Polarisation des ondes lumineuses

On rappelle que l'on ne doit jamais diriger un faisceau laser directement vers son œil !!!

I- Polarisation des ondes lumineuses (à lire avant le TP)

A- Polarisation rectiligne

1- Définition

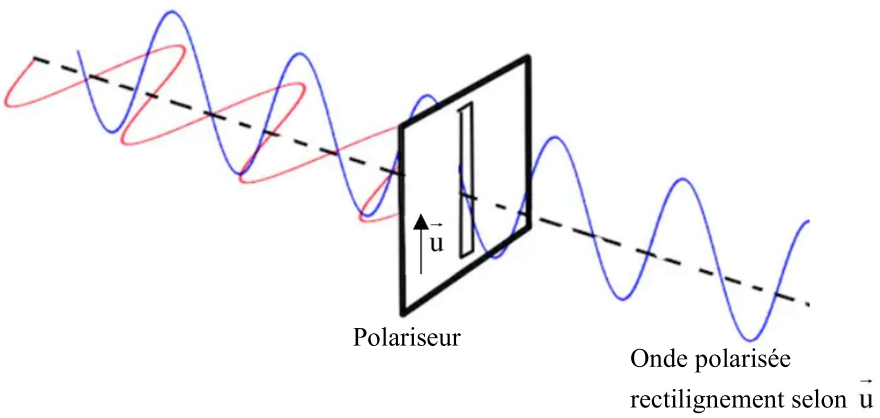
Une onde électromagnétique dont le champ électrique garde une orientation constante de vecteur unitaire $\vec{u}$ est dite **polarisée rectilignement** selon $\vec{u}$

$\vec{u}$ définit la polarisation rectiligne de l'onde.

2- Production d'une onde polarisée rectiligne : utilisation d'un polariseur.

Les filtres polarisants les plus courants sont constitués d'une feuille mince qui est transparente si le champ électrique de l'onde est parallèle à une direction caractéristique (de vecteur unitaire $\vec{u}$) et quasiment opaque si $\vec{E}$ est orthogonal à cette direction.

Schéma de principe



3- Analyseur d'une lumière polarisée rectilignement

Un filtre polarisant est appelé **analyseur** lorsqu'il agit sur une lumière déjà polarisée. Matériellement, il est identique à un polariseur.

On identifie une onde polarisée rectilignement en faisant tourner un analyseur placé dans un plan d'onde. S'il existe une position de l'analyseur pour laquelle l'intensité de la lumière transmise est nulle, on peut conclure que :

- l'onde incidente est polarisée rectilignement ;
- sa direction de polarisation est normale à la direction caractéristique $\vec{v}$ de l'analyseur lors de l'extinction.

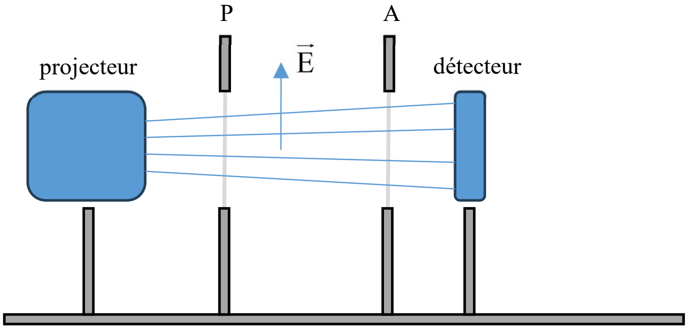
En revanche, si l'onde n'est pas polarisée rectilignement, il est impossible d'aligner de façon permanente le champ $\vec{E}$ avec la direction normale à $\vec{v}$ et il est imposante d'éteindre l'onde transmise.

4- Montage « polariseur et analyseur croisé »

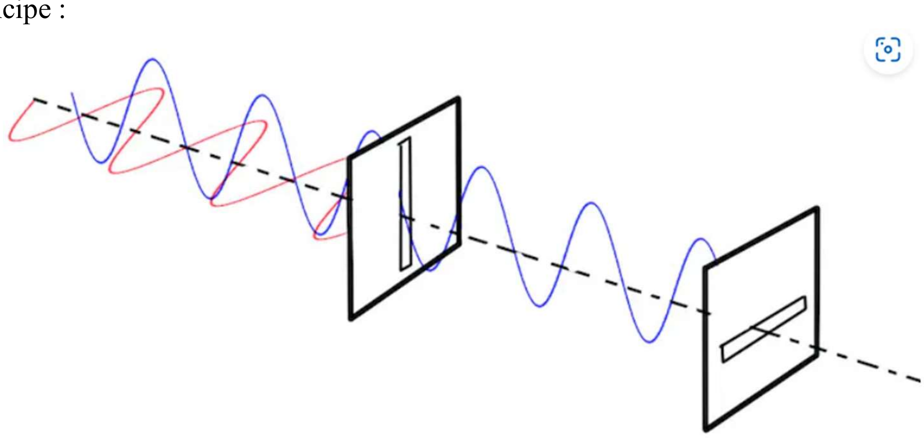
Réalisons le montage représenté sur le schéma ci-dessous. Le détecteur peut être simplement un écran observé visuellement ou une cellule photoélectrique.

- Entre le polariseur P et l'analyseur A, l'onde lumineuse est polarisée rectilignement selon la direction caractéristique $\vec{u}$ du polariseur.

- Faisons tourner l'analyseur. Nous constatons que l'intensité transmise varie avec l'orientation de l'analyseur ; l'intensité transmise est quasiment nulle pour une direction bien précise telle que la direction caractéristique de l'analyseur, $\vec{v}$, est normale à $\vec{u}$ [1].



Principe :

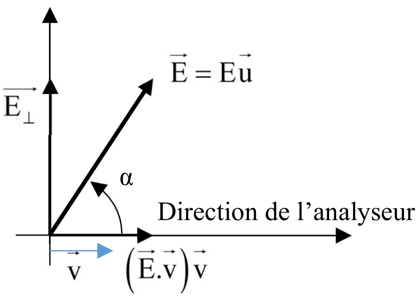


- Pour analyser une lumière inconnue est déterminée si elle est polarisée rectilignement, on utilisera simplement un analyseur qui interceptera le faisceau lumineux. Si une orientation de l'analyseur permet l'extinction du faisceau transmis, la lumière est polarisée.

5- Loi de Malus

Un faisceau de lumière polarisée rectilignement selon la direction $\vec{u}$ est intercepté par un polariseur, normal à la direction de propagation, et de direction caractéristique $\vec{v}$.
E_0 et I_0 sont l'amplitude et l'intensité (proportionnelle à l'amplitude) de l'onde incidente. E et I sont l'amplitude et l'intensité de l'onde émergente, α est l'angle entre $\vec{u}$ et $\vec{v}$. I suit la **loi de Malus :**

$$\boxed{I = I_0 \cos^2 \alpha}$$



Preuve : l'onde incidente est polarisée rectilignement : $\overrightarrow{E_{inc}} = E_0(M,t)\vec{u}$ et $I_0 = K\langle E_{inc}^2 \rangle = KE_0^2$

[1] Un procédé de cinéma en relief utilise ce principe. L'appareil de prise de vues réalise deux films, correspondant à la vision de chaque œil. A la projection, les deux films sont projetés simultanément sur le même écran, mais on place à la sortie des deux projecteurs des polariseurs orientés orthogonalement. Chaque spectateur est équipé de lunettes dont les verres sont des filtres polarisants orientés orthogonalement. Chaque verre joue le rôle d'un analyseur croisé avec l'un des polariseurs. Chaque œil ne perçoit donc qu'une des deux images, ce qui restitue l'impression de relief

$\overrightarrow{E_{inc}} = E_0(M,t)\cos(\alpha)\vec{v} + E_0(M,t)\sin(\alpha)\overrightarrow{v_\perp}$

L'onde polarisée selon $\overrightarrow{v_\perp}$ est absorbée par le polariseur et l'onde transmise selon $\vec{v}$ est intégralement transmise. Après le polariseur : $\overrightarrow{E_{transmis}} = E_0(M,t)\cos(\alpha)\vec{v}$ et $I_0 = K\langle E^2_{transmis}\rangle = KE_0^2\cos^2\alpha$

B- Etats de polarisation de l'onde

La polarisation rectiligne est un cas particulier d'état de polarisation (cf annexe)

C- Lumière non polarisée

Les sources classiques de lumière sont constituées d'un très grand nombre d'émetteurs (molécules) qui émettent des trains d'ondes incohérents entre eux et de polarisation aléatoire. La superposition des différentes ondes émises sera modélisée par : $\vec{E}(z,t) = \begin{pmatrix} E_{0x}(t)\cos(\omega t - kz + \varphi_x(t)) \\ E_{0y}(t)\cos(\omega t - kz + \varphi_y(t)) \\ 0^* \end{pmatrix}$ [2]

Les amplitudes E_{0x}, E_{0y} et les phases initiales φ_x et φ_y sont des fonctions variant lentement dans le temps à l'échelle de la période du signal lumineux.

Les directions $\overrightarrow{u_x}$ et $\overrightarrow{u_y}$ sont équivalentes dans le cas d'une lumière « naturelle » donc $E_{0x} = E_{0y} = E_0$

Après un analyseur de $\vec{v}$, $\overrightarrow{E_{trans}} = E_{0x}\cos(\alpha)\cos(\omega t - kz + \varphi_x(t)) + E_{0y}\sin(\alpha)\cos(\omega t - kz + \varphi_y(t))$ et alors

$$I_{transmis} = K\langle E^2_{transmis}\rangle = \underbrace{K\langle E^2_{0x}\cos^2(\alpha)\cos^2(\omega t - kz + \varphi_x(t))\rangle}_{\frac{K}{2}E^2_{0x}\cos^2(\alpha)} + \underbrace{K\langle E^2_{0y}\cos^2(\alpha)\cos^2(\omega t - kz + \varphi_y(t))\rangle}_{\frac{K}{2}E^2_{0y}\sin^2(\alpha)}$$

$I_{transmis} = \frac{K}{2}E_0^2$ qui ne dépend plus de α

[2] Nous expliquerons dans le cours pourquoi nécessairement $E_z = 0$

II- Travail demandé :

Les protocoles proposés et les résultats obtenus devront faire l'objet d'un compte rendu soigné.
Les 3 premiers points ci-dessous ne devront pas dépasser 45 min

- Etudier la polarisation de la lumière émise par les différentes sources à votre disposition.

- Etudier la polarisation de la lumière diffusée par un écran blanc, par un objet quelconque présent dans la pièce, par un nuage, et par le ciel bleu si la météo le permet…

  On mettra en évidence que la lumière provenant du ciel depuis une direction faisant un angle de 90° avec les rayons du Soleil est polarisée rectilignement.

- Etudier la polarisation de la lumière réfléchie par une vitre ou une surface plane non métallique, en fonction de l'angle d'incidence (on pourra par exemple regarder le reflet de la lumière produite par la lampe de bureau sur la paillasse).

  On mettra en évidence l'existence d'un angle voisin de 50° pour lequel la réflexion s'accompagne d'un effet significatif sur la polarisation.

- Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant le luxmètre permettant de discuter quantitativement la loi de Malus (on utilisera un diaphragme placé juste après la lampe et régler son ouverture afin que l'image déborde les contours de la face de réception du luxmètre)
- Mettre en œuvre un protocole expérimental permettant d'étudier l'effet des objets suivants sur une onde polarisée rectilignement :
  1) Une solution de saccharose. On pourra analyser l'influence de la concentration de la solution en saccharose, ainsi que l'effet de la longueur de solution traversée par l'onde (se contenter de ce dernier effet s'il reste peu de temps).
     On montrera que la solution est optiquement active et on déterminera l'angle de rotation de la polarisation par unité de longueur de solution traversée pour la concentration de travail.
  2) Une lame fine faite d'un matériau inconnu (s'il est présent sur la paillasse). Comparer à un bloc de verre à faces parallèles.
     On montrera que la lame est biréfringente[3] *et on déterminera les positions de ses lignes neutres.*

- **S'il reste du temps** : étude d'un composant optoélectronique
  On utilise une photorésistance : dipôle dont la résistance électrique R varie avec l'éclairement suivant une loi $R = kI^n$ où k et n sont des paramètres constants.

---

[3] Un matériau biréfringent présente un indice de réfraction différent selon la direction de polarisation de la lumière : un indice n_x (respectivement n_y) pour les ondes polarisées rectilignement selon la direction Ox (resp Oy). Les axes Ox et Oy sont appelés axe neutre du matériau (car l'état de polarisation d'une onde polarisée selon l'un de ces deux axes n'est pas modifiée).

Entrée de lame	Sortie de lame (e est l'épaisseur traversée)	Etat de polarisation
$E_0\cos(\omega t)\overrightarrow{u_x}$	$E_0\cos\left(\omega\left(t-\frac{n_x}{c}e\right)\right)\overrightarrow{u_x} = E_0\cos(\omega t+\varphi_x)\overrightarrow{u_x}$	L'onde incidente comme l'onde émergente est polarisée rectilignement selon Ox
$E_0\cos(\omega t)\overrightarrow{u_y}$	$E_0\cos\left(\omega\left(t-\frac{n_y}{c}e\right)\right)\overrightarrow{u_y} = E_0\cos(\omega t+\varphi_y)\overrightarrow{u_y}$	Idem selon Oy
$E_0\cos(\omega t)\left(\cos\theta\overrightarrow{u_x}+\sin\theta\overrightarrow{u_y}\right)$	$E_0\cos\theta\cos(\omega t+\varphi_x)\overrightarrow{u_x}+E_0\sin\theta\cos(\omega t+\varphi_y)\overrightarrow{u_y}$	L'état de polarisation est modifié (polarisation elliptique)

Reprendre le montage utilisé pour vérifier la loi de Malus en substituant la photorésistance au luxmètre. On mesurera à l'ohmmètre la résistance de la photorésistance.

- Vérifier que la rotation de l'analyseur fait varier la valeur de la résistance affichée par l'ohmmètre. Choisir le calibre de celui-ci de manière à pouvoir mesurer la résistance maximale.
  Vérifier que les extrema de R sont obtenus pour les valeurs de 0° et 90° de l'angle entre analyseur et polariseur.
  Déduire du caractère croissant ou décroissant de la loi $R(\alpha)$ le signe du coefficient n.
- Relever la loi $R(\alpha)$ pour différents angles et tracer la courbe $\log(R)$ en fonction de $\log(\cos(\alpha))$ et en déduire la valeur de n.

Annexe : les différents états de polarisation

Les vecteurs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ d'une onde plane progressive monochromatique dans le vide (ou l'air) varient sinusoïdalement dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. La manière dont se fait cette variation caractérise l'état de polarisation de l'onde.

Une onde se propageant dans la direction Oz dans le sens des z croissants, peut donc s'écrire façon la plus générale :

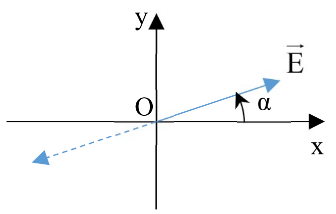
$$\vec{E}(z,t)=\begin{pmatrix} E_{0x}(t)\cos\left(\omega t-kz+\varphi_x(t)\right) \\ E_{0y}(t)\cos\left(\omega t-kz+\varphi_y(t)\right) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Lorsque $\dfrac{E_{0x}(t)}{E_{0y}(t)}=\text{cst}$ et $\varphi_x(t)-\varphi_y(t)=\text{cst}$, l'onde est dite polarisée.

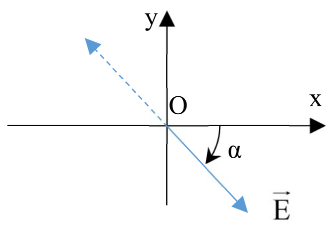
I- Polarisation rectiligne

Lorsque $\varphi_x(t)-\varphi_y(t)=0$ ou $\varphi_x(t)-\varphi_y(t)=\pi$, l'onde est polarisée rectilignement dans la direction faisant un angle α avec l'axe Ox tel que :

- $\alpha=\arctan\left(\dfrac{E_{0y}(t)}{E_{0x}(t)}\right)$ si $\varphi_x(t)-\varphi_y(t)=0$
- $\alpha=-\arctan\left(\dfrac{E_{0y}(t)}{E_{0x}(t)}\right)$ si $\varphi_x(t)-\varphi_y(t)=\pi$: $\vec{E}(z,t)=\begin{pmatrix} E_{0x}(t)\cos\left(\omega t-kz+\varphi_x(t)\right) \\ -E_{0y}(t)\cos\left(\omega t-kz+\varphi_x(t)\right) \\ 0 \end{pmatrix}$



$\varphi_x(t)-\varphi_y(t)=0$



$\varphi_x(t)-\varphi_y(t)=\pi$

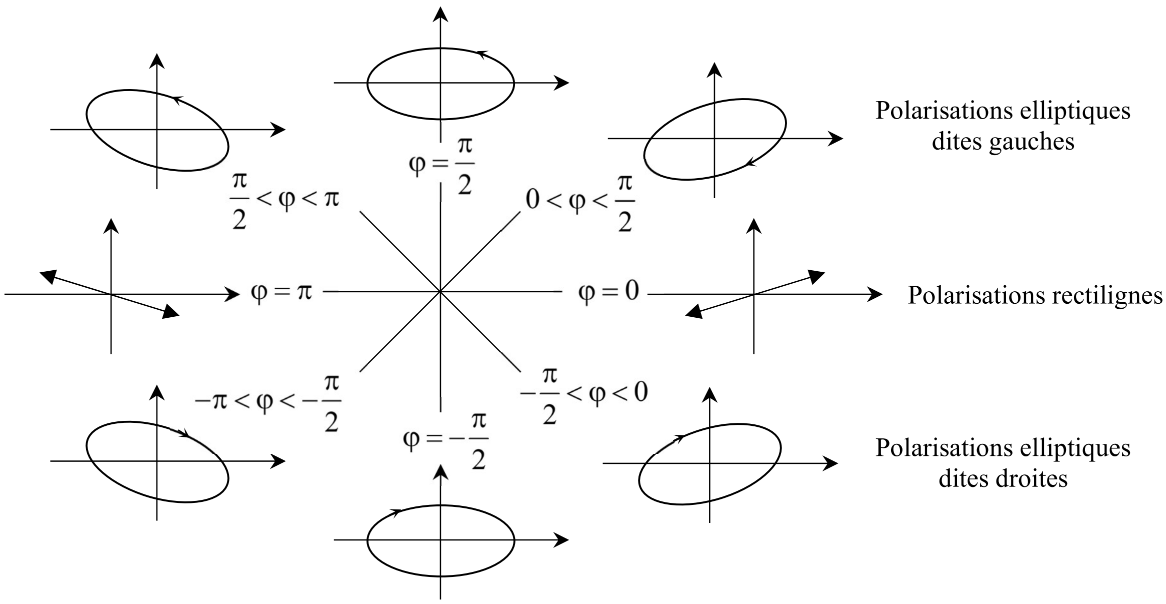
II- Polarisation elliptique

Dans le cas général, les deux composantes Ex et Ey d'une onde monochromatique ont même fréquence mais peuvent être déphasées :

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

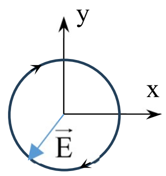
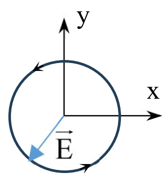
Cette onde est obtenue par superposition de deux ondes polarisées rectilignement, dans deux directions orthogonales, de même pulsation et cohérentes entre elles (ce qui signifie pour nous ici $\varphi_x(t)-\varphi_y(t)=\text{cst}$). En un point donné (z = cst), l'extrémité du vecteur $\vec{E}$ décrit une ellipse (qui peut-être dans des cas particuliers comme ceux vus au I- un segment de droite ou un cercle) dans le plan z = cst. Le sens de parcours de l'ellipse est déterminé par le signe de $\left.\frac{dE_y}{dt}\right)_{\omega t-kz=0} = \omega E_{0y}\sin\varphi$ et donc par le signe de $\sin\varphi$.

Les différents états de polarisation de l'OPPM sont résumés sur le document ci-dessous.



II- Polarisation circulaire

Dans le cas particulier où $\varphi_x(t) - \varphi_y(t) = \pm\frac{\pi}{2}$ et $E_{0x} = E_{0y}$, on parlera de polarisation circulaire.

Nature de l'onde	Notation réelle	Notation complexe	Schéma
Circulaire « droite » $\varphi = -\frac{\pi}{2}$	$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_0\cos(\omega t - kz) \\ -E_0\sin(\omega t - kz) \\ 0 \end{pmatrix}$	$\underline{\vec{E}} = \begin{pmatrix} E_0 e^{i(\omega t - kz)} \\ iE_0 e^{i(\omega t - kz)} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ 0 \end{pmatrix} E_0 e^{i(\omega t - kz)}$	
Circulaire « gauche » $\varphi = \frac{\pi}{2}$	$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_0\cos(\omega t - kz) \\ E_0\sin(\omega t - kz) \\ 0 \end{pmatrix}$	$\underline{\vec{E}} = \begin{pmatrix} E_0 e^{i(\omega t - kz)} \\ -iE_0 e^{i(\omega t - kz)} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -i \\ 0 \end{pmatrix} E_0 e^{i(\omega t - kz)}$	

Polarisation des ondes lumineuses
Matériel

- Diverses sources de lumière (Lampe blanche, diode laser)
- Polariseur et analyseur (2 polariseurs)
- Banc d'optique
- luxmètre + notice
- photorésistance
- 2 multimètres
- Solution de saccharose
- Fine lame transparente faite d'un matériau biréfringent **(mica et/ou quarz « 4 mm »)**
- Support élévateur
- **Un écran**