

---

## Polarisation I

---

FRANCON : *Vibrations lumineuses*, p. 240 à 256

MATHIEU : *Optique, tome I*, p. 93 à 121 et 261 à 283

BRUHAT-KASTLER : *Optique*, § 170 et suivants, § 242 et suivants

PEREZ : *Optique*

SEXTANT : *Optique expérimentale*

HECHT : *Optics* (2<sup>ème</sup> édition), chapitre 8

DUFFAIT : *Expériences d'optique, Agrég. de Sc. Physiques* (2<sup>ème</sup> édition)

Il est nécessaire de se familiariser avec les notions fondamentales :

- vibration lumineuse rectiligne, elliptique, circulaire ; totale ou partielle ; droite ou gauche (on rappelle que la règle adoptée est celle-ci : une vibration est droite si l'observateur qui la *reçoit* la voit tourner dans le sens des aiguilles d'une montre) ; degré (ou taux) de polarisation.
- axe optique, lignes neutres d'une lame cristalline, quartz parallèle ( $\parallel$ ) et quartz perpendiculaire ( $\perp$ ).
- polariseur, analyseur, lame onde  $\lambda$ , demi-onde  $\lambda/2$ , quart d'onde  $\lambda/4$ .

Nous avons choisi ici de séparer les paragraphes « production » et « analyse » d'une lumière polarisée ; mais pour un montage, une synthèse peut être nécessaire.

Dans toutes les expériences décrites ici, P et A sont des polariseurs, D un diaphragme, E un écran et L une lentille.

## I) Analyse de la lumière naturelle

On peut utiliser une lampe Quartz-Iode.

### 1) Symétrie de révolution

Placer un polariseur sur le trajet du faisceau et montrer qu'en le faisant tourner, l'intensité reste constante.

### 2) Absence de polarisation

Ajouter avant le polariseur une lame  $\lambda/4$  avec un filtre adapté et vérifier que l'intensité obtenue en faisant tourner le polariseur est toujours constante.

La lumière naturelle n'est donc pas polarisée (pour l'interprétation, voir le paragraphe III).

## II) Obtention de lumière polarisée

### 1) Polarisation rectiligne

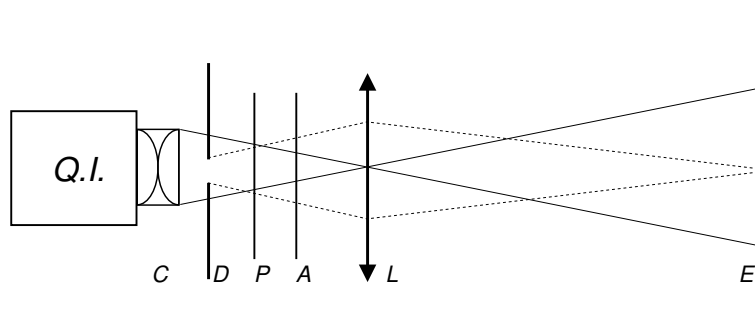
#### a) Obtenue par dichroïsme : polaroïds

Un matériau est dit « dichroïque » si son absorption dépend de la polarisation de l'onde incidente.

Montage :

Maintenir P fixe et vérifier l'extinction pour P et A croisés.

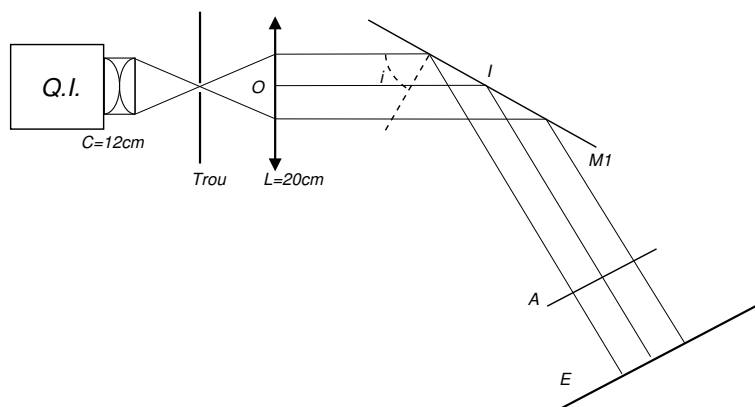
*Remarque :* En toute rigueur, on devrait utiliser un faisceau parallèle et ne contenant pas d'infrarouge (on dispose dans la collection d'un filtre antithermique qui coupe l'infrarouge de 0.85 à 1.3  $\mu\text{m}$ ) car les polariseurs dont on dispose fonctionnent dans le visible mais pas dans l'I.R.. Pour une expérience visuelle de cours, un faisceau quasi parallèle de lumière blanche convient.



### b) Obtenue par réflexion vitreuse

On utilise un miroir de verre noir dont seule la face avant est réfléchissante. Pour le réglage et l'utilisation, *se reporter au mode d'emploi*.

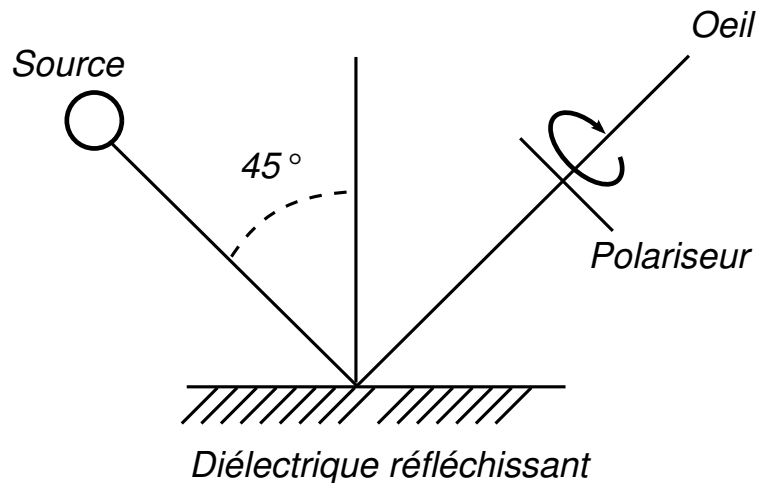
Envoyer un faisceau parallèle de lumière blanche sur le miroir  $M_1$  et étudier la polarisation du faisceau réfléchi à l'aide d'un analyseur.



Pour une rotation complète de  $360^\circ$  de l'analyseur, l'intensité lumineuse présente 2 maxima et 2 minima placés à angle droit. Si l'incidence sur  $M_1$  est l'incidence brewstérienne ( $i = i_B$  avec  $\tan i_B \simeq n$ , indice du verre), les minima sont nuls ; on a affaire à de la polarisation rectiligne totale. Ici  $i_B \approx 56^\circ$ . Si  $i \neq i_B$ , la polarisation est rectiligne partielle, il subsiste, en plus de la vibration rectiligne précédente, une fraction de lumière naturelle. Dans les 2 cas, vérifier que la vibration rectiligne obtenue est perpendiculaire au plan d'incidence sur  $M_1$ .

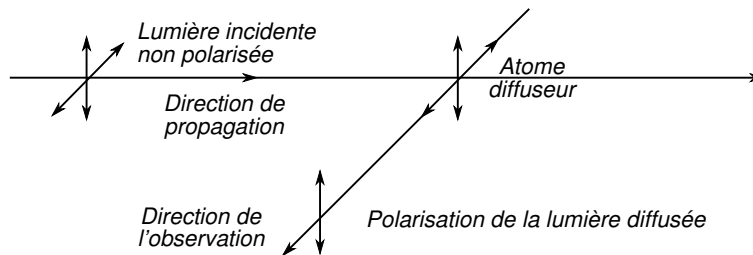
*Remarque* : on peut aussi obtenir de la lumière polarisée rectiligne partielle par transmission, par réfraction à l'angle de Brewster à travers une pile de glaces (empilement de lames de verre transparentes). Cette méthode a l'avantage que le faisceau n'est pas dévié et est plus lumineux (l'intensité du faisceau réfléchi à l'incidence de Brewster est 7,5% de l'intensité incidente).

*Contrôle rapide d'un polariseur* : Observer l'image d'une lampe réfléchi sur une surface brillante diélectrique (peinture, bois verni, etc. . .) sous une incidence de l'ordre de  $45^\circ$ , à travers le polariseur à contrôler. Repérer l'angle du polariseur qui donne un minimum de luminosité. Interpréter. Ceci permet de voir si l'index du polariseur repère la transmission ou l'extinction, et surtout si le polariseur n'a pas glissé par rapport à l'index.



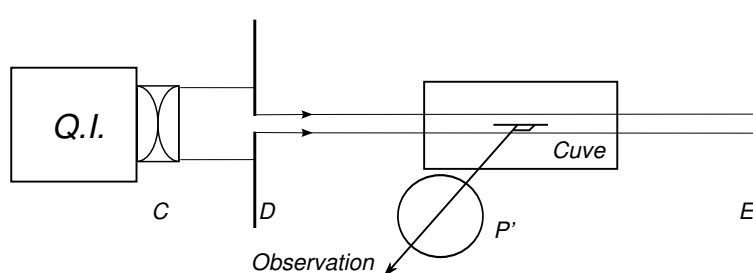
### c) Obtenue par diffusion

Lors de la diffusion de lumière non polarisée, la lumière réémise dans le plan perpendiculaire à la direction du faisceau incident est polarisée linéairement.



Par beau temps, observer le ciel avec un polaroïd : il y a une extinction très nette pour une direction d'observation perpendiculaire aux rayons solaires (en déduire le rôle des filtres polariseurs sur les appareils photo).

### Expérience :



On opère avec une cuve parallélépipédique en verre. Dans la cuve pleine d'eau ajouter une pincée de lait en poudre (ne pas oublier de vider la cuve après l'expérience : il ne s'agit pas de fabriquer du yaourt).

Observer la lumière diffusée à  $90^\circ$  à travers l'analyseur  $P'$ . Pourquoi l'extinction n'est-elle pas totale (vous pouvez raisonner en terme de diffusions multiples) ?

On place un polariseur  $P$  sur le faisceau incident et on observe toujours à  $90^\circ$  à travers  $P'$ . Qu'observe-t-on en tournant  $P$  ?

Observer sur l'écran E la coloration du faisceau direct, expliquer le phénomène.

## 2) Polarisation elliptique

Rappels sur les lames cristallines :

Nous disposons de deux sortes de lames à faces parallèles de quartz :

*quartz*  $\parallel$  : l'axe optique est parallèle aux faces de la lame.

*quartz*  $\perp$  : l'axe optique est perpendiculaire aux faces de la lame.

Si on attaque une lame de quartz parallèle en incidence normale, la vitesse de propagation n'est pas la même pour une onde polarisée parallèlement à l'axe optique (indice  $n_e$ ) et pour une onde polarisée perpendiculairement à l'axe optique (indice  $n_o$ ). C'est le phénomène de biréfringence, qui donne lieu, en incidence non normale, à l'apparition de deux rayons réfractés (faire un schéma).

Dans le cas d'un quartz  $\perp$ , la biréfringence n'apparaît pas en incidence normale (ces lames seront utilisées pour l'étude de la polarisation rotatoire dans le TP Polarisation II).

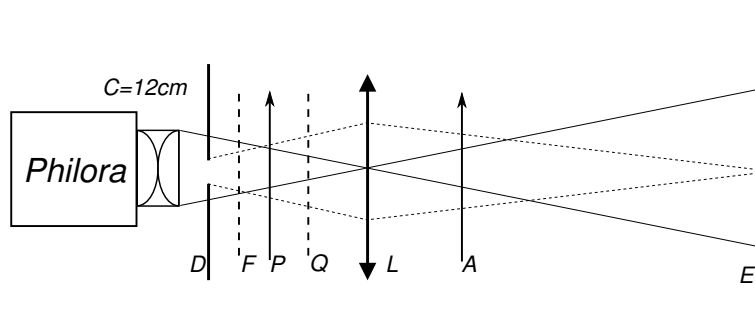
Nous disposons aussi de lames de spath  $\parallel$  (milieu uniaxe ne présentant pas de polarisation rotatoire).

Pour le quartz  $\Delta n = n_e - n_o \approx 1 \times 10^{-2}$ . Pour le spath,  $n_e - n_o \approx -20 \times 10^{-2}$ .

Il existe d'autre part des lames de mica, milieu biaxe sans polarisation rotatoire qui se comporte dans les géométries utilisées comme un milieu uniaxe.

### a) Obtenue par biréfringence

Lame d'épaisseur quelconque



Attention, il faut utiliser une lame **mince**, c'est-à-dire qui introduit une différence de marche  $e\Delta n$  de l'ordre de  $\lambda$ . Dans le cas d'une lame plus épaisse (par exemple  $e\Delta n \approx 50\lambda$  autrement dit  $e \approx 2$  mm pour du quartz en lumière bleue) on a, avec un filtre interférentiel de bande passante typique  $\delta\lambda \approx \lambda/50$  ( $\lambda \approx 500$  nm et  $\delta\lambda \approx 10$  nm) une différence de marche qui varie d'environ  $\lambda$  d'un bord à l'autre de la bande passante du filtre, ce qui ne permet pas d'avoir une lumière dans un état de polarisation bien défini.

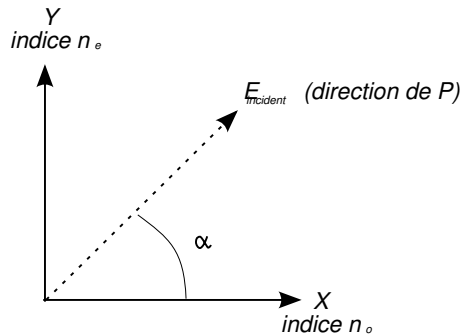
Cependant, même avec une lame mince, il est recommandé d'utiliser une lampe spectrale (largeur spectrale réduite à 0,5 nm environ et meilleure luminosité). Le filtre interférentiel (F) permet de sélectionner une seule des raies du mercure (la raie verte).

En l'absence de Q, croiser P et A.

Introduire Q, lame cristalline choisie en fonction des informations qui précèdent. En tournant Q, montrer qu'on obtient quatre positions pour lesquelles l'extinction est rétablie. On fait ainsi apparaître les lignes neutres de la lame.

Dans une position de Q où il n'y pas d'extinction, tourner l'analyseur pour vérifier que celle-ci ne réapparaît pas pour une autre position de A. En sortie de la lame, la lumière n'est donc plus polarisée linéairement.

*Interprétation* : désignons par X et Y les directions des lignes neutres de la lame qui sont par définition la direction de l'axe optique (Y) et la direction perpendiculaire (X).



On décompose la vibration incidente sur les lignes neutres :

$$\vec{E}_{incident} = E_0 \cos \alpha \cos \omega t \vec{X} + E_0 \sin \alpha \cos \omega t \vec{Y}$$

où  $E_0$  est l'amplitude de  $\vec{E}_{incident}$ . Après traversée de la lame, on a :

$$\vec{E}_{emergent} = E_0 \cos \alpha \cos \omega t \vec{X} + E_0 \sin \alpha \cos(\omega t - \varphi) \vec{Y}$$

avec  $\varphi = 2\pi e \Delta n / \lambda$  où  $e$  est l'épaisseur de la lame. La vibration résultante est en général polarisée elliptiquement.

Si  $\sin \alpha = 0$  ou  $\cos \alpha = 0$ ,  $\vec{E}_{incident}$  est parallèle à l'une des lignes neutres, et la polarisation est alors inchangée. On a donc quatre positions de Q pour lesquelles l'extinction est rétablie.

### Lames d'épaisseur particulière

- Action d'une lame  $\lambda/2$  sur une vibration rectiligne :

Dans ce cas, la lame introduit une différence de marche  $(n_e - n_o)e$  égale à  $\lambda/2$  et donc  $\varphi = \pi$ . La vibration émergente est polarisée rectilignement dans une direction symétrique de celle de  $\vec{E}_{incident}$  par rapport aux lignes neutres.

Travailler en lumière monochromatique en choisissant un filtre adapté à la lame utilisée. Après avoir repéré les lignes neutres de la lame entre polariseur et analyseur croisés, tourner la lame d'un angle  $\alpha < \pi/4$ . Montrer que la vibration obtenue est rectiligne et déterminer sa direction par rapport aux directions des lignes neutres de la lame et de la polarisation rectiligne incidente.

- Action d'une lame  $\lambda/4$  sur une vibration rectiligne :

Ici,  $\varphi = \pi/2$ . La vibration émergente est polarisée elliptiquement et les axes de l'ellipse sont les lignes neutres de la lame. Pour  $\alpha = 45^\circ$ , la vibration émergente est polarisée circulairement.

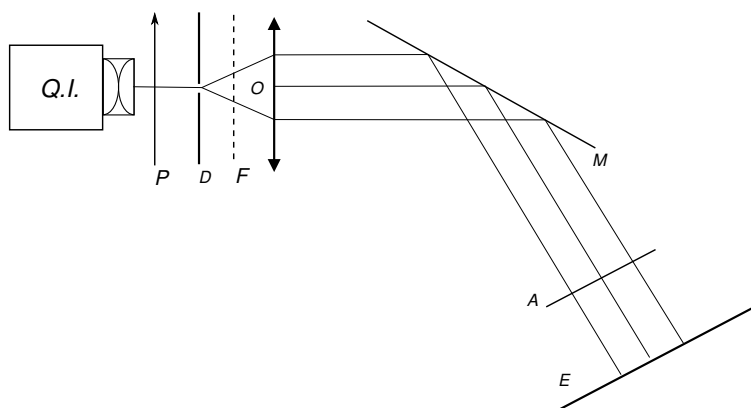
Après avoir repéré les lignes neutres de la lame entre polariseur et analyseur croisés, tourner la lame de manière à placer ses lignes neutres à  $\pi/4$  de la polarisation incidente.

Tourner l'analyseur et vérifier que l'intensité lumineuse est constante. On vérifiera au III que la vibration obtenue est polarisée circulairement.

N.B. : On retiendra qu'une lame mince donnée n'est  $\lambda/2$  ou  $\lambda/4$  que pour une longueur d'onde particulière. Pour obtenir un déphasage constant sur tout un intervalle de longueurs d'ondes, il faut utiliser une lame d'onde achromatique constituée d'une association de plusieurs matériaux biréfringents.

### b) Obtenue par réflexion métallique (facultatif en début d'année)

Sous incidence très oblique sur un miroir aluminé sur sa face avant, un faisceau polarisé rectilignement à  $45^\circ$  par rapport au plan d'incidence acquiert une polarisation elliptique. L'ellipticité obtenue est de l'ordre de  $15^\circ$  (voir Bruhat : *Optique*, chapitre XVIII).



Tourner l'analyseur pour vérifier qu'il n'y a pas d'extinction. Notez les directions des extrema d'éclairement.

N.B. : une analyse quantitative de l'état de polarisation de l'onde réfléchie permet de remonter aux indices optiques du métal.

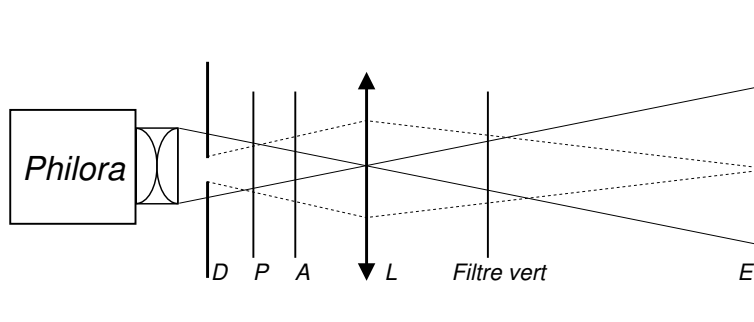
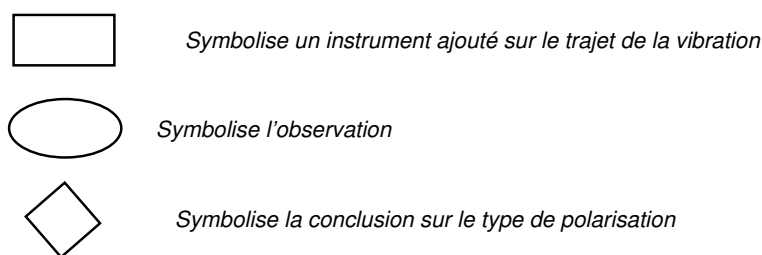
## III) ANALYSE DE L'ETAT DE POLARISATION D'UNE LUMIÈRE

### 1) Méthode générale

L'analyse des vibrations lumineuses nécessite la détermination de divers facteurs :

- lumière naturelle ou polarisée totalement ou partiellement (dans ce dernier cas détermination du taux de polarisation).
- lumière polarisée rectiligne, circulaire, elliptique (dans ces deux derniers cas, détermination du sens droit ou gauche).

En présence d'une polarisation inconnue on procèdera comme indiqué dans le schéma de la dernière page avec les notations ci-dessous (voir également Duffait, Chap. IX-3) :



### a) Analyseur à extinction, type polaroïd ou nicol

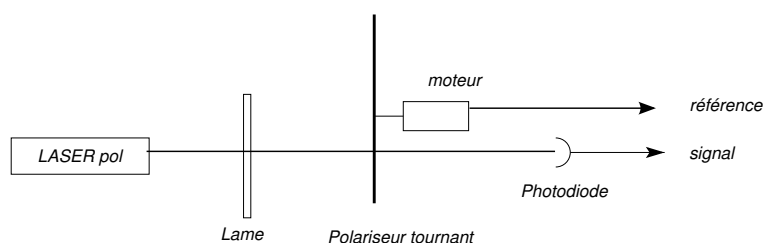
Montage en lumière verte du mercure

Évaluer l'incertitude sur la détermination de la direction de la polarisation rectiligne.

### b) Pointé précis de la direction de polarisation

**Analyseur à pénombre** L'instrument "traditionnel" destiné à faire des pointés précis de la direction absolue (c'est-à-dire par rapport à un repère du laboratoire) est l'analyseur à pénombre. Il n'est plus très utilisé aujourd'hui. Pour sa description voir Bruhat § 278 et suivants.

**Polariseur tournant** Ref : Sextant p. 301 et suivantes.



Un polariseur de type polaroïd a été monté sur le moteur d'un hacheur optique. Une petite languette de scotch noir est collée sur le bord du disque dans la direction de l'axe absorbant du polariseur. Son passage dans la fourche optique permet au boîtier du hacheur de fournir une tension de référence (sortie « reference out ») dont le zéro correspond au passage de l'axe absorbant dans la direction (généralement) verticale. On notera que la taille de cette languette limite déjà la précision du pointé.

Envoyer sur ce polariseur tournant le faisceau d'un laser polarisé. Observer l'évolution temporelle de l'intensité émergente avec une photodiode et un oscilloscope numérique.



**Loi de Malus** Faire une acquisition de ce signal et l'ajuster par une sinusoïde. Commenter en particulier la période et la valeur moyenne. Pourquoi la loi de Malus illustre-t-elle le caractère vectoriel de la lumière ?

**Pointé d'une direction de polarisation** Mesurer la phase du signal par rapport au signal de référence. En déduire la direction de polarisation. Quelle précision peut-on attendre ? Introduire une lame  $\lambda/2$  avant le polariseur tournant. Constater que la polarisation reste rectiligne. Tourner cette lame d'un angle arbitraire. Déduire de la courbe lue à l'oscilloscope la rotation de la direction de polarisation induite. Conclure. Quelle précision peut-on attendre de la méthode du polariseur tournant pour des pointés *relatifs* de direction de polarisation ?

## 2) Analyse d'une vibration elliptique (important)

Produire un faisceau de lumière polarisée elliptiquement par l'une des méthodes proposées au II.2.

Repérer avec un analyseur la direction de l'intensité minimale (petit axe de l'ellipse), puis ôter l'analyseur. Placer une lame quart d'onde (et donc travailler en lumière monochromatique) de manière à ce que son axe lent coïncide avec la direction que l'on vient de repérer.

A la sortie de la lame quart d'onde, on a alors une vibration rectiligne. Replacer l'analyseur avec son orientation initiale et repérer l'extinction en tournant l'analyseur d'un angle  $\beta < \pi/4$ .

L'angle  $\beta$  dont on a dû tourner l'analyseur permet d'avoir :

- le degré d'ellipticité de la vibration par  $\tan \beta = b/a$  où  $a$  est le demi grand axe de l'ellipse ( $b$  est le demi petit axe)
- le sens de rotation de la vibration (opposé au sens de rotation de l'analyseur)

Faire les calculs qui permettent de trouver ces résultats.

**Polariseur tournant** Envoyer la lumière polarisée elliptiquement sur le polariseur tournant décrit au paragraphe précédent. Comment déduire le degré d'ellipticité de la courbe obtenue à l'oscilloscope ?

## 3) Analyse d'une vibration rectiligne partielle

Le moyen de production le plus simple consiste à utiliser la réflexion vitreuse avec une incidence autre que l'incidence de Brewster (cf. II.1.b). On peut aussi utiliser une pile de glace par transmission (cf. II.1.b).

Pour l'analyser, repérer la direction de l'intensité minimale grâce à un analyseur, qu'on retire ensuite.

Placer une lame  $\lambda/4$  (et donc travailler en lumière monochromatique) dont l'un des axes est parallèle à la direction repérée précédemment. Avec l'analyseur, vérifiez que le minimum d'intensité (non nul) est parallèle à l'un des axes de la lame.

