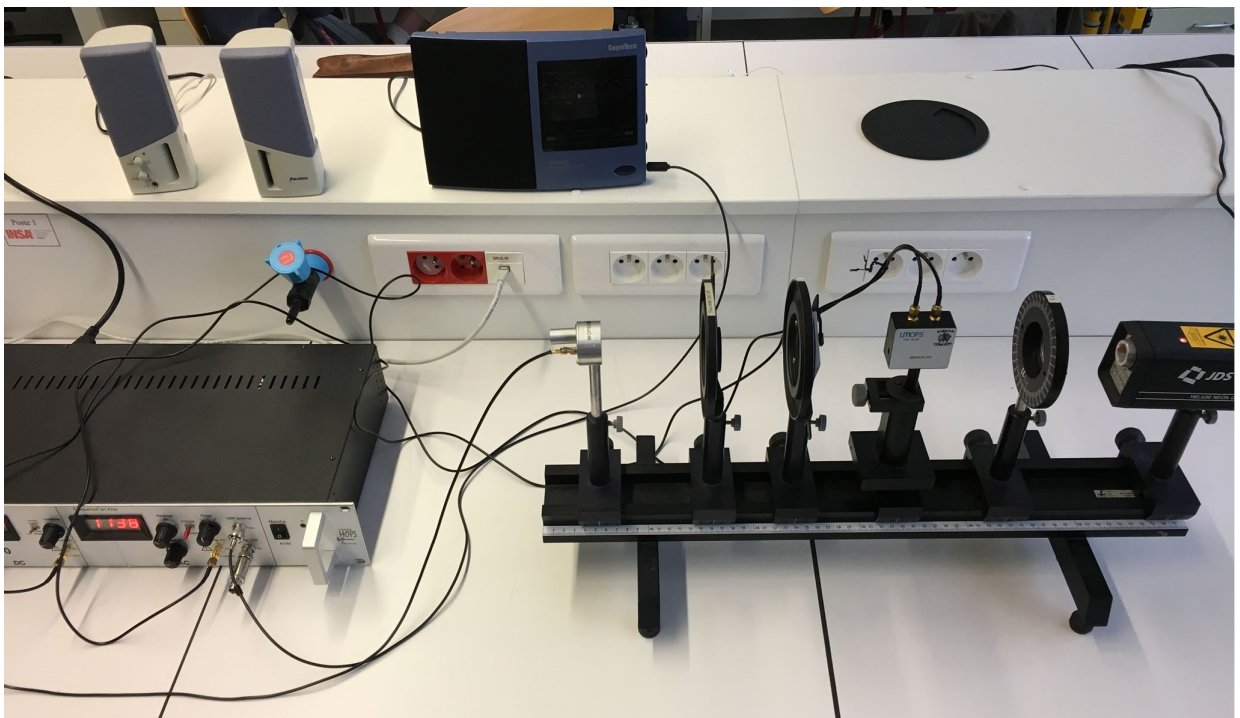


## Transmission d'un signal radio par laser (Effet Pockels)



### Étudiants :

Josselin ALLAIN  
Loïc MARCHAND  
Nicolas PIRONNET

Cyril ANGOULVENT  
Thomas MICHELON  
Alexis QUESNEY

### Enseignant-responsable du projet :

Guillaume LEFEVRE



**Date de remise du rapport :** 18/06/2018

**Référence du projet :** STPI/P6/2018 – n°29

**Intitulé du projet :** Transmission d'un signal radio par laser (Effet Pockels)

**Type de projet :** Expérimental et bibliographique

**Objectifs du projet :**

L'objectif principal de notre projet est d'arriver à transmettre un signal radio par laser à l'aide d'une cellule de Pockels. Cette expérience a pour ambition de nous faire comprendre le comportement d'une onde lumineuse à travers différents instruments d'optique (polariseurs et lames à retard) ainsi que l'effet d'une cellule de Pockels sur cette onde polarisée. Ce projet a également pour buts d'approfondir les notions vues majoritairement en P4.2 et de les utiliser dans nos recherches.

**Mots-clefs du projet :** Montage optique - Onde - Polarisation - Cellule de Pockels

**Remerciements :**

Nous tenons tout d'abord à remercier notre responsable de projet, M. Lefevre qui nous a grandement aidé pour appréhender notre sujet et nous donner les axes d'approfondissement. Nous remercions aussi l'Université de Sciences de Saint-Étienne-du-Rouvray ainsi que l'INSA pour nous avoir prêté le matériel nécessaire à la manipulation. Enfin nous remercions M. Honoré pour la mise à disposition du logiciel EMANIM qui nous a éclairé sur les polarisations des ondes.

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>Méthodologie et organisation du travail</b>	<b>5</b>
<b>Définitions, notations et acronymes</b>	<b>6</b>
<b>1 Polarisation des ondes</b>	<b>8</b>
1.1 Point historique . . . . .	8
1.2 Polarisation optique et formalisme de Jones . . . . .	9
1.2.1 Vecteurs de Jones . . . . .	9
1.2.2 Matrices de Jones . . . . .	9
1.2.3 Détermination de la nouvelle polarisation d'une onde après passage dans un système optique . . . . .	10
1.3 Application du formalisme de Jones à notre projet . . . . .	10
<b>2 Effet Pockels</b>	<b>12</b>
2.1 Cristaux piézo-électriques . . . . .	12
2.2 Biréfringence . . . . .	12
2.3 Cellule de Pockels . . . . .	12
<b>3 Description du protocole et de l'expérience de l'effet Pockels</b>	<b>14</b>
3.1 Protocole . . . . .	14
3.1.1 Liste du matériel pour réaliser l'expérience . . . . .	14
3.1.2 Étude de certains éléments optiques . . . . .	14
3.2 Expérience . . . . .	18
3.2.1 Réalisation du montage . . . . .	18
3.2.2 Mise en évidence expérimentale de l'effet Pockels . . . . .	20
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>22</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>23</b>
<b>A Tableau des vecteurs de Jones associés à chaque polarisation optique</b>	<b>25</b>
<b>B Tableau des matrices de Jones associées à chaque système optique</b>	<b>26</b>
<b>C Fiches techniques des composants</b>	<b>27</b>

# Introduction

Aujourd'hui, une quantité phénoménale d'informations est transmise dans le monde. Toutes ces informations ont besoin d'un moyen rapide et sûr pour être transmises dans de bonnes conditions. Aujourd'hui, le moyen le plus efficace pour transmettre un signal audio ou vidéo reste la lumière. Les caractéristiques de la lumière (longueur d'onde, intensité, tension, fréquence) sont alors utilisées pour transmettre toutes les composantes d'un signal.

L'effet Pockels fait partie des montages ayant cet objectif : transmettre un signal audio à l'aide d'un laser. Notre projet s'inscrit donc dans la modernité. Nous allons ainsi expliquer le fonctionnement de la cellule de Pockels et de chaque composant que nous avons utilisé lors de l'expérience.

Notre projet consistait à trouver un montage avec lequel nous pourrions transmettre un signal radio grâce à l'effet Pockels.

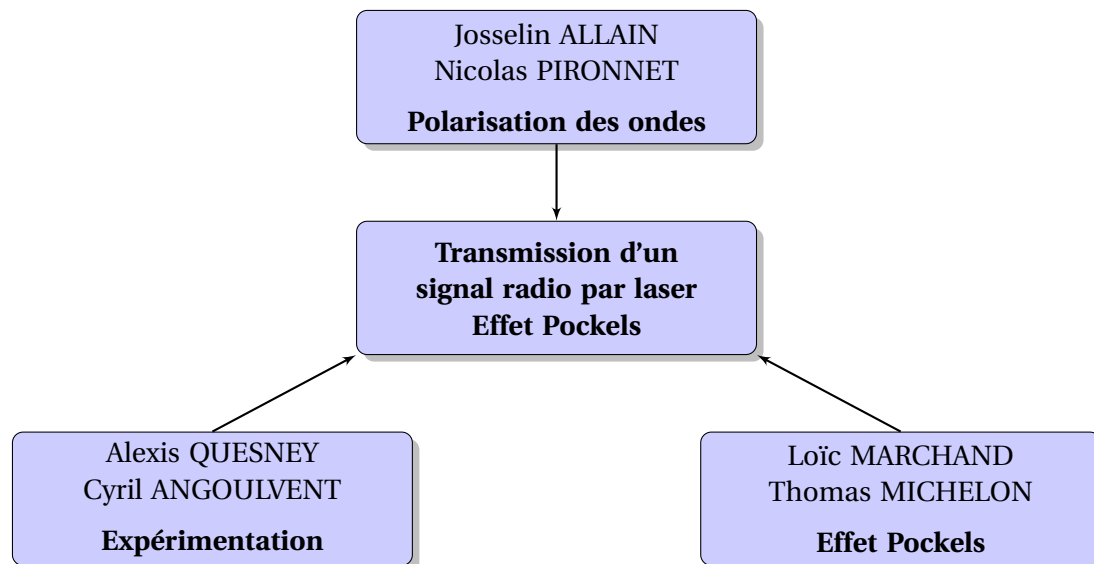
La première partie du projet avait pour objectif de définir l'effet Pockels. Nous avons ensuite déterminé les formules mathématiques qui définissaient la cellule de Pockels et ses effets sur une onde électromagnétique. Enfin, nous avons pu commencer à faire l'expérience de l'effet Pockels afin de mettre en application toute la théorie que nous avons rencontrée lors de nos recherches pour ainsi comparer nos résultats expérimentaux avec les résultats théoriques.

# Méthodologie et organisation du travail

Pour préparer ce projet de P6, nous étions six élèves de STPI-2 et nous avons un créneau réservé le jeudi entre 8h et 9h30 chaque semaine durant ce dernier semestre encadré par M.LEFEVRE.

Lors de la première séance notre professeur nous a présenté notre sujet, ses spécificités, et les grandes lignes qui définissent la cellule de Pockels. Ainsi nous avons pu rapidement obtenir un plan de notre projet que nous avons fait valider par notre encadrant. Après cela, des binômes se sont créés s'occupant chacun d'une partie du sujet en fonction de nos préférences. En effet cela nous a permis de travailler avec plus d'intérêt et donc plus efficacement.

Nous avons donc créé 3 binômes travaillant sur différentes parties de notre projet et nous sommes répartis de la manière suivante :



## Définitions, notations et acronymes

- **Ondes électromagnétiques :** Les ondes électromagnétiques transportent un champ électrique  $E$  et perpendiculaire à ce dernier, un champ magnétique  $B$ . Elles sont capables de se déplacer dans le vide à la vitesse de la lumière et de transporter des informations. On dit qu'elles sont polarisées.

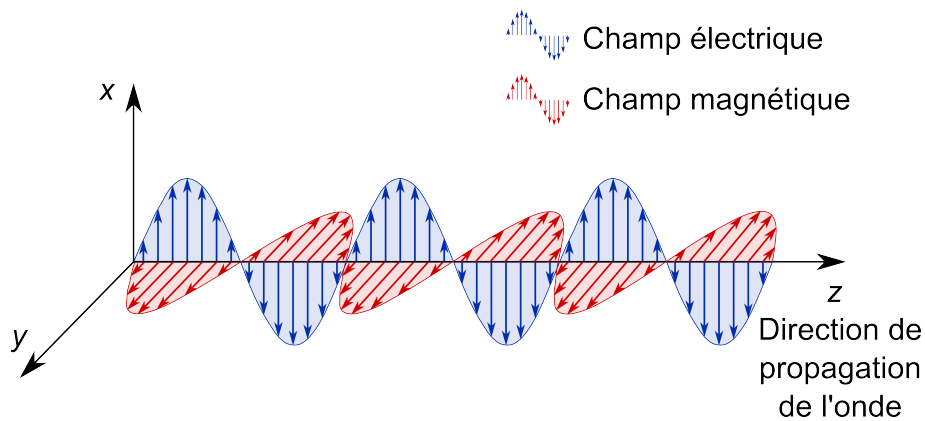


FIGURE 1 – Onde électromagnétique

- **Polarisation :** La polarisation de la lumière est le fait qu'un milieu ne laisse traverser que certaines composantes de l'onde. On dit de plus qu'une onde polarisée linéairement est une onde qui en se propageant garde ses vecteurs des champs électrique et magnétique dans le même plan.

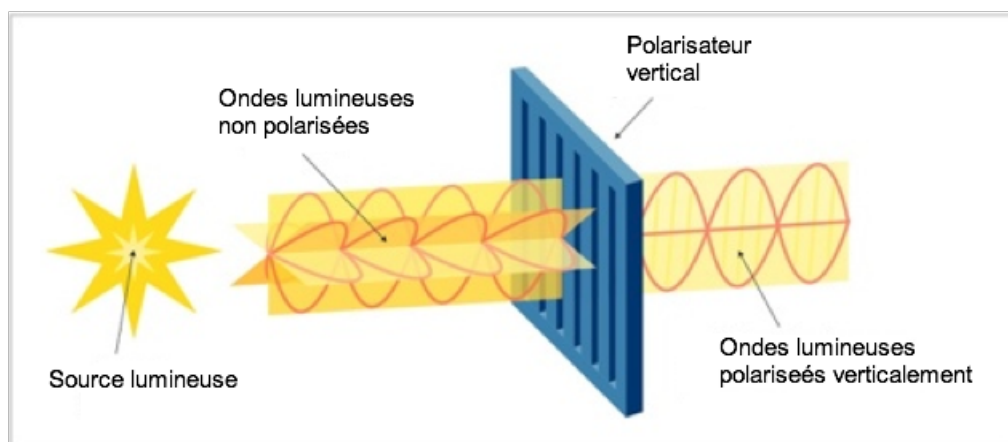


FIGURE 2 – Polarisation d'une onde à travers un polariseur vertical

- **Lame demi-onde :** Une lame demi-onde est un système optique induisant un retard d'une moitié de longueur d'onde et un déphasage de  $180^\circ$ .  
Avec une polarisation d'entrée à  $45^\circ$  par rapport à la verticale, elle permet donc d'obtenir une polarisation croisée.

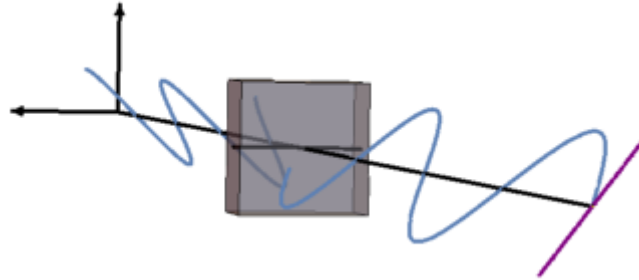


FIGURE 3 – Polarisation d'une onde linéaire entrant à  $45^\circ$  par rapport à la verticale à travers une lame demi-onde

- **Lame quart d'onde :** Une lame quart d'onde est un système optique induisant un déphasage de  $90^\circ$ . Elle permet de transformer une onde rectiligne en une onde circulaire ou elliptique et inversement.

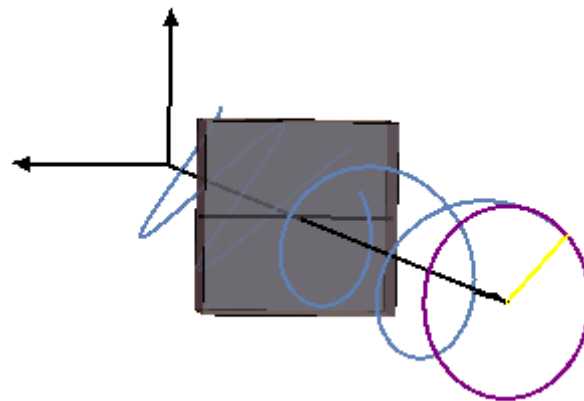


FIGURE 4 – Polarisation d'une onde linéaire entrant à  $45^\circ$  par rapport à la verticale à travers une lame quart d'onde



# Chapitre 1

## Polarisation des ondes

### 1.1 Point historique

L'objectif de cette première partie est de définir les termes importants du projet ainsi que d'en comprendre leur origine scientifique. Nous travaillerons dans un second temps sur les outils mathématiques importants dans la réalisation du projet et de l'expérience de Pockels, principalement la matrice et les vecteurs de Jones. Pour utiliser les résultats de Jones et pour simplifier l'expérience ainsi que son étude, nous utiliserons un laser car c'est une lumière cohérente, soit une lumière monochromatique avec un minimum d'interférences.

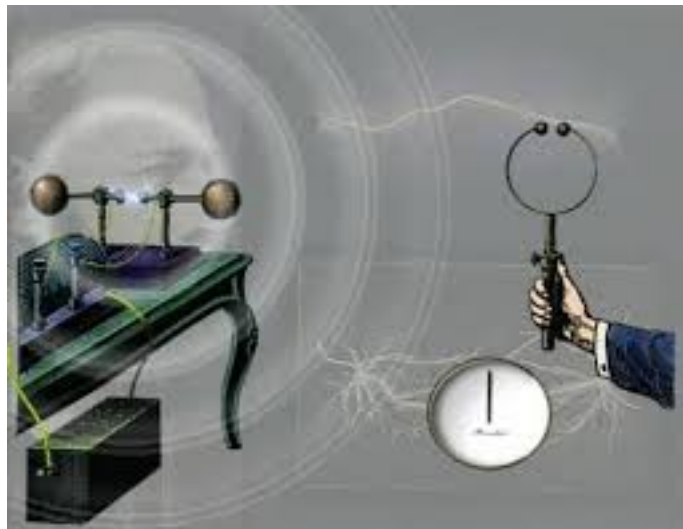


FIGURE 1.1 – Expérience de Ruhmkorff

C'est Hertz qui confirmera l'existence des ondes électromagnétiques en 1888 grâce à une expérience contenant un émetteur et un récepteur. L'émetteur est constitué de deux sphères de cuivre chargées initialement positivement pour l'une et négativement pour l'autre qui, grâce à une bobine de Ruhmkorff, vont changer de charge à plusieurs reprises « comme une oscillation » ou « un diapason électrique » dont Maxwell calculera la fréquence ( $\approx 10^8$  périodes par seconde). Le récepteur est un résonateur circulaire constitué de deux boules de laiton. Lorsque l'émetteur est mis en marche, des étincelles se produisent entre les boules de laiton (visibles à 25 mètres) même en mettant le récepteur derrière une paroi.

La polarisation est un phénomène qui est au centre de notre projet car c'est ce que l'on va étudier à travers l'expérience de Pockels. De nombreux scientifiques ont travaillé dessus à partir de la seconde moitié du XVII<sup>ème</sup> siècle avec notamment la découverte de la biréfringence par Rasmus Bartholin grâce à un Spath d'Islande. La biréfringence a ensuite fait l'objet de beaucoup d'expériences prouvant notamment que l'orientation du prisme changeait l'intensité de la lumière (Malus et Huygens). L'effet Pockels sera lui découvert en 1893 par Friedrich Carl Alwin Pockels.

## 1.2 Polarisation optique et formalisme de Jones

Une onde électromagnétique plane et monochromatique peut être définie par le vecteur :

$$\begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x^0 \cdot e^{i(-\omega t + \phi_x)} \\ E_y^0 \cdot e^{i(-\omega t + \phi_y)} \end{bmatrix}$$

Avec :

- $E_x(t)$  et  $E_y(t)$  les composantes du champ électrique selon  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$
- $E_x^0$  et  $E_y^0$  les amplitudes selon les axes  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$
- $\omega$  la pulsation
- $\phi_x$  et  $\phi_y$  les phases à l'origine

En posant :  $\begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix} = E^0 \cdot e^{i(-\omega t + \phi_x)} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}$ , on voit apparaître le vecteur de Jones :  $\vec{V} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}$

### 1.2.1 Vecteurs de Jones

Dans le formalisme de Jones, chaque polarisation peut s'écrire sous la forme d'un vecteur de Jones de la forme :  $\vec{V} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}$

Avec :  $\begin{cases} V_x \text{ un nombre réel} \\ V_y \text{ un nombre complexe} \end{cases}$  et  $\|\vec{V}\| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = 1$

Par exemple, une polarisation rectiligne selon l'axe  $\vec{x}$  s'écrira :  $\vec{V} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ,

tandis qu'une polarisation circulaire gauche s'écrira :  $\vec{V} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$

La liste des vecteurs de Jones pour tout type de système optique est disponible dans l'annexe A (page 25).

### 1.2.2 Matrices de Jones

De même que le formalisme de Jones permet d'associer une certaine polarisation à un vecteur de Jones, on associe une matrice de Jones à chaque système optique (polariseur, lames à retard...).

Ainsi, la matrice de Jones associée à un polariseur incliné d'un angle  $\varphi$  sera :

$$M(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos^2(\varphi) & \cos(\varphi)\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi)\sin(\varphi) & \sin^2(\varphi) \end{bmatrix}$$

Pour une lame demi-onde :  $M(\varphi) = \begin{bmatrix} -i & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$

Pour une lame quart d'onde :  $M(\varphi) = e^{-\frac{i\pi}{4}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$

La liste des matrices de Jones pour tout type de système optique est disponible dans l'annexe B (page 26).

### 1.2.3 Détermination de la nouvelle polarisation d'une onde après passage dans un système optique

L'intérêt principal des vecteurs et des matrices de Jones est que l'on peut facilement obtenir une polarisation à la sortie d'un système optique en connaissant uniquement la polarisation de l'onde à l'entrée et la nature du système.

Pour cela, il suffit de faire le produit entre la matrice de Jones associée au système optique et le vecteur de Jones associé à la polarisation en entrée de système.

Soit  $\vec{V}'$  la polarisation en sortie de système, on a :

$$\vec{V}' = M(\varphi) \cdot \vec{V}$$

## 1.3 Application du formalisme de Jones à notre projet

La lumière émise par le laser étant polarisée rectilignement, nous plaçons une lame demi-onde comme premier système optique du montage afin que la lumière entre dans la cellule de Pockels avec un angle d'inclinaison de  $45^\circ$ .

Le vecteur de Jones à la sortie de la lame demi-onde est donc :  $\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$

Ensuite, le faisceau lumineux traverse la cellule de Pockels. La matrice de Jones associée à une cellule de Pockels dont les axes sont inclinés de  $45^\circ$  par rapport au plan d'incidence est :

$$M_{CP} = e^{i\phi} \cdot \begin{bmatrix} e^{-i\frac{\pi V}{V\pi}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi V}{V\pi}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{array}{l} \phi = \frac{\pi \cdot L}{\lambda} \cdot (n_l + n_r) \pmod{2\pi} \\ L \text{ (la longueur de la cellule de Pockels)} = 40 \text{ mm} \\ \lambda \text{ (la longueur d'onde du laser)} = 633 \text{ nm} \\ n_l \text{ (l'indice de réfraction de l'axe lent)} = 2.285 \\ n_r \text{ (l'indice de réfraction de l'axe rapide)} = 2.2 \text{ pm/V} \\ V \text{ la tension appliquée à la cellule de Pockels} \\ V_\pi \text{ (tension à laquelle la cellule de Pockels se comporte comme une lame demi-onde } (\phi = \pi) \\ \approx 310 \text{ V} \end{array}$$

En sortie de la cellule de Pockels, le vecteur de Jones peut donc être écrit :

$$\vec{J} = M_{CP} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Le vecteur de Jones en sortie de lame quart d'onde s'écrit donc :

$$\vec{J}_{final} = e^{-\frac{i\pi}{4}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1+i & 1-i \\ 1-i & 1+i \end{pmatrix} \cdot \vec{J}$$

Le vecteur de Jones final dépend donc du vecteur  $\vec{J}$  qui, lui, dépend de la tension  $V$  entrante aux bornes de la cellule de Pockels.

Nous allons maintenant essayer de comprendre le fonctionnement précis d'une cellule de Pockels afin d'étudier son effet plus en détails.

# Chapitre 2

## Effet Pockels

### 2.1 Cristaux piézo-électriques

La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Les deux effets sont indissociables.

Le premier est appelé effet piézoélectrique direct; le second effet piézoélectrique inverse. Cette propriété trouve un très grand nombre d'applications dans l'industrie et la vie quotidienne. Une application parmi les plus familières est l'allume-gaz. Dans un allume-gaz, la pression exercée produit une tension électrique qui se décharge brutalement sous forme d'étincelles : c'est une application de l'effet direct.

De manière plus générale, l'effet direct peut être mis à profit dans la réalisation de capteurs (capteur de pression...) tandis que l'effet inverse permet de réaliser des actionneurs de précision (injecteurs à commande piézoélectrique en automobile, nano-manipulateur...).

### 2.2 Biréfringence

La biréfringence est un phénomène en milieu anisotrope. Un matériau anisotrope est un milieu qui possède des propriétés différentes selon la direction. La biréfringence est une de ces propriétés de la matière, c'est un cas particulier des propriétés anisotropes. Les milieux biréfringents ont un double indice de réfraction : c'est à dire qu'un rayon lumineux qui pénètre dans le milieu biréfringent sera séparé en deux rayons l'un ordinaire (o) et l'autre extraordinaire (e). Il existe une situation où la lumière qui traverse le milieu n'est pas déformée, c'est lorsqu'elle passe dans le plan d'un ou des axe(s) optique(s).

### 2.3 Cellule de Pockels

Une cellule de Pockels est une cellule composée d'un cristal électro-optique dont la biréfringence peut être contrôlée lorsqu'une tension est appliquée. Le fait de soumettre un cristal électro-optique à un champ électrique par application d'une tension aux bornes du

crystal est appelé biréfringence provoquée. La contrainte électrique appliquée ici permet un contrôle de l'anisotropie du cristal.

La biréfringence est proportionnelle au champ électrique appliqué contrairement à l'effet Kerr qui est proportionnel au carré du champ électrique appliqué.

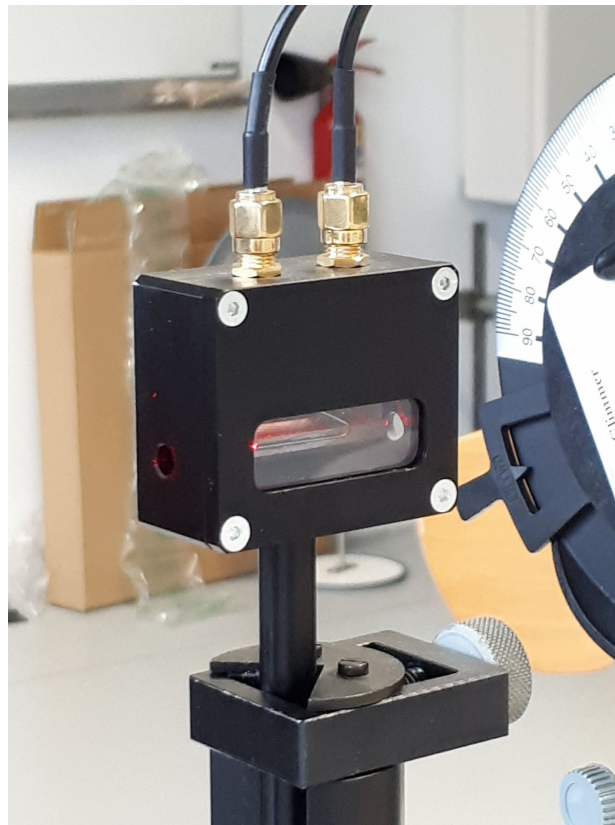


FIGURE 2.1 – Photo de la cellule de Pockels utilisée lors de l'expérience

## Chapitre 3

# Description du protocole et de l'expérience de l'effet Pockels

### 3.1 Protocole

#### 3.1.1 Liste du matériel pour réaliser l'expérience

- Un banc optique et différents supports
- Une radio et ses enceintes
- Un oscilloscope
- Câbles d'alimentation et de branchements
- Laser rouge (cf fiche technique dans l'annexe C.1 (page 27))
- Une cellule de Pockels (cf fiche technique dans l'annexe C.2 (page 28))
- Une photodiode
- Une lame demi-onde
- Une lame quart d'onde
- Deux polariseurs dont un seul utilisé pour l'expérience finale

#### 3.1.2 Étude de certains éléments optiques

##### Vérification de la polarisation rectiligne du laser

La première manipulation va consister en la vérification de la polarisation du laser. On considère celui-ci comme polarisé rectilignement selon la direction  $\vec{U}_z$  (axe vertical). On fait ainsi tourner le polariseur afin d'obtenir le maximum d'intensité reçu par la photodiode. On fixera l'angle d'intensité transmise maximale, celui-ci restera constant durant toute la manipulation.

On trouve, pour notre laser, un angle de transmission maximale qui correspond à l'orientation de l'axe d'émission du laser.

##### Loi de Malus

Cette première étape consiste en une vérification expérimentale de la loi de Malus, loi reliant l'intensité lumineuse transmise en fonction de l'angle entre les deux polariseurs.

On monte un polariseur seul entre le laser et la photodiode reliée à l'oscilloscope . Ce polariseur évite une saturation de cette dernière. Ici, l'objectif est de déterminer une valeur maximale de l'intensité du laser. Cette valeur correspondra au  $I_0$  et l'angle de polarisation associé servira de référence : l'orientation de son axe. Ensuite, le second polariseur est placé à la sortie du laser. On varie l'angle de ce polariseur entre  $\theta = -180^\circ$  et  $\theta = 180^\circ$ . On relève ainsi pour chaque angle la valeur de l'intensité transmise.

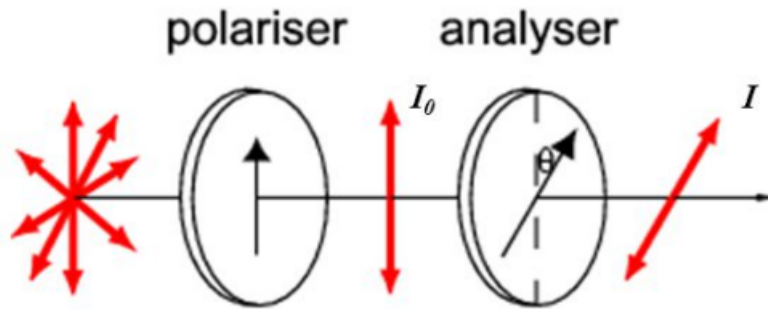
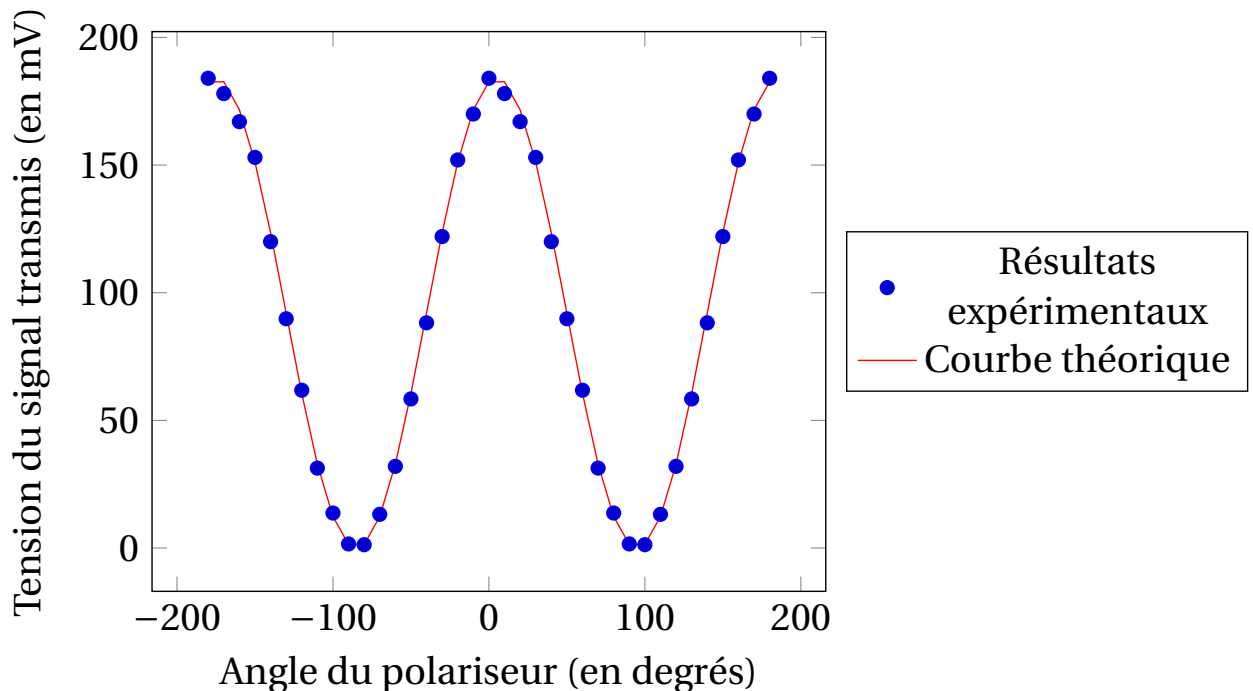


FIGURE 3.1 – Montage théorique pour vérifier la loi de Malus

Théoriquement l'intensité de la lumière transmise est donnée par la loi de Malus :

$$I = I_0 \cdot \cos^2(\theta)$$

En relevant précisément les mesures de l'angle de l'analyseur (avec un pas de  $10^\circ$ ) et de son intensité associée, nous pouvons tracer le graphique ci-dessous combinant nos valeurs avec la courbe théorique de la loi de Malus :



**Loi de Malus**



En prenant la valeur de  $I_0$  égale au  $I_{max}$  expérimental, on remarque que les courbes théoriques et expérimentales présentent la même allure :

- maximum/minimum pour les mêmes valeurs d'angle
- allure sinusoïdale
- amplitude des deux signaux similaires

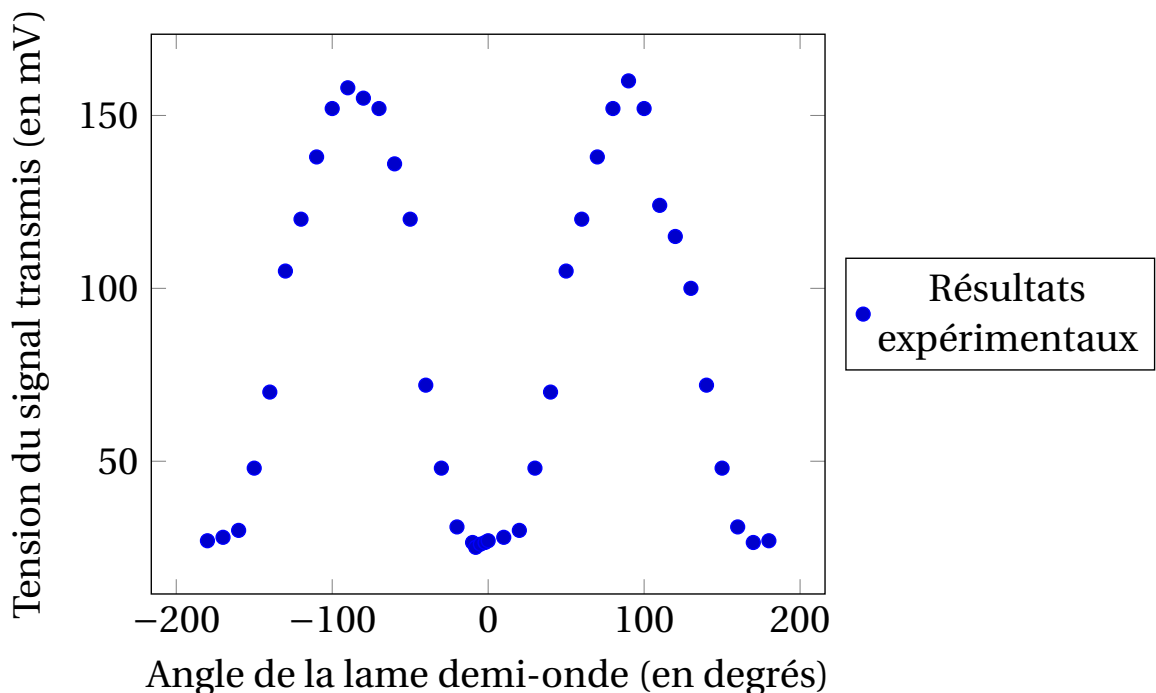
L'intensité reçue expérimentalement est sensiblement la même que la théorique. On peut donc confirmer le modèle de la loi de Malus.

### Détermination de l'axe de la lame demi-onde et quart d'onde

Pour être sûr que les polarisations soient correctes, il est essentiel que les angles de polarisation soient vérifiés. Il est donc nécessaire de déterminer les axes de la lame demi-onde et la lame quart d'onde.

Commençons par la demi-onde :

On place d'abord notre lame demi-onde, suivie de l'analyseur réglé avec l'orientation de son axe à la verticale. L'objectif étant de relever l'angle de la lame demi-onde pour lequel la tension est minimale aux bornes de la photodiode. Pour se faire on a fait varier l'angle de la lame demi onde entre  $-180^\circ$  et  $180^\circ$ . Ainsi lorsque la tension est minimale la lame et l'analyseur ont leurs axes de polarisation croisés et on obtient ainsi l'orientation son axe principal.



### Détermination de l'axe de notre lame demi-onde

Après analyse des résultats nous remarquons que la valeur minimale de tension se trouve entre  $-10^\circ$  et  $0^\circ$ . Nous avons donc augmenté le nombre de relevés dans cette zone. On obtient alors la valeur précise de l'orientation de l'axe de la lame qui est  $-8^\circ$ .

En représentant le diagramme dans une forme circulaire, on obtient le diagramme suivant, plus représentatif de la fonction de la lame demi-onde :

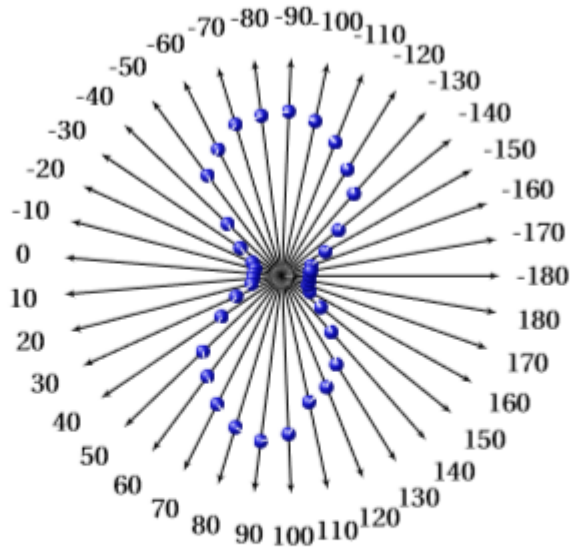
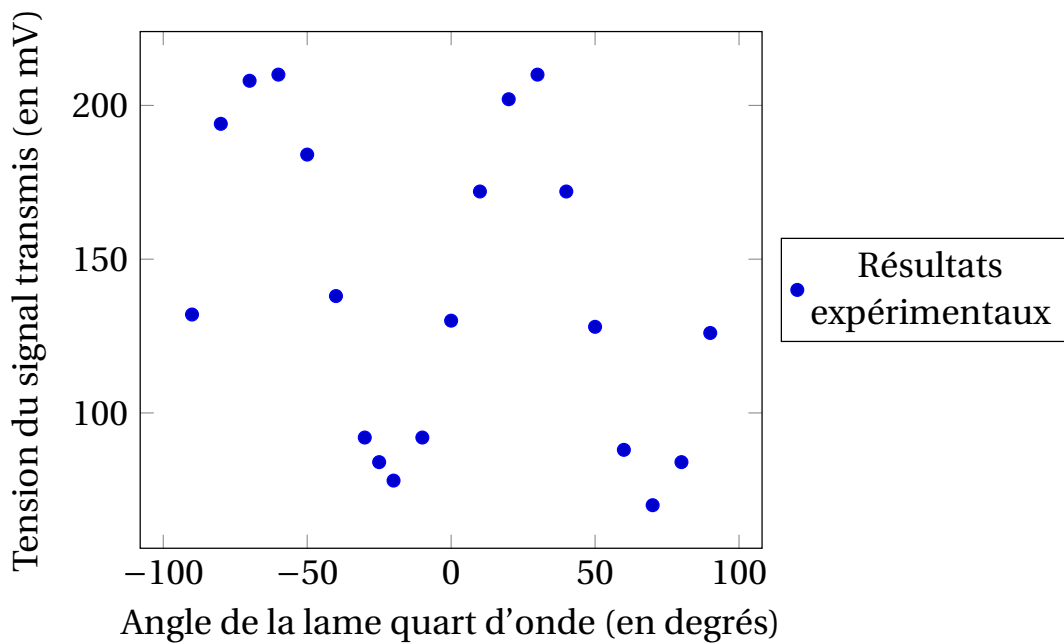


Figure 1: Diagramme circulaire d'une lame demi-onde représentant la tension de sortie en fonction de l'angle de la lame demi-onde  
 Angle circulaire = Angle de la lame par rapport à son axe en degrés  
 Distance à l'origine = Augmentation de la tension en mV

On passe ensuite à la lame quart d'onde. Le protocole reste le même que pour la lame demi onde. On obtient les résultats expérimentaux suivants :



**Détermination de l'axe de notre lame quart d'onde**

Comme nous pouvons le voir sur le graphique, l'axe de la lame quart d'onde que nous avons utilisé se situe vers  $-20^\circ$  par rapport à la verticale.

Pour la suite de nos expériences, nous utiliserons donc ces valeurs de référence comme direction de l'axe et non pas les "zéro" indiqués sur les polariseurs et lames à retard.

## 3.2 Expérience

### 3.2.1 Réalisation du montage

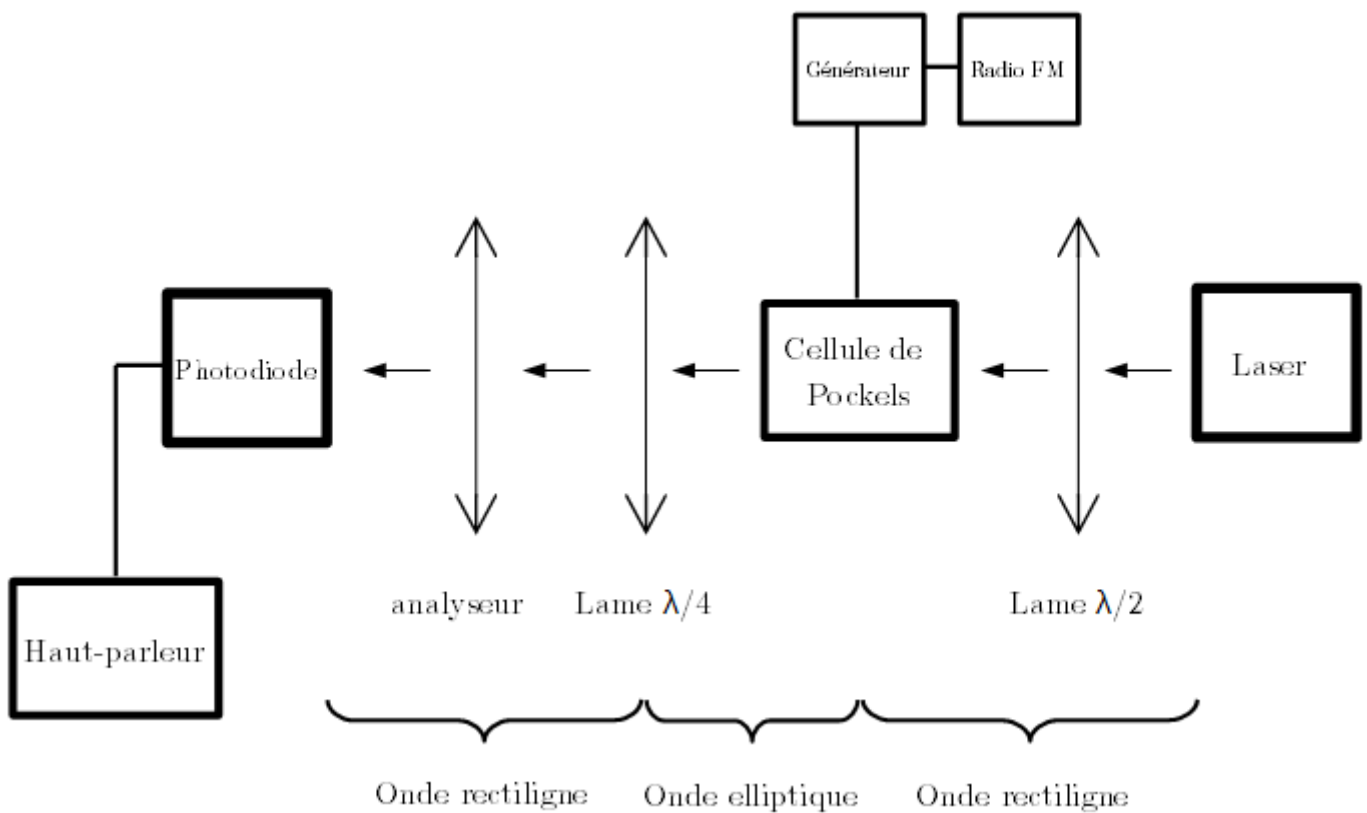


FIGURE 3.2 – Schéma représentant le montage à réaliser pour l'expérience

#### Suivi de la polarisation et analyse

Lors de cette expérience, l'onde lumineuse émise par le laser traverse plusieurs éléments optiques modifiant sa polarisation. On considère que cette onde est bien polarisée rectilignement.

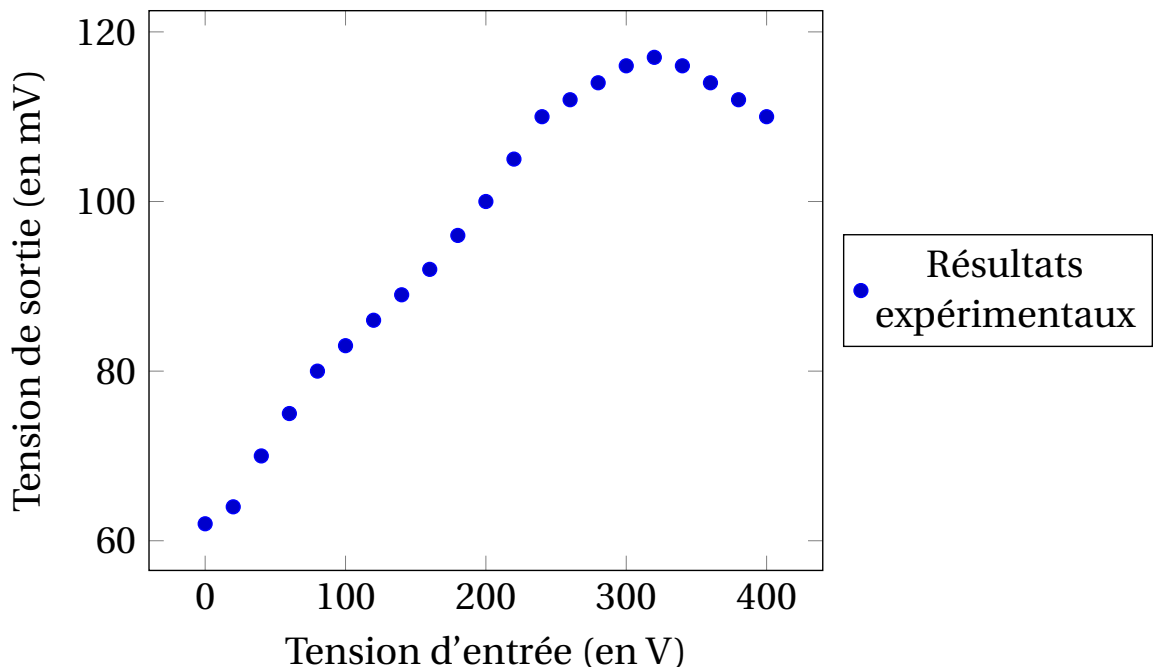
La lame demi-onde a pour objectif de polariser l'onde à  $45^\circ$ . Cela permet à l'onde de posséder une composante pour chacun des deux axes de la cellule de Pockels. A la sortie de cette cellule, l'onde a une polarisation circulaire ou elliptique.

La lame quart d'onde permet ensuite de la transformer en onde rectiligne.

Finalement, l'analyseur permet d'isoler une partie de cette onde polarisée. L'onde ayant sans cesse une orientation différente grâce à la modulation effectuée par la radio, la composante reçue par la photodiode change donc également en permanence.

Cette modulation induit des variations de la tension au niveau de la photodiode qui les retranscrit alors en modulation de la fréquence au niveau des enceintes.

Pour pouvoir observer l'utilité de la cellule de Pockels au sein de notre dispositif, nous avons branché un oscilloscope à la photodiode de sortie. En modulant la tension d'entrée (comme le fait la radio) avec un générateur de tension, nous avons relevé la tension de sortie en ne faisant varier aucun autre paramètre. Nous pouvons voir l'évolution de la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée sur le graphique ci-dessous :



### Evolution de la tension en sortie de la photodiode en fonction de la tension d'entrée imposée

Comme dans la théorie, nous pouvons remarquer l'apparition d'un maximum d'amplitude à environ 310 mV. Cette tension est appelée tension  $V_{\pi}$  et représente la tension à laquelle la cellule de Pockels se comporte comme une lame demi-onde.

Il est logique que cette tension  $V_{\pi}$  soit le maximum de notre courbe. En effet, quand la cellule de Pockels se comporte comme une lame demi-onde, les deux lames demi-onde consécutives permettent à l'onde d'arriver exactement dans l'axe de la lame quart d'onde placée à  $90^{\circ}$  de la demi-onde. L'intensité est donc maximale dans ce cas puisque l'onde est transmise en intégralité.

De plus, sur la fiche technique de la cellule, nous pouvons voir que la tension  $V_{\pi}$  théorique

est égale à 310 mV, notre expérience est donc en accord avec la théorie.

### 3.2.2 Mise en évidence expérimentale de l'effet Pockels

Après avoir mis en place le dispositif expérimental et trouvé les orientations des axes de chaque système optique, nous avons donc réalisé l'expérience finale sur l'effet Pockels.

#### Quelques précautions à prendre pour le bon déroulement de l'expérience

- La lame demi-onde doit faire un angle de  $45^\circ$  par rapport au laser.
- L'analyseur doit être incliné à  $90^\circ$  par rapport à la lame demi-onde
- Il est important de vérifier l'alignement de tous les éléments en évitant au maximum les pertes pour une transmission optimale
- La tension aux bornes de la cellule (avant d'être modulée par la radio) est fixée à  $V_\pi=310V$

#### Expérience de la transmission d'un signal radio par effet Pockels

Lors des premières séances, nous avons eu du mal à bien aligner tout le système afin qu'une partie de l'onde émise soit reçue par la photodiode, notamment à cause de la détermination des axes de nos systèmes optiques. En effet, nous prenions comme référence les "zéros" inscrits sur le polariseur et les lames à retard ce qui avait pour conséquence d'éteindre en partie le signal ainsi que de ne pas donner le résultat attendu.

Une fois ces problèmes résolus, nous avons réussi à obtenir la transmission d'une onde radio à travers un laser. En effet, nous pouvions entendre la radio au travers des enceintes et dès que nous mettions notre main devant le laser, le signal audio s'arrêtait : preuve que c'était bien le laser qui transmettait le signal.

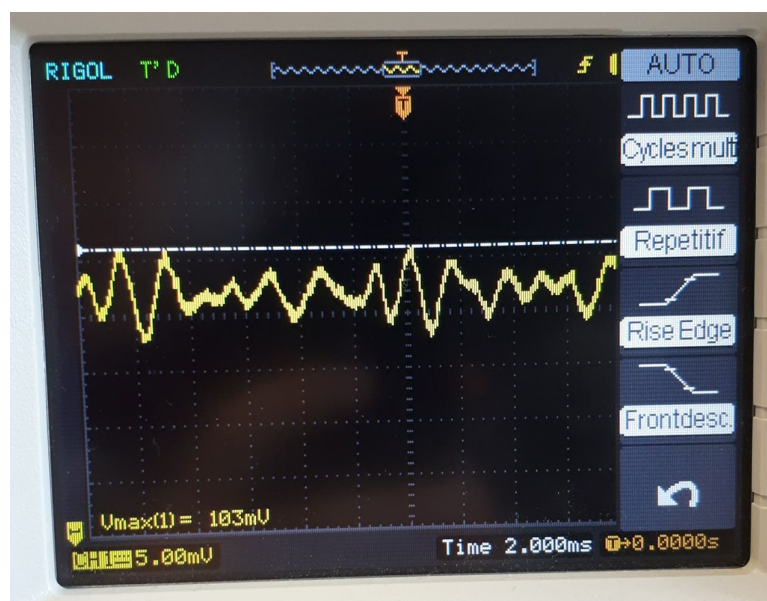


FIGURE 3.3 – Signal obtenu à l'aide d'un oscilloscope en sortie de photodiode

Comme nous pouvons le voir sur la photo ci-dessus, la tension en sortie de photodiode est bien modulée.

Nous avons ensuite essayé de transmettre de la musique depuis nos téléphones avec la même méthode en nous disant que le fonctionnement restait le même. En effet, le fonctionnement est le même car notre signal est transmis. Toutefois, l'intensité du signal sonore est beaucoup plus faible dû au fait que les intensités initiales sont grandement différentes.

## Conclusion et perspectives

Notre projet nous a donc bien permis de vérifier le fonctionnement de l'effet Pockels. En effet, nous sommes parvenus à transmettre un signal radio par modulation électro-optique. On a pu constater que la manipulation n'était pas compliquée à mettre en place si l'on dispose du matériel nécessaire et que l'on dispose des informations concernant les éléments optiques. Grâce à cette expérience nous avons pu illustrer la théorie que nous avons exposé en première partie notamment le formalisme de Jones. Enfin cette méthode de transmission s'est révélée fiable car nous n'avons pas constaté d'interférence au niveau du son.

Cependant, la méthode de transmission présente des limites, le signal est transmis dans l'air et donc facilement perturbable par un obstacle. C'est pourquoi il n'est pas utilisé en télécommunication, on privilégie la fibre optique. Ce n'est pas l'effet Pockels qui intervient dans cette méthode mais l'effet Kerr. L'utilisation de la fibre optique permet une protection du signal grâce à une transmission dans du verre. Ainsi l'étude de la fibre optique serait une bonne perspective pour approfondir notre sujet.

Nous avons été confrontés à la réalité d'un projet scientifique en groupe. Cependant, grâce à une communication et une répartition réfléchie des tâches nous avons pu mener ce projet à bien. Nous avons appris le fonctionnement de nouveaux instruments expérimentaux. De plus, nous avons pu apprendre des notions d'optique qui ne nous étaient pas familières. Finalement, nous avons pu enrichir notre culture scientifique ce qui nous permettra à l'avenir de mieux comprendre la transmission des signaux par la lumière, technologie qui tend à se démocratiser dans le futur.

# Bibliographie

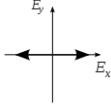
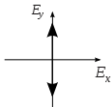
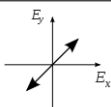
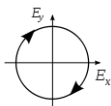
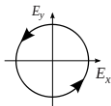
- [1] HISTOIRE DE SCIENCES : HERTZ ET LA DÉCOUVERTE DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES, <http://histoires-de-sciences.over-blog.fr/2014/02/hertz-et-la-d%C3%A9couverte-des-ondes-%C3%A9lectromagn%C3%A9tiques.html>, (Valide à la date du 19/04/2018)
  
- [2] FRANCE TV EDUCATION : DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES À L'INVENTION DE LA TSF (TRANSMISSION PAR RADIO), <https://education.francetv.fr/matiere/physique-chimie/terminale/video/des-ondes-electromagnetiques-a-l-invention-de-la-tsf>, (Valide à la date du 19/04/2018)
  
- [3] ACADÉMIE-SCIENCES : MAXWELL, HERTZ ET L'ÉLECTROMAGNÉTISME, [http://www.academie-sciences.fr/archivage\\_site/activite/hds/textes/evol\\_Sanchez1.pdf](http://www.academie-sciences.fr/archivage_site/activite/hds/textes/evol_Sanchez1.pdf), (Valide à la date du 17/05/2018)
  
- [4] SESPESEP.PRO : LA DÉCOUVERTE ET L'ÉTUDE DE LA POLARISATION, [http://sesp.esep.pro/fr/pages\\_polarisation/histoire.html](http://sesp.esep.pro/fr/pages_polarisation/histoire.html), (Valide à la date du 19/04/2018)
  
- [5] WIKIUNIVERSITÉ : LA LUMIÈRE, UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE, [https://fr.wikiversity.org/wiki/Notions\\_de\\_base\\_d%27optique\\_ondulatoire/La\\_lumi%C3%A8re,\\_une\\_onde\\_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique](https://fr.wikiversity.org/wiki/Notions_de_base_d%27optique_ondulatoire/La_lumi%C3%A8re,_une_onde_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique), (Valide à la date du 19/04/2018)
  
- [6] WORLDPRESS : POLARISATION DE LA LUMIÈRE, <https://sites.google.com/site/ls3tpe3d/procedes-stereoscopiques/polarisation>, (Valide à la date du 17/05/2018)
  
- [7] GUILLAUME'S BLOG : POLARISATION CIRCULAIRE, <http://blog.guillaume-loubet.fr/polarisation-circulaire-et-cinema-3d>, (Valide à la date du 19/04/2018)
  
- [8] WIKIPÉDIA : FORMALISME DE JONES, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Formalisme\\_de\\_Jones](https://fr.wikipedia.org/wiki/Formalisme_de_Jones), (Valide à la date du 19/04/2018)



- [9] WIKIPÉDIA : PIÉZO-ÉLECTRICITÉ, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%A9zo%C3%A9lectrit%C3%A9>, (Valide à la date du 19/04/2018)
- [10] LASER COMPONENTS, <https://www.lasercomponents.com/fr/produit/cellules-de-pockelsmodulateurs/>, (Valide à la date du 17/05/2018)
- [11] Rapport du projet d'optique réalisé par Vianney LATOUR, Jean-Yves MIGEON et Timothée THEVENEUX-PELZER, "L'Effet Pockels", Université Pierre et Marie Curie L3-PC, Mai-Juin 2006
- [12] ENS CACHAN, [http://www.physique.ens-cachan.fr/laboratoire/materiel/fichiers/MEO\\_LN310.pdf/](http://www.physique.ens-cachan.fr/laboratoire/materiel/fichiers/MEO_LN310.pdf/), (Valide à la date du 31/05/2018)
- [13] PARIS TECH INSTITUT OPTIQUE, <http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=264&fileid=13515>, (Valide à la date du 31/05/2018)
- [14] Bruno BOULBRY, "Mise en place d'un polarimètre de Mueller achromatique dans le domaine du visible en régime laser impulsionnel", U.E.R. Sciences et Techniques de Brest, 2002
- [15] Frédéric ESTABLE, "Amplification régénérative et multipassage d'impulsions lumineuses dans des milieux solides", Université de Paris-Sud Orsay, 1992
- [16] TP D'OPTIQUE : STI LYCÉE MERMOZ, [http://sti.mermoz.free.fr/Phy/Opt\\_Phys/TP\\_Phys/TS2/13\\_Pockels.pdf](http://sti.mermoz.free.fr/Phy/Opt_Phys/TP_Phys/TS2/13_Pockels.pdf), (Valide à la date du 07/06/2018)
- [17] DIDA CONCEPT : TRAVAUX PRATIQUES : EFFET POCKELS ET MODULATION ÉLECTRO-OPTIQUE, [http://www.didaconcept.com/documentation/tp/fiches\\_tp/Plaque\\_d\begingroup\let\relax\relax\endgroup\[Pleaseinsert\PrerenderUnicode{\u00A9}intopreamble\]\u00A9taille\\_TPEO.pdf](http://www.didaconcept.com/documentation/tp/fiches_tp/Plaque_d\begingroup\let\relax\relax\endgroup[Pleaseinsert\PrerenderUnicode{\u00A9}intopreamble]\u00A9taille_TPEO.pdf), (Valide à la date du 07/06/2018)
- [18] 3BSCIENTIFIC : EFFET POCKELS, [https://www.3bscientific.fr/PhysicsExperiments/UE4040500\\_FR.pdf](https://www.3bscientific.fr/PhysicsExperiments/UE4040500_FR.pdf), (Valide à la date du 07/06/2018)

## Annexe A

### Tableau des vecteurs de Jones associés à chaque polarisation optique

Polarisation	Vecteur de Jones	Représentation
Rectiligne selon l'axe x	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	
Rectiligne selon l'axe y	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	
Rectiligne selon un axe à 45° par rapport à l'axe x	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$	
Circulaire droite	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$	
Circulaire gauche	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$	

## Annexe B

### Tableau des matrices de Jones associées à chaque système optique

Système optique	Matrice de Jones
Polariseur avec axe horizontal	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
Polariseur avec axe vertical	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
Polariseur avec axe incliné à $\pm 45^\circ$	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \pm 1 \\ \pm 1 & 1 \end{pmatrix}$
Polariseur incliné d'un angle $\varphi$	$\begin{pmatrix} \cos^2(\varphi) & \cos(\varphi) \sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \sin(\varphi) & \sin^2(\varphi) \end{pmatrix}$
Polariseur circulaire droite	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{pmatrix}$
Polariseur circulaire gauche	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{pmatrix}$
Lame demi-onde avec l'axe rapide horizontal	$\begin{pmatrix} -i & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$
Lame quart d'onde avec axe rapide horizontal	$e^{-\frac{i\pi}{4}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$

## Annexe C

# Fiches techniques des composants

### Self-Contained Helium-Neon Laser Systems 1500 Series



#### Specifications

Parameter	1507P
-----------	-------

#### Optical

Minimum output power (TEM <sub>00</sub> )	0.8
Wavelength	632.8
Beam diameter (1/e <sup>2</sup> points, ±3%, TEM <sub>00</sub> )	0.48
Beam divergence (±3%, TEM <sub>00</sub> )	1.7
Polarization ratio (minimum)	500:1
Longitudinal mode spacing (nominal)	1090
Maximum noise (rms, 30 Hz to 10 MHz)	1.0
Maximum drift (mean power measured over 8 hours)	±2.5
Maximum mode sweep contribution	10
Maximum warm-up time (minutes to 95% power)	10
CDRH class	IIIa

#### Electrical

AC adaptor operating current	
at 100 V AC	150
at 120 V AC	150
at 220 V AC	82

FIGURE C.1 – Fiche technique du laser utilisé

## MODULATEUR ELECTRO-OPTIQUE (CELLULE DE POCKELS)

### Principales caractéristiques :

Cristal :	LiNbO <sub>3</sub> congruent
Configuration :	Transverse
Propagation :	suivant Z (axe optique)
Direction du champ électrique :	suivant Y
Dimension :	X,Y = 3 mm / Z = 40 mm
Coefficient électro-optique :	$r_{22} = 6.4 \text{ pm/V @633 nm}$
Tension demi-onde :	$V_{\pi} = 310 \text{ pm/V @633 nm}$
Indice de réfraction :	$n_0 = 2.285, n_e = 2.2 @633 \text{ nm}$
Electrodes :	Or (épaisseur 100 nm)
Connecteur :	SMA



FIGURE C.2 – Fiche technique de notre cellule de Pockels