

## TP 6 Ellipsométrie

### 1. L'ellipsométrie

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.

L'utilisation croissante des traitements de surface (optique, technologie des semi-conducteurs, métallurgie) a contribué au développement de techniques optiques d'analyse de surface : interférométrie, réflectométrie et ellipsométrie. Le principe de l'ellipsométrie, qui a été découvert il y a plus d'un siècle, a trouvé un essor récent grâce à l'utilisation des micro-ordinateurs et de la commande électronique de moteurs, permettant l'automatisation et l'optimisation des mesures, ainsi que leur exploitation de plus en plus complexe.

Les points forts de l'ellipsométrie sont : son caractère non destructif, sa large gamme de mesure (mesure d'épaisseur depuis une fraction de couche monoatomique jusqu'à quelques micromètres), sa possibilité de contrôle in situ permettant la mesure d'épaisseur de couches pendant leur croissance en temps réel. Il faut distinguer l'ellipsométrie à une seule longueur d'onde, qui est l'outil le plus simple, mais ne permet l'identification que de deux paramètres, de l'ellipsométrie spectroscopique, qui effectue des mesures sur tout un spectre et permet d'interpréter des structures complexes : multicouche, rugosité d'interface, homogénéité, etc. Dans ce TP, on se contentera de l'ellipsométrie à une longueur d'onde.

### 2. Principe de la mesure

#### 2.1. Représentation d'une onde plane monochromatique polarisée

Considérons une onde plane polarisée arrivant sur une surface plane séparant deux milieux (figure 1). Une partie de l'onde plane est transmise ou absorbée à travers la surface, une autre partie est réfléchie par cette surface. L'onde réfléchie a une subit un changement d'état polarisation. La mesure ellipsométrique consiste à déterminer ce changement. Nous allons donc dans premier rappeler le calcul des coefficients de réflexion d'une onde plane sur une interface optique. On considère le système suivant :

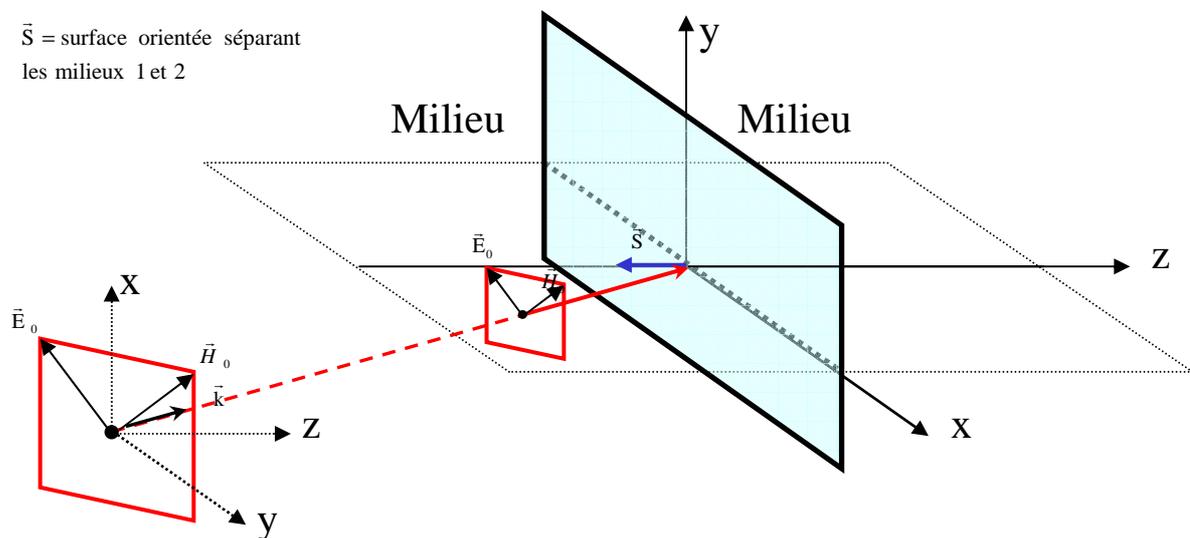


Figure 1 : onde plane incidente sur une interface optique séparant deux milieux

La propagation se fait selon une direction  $\frac{\vec{k}}{|\vec{k}|}$  qui est contenue dans le plan (Oxz). Le plan d'incidence est alors définie

par cette direction de propagation de l'onde plane et la normale  $\vec{S}$  à la surface de séparation, c'est-à-dire que le plan d'incidence est confondu avec le plan (Oxz). Une onde plane a une structure transversale c'est à dire le champ électrique  $\vec{E}_0$  est contenu dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. Le calcul des coefficients de

réflexion et de transmission sur l'interface optique utilise les relations de continuité à l'interface des composantes tangentielles du champ électrique et magnétique :

$$\begin{cases} \vec{S} \wedge (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 & \text{Continuité de la composante tangentielle du champ électrique.} \\ \vec{S} \wedge (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = 0 & \text{Continuité de la composante tangentielle du champ magnétique.} \end{cases}$$

On doit alors pour calculer ces coefficients de réflexion et de transmission **décomposer le champ suivant deux axes**.

- Un axe correspondant au cas où le champ électrique est tangentiel à l'interface optique, le champ électrique est alors perpendiculaire au plan d'incidence. Sur la figure 1 le champ est alors orienté selon y. On parle de composante transverse électrique (TE ou s).
- Un axe correspondant au cas où le champ magnétique est tangentiel à l'interface optique, le champ électrique est alors parallèle au plan d'incidence. Sur la figure 1 le champ est dans le plan (Oxz). On parle de composante transverse magnétique (TM ou p).

Si on projette sur ces deux axes le champ électrique d'une onde plane monochromatique polarisée, on a :

$$\vec{E} = \vec{E}_{TE} \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_{TE}) + \vec{E}_{TM} \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_{TM})$$

Où encore dans le formalisme de Jones : 
$$\vec{E} = \frac{1}{\sqrt{E_{TE}^2 + E_{TM}^2}} \begin{pmatrix} E_{TE} \\ E_{TM} e^{i(\varphi_{TM} - \varphi_{TE})} \end{pmatrix}$$

**Il est important de noter que les coefficients de réflexion sont différents pour une onde plane polarisée TE ou TM, ce qui va se traduire par une modification de la polarisation lors d'une réflexion.**

## 2.2. Coefficient de réflexion pour la composante TE

On considère une onde plane monochromatique à la longueur d'onde  $\lambda$  dont champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence et l'angle d'incidence est  $\Phi_i$  (figure 2). Le coefficient de réflexion de cette onde plane à l'interface

séparant les milieux 1 et 2 peut s'écrire : 
$$r_s = \frac{|E_{or}|}{|E_{oi}|} = \frac{n_1 \cos(\phi_i) - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2(\phi_i)}}{n_1 \cos(\phi_i) + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2(\phi_i)}}$$

Ce coefficient de réflexion dépend donc de 3 paramètres :  $n_1$ ,  $n_2$  et  $\Phi_i$ . Dans le cas où l'on peut considérer le milieu 2 comme non absorbant à la longueur d'onde  $\lambda$ , l'indice  $n_2$  est réel ce coefficient de réflexion est réel. En revanche, dans le cas où le milieu 2 est absorbant à la longueur d'onde  $\lambda$ , l'indice  $n_2$  est complexe :  $n_2 = n + jk$ . Le coefficient de réflexion  $r_s$  devient alors complexe. On peut alors l'écrire sous la forme :  $r_s = |r_s| e^{i\varphi_s}$

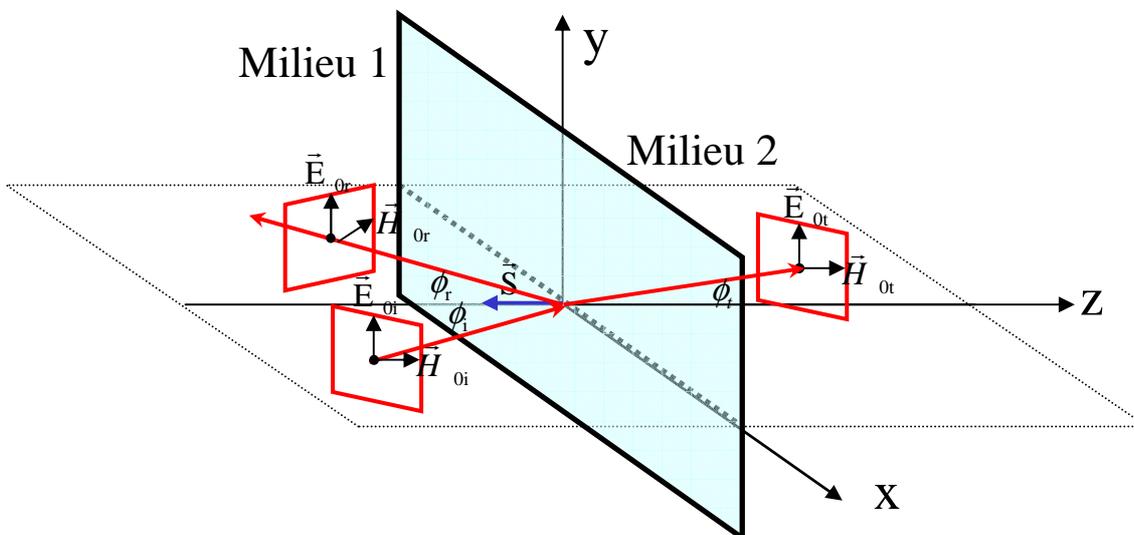


Figure 2 : Réflexion d'une onde plane polarisée transverse électrique

### 2.3. Coefficient de réflexion pour la composante TM

On considère une onde plane monochromatique à la longueur d'onde  $\lambda$  dont champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence et l'angle d'incidence est  $\Phi_i$  (figure 3). Le coefficient de réflexion de cette onde plane à l'interface

séparant les milieux 1 et 2 peut s'écrire :  $r_p = \frac{|E_{0r}|}{|E_{0i}|} = \frac{-n_2 \cos(\phi_i) + \frac{n_1}{n_2} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2(\phi_i)}}{n_2 \cos(\phi_i) + \frac{n_1}{n_2} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2(\phi_i)}}$

Ce coefficient de réflexion dépend donc de 3 paramètres :  $n_1$ ,  $n_2$  et  $\Phi_i$ . Dans le cas où l'on peut considérer le milieu 2 comme non absorbant à la longueur d'onde  $\lambda$ , l'indice  $n_2$  est réel ce coefficient de réflexion est réel. En revanche, dans le cas où le milieu 2 est absorbant à la longueur d'onde  $\lambda$ , l'indice  $n_2$  est complexe :  $n_2 = n + jk$ . Le coefficient de réflexion  $r_s$  devient alors complexe. On peut alors l'écrire sous la forme :  $r_p = |r_p| e^{i\phi_p}$

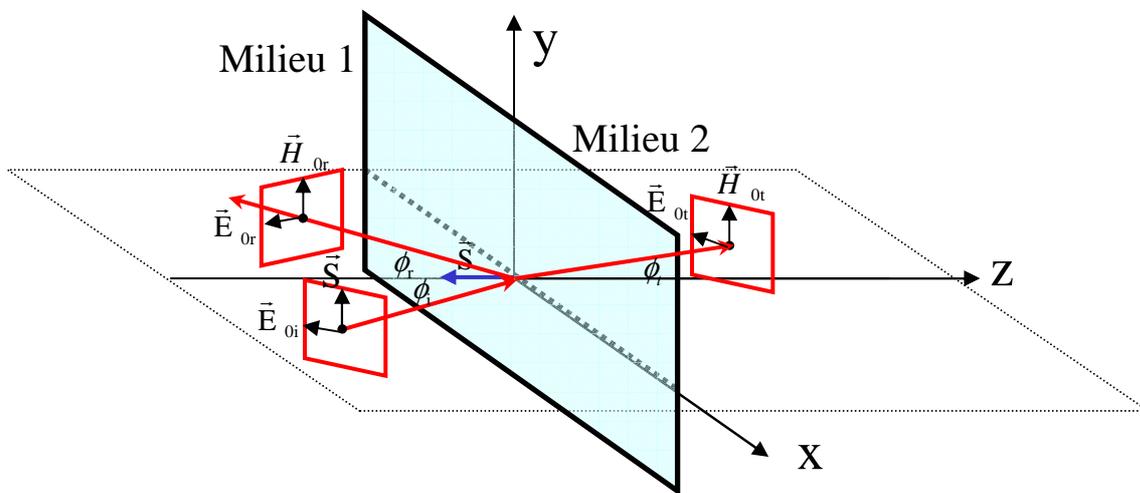


Figure 3 : Réflexion d'une onde plane polarisée transverse magnétique

### 2.4. Changement de polarisation lors de réflexion sur une interface optique

Lors d'une réflexion sur une interface optique, l'amplitude et la phase des composantes TE et TM d'une onde plane monochromatique vont être modifiées. Soit une onde plane incidente dont le champ électrique  $\vec{E}$  est :

$$\begin{cases} \vec{E} = \vec{E}_{TE} \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_{TE}) + \vec{E}_{TM} \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_{TM}) \\ \vec{E} = \frac{1}{\sqrt{E_{TE}^2 + E_{TM}^2}} \begin{vmatrix} E_{TE} \\ E_{TM} e^{i(\varphi_{TM} - \varphi_{TE})} \end{vmatrix} \end{cases}$$

Après réflexion on a alors :

$$\begin{cases} \vec{E} = r_s \vec{E}_{TE} \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_{TE} + \varphi_s) + r_p \vec{E}_{TM} \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_{TM} + \varphi_p) \\ \vec{E} = \frac{1}{\sqrt{E_{TE}^2 + E_{TM}^2}} \begin{vmatrix} r_s E_{TE} \\ r_p E_{TM} e^{i(\varphi_{TM} + \varphi_p - \varphi_{TE} - \varphi_s)} \end{vmatrix} \end{cases}$$

On en déduit donc que la polarisation est modifiée :

- Par exemple, si on a une polarisation incidente linéaire et une interface non absorbante alors le changement de polarisation se traduit par une rotation de la polarisation.
- Par exemple, si on a une polarisation incidente linéaire et une interface absorbante alors le changement se traduit par une polarisation qui devient elliptique.

Si l'on connaît l'angle d'incidence et l'indice de réfraction du milieu incident alors ce changement de polarisation ne dépend que de l'indice du milieu 2  $n_2 = n + jk$ . En déduit que la détermination de ce changement de polarisation doit permettre de remonter aux paramètres  $n$  et  $k$  de  $n_2$ .

### 3. Technique de mesure

#### 3.1. Principe et montage optique

L'objectif de la mesure est de déterminer les paramètres  $n$  et  $k$  de l'indice de réfraction  $n_2$  du milieu 2. On a donc deux inconnues à déterminer ce qui nécessite d'avoir deux équations. Dans la pratique ces deux équations sont obtenus

par la mesure des angle  $\psi$  et  $\Delta$  tel que :  $\tan(\psi) = \frac{|r_p|}{|r_s|}$  et  $\Delta = \varphi_p - \varphi_s$

La méthode utiliser dans ce TP pour mesurer ces angles est basé sur l'extinction de la lumière réfléchié par l'échantillon. Cette extinction est obtenue à l'aide d'un compensateur qui pour rôle de compenser le déphasage entre les composantes TE et TM engendré lors de la réflexion et d'un analyseur (polariseur) qui a pour rôle de déterminer l'angle  $\psi$ . Le montage optique est représenté sur la figure 4.

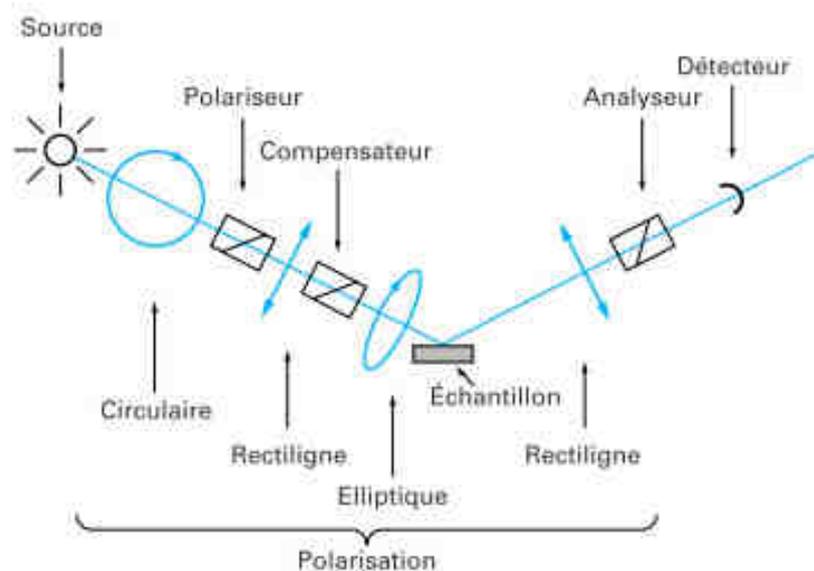


Figure 4 : montage optique d'un ellipsomètre à extinction

Ce montage comprend :

- 1 source lumineuse monochromatique (ici un laser vert à 532nm ou un laser rouge à 650nm),
- 1 polariseur circulaire, constitué d'un polariseur et d'une lame quart d'onde, qui va transformer toute polarisation incidente en polarisation circulaire
- 1 polariseur permettant de polariser linéairement la lumière envoyée sur le compensateur
- 1 compensateur (lame quart d'onde) qui va transformer la polarisation linéaire en polarisation elliptique. Il est orienté par rapport au polariseur de manière à obtenir une polarisation linéaire après la réflexion du faisceau sur l'échantillon et déterminer ainsi le déphasage  $\Delta$ .
- 1 échantillon placé sur une platine graduée permettant de régler l'angle d'incidence
- 1 analyseur (polariseur) utilisé pour obtenir l'extinction et déterminer ainsi la rotation du plan de polarisation

La polarisation linéaire après le polariseur est transformée en polarisation elliptique par le compensateur (lame quart d'onde). Le polariseur est orienté par rapport à la lame quart d'onde de manière à obtenir une polarisation linéaire après la réflexion sur l'échantillon. L'ensemble polariseur et lame  $\frac{\lambda}{4}$  joue alors un rôle symétrique à l'échantillon.

L'analyseur est ensuite orienté de manière à être croisé avec la polarisation linéaire ainsi obtenue, ce qui conduit à l'extinction du faisceau. **Il est important de noter que si on n'arrive pas à compenser le déphasage engendré par la réflexion, il est alors impossible d'obtenir une extinction avec l'analyseur.**

### 3.2. Description du montage dans la représentation Jones.

Le montage de la figure 4 peut être modélisé assez simplement en utilisant le formalisme de Jones dans le repère formé par les composantes TE et TM du champ électrique c'est-à-dire un axe perpendiculaire au plan d'incidence (Y) et un axe perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde plane monochromatique (X'). On rappelle les matrices de Jones des différents éléments du montage optique de la figure 4 :

$$\text{Un polariseur faisant un angle } \theta \text{ avec l'axe X' est décrit par: } \begin{vmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{vmatrix}$$

$$\text{Une lame } \frac{\lambda}{4} \text{ dont l'axe rapide fait un angle } \theta \text{ avec l'axe X' est décrit par: } \begin{vmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{vmatrix}$$

$$\text{Un échantillon d'après le paragraphe 2.4 est décrit par: } \begin{vmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{vmatrix} = r_s \begin{vmatrix} \frac{r_p}{r_s} & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = r_s \begin{vmatrix} \frac{r_p}{r_s} e^{i\Delta} & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = r_s \begin{vmatrix} \tan(\psi) e^{i\Delta} & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

#### 3.2.1. Polarisation après le polariseur

On a une polarisation circulaire avant le polariseur, ce qui veut dire qu'après le polariseur on a une onde linéaire polarisée d'intensité  $I_0$  et ceci quelque soit l'orientation du polariseur. Si le polariseur fait un angle P avec l'axe perpendiculaire à la direction de propagation (X') alors le champ électrique de l'onde peut s'écrire à une constante près:

$$\vec{E}_0 = \begin{vmatrix} \cos(p) \\ \sin(p) \end{vmatrix}$$

(Afin de simplifier les écritures, on peut négliger les constantes devant les matrices de Jones car ce qui nous intéresse est de trouver une condition d'extinction)

#### 3.2.2. Polarisation avant l'échantillon

Dans le montage de la figure 4, la lame  $\frac{\lambda}{4}$  qui constitue le compensateur fait un angle de  $-45^\circ$  avec l'axe perpendiculaire à la direction de propagation (X'). Dans le repère (OX'Y) cette lame est alors décrite par :

$$M_{\frac{\lambda}{4}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{vmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{vmatrix}$$

$$M_{\frac{\lambda}{4}} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1-i & -1-i \\ -1-i & 1-i \end{vmatrix} = \frac{1}{2} (1-i) \begin{vmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{vmatrix}$$

$$\text{La lame } \frac{\lambda}{4} \text{ peut donc être décrite à une constante près par: } \begin{vmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{vmatrix}$$

On en déduit la polarisation  $\vec{E}_1$  avant l'échantillon :

$$\vec{E}_1 = \begin{vmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos(p) \\ \sin(p) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(p) - i \sin(p) \\ \sin(p) - i \cos(p) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(p) - i \sin(p) \\ -i(\cos(p) + i \sin(p)) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 e^{i\varphi_x} \\ -i e^{i\varphi_y} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 e^{i\varphi_x} \\ -e^{i\frac{\pi}{2}} e^{i\varphi_y} \end{vmatrix} = e^{i\varphi_y} e^{i\frac{\pi}{2}} \begin{vmatrix} 1 e^{i(\varphi_x - \varphi_y - \frac{\pi}{2})} \\ -1 \end{vmatrix}$$

$$\text{Avec: } \begin{cases} \varphi_x = a \tan\left(\frac{-\sin(p)}{\cos(p)}\right) = -p \\ \varphi_y = a \tan\left(\frac{\sin(p)}{\cos(p)}\right) = p \end{cases}$$

On a finalement à un terme de phase près :  $\vec{E}_1 = \begin{vmatrix} 1e^{-i\left(\frac{\pi}{2}+2p\right)} \\ -1 \end{vmatrix}$

On en déduit que pour compenser le déphasage  $\Delta$  entre les composantes TE et TM induit par l'échantillon lors de la réflexion, le polariseur doit faire un angle  $p$  avec l'axe  $X'$  tel que :  $\frac{\pi}{2} + 2p = \Delta$  Il apparaît clairement ici le rôle du compensateur.

### 3.2.3. Polarisation après l'échantillon

La polarisation  $\vec{E}_2$  après l'échantillon est donné à une constante près par :

$$\vec{E}_2 = \begin{vmatrix} \tan(\psi)e^{i\Delta} & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1e^{-i\left(\frac{\pi}{2}+2p\right)} \\ -1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \tan(\psi)e^{i\Delta}e^{-i\left(\frac{\pi}{2}+2p\right)} \\ -1 \end{vmatrix}$$

On constate que :

- Dans le cas où  $\frac{\pi}{2} + 2p \neq \Delta$  on a une polarisation elliptique après l'échantillon, impossible à annuler avec l'analyseur.
- Dans le cas où  $\frac{\pi}{2} + 2p = \Delta$  on a une polarisation rectiligne après l'échantillon qu'il est possible d'annuler avec l'analyseur. Cette polarisation rectiligne fait alors un angle  $\alpha$  avec l'axe  $X'$ , tel

que:  $\tan(\alpha) = \frac{-1}{\tan(\psi)} = -\frac{\cos(\psi)}{\sin(\psi)} = \frac{-\sin\left(\frac{\pi}{2} + \psi\right)}{-\cos\left(\frac{\pi}{2} + \psi\right)}$  soit  $\alpha = \frac{\pi}{2} + \psi$

On aura donc une extinction si l'angle  $A$  de l'analyseur avec l'axe  $X'$  est égale à  $\psi$ .

### 3.2.4. Polarisation après l'analyseur

La polarisation  $\vec{E}_3$  après l'échantillon est donné à une constante près par :

$$\vec{E}_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos(A) & \sin(A) \\ -\sin(A) & \cos(A) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \tan(\psi)e^{i\Delta}e^{-i\left(\frac{\pi}{2}+2p\right)} \\ -1 \end{vmatrix}$$

$$\vec{E}_3 = \begin{vmatrix} \cos(A) & \sin(A) \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \tan(\psi)e^{i\Delta}e^{-i\left(\frac{\pi}{2}+2p\right)} \\ -1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(A)\tan(\psi)e^{i\Delta}e^{-i\left(\frac{\pi}{2}+2p\right)} - \sin(A) \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$I = |\vec{E}_3|^2 = \left( \cos(A)\tan(\psi)e^{i\Delta}e^{-i\left(\frac{\pi}{2}+2p\right)} - \sin(A) \right)^2$$

On en déduit les conditions pour lesquels on a une extinction ( $I=0$ ):

- Si l'angle  $P$  du polariseur satisfait  $2p + \frac{\pi}{2} = \Delta$  et si l'angle  $A$  de l'analyseur avec l'axe  $X'$  est égale à  $\psi$
- Si l'angle  $P$  du polariseur satisfait  $2p - \frac{\pi}{2} = \Delta$  et si l'angle  $A$  de l'analyseur avec l'axe  $X'$  est égale à  $-\psi$

### 3.3. Protocole de mesure

Les angles  $\Psi$  et  $\Delta$  se déterminent donc à partir de la mesure des deux couples de valeurs d'angles définis précédemment, pour lesquels on obtient une extinction du faisceau lumineux. On notera  $(A_1 ; P_1)$  et  $(A_2 ; P_2)$  respectivement les angles de l'analyseur et du polariseur des couples 1 et 2.

**1<sup>er</sup> couple de valeurs :** on cherche une extinction pour des angles P et A tel que :  $-45^\circ < P_1 < 135^\circ$  et  $0^\circ < A_1 < 90^\circ$

1. placez l'analyseur et le polariseur à  $0^\circ$  ( $A_0$  et  $P_0$ ),
2. faites varier les angles de l'analyseur et du polariseur dans les intervalles définis.
3. Si vous obtenez un minimum, ajustez légèrement l'analyseur et le polariseur afin d'optimiser l'annulation. Relevez alors les angles  $(A_1 ; P_1)$
4. Si vous n'obtenez pas de minimum : placez le polariseur à  $45^\circ$  et faites varier votre analyseur de  $0$  à  $90^\circ$ .
5. Si vous obtenez un minimum ajustez les deux éléments pour optimiser le minimum et relevez alors les angles  $(A_1 ; P_1)$
6. Si vous n'obtenez toujours pas de minimum, effectuez à nouveau la manipulation en plaçant le polariseur à  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  et  $-45^\circ$ . Toutefois faites attention à rester dans l'intervalle recherché.
7. Une fois cette manipulation effectuée notez les angles  $A_1$  et  $P_1$  et calculez :  $\Delta_1 = 2P_1 + 90^\circ$  et  $\Psi_1 = A_1$

**2<sup>ème</sup> couple de valeurs :** on cherche une extinction pour des angles P et A tel que :  $-135^\circ < P_2 < 45^\circ$  et  $90^\circ < A_2 < 180^\circ$

1. placez l'analyseur et le polariseur à  $0^\circ$  ( $A_0$  et  $P_0$ )
2. Effectuez les mêmes manipulations que précédemment en respectant les intervalles précisés, c'est-à-dire en faisant varier A de  $90^\circ$  à  $180^\circ$  et en plaçant successivement P à  $0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, -90^\circ, -135^\circ$ .
3. Puis calculez :  $\Delta_2 = 2P_2 - 90^\circ$  et  $\Psi_2 = 180^\circ - A_2$

#### Détermination de $\Psi$ et $\Delta$ :

Suite aux mesures que vous venez d'effectuer, déterminez les valeurs des angles  $\Psi$  et  $\Delta$ . Pour cela veillez à ce que la valeur de  $\Delta_2$  appartienne à l'intervalle  $[0 ; 360^\circ]$ .

$$\text{Ainsi on a : } \begin{cases} \Psi = \frac{180^\circ - A_2 + A_1}{2} \\ \Delta = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \end{cases}$$

#### Précision des mesures:

Il est possible de faire une mesure plus précise de l'angle  $\Psi$  en effectuant un ajustement numérique sur une série de points expérimentaux. Pour cela :

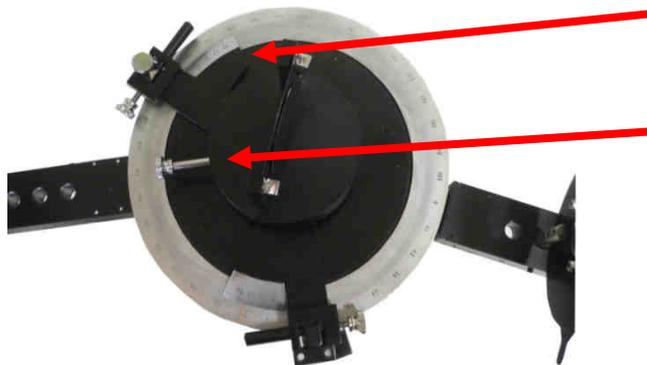
1. Fixez le polariseur sur la position déterminée à l'œil.
2. Faites varier l'angle A de l'analyseur sur un intervalle de  $20^\circ$  autour de la position trouvée par pas de  $2^\circ$ .
3. Notez les valeurs angulaires et d'intensités obtenues.
4. Rentez ces valeurs dans « ellipso fit » qui fait un ajustement de l'expression de l'intensité après l'analyseur.
5. Analysez et déterminez le minimum de la courbe, ce sera votre nouvelle valeur pour l'analyseur.

La précision de cette méthode de mesure également dépend du bruit de fond du détecteur car elle travaille toujours au minimum du signal. C'est pourquoi il est conseillé lors de toutes les mesures effectuées lors de ce TP de travailler dans une pièce à luminosité réduite et constante. Il est également important de travailler avec des échantillons propres. Evitez de mettre vos doigts sur les échantillons.

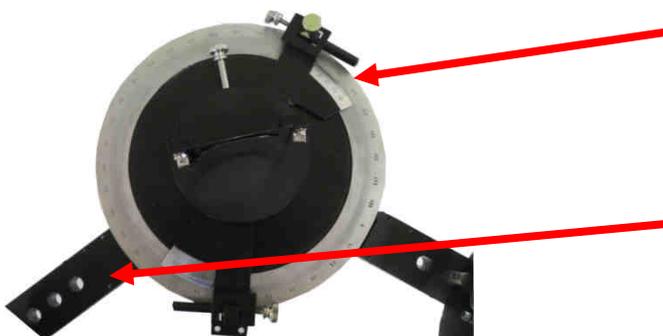
#### 4. Installation du montage optique (figure 5)

Lors de l'installation des différents composants il est important de vérifier que les composants sont bien perpendiculaires au trajet optique et que le faisceau du laser passe au centre de chaque élément.

1. **Installez le laser.** Réglez sa hauteur et son orientation de telle sorte que le faisceau passe au centre du support de l'échantillon. Ne plus toucher le laser ensuite et retirer la cible.
2. **Installez le polariseur circulaire.** Placez le juste après le laser, celui-ci va permettre d'annihiler toute polarisation du faisceau laser. On pourra ainsi travailler avec des sources déjà polarisées. **Les graduations du polariseur circulaire doivent être orientées vers l'échantillon.** Régler l'orientation du polariseur circulaire de façon à avoir un maximum de transmission.
3. **Déterminez l'axe de transmission du polariseur.** On utilisera pour cela une réflexion sous une incidence  $i_B$  dite de Brewster pour laquelle la lumière réfléchi est polarisée TE, c'est à rectilignement dans la direction perpendiculaire au plan d'incidence. Notez l'angle de transmission du polariseur et de l'analyseur.
4. **Installez le détecteur.** Placez les deux bras de l'ellipsomètre dans la même direction (on restera ainsi lors de toute la phase de réglage) et faites en sorte que le rayon laser frappe le centre du détecteur.
5. **Installez le polariseur.** Positionnez le polariseur derrière le polariseur circulaire, **les graduations du polariseur doivent être orientées vers la source.** Placez l'axe de transmission du polariseur dans le plan d'incidence. On note cet angle  $P_0$  et on prendra cette valeur d'angle comme référence dans toutes les mesures.
6. **Installez l'analyseur.** Placez l'analyseur avant le détecteur, **les graduations de l'analyseur doivent être orientées vers la source.** Balayez angulairement jusqu'à ce que vous observiez un minimum d'intensité (extinction). On a ainsi croisé le polariseur et l'analyseur. L'axe de transmission de l'analyseur est théoriquement orienté perpendiculairement à l'axe de transmission du polariseur (donc au plan d'incidence). Tournez l'analyseur d'un angle de  $90^\circ$  afin de le placer dans le plan d'incidence. On notera cet angle  $A_0$ , on prendra cette valeur d'angle comme référence par la suite.
7. Installez la lame  $\lambda/4$ , **les graduations de la lame doivent être orientées vers la source.** Afin d'avoir un angle de  $-45^\circ$  entre l'axe rapide du compensateur, **vous orientez la lame sur la graduation  $315^\circ$ .**
8. **Réglez l'angle d'incidence :**



Positionnez un des échantillons, en tournant son support, de sorte que le rayon réfléchi soit confondu avec le rayon incident. Fixez alors le support à l'aide de la molette. Vous êtes alors en incidence normale ( $0^\circ$ ).



Tournez le vernier de l'angle d'incidence voulu (ici  $70^\circ$  donc position sur  $\alpha+70$ ).

Placez le bras de l'analyseur de sorte que le rayon réfléchi frappe le détecteur dans son centre. Le rayon réfléchi est également à  $70^\circ$  de la normale à l'échantillon.

On a au final le montage suivant :

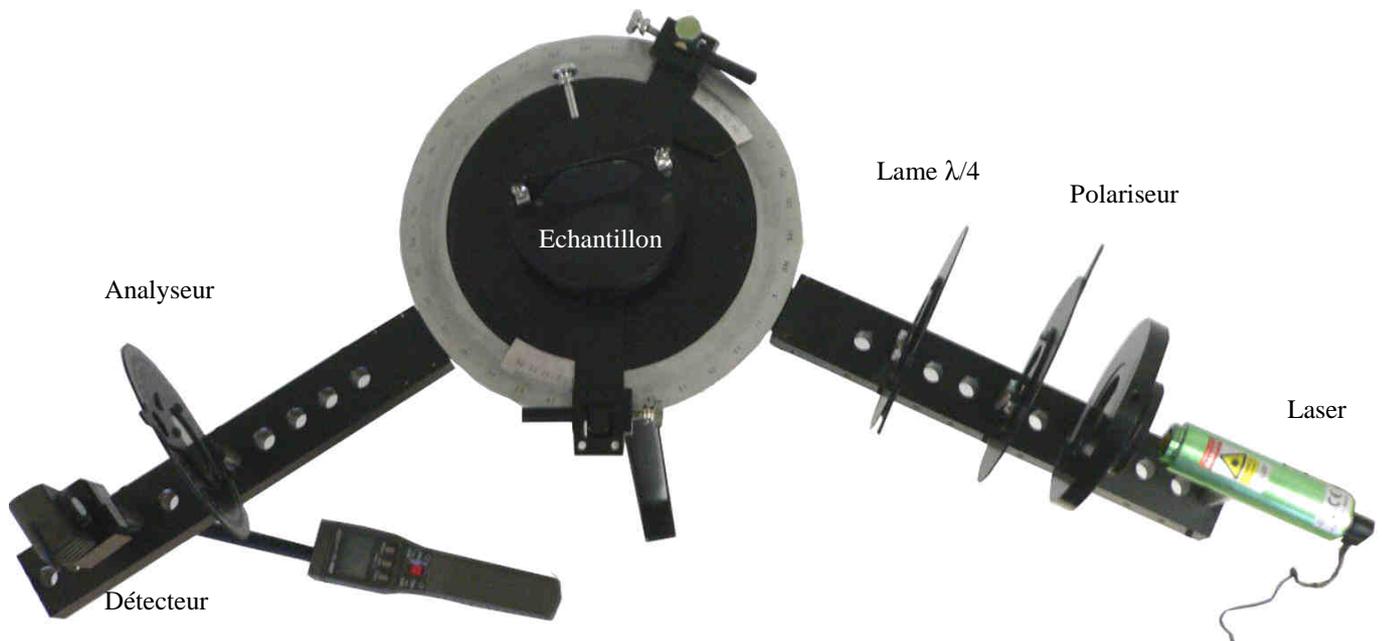


Figure 5 : montage optique de l'ellipsomètre à extinction



**C'est le plan d'incidence qui constitue la référence de tous les angles des éléments optique. L'origine des angles pour le polariseur et l'analyseur sont donc respectivement  $P_0$  et  $A_0$ . Le sens positif de rotation est le sens inverse des aiguilles d'une montre (graduation décroissante pour le polariseur et l'analyseur).**

**QUESTION I :** Montrer expérimentalement que l'association polariseur + lame  $\lambda/4$  à  $-45^\circ$  permet de compenser un déphasage entre deux composantes TE et TM engendré par une lame  $\lambda/2$  et lame  $\lambda/4$  dont un des axes neutres est confondue avec le plan d'incidence.

## 5. Mesure sur substrat

Le calcul des indices de réfraction  $n$  d'absorption  $k$  dans le cas d'un substrat isotrope aboutit aux relations suivantes :

$$n^2 - k^2 = \sin^2\theta \left( 1 + \tan^2\theta \frac{\cos^2 2\Psi - \sin^2 2\Psi \sin^2 \Delta}{(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2} \right) \quad (7.1)$$

et

$$2nk = \sin^2\theta \tan^2\theta \frac{\sin 4\Psi \sin \Delta}{(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2} \quad (7.2)$$

La mesure des angles ellipsométriques  $\Psi$  et  $\Delta$  à une longueur d'onde et à un angle d'incidence  $\theta$  est suffisante pour déterminer les indices inconnus  $n$  et  $k$ . Pour un système mono couche isotrope, le calcul des inconnues, en particulier l'épaisseur, peut même être effectuée dans certains cas de manière analytique.

### QUESTION II : Avec le laser vert :

II.1 A partir de la mesure des couples d'angle (A,P), déterminez les angles ellipsométriques de ce substrat à 70° d'angle d'incidence.

II.2 D'après les formules (7.1) et (7.2), calculez les indices  $n$  et  $k$  du substrat.

II.3 Effectuez de même pour un angle d'incidence de 65°.

II.4 Quelles sont vos conclusions ?

### QUESTION III : Avec le laser rouge :

III.1 Déterminez les indices  $n$  et  $k$  de ce substrat à 70° d'incidence.

III.2 Que remarquez-vous ?

## 6. Couche transparente sur substrat

### QUESTION IV : Avec le laser vert :

IV.1 Déterminez les angles ellipsométriques à 70° d'incidence.

IV.2 A l'aide du logiciel « ellipso » déterminez les indices  $n$  et  $e$  de cette couche.

IV.3 Effectuez de même pour un angle d'incidence de 65°.

IV.4 Que remarquez-vous ?

### QUESTION V : Avec le laser rouge :

V.1 Déterminez les indices  $n$  et  $e$  de cette couche à 70° d'incidence.

V.2 Que remarquez-vous ?

### QUESTION VI :

VI.1 Effectuez les mêmes calculs (indices  $n$  et  $e$  de cette couche à 70°) à l'aide du logiciel ellipso mais cette fois-ci en prenant comme indices du substrat ceux déterminés expérimentalement (Questions II et III).

VI.2 Comparez les valeurs obtenues.

VI.3 Concluez.

## 7. Etude d'un métal

### QUESTION VII:

VII.1 Déterminez les indices  $n$  et  $k$  du métal.

VII.2 Comparez-les aux valeurs du substrat précédent. Que pouvez-vous dire sur la valeur de  $k$  ?

## 8. Etude du verre

### QUESTION VIII:

VIII.1 Déterminez les indices  $n$  et  $k$  du verre.

VIII.2 Comparez les indices du verre avec ceux de la couche de SiO<sub>2</sub>. Quelle hypothèse pouvez-vous faire sur la composition chimique du verre ?

## 9. Erreurs de mesures

Les résultats d'indices et d'épaisseurs ont été obtenus précédemment par les mesures angulaires de l'angle d'incidence, de l'angle du polariseur ainsi que de l'angle de l'analyseur. Une erreur sur l'un de ces éléments génère une erreur sur le résultat final.

Cette partie est destinée à estimer l'erreur sur le paramètre physique en fonction de l'erreur de manipulation.

### QUESTIONS IX:

**IX.1** Selon vous quelles erreurs de mesure avez vous effectuées lors de vos manipulations de l'angle d'incidence, de l'angle de l'analyseur et de l'angle du polariseur ?

**IX.2** Compte tenu de l'erreur de mesure lors du réglage de l'angle d'incidence, estimez l'erreur finale sur les indices du substrat obtenus par calculs ?

**IX.3** Effectuez de même pour les mesures du substrat en considérant cette fois-ci une erreur sur les mesures des angles du polariseur ainsi que de l'analyseur.

## Annexe : Logiciel (cf notice d'utilisation du Logiciel)

Le logiciel « ellipso » permet le calcul des caractéristiques d'un système, substrat ou couche transparente sur substrat, à partir des angles ellipsométriques déterminés expérimentalement.

Différents onglets apparaissent dans ce logiciel :

### Onglet « Paramètres »

- Longueur d'onde de la source lumineuse utilisée (entre 400 et 1000nm). Par défaut, c'est-à-dire au lancement du logiciel, la longueur d'onde 532 nm est affichée.
- Angle d'incidence (entre 10 et 90°). Par défaut, 70°.

### Onglet « Mesures »

- Entrez les angles de l'analyseur (A1 et A2) et du polariseur (P1 et P2) déterminés par la méthode de mesure. Par défaut, 0°, valeur mini autorisée : -360°, valeur maxi autorisée : +360°.

### Onglet « Angles ellipsométriques »

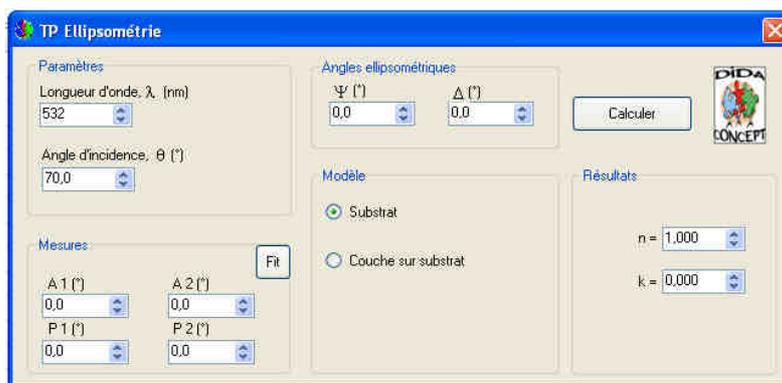
- Les angles  $\Psi$  (Psi) et  $\Delta$  (Delta) se calculent et s'affichent automatiquement si l'utilisateur entre des valeurs dans les cases A1, A2, P1 et P2.
- Il est toujours possible d'entrer directement ou de modifier dans ces 2 cases les valeurs des angles Psi et Delta.
- Pour  $\Psi$ , par défaut 0°, valeur mini autorisée : 0°, valeur maxi autorisée 90°
- Pour  $\Delta$ , par défaut 0°, valeur mini autorisée : -360°, valeur maxi autorisée : +360°

### Onglet « Modèles »

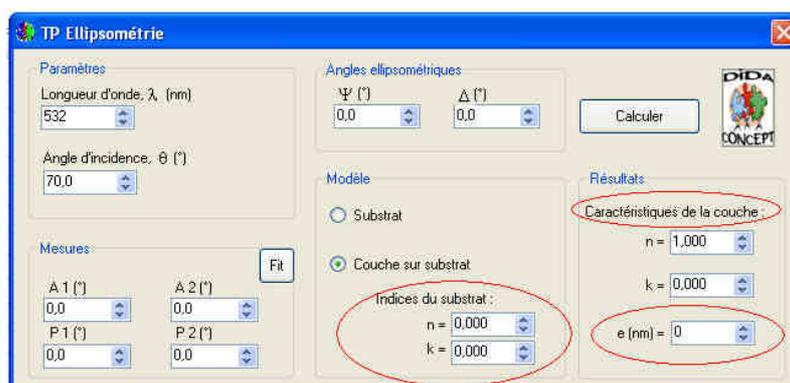
- 2 cases à choix : Substrat ou Couche sur substrat

L'interface diffère selon le choix dans cet onglet.

Si modèle « substrat » activé :



Si modèle « couche sur substrat » activé :



Le calcul de l'indice de réfraction  $n$  et l'épaisseur  $e$  d'une couche transparente ( $k = 0$ ) est alors possible. Il est nécessaire de connaître les indices du substrat. Des cases permettant de rentrer les indices du substrat apparaissent. Les indices  $n$  et  $k$  doivent être positifs et inférieurs à 10,0.

**Bouton « Calculer »**

- Permet d'effectuer les calculs en fonction des paramètres entrés par l'utilisateur.

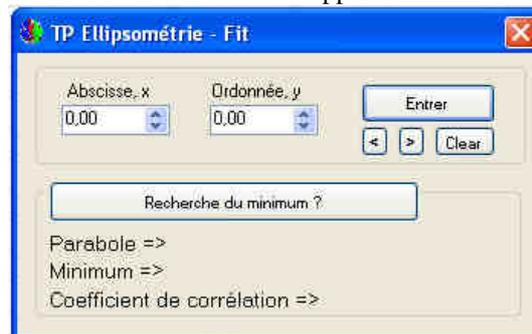
**Onglet « Résultats »**

- Pour un substrat, les indices  $n$  et  $k$  sont affichés
- Pour une couche transparente sur substrat, l'indice  $n$  et l'épaisseur  $e$  sont affichés

**Onglet « fit »**

- Permet d'effectuer un fit à partir d'une série de mesure et d'en déterminer le minimum.

Lorsque l'on clique sur ce lien l'interface suivante apparaît :



Ce logiciel va afficher l'équation de la courbe de tendance des valeurs mesurées, son coefficient de corrélation ainsi que le minimum de la courbe. Sur ce logiciel il est possible à l'aide de  de faire défiler les valeurs enregistrés.