# Ellipsométrie optique

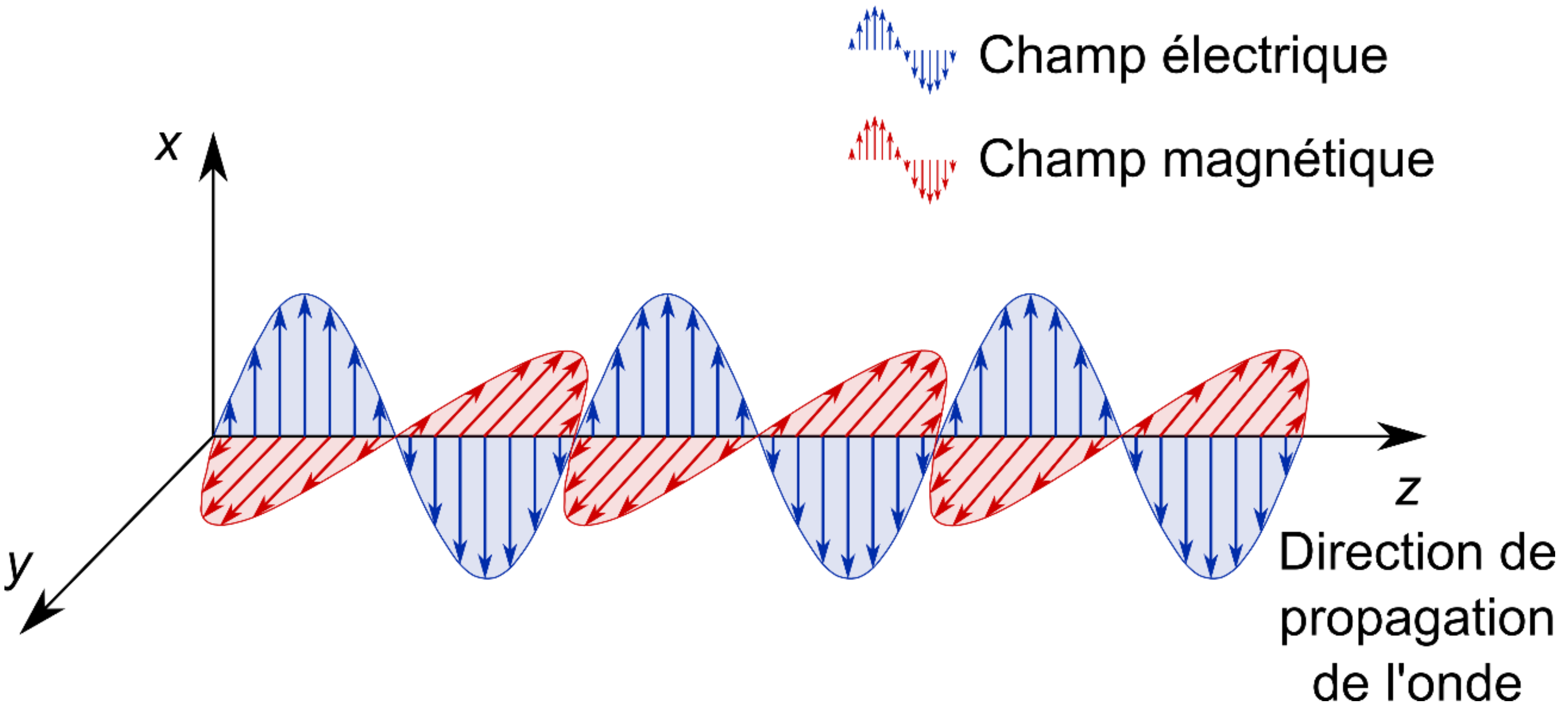
# Définition

L’ellipsométrie est une technique optique d’analyse de surface fondée sur la mesure du changement de l’état de polarisation de la lumière après réflexion sur une surface plane.

# I. Principes de polarisation de la lumière

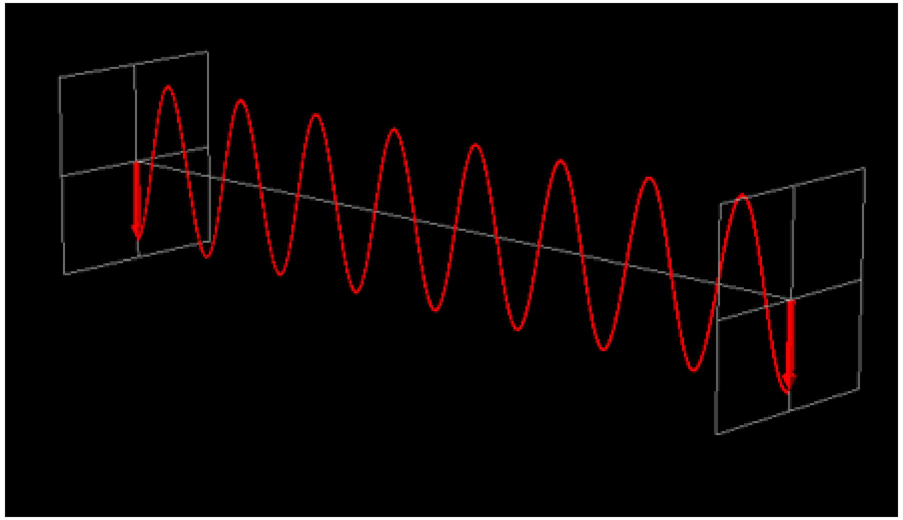
## I.1 définitions:

- Depuis les travaux théoriques de Maxwell et les expériences de Hertz à la fin du XIXe siècle, la lumière est décrite par une onde électromagnétique de haute fréquence ν ( de 4.3 à 7.5 $10^{14}$ Hz) et par conséquent de courte longueur d'onde λ ( de 700 à 400 nm) ($\lambda = \dfrac{c}{\nu}$)
- Une onde électromagnétique consiste en la propagation dans l'espace à la vitesse de la lumière d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{B}$, vibrant en phase. Les ondes électromagnétiques sont transversales : le vecteur du champ électrique $\vec{E}$ et le vecteur du champ magnétique $\vec{B}$ sont perpendiculaires l'un à l'autre et situés dans un plan normal à la direction de propagation $\vec{k}$.

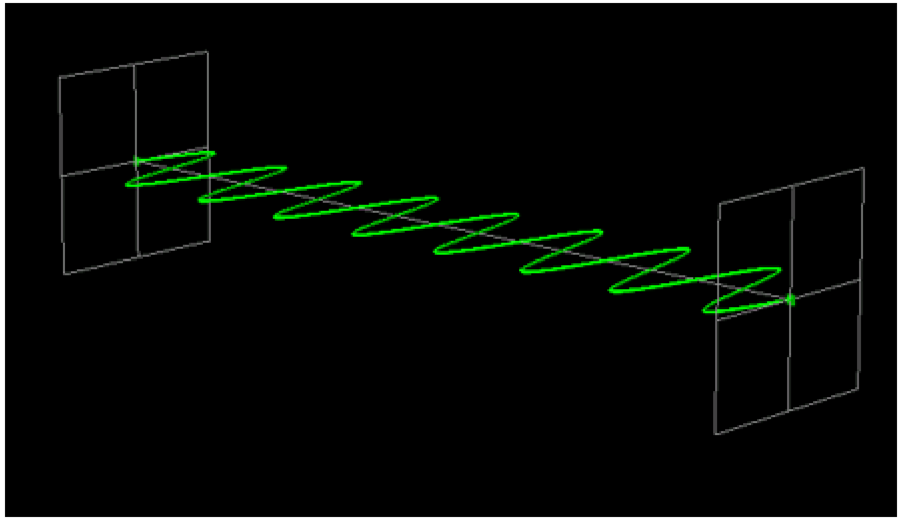

Champ électrique
Champ magnétique
x
y
z
Direction de propagation de l'onde

- Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par leur fréquence (ou par leur longueur d'onde ), par leur vitesse et par leur intensité (ou par leur amplitude). Etant transversales, elles possèdent une propriété supplémentaire: elles sont polarisées. Une onde électromagnétique plane est dite ***polarisée linéairement*** si, lors de la propagation, les vecteurs champs électriques restent dans un même plan; les vecteurs champs magnétiques restent alors également dans un même plan, perpendiculaire au précédent. Le plan formé par le vecteur $\vec{E}$ et la direction de propagation (vecteur $\vec{k}$) est appelé ***plan de polarisation.*** La direction du vecteur $\vec{E}$ est prise par convention comme direction de polarisation de l'onde.

La polarisation caractérise la direction d'oscillation du champ électrique dans un plan orthogonal à la direction de propagation de l'onde.

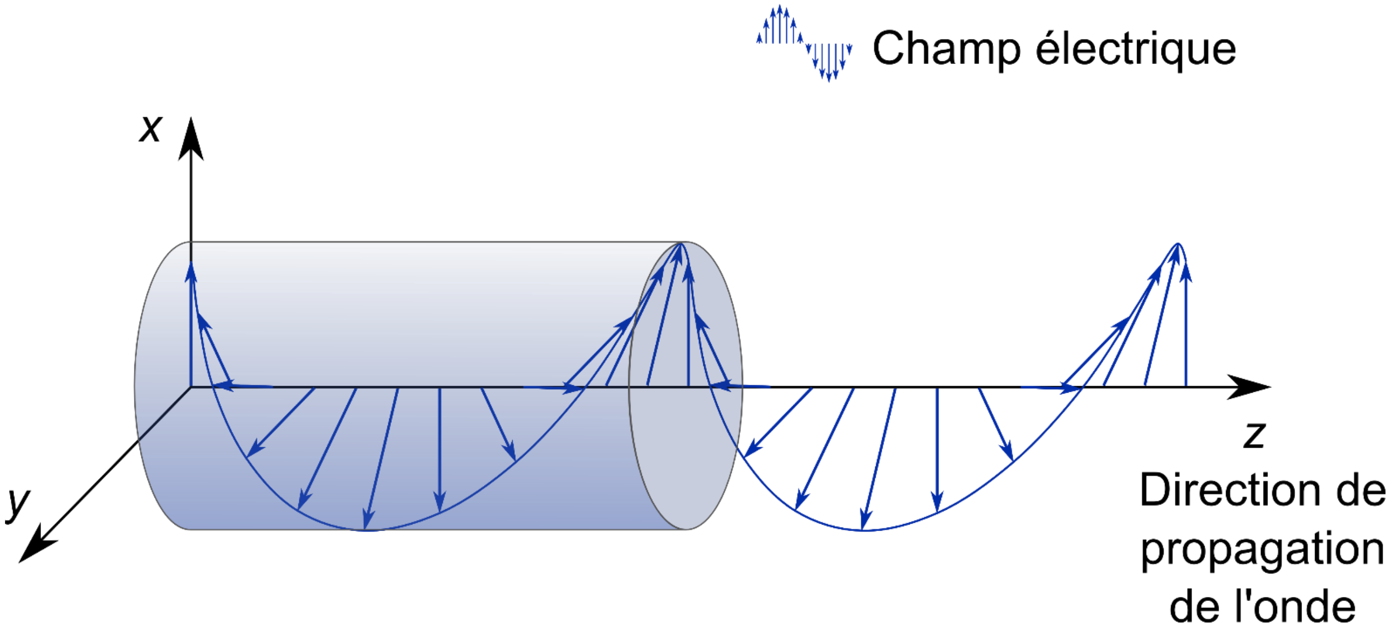


Polarisation verticale



Polarisation horizontale

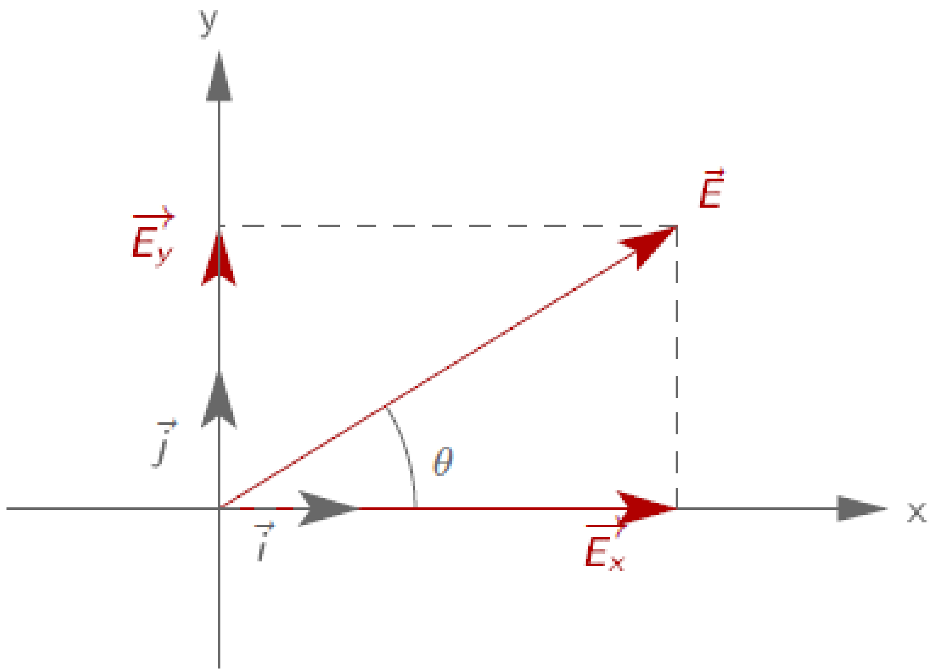
La polarisation circulaire est un peu plus complexe que la polarisation linéaire. Dans ce cas, le champ électrique change d'orientation le long du faisceau et décrit une spirale. Il en va de même pour le champ magnétique, qui est toujours orthogonal au champ électrique.




En plus des polarisations linéaire et circulaire, il existe également la polarisation elliptique. Dans ce cas, le champ électrique décrit une spirale elliptique au lieu d'une spirale circulaire le long du faisceau.

# I.2 Polarisation linéaire et circulaire

À tout instant, le vecteur champ électrique $\vec{E}$ peut être décomposé en une somme de deux vecteurs suivant deux directions x et y perpendiculaires choisies arbitrairement.




Le champ électrique s'exprime alors :

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E_x} + \vec{E_y} \\ &= E_x \vec{i} + E_y \vec{j} \end{aligned}$$

L'angle  étant constant au cours du temps, on a :

$$\begin{aligned} E_x &= a \cos(2\pi\nu t) \\ E_y &= b \cos(2\pi\nu t) \end{aligned}$$

a et b correspondent aux amplitudes maximales des composantes $E_x$ et $E_y$ ,

$$\tan\theta = \frac{b}{a}$$

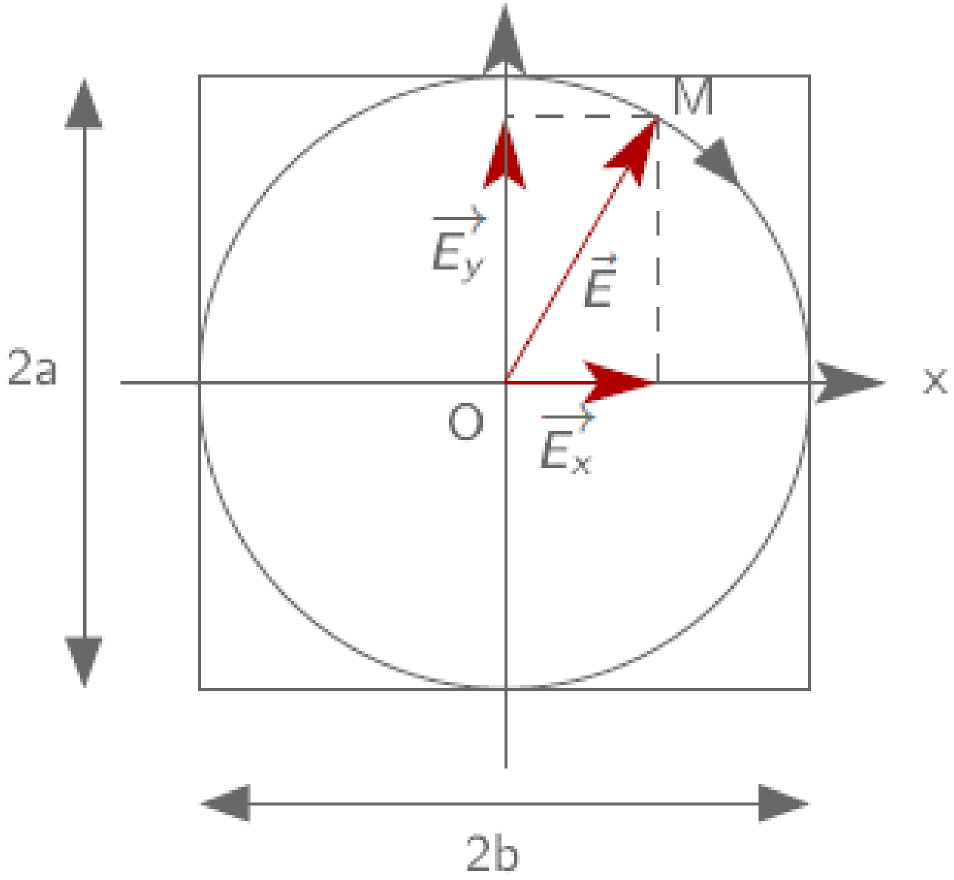
Les deux composantes sont en phase car leurs deux cosinus ont le même argument, la direction d'oscillation du champ électrique évolue au cours du temps. Les deux composantes $E_x$ et $E_y$ n'oscillent plus en phase on note φ le déphasage entre ces deux composantes. on considère qu'elles ont même amplitude (a = b).

On a alors :

$$\begin{aligned} E_x &= a\cos(2\pi\nu t) \\ E_y &= a\cos(2\pi\nu t + \varphi) \end{aligned}$$

Si φ = ±π/2, on parle alors de **polarisation circulaire** et on reconnaît alors l'équation paramétrique d'un cercle :

$$\begin{aligned} E_x &= a\cos(2\pi\nu t) \\ E_y &= a\cos(2\pi\nu t + \pi/2) \end{aligned}$$



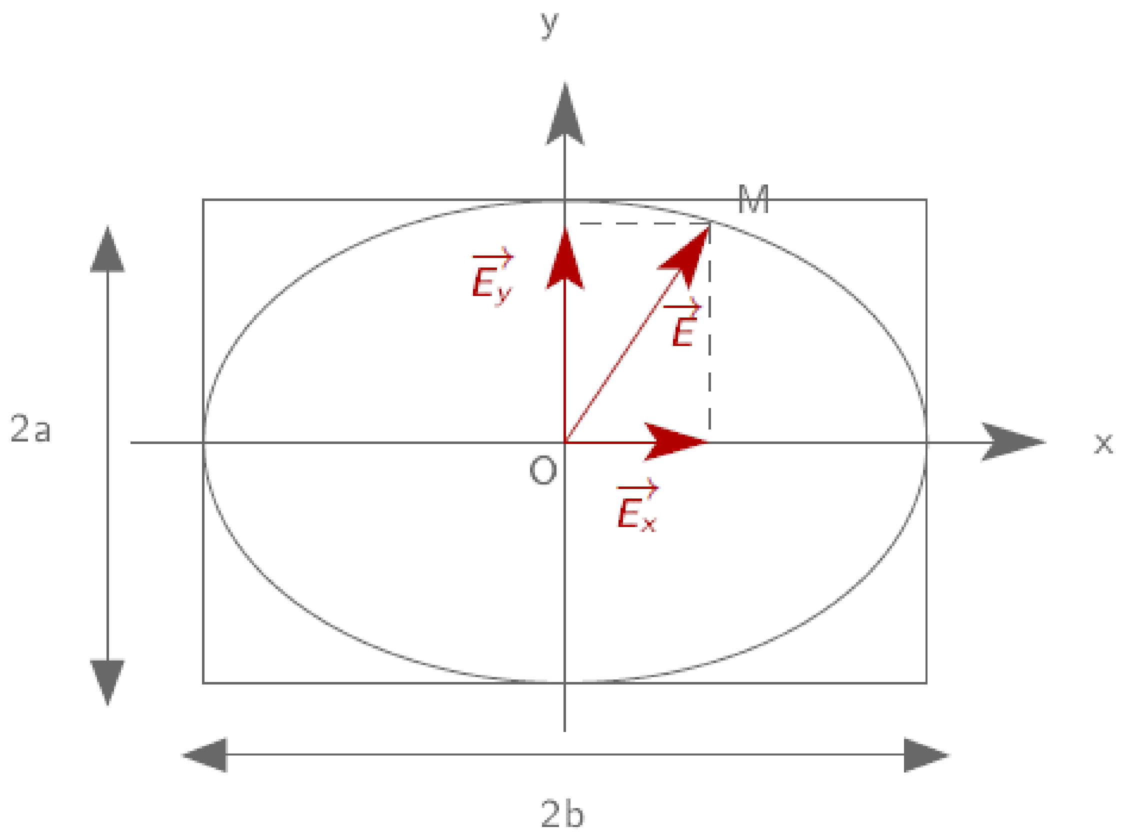
On considère maintenant que les deux composantes Ex et Ey ont des amplitudes différentes.

$$E_x = a\cos(2\pi\upsilon t)$$

$$E_y = b\cos(2\,\pi\upsilon\,t + \varphi)$$

avec $\varphi = \pm\pi/2$

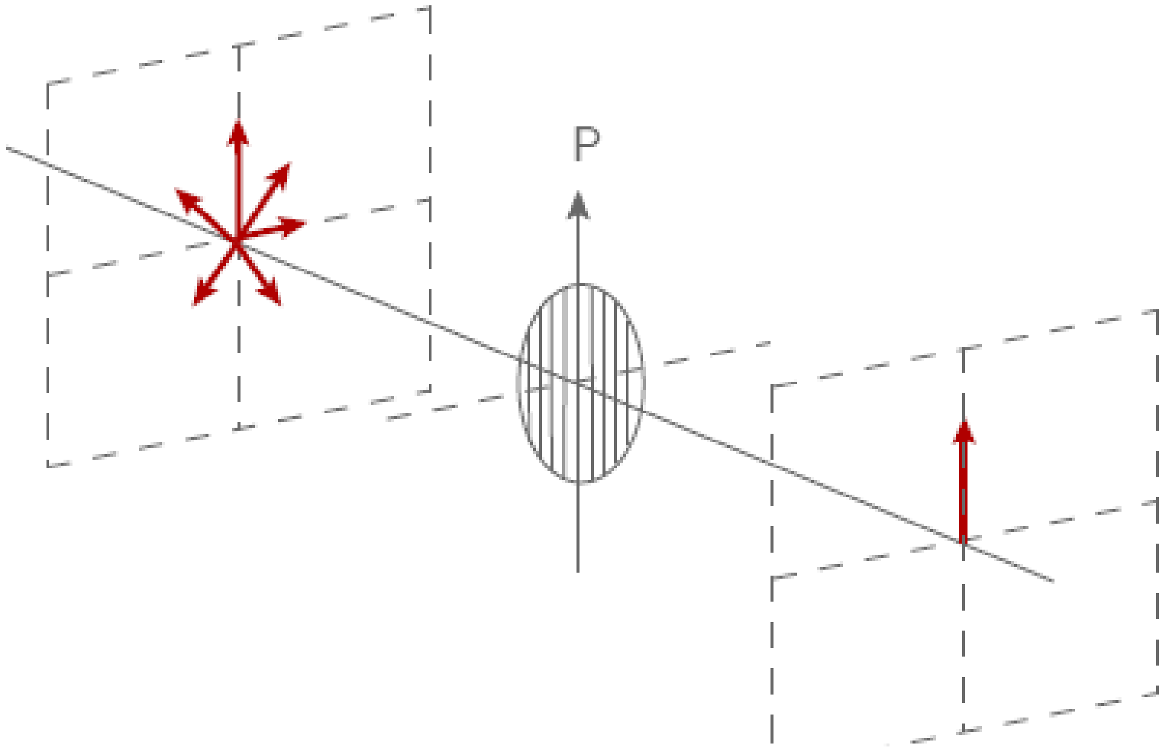
L'extrémité M du champ électrique décrit maintenant une ellipse.



## I.3 Polariseurs / analyseurs

**Polariseurs**

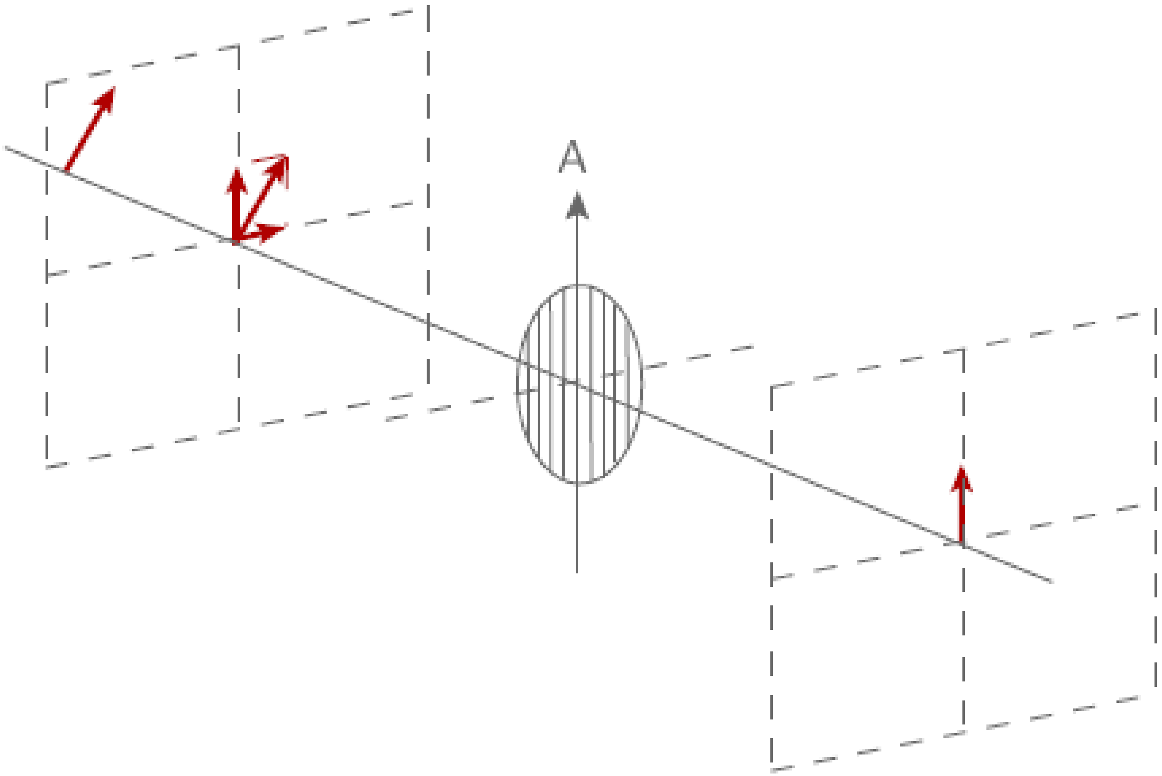
Composant qui sélectionne dans la lumière incidente la composante de direction parallèle à sa direction privilégiée. Il arrête les vibrations perpendiculaires à cette direction génère une lumière polarisée rectilignement.

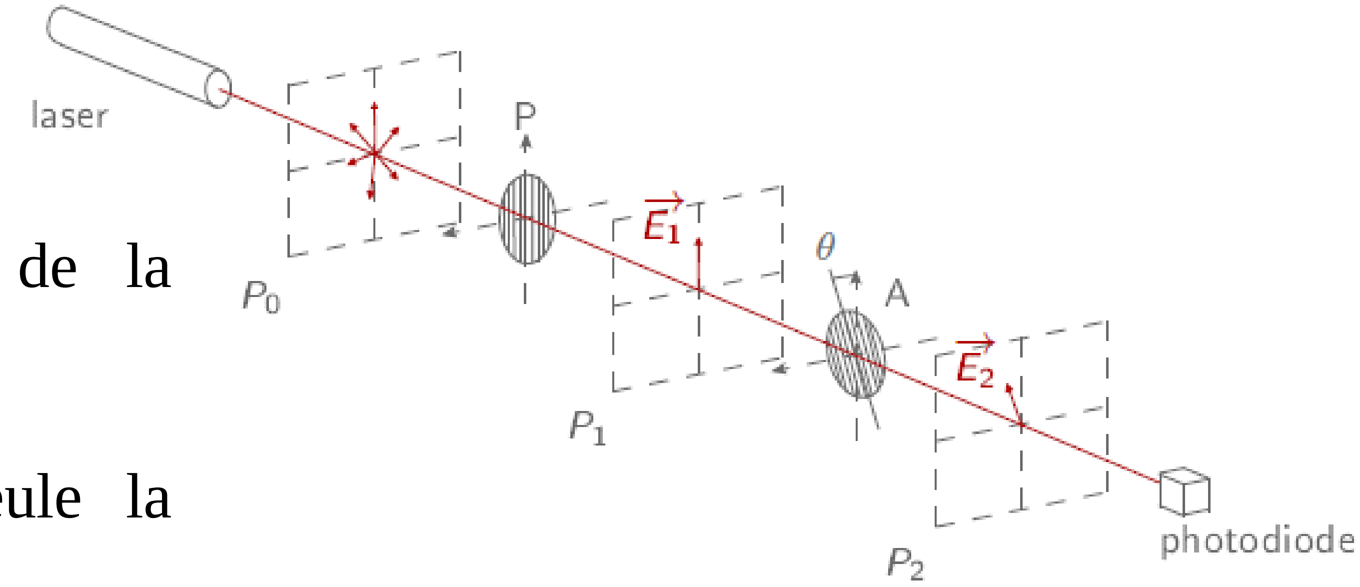


**Analyseur**

Dispositif capable de déterminer si une lumière est polarisée rectilignement ou non, et si c'est le cas, de déterminer sa direction de polarisation.

Un analyseur est tout simplement un polariseur dans lequel on fait traverser la lumière à analyser. Si, pour une orientation particulière de l'analyseur, on observe une extinction de lumière en sortie, c'est que la lumière incidente est polarisée rectilignement dans une direction perpendiculaire à l'axe de l'analyseur.






P sélectionne la composante verticale de la polarisation du champ incident : $P_1 = P_0/2$.

Lors de la traversée de l'analyseur, seule la projection du vecteur $\vec{E}_1$ est transmise

$$\|\vec{E}_2\| = \|\vec{E}_1\| \cdot \cos\theta$$

soit en puissance optique :

$$P_2 = <\|\vec{E}_2\|^2>_\tau \;= <\|\vec{E}_1\|^2 \cdot \cos^2\theta>_\tau \;= <\|\vec{E}_1\|^2>_\tau \cdot \cos^2\theta$$

La loi de Malus s'écrit donc :

$$P_2 = P_1 \cos^2\theta$$

## I.3 Lames de phase

Se sont des lames minces taillées dans un cristal ayant des propriétés optiques anisotropes, agissant sur l’état de polarisation d’une onde. Pour une lumière polarisée rectilignement qui traverse la lame d’épaisseur e, la composante de la vibration incidente suivant l’axe lent subit un retard de phase par rapport à la composante suivant l’axe rapide.

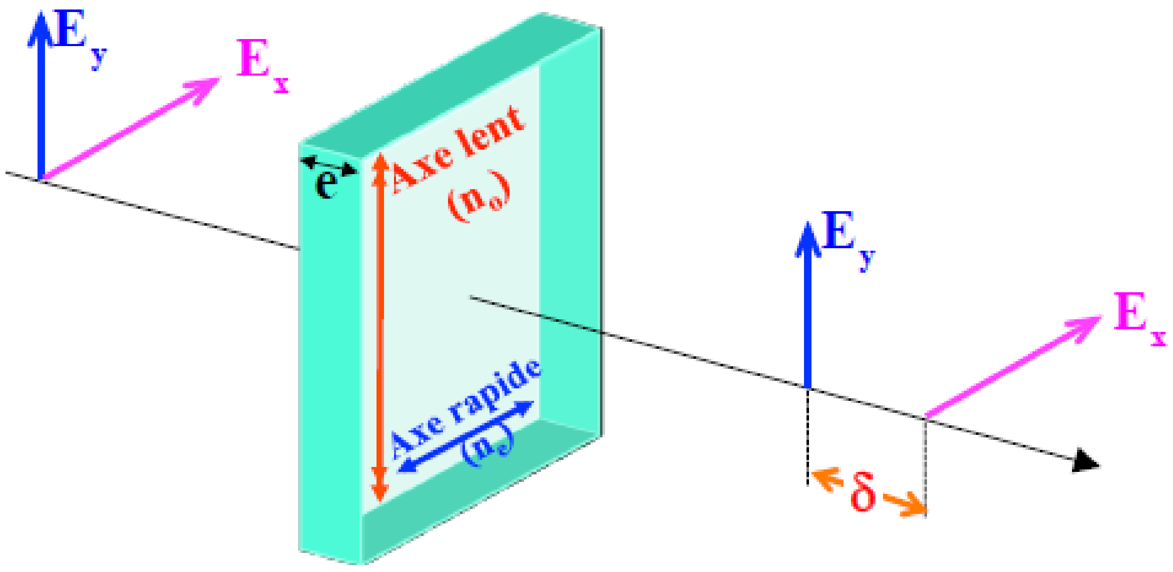
Ceux deux ondes de même fréquence polarisées suivant les axes lent et rapide, subissent le déphasage :

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_o}\delta \quad \text{Avec} \quad \delta = (n_e - n_o)e$$

où $n_o$ : indice ordinaire

$n_e$ : indice extraordinaire

e : l'épaisseur de la lame.




- si $|\delta| = \frac{\lambda_o}{4} \Rightarrow |\varphi| = \frac{\pi}{2}$

la lame est dite *quart-d'onde* ou lame λ/4

- si $|\delta| = \frac{\lambda_o}{2} \Rightarrow |\varphi| = \pi$

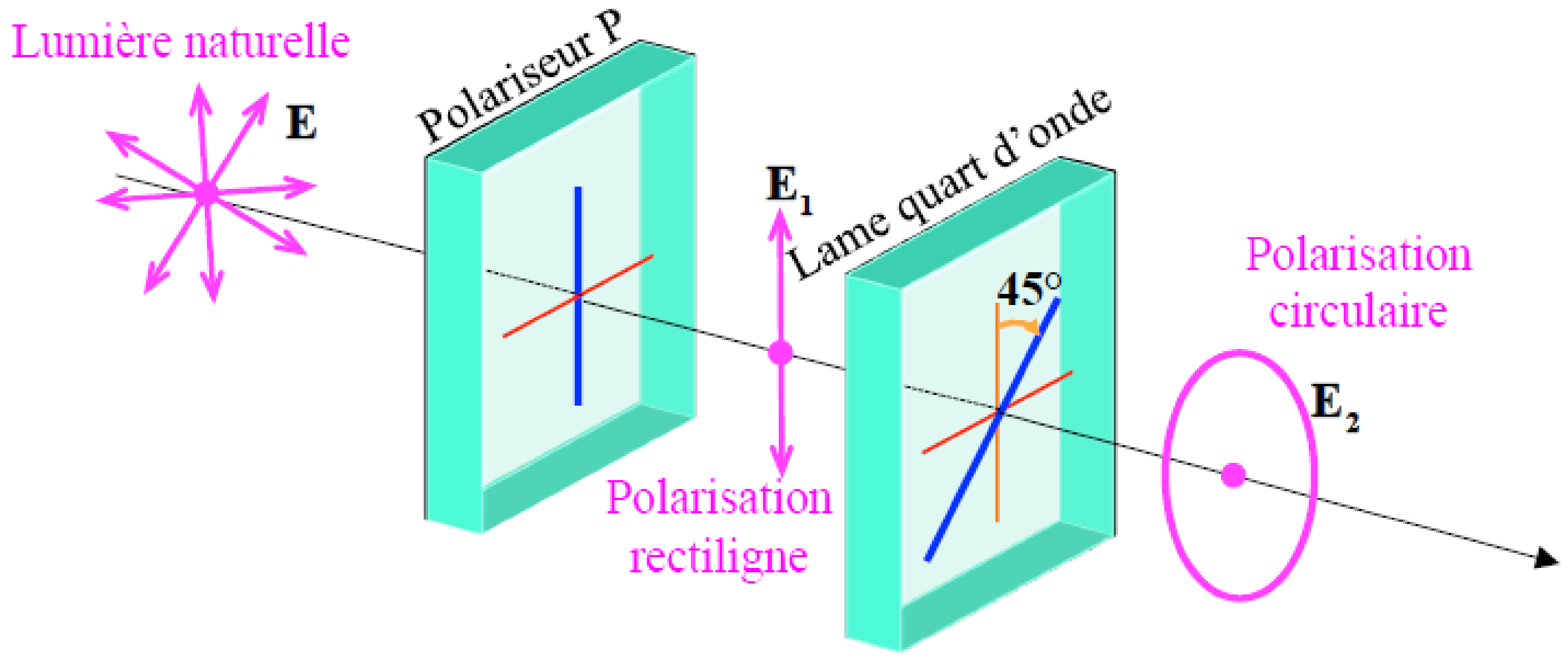
la lame est dite *demi-d'onde* ou lame λ/2.

Soit une onde incidente polarisée rectilignement. A la traversée de la lame :

$$E = E\cos(\alpha)\cos(kz - \omega t)$$
$$y\ i\ E = E\sin(\alpha)\cos(kz - \omega t + \varphi)$$

On remarque que pour $\alpha = 0$ ou $\alpha = \pi/2$ la polarisation reste rectiligne quel que soit $\varphi$.

Lorsque $\varphi = \pm\pi/2$ et $\alpha = \pi/4$, la lumière transmise est polarisée circulairement

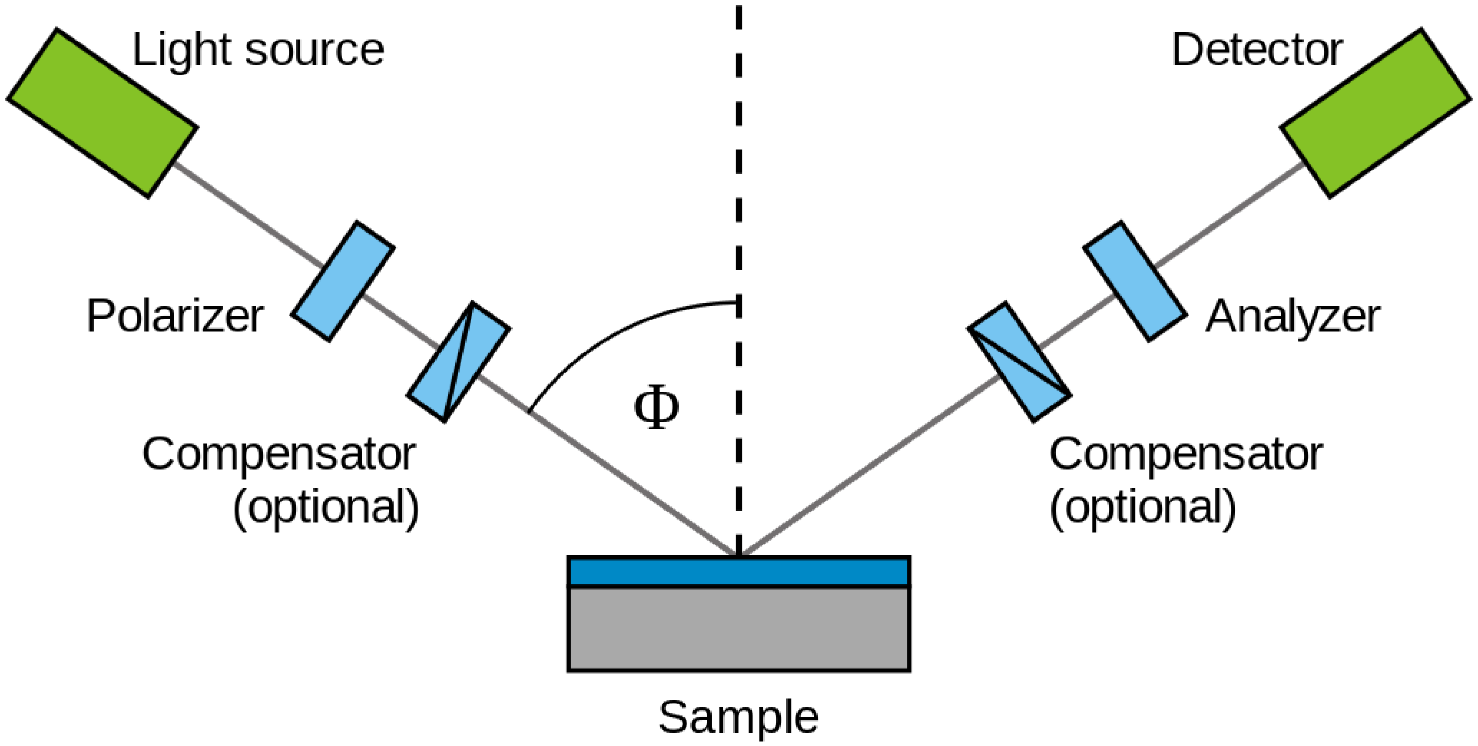


# II. Appareillage et techniques de mesure: ellipsomètrie

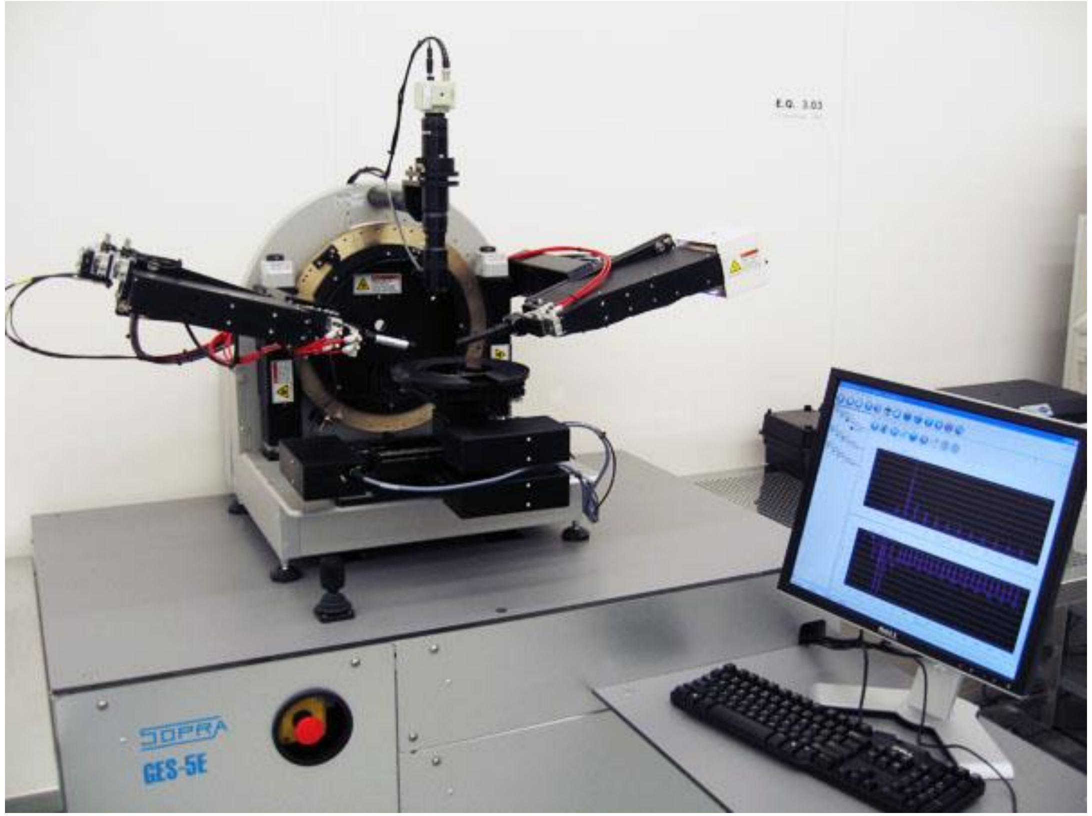
## II.1 principe de l’ellipsomètre

Le terme ellipsomètrie traduit le fait qu’une lumière monochromatique polarisée rectilignement se retrouve généralement polarisée elliptiquement après réflexion sur un matériau homogène, isotrope et absorbant; ainsi l’ellipsométre consiste à mesurer l’ellipcité de l’onde réfléchie.

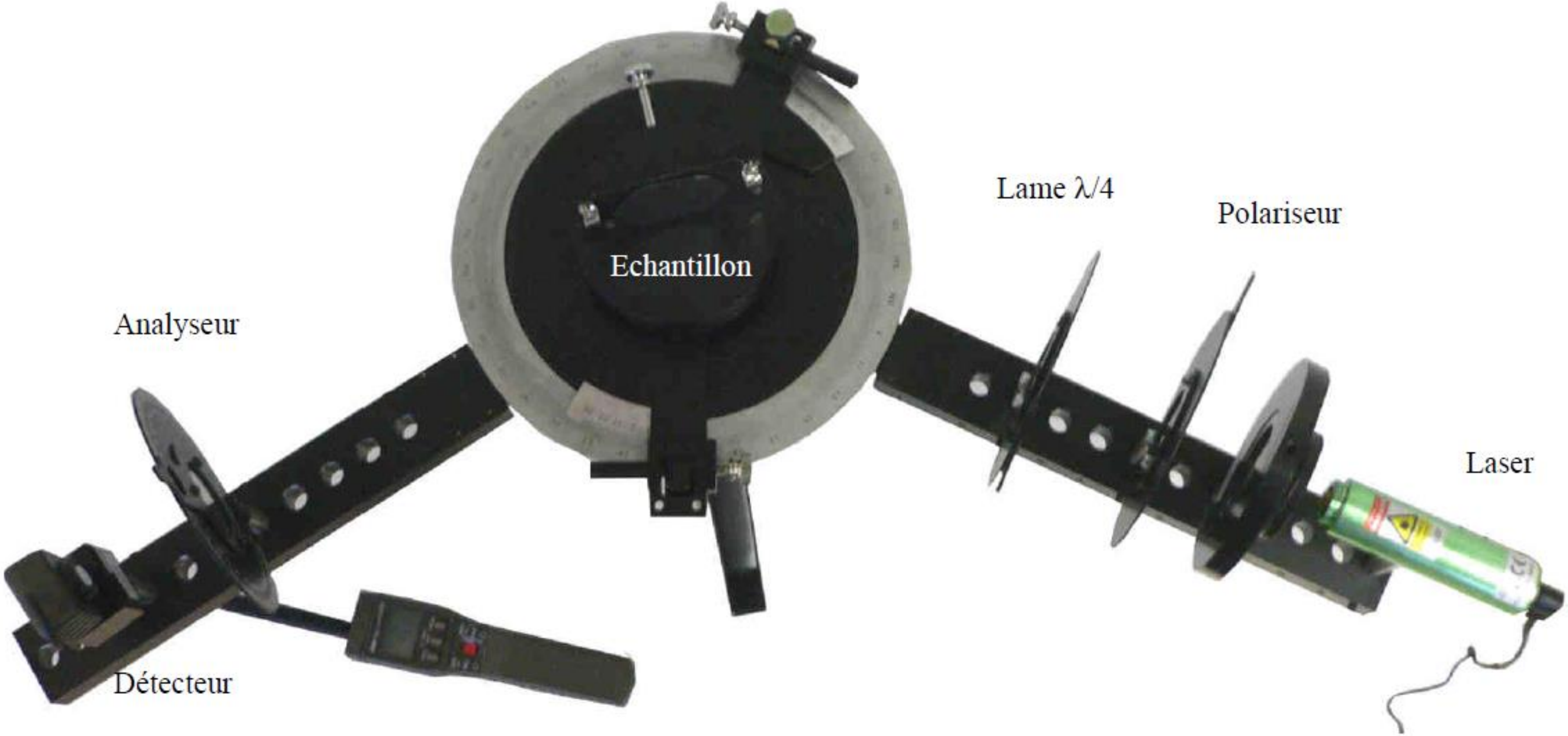
Les informations que l’on peut en extraire dépendent largement du type du matériel utilisé. On peut déterminer l’indice de réfraction et l’épaisseur d’un matériau transparent lorsqu’il est déposé en couche mince.


Light source
Detector
Polarizer
Analyzer
Φ
Compensator
(optional)
Compensator
(optional)
Sample

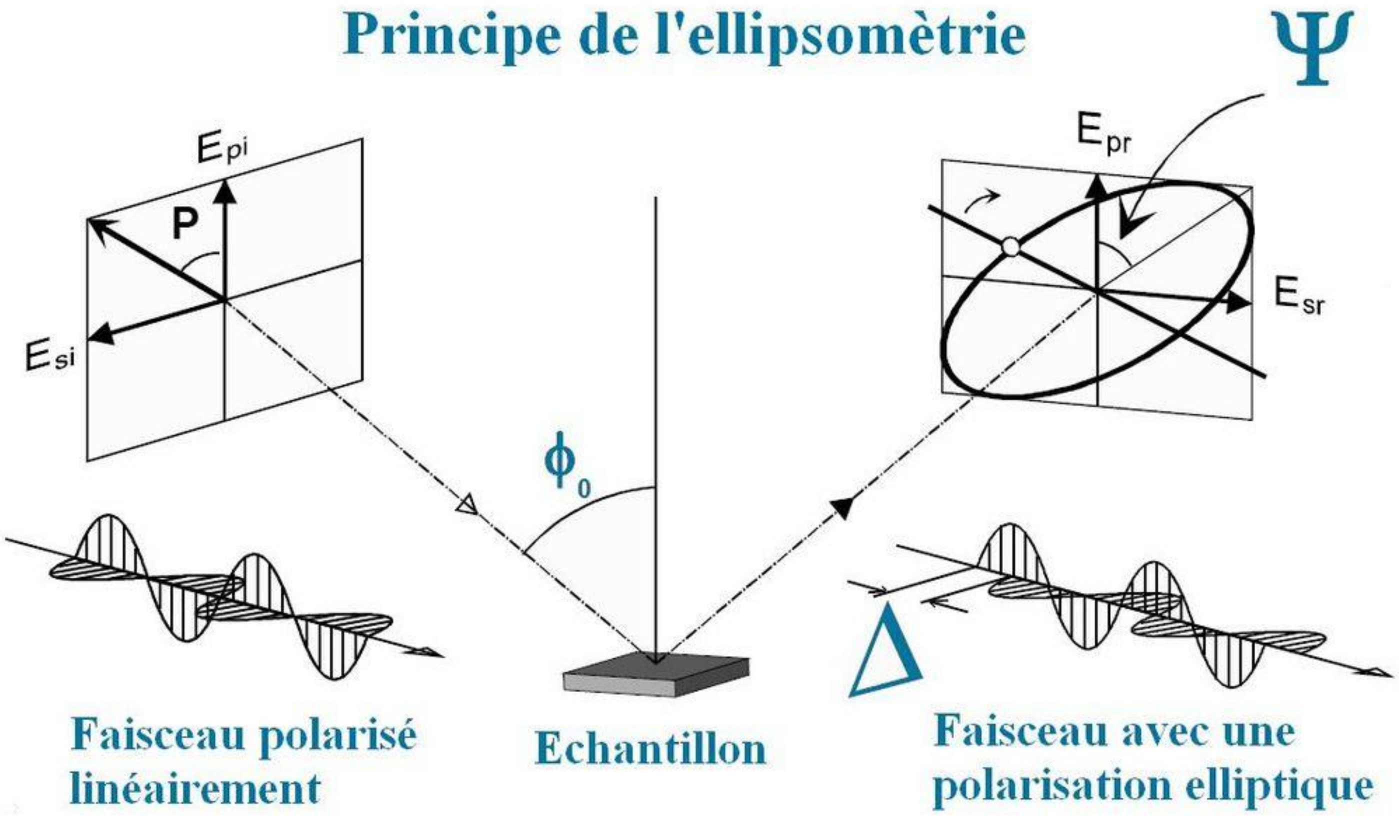

Polariseur et Analyseur


SOPRA
GES-5E


J. A. Woollam Co., Inc.
α-SE™


Lame λ/4
Polariseur
Echantillon
Analyseur
Laser
Détecteur

Considérons une surface et un faisceau incident de lumière polarisée. Une partie du faisceau est transmise ou absorbée à travers la surface, une autre est réfléchie. Dans les deux cas, l'état de polarisation du faisceau a changé. Cette modification de l'état de polarisation de la lumière incidente dépend de la surface étudiée.



Pour un échantillon isotrope et massif, l'angle de réfraction $\Phi_1$ est régi par la loi de Snell-Descartes : $N_0 \sin \Phi_0 = N_1 \sin \Phi_1$

Avec : $N_0$ indice du milieu 0 (milieu extérieur)

$N_1 = n_1 + jk_1$, $n_1$ indice (réel) de réfraction et $k_1$ coefficient d'extinction du milieu 1,

$\Phi_0$ angle d'incidence et $\Phi_1$ angle de réfraction.

Le coefficient de réflexion de l'échantillon pour une polarisation parallèle au plan d'incidence est :

$$r_p = \frac{E_{pr}}{E_{pi}} = \frac{N_1 \cos \phi_0 - N_0 \cos \phi_1}{N_1 \cos \phi_0 + N_0 \cos \phi_1}$$

- Le coefficient de réflexion de l'échantillon pour une polarisation perpendiculaire au plan d'incidence est :

$$r_s = \frac{E_{sr}}{E_{si}} = \frac{N_0 \cos \phi_0 - N_1 \cos \phi_1}{N_0 \cos \phi_0 + N_1 \cos \phi_1}$$

En ellipsométrie, ces deux coefficients $r_p$ et $r_s$ sont donnés sous la forme:

$$r_p = \frac{E_{pr}}{E_{pi}} = \left|r_p\right| \exp(j\delta_p) \qquad\qquad r_s = \frac{E_{sr}}{E_{si}} = \left|r_s\right| \exp(j\delta_s)$$

Ce sont des coefficients complexes. Leur module $|r_p|$, $|r_s|$ représente la modification apportée à l'amplitude de la composante du champ, et leur phase, $\delta_p$ et $\delta_s$, le retard introduit par la réflexion.

En pratique, la quantité mesurée est le rapport de ces deux coefficients, qui s'exprime sous la forme :

$$\frac{r_p}{r_s} = \tan\psi.\exp(j\Delta) = \rho$$

Avec: $\tan\psi = \dfrac{|r_p|}{|r_s|}$ rapport des modules,

$\Delta$ différence de phase introduite par la réflexion.

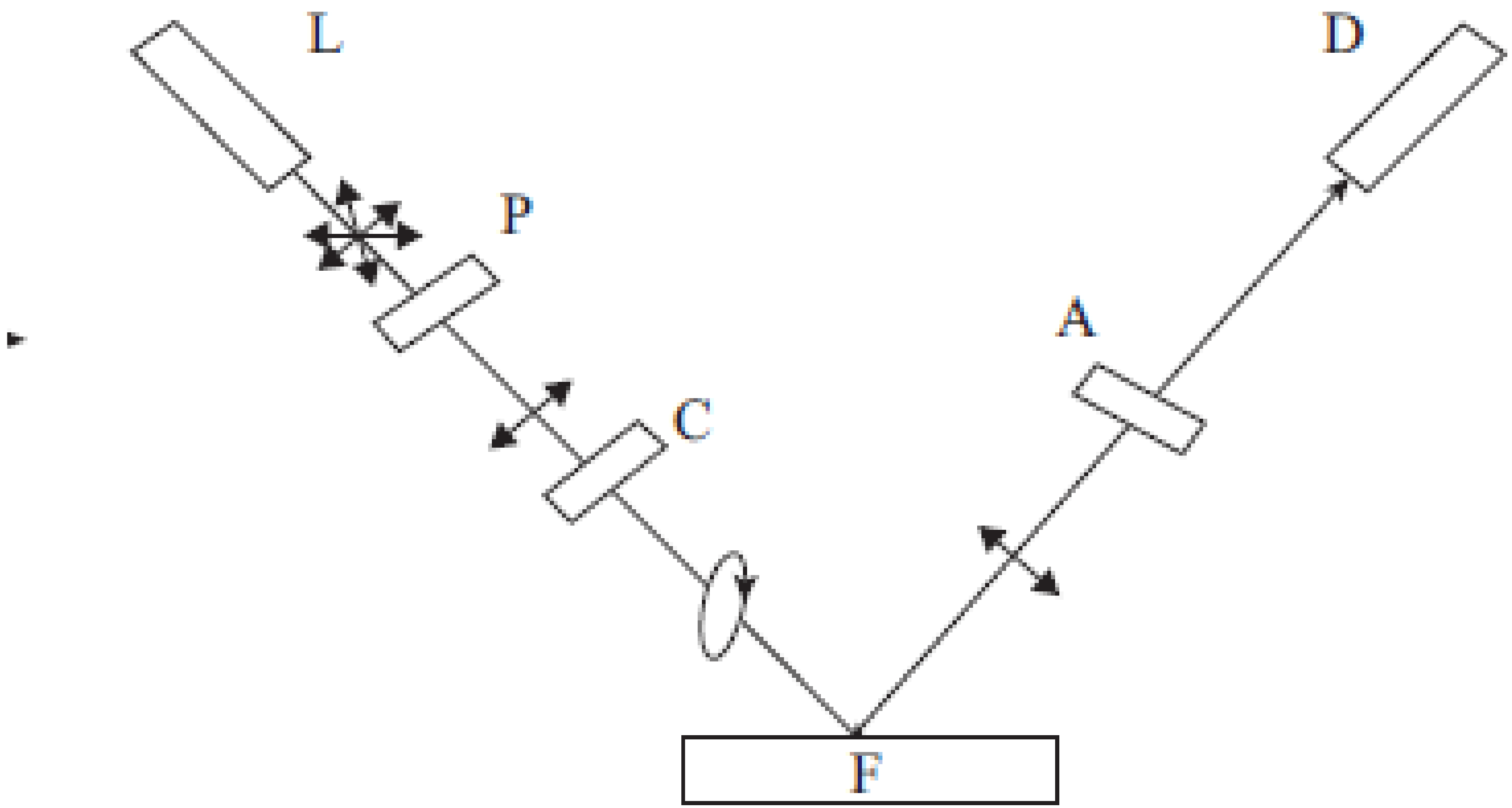
Pratiquement, la mesure de ρ conduit à l’identification de deux quantités (ψ et Δ, ou tan ψ et cos Δ). Une mesure effectuée à un angle d’incidence et à une longueur d’onde donnés permettra le calcul de deux paramètres de l’échantillon : les indices *n* et *k* d’un substrat ou d’une couche d’épaisseur connue (N= n + jk, l’indice de réfraction complexe), ou l’indice *n* et l’épaisseur *e* d’une couche connaissant son coefficient d’extinction *k*.

## II.2 Différents types d’ellipsomètres

Tout ellipsomètre se compose d’une source lumineuse (L), d’un polariseur (P), l’échantillon à étudier, un analyseur pour déterminer l’état de polarisation après réflexion (ou transmission) de l’échantillon (A) et finalement d’un détecteur (D) pour déterminer l’intensité. À partir de ce schéma général, on distingue principalement trois types d'ellipsomètres : ellipsomètre à annulation, ellipsomètre à modulation de phase et ellipsomètre à élément tournant.

## 4.1 Ellipsomètre à annulation

Le schéma de base d’un ellipsomètre à extinction est donné par la figure. La polarisation, linéaire après le polariseur, est transformée en polarisation elliptique par le compensateur. On oriente ce dernier de manière à obtenir une polarisation linéaire après réflexion sur l’échantillon. L’analyseur est par la suite orienté de manière à être croisé avec la polarisation linéaire obtenue jusqu’à l’extinction du faisceau.



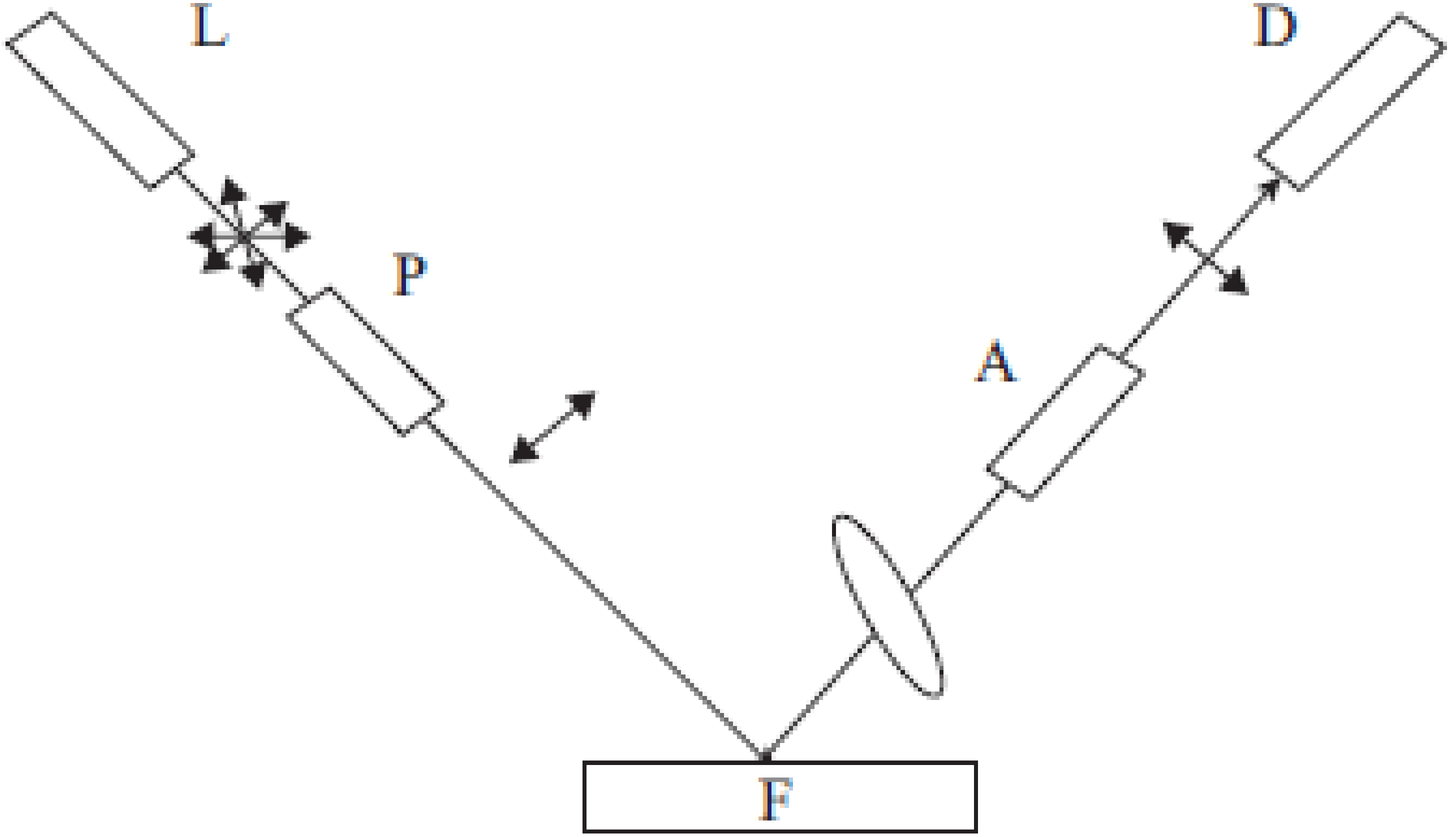
L
D
P
A
C
F

## 4.2 Ellipsomètres à éléments tournant

Pour ce type d'ellipsomètres, on appelle élément tournant, un élément agissant sur la polarisation et tournant avec une vitesse de rotation uniforme autour de l'axe optique du système. Polariseurs, analyseurs ou compensateurs peuvent jouer ce rôle, ce qui conduit à trois types d'ellipsomètres à élément tournants :

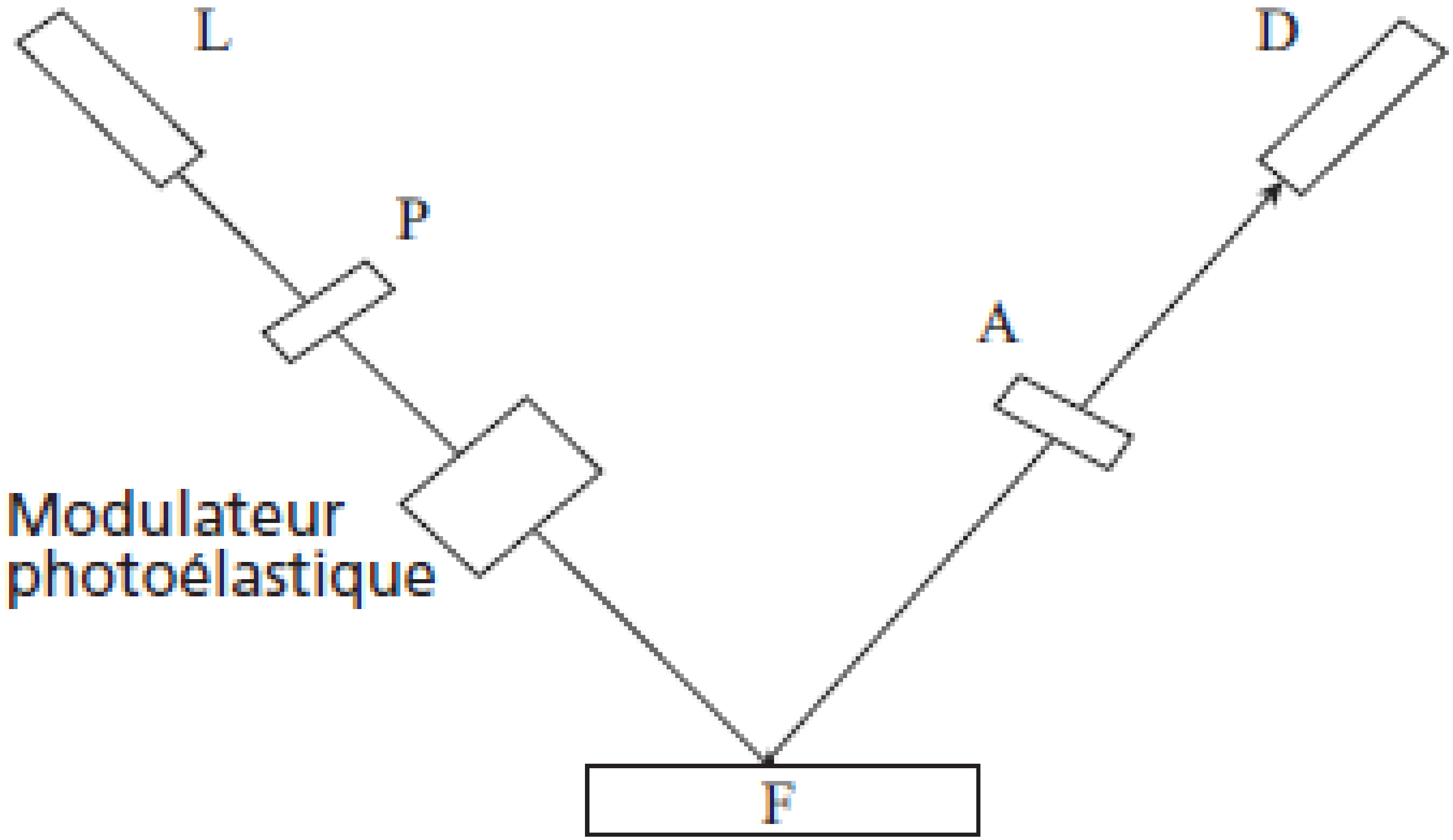
a. ellipsomètre à analyseur tournant,
b. ellipsomètre à polariseur tournant,
c. ellipsomètre à compensateur tournant.

L'éllipsomètre à analyseur ou à polariseur tournant permet d'avoir, au niveau du détecteur, un signal en fonction des angles ellipsométriques, des angles du polariseur et de l'analyseur et des caractéristiques de la source,


L
P
D
A
F

## 4.3 Ellipsomètre à modulation de phase

Le montage optique est le même que le précédent et on ajoute un modulateur après le polariseur. Dans cette configuration aucune caractéristique n’est requise au niveau de la polarisation pour la source et le détecteur. La méthode à modulation de phase nécessite une électronique très performante, capable d’assurer la saisie du signal et son traitement à une fréquence compatible à 50 KHz.



L
D
P
A
Modulateur
photoélastique
F

L’avantage de cette technique est que toutes les composantes optiques sont fixes durant les mesures, ce qui nous affranchit des problèmes de fluctuations mécaniques. De plus, la fréquence de modulation étant typiquement de 50 kHz, elle permet d’éviter les perturbations par les bruits habituels. La fréquence de modulation de 50kHz permet des mesures très rapides.

# III. Application au couches minces

**1. Pour un substrat d'indice de réfraction N=n-ik**

L'application des lois de Snell-Descartes nous donnent:

$$N = N_0 \sin^2\theta \sqrt{1 + \left(\frac{1-\rho}{1+\rho}\right)^2 \tan^2\theta}$$

θ: l'angle d'incidence;

$N_0$: l'indice du milieu d'incidence;

ρ: $\tan(\psi)e^{i\Delta}$

On trouve ainsi:

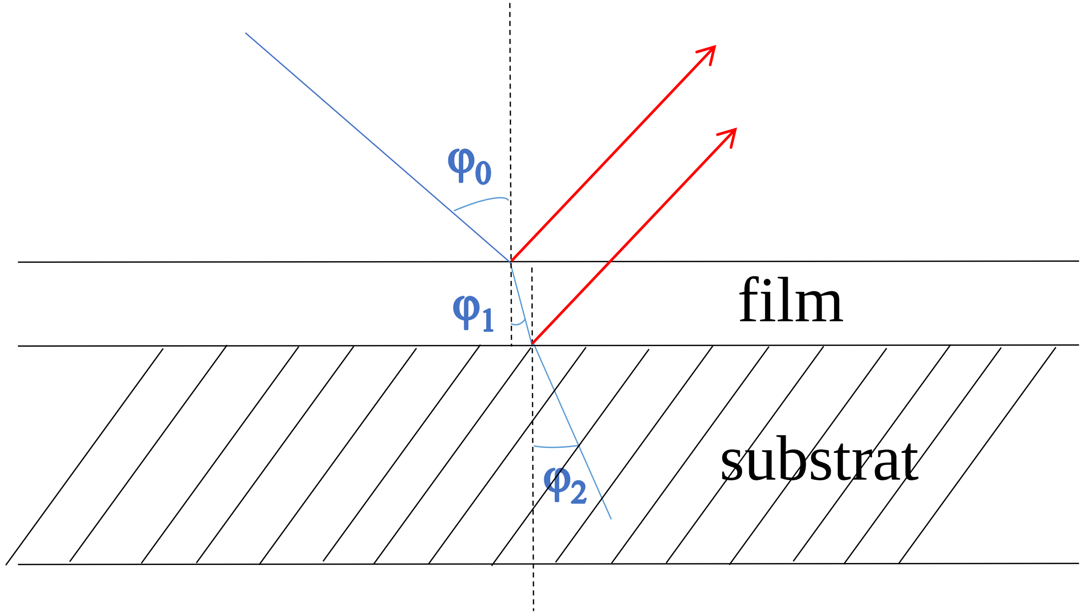
$$n^2 - k^2 = N_0^2 \sin^2\theta \left(1 + \tan^2\theta . \frac{\cos^2 2\psi - \sin^2 2\psi . \sin^2\Delta}{(1+\sin 2\psi . \cos\Delta)^2}\right)$$

$$2nk = N_0^2 \sin^2\theta . \tan^2\theta . \frac{\sin 4\psi . \sin\Delta}{(1+\sin 2\psi . \cos\Delta)^2}$$

Si on connait ψ et Δ, on connait n et k.

**2. Couche mince sur un substrat:**

Soit un film mince d'épaisseur e et d'indice de réfraction $N_1$contenue entre un milieu d'indice $N_0$ et un substrat d'indice $N_2$:




$r_{1p}, r_{2p}, r_{1s}, r_{2s}$ sont les coefficients de réflexion tq:

$$r_{1p} = \frac{N_1 \cos\phi_0 - N_0 \cos\phi_1}{N_1 \cos\phi_0 + N_0 \cos\phi_1}$$

$$r_{1s} = \frac{N_0 \cos\phi_0 - N_1 \cos\phi_1}{N_0 \cos\phi_0 + N_1 \cos\phi_1}$$

$$r_{2p} = \frac{N_2 \cos\phi_1 - N_1 \cos\phi_2}{N_2 \cos\phi_1 + N_1 \cos\phi_2}$$

$$r_s = \frac{N_1 \cos\phi_1 - N_2 \cos\phi_2}{N_1 \cos\phi_1 + N_2 \cos\phi_2}$$

Si on pose:

$$\beta = 2\pi \frac{e}{\lambda}\sqrt{N_1^2 - N_0^2 \sin^2\phi_0}$$

λ est la longueur d’onde incidente. On a:

$$\rho = tg\psi e^{i\Delta} = \frac{r_{1p} + r_{2p}e^{-j2\beta}}{1 + r_{1p}r_{2p}e^{-j2\beta}} \frac{1 + r_{1s}r_{2s}e^{-j2\beta}}{r_{1s} + r_{2s}e^{-j2\beta}}$$

Si on connait les indices de réfraction $N_0$, $N_1$ et $N_2$ on peut déterminer l’épaisseur e du film.