

Synthèse et analyse d'une polarisation

I. Compétences mobilisées

S'approprier :

- rechercher, extraire et organiser l'information en lien avec une situation expérimentale

Réaliser

- mettre en œuvre un protocole
- utiliser (avec la notice) le matériel de manière adaptée, en autonomie
- mettre en œuvre des règles de sécurité adéquates

Valider

- exploiter des observations, des mesures en identifiant les sources d'erreurs et en estimant les incertitudes
- modéliser
- confronter un modèle à des résultats expérimentaux
- confirmer ou infirmer une hypothèse, une information
- analyser les résultats de manière critique

Communiquer à l'écrit (rédiger un compte rendu)

Présenter les étapes de son travail de manière synthétique, organisée, cohérente et compréhensible

II. Objectifs

Dans cette activité expérimentale, il s'agit de comprendre les différents états de polarisation d'une vibration lumineuse. Il s'agit entre autre de savoir produire une lumière polarisée à partir de lumière naturelle et de comprendre le rôle joué par des lames à retard, type demi-onde et quart d'onde.

III. Définition de la polarisation d'une onde électromagnétique

1. Définition

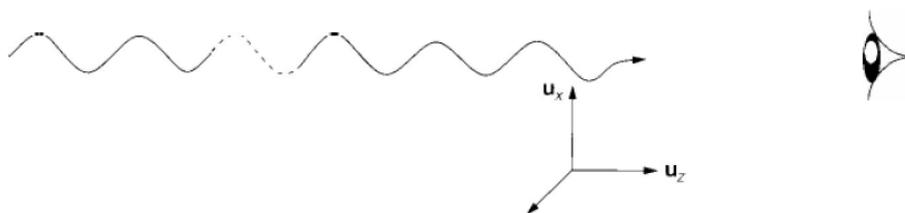
La lumière est une onde électromagnétique résultant de la propagation d'un champ électrique et magnétiques vibrants dans l'espace et dans le temps.

Pour l'onde plane progressive monochromatique dans le vide, les champs électriques et magnétiques sont perpendiculaires à la direction de propagation donnée par le vecteur d'onde \vec{k} . Vu que les champs

électrique et magnétique sont liés par $\vec{B} = \frac{\vec{k} \wedge \vec{E}}{\omega}$, étudier l'évolution du champ électrique suffit. Pour

achever la description du champ électromagnétique, on s'intéresse à l'évolution du champ électrique, au cours du temps, dans un plan normal à la direction de propagation. On regarde par convention dans la

direction opposée au sens de propagation (Voir ci-dessous). NB : $k = \frac{\omega}{c}$ dans le vide



L'étude de la polarisation d'une onde électromagnétique consiste à suivre l'évolution du champ électrique dans un plan normal à sa direction de propagation. L'observation se fait selon le sens opposé à celui de la propagation. La polarisation est alors définie comme le lieu géométrique qu'occupe l'extrémité du vecteur champ électrique au cours du temps.

Lorsque le champ électrique \vec{E} vibre selon une direction fixe dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation, on parle alors de polarisation rectiligne.

2. Polarisation elliptique

Pour étudier la polarisation du champ, on regarde donc l'évolution de \vec{E} dans un plan d'onde (tout plan orthogonal à Oz convient). Dans la suite, on désigne par Oz l'axe selon lequel l'onde plane progressive harmonique monochromatique (OPPHM) se propage. En projetant sur un système d'axe dans le plan (Oxy) transversal à la propagation de l'onde électromagnétique, on obtient une décomposition du champ en électrique de l'OPPHM en :

$$\vec{E} = \begin{cases} E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \\ E_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \end{cases}$$

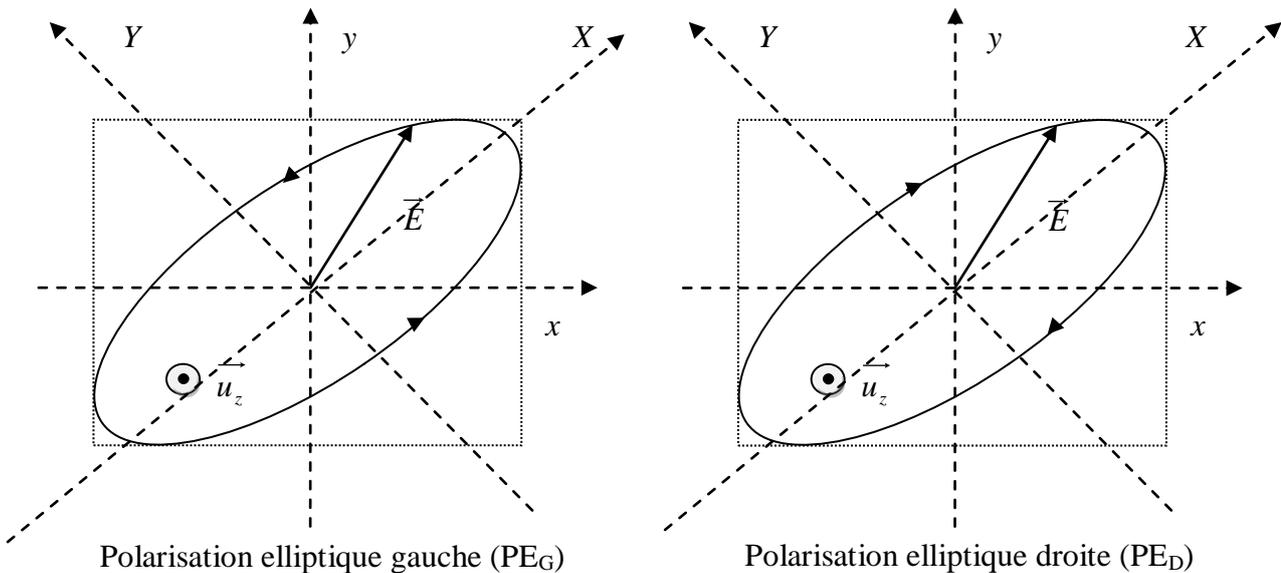
E_{x0} et E_{y0} sont pris positifs par un choix convenable de φ_x et φ_y . Il s'agit de l'équation paramétrique d'une ellipse. On constate que l'extrémité du vecteur champ électrique \vec{E} décrit une trajectoire fermée elliptique de période égale à celle de l'onde.

L'état le plus général de la polarisation d'un champ électrique \vec{E} correspond à une polarisation elliptique.

Le sens de parcours de cette ellipse dépend du déphasage défini par le signe de $\varphi = \varphi_x - \varphi_y$.

Si l'ellipse est décrite dans le sens trigonométrique ou inverse du sens des aiguilles d'une montre, on parle de polarisation elliptique gauche (PE_G). On parle aussi d'hélicité positive. Cela correspond à un déphasage $\varphi = \varphi_x - \varphi_y > 0$

Si l'ellipse est décrite dans le sens inverse du sens trigonométrique ou dans le sens des aiguilles d'une montre, on parle de polarisation elliptique droite (PE_D). On parle aussi d'hélicité négative. Cela correspond à un déphasage $\varphi = \varphi_x - \varphi_y < 0$



On remarque que l'on peut aussi donner la décomposition du champ \vec{E} dans un repère lié au grand axe (OX) de l'ellipse et au petit axe (OY) de l'ellipse. Dans ce système d'axe (OXY) déduit par rotation du système d'axe (Oxy) on obtient la décomposition suivante en :

$$\vec{E} = \begin{cases} E_X = E_{X0} \cos(\omega t - kz) \\ E_Y = \pm E_{Y0} \sin(\omega t - kz) \end{cases}$$

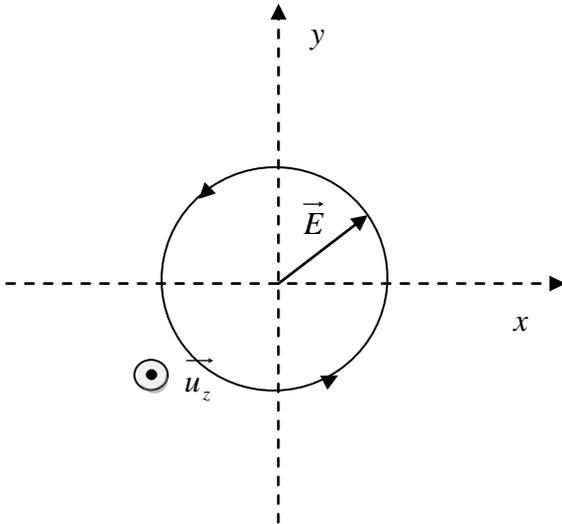
Le signe + correspond à une polarisation de type (PE_G) alors que le signe - à une polarisation de type (PE_D). En effet, en $z = 0$ et à $t = 0_+$, on doit avoir $E_Y > 0$ pour une (PE_G) alors que $E_Y < 0$ pour une (PE_D)

3. Polarisation circulaire

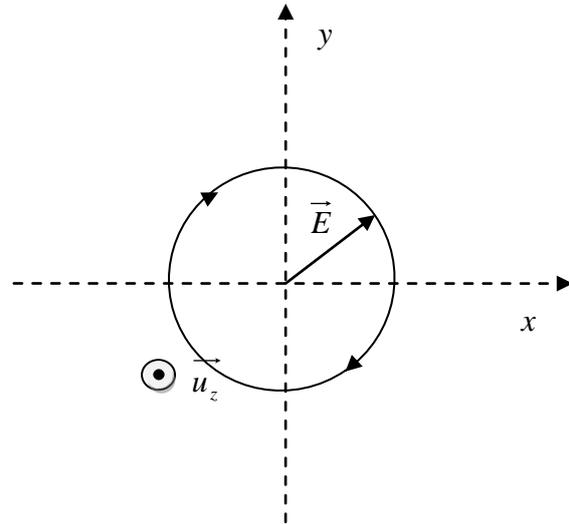
Dans le cas particulier où les deux composantes ont la même amplitude, on obtient que : $E_{x0} = E_{y0} = E_0$
 La trajectoire décrite dans le plan (Oxy) ou (OXY) est un cercle on parle de polarisation circulaire
 On obtient les polarisations suivantes :

Polarisation circulaire gauche (PC_G): $\vec{E} = \begin{cases} E_x = E_0 \cos(\omega t - kz) \\ E_y = E_0 \sin(\omega t - kz) \end{cases}$

Polarisation circulaire droite (PC_D): $\vec{E} = \begin{cases} E_x = E_0 \cos(\omega t - kz) \\ E_y = -E_0 \sin(\omega t - kz) \end{cases}$



Polarisation circulaire gauche (PC_G)

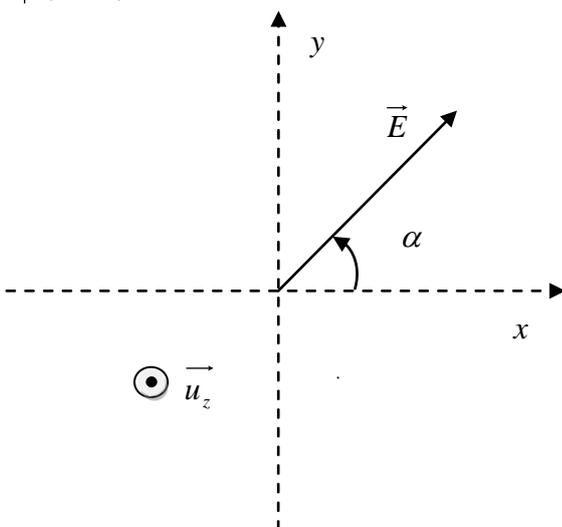


Polarisation circulaire droite (PC_D)

4. Polarisation linéaire

Lorsque le champ électrique \vec{E} vibre selon une ellipse dégénérée, alors le champ électrique \vec{E} vibre selon une direction fixe dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. On parle alors de polarisation rectiligne. Les deux composantes selon Ox et Oy du champ électrique vibrent en phase $\varphi = 0$:

$$\vec{E} = \begin{cases} E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \\ E_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \end{cases}$$



Polarisation rectiligne avec

$$\tan \alpha = \frac{E_{x0}}{E_{y0}}$$

La vibration s'effectue selon une direction fixe pointée par le vecteur unitaire de direction fixe \vec{u} .
 On peut écrire que pour une polarisation rectiligne (PR) : $\vec{E} = E_0 \vec{u} \cos(\omega t - kz + \varphi)$

5. Lumière « naturelle »

La lumière naturelle (par exemple celle émise par le Soleil, ou une ampoule) possède une certaine étendue en fréquence. Afin de se rapprocher de l'étude précédente, on s'intéresse à de la lumière naturelle, après l'action d'un filtre permettant d'isoler une très mince bande en fréquence, qu'on considérera comme quasi monochromatique.

L'onde obtenue, si elle est bien transverse, n'a aucune raison d'être polarisée⁴. Les deux composantes du champ vibrent de manière incohérente. Cela peut se modéliser sous la forme de l'expression précédente (1), mais où le déphasage $\varphi(t)$ est une fonction aléatoire variant très rapidement dans le temps :

$$\vec{E} = \begin{cases} E_{x0} \cos(\omega t - kz) \\ E_{y0} \cos(\omega t - kz - \varphi(t)) \end{cases}$$

Ainsi, la « courbe » décrite par l'extrémité de \vec{E} dans un plan perpendiculaire à sa direction de propagation couvre la totalité d'un carré (les deux amplitudes E_{x0} et E_{y0} sont égales par symétrie pour la lumière naturelle).

5. Décomposition de l'état général d'une polarisation

1. Décomposition à l'aide d'une base orthogonale de polarisation rectiligne

On remarque de surcroît que l'on peut réécrire le champ \vec{E} , du fait de la linéarité des équations de Maxwell comme la superposition de deux ondes polarisées rectilignement selon Ox et selon Oy avec :

$$\vec{E} = \begin{vmatrix} E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \\ E_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} E_{x0} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \\ 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ E_{y0} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \end{vmatrix}$$

Toute polarisation d'un champ électrique \vec{E} peut être décomposée en somme de deux polarisations rectilignes mutuellement orthogonales.

2. Décomposition à l'aide d'une base orthogonale de polarisation circulaire

En prenant pour origine des phases $\varphi_x = 0$, on peut aussi décomposer la polarisation rectiligne selon Ox selon :

$$\vec{E} = \begin{vmatrix} E_0 \cos(\omega t - kz) \\ 0 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} E_0 \cos(\omega t - kz) \\ E_0 \sin(\omega t - kz) \end{vmatrix} + \frac{1}{2} \begin{vmatrix} E_0 \cos(\omega t - kz) \\ -E_0 \sin(\omega t - kz) \end{vmatrix}$$

Ceci signifie qu'une onde polarisée rectilignement selon Ox s'interprète aussi comme la superposition d'une polarisation circulaire droite et d'une polarisation circulaire gauche de mêmes amplitudes.

On peut aussi décomposer la polarisation rectiligne selon Oy selon :

$$\vec{E} = \begin{vmatrix} 0 \\ E_0 \sin(\omega t - kz + \varphi) \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi) \\ E_0 \sin(\omega t - kz + \varphi) \end{vmatrix} + \frac{1}{2} \begin{vmatrix} E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi) \\ -E_0 \sin(\omega t - kz + \varphi) \end{vmatrix}$$

Ceci signifie qu'une onde polarisée rectilignement selon Oy s'interprète aussi comme la superposition d'une polarisation circulaire droite et d'une polarisation circulaire gauche de mêmes amplitudes.

Toute polarisation d'un champ électrique \vec{E} peut être décomposée en somme de deux polarisations circulaires gauche et droite. Ces deux polarisations correspondent à des états de polarisation mutuellement orthogonales.

IV. Polarisation rectiligne

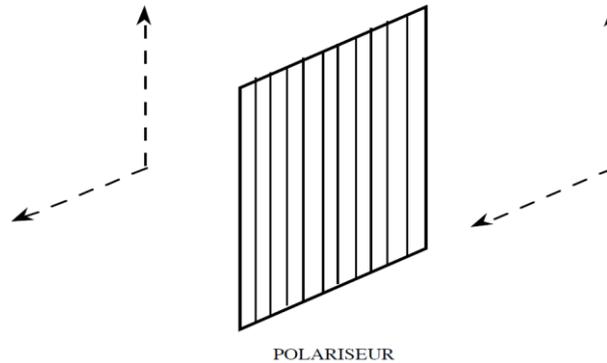
1. Polarisation par une grille

Nous avons déjà vu qu'une onde électromagnétique arrivant en incidence normale sur un conducteur parfait est totalement réfléchi par celui-ci. Il en est de même pour une onde polarisée rectilignement arrivant sur une grille conductrice dont les fils sont parallèles à la direction de polarisation du champ, l'écartement des fils étant petit par rapport à la longueur d'onde dans le vide de l'onde.

En effet, le parallélisme des fils et du champ électrique \vec{E} incident permet la création de courants dans ces fils, courants qui engendrent l'onde réfléchi. L'écartement des fils est en outre trop faible pour permettre la propagation d'ondes guidées entre les fils, avec un champ \vec{E} parallèle aux fils.

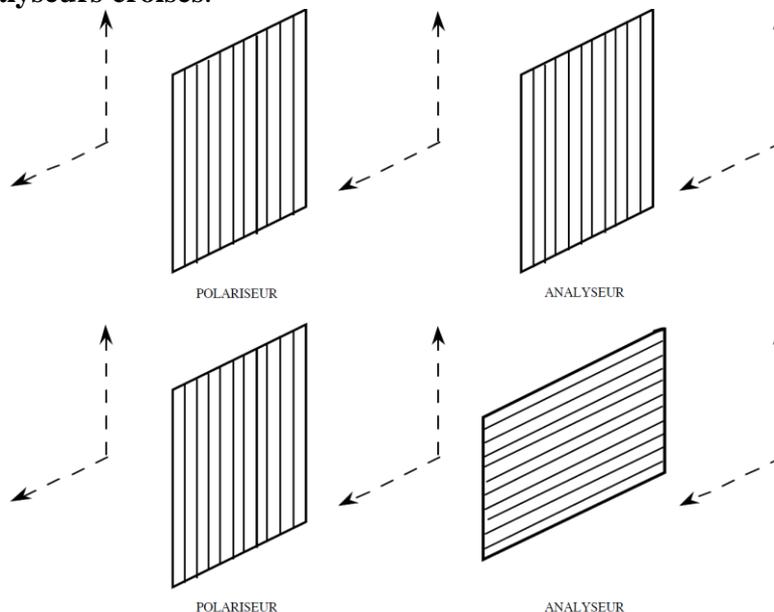
En revanche, si le champ incident est polarisé orthogonalement à la direction des fils, aucun courant n'est engendré, et la propagation « entre » les fils est possible avec un champ orthogonal : l'onde incidente est entièrement transmise. Par conséquent, pour une onde incidente non polarisée, le champ \vec{E} incident peut toujours être décomposé en une composante parallèle aux fils et une composante orthogonale : la composante parallèle est réfléchi, la composante normale est transmise.

Après la grille, on obtient donc une onde polarisée rectilignement, de direction de polarisation orthogonale aux fils de la grille : cette grille constitue un **polariseur rectiligne**.



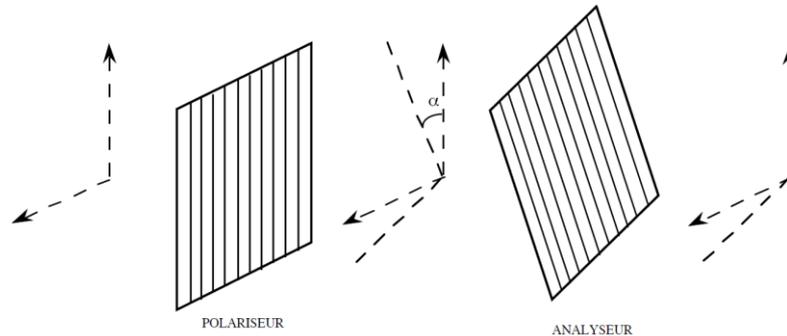
2. Analyse d'une polarisation rectiligne par une grille

Une grille du même type que le polariseur pourra servir de détection d'une lumière polarisée. En effet, si on place une deuxième grille du même type que le polariseur derrière celui-ci, celle-ci « laisse passer » l'onde polarisée si ses fils sont orthogonaux à la direction de polarisation (donc en fait parallèles à ceux du polariseur) et la réfléchit totalement si ses fils sont parallèles à la direction de polarisation (donc en fait orthogonaux à ceux du polariseur). Cette deuxième grille est alors appelée **analyseur**. Quand on peut observer avec un analyseur « l'extinction » complète d'une onde, c'est que celle-ci était polarisée rectilignement. Dans l'expérience précédente, la configuration des 2 grilles permettant l'extinction est dite **polariseur et analyseurs croisés**.



3. Conséquence : loi de Malus pour une polarisation rectiligne incidente

Imaginons enfin que les deux directions des fils du polariseur et de l'analyseur fassent entre elles un angle α . Le polariseur a "fabriqué" une onde rectiligne de direction y, de module E_0 . Le champ \vec{E} de cette onde doit à nouveau être décomposé suivant les axes X et Y. Seule la composante $E_Y = E_0 \cos \alpha$ est transmise. L'onde finale est polarisée suivant Y, de module $E_0 \cos \alpha$. L'énergie de l'onde est alors transportée par le vecteur de Poynting dont le module varie en $\cos^2 \alpha$ avec l'angle α .



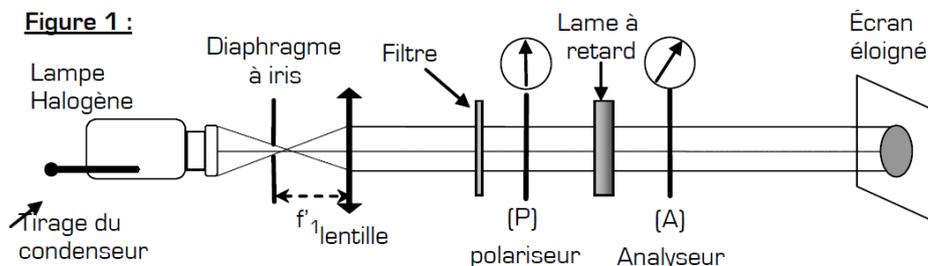
Les considérations précédentes s'étendent évidemment aux ondes dont le domaine de fréquences est celui de l'optique : pour ces ondes l'écartement des fils de la grille devra être petit devant λ , c'est-à-dire devant des distances de l'ordre du μm . En optique, les polariseurs sont en fait constitués de milieux transparents, appelés **polaroïds**, comportant des longues chaînes moléculaires créées par étirement et rendues conductrices, qui se comportent comme les fils de la grille métallique.

Ces milieux transmettent alors totalement une onde polarisée rectilignement suivant une direction spécifique et pas du tout suivant la direction orthogonale : c'est le **dichroïsme**.

L'intensité lumineuse associée à l'onde ayant traversé polariseur et analyseur faisant entre eux un angle α varie alors suivant la loi de Malus : $I = I_0 \cos^2 \alpha$

4. Manipulation :

1. Le montage de base pour les expériences à réaliser :



- Réaliser le montage ci-dessous.
 - Veillez à centrer les différents éléments. Les lames à retard seront introduites en deuxième partie du TP. Ne pas les positionner entre le polariseur et l'analyseur.
 - Agir sur la tige du condenseur pour concentrer au mieux la lumière sur le diaphragme circulaire.
 - Placez-le dans le plan focal objet d'une lentille convergente (de focale voisine de 10 cm) pour obtenir en sortie un faisceau parallèle.
 - Réglez l'ouverture du diaphragme à iris pour que le faisceau parallèle ne soit pas diaphragmé par les différents éléments (lentille, polariseurs, filtres, lames).
 - Lorsque vous utiliserez des lames demi-onde ou quart d'onde, pensez éventuellement à utiliser la source à vapeur de sodium (qui émet principalement dans la bande de longueurs d'onde pour laquelle les lames sont conçues), juste avant le polariseur (donc dans la partie parallèle du faisceau lumineux). Sinon, garder la lampe blanche pour mener les expériences.
- Éventuellement, vous pourrez placer après l'analyseur une deuxième lentille (de focale voisine de 30 cm) et observer sur l'écran placé dans son plan focal image. Utiliser une photodiode pour réaliser les mesures quantitatives.

2. En utilisant le montage précédent, Montrer que la lumière naturelle est non polarisée. Proposer une expérience.

3. L'orientation du plan de polarisation d'une lumière naturelle ayant traversé un polariseur rectiligne dépend-elle de la longueur d'onde ? Proposer et réaliser une expérience pour répondre à cette question

4. Comment déterminer la direction d'extinction absolue d'un polariseur rectiligne (Pensez à l'incidence de Brewster) ? Quelle direction indique l'index de la monture ? Pour répondre à cette question, on utilisera les données fournies dans l'activité documentaire en annexe à ce TP

5. Etude expérimentale de la loi de MALUS :

a) Remplacer l'écran par une photodiode branchée à un voltmètre. Utiliser éventuellement une lentille convergente pour focaliser le faisceau sur la partie active du détecteur. La tension U lue aux bornes de la photodiode est proportionnelle à l'intensité lumineuse reçue sur le détecteur.

Toutes les mesures de luminosité à l'aide de la photodiode seront précédées d'une mise à zéro de la valeur lue en présence de la seule lumière parasite (il suffit de masquer le faisceau direct).

Tous les dispositifs polarisants seront disposés dans la zone marquée Z sur le schéma ; on devra donc veiller à ce que les faisceaux lumineux soient, dans cette zone, quasiment parallèles. Il faudra donc éloigner le plus possible l'écran E de la lentille L .

Dans le faisceau de sortie du diaphragme, disposer deux polariseurs rectilignes (polaroïds jouant respectivement le rôle du polariseur et de l'analyseur) faisant entre eux un angle arbitraire θ . On choisira l'origine des angles de sorte que $\theta = 0$ corresponde à un maximum de lumière à repérer au préalable.

b) Compléter le tableau ci-dessous et tracer la courbe donnant $U(\theta)$ sous Regressi.

θ (°)	0	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
$U(\theta)$											
$U(\theta) / U(0)$											

c) Proposer une modélisation mathématique permettant de reproduire les variations de $U(\theta)$. Conclure en validant expérimentalement (ou non) la loi de Malus.

V. Polarisation elliptique

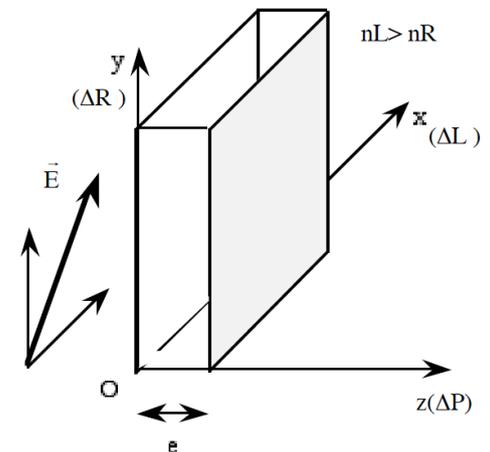
1. Action des lames à retard

Dans un milieu diélectrique homogène isotrope toutes les directions de l'espace sont équivalentes, l'indice n est finalement qu'une constante unique du diélectrique.

Dans les milieux anisotropes, il en va différemment : il existe en particulier des milieux **biréfringents**, caractérisés par deux axes orthogonaux à chacun desquels on associe un indice différent : ainsi, une onde se propageant orthogonalement au plan de ces deux axes, et dont le champ électrique est polarisé suivant l'un des ces axes "verra" l'indice associé. A ces deux indices correspondent évidemment des vitesses de phase différentes.

L'axe de plus grand indice, donc de plus faible vitesse, est appelé axe lent L et l'autre axe rapide R. Ces axes constituent ce que l'on appelle les lignes neutres. Une onde pénétrant en incidence normale dans un tel milieu, et polarisée suivant l'axe lent ou l'axe rapide, ressortira du milieu avec la même polarisation. Par contre, une onde polarisée elliptiquement devra être décomposée suivant les deux axes. Les deux composantes ne se propagent pas à la même vitesse selon chaque axe de polarisation, elles ressortiront déphasées l'une par rapport à l'autre, ce qui peut modifier notablement l'état de polarisation de l'onde.

On conçoit donc qu'on peut utiliser les milieux diélectriques biréfringents pour fabriquer des lames transparentes, taillées de façon à ce qu'elles soient traversées en incidence normale par rapport au plan $(\Delta L, \Delta R)$ et qui serviront à modifier l'état de polarisation d'une onde qui les a traversées.



Plus précisément, examinons la propagation d'une onde dans la lame. Nous prendrons le système axe lent, axe rapide, axe de propagation, noté (L, R, P) comme système d'axes de projection.

En prenant l'origine de la propagation à l'entrée de la lame, en posant $\varphi_x = 0$ (id. $\varphi_y = -\varphi$) le champ \vec{E} est décomposé en entrée :

$$\vec{E} = \begin{cases} E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \\ E_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz - \varphi) \end{cases}$$

A la sortie de la lame, d'épaisseur e suivant Oz, le champ sera déphasé du fait de la propagation par l'ajout d'un déphasage différent selon les deux composantes de polarisation selon l'axe lent ou l'axe rapide de la lame :

- pour la composante polarisée suivant Ox (axe lent) le déphasage vaut $\varphi'_x = n_L k e = n_L \frac{\omega}{c} e$ où n_L est l'indice de réfraction associé à l'axe lent
- pour la composante polarisée suivant Oy (axe rapide) le déphasage vaut $\varphi'_y = n_R k e = n_R \frac{\omega}{c} e$ où $n_R < n_L$ est l'indice de réfraction associé à l'axe rapide.

On obtient la décomposition suivante :

$$\vec{E} = \begin{cases} E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz - \varphi'_x) \\ E_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz - \varphi - \varphi'_y) \end{cases}$$

En ramenant l'origine de la propagation à la sortie de la lame pour la composante lente, le champ sera par la suite de la forme :

$$\vec{E} = \begin{cases} E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \\ E_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz - \varphi - \varphi'_y + \varphi'_x) \end{cases} \text{ soit } \vec{E} = \begin{cases} E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \\ E_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz - \varphi - \varphi') \end{cases}$$

avec $\varphi' = \varphi'_y - \varphi'_x = (n_R - n_L) \frac{\omega}{c} e$

On en conclue que lorsque les lames sont attaquées par des polarisations rectilignes incidentes orientées selon les axes L ou R (lignes neutres), l'état de polarisation en sortie demeure inchangé.

Par contre, lorsque la polarisation est elliptique non dégénérée, la polarisation de l'onde incidente est modifiée par l'introduction **d'un retard de phase de la composante suivant l'axe lent par rapport à la composante suivant l'axe rapide**. La lame est appelée **lame à retard** et possède des propriétés particulières suivant la valeur de e . Le contrôle de l'épaisseur e permet entre autre de créer des lames dites lames demi-onde (très souvent désignées par $\lambda / 2$) et des lames quart d'onde (très souvent désignées par $\lambda / 4$).

Action d'une lame demi-onde $\lambda / 2$:

Elles sont construites de telle sorte que : $\varphi' = \varphi'_y - \varphi'_x = (n_R - n_L) \frac{\omega}{c} e = -\pi$ soit encore tel que :

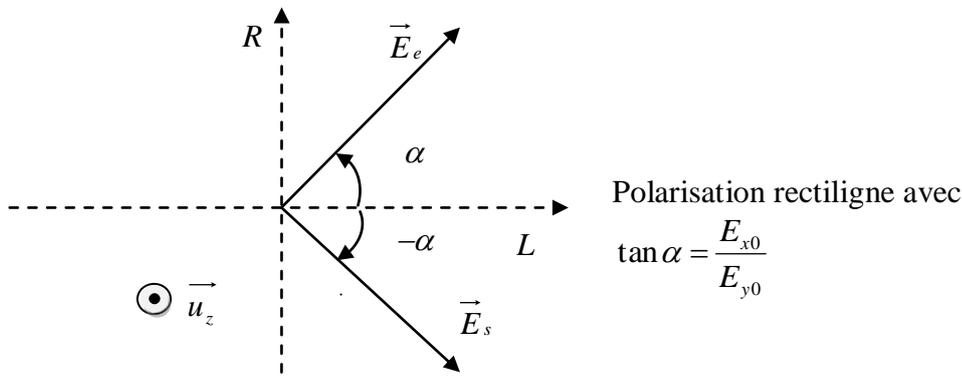
$$(n_L - n_R) e = +\pi \frac{c}{\omega} = \frac{\lambda}{2}$$

On peut résumer l'action de la lame demi-onde sur les composantes du champ entre l'entrée et la sortie de la lame par un déphasage de $+\pi$ entre les deux composantes de la polarisation du champ

$$\vec{E} = \begin{cases} E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \\ E_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz - \varphi + \pi) \end{cases} \text{ soit } \vec{E} = \begin{cases} E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \\ E_y = -E_{y0} \cos(\omega t - kz - \varphi) \end{cases}$$

L'action de la lame demi-onde est donc similaire à un « opérateur » (1,-1) sur les deux composantes de la polarisation incidente. Ceci a pour effet de renverser une polarisation incidente rectiligne (champ \vec{E}_e sur la figure) en son symétrique \vec{E}_s par rapport aux lignes neutres de la lame.

Si la polarisation est elliptique gauche en entrée, elle ressort elliptique droite et inversement.



Action d'une lame quart d'onde $\lambda / 4$:

Elles sont construites de telle sorte que : $\varphi' = \varphi'_y - \varphi'_x = (n_R - n_L) \frac{\omega}{c} e = -\frac{\pi}{2}$ soit encore tel que :

$$(n_L - n_R)e = +\frac{\pi}{2} \frac{c}{\omega} = \frac{\lambda}{4}$$

On peut résumer l'action de la lame quart d'onde sur les composantes du champ entre l'entrée et la sortie de la lame par un déphasage de $+\pi/2$ entre les deux composantes de la polarisation du champ

$$\vec{E} = \begin{cases} E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \\ E_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz - \varphi + \pi/2) \end{cases} \text{ soit } \vec{E} = \begin{cases} E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \\ E_y = E_{y0} \sin(\omega t - kz - \varphi) \end{cases}$$

Si la polarisation est circulaire en entrée, elle ressort rectiligne à 45° des lignes neutres.

Si la polarisation rectiligne incidente est inclinée à 45° des lignes neutres, la polarisation de l'onde en sortie d'une lame $\lambda / 4$ est circulaire.

2. Action d'une lame demi-onde

1. Reprendre le montage de la figure 1. Régler les polariseurs et analyseur de façon à avoir une extinction totale de la lumière transmise. Justifier alors que le polariseur et l'analyseur sont croisés. On parle de configuration PAC.
2. Interposer entre les polariseurs et les analyseurs une lame biréfringente à retard demi-onde ($\lambda / 2$).
3. Repérer les lignes neutres de cette lame en recherchant une extinction de l'intensité transmise entre le polariseur et l'analyseur croisés (90°).
4. Incliner ensuite la lame demi onde d'un angle d'environ $\alpha = 30^\circ$ par rapport aux lignes neutres précédemment repérées.
5. Montrer alors avec l'analyseur que la lumière ressort polarisée rectilignement. Proposer un protocole.
6. Déterminer alors la polarisation de la lumière en sortie de la lame demi-onde.

3. Utilisation d'une lame quart d'onde pour la synthèse d'une polarisation elliptique à partir d'une polarisation rectiligne

1. Reprendre le montage de la figure 1. Régler les polariseurs et analyseur de façon à avoir une extinction totale de la lumière transmise. Justifier alors que le polariseur et l'analyseur sont croisés. On parle de configuration PAC.
2. Interposer entre les polariseurs et les analyseurs une lame biréfringente à retard quart d'onde.
3. Repérer les lignes neutres de cette lame en recherchant une extinction de l'intensité transmise entre le polariseur et l'analyseur croisés (90°). Incliner ensuite la lame quart d'onde d'un angle d'environ $\alpha = 30^\circ$ par rapport aux lignes neutres précédemment repérées. La lumière est alors polarisée elliptiquement.

4. Analyse d'une polarisation elliptique

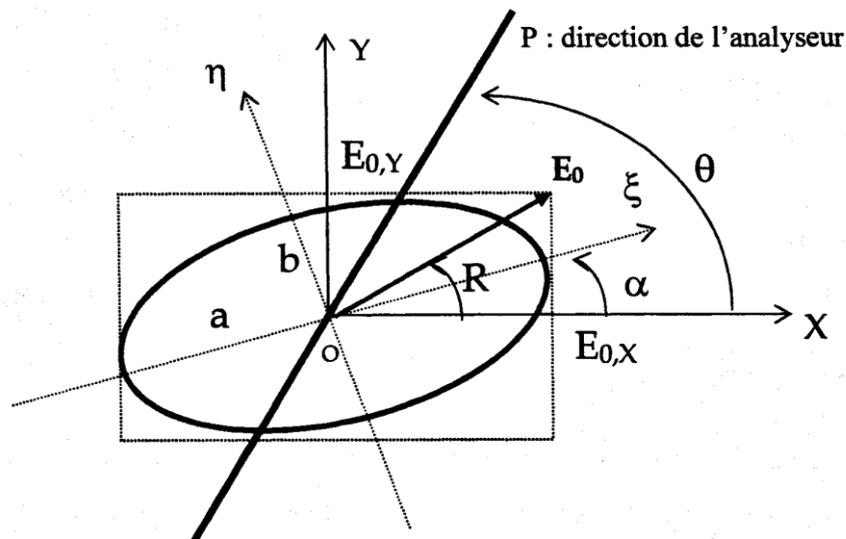
1. Etude qualitative

Procéder à nouveau de même que pour l'étude de la loi de Malus en faisant tourner l'angle de l'analyseur par rapport à celle des directions du polariseur et des lignes neutres de la lame à retard maintenues fixes. Qu'observe-t-on et que peut-on en déduire ?

2. Etude quantitative

Procéder à nouveau de même que pour l'étude de la loi de Malus et compléter le tableau ci-dessous.

$\theta(^{\circ})$	0	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
$U(\theta)$											
$U(\theta)/I(\max)$											



On propose de modéliser l'intensité mesurée par le détecteur par en fonction des caractéristiques de la polarisation elliptique : $\frac{I(\theta)}{I(0)} = (a^2 - b^2) \cos^2(\theta - \alpha) + b^2$.

Utiliser cette modélisation.

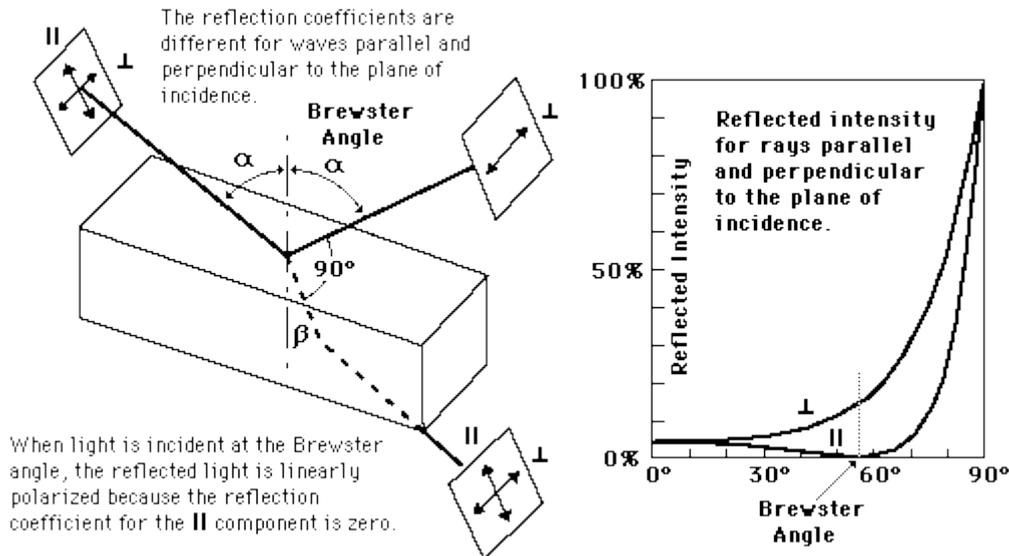
4. Dans cette formule, a et b sont les longueurs des demi axes de l'ellipses (voir schéma).

Annexe 1 : Activité documentaire

Polarisation par réflexion à incidence de Brewster

Lorsqu'une onde électromagnétique arrive en incidence sur une interface, on peut décomposer la direction du champ électrique (ou polarisation) en deux composantes :

- l'une contenue dans le plan d'incidence notée (p) ou \parallel
- l'autre perpendiculaire au plan d'incidence notée (s) ou \perp



Lors d'une réflexion sur l'interface entre deux milieux d'indices différents (air/verre typiquement, il faut que $n_1 < n_2$), les coefficients de réflexion (en puissance ou intensité) dépendent de l'angle d'incidence et de la direction de polarisation. On observe en particulier que dans la lumière réfléchie, la composante perpendiculaire au plan d'incidence (notée (s) ou \perp) prédomine.

La composante parallèle au plan d'incidence, notée (p) ou \parallel , peut même s'annuler pour une direction d'incidence bien particulière qui dépend des indices n_1 et n_2 , appelée incidence de Brewster.

Si l'on ne dispose pas d'un analyseur connu, on peut utiliser la polarisation par réflexion vitreuse sous incidence de Brewster. En effet, on fabrique ainsi une onde rectiligne dont on connaît la direction de polarisation (orthogonale au plan d'incidence). Il suffit alors de placer sur le trajet de l'onde réfléchie le polariseur inconnu, qui sert ici d'analyseur : l'extinction est obtenue quand la direction de polarisation de cet analyseur est dans le plan d'incidence.

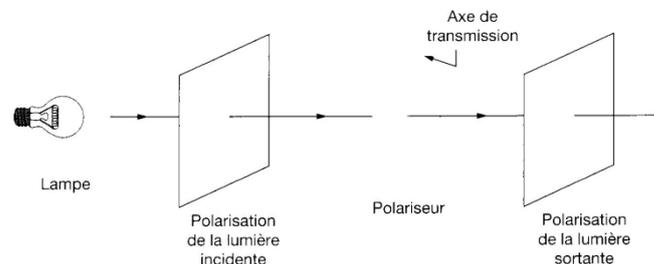
ANNEXE 2 : Polariseurs et analyseurs

1. Polariseur

Un polariseur est un système optique (qu'on considérera plan) possédant deux directions privilégiées. L'une d'entre elles, appelée axe de transmission, est telle que le polariseur transmet la composante du champ électrique incident parallèle à l'axe de transmission et arrête la composante perpendiculaire.

La lumière sortant d'un polariseur est polarisée rectilignement, parallèlement à la direction de l'axe de transmission, quelle que soit la nature de la lumière incidente.
En outre, si la lumière incidente est polarisée rectilignement selon la direction perpendiculaire à l'axe de transmission, alors aucune lumière ne sort du polariseur.

Par exemple, sur la figure ci-dessous, un polariseur est éclairé en lumière parallèle naturelle. Le champ électrique arrivant sur le polariseur vibre dans toutes les directions perpendiculaires à la direction de propagation. À la sortie du polariseur, le champ vibre dans la direction de l'axe de transmission : la lumière transmise est polarisée rectilignement.



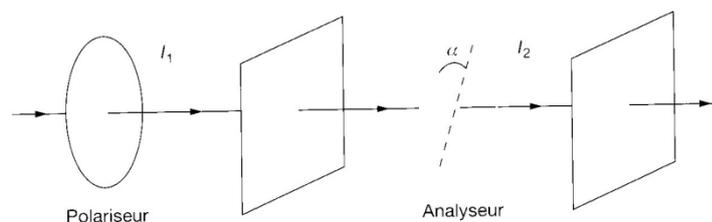
2. Loi de Malus

Considérons deux polariseurs, l'un à la suite de l'autre, dont les axes de transmission respectifs font un angle α . À la sortie du premier polariseur, le champ électrique est polarisé rectilignement selon la direction \vec{u}_1 , du premier axe de transmission. Après le second polariseur, souvent appelé analyseur, la lumière est polarisée rectilignement selon \vec{u}_2 , direction de son axe de transmission. Le champ électrique après le premier polariseur est noté $\vec{E}_1 = E_1 \vec{u}_1$. Après l'analyseur, le champ transmis est : $\vec{E}_2 = E_2 \vec{u}_2 = E_1 \cos \alpha \vec{u}_2$. Comme l'intensité de l'onde électromagnétique est proportionnelle au carré de l'amplitude du champ, on en déduit la loi de Malus : $I_2 = I_1 \cos^2 \alpha$

Conclusion :

Quand on place successivement un polariseur et un analyseur, l'intensité lumineuse I_1 après le polariseur est liée à l'intensité I_2 après l'analyseur par la loi de Malus :

$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha$ où α est l'angle entre les axes de transmission du polariseur et de l'analyseur.



Cette expression appelle quelques commentaires. Si $\alpha = 0$ (π), alors les axes de transmission des deux polariseurs sont parallèles, et l'analyseur laisse passer tout le champ qui lui est incident : $I_2 = I_1$.

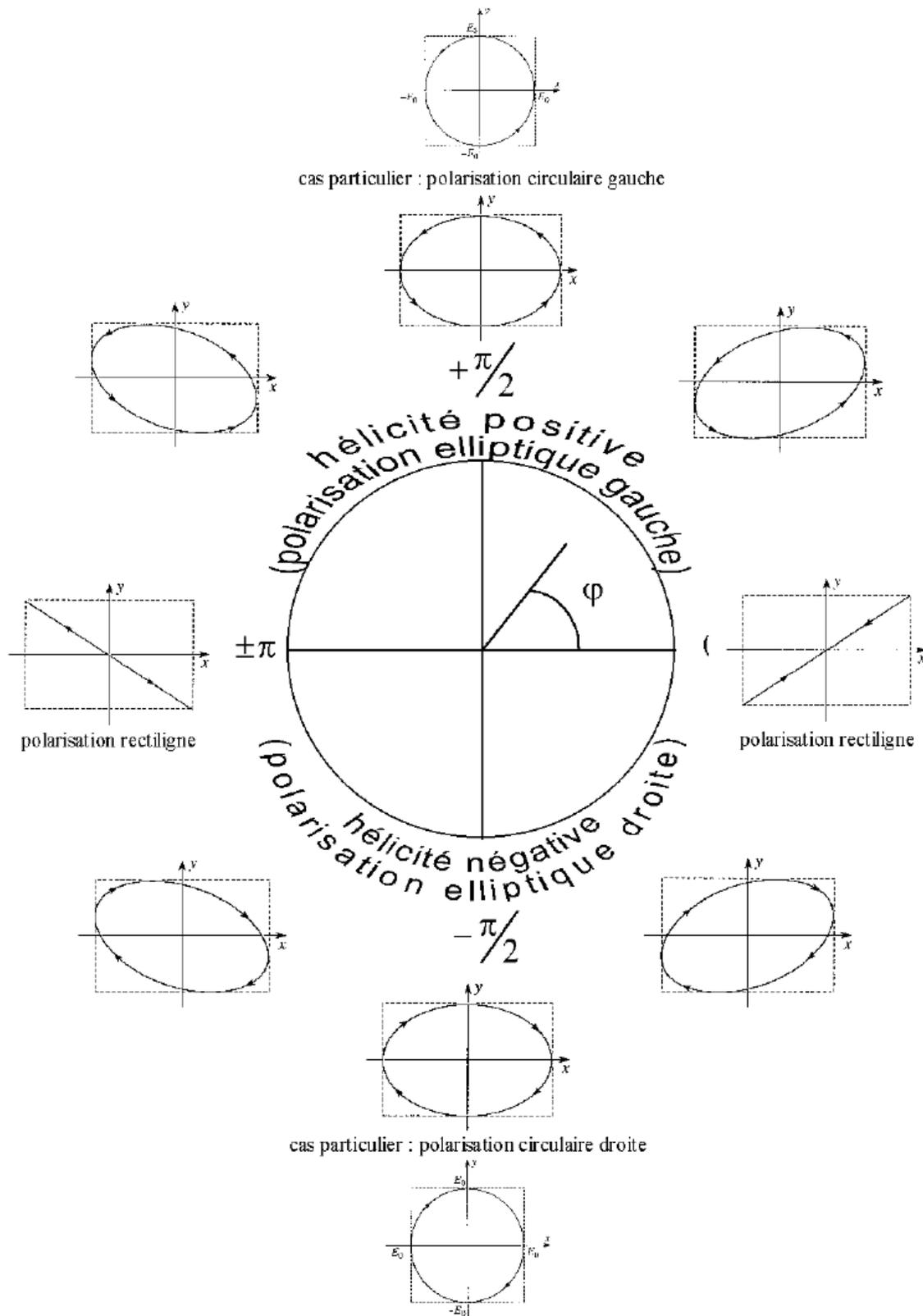
Si $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (π) (polariseurs croisés), l'analyseur arrête complètement l'onde incidente car elle est polarisée rectilignement perpendiculairement à son axe de transmission : $I_2 = 0$. Ces remarques permettent de connaître la direction relative des axes de transmission de deux polariseurs.

ANNEXE 3 : Récapitulatif

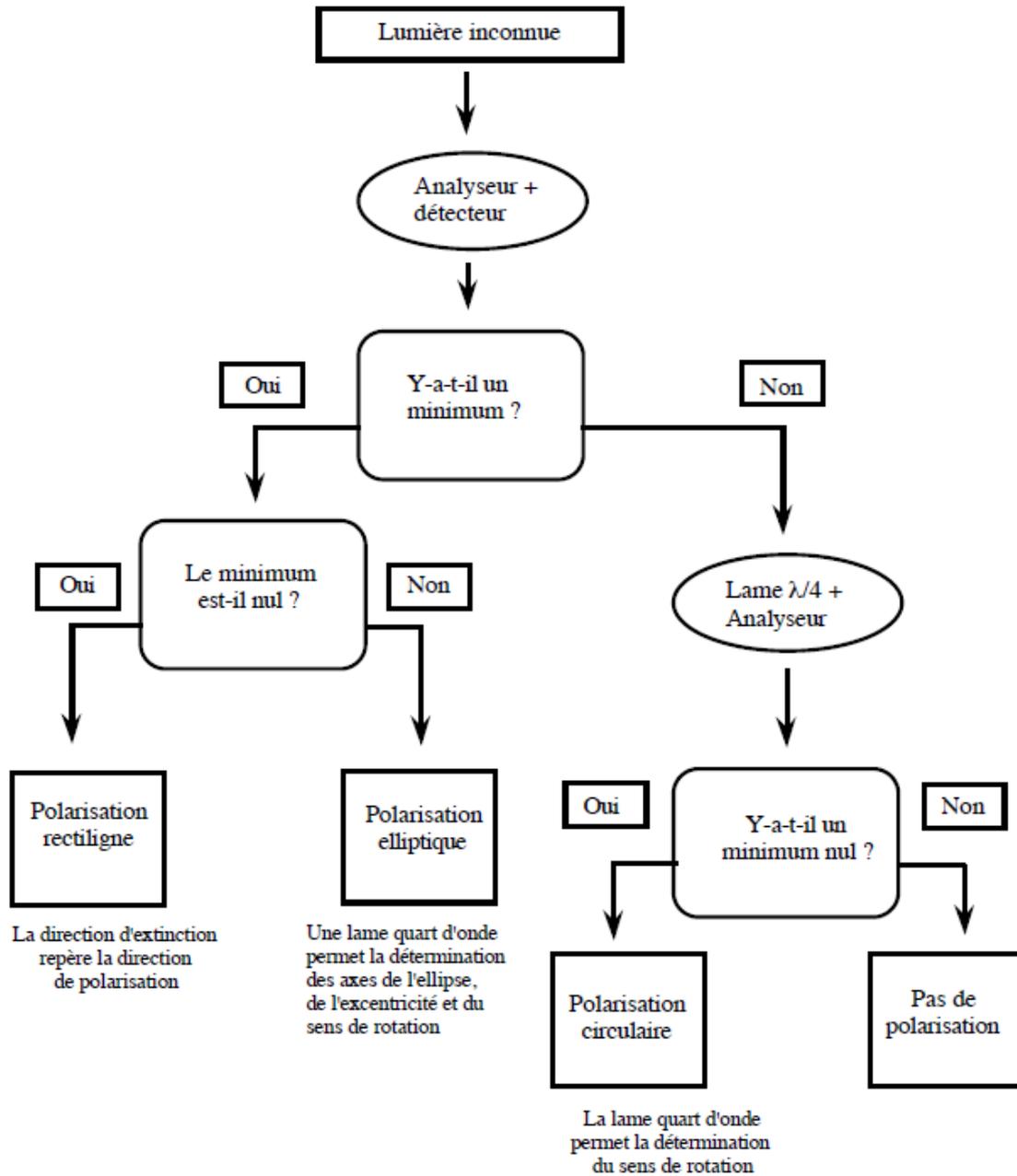
Sans perte de généralité, on peut poser $\varphi_x = 0$ par un choix convenable de l'origine des temps. On obtient

alors : $\varphi = -\varphi_y$ et $\vec{E} = \begin{cases} E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz) \\ E_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz - \varphi) \end{cases}$

Le schéma ci-dessous, donne la description des états de polarisation



ANNEXE 4 : Analyse d'une polarisation



MATERIEL :

- 3 polariseurs (filtres polaroid ou dichroïques)
- Lampe blanche 12 V avec condenseur (Quartz-iode)
- Photodiode
- Oscilloscope numérique
- Multimètre
- Lames biréfringentes $\frac{\lambda}{4}$ et $\frac{\lambda}{2}$
- 1 lampe de poche
- 1 poste informatique
- Jeu de lentille 100, 200, 300 mm
- Ecran blanc
- Un diaphragme à iris,
- Une source spectrale à vapeur de sodium