

Cours 06

Optique physique

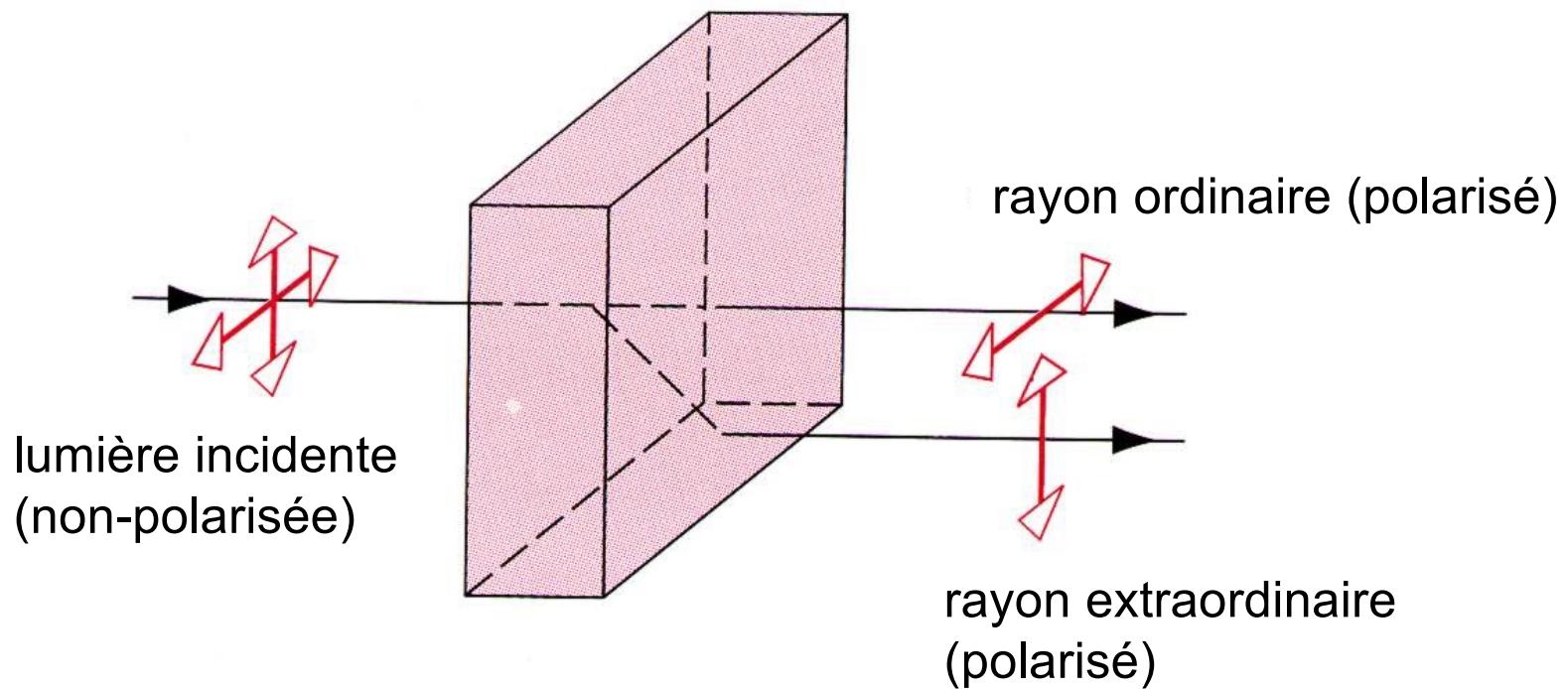
- Biréfringence
 - Expérience avec un échantillon de calcite (CaCO_3)
 - Notions générales
 - Explication de l'expérience avec la calcite
 - Cristal biréfringent avec axe optique // à la surface
 - Lame demi-onde
 - Lame quart d'onde
 - Activité optique
 - Affichage à cristaux liquides (LCD)

Expérience avec un échantillon de calcite (CaCO_3)



- Lorsqu'on tourne le cristal, une image du texte reste fixe et l'autre lui tourne autour.
- Les deux images ont des polarisations orthogonales.

Rayons ordinaire et extraordinaire



Biréfringence: indices de réfraction

**Principal Indices of Refraction of Several
Doubly Refracting Crystals^a**

TABLE 44-1

<i>Crystal</i>	<i>Formula</i>	n_o	n_e	$n_e - n_o$
Ice	H_2O	1.309	1.313	+0.004
Quartz	SiO_2	1.544	1.553	+0.009
Wurzite	ZnS	2.356	2.378	+0.022
Calcite	CaCO_3	1.658	1.486	-0.172
Dolomite	$\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{CO}_2$	1.681	1.500	-0.181
Siderite	$\text{FeO} \cdot \text{CO}_2$	1.875	1.635	-0.240

^a For sodium light, $\lambda = 589$ nm.

Notions générales

Matériaux optiquement isotropes (exemple: matériaux de symétrie cubique)

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$$

\vec{E} et \vec{P} sont colinéaires !

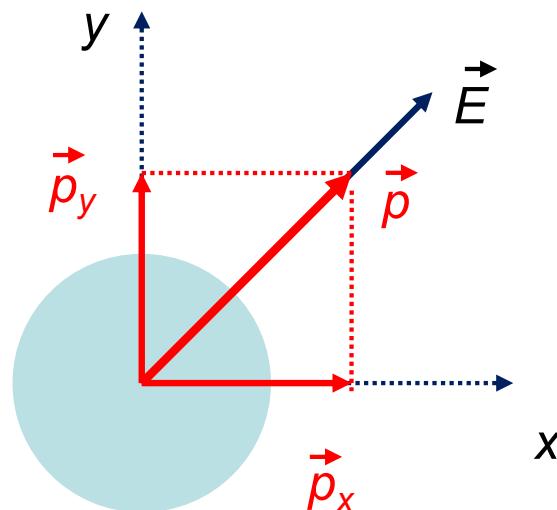
... de manière plus générale

$$P_i = \epsilon_0 \sum_j \chi_{ij} E_j \quad \Rightarrow \quad D_i = \sum_j \epsilon_0 \epsilon_{ij} E_j$$

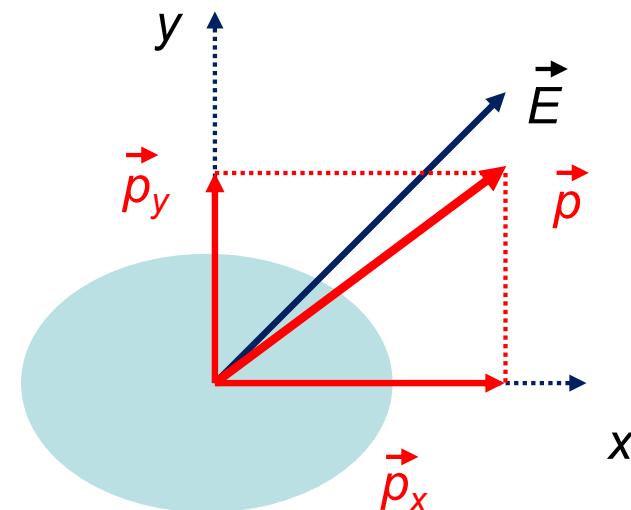
\vec{E} et \vec{P} peuvent ne pas être colinéaires !

Notions générales

Voici comment on peut comprendre la non-colinéarité entre \vec{P} et \vec{E}



colinéarité



non-colinéarité

Notions générales

$$D_i = \sum_j \epsilon_0 \epsilon_{ij} E_j$$

...exprimé dans le référentiel des axes principaux :

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \epsilon_0 \begin{pmatrix} \epsilon_1 & & \\ & \epsilon_2 & \\ & & \epsilon_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$

déplacement
électrique

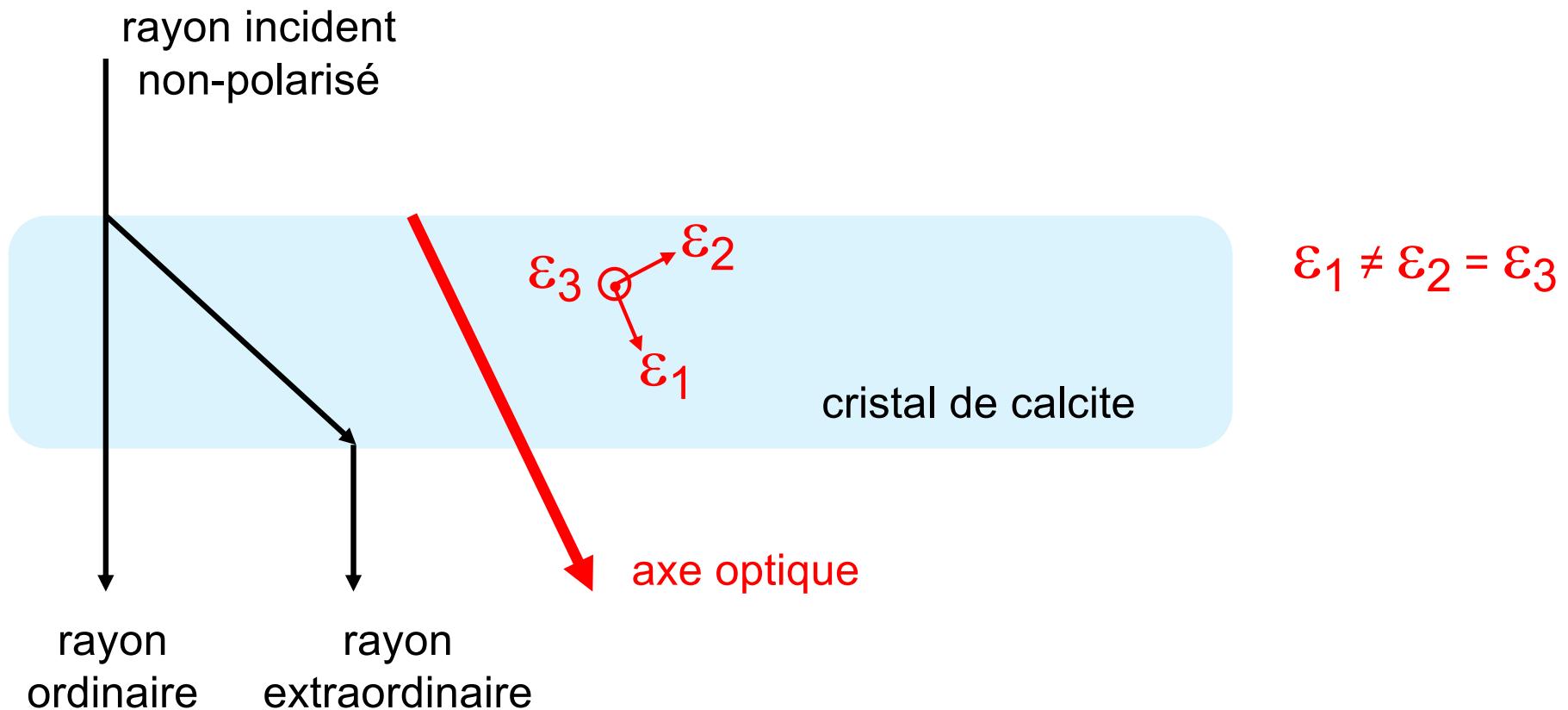
tenseur diélectrique

champ
électrique

$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ matériau optiquement isotrope

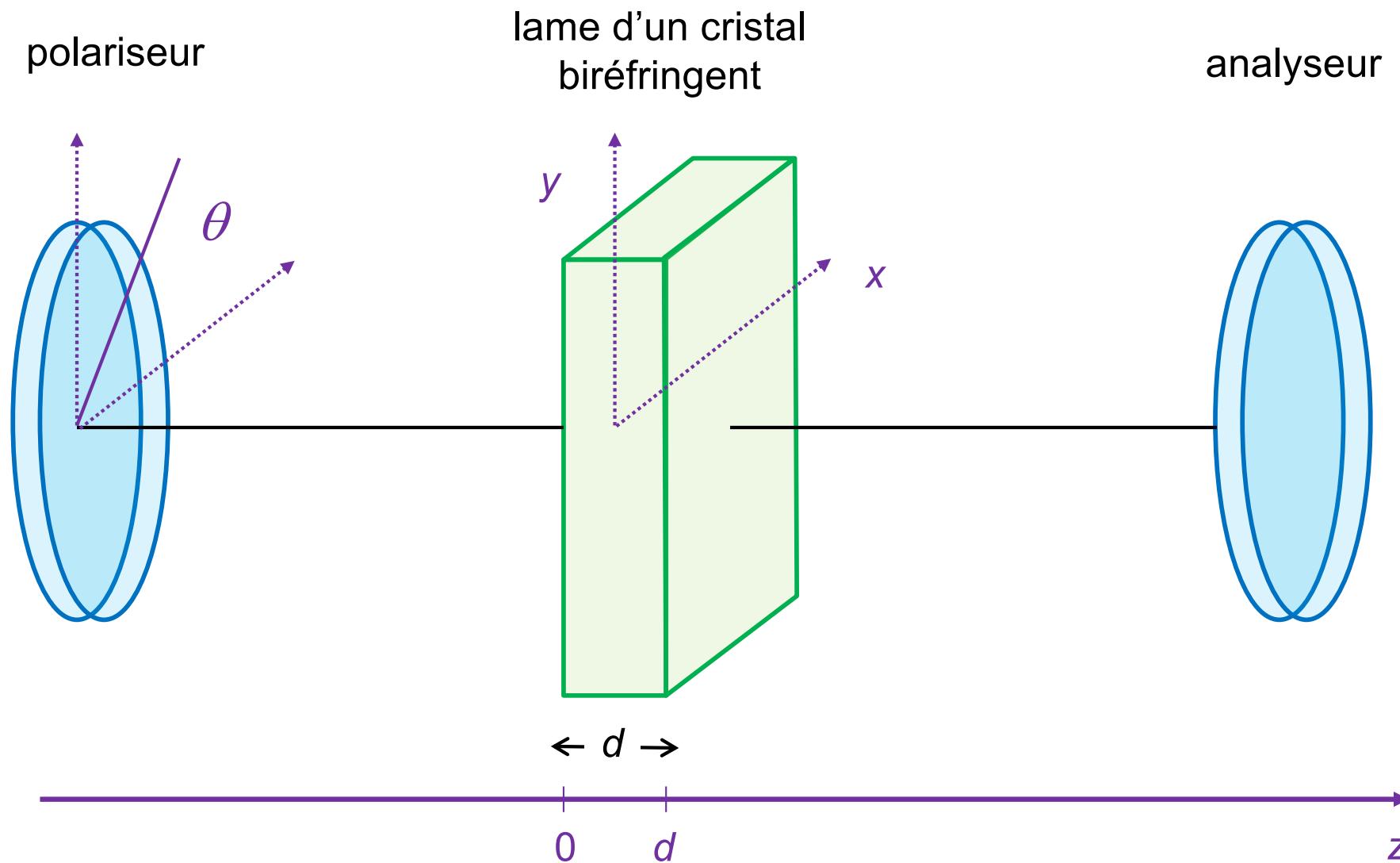
$\epsilon_1 \neq \epsilon_2 = \epsilon_3$ cristal uni-axe, l'axe 1 est l'**axe optique**

Explication de l'expérience avec la calcite



- Le rayon ordinaire voit un indice de réfraction bien défini (axe 3) et obéit à Snell-Descartes, c'est-à-dire il va tout droit.
- Le rayon extraordinaire voit des indices différents dans le plan 1-2. Les équations de Maxwell l'obligent à changer de direction.

Cristal biréfringent avec axe optique // à la surface



NB Le référentiel xy est orienté selon les axes principaux du cristal biréfringent !

Cristal biréfringent avec axe optique // à la surface

Pour $z < 0$ (à l'entrée du cristal, après le polariseur) :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x = E_0 \cos \theta \cos(kz - \omega t) \\ E_y = E_0 \sin \theta \cos(kz - \omega t) \end{array} \right.$$

Pour $0 < z < d$ (à l'intérieur du cristal biréfringent) :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x = E_0 \cos \theta \cos(k_x z - \omega t) \\ E_y = E_0 \sin \theta \cos(k_y z - \omega t) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} k_x = \frac{2\pi}{\lambda_x} = \frac{2\pi}{\lambda} n_x \\ k_y = \frac{2\pi}{\lambda_y} = \frac{2\pi}{\lambda} n_y \end{array}$$

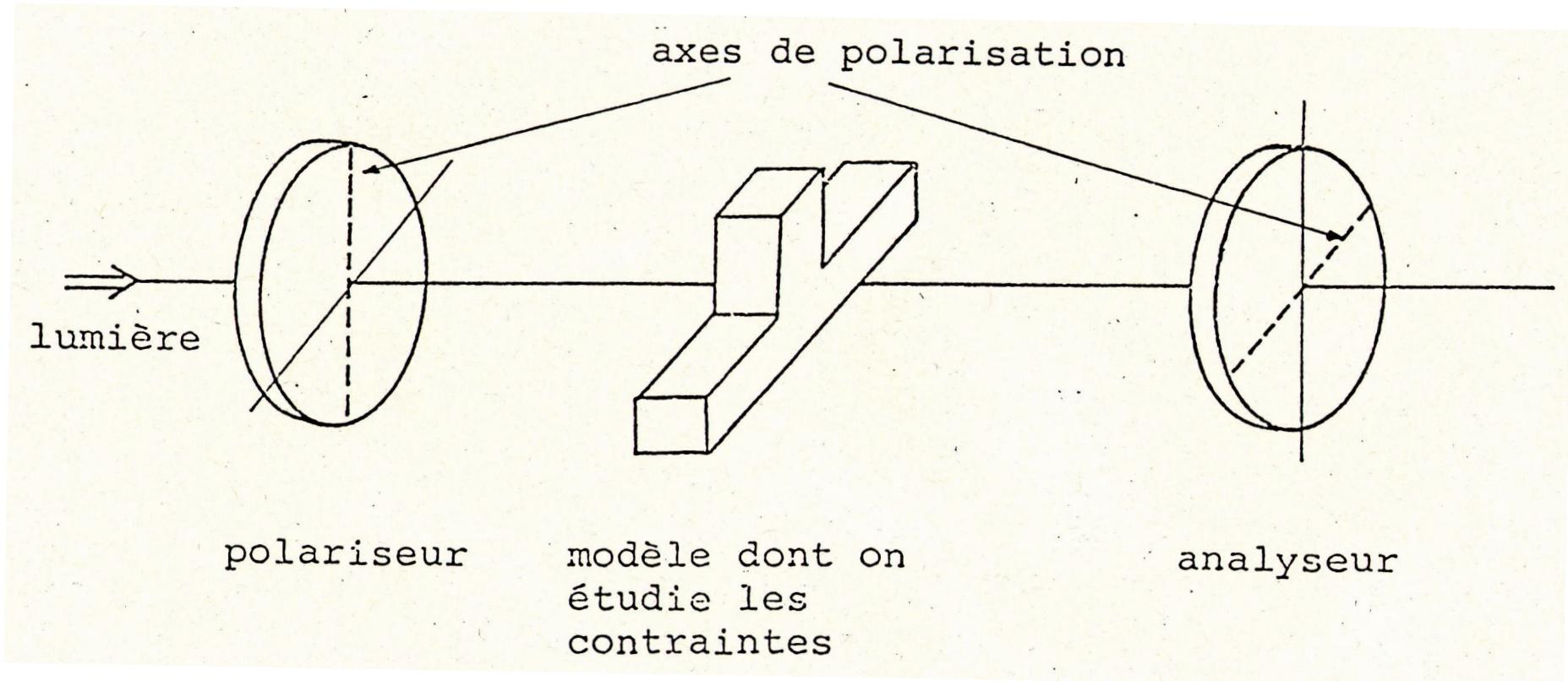
NB célérités différentes !

Pour $z > d$ (à la sortie du cristal, avant l'analyseur) :

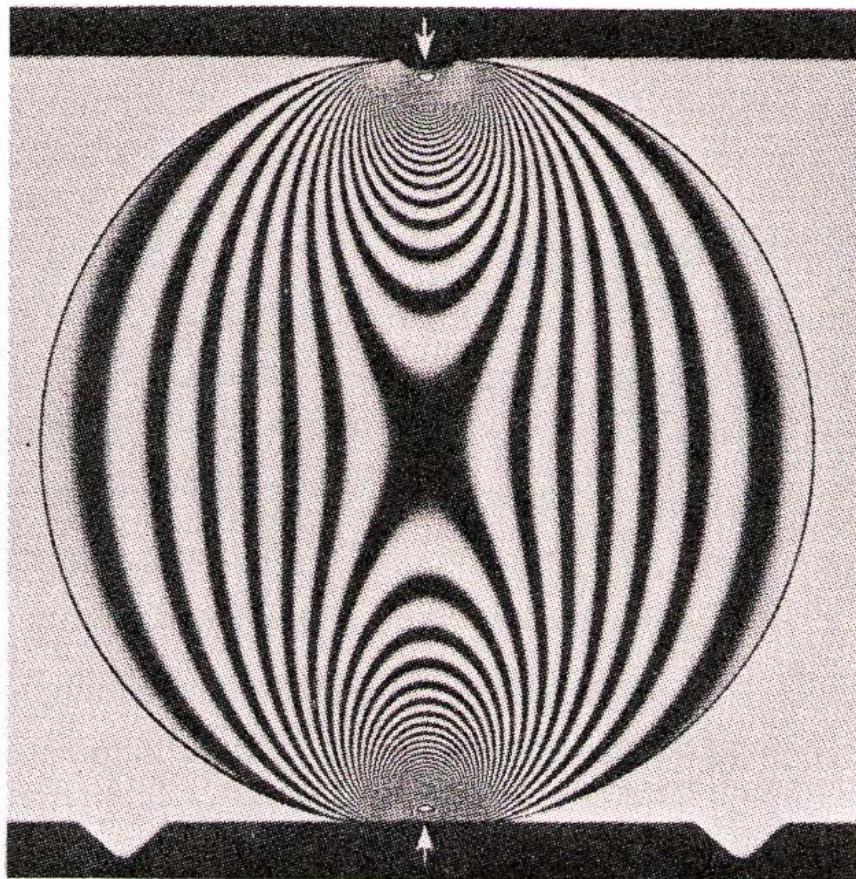
$$\left\{ \begin{array}{l} E_x = E_0 \cos \theta \cos [k(z-d) + \frac{2\pi}{\lambda} n_x d - \omega t] \\ E_y = E_0 \sin \theta \cos [k(z-d) + \frac{2\pi}{\lambda} n_y d - \omega t] \end{array} \right. \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d (n_x - n_y)$ polarization elliptique!

Polariseur- analyseur



Biréfringence par l'application d'une contrainte



- La biréfringence $n_1 - n_2$ est induite par des contraintes mécaniques
- Contours d'**égale contrainte** apparaissent comme contours d'**égale luminosité**

Lame demi-onde

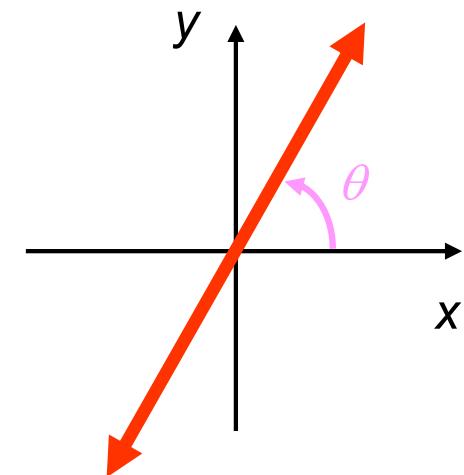
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d (n_x - n_y) = \pi$$

À l'entrée

Polarisation linéaire

Le champ \vec{E} forme un angle θ avec l'axe x

$$\begin{cases} E_x = E_0 \cos\theta \cos(kz - \omega t) \\ E_y = E_0 \sin\theta \cos(kz - \omega t) \end{cases}$$

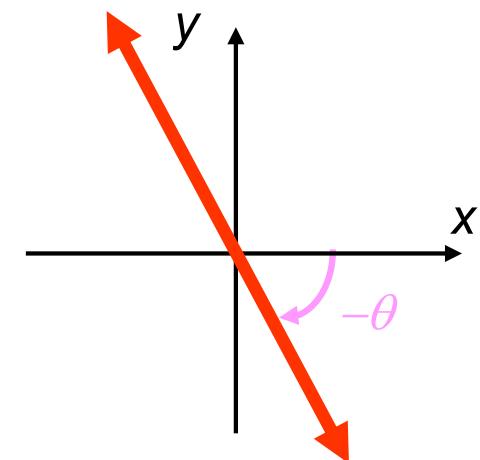


Lame demi-onde

À la sortie

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x = E_0 \cos \theta \cos(kz - \omega t) \\ E_y = E_0 \sin \theta \cos(kz - \omega t + \pi) \end{array} \right.$$

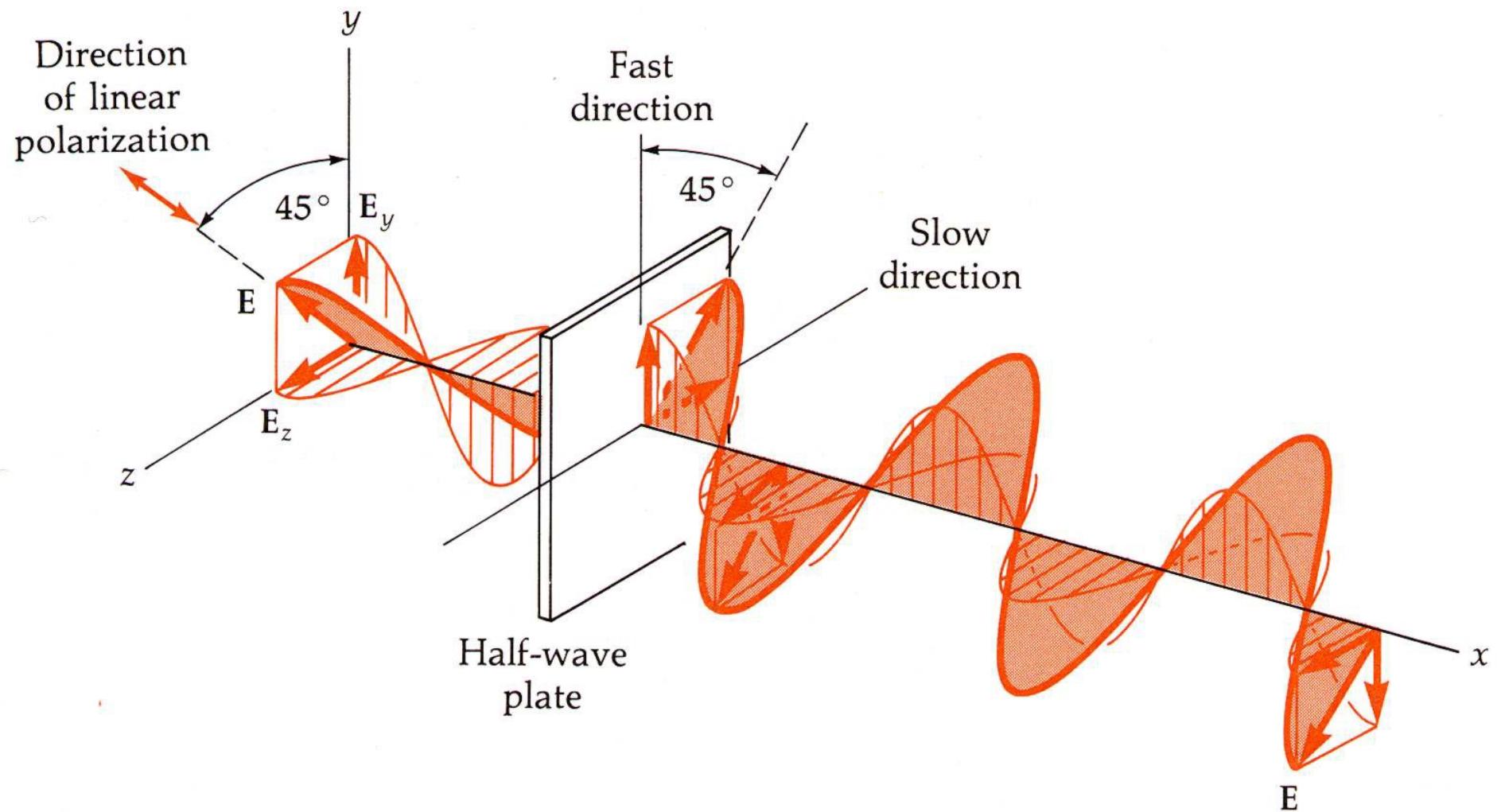
$$\left\{ \begin{array}{l} E_x = E_0 \cos(-\theta) \cos(kz - \omega t) \\ E_y = E_0 \sin(-\theta) \cos(kz - \omega t) \end{array} \right.$$



Polarisation linéaire

Le champ \vec{E} forme un angle $-\theta$ avec l'axe x

Lame demi-onde



Lame quart d'onde

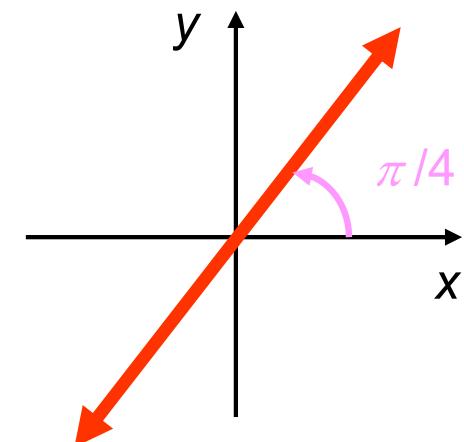
$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d (n_x - n_y) = \frac{\pi}{2}$$

À l'entrée

Polarisation linéaire

Le champ \vec{E} forme un angle $\theta = \frac{\pi}{4}$ avec l'axe x

$$\begin{cases} E_x = E_0 \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(k z - \omega t) \\ E_y = E_0 \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(k z - \omega t) \end{cases}$$

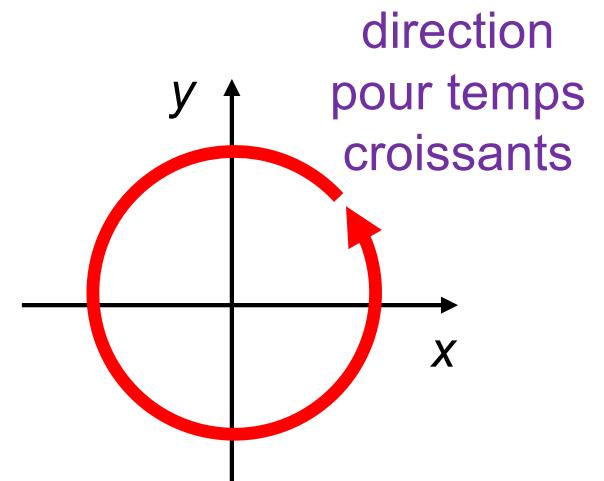


Lame quart d'onde

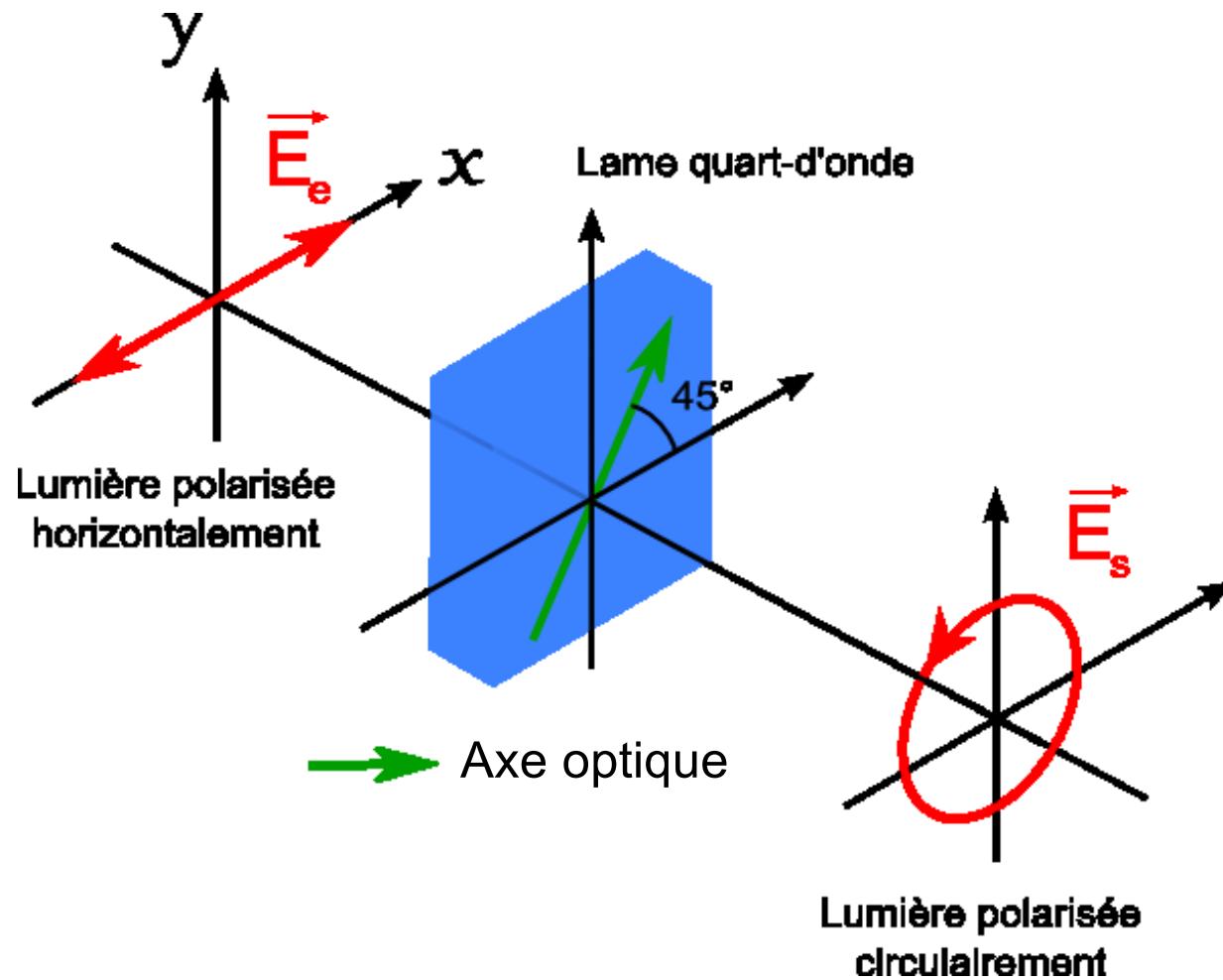
À la sortie

$$\begin{cases} E_x = E_0 \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(k z - \omega t) \\ E_y = E_0 \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(k z - \omega t + \frac{\pi}{2}) = -E_0 \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(k z - \omega t) \end{cases}$$

Polarisation circulaire

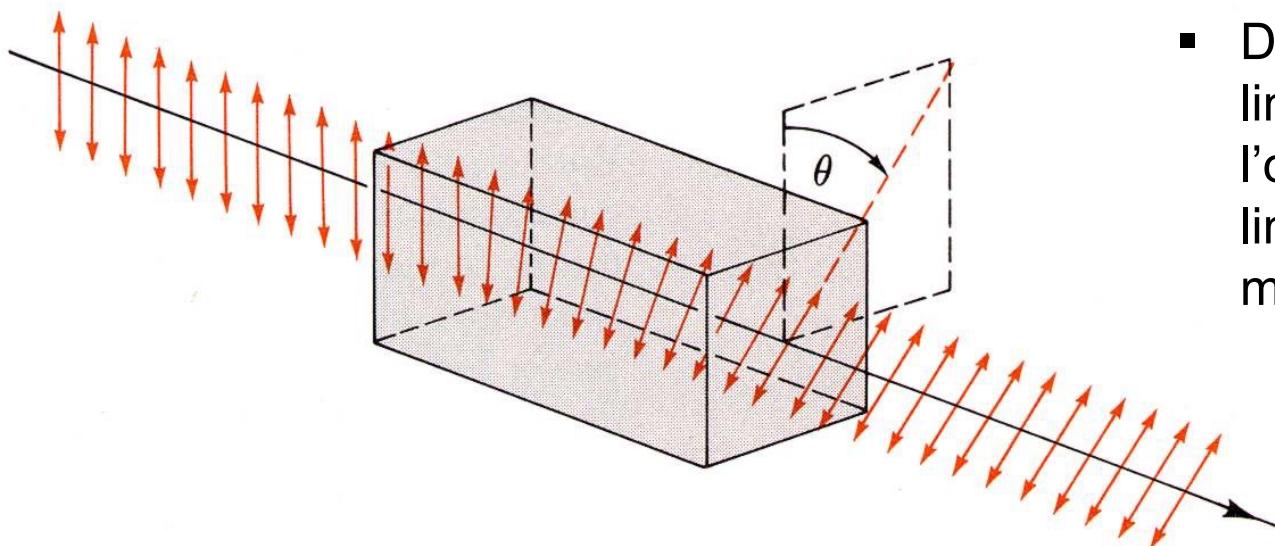
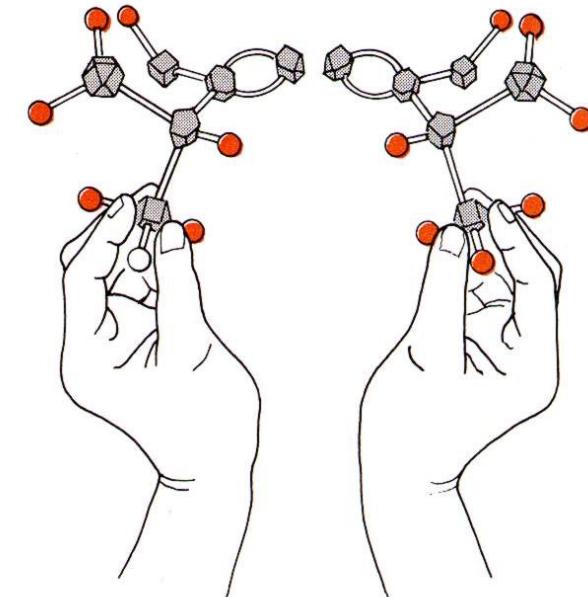


Lame quart d'onde



Activité optique (biréfringence circulaire)

- Dans la nature on trouve des stéréoisomères, par exemple pour le sucre naturel.
- Des matériaux avec une chiralité de ce genre présentent des célérités différentes pour polarization circulaire droite et gauche.



- De la lumière polarisée linéairement change l'orientation de sa polarisation linéaire en passant pas des matériaux optiquement actifs.

Activité optique : démonstration

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} d (n_+ - n_-)$$

À l'entrée

Polarisation linéaire selon x
= superposition de polarisation circulaire gauche et droite

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_0 \cos \phi \\ 0 \end{pmatrix} = E_0 \left(\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \cos \phi \\ -\sin \phi \end{pmatrix} \right)$$

$$\phi = k z - \omega t$$

Activité optique : démonstration

À la sortie

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = E_0 \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \cos(\phi + \psi) \\ -\sin(\phi + \psi) \end{pmatrix} \end{bmatrix} = E_0 \begin{bmatrix} \frac{1}{2} [\cos \phi + \cos(\phi + \psi)] \\ \frac{1}{2} [\sin \phi - \sin(\phi + \psi)] \end{bmatrix}$$

$$= E_0 \begin{bmatrix} \cos(\phi + \psi/2) \cos(-\psi/2) \\ \cos(\phi + \psi/2) \sin(-\psi/2) \end{bmatrix} = E_0 \cos(\phi + \psi/2) \begin{bmatrix} \cos(-\psi/2) \\ \sin(-\psi/2) \end{bmatrix}$$

cos α + cos β = 2 cos $\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)$ cos $\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)$

sin α - sin β = 2 cos $\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)$ sin $\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)$

formules trigonométriques

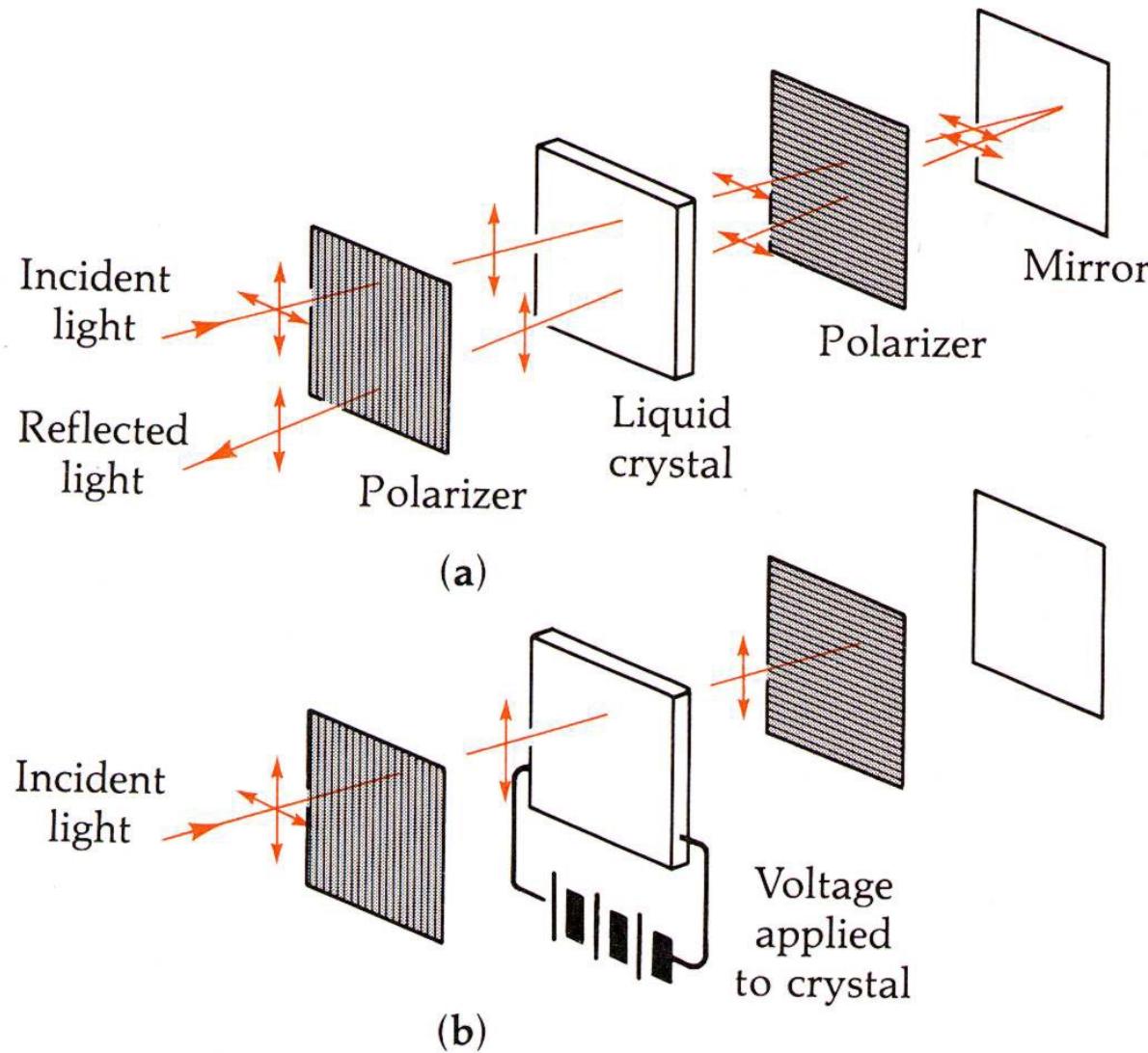
polarisation linéaire orientée selon
un angle de $-\psi/2$ avec l'axe x

Affichage à cristaux liquides (LCD)

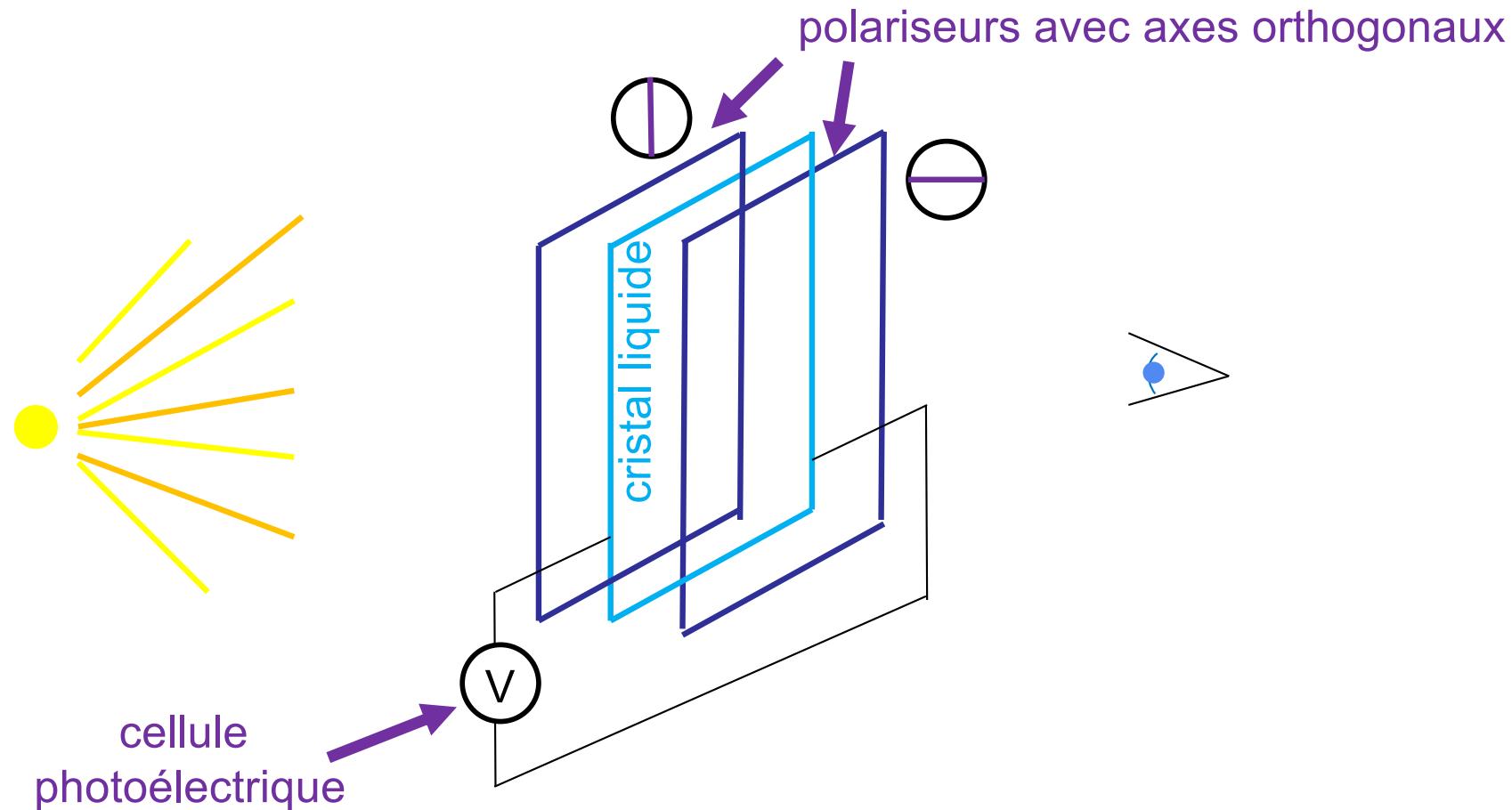


- Application d'activité optique.
- Le cristal liquide tourne la polarisation de 90°.
- Le cristal perd cette capacité lors de l'application d'un faible champ électrique.
- La source lumineuse est la lumière ambiante, donc ce dispositif présente une faible consommation d'énergie.

Liquid crystal display (LCD)



Masque du soudeur (application LCD)



beaucoup de lumière

plus de courant grâce à la cellule

activité optique de l'LCD désactivée

polariseurs \perp arrêtent la lumière

Cours 06

Optique physique

- Biréfringence
 - Expérience avec un échantillon de calcite (CaCO_3)
 - Notions générales
 - Explication de l'expérience avec la calcite
 - Cristal biréfringent avec axe optique // à la surface
 - Lame demi-onde
 - Lame quart d'onde
 - Activité optique
 - Affichage à cristaux liquides (LCD)