Polarisation

JR Seigne MP*, Clemenceau Nantes

September 24, 2024

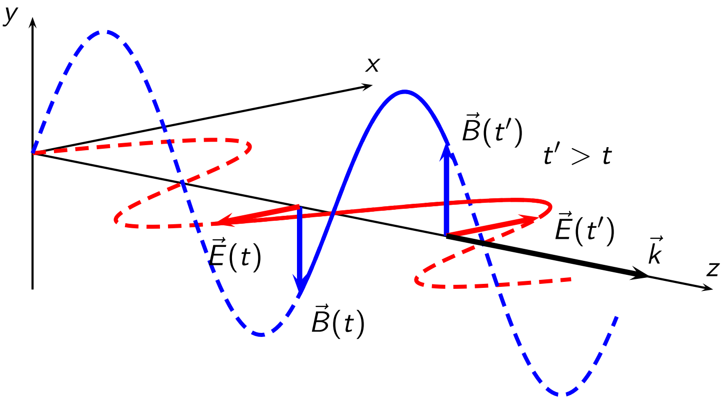
On appelle *plan de polarisation* de l'onde lumineuse :

- le plan formé par le vecteur d'onde $\vec{k}$ et le champ électrique $\vec{E}$.

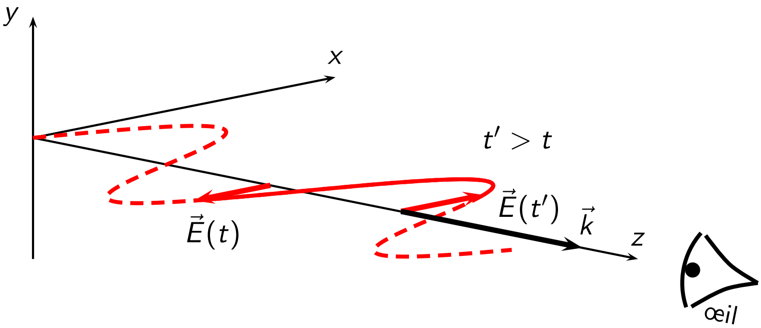
On appelle *direction de polarisation* de l'onde lumineuse :

- la direction prise par le champ électrique $\vec{E}$ dans le plan perpendiculaire à l'axe Oz, c'est-à-dire le plan Oxy.

Onde électromagnétique

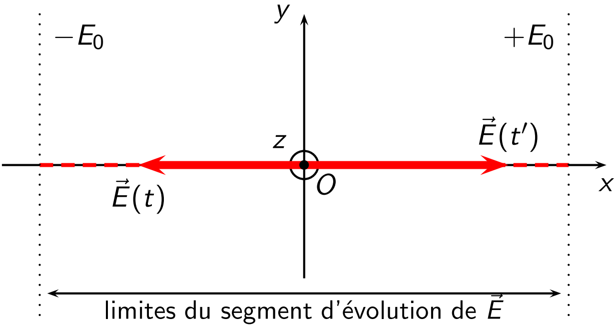


Perception d'une polarisation



L'œil doit voir arriver l'onde électromagnétique.

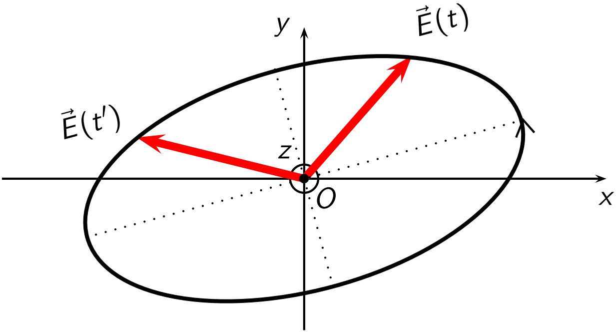
Polarisation rectiligne



$$\vec{E} = E_{0x}\cos(\omega t - kz)\vec{e}_x + E_{0y}\cos(\omega t - kz)\vec{e}_y$$

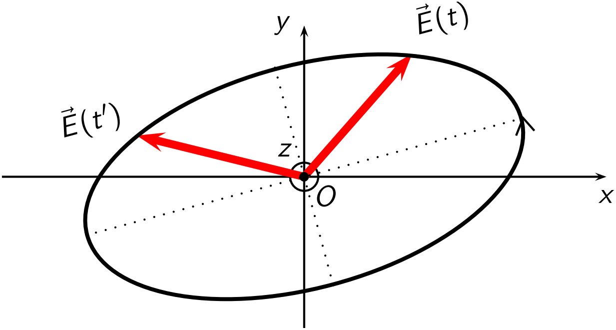
Ici, on note que sur la figure $E_{0y} = 0$.

Représentation du champ électrique



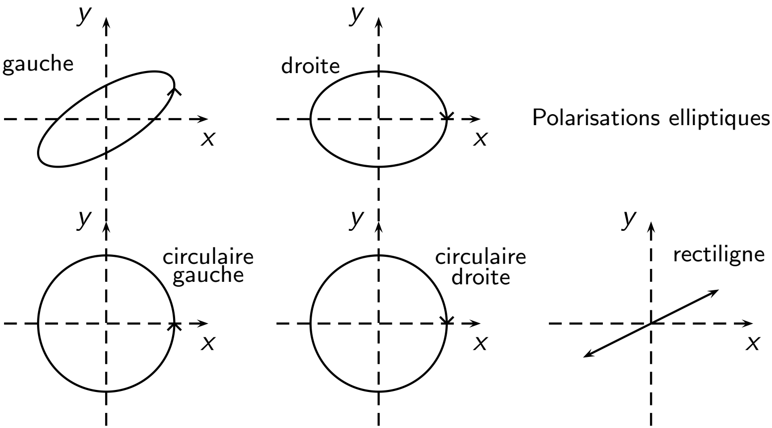
$$\vec{E} = E_{0x}\cos(\omega t - kz)\vec{e}_x + E_{0y}\cos(\omega t - kz - \varphi)\vec{e}_y$$

Trajectoire décrite par $\vec{E}$



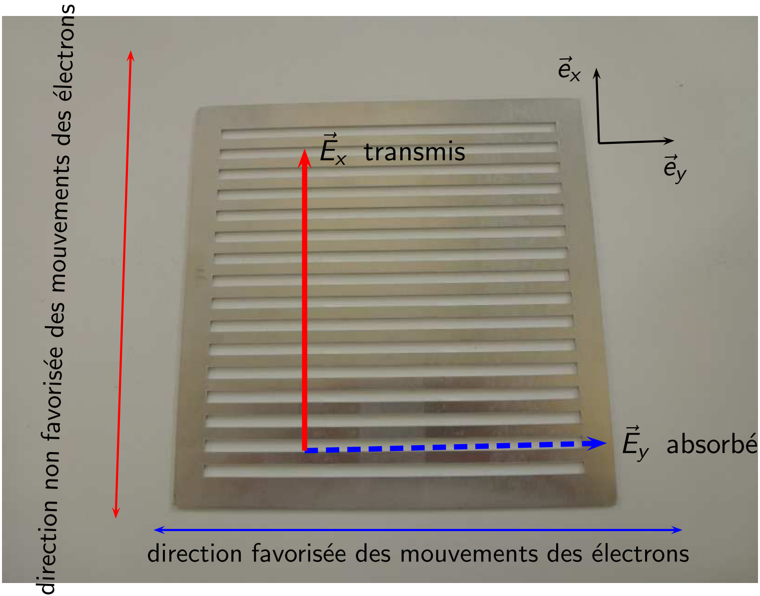
$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_xE_y}{E_{0x}E_{0y}}\cos\varphi = \sin^2\varphi$$

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

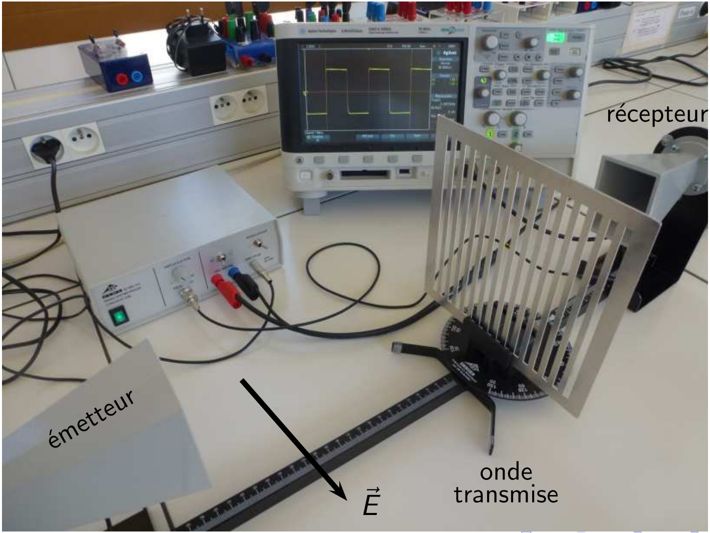


Les trois situations de polarisation à connaître : elliptique, circulaire et rectiligne.

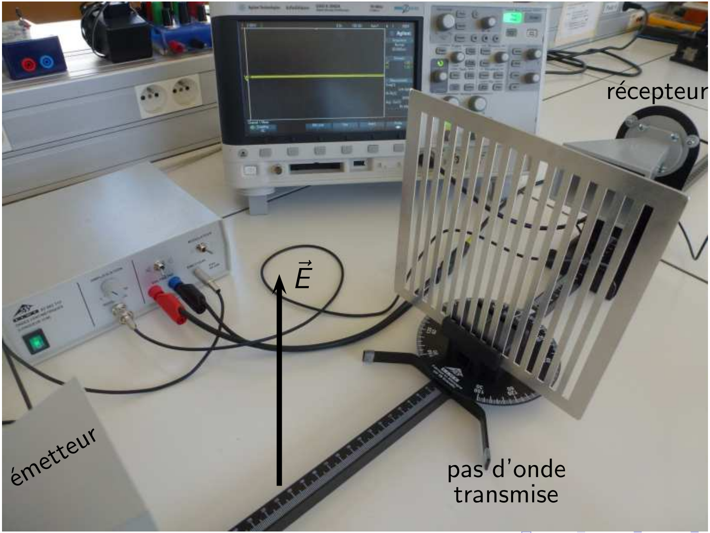
Polariseur rectiligne pour ondes centimétriques



Onde polarisée rectilignement intégralement transmise



Onde polarisée rectilignement intégralement absorbée



Un polariseur rectiligne $\mathcal{P}$ est un dispositif qui ne transmet que la composante de $\vec{E}$ parallèle à un axe privilégié appelé axe du polariseur. Les plus courants sont les Polaroïds. Le Polaroïd est un milieu *anisotrope*. Si on note $\vec{E}_{\text{avant}}$ le champ électrique de l'onde non polarisée avant son arrivée sur le polariseur, on aura dans le cas d'une direction de polarisation sur $\vec{e}_x$:

$$\vec{E}_{\text{après}} = \left(\vec{E}_{\text{avant}} \cdot \vec{e}_x\right)\ \vec{e}_x$$

On constate un **effet de projection** du champ électrique.

Lumière non polarisée

On peut représenter une lumière **non polarisée** par le champ électrique suivant :

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - kz)\vec{e}_x + E_0 \cos(\omega t - kz - \varphi(t))\vec{e}_y$$

à condition que $\varphi(t)$ soit une fonction totalement aléatoire de t.

L'intensité de cette lumière non polarisée est donnée par :

$$I_{\text{non pol}} = \alpha \langle \vec{E}^{\,2} \rangle_t = \alpha\, E_0^2$$

Polariseur rectiligne et lumière non polarisée

Un polariseur rectiligne impose au champ électrique la direction $\vec{e}_x$ (direction de polarisation). Après le polariseur :

$$\vec{E}_{\text{pol rect}} = \left(\vec{E}_{\text{non pol}} \cdot \vec{e}_x\right)\, \vec{e}_x = E_0 \cos(\omega t - kz)\vec{e}_x$$

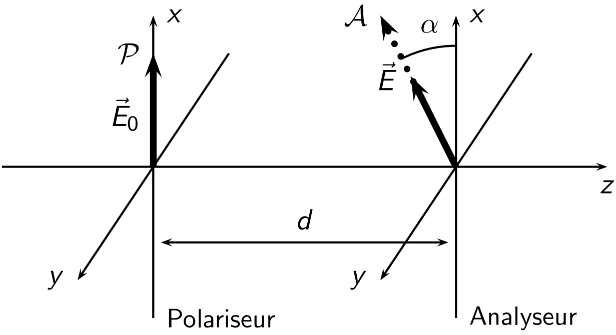
L'intensité de cette lumière polarisée rectilignement est donnée par :

$$I_{\text{pol rect}} = \alpha \langle \vec{E}^{\,2}_{\text{pol rect}} \rangle_t = \alpha \, \frac{E_0^2}{2}$$

50% de l'intensité a été perdue par l'effet du polariseur rectiligne

Situation de Malus

On enchaîne deux polariseurs rectilignes. Le premier impose à une onde une polarisation rectiligne sur $\vec{e}_x$. Le second impose une autre direction de polarisation rectiligne donnée par $\vec{e}_{\mathcal{A}}$.



Loi de Malus

Lumière non polarisée envoyée sur un polariseur rectiligne $\mathcal{P}$ de direction de transmission $\vec{e}_x$: $\vec{E}_{\text{après}\,\mathcal{P}} = E_0 \cos(\omega t - kz)\vec{e}_x$.
Cette onde arrive sur un second polariseur rectiligne - l'*analyseur* $\mathcal{A}$ - dont la direction de polarisation $\vec{e}_{\mathcal{A}}$ fait un angle α avec $\vec{e}_x$.

$$\vec{E}_{\text{après}\mathcal{A}} = E_0 \cos\alpha \, \cos(\omega t - k(z-d))\vec{e}_{\mathcal{A}}$$

Loi de Malus : $I_{\text{après}\,\mathcal{A}} = I_{\text{avant}\,\mathcal{A}} \cos^2\alpha$

Les valeurs particulières de $\alpha = \dfrac{\pi}{2}$ ou $\dfrac{3\pi}{2}$ correspondent à **l'extinction** : $I_{\text{après}\mathcal{A}} = 0$.

Certaines substances font tourner la direction de polarisation de la lumière polarisée rectilignement. Cet effet est lié aux propriétés liées aux symétries du réseau cristallin. En chimie, des molécules possédant un carbone asymétrique ont aussi cette faculté. Selon la loi de Biot, l'angle θ dont tourne la direction du champ électrique $\vec{E}$ est donné par :

$$\theta = [\theta]_\lambda \, c \, \ell$$

où $[\theta]_\lambda$ est le pouvoir rotatoire spécifique de la substance, c la concentration de la solution et ℓ la longueur parcourue par la lumière dans la solution. $[\theta]_\lambda$ dépend de la température.

Les substances peuvent être lévogyres si elles font tourner la direction de polarisation dans le sens trigonométrique et dextrogyres dans le cas contraire. On dit que ces substances possèdent une **activité optique**.

Polarisation par diffusion

Une explication du phénomène sera vue lors de l'étude du rayonnement électromagnétique d'un dipôle électrique oscillant dans le cadre du cours d'électromagnétisme.

Photographies réalisées par Baptiste B. MP 2020.

Sans polariseur

Avec polariseur

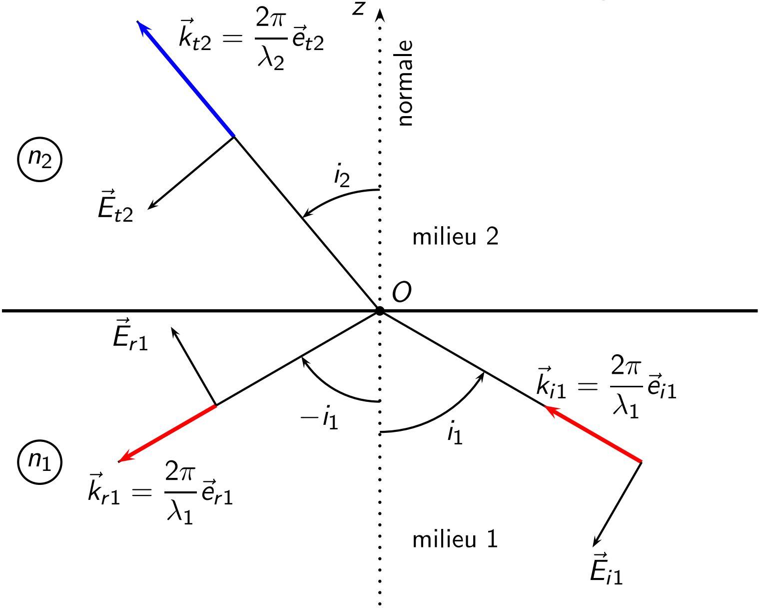
Photographies réalisées par Baptiste B. MP 2020.

Sans polariseur

Avec polariseur

Polarisation par réflexion

Dioptre


$\vec{k}_{t2} = \frac{2\pi}{\lambda_2}\vec{e}_{t2}$
z
normale
n_2
i_2
$\vec{E}_{t2}$
milieu 2
O
$\vec{E}_{r1}$
$\vec{k}_{i1} = \frac{2\pi}{\lambda_1}\vec{e}_{i1}$
$-i_1$
i_1
n_1
$\vec{k}_{r1} = \frac{2\pi}{\lambda_1}\vec{e}_{r1}$
milieu 1
$\vec{E}_{i1}$

Continuité des champs

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E}_{i1}(z=0,t) + \vec{E}_{r1}(z=0,t) = \vec{E}_{t2}(z=0,t) \\ \\ \vec{B}_{i1}(z=0,t) + \vec{B}_{r1}(z=0,t) = \vec{B}_{t2}(z=0,t) \end{array} \right.$$

On pose $r_{\|} = E_{r1}/E_{i1}$, coefficient de réflexion en amplitude du champ électrique et $t_{\|} = E_{t2}/E_{i1}$ celui de transmission pour les composantes dans le plan d'incidence. Ces coefficients de Fresnel sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{\|} = \dfrac{n_1 \cos i_2 - n_2 \cos i_1}{n_1 \cos i_2 + n_2 \cos i_1} \\ \\ t_{\|} = \dfrac{2 n_1 \cos i_1}{n_1 \cos i_2 + n_2 \cos i_1} \end{array} \right.$$

Incidence normale

Sous incidence normale alors $i_1 = i_2 = 0$, on retrouve une forme de coefficients qui ressemble à celle déjà vue lors du branchement de deux câbles coaxiaux successifs :

$$\begin{cases} r_{\parallel} = \dfrac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \\[2ex] t_{\parallel} = \dfrac{2n_1}{n_1 + n_2} \end{cases}$$

Pour les composantes normales au plan d'incidence du champ électrique, on retrouve les mêmes expressions sous incidence normale puisque :

$$\begin{cases} r_{\perp} = \dfrac{n_1 \cos i_1 - n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} \\[2ex] t_{\perp} = \dfrac{2n_1 \cos i_1}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} \end{cases}$$

Incidence de Brewster

L'angle de Brewster est un angle d'incidence particulier $i_1 = i_B$ qui permet d'annuler la réflexion des composantes parallèles au plan d'incidence :

$$\tan i_B = \frac{n_2}{n_1}$$

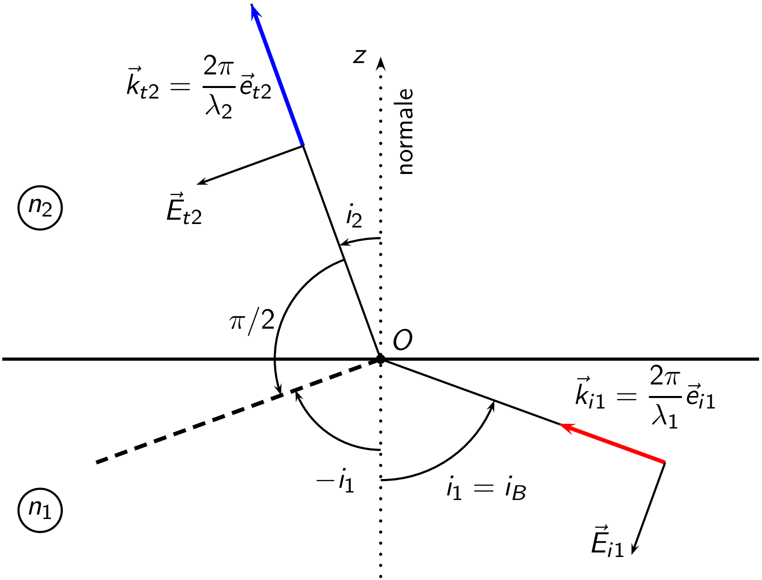
$$\frac{\sin i_B}{\cos i_B} = \frac{n_2}{n_1} \text{ ou encore } n_1 \sin i_B = n_2 \cos i_B$$

On constate que $\cos i_B = \sin i_2$ et donc $i_B + i_2 = \pi/2$.

Interface air-verre : $n_1 = 1$ et $n_2 = 1,5$, on a $i_B \simeq 57°$

Interface air-eau : $n_1 = 1$ et $n_2 = 1,3$, on a $i_B \simeq 52°$

Configuration de Brewster



Polarisation par réflexion

Reprenons le coefficient de réflexion pour une incidence de Brewster $i_1 = i_B$ donc $\cos i_2 = \sin i_1 = \sin i_B$:

$$r_{\parallel} = \frac{n_1 \cos i_2 - n_2 \cos i_1}{n_1 \cos i_2 + n_2 \cos i_1} = \frac{n_1 \sin i_1 - n_2 \cos i_1}{n_1 \cos i_2 + n_2 \cos i_1}$$

$$r_{\parallel} = (n_1 \cos i_1) \frac{\tan i_1 - \dfrac{n_2}{n_1}}{n_1 \cos i_2 + n_2 \cos i_1} = 0$$

Onde incidente non polarisée sous i_B : $\vec{E}_i = \vec{E}_{i,\parallel} + \vec{E}_{i,\perp}$

Onde réfléchie polarisée : $\vec{E}_r = \vec{E}_{r,\perp}$ puisque $r_{\parallel} = 0$

L'onde réfléchie est polarisée perpendiculairement au plan d'incidence.