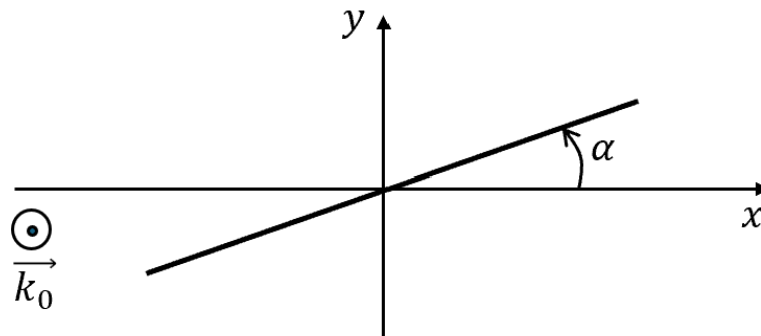


## I Préambule théorique : action des lames cristallines demi-onde et quart d'onde

### I.1 Lames cristallines à retard

Dans ce TP, on étudie l'action de deux types de lames cristallines, dites lames à retard, sur la polarisation d'une onde électromagnétique plane progressive harmonique (OPPH).

Considérons dans un premier temps le cas particulier d'une polarisation rectiligne d'axe faisant un angle  $\alpha$  avec  $(Ox)$  et se propageant selon  $+\vec{e}_z$  dans le vide. L'amplitude du champ électrique est notée  $E_0$ .



Le champ électrique réel s'écrit alors :

$$\vec{E} = E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \vec{e}_x + E_0 \sin(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \vec{e}_y$$

★

avec  $k_0 = \frac{\omega}{c}$  le vecteur d'onde dans le vide. La longueur d'onde dans le vide vaut alors  $\lambda_0 = \frac{2\pi}{k_0}$ .

Une lame cristalline est taillée dans un cristal, qui possède une organisation spatiale régulière de ses constituants microscopiques (contrairement au verre). Cela a pour effet de rendre la lame anisotrope : toutes les directions de l'espace ne sont pas équivalentes. On repère alors deux directions particulières de la lame cristallines : les lignes neutres de la lame.

Lorsque le champ électrique incident arrive sur la lame, il est décomposé sur chacune des directions des lignes neutres. Il se propage alors dans la lame et, à la sortie de la lame, les deux composantes ont été déphasées entre elles. Le déphasage dépend des caractéristiques de la lame (matériau et épaisseur de la lame). On utilise couramment deux types de lames cristallines :

- les lames demi-onde, pour lesquelles la différence de marche introduite entre les deux composantes du champ électrique lors de la traversée de la lame vaut  $\delta = \frac{\lambda_0}{2} + n\lambda_0$  avec  $n \in \mathbb{N}$
- les lames quart d'onde, pour lesquelles la différence de marche introduite entre les deux

composantes du champ électrique lors de la traversée de la lame vaut  $\delta = \frac{\lambda_0}{4} + n\lambda_0$  avec  $n \in \mathbb{N}$



Une lame donnée ne sera demi-onde ou quart d'onde que si elle est effectivement utilisée avec de la lumière à la longueur d'onde  $\lambda_0$  pour laquelle la lame a été conçue. Il est impératif d'accorder la lame choisie avec la longueur d'onde de la source optique utilisée.

Dans ce TP, vous utiliserez des lames demi-onde et quart d'onde à 560 nm : on mettra donc un filtre vert à la sortie d'une lampe blanche pour travailler autour de cette longueur d'onde particulière.

## I.2 Lamme demi-onde

Reprenons l'exemple de la polarisation rectiligne précédente. Supposons que les lignes neutres de la lame demi-onde soient les axes  $(Ox)$  et  $(Oy)$ .

A la sortie de la lame demi-onde, le champ électrique s'écrit donc :

$$\vec{E} = E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \vec{e}_x + E_0 \sin(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z - k_0 \delta) \vec{e}_y$$

Lors de la traversée de la lame demi-onde, la composante  $E_y$  du champ a été déphasée de

$$\Delta\varphi = k_0 \delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left( \frac{\lambda_0}{2} + n\lambda_0 \right) = \pi + 2n\pi = \pi$$

★ Dans le cas d'une polarisation incidente rectiligne, le champ en sortie de la lame est donc :

$$\vec{E} = E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \vec{e}_x - E_0 \sin(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \vec{e}_y$$

Polarisation rectiligne d'angle  $-\alpha$  avec  $(Ox)$ .

Représentation de la polarisation en entrée, puis en sortie.

**Exercice :** Une OPPH polarisée circulairement gauche arrive sur une lame demi-onde. Décrire l'état de polarisation en sortie de la lame demi-onde.

★ Ne pas leur laisser de temps.  
 ★ Représenter champ incident. Champ en entrée. Champ en sortie. Représentation. Description.

## I.3 Lamme quart d'onde

Reprenons à nouveau l'exemple de la polarisation rectiligne. Supposons que les lignes neutres de la lame demi-onde soient les axes  $(Ox)$  et  $(Oy)$ .

A la sortie de la lame quart d'onde, le champ électrique s'écrit donc :

$$\vec{E} = E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \vec{e}_x + E_0 \sin(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z - k_0 \delta) \vec{e}_y$$

Lors de la traversée de la lame quart d'onde, la composante  $E_y$  du champ a été déphasée de

$$\Delta\varphi = k_0\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left( \frac{\lambda_0}{4} + n\lambda_0 \right) = \frac{\pi}{2} + 2n\pi = \frac{\pi}{2}$$

★ Dans le cas d'une polarisation incidente rectiligne, le champ en sortie de la lame est donc :

$$\vec{E} = E_0 \cos(\alpha) \cos(\omega t - k_0 z) \vec{e}_x + E_0 \sin(\alpha) \sin(\omega t - k_0 z) \vec{e}_y$$

Polarisation elliptique d'axes les lignes neutres de la lame et gauche (si  $0 < \alpha < \pi/2$ ).  
Représentation de la polarisation en entrée, puis en sortie.

**Exercice :** Une OPPH polarisée circulairement gauche arrive sur une lame quart d'onde. Décrire l'état de polarisation en sortie de la lame quart d'onde.

★ Représenter champ incident. Champ en entrée. Champ en sortie. Représentation. Description.

**Exercice :** Une OPPH polarisée elliptiquement gauche, et d'axes les lignes neutres de la lame, arrive sur une lame quart d'onde. Décrire l'état de polarisation en sortie de la lame quart d'onde.

★ Représenter champ incident. Champ en entrée. Champ en sortie. Représentation. Description.

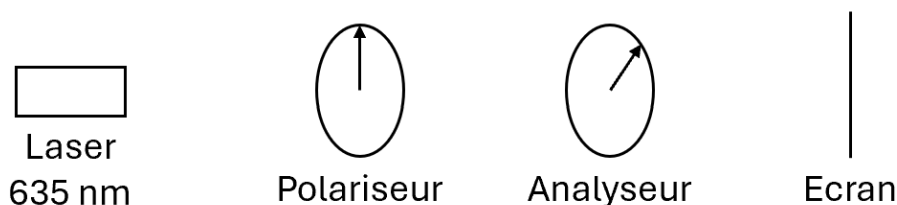
## II Polariseur et analyse d'un état de polarisation rectiligne

Dans cette partie, on utilisera des diodes-lasers de classe 2. Ces sources optiques sont sans danger sur la peau ou les vêtements, mais sont susceptibles de provoquer des lésions oculaires irréversibles si on regarde le faisceau laser directement à l'œil nu pendant une durée supérieure à 0.5 s. **On positionnera les éléments optiques de sorte à ne JAMAIS être tenté de regarder dans la direction du faisceau laser. On observera uniquement la tache laser par le biais d'un écran. Le faisceau laser ne doit pas sortir de votre paillasse.**



### II.1 Analyse d'une polarisation rectiligne (15 min)

Protocole :



- Tourner l'analyseur et observer à l'œil l'intensité de la tache laser sur l'écran.

**Remarque :** **Rédaction protocole :** En optique, rédiger un protocole revient à réaliser un schéma de ce type sur le compte-rendu, puis à indiquer les étapes à suivre, avec les éventuels instruments de mesure (l'œil est un instrument de mesure fréquent en optique).

Exploitation :

- Quel est le type de polarisation de l'onde électromagnétique juste avant l'analyseur ?

## II.2 Loi de Malus (1 h)

### a Préambule théorique : la photodiode

Une photodiode est un capteur optique permettant de mesurer l'intensité lumineuse. Il convertit cette intensité lumineuse en une intensité électrique qui lui est proportionnelle.

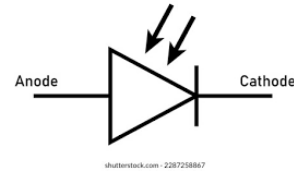
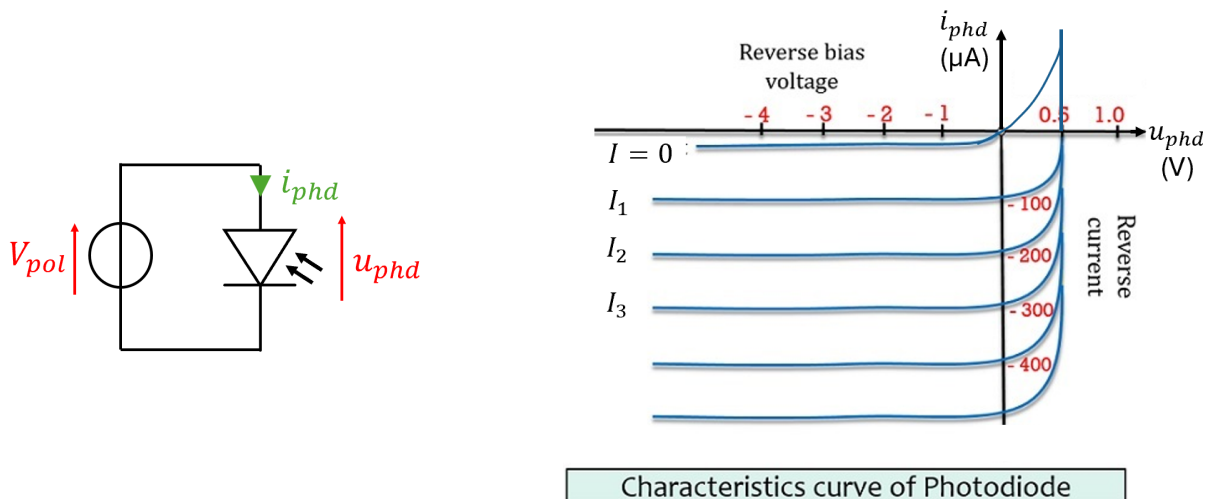


Figure 1: Symbole électrique d'une photodiode. L'anode correspond au fil noir branché sur votre photodiode.

Comme tout dipôle électronique, on peut tracer sa caractéristique statique courant-tension. La tension  $u_{phd}$  et l'intensité  $i_{phd}$  mesurées sont représentées sur le schéma électrique ci-dessous.



On observe que la caractéristique courant-tension est modifiée lorsque la photodiode est éclairée par un rayonnement d'intensité lumineuse  $I$ . En particulier, on montre la propriété suivante.

#### Utilisation d'une photodiode pour mesurer l'intensité lumineuse

L'intensité électrique  $i_{phd}$  mesurée lorsque la photodiode est polarisée en inverse (i.e. lorsque  $u_{phd} < 0$ ) est proportionnelle à l'intensité lumineuse  $I$  :

$$i_{phd} = kI \quad \text{avec} \quad k < 0 \quad \text{à la condition que} \quad u_{phd} < 0$$

$|i_{phd}|$  est alors appelé le courant inverse.

### b Préambule théorique : loi de Malus

La loi de Malus donne l'intensité lumineuse en sortie d'un analyseur lorsque l'onde est polarisée rectilignement avant l'analyseur :

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

- Comment est défini l'angle  $\theta$  dans la loi de Malus ?

### c Protocole pour vérifier la loi de Malus

On reprend le montage optique de la partie II.1 en remplaçant l'écran par une photodiode. Concernant le montage électrique, le souci est que le courant inverse d'une photodiode est de l'ordre de  $100\ \mu\text{A}$ , ce qui est trop faible pour être mesuré précisément à l'ampèremètre.

- Proposer un montage électrique permettant de mesurer une grandeur proportionnelle à l'intensité lumineuse avec une précision suffisante.
- Mettre en œuvre le montage optique et électrique permettant la vérification de la loi de Malus.

### d Mesures et exploitation quantitative

- Effectuer plusieurs mesures de l'angle  $\theta$  et de la grandeur proportionnelle à l'intensité lumineuse.
- Tracer un graphe permettant de valider ou d'invalider la loi de Malus à partir des données expérimentales.

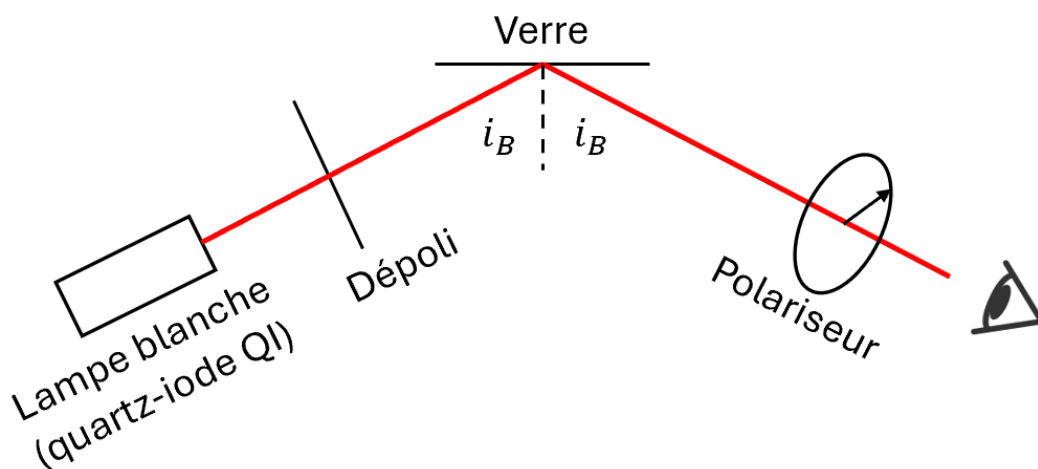
## II.3 Identification de l'axe passant d'un polariseur par la méthode de la réflexion vitreuse (15 min)

### a Préambule théorique : angle de Brewster

On considère la réflexion d'une onde électromagnétique incidente arrivant sur une interface séparant deux milieux diélectriques linéaires homogènes isotropes et transparents d'indices optiques  $n_1$  et  $n_2$ .

On montre qu'il existe un angle d'incidence, appelé angle de Brewster  $i_B$ , tel que l'onde réfléchie soit polarisée rectilignement de manière orthogonale au plan d'incidence. Cet angle  $i_B$  vérifie  $\tan(i_B) = \frac{n_1}{n_2}$ . Dans le cas de l'interface air  $\rightarrow$  verre, en prenant  $n_1 = 1$  et  $n_2 = 1.5$ , on obtient  $i_B = 56^\circ$ .

### b Méthode de la réflexion vitreuse



**Remarque :** Le dépoli est un système optique diffusant permettant d'observer une lampe blanche ou une lampe à vapeur à l'œil nu sans s'éblouir et donc sans risquer de provoquer des lésions oculaires.

- Mettre en œuvre le montage ci-dessus. Tourner le polariseur.
- Dédire de votre observation le type de polarisation de l'onde réfléchie.
- Déterminer si la languette présente sur le polariseur permet de repérer l'axe passant ou l'axe bloquant du polariseur.

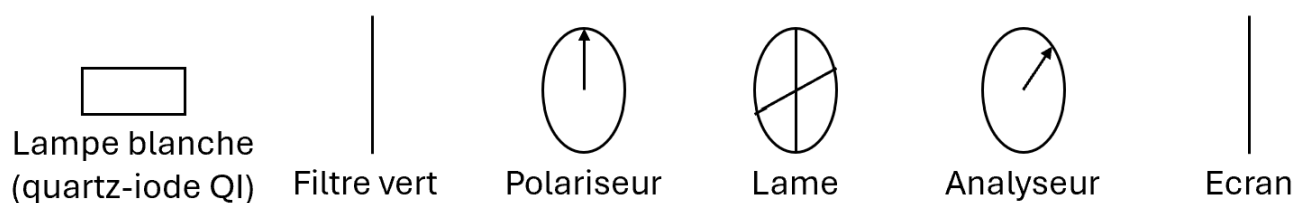
Ce montage permet donc de repérer de manière absolue l'axe passant d'un polariseur, sans utiliser un autre polariseur déjà étalonné.

### III Modification et analyse d'un état de polarisation avec des lames cristallines

Dans toute cette partie, l'objectif n'est pas de réaliser des mesures quantitatives, mais est de comprendre l'action des lames cristallines sur l'état de polarisation d'une onde électromagnétique.

#### III.1 Analyse d'une polarisation rectiligne (15 min)

Protocole sans la lame cristalline :



- Réaliser le montage ci-dessus **sans la lame cristalline**. Tourner l'analyseur et observer à l'œil l'intensité de la tache sur l'écran.

**Remarque : Rédaction protocole :** En optique, rédiger un protocole revient à réaliser un schéma de ce type sur le compte-rendu, puis à indiquer les étapes à suivre, avec les éventuels instruments de mesure (l'œil est un instrument de mesure fréquent en optique).

Exploitation :

- Quel est le type de polarisation de l'onde électromagnétique juste avant l'analyseur ?

#### III.2 Identification des lignes neutres d'une lame cristalline (15 min)

Protocole avec la lame cristalline :

- Reprendre le montage du III.1 (toujours sans la lame cristalline) et orienter la direction de l'axe passant du polariseur verticalement.
- Croiser polariseur et analyseur.
- Ajouter la lame cristalline de votre choix. La tourner de sorte à annuler la tache lumineuse sur l'écran.

Exploitation :

- Identifier la direction des lignes neutres de la lame cristalline.

### III.3 Modification d'une direction de polarisation rectiligne (15 min)

#### Protocole :

- Reprendre le montage du III.1 avec une lame demi-onde. Orienter les lignes neutres de la lame verticalement et horizontalement.
- Orienter l'axe passant du polariseur avec un angle  $\alpha \in ]0, \frac{\pi}{2}[$  par rapport à la verticale. Mesurer l'angle  $\alpha$ .
- Tourner l'analyseur et observer l'intensité lumineuse sur l'écran.

#### Exploitation :

On cherche à décrire l'état de polarisation après la lame  $\lambda/2$ .

- Décrire le type de polarisation après la lame  $\lambda/2$ .
- De quel angle avez-vous tourné l'analyseur pour éteindre la tache lumineuse sur l'écran ? En déduire la direction de polarisation après la lame  $\lambda/2$ .

La lame  $\lambda/2$  permet donc de modifier la direction d'une polarisation rectiligne.

### III.4 Polarisation circulaire (30 min)

#### a Création d'une onde polarisée circulairement

- Reprendre le montage du III.1 avec une lame quart d'onde. Orienter les lignes neutres de la lame verticalement et horizontalement.
- Orienter l'axe passant du polariseur avec un angle  $\alpha$  par rapport à la verticale. Choisir la seule valeur de  $\alpha$  possible (modulo  $\pi$ ) pour que la polarisation après la lame  $\lambda/4$  soit circulaire.

#### b Analyse de l'état de polarisation circulaire

- Comment doit varier l'intensité lumineuse en tournant un analyseur si la polarisation en entrée de l'analyseur est circulaire ? Le vérifier expérimentalement.

Le problème de cette méthode d'analyse de la polarisation circulaire est qu'elle ne permet pas de différencier une onde polarisée circulairement d'une onde non polarisée. On réalise cette distinction avec la méthode de la  $\lambda/4$ .

#### Protocole : méthode de la $\lambda/4$

On cherche à analyser un état de polarisation circulaire.

- Placer une seconde lame  $\lambda/4$  au niveau de l'état de polarisation circulaire à analyser. Orienter les lignes neutres de cette lame  $\lambda/4$  verticalement et horizontalement.
- Après la seconde lame  $\lambda/4$ , l'état de polarisation est rectiligne, avec une direction orientée à

45 ° de la direction des lignes neutres de cette  $\lambda/4$ . Tourner un analyseur afin de vérifier cet état de polarisation.

### Cas d'une onde non polarisée :

Un exemple de source optique non polarisée est la lampe blanche QI (avec son filtre) que vous utilisez. (On peut aussi citer le Soleil, les néons du couloir, etc.)

L'objectif de la suite est de vérifier que l'onde issue de la lampe QI + filtre est bien non polarisée.

- A l'aide d'un analyseur, vérifier que l'intensité lumineuse reste constante lorsqu'on tourne cet analyseur.
- Placer une lame  $\lambda/4$  au niveau de l'onde non polarisée à analyser. Quel est l'état de polarisation de l'onde après la lame  $\lambda/4$  ?
- Vérifier que si l'on tourne un analyseur placé après la  $\lambda/4$ , l'intensité lumineuse en sortie reste bien constante.

## III.5 Polarisation elliptique (30 min)

### a Création d'une onde polarisée elliptiquement

- Reprendre le montage du III.1 avec une lame quart d'onde. Orienter les lignes neutres de la lame verticalement et horizontalement.
- Orienter l'axe passant du polariseur avec un angle  $\alpha \in ]0, \frac{\pi}{2}[$  par rapport à la verticale.

La polarisation obtenue en sortie de la lame  $\lambda/4$  est alors elliptique, d'axes les lignes neutres de la lame, et d'ellipticité  $\alpha$ .

### b Analyse de l'état de polarisation elliptique

#### Type de polarisation et axes de l'ellipse :

- Comment doit varier l'intensité lumineuse en tournant un analyseur si la polarisation en entrée de l'analyseur est elliptique ? Le vérifier expérimentalement.
- En déduire les directions des axes de la polarisation elliptique.

#### Ellipticité : méthode de la $\lambda/4$

On cherche à analyser un état de polarisation elliptique.

- Placer une seconde lame  $\lambda/4$  au niveau de l'état de polarisation elliptique à analyser. Orienter les lignes neutres de cette lame  $\lambda/4$  selon les axes de l'ellipse.
- Après la seconde lame  $\lambda/4$ , l'état de polarisation est rectiligne, avec une direction orientée avec un angle  $\alpha$  de la direction des lignes neutres de cette  $\lambda/4$ . Tourner un analyseur afin de vérifier cet état de polarisation. Noter l'angle duquel vous avez tourné l'analyseur.
- Déterminer l'ellipticité de la polarisation elliptique.



## IV Synthèse sur l'analyse d'un état de polarisation

