

## POLARISATION DE LA LUMIERE

### But du T.P. :

- Produire une lumière totalement polarisée.
- Modifier et analyser une onde polarisée rectilignement.
- Mesurer un pouvoir rotatoire.
- Distinguer une lumière non polarisée d'une lumière totalement polarisée et analyser cette dernière.
- Mesure de la biréfringence d'un ruban adhésif.



= Appel professeur



= A travailler impérativement avant le TP

Prérequis : Revoir cours et TP de première année sur la polarisation rectiligne et la loi de Malus.

### Précautions :

- **NE PAS PLACER LE POLARISEUR TROP PRES DE LA LAMPE** car il craint la chaleur. Si possible, intercaler un filtre anticalorique entre la source et le polariseur. Ne jamais faire converger un faisceau sur un polariseur.

- Ne pas tourner les polariseurs et analyseurs avec l'aiguille permettant de mesurer l'angle.
- Ne pas toucher les lames avec les doigts.

- **NE JAMAIS RALLUMER UNE LAMPE SPECTRALE DONT L'AMPOULE EST ENCORE CHAUDE** pour ne pas réduire sa durée de vie. Le mieux reste de ne pas l'éteindre pendant toute la durée du T.P.

### Donnée :

- Longueur d'onde moyenne du doublet du sodium : 589,3 nm



### I. UN PEU DE THEORIE...

#### 1) Structure de l'onde électromagnétique plane progressive

La lumière est une onde électromagnétique. Les champs électrique  $\vec{E}$  et magnétique  $\vec{B}$  qui la caractérisent vérifient l'équation de propagation de d'Alembert à 3 dimensions. La vitesse de propagation (vitesse de phase) est  $c = 299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$  dans le vide<sup>1</sup> et  $c/n$  dans un milieu linéaire homogène isotrope transparent d'indice  $n$ .

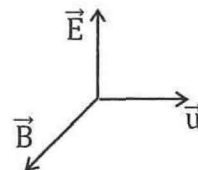
Nous nous limiterons à l'étude de **l'onde plane progressive** c'est-à-dire à une propagation dans un "milieu infini" en négligeant les ondes réfléchies lors des changements de milieu.

On démontre à partir des équations de Maxwell que l'onde plane progressive est **transverse** et que :

$$\vec{B} = n/c \cdot \vec{u} \wedge \vec{E} \text{ avec } \vec{u} \text{ vecteur unitaire dans la direction de propagation.}$$

La connaissance de  $\vec{E}$  et  $\vec{u}$  permet donc de déterminer  $\vec{B}$ . De plus la plupart des systèmes optiques (en particulier les détecteurs) interagissent avec  $\vec{E}$ .

On se limitera donc à l'étude du champ électrique.



<sup>1</sup>La valeur de  $c$  est liée à la définition du mètre : Longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $1 / 299\,792\,458$  seconde.

*Remarque* : Les détecteurs utilisés en optique sont **sensibles à la valeur moyenne de  $E^2$** . Ils sont dits quadratiques moyens. Par opposition, les détecteurs utilisés en acoustiques sont sensibles à la valeur instantanée de la surpression.

En s'appuyant sur l'analyse de Fourier, on peut décomposer l'onde en une superposition d'ondes planes progressives monochromatiques.

Par conséquent, ce T.P. aura pour but d'étudier l'évolution dans le temps et dans l'espace du champ électrique caractérisant une onde électromagnétique plane progressive monochromatique se propageant suivant l'axe Oz. La forme générale de son expression est :

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} \cos(\omega t - kz) \\ E_{0y} \cos(\omega t - kz - \phi) \\ 0 \end{pmatrix}$$

avec  $E_{0x}$  et  $E_{0y}$  positifs,  $\phi$  quelconque,  $k = n.2\pi/\lambda$  avec  $\lambda$  la longueur d'onde dans le vide et  $\omega = k.c/n$

## 2) La lumière naturelle

Une lumière sera dite naturelle (ou non polarisée) si la direction du champ électrique varie dans le temps, de façon aléatoire et très rapide par rapport au temps de réponse (ou d'intégration)  $\theta$  des détecteurs. Elle prend donc aléatoirement toutes les directions de façon équiprobable dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Si l'on revient au modèle des trains d'onde, cela signifie que la direction du champ électrique varie **aléatoirement** d'un train d'onde à l'autre.

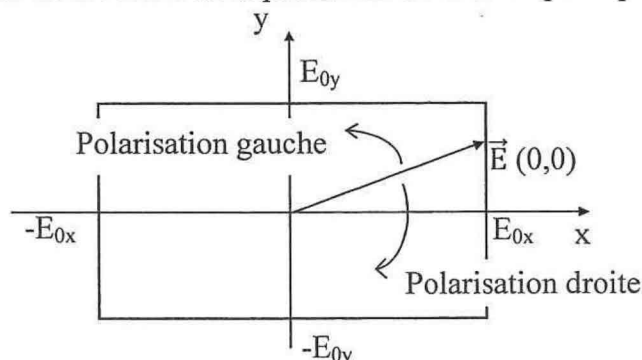
Donc, pour une telle onde,  $\phi$  varie dans le temps, prenant aléatoirement toutes les valeurs entre 0 et  $2\pi$  de façon équiprobable sur une durée  $\theta$ . De même,  $E_{0x}$  et  $E_{0y}$  varient aléatoirement dans le temps avec la valeur moyenne de  $E_{0x}^2 + E_{0y}^2$  sur le temps caractéristique  $\theta$  égale à  $E_0^2$  proportionnel à l'intensité lumineuse de l'onde émise par la source. Cette onde présente donc un caractère isotrope dans un plan d'onde.

## 3) Les différents états de polarisation d'une lumière totalement polarisée

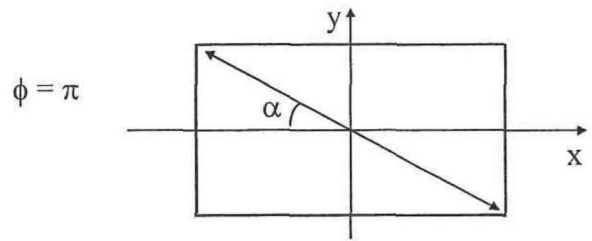
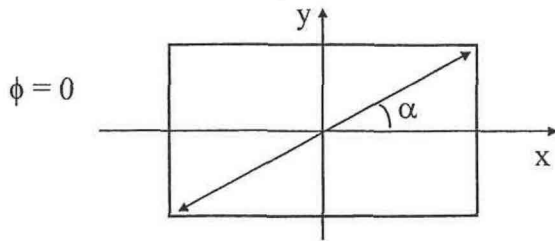
**Postulat** :  $\phi$ ,  $E_{0x}$  et  $E_{0y}$  sont indépendants du temps.

### Définitions

- L'état de polarisation est défini par la forme de la courbe décrite par l'extrémité du vecteur  $\vec{E}$  dans un plan d'onde. La normale au plan est définie par  $\vec{u}$ . La polarisation dépend donc de la valeur de  $\phi$ . Dans le cas général, c'est une ellipse. L'observation se fait en direction de la source.
- Pour déterminer le sens de rotation de  $\vec{E}$ , deux méthodes sont possibles :
  - Se placer dans le plan  $z = 0$  et observer l'évolution de  $\vec{E}$  entre  $t = 0$  et  $t = T/4$ .
  - Etudier le sens de la vitesse de déplacement de  $\vec{E}$  en un point particulier.



- Polarisation rectiligne



$$E_{0x} = E_0 \cos \alpha \text{ et } E_{0y} = E_0 \sin \alpha$$

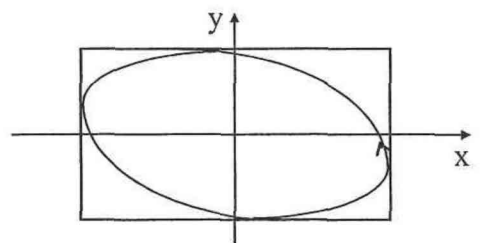
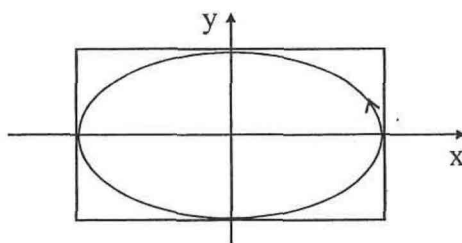
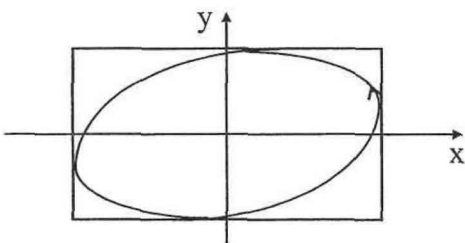
Quel que soit  $\phi$ ,  $E_{0x} = 0$  ou  $E_{0y} = 0$  correspond aussi à une polarisation rectiligne.

- Polarisation elliptique gauche :  $\phi \in ]0 ; \pi [$

$\phi \in ]0 ; \pi/2 [$

$\phi = \pi/2$

$\phi \in ]\pi/2 ; \pi [$

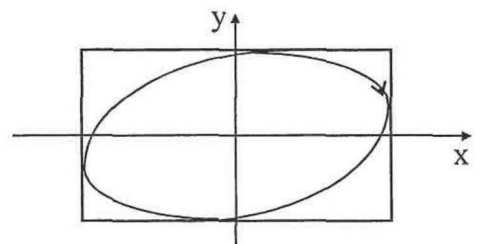
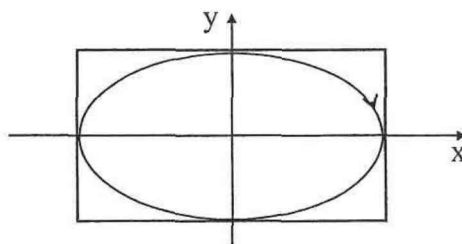
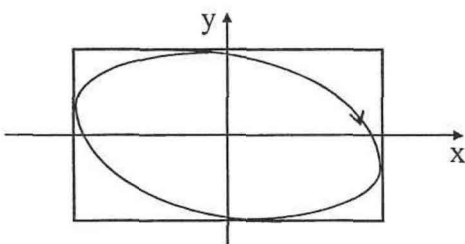


- Polarisation elliptique droite :  $\phi \in ]\pi ; 2\pi [$

$\phi \in ]\pi ; 3\pi/2 [$

$\phi = 3\pi/2$

$\phi \in ]3\pi/2 ; 2\pi [$



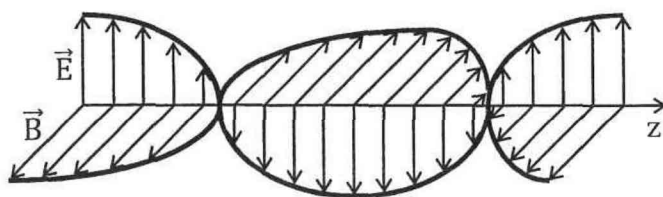
- Polarisation circulaire : Elle est obtenue pour  $\phi = \pi/2$  ou  $\phi = 3\pi/2$  et  $E_{0x} = E_{0y}$

Cette description couvre tous les états d'une lumière totalement polarisée.

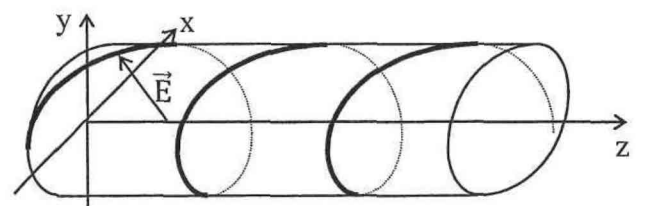
*Remarque* : La superposition d'une lumière naturelle et d'une lumière totalement polarisée donne une lumière partiellement polarisée.

**Evolution du champ dans l'espace à un instant donné**

Polarisation rectiligne



Polarisation elliptique



**T.1.** Est-ce une polarisation elliptique gauche ou droite ?

#### 4) Notions de base de polarisation

Pour cette étude, on utilisera la notation complexe.

##### Base de polarisation rectiligne

Soient les vecteurs de base :

$$\vec{e}_x = \begin{pmatrix} \exp j(\omega t - kz) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{e}_y = \begin{pmatrix} 0 \\ \exp j(\omega t - kz) \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{alors} \quad \vec{E} = E_{0x} \cdot \vec{u}_x + E_{0y} \cdot e^{-j\phi} \cdot \vec{u}_y$$

Une lumière totalement polarisée peut toujours être considérée comme la superposition de deux ondes polarisées rectilignement sur des directions orthogonales.

##### Base de polarisation circulaire

$$\vec{u}_g = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \cdot \exp j(\omega t - kz) \\ -j/\sqrt{2} \cdot \exp j(\omega t - kz) \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{u}_d = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \cdot \exp j(\omega t - kz) \\ j/\sqrt{2} \cdot \exp j(\omega t - kz) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$\vec{u}_g$  (respectivement  $\vec{u}_d$ ) correspond à une polarisation circulaire gauche (respectivement droite).

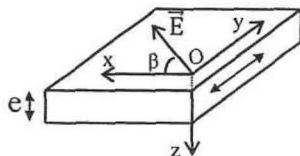
Or  $\vec{u}_x = 1/\sqrt{2} \cdot (\vec{u}_g + \vec{u}_d)$  et  $\vec{u}_y = j/\sqrt{2} (\vec{u}_g - \vec{u}_d)$ , donc  $\vec{E} = (E_{0x} + j \cdot E_{0y} \cdot e^{j\phi})/\sqrt{2} \cdot \vec{u}_g + (E_{0x} - j \cdot E_{0y} \cdot e^{j\phi})/\sqrt{2} \cdot \vec{u}_d$ .

Une lumière totalement polarisée peut toujours être considérée comme la superposition de deux ondes polarisées circulairement en sens inverse.

#### 5) Les lames à retard

##### Définitions

Lame mince à faces parallèles taillée dans un cristal uniaxe. Cette lame est caractérisée par deux indices différents suivant que le champ électrique est polarisé selon deux directions orthogonales que nous noterons Ox et Oy. Ces deux directions sont appelées **lignes neutres**.



Soit  $n_x$  l'indice selon Ox et  $n_y$  celui selon Oy.

$\Delta n = |n_x - n_y|$  est appelé **biréfringence**

Si  $n_x < n_y$ , Ox est l'**axe rapide** et Oy l'**axe lent**.

Si  $n_x > n_y$ , c'est l'inverse.

**T.2.** Justifier ces appellations.

##### Action de la lame sur une OPPM sous incidence normale (calcul complet en annexe)

Décomposons l'onde en deux OPPM polarisées rectilignement selon Ox et Oy car ce sont les deux seules directions pour lesquelles nous connaissons la vitesse de propagation de l'onde.

Onde incidente :

$$\forall z < 0, \vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} \cdot \cos(\omega t - 2\pi z/\lambda) \\ E_{0y} \cdot \cos(\omega t - 2\pi z/\lambda - \Phi) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Rq : Si l'onde incidente est polarisée rectilignement  $E_{0x} = E_0 \cos \beta$ ,  $E_{0y} = E_0 \sin \beta$  et  $\Phi = 0$

Si l'onde incidente est polarisée circulairement  $E_{0x} = E_{0y} = E_0$  et  $\Phi = \pi/2$  ou  $3\pi/2$

La traversée de la lame introduit une différence de marche  $\delta = e (n_y - n_x)$  entre les 2 composantes du champ électriques donc une différence de phase :  $\Psi = 2\pi e (n_y - n_x)/\lambda$  donc à la sortie de la lame :

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} \cdot \cos(\omega t - 2\pi z'/\lambda) \\ E_{0y} \cdot \cos(\omega t - 2\pi z'/\lambda - \Psi - \Phi) \\ 0 \end{pmatrix} = E_{0y} \cos(\omega t - \frac{2\pi z'}{\lambda}) (\cos(-\Psi - \Phi) + \sin(\omega t) \sin(-\Psi - \Phi))$$

$$\cos(a-b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b$$

En conclusion, la traversée de la lame introduit un déphasage entre les composantes du champ électrique sur ses lignes neutres égal à  $\Psi = 2\pi e(n_y - n_x)/\lambda$ .

Dans le cas général, la lumière émergente est elliptique sauf pour certaines valeurs de  $\Psi$ .

Par exemple, si  $\Psi = 2\pi$  : lame onde, il n'y a pas de modification de la polarisation de l'onde incidente.

Si l'onde incidente est polarisée rectilignement selon l'un des axes de la lame, quelle que soit  $\Psi$  sa polarisation n'est pas modifiée, d'où l'appellation de **lignes neutres** pour ces axes. Cette propriété est à exploiter pour identifier les lignes neutres.

Attention,  $\Psi$  dépend de la longueur d'onde, les propriétés d'une lame à retard ne sont donc valables que pour **une longueur d'onde donnée**. Il est donc indispensable de travailler en lumière monochromatique. Les lames disponibles au laboratoire sont adaptées au doublet du sodium.

### 6) La lame demi-onde

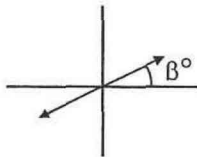
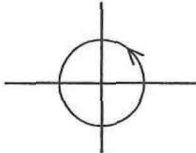
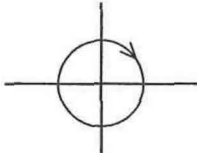
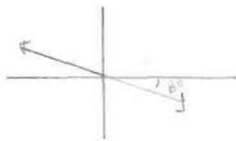
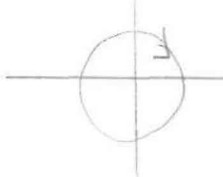
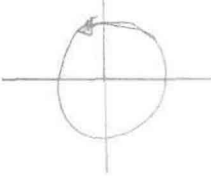
#### Définition

C'est une lame à retard telle que  $\Psi = \pm \pi$  soit  $|\delta| = \lambda/2$ , d'où son nom.

#### Propriétés

T.3. La polarisation de l'onde émergente est-elle modifiée si on inverse les axes rapide et lent ?

T.4. Compléter le tableau ci-dessous, les axes horizontal et vertical correspondent aux lignes neutres :

	Polarisation rectiligne	Polarisation circulaire gauche	Polarisation circulaire droite
Onde incidente			
Onde émergente			

#### Conclusion

Une lame  $\lambda/2$  transforme une onde polarisée rectilignement en une onde .....

Une lame  $\lambda/2$  transforme une onde polarisée elliptiquement ou circulairement en une onde .....

$\Psi = \pi \rightarrow$  axe rapide en avance de  $\pi$   
 $-\pi \rightarrow$  " " " " en retard de  $\pi$

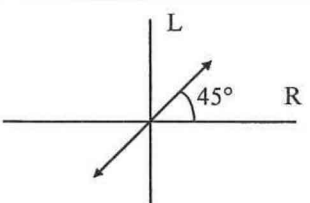
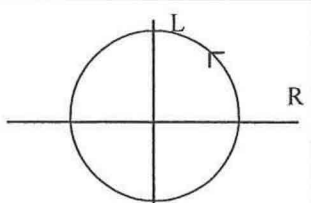
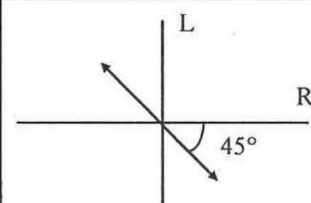
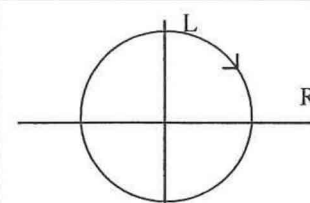
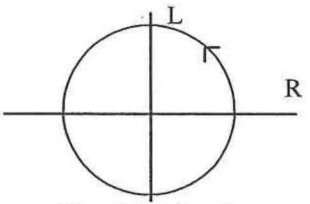
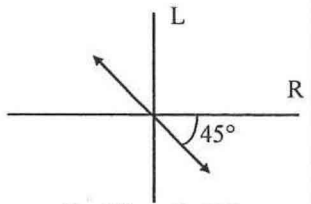
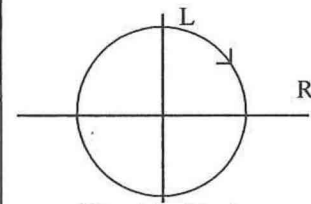
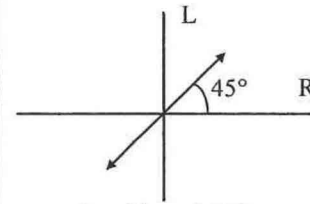


## 7) La lame quart d'onde

### Définition

C'est une lame à retard telle que  $\Psi = \pm \pi/2$  soit  $|\delta| = \lambda/4$ , d'où son nom.

### Propriétés

Onde incidente	Onde émergente	Onde incidente	Onde émergente
 <p>Rectiligne à 45°</p>	 <p>Circulaire Gauche</p>	 <p>Rectiligne à -45°</p>	 <p>Circulaire Droite</p>
 <p>Circulaire Gauche</p>	 <p>Rectiligne à -45°</p>	 <p>Circulaire Droite</p>	 <p>Rectiligne à 45°</p>

**T.5.** Vérifier une des lignes du tableau, en écrivant de la façon la plus simple l'expression du champ électrique incident. En déduire celle du champ émergent.

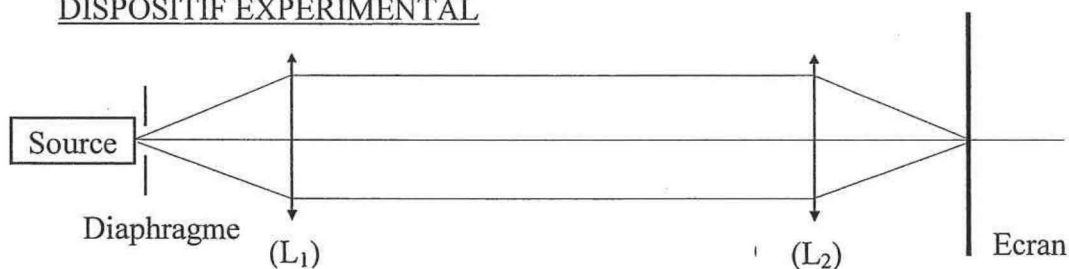
### Conclusion

Une lame  $\lambda/4$  transforme une vibration rectiligne en une vibration elliptique dont les axes coïncident avec ses lignes neutres.

Cas particuliers:

- Si la vibration incidente est à 45° des lignes neutres, la vibration obtenue est circulaire.
- Si la vibration incidente coïncide avec une ligne neutre, pas de modification de la polarisation.

## II. DISPOSITIF EXPERIMENTAL



Sauf indication contraire la source est une lampe à vapeur de sodium.

Si les deux lentilles sont de focales différentes, on les placera telle que l'image du diaphragme soit plus grande que l'objet.

**P.1.** Placer le diaphragme dans le plan focal objet de  $(L_1)$  par la méthode d'autocollimation. Quelle est la nature de l'onde après la première lentille ?

**P.2.** Placer  $(L_2)$  à environ 1 m de  $(L_1)$  et faire l'image du diaphragme sur l'écran. Où se situe l'écran par rapport à  $(L_2)$  ?

### III. PRODUCTION D'UNE LUMIERE TOTALEMENT POLARISEE

#### 1) Le polariseur

**Polariseur** : Système optique permettant de transformer une lumière de polarisation quelconque en une lumière polarisée rectilignement selon une direction particulière. Quelle que soit la vibration incidente, on ne conserve après le polariseur que la projection du champ  $\vec{E}$  selon l'axe de la lame. En fait, la composante perpendiculaire est totalement réfléchiée et/ou absorbée ; quant à la composante parallèle, elle est quasiment intégralement transmise (légère absorption; pour s'en convaincre il suffit de regarder l'opacité d'un polariseur).

Les polariseurs sont aussi utilisés comme **analyseurs** puisqu'ils permettent de déterminer la direction de la vibration incidente.

**Polaroïd** : C'est un film constitué de macromolécules organiques orientées selon une direction. La composante de  $\vec{E}$  parallèle aux molécules va exciter les électrons de celle-ci et sera totalement absorbée ou réfléchiée tandis que la composante orthogonale sera totalement transmise. Ce dispositif convient aux longueurs d'onde de la lumière visible. C'est le dispositif que nous allons utiliser pour ce T.P.

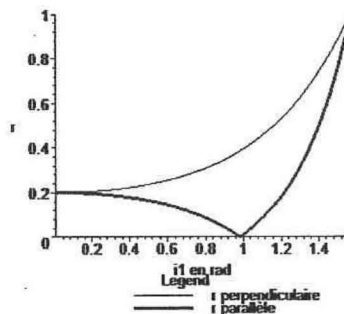
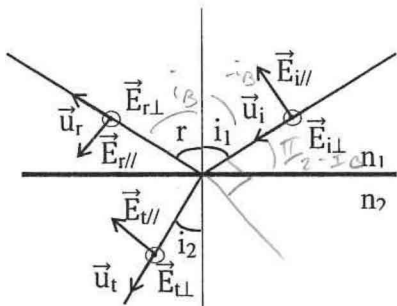
En ondes centimétriques, par exemple, on utilise un dispositif analogue : une grille constituée de barreaux parallèles. Faire le lien avec la longueur d'onde.

#### 2) Comment identifier l'axe d'un polariseur ?

##### La réflexion vitreuse :

Lors de la réflexion d'une onde électromagnétique plane progressive monochromatique d'un milieu d'indice  $n_1$  sur un milieu d'indice  $n_2$ , il faut distinguer le coefficient de réflexion relatif à la composante du champ électrique appartenant au plan d'incidence,  $r_{//}$  et celui relatif à la composante perpendiculaire au plan d'incidence,  $r_{\perp}$ .

**T.6.** Commenter les courbes ci-dessous donnant l'évolution de ces coefficients avec  $i_1$  dans le cas où  $n_1 < n_2$ .



Soit  $i_B$  (appelé angle de Brewster) l'angle pour lequel l'onde réfléchiée est polarisée rectilignement. Sachant qu'à l'angle de Brewster, le rayon réfracté est orthogonal au rayon réfléchi, déterminer  $i_B$  en fonction de  $n_1$  et  $n_2$ .

Evaluer la valeur de  $i_B$  pour une réflexion de l'air sur du verre.

##### Application : détermination de l'axe d'un polariseur

➤ Prendre un polariseur. Observer à l'œil, à travers le polariseur, la lumière réfléchiée par une table (ou par une vitre). Faire tourner le polariseur pour obtenir un minimum de l'intensité. Chercher un minimum nul en modifiant l'angle d'incidence de la lumière réfléchiée (incidence de **Brewster**). En déduire la direction de l'axe du polariseur.

#### 3) Création d'une lumière totalement polarisée

**P.3.** En exploitant les propriétés des polariseurs, lames demi-onde et quart d'onde, produire :  
- une onde polarisée rectilignement faisant un angle de  $30^\circ$  avec la verticale

- une onde polarisée circulaire droite

Dans chaque cas, on donnera l'expression du champ électrique et on décrira précisément le protocole expérimental. Puis on placera un second polariseur (appelé analyseur) avant ( $L_2$ ) que l'on fera tourner. Décrire et interpréter vos observations.



: Expliquer vos protocoles.

#### IV. MODIFICATION ET ANALYSE D'UNE LUMIERE POLARISEE RECTILIGNEMENT

##### 1) Action d'un polariseur sur une lumière polarisée rectilignement

T.7. Démontrer et vérifier expérimentalement la loi de Malus.

##### 2) Action d'une lame demi-onde sur une lumière polarisée rectilignement

P.4. Placer entre les 2 lentilles, un polariseur (P) puis un deuxième polariseur jouant le rôle d'analyseur (A). Orienter (A) pour que les axes de (P) et (A) soient croisés (position correspondant à l'extinction). Introduire la lame demi-onde entre (P) et (A) et la faire tourner jusqu'à obtenir l'extinction : position d'origine (0). Dans quelle configuration se trouve-t-on ? Montrer que l'on a déterminé la position des lignes neutres.

P.5. A partir de cette position, faire tourner la lame demi-onde d'un angle  $\gamma$ . Comment faut-il faire tourner (A) pour retrouver l'extinction ? Justifier. Faire l'expérience pour différentes valeurs de  $\gamma$ .

P.6. Application : donner 2 méthodes (l'une avec un polariseur, l'autre avec une lame demi-onde) pour transformer une onde polarisée rectilignement en une autre dont le champ électrique fait un angle de  $30^\circ$  avec le champ de l'onde incidente. Quel est l'intérêt de la lame demi-onde par rapport au polariseur ?

##### 3) Mesure d'un pouvoir rotatoire

- Placer entre ( $L_1$ ) et ( $L_2$ ), un polariseur et un analyseur croisé.
- Placer entre les deux une cuve remplie d'une solution de saccharose préparée en dissolvant 200 g de sucre dans un 1 litre d'eau.
- Vérifier que l'onde émergente est toujours polarisée rectilignement mais que le champ électrique a tourné d'un angle  $\alpha$  à déterminer.  $\alpha$  est compté positivement si le champ a tourné dans le sens horaire (la molécule est alors dite dextrogyre, lévogyre sinon) en regardant la source.

T.8. Proposer un protocole pour vérifier que  $\alpha$  est bien inférieur à  $2\pi$ . On admettra que c'est bien le cas ici.

P.7.  $\alpha$  est proportionnel à deux grandeurs expérimentales. Lesquelles ? Le coefficient de proportionnalité est appelé pouvoir rotatoire d'une molécule. Il dépend de la température et de la longueur d'onde. Le pouvoir rotatoire du saccharose est  $[\alpha_0] = 66,4^\circ \text{ dm}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ cm}^3$  à  $20^\circ\text{C}$  pour une longueur d'onde de 589 nm. Est-ce compatible avec votre mesure ?

Remarque : Aviez-vous toutes les indications pour déterminer précisément la concentration en saccharose ?

dm <sup>-3</sup>	cm <sup>-3</sup>
1	0,001

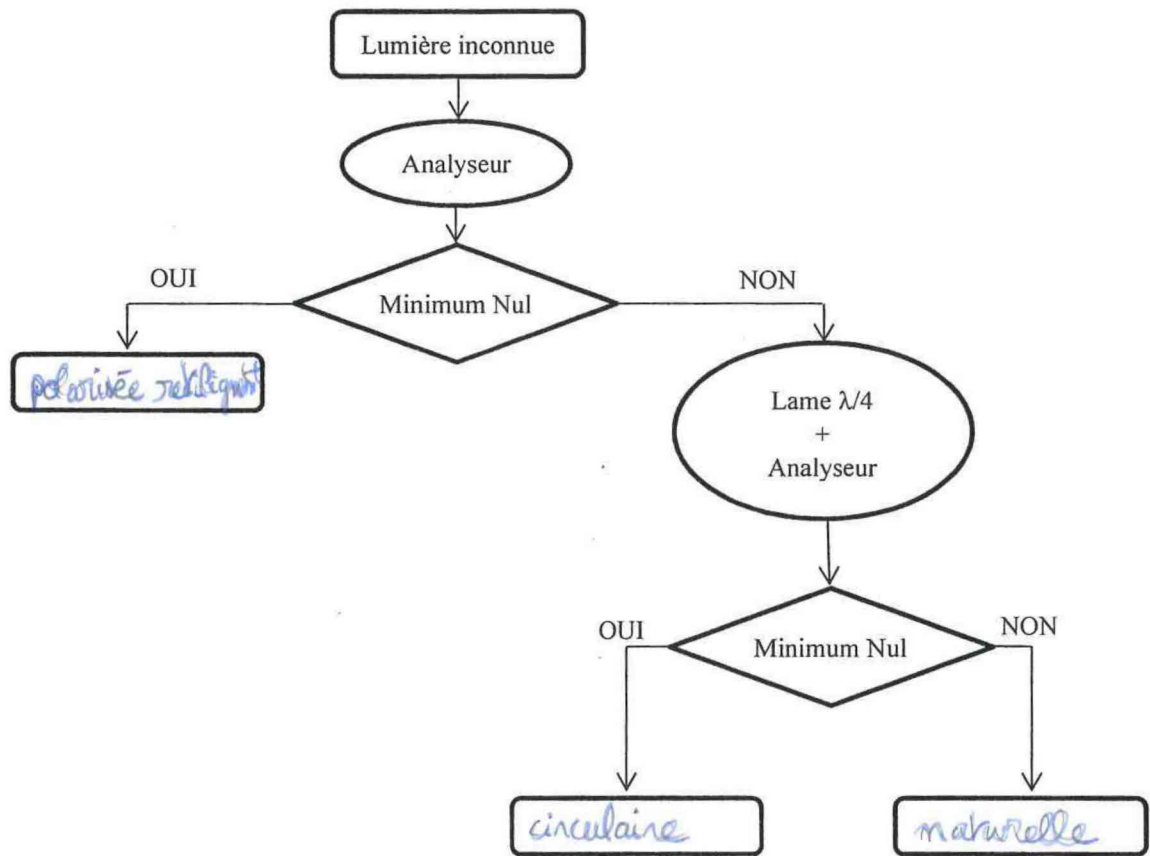
$$\alpha = 20^\circ$$

$$= \frac{200}{10^3} \times 22,7 \cdot 10^{-2} \times 66,4$$

V. ANALYSE D'UNE LUMIERE TOTALEMENT POLARISEE OU NATURELLE

1) Principe de l'étude

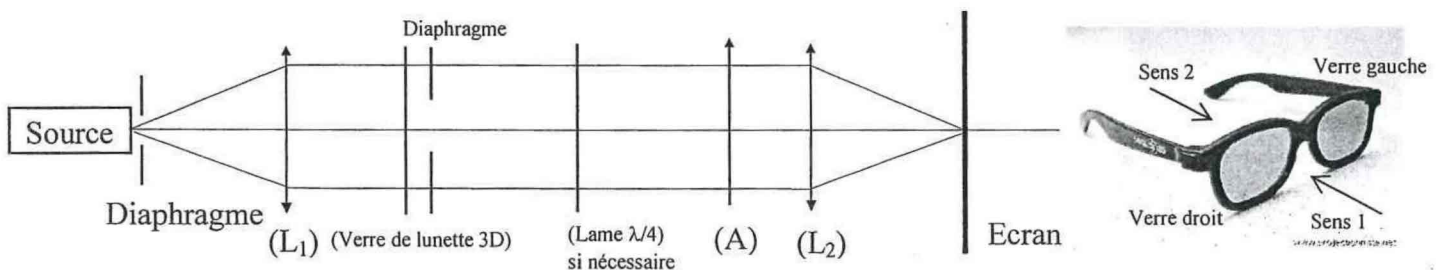
T.9. Compléter l'organigramme suivant qui illustre la méthode expérimentale permettant de déterminer si une lumière est naturelle, polarisée rectilignement ou circulairement.



Remarque : Si, à la première analyse, vous aviez observé un minimum non nul, qu'en auriez-vous conclu ? *que la lumière n'était pas polarisée rectilignement*

2) Analyse d'une lumière

- On se propose d'étudier l'état de polarisation de la lumière après la traversée des verres d'une paire de lunettes pour la vision 3D au cinéma et ce en fonction du sens de propagation.
- Dispositif expérimental



Le second diaphragme a pour rôle de ne laisser passer que la lumière qui a traversé le verre.

P.8. Expliquer votre mode opératoire et remplir le tableau suivant :

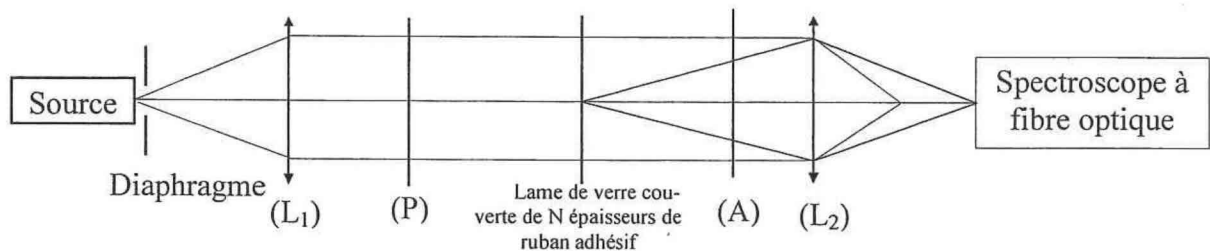
	verre droit sens 1	verre gauche sens 1	verre droit sens 2	verre gauche sens 2
Etat de polarisation				

• Interprétation :

- Que doit contenir le verre de lunette pour expliquer les observations dans le sens 1 ?
- Que doit-on ajouter vues les observations du sens 2 ? Pourquoi cet élément était-il sans action lors de la propagation dans le sens 1 ?
- Comment fonctionnent de telles lunettes pour la vision 3 D au cinéma ?

## VI. MESURE DE LA BIREFRINGENCE D'UN RUBAN ADHESIF

### 1) Principe de la mesure



- La source est une source de lumière blanche.
- Le diaphragme doit être dans le plan focal objet de ( $L_1$ ).
- Le polariseur et l'analyseur sont croisés, leurs directions sont à  $45^\circ$  de l'horizontal (direction choisie pour l'orientation du ruban adhésif).
- La lame couverte de ruban adhésif (matériau biréfringent) sera positionnée horizontalement et conjugué avec l'écran. Régler l'ouverture du diaphragme pour que toute la lumière arrivant sur l'écran ait traversée le ruban adhésif.
- Retirer l'écran et placer la fibre optique au milieu de la tache lumineuse qui était présente sur l'écran.
- Le spectroscopie à fibre est relié à un ordinateur et les données traitées par le logiciel Spid H.R. Dans les paramètres d'acquisition, choisir un temps d'acquisition de 500 ms, un moyennage sur 10 acquisitions et un filtrage faible.

**T.10.** Pourquoi le ruban adhésif est-il biréfringent ?

**T.11.** Montrer que l'intensité lumineuse à l'entrée du spectroscopie vaut :

$$I = I_0 (1 - \cos \Psi) \text{ avec } \Psi = 2\pi N e_0 (n_y - n_x) / \lambda \text{ avec } e_0 \text{ l'épaisseur du ruban adhésif.}$$

**T.12.** Le spectre observé est donc un spectre cannelé, on va mesurer les longueurs d'onde correspondant aux cannelures. Montrer qu'on peut en déduire le produit  $e_0(n_y - n_x)$  en valeur absolue.

### 2) Mesures

**P.9.** Etudier le spectre cannelé pour  $N = 20$  (puis  $N = 15$  et  $N = 25$  si vous avez le temps).

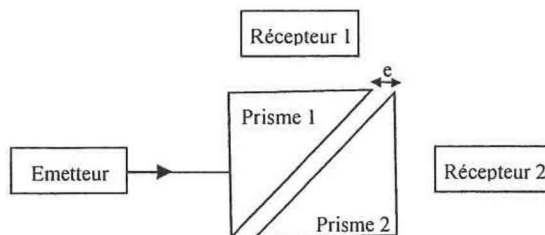
**P.10.** Déterminer  $e_0$  par un protocole à définir.

**P.11.** En déduire la biréfringence du ruban adhésif.

## Expérience complémentaire : Réflexion totale frustrée

Les 2 prismes sont identiques, en paraffine d'indice  $n$ .

L'émetteur génère des ondes hyperfréquences ( $f \approx 10$  GHz) ; Calculer leur longueur d'onde dans le vide.



- Placer uniquement le prisme 1. Observer les signaux reçus quand le récepteur est respectivement dans la position 1 puis 2.
- Placer le second prisme à une distance  $e$  de quelques cm, le récepteur dans la position 2, et rapprocher lentement le prisme afin de diminuer  $e$ . Qu'observez-vous ?

Interpréter ces observations.

### Annexe : Action d'une lame à retard

Onde incidente :

$$\forall z < 0, \vec{E} \begin{cases} E_{0x} \cdot \cos(\omega t - 2\pi z/\lambda) \\ E_{0y} \cdot \cos(\omega t - 2\pi z/\lambda - \Phi) \\ 0 \end{cases}$$

Sachant que dans la lame la vitesse de propagation est différente pour les composantes du champ électrique selon  $Ox$  et  $Oy$  et en appliquant la continuité du champ électrique à chaque interface, on obtient :

Dans la lame :

$$\forall z \in [0, e], \vec{E} \begin{cases} E_{0x} \cdot \cos(\omega t - (2\pi/\lambda) \cdot n_x \cdot z) \\ E_{0y} \cdot \cos(\omega t - (2\pi/\lambda) \cdot n_y \cdot z - \Phi) \\ 0 \end{cases}$$

Onde émergente :

$$\forall z > e, \vec{E} \begin{cases} E_{0x} \cdot \cos(\omega t - (2\pi/\lambda) \cdot (z - e) - (2\pi/\lambda) \cdot n_x \cdot e) \\ E_{0y} \cdot \cos(\omega t - (2\pi/\lambda) \cdot (z - e) - (2\pi/\lambda) \cdot n_y \cdot e - \Phi) \\ 0 \end{cases}$$

Ce qui peut aussi s'écrire après un changement d'origine dans l'espace (ou le temps) :

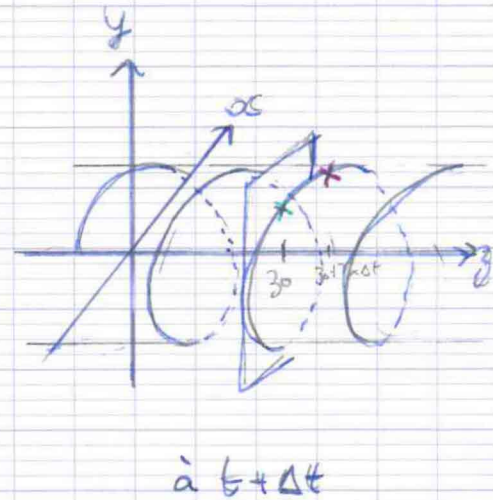
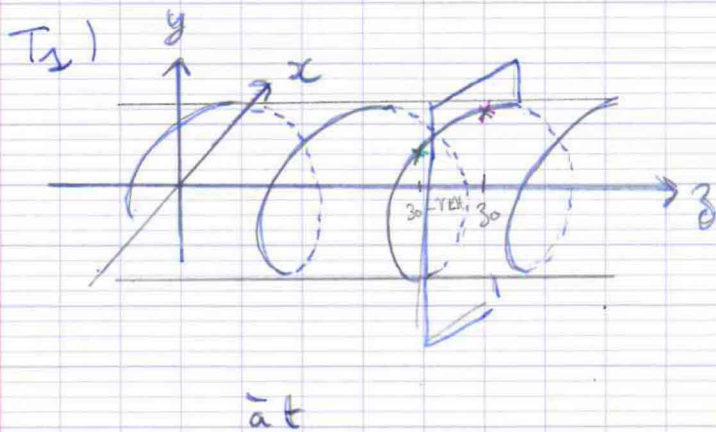
$$\vec{E} \begin{cases} E_{0x} \cdot \cos(\omega t - 2\pi z'/\lambda) \\ E_{0y} \cdot \cos(\omega t - 2\pi z'/\lambda - \Psi - \Phi) \\ 0 \end{cases} \quad \text{avec } \Psi = 2\pi e(n_y - n_x)/\lambda.$$

MABESTÉ  
Julie

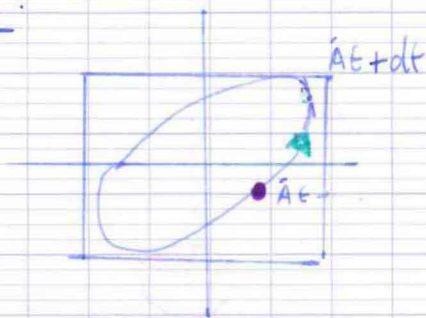
MARPAUX Lucie

## T.P. Polarisation de la lumière

### I. Un peu de théorie...



Dans le plan centré sur  $z_0$ , on voit le champ  $\vec{E}$  tourner vers la gauche, c'est donc une polarisation elliptique gauche.



T<sub>2</sub>)  $v = \frac{c}{n}$  donc  $v_x = \frac{c}{n_x}$  et  $v_y = \frac{c}{n_y}$

Donc  $n_x < n_y$  implique  $v_x > v_y$  d'où  $o_x$  est l'axe rapide et  $o_y$  l'axe lent.

T<sub>3</sub>) Si on inverse l'axe lent et l'axe rapide, l'axe  $x$  devient l'axe lent et l'axe  $y$  devient l'axe rapide.

L'axe  $z'$  va donc être en retard de  $\frac{\pi}{2}$  par rapport à l'axe  $y$ .

On a 
$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} \cos(\omega t - \frac{2\pi z'}{\lambda} - \psi) \\ E_{0y} \cos(\omega t - \frac{2\pi z'}{\lambda} - \psi) \\ 0 \end{pmatrix} \quad \left. \begin{matrix} + \psi \\ + \psi \end{matrix} \right\} \begin{matrix} \text{on applique m' déphasage} \\ \text{pour chaque onde} \\ = \text{ne change rien} \end{matrix}$$

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} \cos(\omega t - \frac{2\pi z'}{\lambda}) \\ E_{0y} \cos(\omega t - \frac{2\pi z'}{\lambda} - \psi) \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} - \frac{\psi}{2} \\ = -\frac{\psi}{2} \rightarrow \text{ne change} \\ \text{rien à la polarisation} \end{matrix}$$

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} \cos(\omega t - \frac{2\pi z'}{\lambda}) \\ E_{0y} \cos(\omega t - \frac{2\pi z'}{\lambda} - \psi) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Donc échanger axe lent et axe rapide ne change rien à la polarisation de l'onde émergente.

$T_{11}$	Polarisation rectiligne	Polarisation circulaire gauche	Polarisation circulaire droite
onde incidente			
onde émergente			

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{j(\omega t - kz)} \\ E_{0y} e^{j(\omega t - kz - \pi)} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{j(\omega t - kz)} \\ -E_{0y} e^{j(\omega t - kz)} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} \cos(u) \\ E_{0y} \sin(u - \pi) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} \cos u \\ -E_{0y} \sin u \\ 0 \end{pmatrix}$$
  
P.C.D

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} \cos u \\ -E_{0y} \sin(u - \pi) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_{0x} \cos u \\ E_{0y} \sin u \\ 0 \end{pmatrix}$$
  
P.C.G

Une lame  $\frac{\lambda}{2}$  transforme une onde polarisée rectiligne<sup>v</sup> avec angle  $\beta$  en une polarisation rectiligne avec angle  $-\beta$ .

Une lame  $\frac{\lambda}{2}$  transforme une onde polarisée elliptiquement ou circulairement en une onde polarisée de la même manière mais dans le sens opposé.

T5) On part d'une onde émergente circulaire gauche

$$\vec{E}_{cg} = \begin{pmatrix} E_0 \cos(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}) \\ E_0 \cos(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{\pi}{2}) = \sin(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}) \\ 0 \end{pmatrix}$$

La lame quart d'onde induit un déphasage de  $\pm \frac{\pi}{2}$ , d'où en sortie =

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_0 \cos(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}) \\ E_0 \cos(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2}) \\ 0 \end{pmatrix}$$

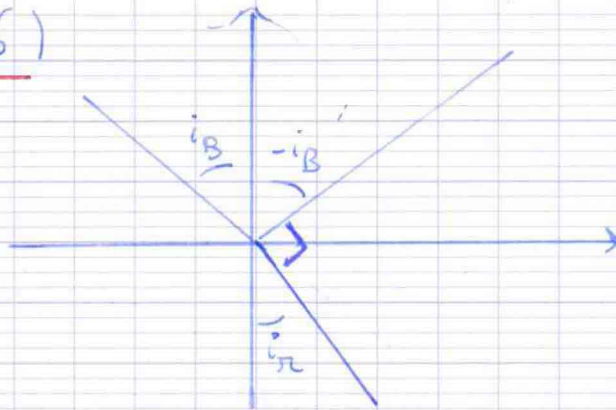
$$= \begin{pmatrix} E_0 \cos(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}) \\ E_0 \cos(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} - \pi) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} E_0 \cos(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}) \\ -E_0 \cos(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}) \\ 0 \end{pmatrix}$$

L'onde en sortie est rectiligne à  $-45^\circ$ .

## II. Dispositif experimental

T6)



$$\pi = i_B + \frac{\pi}{2} + i_B$$

Loi de Descartes :  $n_1 \sin(i_B) = n_2 \sin(i_{\text{refracte}})$

$$\sin(i_B) = \frac{n_2}{n_1} \sin\left(\pi - \frac{\pi}{2} - i_B\right)$$

$$= \frac{n_2}{n_1} \sin\left(\frac{\pi}{2} - i_B\right)$$

$$= \frac{n_2}{n_1} \cos(i_B)$$

$$\Rightarrow \text{au } \boxed{\tan(i_B) = \frac{n_2}{n_1}}$$

Pour une réflexion air sur verre  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1,7$

$$i_B = \arctan(1,7)$$

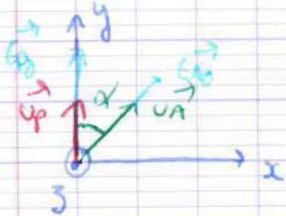
$$\boxed{i_B = 59,5^\circ}$$



Expérience de détermination de l'axe d'un polariseur

$$I_e = \beta \langle \vec{E}_p^2 \rangle_t = \beta E_{p0}^2$$

$$I_s = \beta \langle \vec{E}_A^2 \rangle_t = \beta E_{A0}^2$$

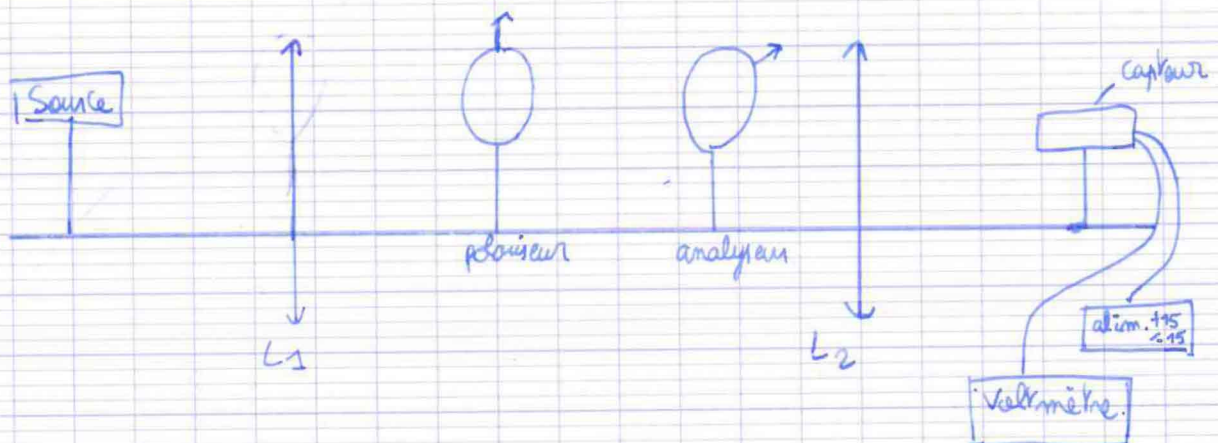


$$\vec{E}_{A0} = E_{p0} \cos \alpha \vec{u}_A$$

$$I_s = \beta E_{p0}^2 \cos^2 \alpha = I_e \cos^2 \alpha \quad \text{Loi de Malus}$$

Verification expérimentale de la loi de Malus:

Montage:



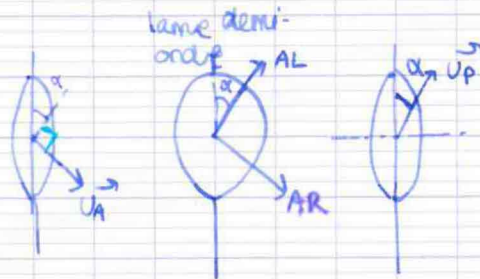
On fixe la direction de polarisation du polariseur.  
 On fait varier l'angle de l'analyseur et on note les valeurs données par le voltmètre pour chaque angle.  
 Cette valeur est proportionnelle à l'intensité de sortie puisque le capteur possède un convertisseur courant tension.

annexe ①

On obtient une droite en traçant  $I_s = f(\cos^2(\alpha))$   
 ce qui vérifie la loi de Malus

P4)

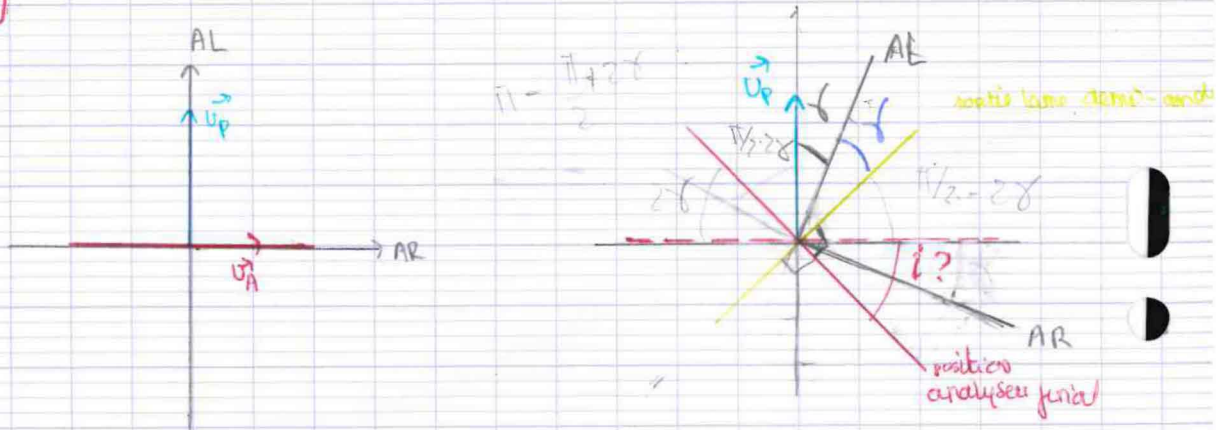
extinction



L'appellation ligne neutre provient du fait que : si l'onde incidente est polarisée rectilignement selon l'un des axes de la lame, la polarisation n'est pas modifiée

On trouve donc les lignes neutres en tournant la lame demi-onde et en l'augmentant de  $n$  angles que la polarisation initiale

P5)



On cherche  $i$  angle de rotation de l'analyseur

On décale la lame demi-onde de  $\gamma$

Par adq la lame demi-onde va décaler  $\vec{u}_P$  de  $2\gamma$  donc en sortie  $\vec{u}_P$  est décalé de  $2\gamma$  donc l'analyseur doit être augmenté de  $2\gamma$  pour retrouver l'extinction.

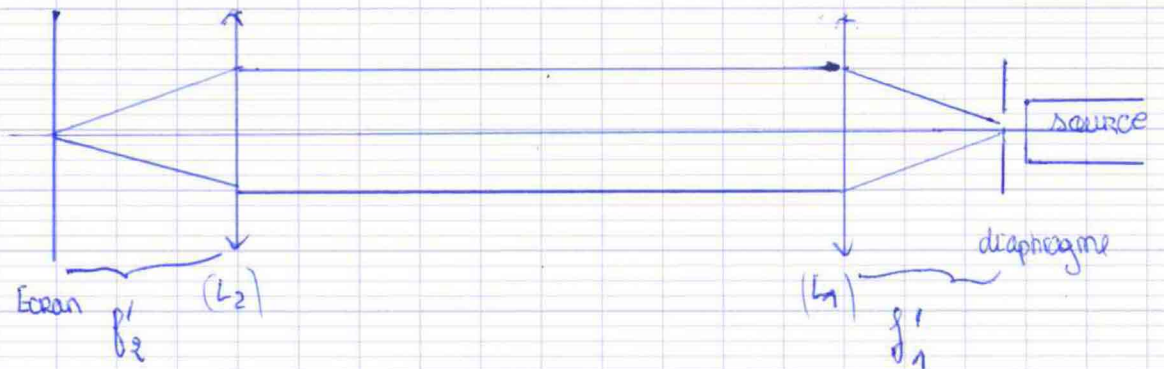
$$\begin{pmatrix} \cos u \\ \sin u \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\xrightarrow{N/4} \begin{pmatrix} \cos u' \\ \sin(u' - \frac{\pi}{2}) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos u' \\ -\sin u' \\ 0 \end{pmatrix}$$

PR

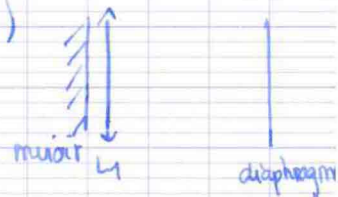
On observe les réflexions sur la table à travers le polariseur. on tourne le polariseur et on observe un minimum d'intensité pour un angle proche de l'angle de Brewster.

P3) Création d'une lumière totalement polarisée  
schéma du montage



On place le diaphragme dans le plan focal objet de la lentille (L1) par autocollimation (on place miroir derrière (L1) et on fait image nette du collimateur sur le collimateur)

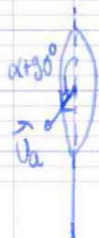
L'écran est dans le plan focal image de (L2)



La lentille transforme l'onde incidente en onde plane progressive harmonique (loi de Malus)

Pour construire une onde polarisée rectilignement faisant un angle 30° avec la verticale:

On place un polariseur avec l'aiguille réglée sur 30° de sens trigo.

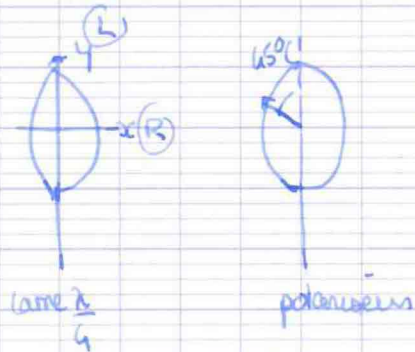


analyseur: on vérifie qu'à  $\alpha + 30^\circ$  on a annulation

polariseur

Construire une onde polarisée circulaire droite:

On place polariseur d'angle  $45^\circ$  puis lame  $(\frac{\lambda}{4})$  quart d'onde  
avec axe rapide = Ox



Pour vérifier qu'on a bien une circulaire droite:

on place un polariseur en sortie  $\rightarrow$  aucune annulation selon l'angle de polarisation

$\rightarrow$  en remplaçant une lame  $\frac{\lambda}{4}$  droite on retransforme onde polarisée circulaire droite en onde polarisée rectilignement.

On peut alors annuler l'intensité avec un polariseur en sortie.

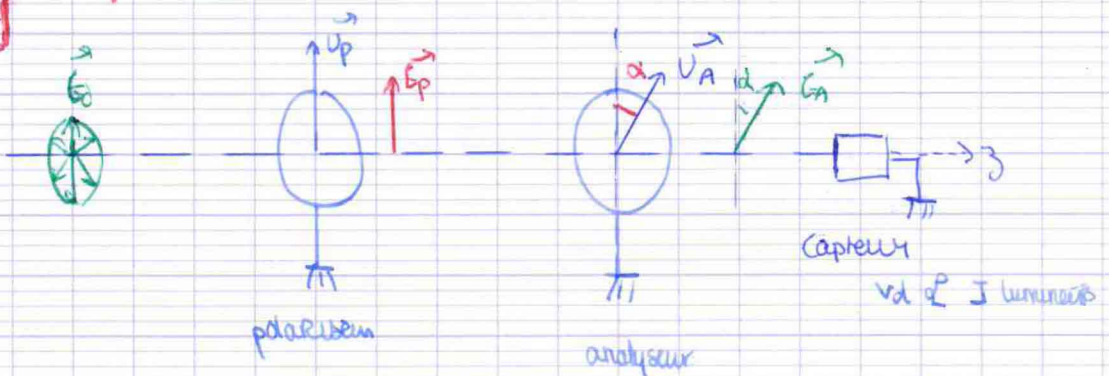
$$E = \begin{pmatrix} E_0 \cos u \\ E_0 \sin u \\ 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{lame } \lambda/4 \text{ droite}} E = \begin{pmatrix} E_0 \cos(u') \\ E_0 \sin(u' - \frac{\pi}{2}) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_0 \cos u \\ -E_0 \sin u \\ 0 \end{pmatrix}$$

PCCB

PR

#### IV. Modification et analyse d'une lumière polarisée rectilignement

IV



on mesure :

angle  $30^\circ$   $40^\circ$   $10^\circ$   $20^\circ$

analyseur  $150^\circ$   $170^\circ$   $110^\circ$   $130^\circ$

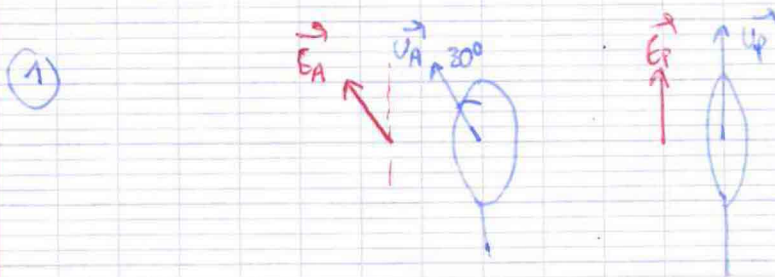
$$150 - 90 = 60^\circ = 2 \times 30^\circ$$

$$170 - 90 = 80^\circ$$

$$110 - 90 = 20^\circ$$

$$130 - 90 = 40^\circ$$

**P6** Méthode pour transformer une onde PR en une autre dont le champ électrique fait un angle de  $30^\circ$  avec le choc de l'onde incidente



② avec lame demi onde

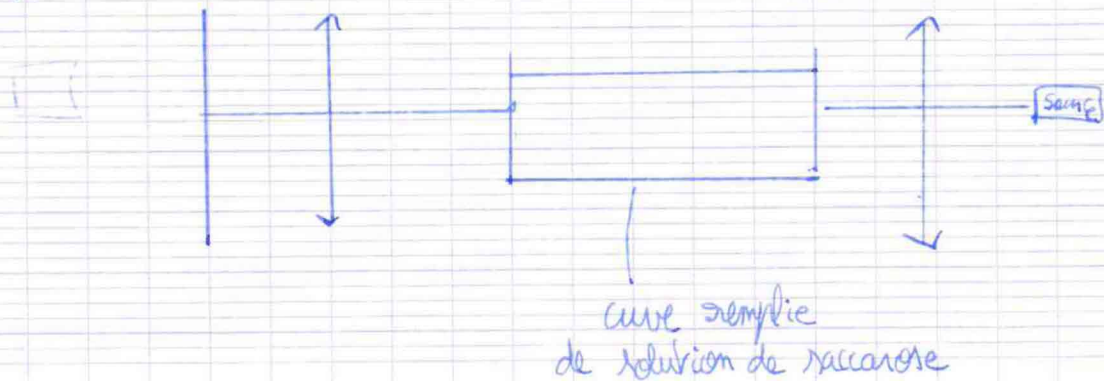
angle entre  $\vec{U}_P$  et  $\vec{U}_R$  fixe :  $\pi - 2\delta$

on veut  $\pi - 2\delta = 30^\circ$  donc  $\delta = 75^\circ$

↓  
angle d'inclinaison  
lame  $\lambda/2$  onde

## Mesure d'un pouvoir rotatoire

### Montage



On trouve  $\alpha = 20^\circ$ .

T8) On fait varier la longueur de la cuve, en commençant avec une petite concentration.  $\alpha \uparrow$  plus  $l$  et  $c \uparrow$  donc on verra à partir de quel moment  $\alpha > 2\pi$ .

P7)  $\alpha = l \times c \times [\alpha]$

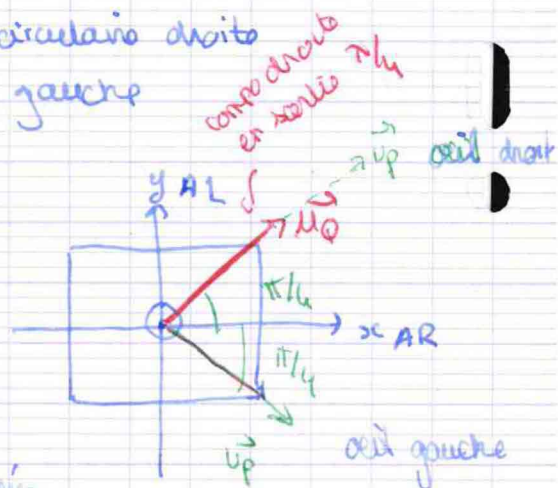
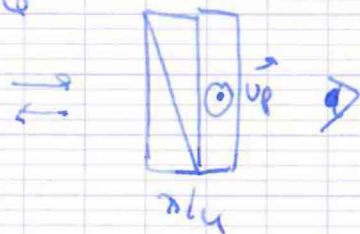
$$\alpha = \underbrace{\frac{20}{10^3}}_c \times \underbrace{22,7 \cdot 10^{-1}}_l \times \underbrace{66,4}_{[\alpha]} = \underline{\underline{30^\circ}}$$

On devrait trouver  $20^\circ$ , c'est  $\approx$  proche.

• Lunette 3D :

une caméra filme en polarisant circulaire droite et une autre en polarisant circulaire gauche

Le verre



Le verre droit filtre la composante circulaire gauche pour avoir circulaire droite

Le verre gauche filtre la composante circulaire droite pour avoir seulement info circulaire gauche

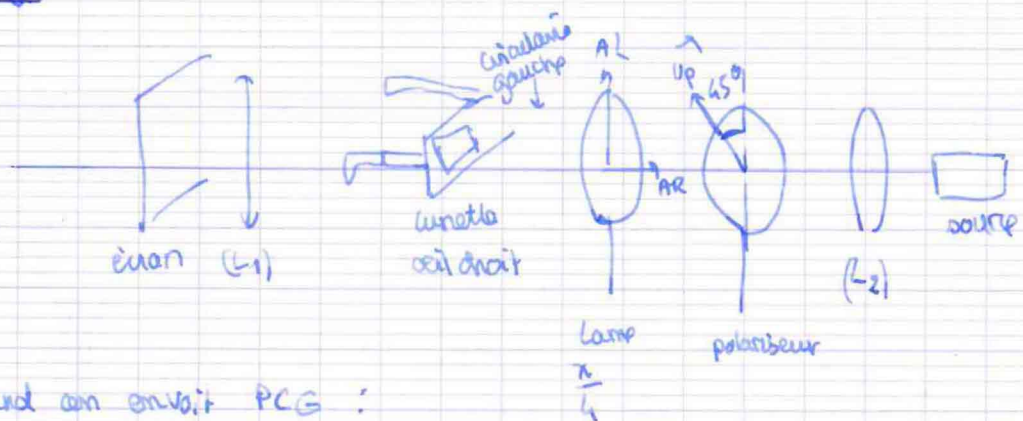
$$\begin{array}{c}
 \text{PCD} \\
 \begin{array}{|l}
 \hline
 E_0 \cos u \\
 -E_0 \sin u \\
 0 \\
 \hline
 \end{array}
 \end{array}
 \xrightarrow{\lambda/4}
 \begin{array}{c}
 \text{PR} \\
 \begin{array}{|l}
 \hline
 E_0 \cos u' \\
 +E_0 \sin u' \\
 0 \\
 \hline
 \end{array}
 \end{array}$$

on met l'analyseur  
à  $-\frac{\pi}{4}$  pour filtrer  
la composante circulaire  
gauche  
et œil droit reçoit PR  
ayant info de la PCD

C'est l'inverse sur l'autre œil.

Donc si on envoie une une PCG sur le verre droit rien  
ne doit passer

Montage:



quand on envoie PCG :

- sur lunette œil droit on ne devrait rien voir sur l'écran
- sur lunette œil gauche, en plaçant un analyseur en sortie on doit observer extinction à  $\pm \frac{\pi}{4}$  rad.

Inverse quand on envoie PCD.

## Is en fonction du cos carré de l'angle de polarisation

