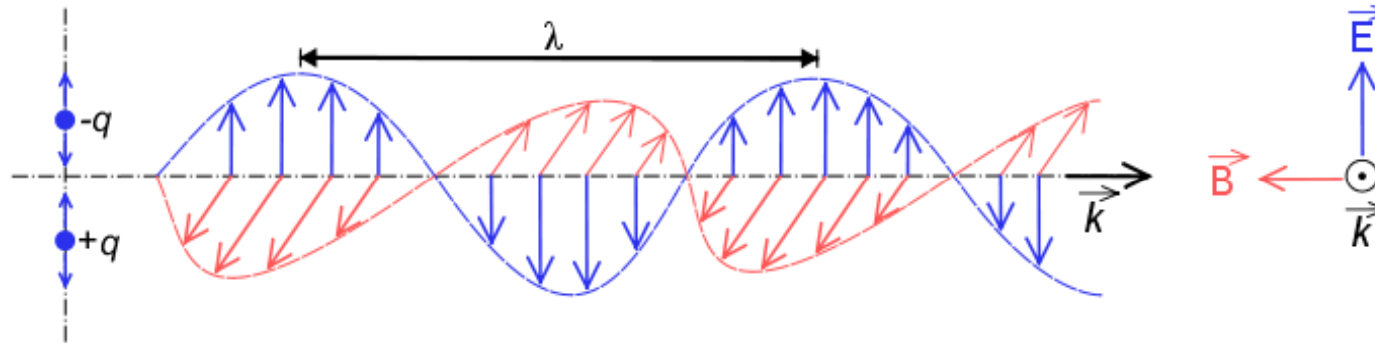




# Introduction à la polarisation

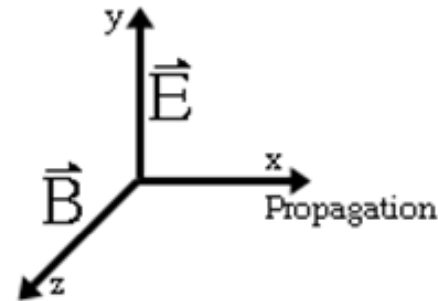


Une onde électromagnétique peut être représentée comme la superposition d'un champ électrique  $\mathbf{E}$  et d'un champ magnétique  $\mathbf{B}$ .

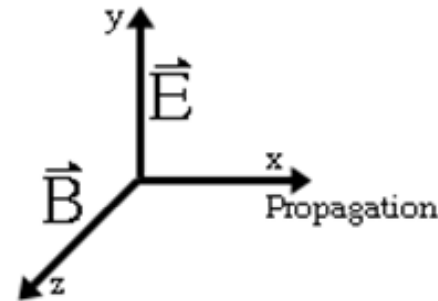


Les vecteurs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{B}$  sont :

- perpendiculaires à la direction de propagation;
- perpendiculaires entre eux;
- en phase (nœuds et ventres de vibration se trouve au même endroit);
- se déplacent à la vitesse de 300'000 km/s dans le vide.



# Vecteur de Poynting

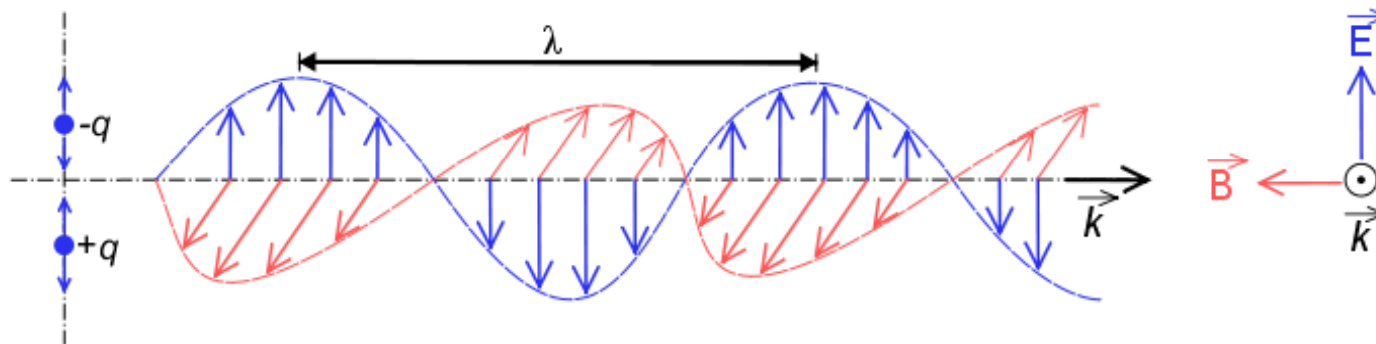
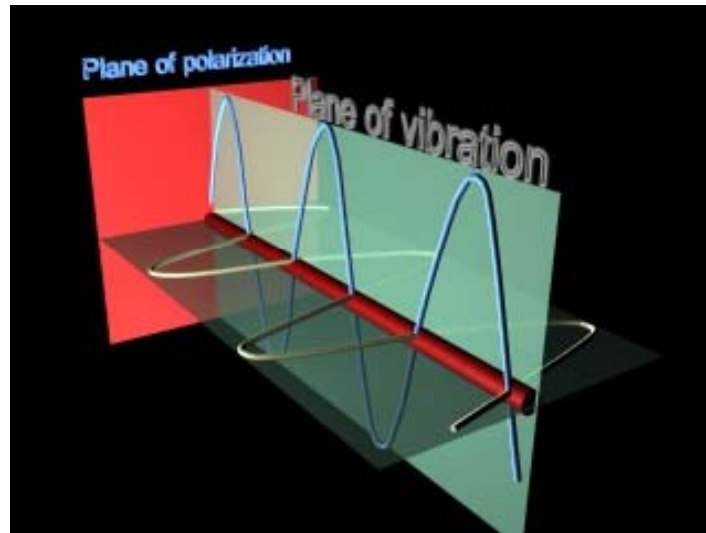


Le **vecteur de Poynting**, noté  $\vec{S}$ ,  $\vec{\Pi}$ , ou encore  $\vec{R}$  est un **vecteur** dont la direction indique, dans un milieu isotrope, la direction de propagation d'une **onde électromagnétique** et dont l'intensité vaut la densité de **puissance** véhiculée par cette onde. Le **module** de ce vecteur est donc une puissance par unité de **surface**.

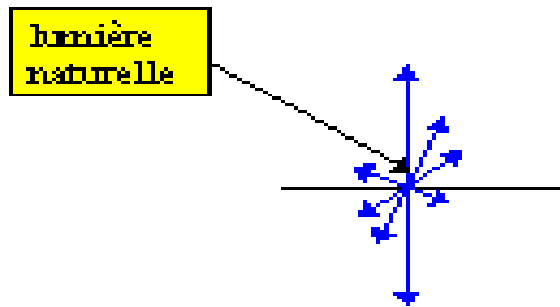
$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \text{ avec } \vec{E} \text{ le champ électrique et } \vec{B} \text{ le champ magnétique, dans le vide.}$$

# Polarisation - définition

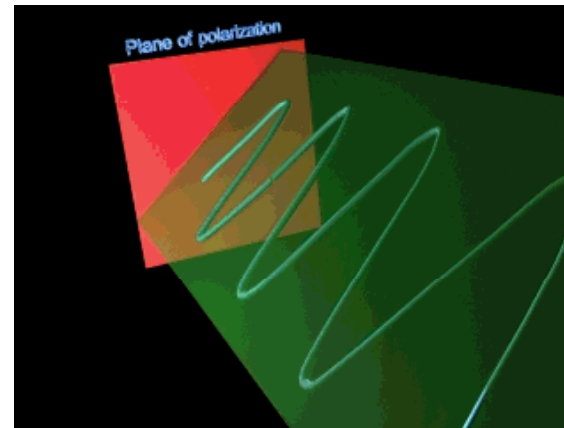
La polarisation est définie par la direction et l'amplitude du champ électrique  $\mathbf{E}$ .



- Pour une onde non polarisée, ou naturelle,  $\mathbf{E}$  tourne autour de son axe de façon aléatoire et imprévisible au cours du temps.
- La lumière dite **naturelle** contient des trains d'onde incohérente où toutes les orientations, dans le plan perpendiculaire à la vitesse, sont équivalentes.



- Polariser une onde correspond à donner une trajectoire définie au champ électrique.
- Il y a plusieurs sortes de polarisation:

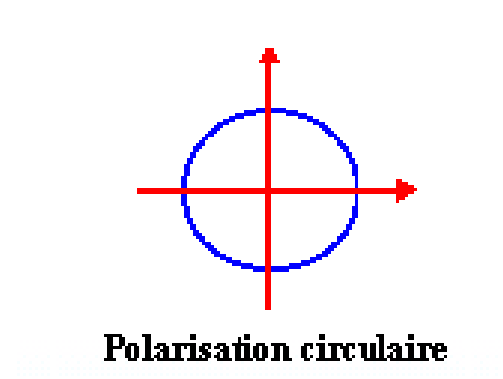
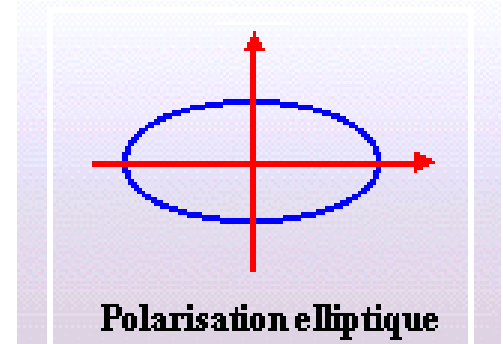


- La **polarisation** est **linéaire** quand  $\mathbf{E}$  reste toujours dans le même plan.

# Polarisation circulaire et elliptique

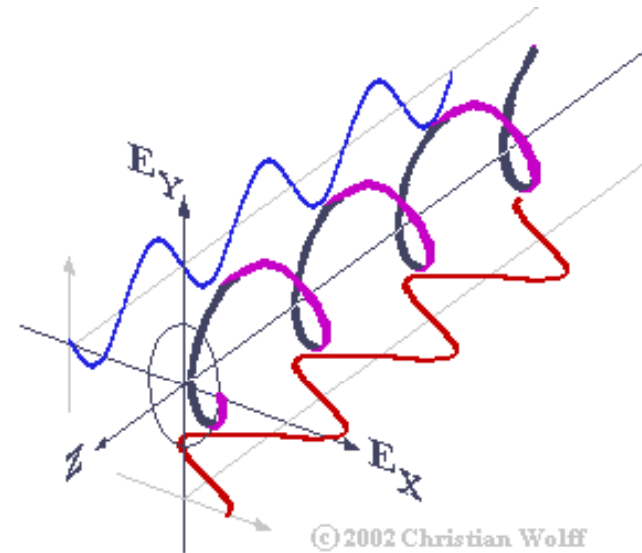
Mais on peut aussi avoir:

- Une polarisation elliptique,  $\mathbf{E}$  tourne autour de son axe et change d'amplitude pour former une ellipse.
- La polarisation circulaire,  $\mathbf{E}$  tourne autour de son axe en formant un cercle.



# Polarisation circulaire et elliptique

Ces régimes s'obtiennent quand 2 (ou plus) champs  $E_1$  et  $E_2$  se somment avec des différences de phase et d'amplitude.



Exploration: polarisation rectiligne, circulaire, elliptique

[http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/physlets\\_em\\_optics/contents/optics/polarization/illustration39\\_1.html](http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/physlets_em_optics/contents/optics/polarization/illustration39_1.html)



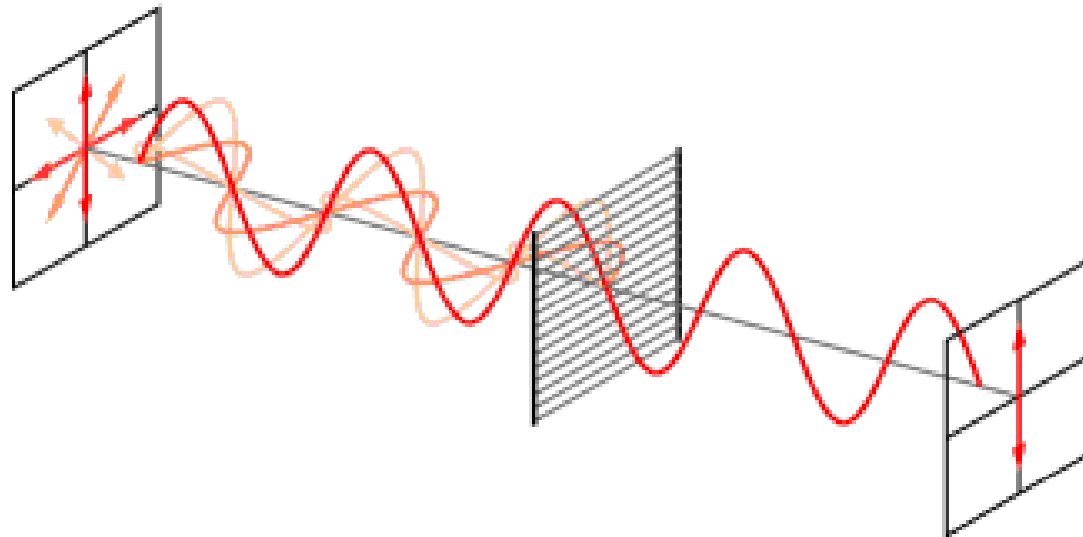
## En résumé:

- La **lumière naturelle** correspond à des orientations **aléatoires** de  $\mathbf{E}$ , normales par rapport à la direction de propagation, et toutes équivalentes.
- La **lumière polarisée** correspond à **une** orientation **privilegiée** de  $\mathbf{E}$ , soit constante (polarisation linéaire), soit périodique (polarisation elliptique).



# Polariseurs par absorption: polaroïds

- Un polariseur rectiligne P est un dispositif qui ne transmet que la composante de E parallèle à un axe privilégié appelé axe du polariseur.
- Les plus courants sont les *polaroïds*. Ils contiennent de longues chaînes polymères (hydrocarbures) parallèles sur lesquelles on fixe des atomes présentant un imposant nuage électronique, en l'occurrence de l'iode. Cela assure une certaine conduction électrique parallèlement aux chaînes.



- Or nous avons vu que les ondes lumineuses ne se propagent pas dans les milieux conducteurs. Le *polaroid* est en quelque sorte un milieu conducteur anisotrope, conducteur dans une direction et isolant dans la direction perpendiculaire.
- Le champ électrique ne pourra donc pas se propager dans la direction conductrice des chaînes hydrocarbonées, mais par contre se propagera dans la direction isolante qui est perpendiculaire.
- A la sortie de ce milieu, l'onde lumineuse sera polarisée rectilignement.

Applet: effet de 1, 2 et 3 polariseurs

<http://www.ngsir.netfirms.com/englishhtm/Polarization.htm>

# Loi de Malus

- La loi de Malus porte sur la quantité d'intensité lumineuse transmise par un polariseur parfait.
- Supposons qu'une onde plane (déjà) polarisée rectilignement passe par un polariseur.
- On note  $\theta$  l'angle que fait cette polarisation avec l'axe du polariseur.
- L'onde sortante est alors polarisée selon l'axe du polariseur, mais elle est atténuée par un certain facteur.
- Si l'on note  $I_0$  et  $I$  les **intensités d'éclairement** incidente et sortante, alors la loi de Malus s'écrit :

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

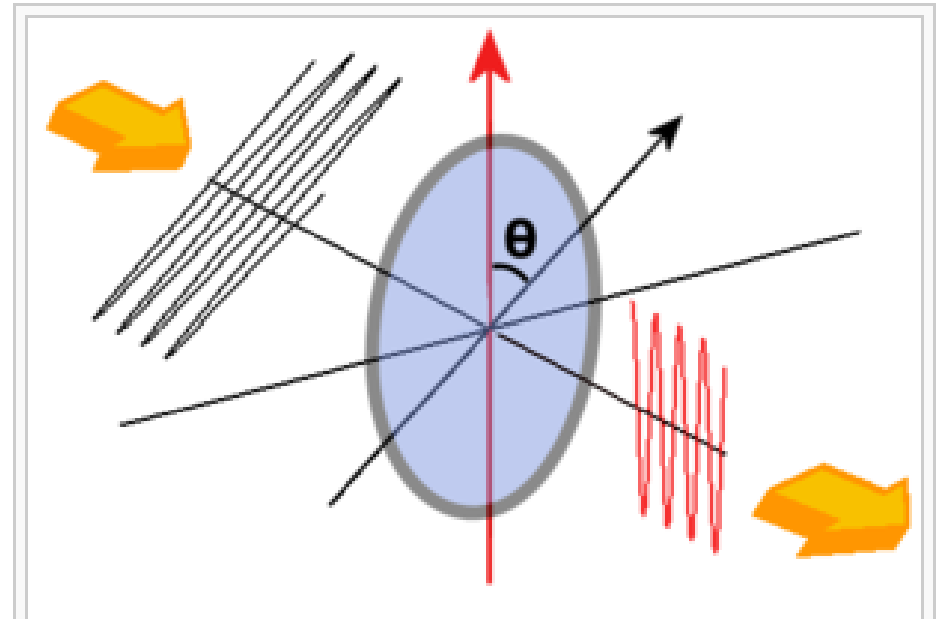


Illustration de la loi de Malus. L'axe rouge du polariseur fait un angle  $\theta$  avec l'axe noir de polarisation de l'onde incidente. L'onde ressort polarisée dans le même sens que l'axe du polariseur, et atténuée.

# Pourquoi $\cos^2 \theta$ ?

- L'état de **polarisation** est représentable par un **vecteur  $E$**  donnant la direction et l'amplitude du **champ électrique**.
- Un vecteur peut toujours être considéré comme résultant d'une **somme vectorielle** selon deux directions arbitraires.
- Quand ce vecteur fait un angle  $\theta$  avec l'alignement d'un polariseur on peut considérer que c'est la composante  $E \cdot \cos \theta$  qui sort du polariseur.
- Mais on sait que l'**éclairement** est proportionnel au **carré** du champ électrique, donc l'intensité sortante sera proportionnelle à  $\cos^2 \theta$ .

## Cette loi a quelques conséquences importantes.

- Si la polarisation de l'onde incidente est dans la même direction que l'axe du polariseur, alors toute l'intensité lumineuse est transmise ( $\theta = 0$ ).
- Si la polarisation de l'onde incidente est orthogonale à l'axe du polariseur, alors il n'y a pas d'onde sortante ( $\theta = 90^\circ$ ). Dans ce cas, on dit que le polariseur est croisé.
- Si l'onde incidente **n'est pas polarisée**, c'est-à-dire qu'elle est constituée de toutes les polarisations possibles, alors en effectuant la moyenne de  $I$ , on obtient

$$I = \frac{I_0}{2}$$

la moitié de l'intensité passe.

**En pratique** on n'obtient pas 50% de transmission car les polariseurs ne sont pas parfaits et filtrent une partie de la lumière: **les polaroïds transmettent typiquement 30-38%** du rayonnement incident.

Seulement certains prismes biréfringents en transmettent 49.9%.

# Exercices – travail personnel

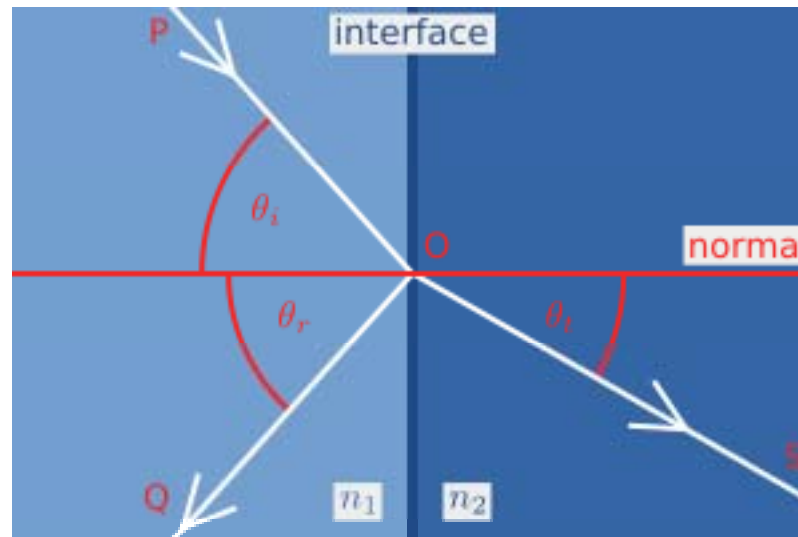
1. Quelle doit être l'orientation relative de deux polariseurs (parfaits) pour qu'une lumière naturelle soit transmise avec une intensité réduite à un quart ?
2. On a deux polariseurs linéaires croisés dont les axes sont vertical et horizontal. On insère un troisième polariseur dont l'axe fait  $45^\circ$  avec la verticale. Déterminer l'intensité émergente, avant et après l'introduction du troisième polariseur.
3. Démontrer par intégration et la loi de Malus qu'un polariseur parfait laisse passer la moitié de l'intensité d'une lumière naturelle



# Polarisation lors de réflexion et réfraction

Quand la lumière passe d'un milieu d'indice  $n_1$  à un autre d'indice  $n_2$ , en général il en résultera **à la fois des phénomènes de réfraction et réflexion**.

Pour cela on introduit le coefficient de réflexion en puissance  $R$  et le coefficient de transmission en puissance  $T$ .



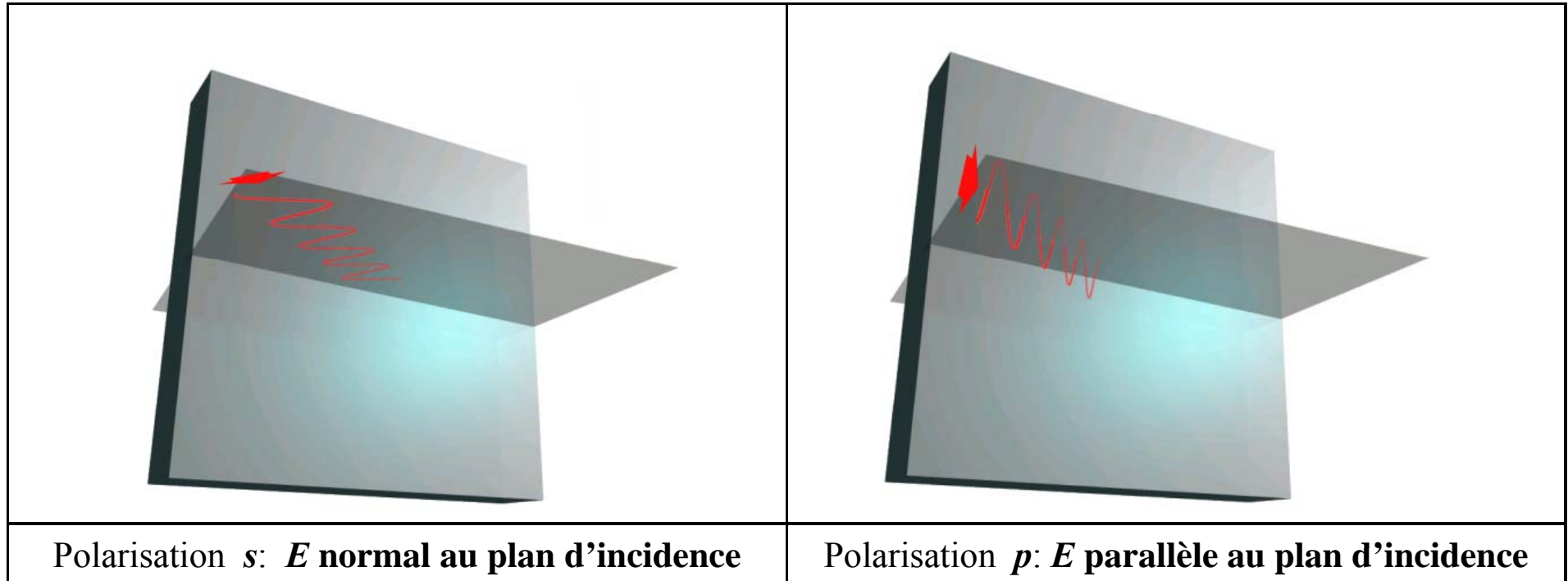
En général, ces coefficients dépendent:

- A. des indices des milieux d'entrée et de sortie, respectivement  $n_1$  et  $n_2$  ;
- B. des angles d'incidence  $\theta_i = \theta_1$  et de réfraction-transmission  $\theta_t = \theta_2$  ;
- C. de la polarisation des ondes.

Ce qui fait que les ondes réfléchies et transmises auront généralement un certain degré de polarisation même quand l'onde incidente est non polarisée.

Les coefficients de réflexion et transmission dépendent de la polarisation de l'onde incidente en rapport avec le plan de la surface d'incidence.

On différencie les deux cas suivants de polarisation rectiligne:



1.  $E$  normal au plan d'incidence : l'onde (c.a.d. le champ électrique) incidente est polarisée perpendiculairement au plan d'incidence (en conséquence le champ magnétique est contenu dans le plan d'incidence). Cet état est aussi appelé polarisation  $s$  (*senkrecht* en allemand).
2.  $E$  parallèle au plan d'incidence : l'onde incidente est polarisée perpendiculairement au plan d'incidence. Cet état est aussi appelé polarisation  $p$  (parallèle).

## Coefficient de reflexion pour la lumière non polarisée

Les coefficients de réflexion en puissance, aussi appelée **réflectances**, sont exprimés par les **équations de Fresnel** et sont différents pour les deux cas (*s* et *p*) de polarisation de l'onde incidente, et sont donnés par:

$$R_s = \left[ \frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left[ \frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_2 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)} \right]^2$$

$$R_p = \left[ \frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left[ \frac{n_1 \cos(\theta_t) - n_2 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_t) + n_2 \cos(\theta_i)} \right]^2$$

Les **transmittances** dans chaque cas sont données par

$$T_s = 1 - R_s \quad \text{et} \quad T_p = 1 - R_p$$

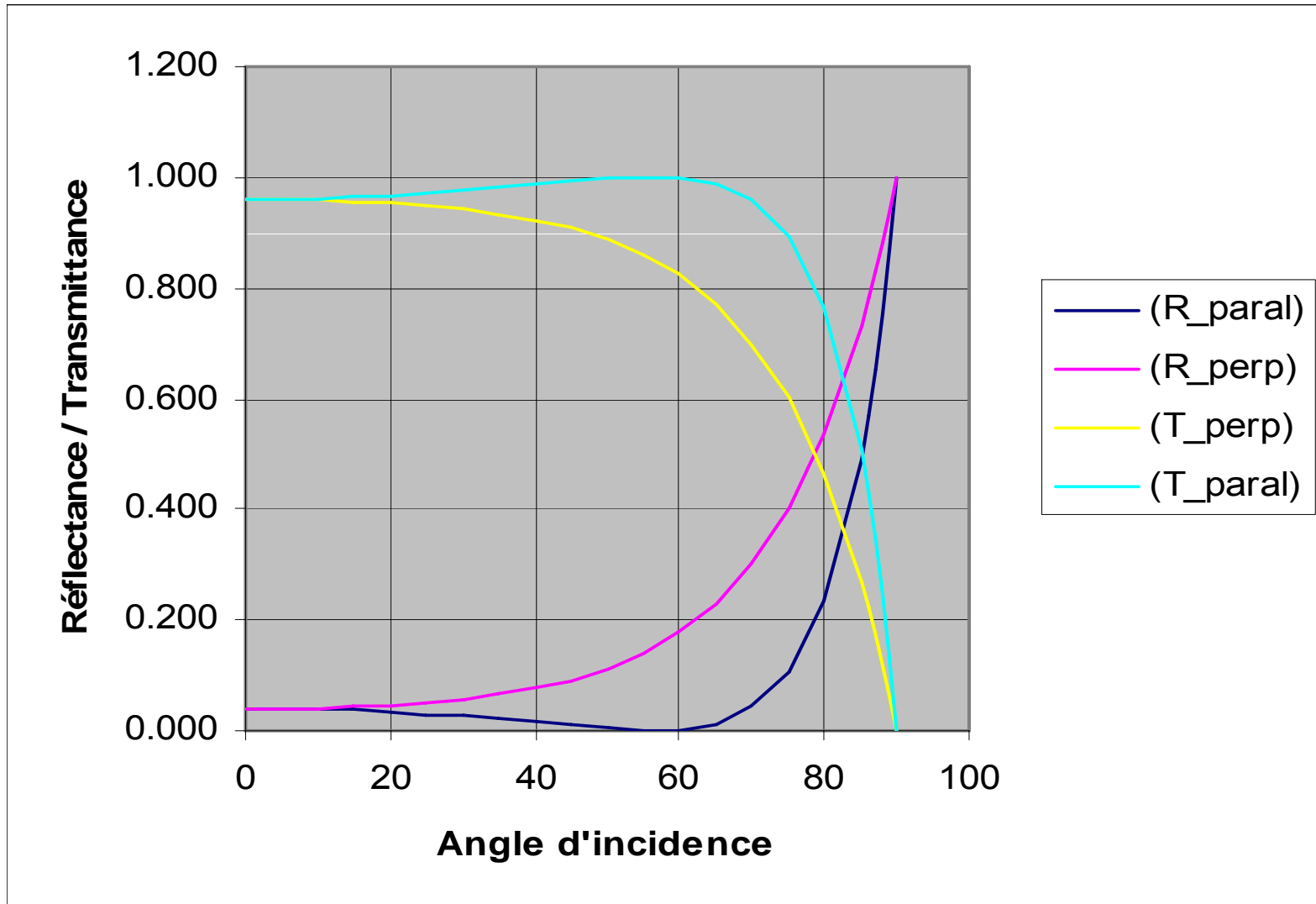
## Coefficient de réflexion pour la lumière non polarisée

La lumière "ordinaire" ou naturelle est en général non polarisée, c'est-à-dire que le champ électrique est orienté en moyenne de façon arbitraire et reste selon une orientation particulière pour des intervalles de temps trop petits pour être mesurés.

Comme on peut considérer qu'elle contient un mix de polarisation  $s$  et  $p$  sa réflexion est décrite par la moyenne des réflectances  $R_s$  et  $R_p$  exprimées par les équations de Fresnel:

$$R = \frac{1}{2} (R_s + R_p)$$

# Réflectance et transmittance pour une interface air-verre avec $n = 1,5$



# L'angle de Brewster

Pour un angle d'incidence particulier à chaque combinaison de  $n_1$  et  $n_2$ , la valeur de la réflectance  $R_p$  tombe à zéro. Donc un rayon incident entièrement polarisé  $p$  est entièrement transmis (réfracté).

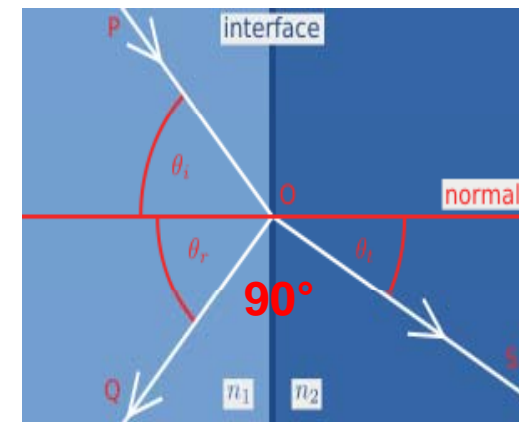
Cet angle est connu comme l'**angle de Brewster** et est donné par

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

L'angle de Brewster est d'environ  $56^\circ$  pour le verre dans l'air ou le vide.

Si une lumière naturelle non polarisée est incidente à cet angle, il en résultera que le rayon réfléchi sera **entièrement polarisé en s** et le rayon réfracté aura un certain degré de polarisation  $p$ .

**Pour un faisceau incident à l'angle de Brewster, les rayons réfléchi et réfracté sont exactement à  $90^\circ$  l'un par rapport à l'autre.**



# Polarisation partielle

- On entend (et lit parfois) que la lumière réfléchie est polarisée. Mais en général celle-ci ne sera pas en réalité polarisée à 100%.
- Si la lumière réfléchie est dite "polarisée" dès que le champ électrique a une orientation préférentielle, en fait elle ne sera en général que **partiellement polarisée**. La polarisation par réflexion n'est effectivement totale que pour un angle très précis et, de façon générale, elle varie avec l'angle.
- Si on dit que la lumière réfléchie est polarisée, c'est par rapport à la lumière "naturelle" (celle d'une lampe à incandescence par exemple) qui est entièrement dépolarisée : le champ électrique n'a aucune direction privilégiée et vibre dans tous les sens.
- Remarque: la lumière du soleil est aussi **partiellement polarisée** à cause de son interaction avec les atomes de l'atmosphère.

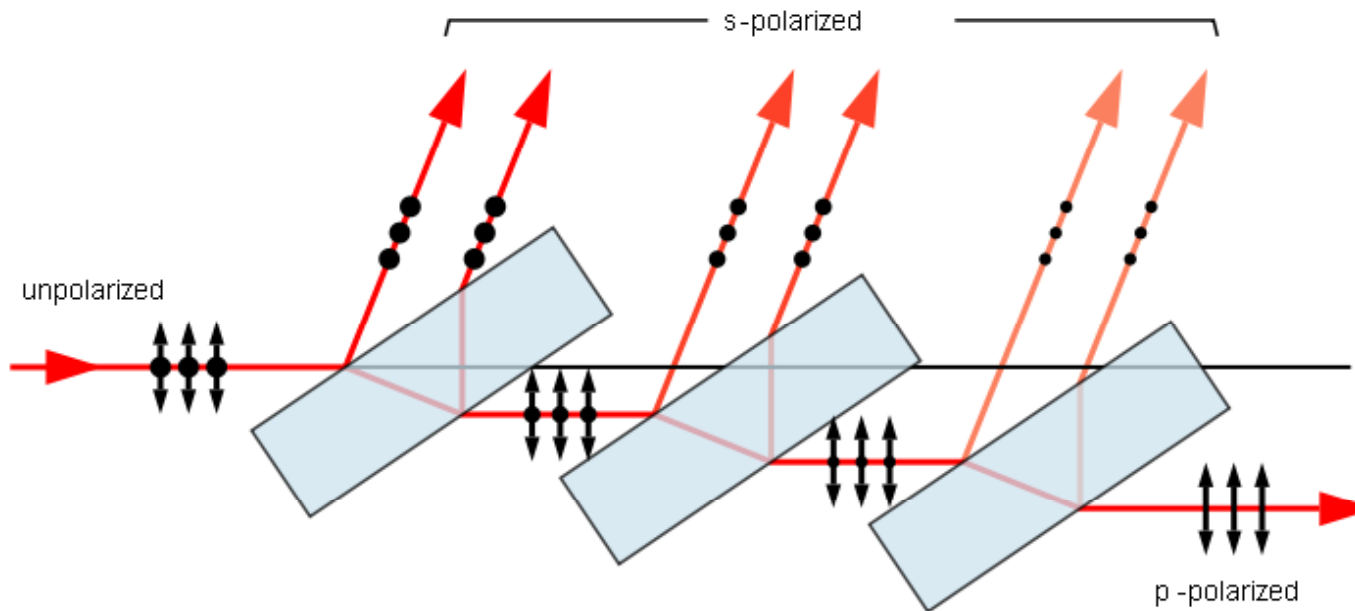




# Polarisation par réflexion et séparation de faisceau

- Les polariseurs par séparation de faisceau séparent le faisceau incident en deux faisceaux de polarisations différentes.
- Ils absorbent très peu la lumière, ce qui en fait un avantage par rapport aux polariseurs par absorption.
- Ils sont aussi utiles dans le cas où les deux faisceaux séparés sont nécessaires.

- La façon la plus simple d'en réaliser consiste en une série de lames de verres orientées à l'**angle de Brewster** par rapport au faisceau.
- A cet angle, valant environ  $56^\circ$  pour le verre, la lumière polarisée **p** (c'est-à-dire parallèlement au plan d'incidence) n'est pas réfléchie par le verre et, selon l'équation de Fresnel pour  $R_s$ , environ 15% de la lumière polarisée **s** (perpendiculairement au plan d'incidence) est réfléchie chaque fois.



# Réflexion et transmission totales d'une lame de verre

- La réflexion et transmission d'une vitrine est le résultat de multiples réflexions et transmissions au deux faces.

- Après plusieurs réflexions-transmissions, la réflectance totale tend à

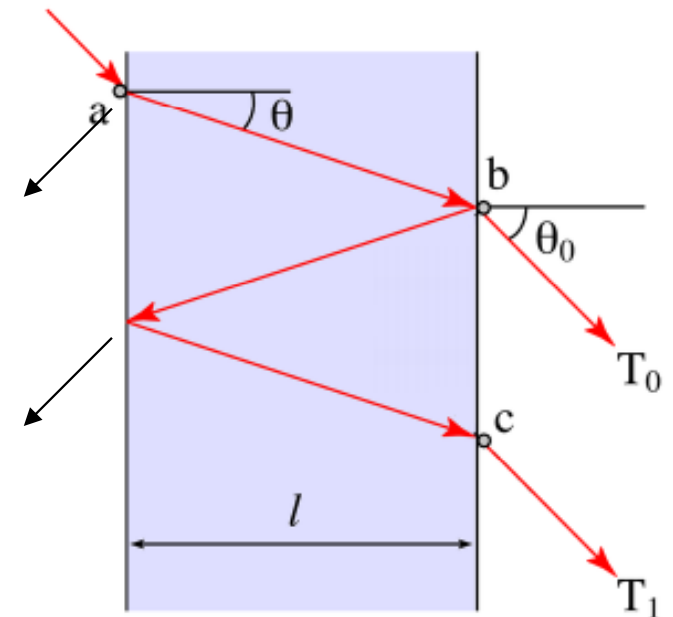
$$R_{lame} = 2R / (1 + R)$$

avec

$R$  = réflectance à une surface air-verre

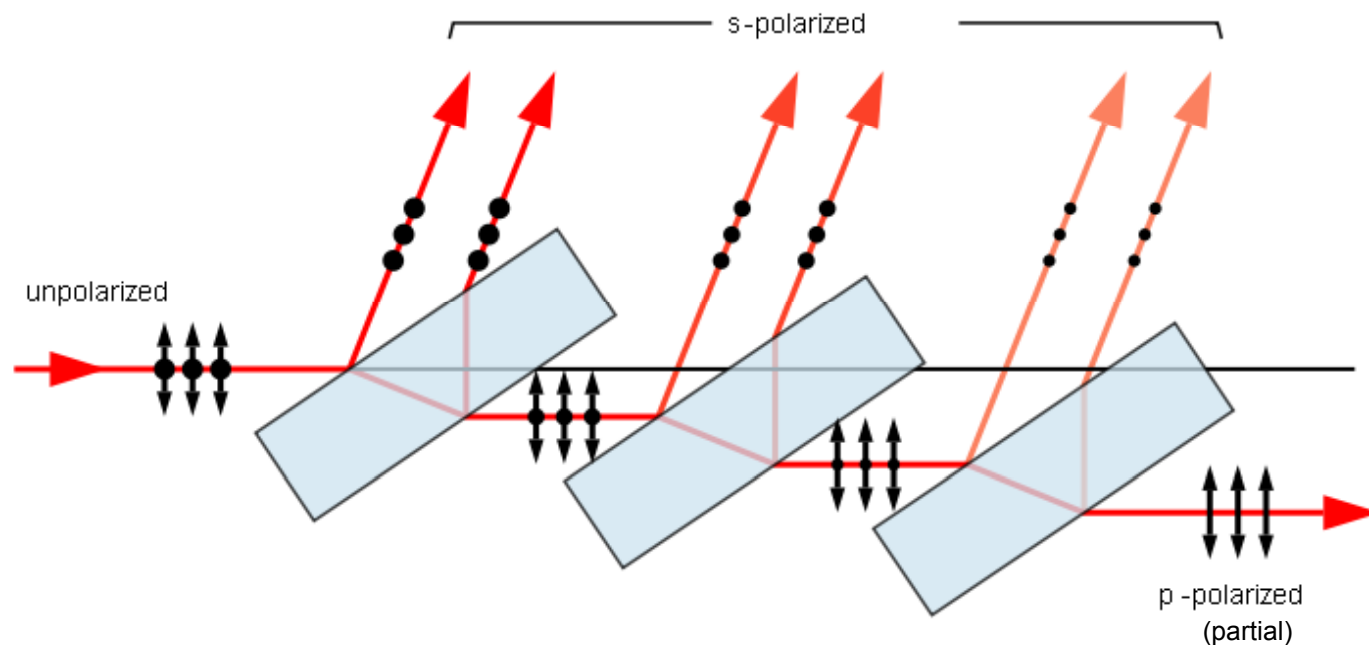
- Pour une incidence à l'angle de Brewster on aura ainsi une intensité réfléchie totale, entièrement polarisée en  $s$ , d'environ 26%.

**Travail personnel:** démontrer ce résultat numériquement.



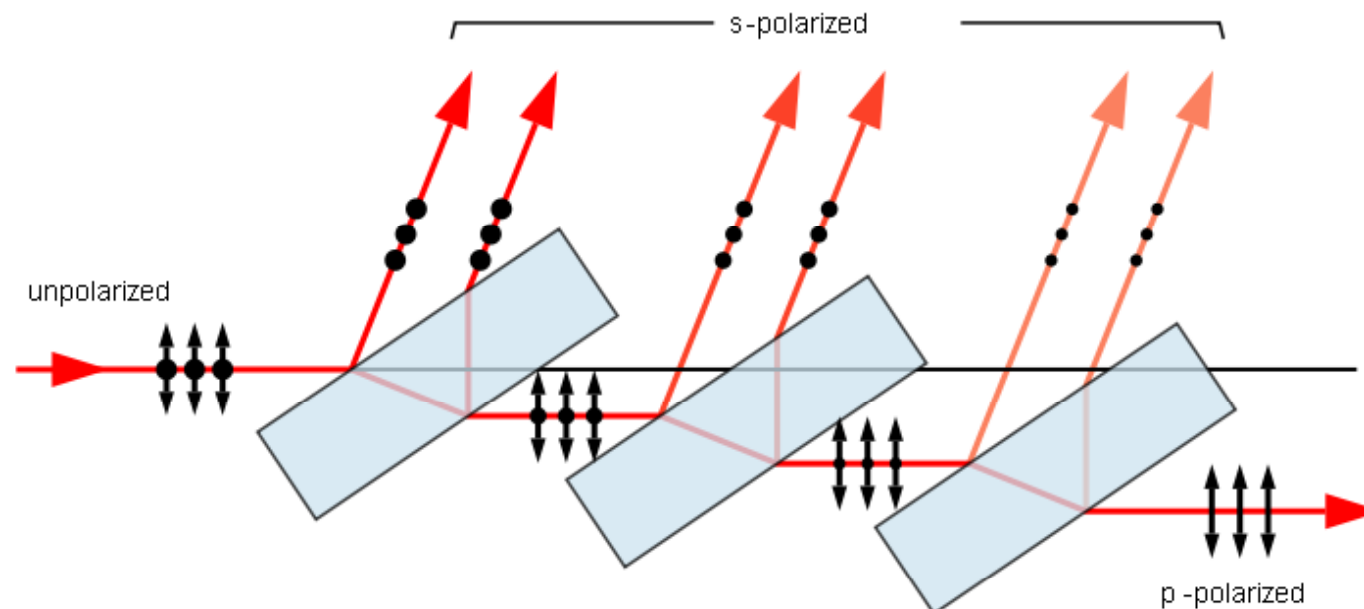
## Exercice: polariseur par réflexion et séparation de faisceau

- Considérons un système constitué de trois lames de verre ( $n = 1,5$ ).
  - Chaque lame de verre réfléchit deux fois la lumière (à l'entrée et à la sortie),
  - Un faisceau lumineux non polarisé est incident à l'angle de Brewster.
1. Calculer la valeur de angle de Brewster.
  2. Calculer pour une, ensuite deux lames de verre le bilan de lumière réfléchie et transmise et son type et degré de polarisation.
  3. (Travail personnel) Calculer le pourcentage résiduel de lumière polarisée **s** qui est transmise à travers trois et quatre lames de verre.



# Stratégies pour augmenter le degré de polarisation $p$ du faisceau transmis on peut:

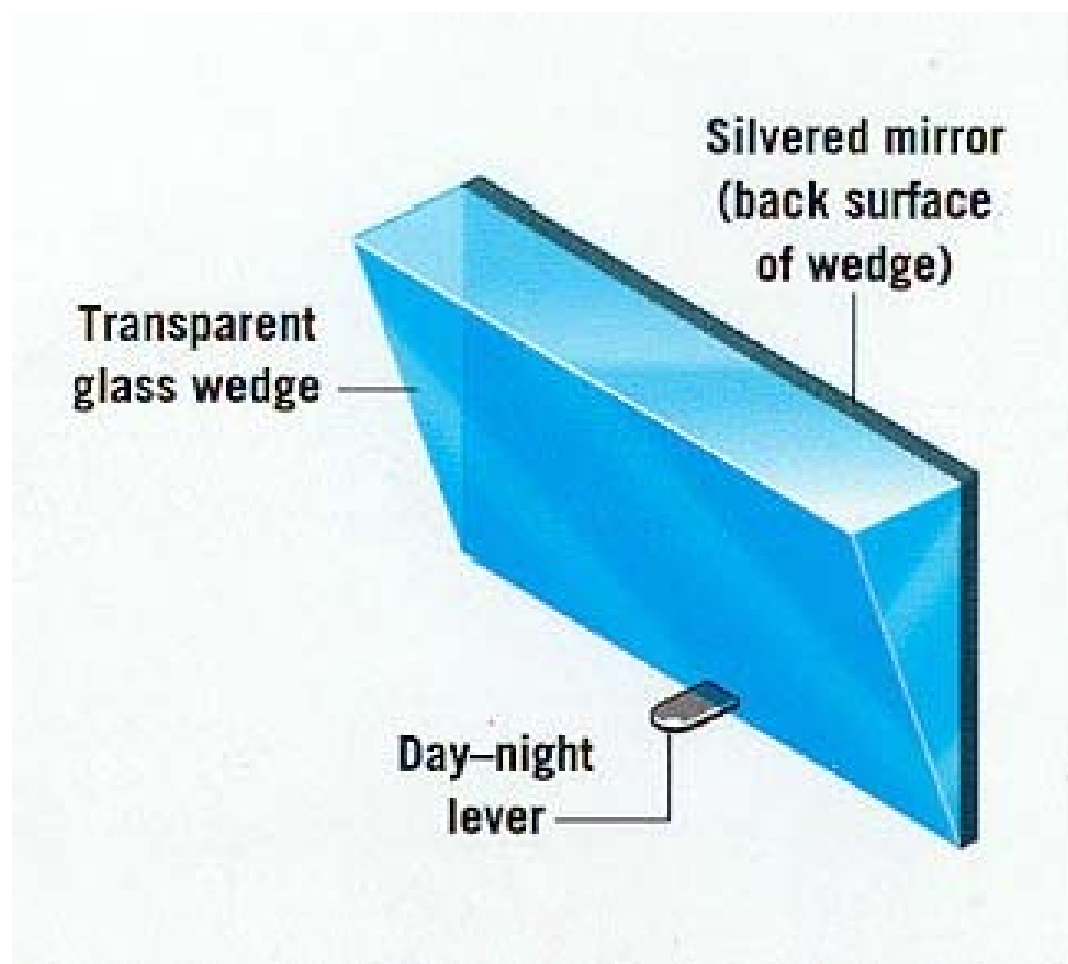
- Augmenter le nombre de lames.
- Utiliser des verres d'indice plus élevé.
- Utiliser un angle d'incidence supérieur à l'angle de Brewster (au prix d'une intensité transmise réduite).



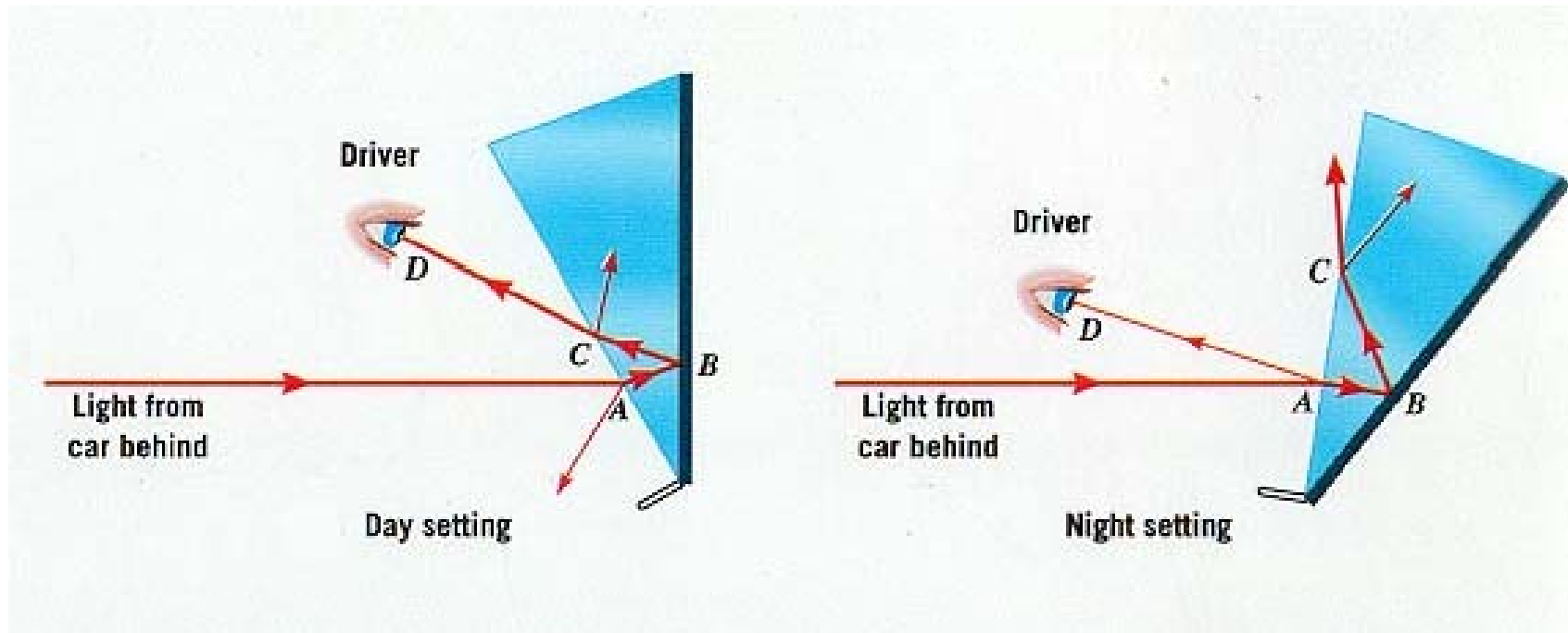
# Une conséquence pratique pour les photographes

- Pour éliminer une grande partie des reflets sur une vitrine lorsqu'on veut photographier ce qu'il y a derrière, ...
- il suffit de placer un filtre polariseur devant l'appareil photo, et de se placer proche de l'angle de Brewster.

# Application pratique des équations de Fresnel: Rétro-réflecteur avec système anti-éblouissement



# Rétro-réflecteur





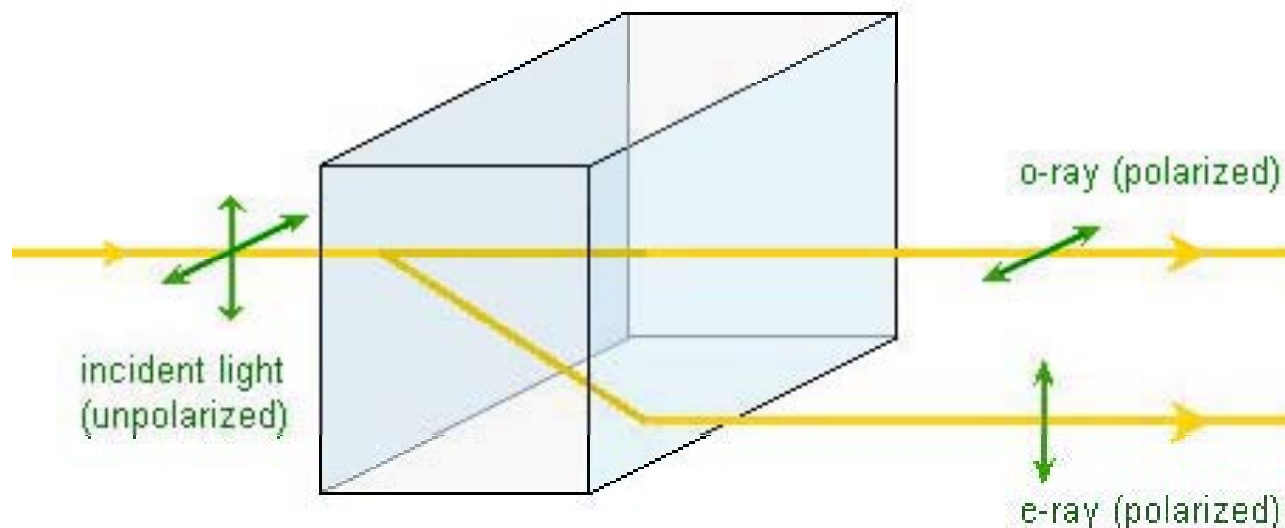
# Biréfringence

- La biréfringence est la propriété physique d'un matériau dans lequel la lumière se propage de façon anisotrope.
- Dans un milieu biréfringent, l'indice de réfraction n'est pas unique, il dépend des directions de propagation et de polarisation du rayon lumineux.
- Un effet spectaculaire de la biréfringence est la double réfraction par laquelle un rayon lumineux pénétrant dans le cristal est divisé en deux.
- C'est pourquoi, sur la photographie ci-bas, l'inscription apparaît en double après avoir traversé le cristal de calcite.



# Polarisation par biréfringence

- Certains polariseurs exploitent la biréfringence de certains matériaux comme le quartz, la calcite et le spath d'Islande.
- Ces cristaux ont la particularité de diviser un faisceau non polarisé en deux faisceaux polarisés différemment: il existe **deux angles de réfraction**, d'où le terme de biréfringence.
- On parle alors d'un **rayon ordinaire** noté **o** et d'un **rayon extraordinaire** noté **e** (en général, ces deux rayons ne sont pas polarisés rectilignement).



# Description des milieux biréfringents

- On considère la propagation d'un rayon lumineux polarisé rectilignement dans un milieu biréfringent. De manière générale, la vitesse de cette onde, ou en d'autres termes l'indice de réfraction, dépend de la direction de polarisation du rayon. C'est le propre d'un milieu biréfringent.
- Il existe cependant au moins une direction privilégiée pour laquelle l'indice est indépendant de la direction de polarisation. Une telle direction est appelée **axe optique** du milieu.
- Il existe alors deux possibilités correspondant à deux types de milieux:
  1. les milieux uniaxes qui possèdent un unique axe optique
  2. les milieux biaxes qui en possèdent deux.

# Milieux uniaxes

- Les milieux uniaxes ont deux indices de réfraction principaux : on les appelle indices ordinaire et extraordinaire. Ils sont en général notés respectivement  $n_o$  et  $n_e$ .
- La différence  $\Delta n = n_e - n_o$  est alors appelée **biréfringence** (ou biréfringence absolue) du milieu. Pour la plupart des milieux, elle vaut en valeur absolue **quelques pourcents**.
- On distingue deux cas selon le signe de la biréfringence :
  - $\Delta n > 0$  : le milieu est dit uniaxe positif.
  - $\Delta n < 0$  : le milieu est dit uniaxe négatif.
- De très nombreux cristaux naturels sont uniaxes, comme le quartz, la glace d'eau ou la calcite.
- Les cristaux uniaxes appartiennent aux systèmes cristallins trigonal, tétragonal ou hexagonal.

# Milieux biaxes

- Les milieux biaxes ont trois indices de réfraction principaux notés en général  $n_1$ ,  $n_2$  et  $n_3$ .
- Les cristaux biaxes appartiennent aux systèmes cristallins triclinique, monoclinique ou orthorhombique.

### Uniaxial materials, at 590 nm

Material ▲	$n_o$ ☒	$n_e$ ☒	$\Delta n$ ☒
beryl $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$	1.602	1.557	-0.045
calcite $\text{CaCO}_3$	1.658	1.486	-0.172
calomel $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$	1.973	2.656	+0.683
ice $\text{H}_2\text{O}$	1.309	1.313	+0.014
lithium niobate $\text{LiNbO}_3$	2.272	2.187	-0.085
magnesium fluoride $\text{MgF}_2$	1.380	1.385	+0.006
peridot $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$	1.690	1.654	-0.036
quartz $\text{SiO}_2$	1.544	1.553	+0.009
ruby $\text{Al}_2\text{O}_3$	1.770	1.762	-0.008
rutile $\text{TiO}_2$	2.616	2.903	+0.287
sapphire $\text{Al}_2\text{O}_3$	1.768	1.760	-0.008
sodium nitrate $\text{NaNO}_3$	1.587	1.336	-0.251
tourmaline (complex silicate )	1.669	1.638	-0.031
zircon, high $\text{ZrSiO}_4$	1.960	2.015	+0.055
zircon, low $\text{ZrSiO}_4$	1.920	1.967	+0.047

### Biaxial materials, at 590 nm

Material ☒	$n_\alpha$ ☒	$n_\beta$ ☒	$n_\gamma$ ☒
borax	1.447	1.469	1.472
epsom salt $\text{MgSO}_4 \cdot 7(\text{H}_2\text{O})$	1.433	1.455	1.461
mica, biotite	1.595	1.640	1.640
mica, muscovite	1.563	1.596	1.601
olivine $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$	1.640	1.660	1.680
perovskite $\text{CaTiO}_3$	2.300	2.340	2.380
topaz	1.618	1.620	1.627
ulexite	1.490	1.510	1.520

# Lames à retard

- Une lame à retard est un outil optique capable de **modifier la polarisation de la lumière la traversant.**
- C'est un **crystal uniaxial biréfringent** taillé en forme de lame à faces parallèles, **l'axe optique** étant parallèle à la face d'entrée.
- Or la lumière ne se propage pas à la même vitesse selon qu'elle est polarisée dans une direction parallèle ou perpendiculaire à **l'axe optique.**
- Ceci permet de définir deux axes particuliers de la lame: **l'axe lent** et **l'axe rapide** (celui-ci est aussi la direction de l'axe optique du matériaux).

## Lames à retard

- La polarisation de la lumière peut toujours être considéré comme décomposée en deux composantes: parallèle ou perpendiculaire à l'**axe optique**.
- Une lame à retard permet donc de retarder une de ces deux composantes par rapport à l'autre, c'est-à-dire de provoquer un **déphasage**.
- Ce retard dépend
  - des **deux indices** de réfractions qui caractérisent le matériau utilisé
  - de l'épaisseur de la lame,
  - de la longueur d'onde de l'onde lumineuse considérée.
- La différence de phase induite dans une lame d'épaisseur  $d$  est égale à:

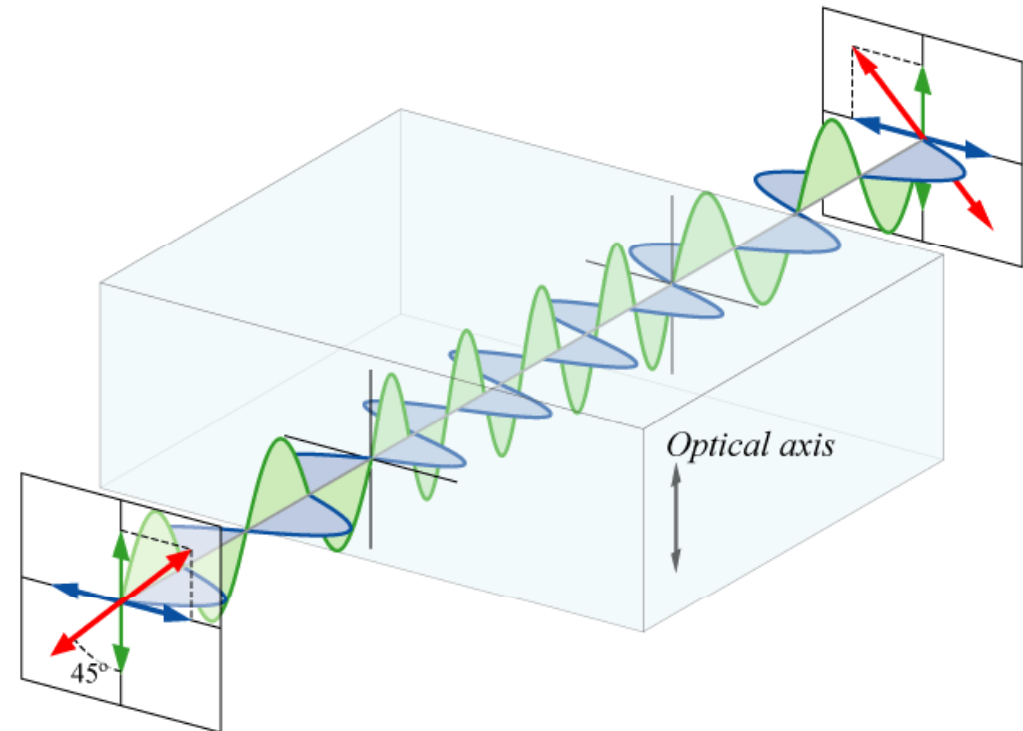
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d$$



# Types de lames à retard

- La plupart des lames à retard sont taillées dans un cristal de façon à ce que l'axe optique soit parallèle à la face de la lame. Ainsi les axes lent et rapide sont également parallèles à la face de la lame.
- Il existe plusieurs types de ces lames, caractérisées par le déphasage qu'elles produisent entre les deux composantes de la polarisation :
  - Une **lame demi-onde**, également notée lame  $\lambda/2$ , crée un déphasage valant  $180^\circ$ , c'est-à-dire un retard d'une moitié de longueur d'onde. L'onde sortant d'une telle lame présente une polarisation symétrique de l'onde entrante par rapport à l'axe optique.
  - Une **lame quart d'onde**, également notée lame  $\lambda/4$ , crée un déphasage de  $90^\circ$ , c'est-à-dire un retard d'un quart de longueur d'onde. Elle permet de passer d'une polarisation rectiligne à une polarisation elliptique ou circulaire, et vice-versa.

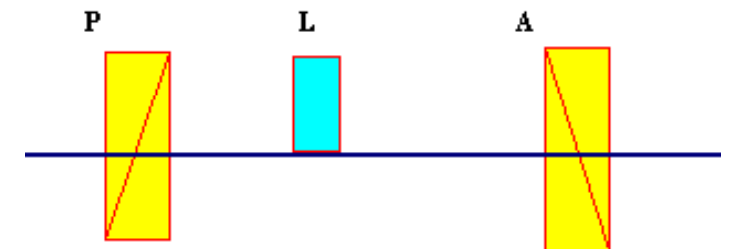
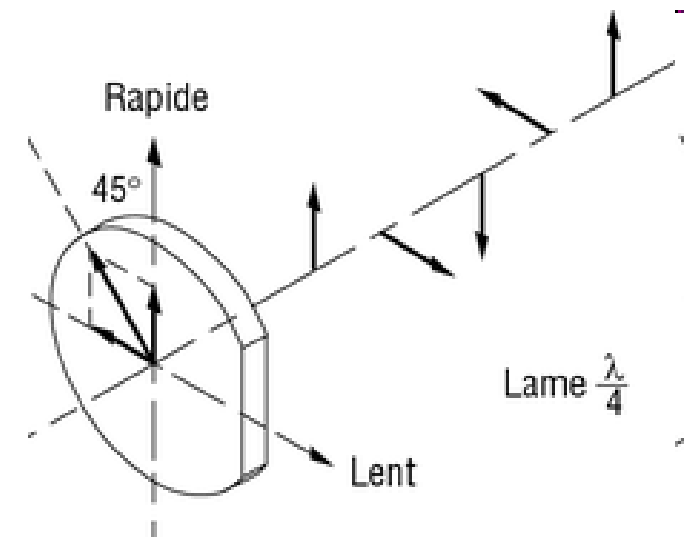
# Lame demi-onde



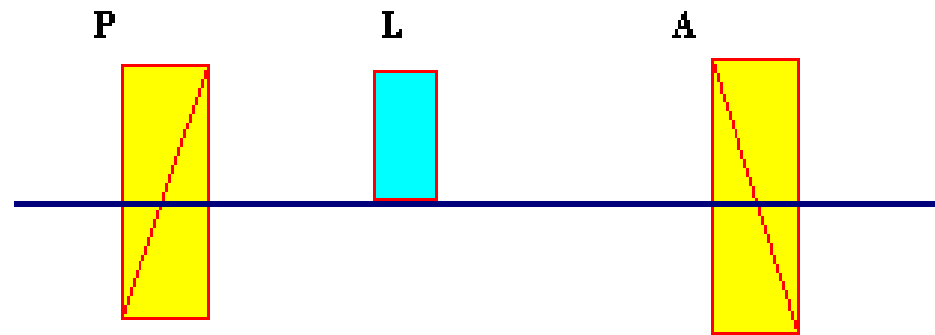
- La lumière entrant dans la lame (ici ayant une polarisation rectiligne selon la direction rouge) peut être décomposée en deux polarisations perpendiculaires (en bleu et vert). A l'intérieur de la lame, la polarisation verte prend un retard par rapport à la bleue.
- Une lame demi-onde transforme une polarisation rectiligne en une autre polarisation rectiligne, symétrique par rapport à son axe optique.
- En conséquence, si l'orientation de la lame demi-onde par rapport à celle d'une polarisation rectiligne est de  $\alpha$ , la polarisation transmise par la lame est de  $2\alpha$ .
- Par exemple, si l'axe optique (rapide) de la lame fait  $45^\circ$  par rapport la direction de polarisation entrante, la direction sortante aura tourné de  $90^\circ$ .
- Une lame demi-onde est très pratique pour faire tourner d'un angle quelconque le plan de polarisation d'une lumière polarisé.

# Lame quart d'onde

- Une lame quart d'onde, également notée lame  $\lambda/4$ , crée un déphasage de  $90^\circ$ , c'est-à-dire un retard d'un quart de longueur d'onde.
- Les lames quart d'onde transforment une polarisation rectiligne en une polarisation circulaire et vice versa. Pour obtenir une polarisation circulaire, la lame doit être orientée de sorte que les composantes rapide et lente de l'onde polarisée linéairement soient égales.
- Le plan de polarisation de l'onde incidente doit donc faire un angle de  $45^\circ$  avec l'axe rapide (et avec l'axe lent), comme sur la figure.
- On peut s'assurer de la bonne circularité de la polarisation en faisant tourner un 2<sup>ème</sup> polariseur servant d'analyseur: l'intensité de la lumière transmise ne doit pas varier. Si elle varie légèrement, cela signifie que la lumière est **polarisée elliptiquement**, et que la lame n'est pas exactement un quart d'onde pour la longueur d'onde utilisée.
- Cela peut être corrigé (comme dans le cas de la demi-onde) en inclinant légèrement la lame autour de l'un de ses axes, lent ou rapide, tout en contrôlant l'invariabilité de l'intensité avec le polariseur.



# Lames à retard – cas général



- En général l'effet d'une lame à retard sur un faisceau polarisé par P est mesuré en faisant tourner un 2<sup>ème</sup> polariseur A servant d'analyseur.
- Si on définit:
  - $\alpha$  = angle entre la direction de polarisation de P et l'axe optique de la lame
  - $\beta$  = angle entre la direction de polarisation de A et l'axe optique de la lame
  - $\Delta\varphi$  = différence de phase induite par la lame

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d$$

- l'intensité de la lumière transmise par l'analyseur A est:

$$I = I_0 \cdot [\cos^2(\alpha + \beta) + \sin(2\alpha) \cdot \sin(2\beta) \cdot \cos^2(\Delta\varphi/2)]$$

# Exercice

1. Soit une onde incidente de 590 nm.  
Calculer l'épaisseur minimum d'une lame en quartz ( $n_o = 1.5443$ ,  $n_e = 1.5534$ ) pour avoir une différence de phase de  $\pi/2$  (quart d'onde) .
2. Si on utilise cette lame avec une lumière de longueur d'onde 550 nm, quel sera la différence de phase effective dans ce cas ?
3. Aura-t-on une polarisation circulaire à la sortie de la lame ?
4. Si non, calculer l'excentricité de la polarisation elliptique obtenue.

Rappel: si  $a$  et  $b$  sont respectivement les demi-grand axe et demi-petit axe d'une ellipse, l'excentricité est donnée par

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

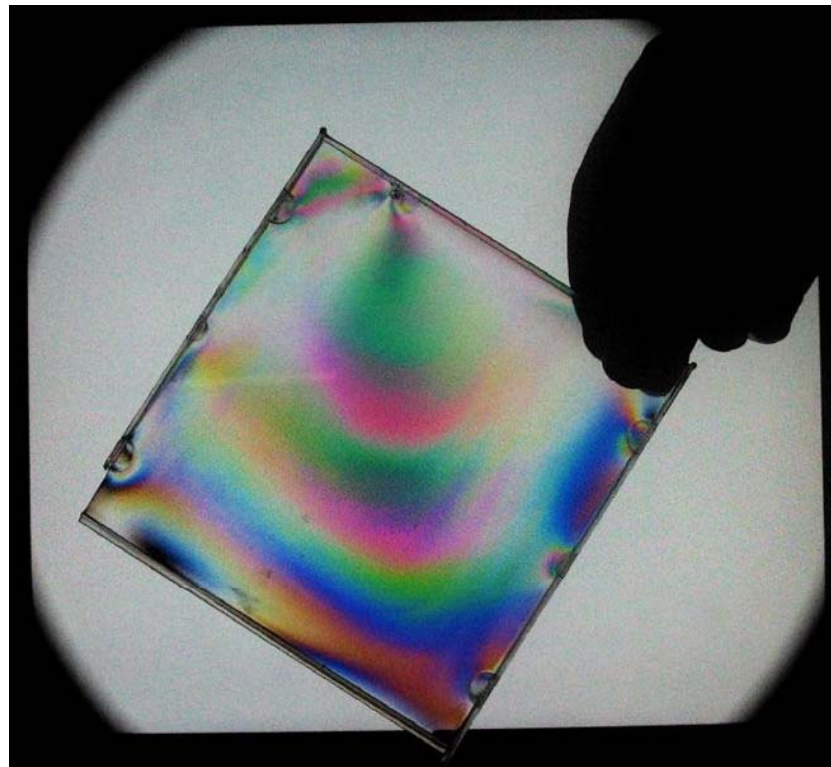


# Biréfringence induite

- Il est possible de créer de la biréfringence dans un milieu optiquement isotrope de plusieurs manières.
- Par un champ électrique
- Par un champ magnétique
- Par une contrainte mécanique
  - Les cristaux soumis à des contraintes mécaniques peuvent présenter une biréfringence : on parle de photoélasticité. Lorsque le matériau est transparent, cet effet permet de visualiser les contraintes par interférométrie.

# Photoélasticimétrie

- La photoélasticimétrie est une méthode expérimentale permettant de visualiser les contraintes existant à l'intérieur d'un solide grâce à sa photoélasticité.
- C'est une méthode principalement optique se basant sur la **biréfringence** acquise par les matériaux soumis à des contraintes.
- On l'utilise souvent dans les cas où les méthodes mathématiques et informatiques deviennent trop lourdes à mettre en œuvre.





# Ecrans LCD

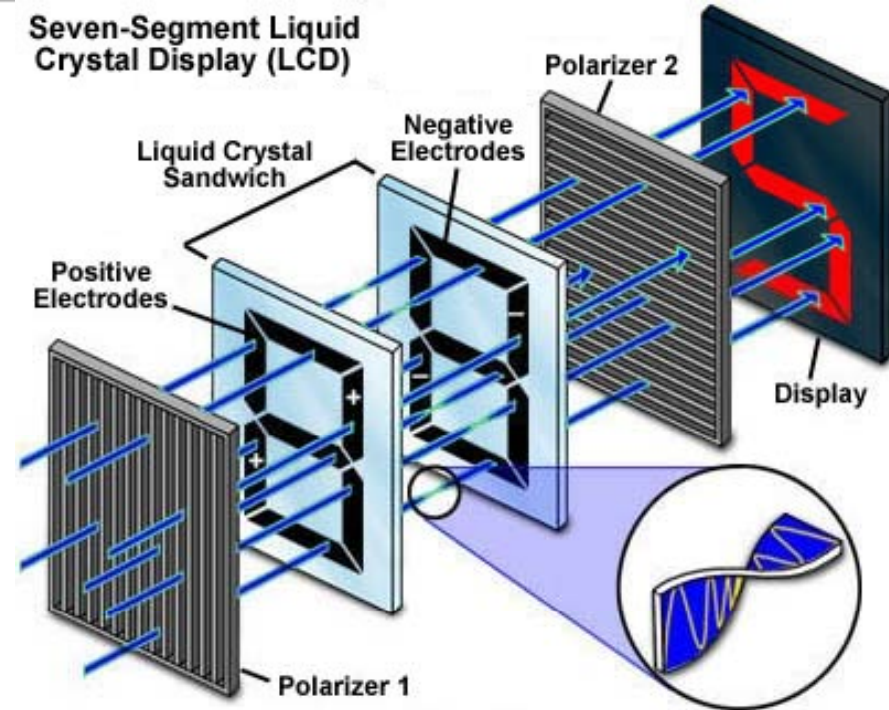
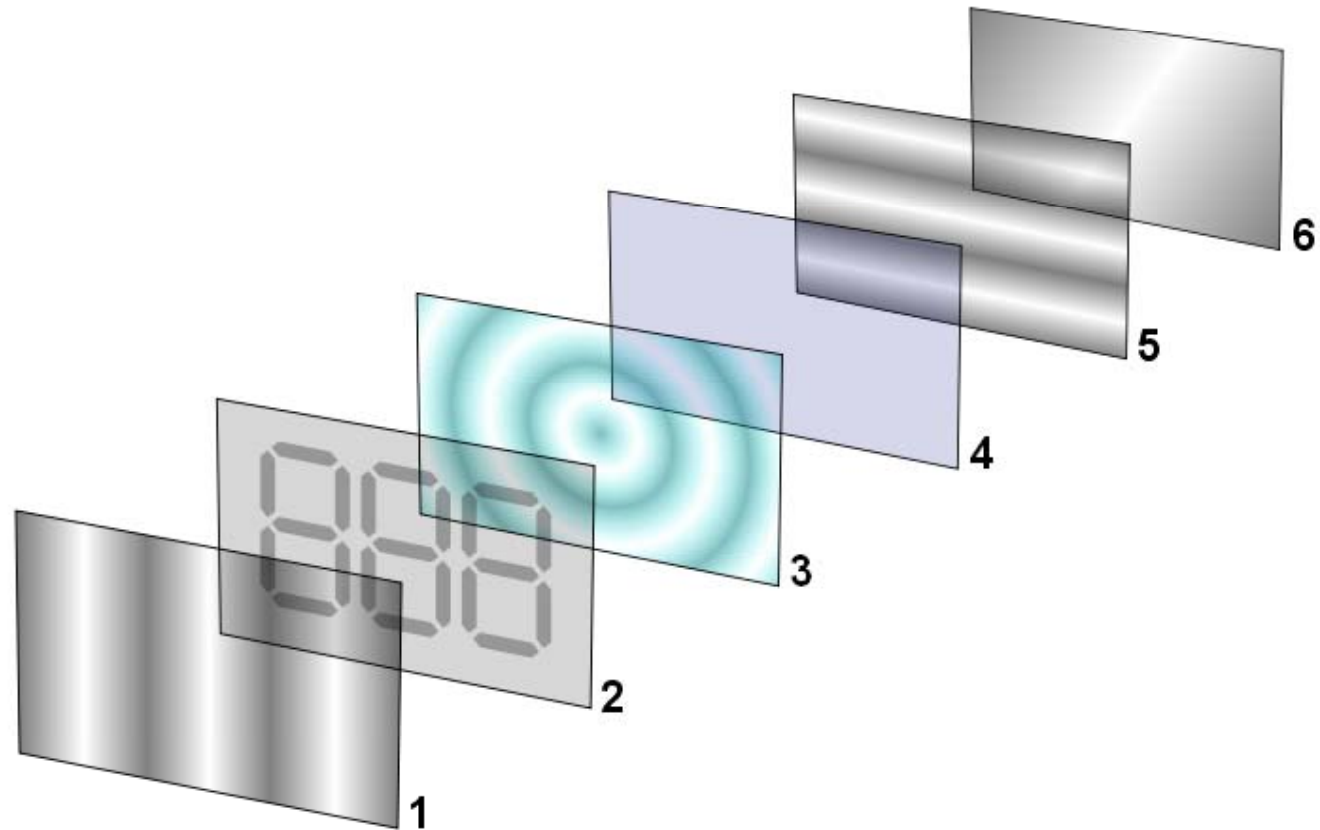


Figure 3

- L'écran utilise la **polarisation** de la lumière grâce à des **filtres polarisants** et à la **biréfringence** de certains cristaux liquides dont on peut faire varier l'orientation en fonction du champ électrique.
- L'écran LCD (Liquid Crystal Display) est constitué de deux polariseurs dont les directions de polarisation forment un angle de  $90^\circ$ , de chaque côté d'un sandwich formé de deux plaques de verre enserrant des cristaux liquides.
- Les deux faces internes des plaques de verre comportent une matrice d'électrodes transparentes, une (noir et blanc) ou trois (couleur) par pixel.
- L'épaisseur du dispositif et la nature des cristaux liquides sont choisis de manière à obtenir la rotation désirée du plan de polarisation en l'absence de tension électrique.

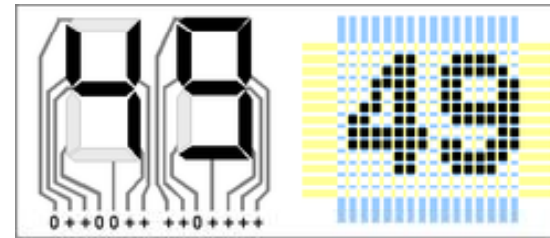
# Ecrans LCD



## *Afficheur 3 chiffres*

- 1 & 5 : filtres polarisants ;
- 2 : électrodes avant ;
- 4 : électrode arrière ;
- 3 : cristaux liquides ;
- 6 : miroir

- L'application d'une différence de potentiel plus ou moins élevée entre les deux électrodes d'un pixel entraîne un changement d'orientation des molécules, une variation du plan de polarisation et donc une variation de la transparence de l'ensemble du dispositif.
- Cette variation de transparence est exploitée par un rétro-éclairage, par réflexion de la lumière incidente ou par projection.
  - Affichage par segments et par pixels
  - Affichage par segments et par pixels



- Les petits afficheurs LCD monochromes utilisent souvent des électrodes avant en forme de segments de caractère de façon à simplifier l'électronique (commande directe en tout ou rien) tout en obtenant une très bonne lisibilité (pas de balayage).
- Les affichages plus complexes, comme pour les télévisions, utilisent des électrodes par pixels accessibles par ligne ou colonne entières. Leur commande d'allumage ou d'extinction doit se faire par un balayage régulier des lignes/colonnes de points.

# Travail personnel

- Etudier le **chapitre 14** du polycopié.
- Exercer les applets indiquées sur la page des supports de cours