

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF -

U.F.A.S (ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté à la faculté des sciences de l'ingénieur
Département d'optique et de mécanique de précision
Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Option : Optique appliquée

Par

Melle TABET Saïda

THEME

*Théorie de corrélation de la diffusion de Rayleigh de la lumière dans
les matériaux polymères amorphes*

Soutenu le : 21 / 10 / 2010

devant le jury composé de :

Pr. M. HAMIDOUCHE	Pr	à l'université de Sétif	Président
Dr. K. AYADI	MC	à l'université de Sétif	Rapporteur
Dr. A. BENAICHE	MC	à l'université de Sétif	Examineur
Dr. H. GUESSAS	MC	à l'université de Sétif	Examineur
Dr. L. SMATA	MC	à l'université de Sétif	Examineur

Année universitaire 2009/201

Remerciements

Je tiens à remercier vivement et sincèrement :

Le Docteur AYADI Khaled, qui a bien voulu accepter de m'encadrer et prodiguer ses meilleurs conseils,

Le Docteur CHBIRA, de l'institut de chimie qui m'a énormément conseillé,

Tous les membres du jury, pour avoir bien voulu accepter d'évaluer ce travail,

A chacun de tous ceux qui, à un moment ou à un autre ne m'ont pas épargné de leurs conseils, assistance et amitiés.

Je vous en suis reconnaissante.

Sommaire

Introduction générale

01

Chapitre I : Diffusion de la lumière

I.1	Introduction	02
I.2	Ondes électromagnétiques et équations de maxwell	02
I.3	Equations de maxwell	02
I.4	Propagation des ondes électromagnétiques	04
I.4.1	Équations de propagation	04
I.4.2	Propagation d'une onde électromagnétique plane	04
I.5	Polarisation des ondes lumineuses	06
I.5.1	Concept général de la lumière polarisée	07
I.6	Interaction lumière –matière	10
I.6.1	Réflexion	10
I.6.2	Transmission	11
I.6.3	Absorption	12
I.7	Diffusion de la lumière	12
I.7.1	Définition	12
I.7.2	Diffusion de la lumière par une surface rugueuse	13
I.7.2.1	Représentation d'une surface rugueuse	14
I.7.2.2	Paramètres caractérisant la rugosité	14
I.7.3	Modélisation de la lumière diffusée par une surface rugueuse	16
I.7.4	Diffusion de la lumière par particule	17
I.7.4.1	Théorie de Rayleigh	17
I.7.4.2	Théorie de Mie	19
I.7.4.3	Diffusion multiple	20

Chapitre II : Généralité sur les polymères

II.1	Introduction	21
II.2	Définition	21
II.3	Structure d'un polymère	22
II.3.1	Macromolécule 'et unité constitutive' (ou « mère »)	22
II.3.2	Dimensions et masses des macromolécules	22
II.4	Synthèse des polymères	23
II.4.1	Polymérisation en chaîne	23
II.4.2	Polycondensation	25
II.5	Classification des polymères	26
II.6	Propriétés des polymères	31
II.6.1	Propriétés mécaniques	31
II.6.1.1	Les différents types de comportements mécaniques	31
II.6.1.2	Facteurs ayant une influence sur les propriétés mécaniques des polymères	31
II.6.2	Propriétés électrique et électro- optique	32
II.6.3	Propriétés optiques	32
II.6.4	Propriétés de protection physique et chimique	33

Chapitre III : Partie expérimentale

III.1	Objectif du travail	34
III.2	Préparation des échantillons	34
III.2.1	Polymère utilisé	34
III.2.2	Quelques propriétés essentielles du polycarbonate	34
III.3	les échantillons épais	35
III.3.1	Conditions de préparation	35
III.3.2	Moyens utilisés	35
III.4	les échantillons films (minces)	37
III.4.1	Moyens utilisés	37
III.5	Analyse microscopique	
III.6	l'étude de la diffusion	40
III.6.1	Mesure N° 1	40
III.6.1.1	Résultat de mesure N°1	43
III.6.1.2	Discussion et interprétation des résultats de la mesure N°1	50
III.6.2	Mesure N° 2	52
III.6.2.1	Résultat de mesure N°2	53
III.6.2.2	Discussion et interprétation des résultats de la mesure N°2	74
	Conclusion générale	88
	Annexes	
	Bibliographie	

Introduction générale

Les matériaux jouent un rôle déterminant dans toutes les mutations technologiques. L'application des matériaux polymères entraîne pour notre monde une révolution comparable à celle introduite au siècle dernier par le développement de la métallurgie.

Les polymères, appelés communément "matières plastiques", sont indissociables de notre environnement et de notre vie pratique. Ils se sont imposés dans tous les domaines de nos activités : des objets les plus banals jusqu'à des applications techniques sophistiquées, en passant par leur utilisation dans les produits d'hygiène ou alimentaires.

Les interactions entre la lumière et la matière sont utilisées dans de nombreuses disciplines scientifiques pour caractériser cette matière. L'étude des phénomènes qui en découlent est parfois le seul moyen d'obtenir des informations sur le système matériel. La diffusion de la lumière est un des phénomènes pour obtenir des informations sur la matière.

La diffusion est une interaction de la lumière avec la matière au cours de laquelle la direction du rayonnement incident et sa polarisation sont modifiées (lorsque une onde lumineuse traverse la matière sa polarisation subit une transformation. Cette variation de l'état de polarisation de l'onde permet alors une caractérisation du système considéré). Donc la lumière ainsi diffusée porte l'information de dépolarisation.

Dans ce présent travail, on étudiera la diffusion de la lumière à travers des échantillons préparés en polymère afin de définir les différents paramètres qui influencent sur la diffusion de la lumière. Notre étude portant sur ce phénomène a été réalisée par une méthode optique basée sur l'utilisation de la lumière blanche, pour tenter d'aborder et appréhender les effets des rayons émis au niveau des échantillons.

Ce mémoire est agencé en trois chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à quelques notions sur la diffusion de la lumière.
- Le second chapitre se rapportera à quelques généralités sur les matériaux polymères.
- Le troisième chapitre, sera réservé à la partie expérimentale avec les résultats obtenus et leurs interprétations.

Et enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

Chapitre I

Diffusion de la lumière

I.1 Introduction :

La lumière et plus généralement les ondes électromagnétiques sont un moyen privilégié pour sonder et observer le monde qui nous entoure. Cependant pour que le scientifique puisse extraire à partir de ses mesures optiques une information objective sur le milieu qu'il étudie, il est nécessaire qu'il connaisse les lois d'interaction de la lumière avec la matière. Au cours de l'histoire, afin d'en déterminer les lois, ces interactions ont été divisées en sous-familles dont les principales sont la réfraction, la diffraction et la diffusion. Cette dernière, la diffusion, est sans aucun doute la plus générale car elle englobe les deux autres [1].

Le phénomène de diffusion de la lumière se rencontre partout dans notre vie quotidienne. En effet, le bleu du ciel, la couleur blanche du lait, le scintillement des étoiles, l'absorption de la peinture sont des exemples de situation où la diffusion de la lumière est responsable de l'effet observé [2].

Les premières études de la diffusion lumineuse ont été faites dans le cadre de l'observation astronomique. En effet le flux lumineux qui vient des étoiles jusque dans nos télescopes a subi une atténuation due à la lumière diffusée dans les nuages de poussières qu'il a rencontré sur son parcours. La diffusion apparaît donc là comme un défaut que les astronomes ont voulu estimer. Mais les physiciens se sont très vite rendu compte que cette diffusion n'avait pas seulement atténué le faisceau de lumière mais avait changé ses propriétés, entre autre de polarisation. A partir de là, la diffusion n'était plus vue comme un défaut [1].

Avant d'aborder la diffusion, on discute quelques notions sur la propagation de la lumière et plus généralement la propagation des ondes électromagnétiques.

I.2 Ondes électromagnétiques et équations de Maxwell :

Le développement des sciences antérieurement au 19^{ème} siècle avait conduit à l'édification de deux sciences distinctes : l'électricité d'une part (par Coulomb, Poisson, Gauss...) et le magnétisme d'autre part (par Oersted, Laplace, Biot et Savart...). Le physicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) commence à traduire l'ensemble des connaissances relatives au champ électrique et au champ magnétique sous forme d'équations locales et établit sous sa forme définitive en 1864 une théorie unifiée dans laquelle l'électricité et le magnétisme apparaissent comme deux manifestations particulières d'une réalité plus générale, baptisée électromagnétisme [11].

I.3 Equations de maxwell :

Les équations de maxwell décrivent la propagation des ondes électromagnétiques dans la matière et dans le vide, en présence de source de rayonnement, à l'aide de 4 champs [3] :

- loi de Gauss (électricité) :

$$\operatorname{div}(\vec{D}) = \rho \quad (1-1)$$

- loi de Gauss (magnétisme) :

$$\operatorname{div}(\vec{B}) = 0 \quad (1-2)$$

-loi de Maxwell Faraday :

$$\operatorname{Rot}(\vec{E}) + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (1-3)$$

-loi de Maxwell Ampère :

$$\operatorname{Rot}(\vec{H}) - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \quad (1-4)$$

Ou \vec{E} et \vec{H} sont les champs électriques et magnétiques, \vec{D} et \vec{B} sont les inductions électrique et magnétique.

ρ et \vec{J} sont respectivement les densités de charge et de courant.

Dans un milieu isotrope et homogène les inductions sont reliées aux champs par les relations :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (1-5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1-6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1-7)$$

Ou :

ε : est la permittivité diélectrique.

μ : est la perméabilité magnétique.

σ : est la conductivité.

Avec :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (1-8)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (1-9)$$

Ou :

ε_0 et μ_0 les constantes dans le vide.

ε_r : est la permittivité électrique relative.

μ_r : est la perméabilité magnétique relative.

Lorsque le matériau est un isolant non chargé $\sigma = 0$ et $\rho = 0$, les équations de Maxwell prennent alors la forme:

$$\text{div}(\vec{E}) = \text{div}(\vec{H}) = 0 \quad (1-10)$$

$$\text{Rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1-11)$$

$$\text{Rot}(\vec{B}) = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1-12)$$

I.4 Propagation des ondes électromagnétiques :

I.4.1 Équations de propagation :

En combinant les relations : (1-3), (1-4) et (1-5), (1-6), (1-7), Maxwell obtient l'équation de propagation des phénomènes ondulatoire de nature électromagnétique :

$$\Delta \vec{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-13)$$

$$\Delta \vec{H} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-14)$$

Où Δ est l'opérateur laplacien :

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1-15)$$

I.4.2 Propagation d'une onde électromagnétique plane :

La propagation d'une onde électromagnétique plane dans un milieu infini, isotrope linéaire et non chargé électriquement peut être décrite par l'équation suivante :

$$\nabla^2 \vec{E}(r,t) = \varepsilon \mu \frac{\delta^2 \vec{E}}{\delta t^2} + \sigma \mu \frac{\delta \vec{E}}{\delta T} \quad (1-16)$$

la solution de ce cette équation dans le cas particulier d'une onde plane est une fonction sinusoïdale, du temps, de pulsation ω et qui a la forme :

$$E(r,t) = \vec{E}_0 \exp \left[i(\omega t - \vec{k}r) \right] \quad (1-17)$$

Où \vec{k} est le vecteur d'onde dont la relation de dispersion s'écrit comme suit:

$$\vec{K}\vec{K} = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \quad (1-18)$$

De la même façon, on peut exprimer les expressions pour \vec{H} et \vec{D} , qui sont proportionnelles à $\exp[i(\omega t - \vec{k}r)]$. En reprenant l'expression (1-10) il suit par la transformation :

$$\text{div}(\vec{D}) = \vec{J}(\vec{K}\vec{D}) = 0, \vec{J}(\varepsilon\vec{E}\vec{K}) = j\varepsilon(\vec{E}\vec{K}) \quad (1-19)$$

Cette équation admet deux solutions :

$\vec{K} \perp \vec{D}$ Qui caractérise l'onde transversale.

$$\varepsilon(\omega) = 0$$

De l'équation (1-17) on tire la relation de dispersion :

$$\vec{K}\vec{K} + \frac{\omega^2}{c^2} \left(\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) \quad (1-20)$$

-cas où le milieu est non conducteur ($\sigma = 0$) :

La solution de l'équation différentielle (1-16) correspond à l'équation d'une onde plane, homogène, se propageant dans la direction du vecteur d'onde \vec{K} et dont les plans d'égale phase sont confondus aux plans d'égale amplitude.

$$\vec{K}\vec{K} = |\vec{K}|^2 = \frac{\omega^2 \varepsilon}{c^2} = \frac{\omega^2 n^2}{c^2} \quad (1-21)$$

Où n est l'indice de réfraction de milieu, relié à la permittivité ε par : $\varepsilon = n^2$

-cas où le milieu est conducteur ou semi conducteur ($\sigma \neq 0$) :

La permittivité relative appelée fonction diélectrique du milieu est complexe et s'écrit :

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (1-22)$$

Où ε_1 , la partie réelle de la permittivité, est liée à la polarisation du milieu et ε_2 , la partie imaginaire est liée à la dissipation d'énergie, la relation de dispersion devient donc :

$$\vec{K}\vec{K} = \omega^2 \frac{\tilde{\varepsilon}}{c^2} \quad (1-23)$$

$$\vec{K} - \frac{\omega}{c} \tilde{n} = 0 \quad (1-24)$$

Ces équations impliquent nécessairement que le vecteur d'onde \vec{K} est complexe

$$\vec{K} = \vec{K}_1 + i\vec{K}_2 \quad (1-25)$$

Où \vec{K}_1 et \vec{K}_2 sont liés respectivement à la phase et à l'atténuation de l'onde.

La solution de l'équation (1-17) devient alors :

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0 \exp(-\vec{k}_2 \vec{r}) \exp[i(\omega t - \vec{k}_1 \vec{r})] \quad (1-26)$$

Cette équation correspond à des ondes non homogènes dont les plans d'égal phase sont distincts des plans d'égal amplitude.

L'indice du milieu est donc complexe.

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{n}^2 = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad \tilde{n} = n = ik \quad (1-27)$$

Où n représente l'indice de réfraction, lié à la vitesse de phase de l'onde dans le milieu.

k Représente l'indice d'extinction, lié à l'atténuation de l'onde dans le milieu.

En considérant $\mu = 1$ on tire les relations :

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad \epsilon_2 = 2nk \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (1-28)$$

L'intensité lumineuse, grandeur accessible à la mesure, est proportionnelle à $\left| \overline{E^2} \right|$ et décroît exponentiellement avec la profondeur de pénétration de l'onde dans le milieu.

Le coefficient d'absorption ' α ' défini à partir de l'amortissement de l'intensité vaut.

$$\alpha = 2|k_2| = 2 \frac{\omega}{c} = 4\pi k \frac{1}{\lambda} = \frac{\sigma}{cn\epsilon_0} \quad (1-29)$$

L'absorption d'une onde dans un milieu est donc déterminée par k, ϵ_2 ou σ

La fonction diélectrique complexe $\tilde{\epsilon} = \tilde{n}^2 = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ caractérise les propriétés optiques d'un matériau.

1.5 Polarisation des ondes lumineuses:

La polarisation est une propriété commune à tous les types d'ondes vectorielles. Pour ces ondes, le concept de polarisation se rapporte au comportement en fonction du temps et en un point de l'espace, d'un des vecteurs caractéristiques de l'onde. Les ondes lumineuses étant des ondes électromagnétiques, elle requiert quatre vecteurs pour leur description, les vecteurs champs électriques \vec{E} , excitation magnétique \vec{H} , champ magnétique \vec{B} et déplacement électrique \vec{D} .

C'est le vecteur champ électrique qui est choisi pour définir l'état de polarisation des ondes lumineuses. Ce choix est pertinent, car dans les milieux optiques lors des interactions entre l'onde lumineuse et la matière, la force exercée par le champ électrique est beaucoup plus intense que celle que le magnétique exerce sur eux. En générale, lorsque la polarisation du champ électrique est fixée, la polarisation des trois autres vecteurs est déterminée, puisque les

quatre vecteurs caractérisant l'onde électromagnétique sont reliés par les équations de Maxwell et les équations de la matière [12].

I.5.1 Concept général de la lumière polarisée :

Le vecteur champ électrique d'une onde électromagnétique plane et monochromatique (ou quasi-monochromatique) peut être décomposé en trois composantes orthogonales dans le système de coordonnées cartésiennes. Dans le cas général, le vecteur champ électrique \vec{E} s'écrit sous la forme[43] :

$$\vec{E}(x, y, z, t) = E_x(x, y, z, t)\vec{x} + E_y(x, y, z, t)\vec{y} + E_z(x, y, z, t)\vec{z} \quad (1-30)$$

Où x , y , et z sont les vecteurs unitaires du système d'axes de référence.
Pour une onde plane quasi-monochromatique :

$$E_i(x, y, z, t) = E_{0i} \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_i) \quad (1-31)$$

Où : $\vec{k}\vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z$ et $i = x, y, z$

Et φ_i est un terme de phase, tandis que E_{0i} est un terme d'amplitude (positif).

Si on choisit l'axe des z comme direction de propagation, on obtient alors le système simplifié suivant :

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - k_z z + \varphi_x) \quad (1-32)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - k_z z + \varphi_y) \quad (1-33)$$

$$E_z(t) = 0 \quad (1-34)$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda} n$ ou λ est la longueur d'onde (dans le vide) et n est l'indice de réfraction vu par l'onde dans la direction de propagation.

Par souci d'allègement de l'écriture, la dépendance temporelle sera sous-entendue et on écrira $E_i(t) = E_i$

En combinant les deux expressions (1.32) et (1.33), et en éliminant la variable temporelle t , on peut montrer que l'extrémité du vecteur champ électrique décrit une ellipse dont l'équation est la suivante :

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos(\varphi) = \sin^2(\varphi) \quad (1-35)$$

Avec : $\varphi = \varphi_x - \varphi_y$

L'état de polarisation est entièrement défini si on connaît l'ensemble des paramètres de l'ellipse (voir fi. 1.1), c'est-à-dire son ellipticité ε , son azimuth θ , la différence de phase φ et son sens de rotation (qui dépend directement du signe de $\sin(\varphi)$).

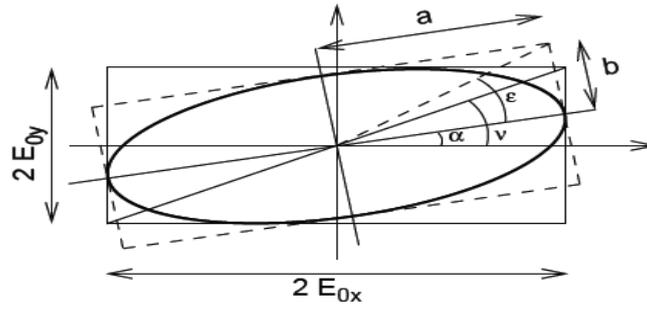
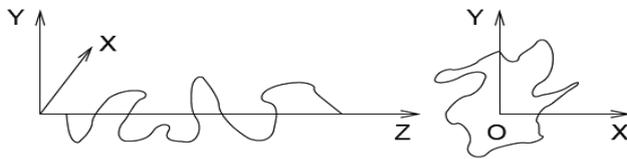
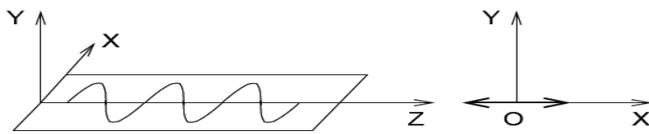


Figure 1.1 : Ellipse de polarisation

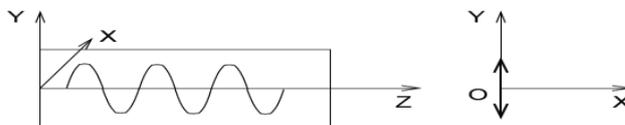
Ainsi, lorsque $\varphi = 0$, ou $\varphi = \pi$ (modulo 2π), nous sommes en présence d'une onde polarisée rectilignement ; lorsque $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ou $\varphi = \frac{3\pi}{2}$ et $E_{0x} = E_{0y}$, l'ellipse devient un cercle et la polarisation est dite circulaire. La figure 1.2 illustre les différents états de polarisation.



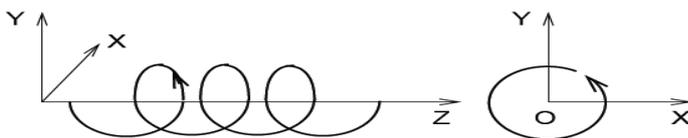
(a) non polarisé



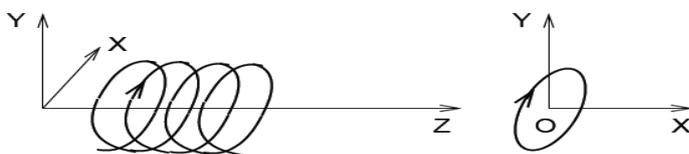
(b) rectiligne horizontal



(c) rectiligne vertical



(d) circulaire



(e) elliptique

Figure 1.2 : Différents états de polarisation

Les différents paramètres de l'ellipse sont liés aux paramètres de l'onde par une série de relations [44] :

$$a^2 + b^2 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \quad (1-36)$$

$$\pm ab = E_{0x}E_{0y} \sin(\varphi) \quad (1-37)$$

$$E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \tan(2\theta) = 2E_{0x}E_{0y} \cos(\varphi) \quad (1-38)$$

$$\frac{E_{0y}}{E_{0x}} = \tan(2\nu) \quad (1-39)$$

$$\frac{b}{a} \tan(\varepsilon) \quad (1-40)$$

$$\frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} = \tan(2\nu) \quad (1-41)$$

$$\frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} = \sin(2\nu) \quad (1-42)$$

Ou encore [45] :

$$\tan(2\theta) = \tan(2\nu) \cos(\varphi) \quad (1-43)$$

$$\cos(2\varepsilon) \cos(2\theta) = \cos(2\nu) \quad (1-44)$$

$$\cos(2\varepsilon) \sin(2\theta) = \cos(2\nu) \tan(2\theta) = \sin(2\nu) \cos(\varphi) \quad (1-45)$$

$$\pm \sin(2\varepsilon) = \sin(2\nu) \sin(\varphi) \quad (1-46)$$

$$\pm \tan(2\varepsilon) = \sin(2\theta) \tan(\varphi) \quad (1-47)$$

L'ellipse est dite droite ou gauche selon le sens de rotation du vecteur champ électrique. Par convention, elle est dite droite lorsque pour un observateur regardant dans la direction opposée au sens de propagation, la rotation s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre. Ainsi dans les équations (1.46) et (1.47), le signe (+) correspond à une rotation gauche et respectivement le signe (-) correspond à une rotation droite du vecteur champ électrique [46].

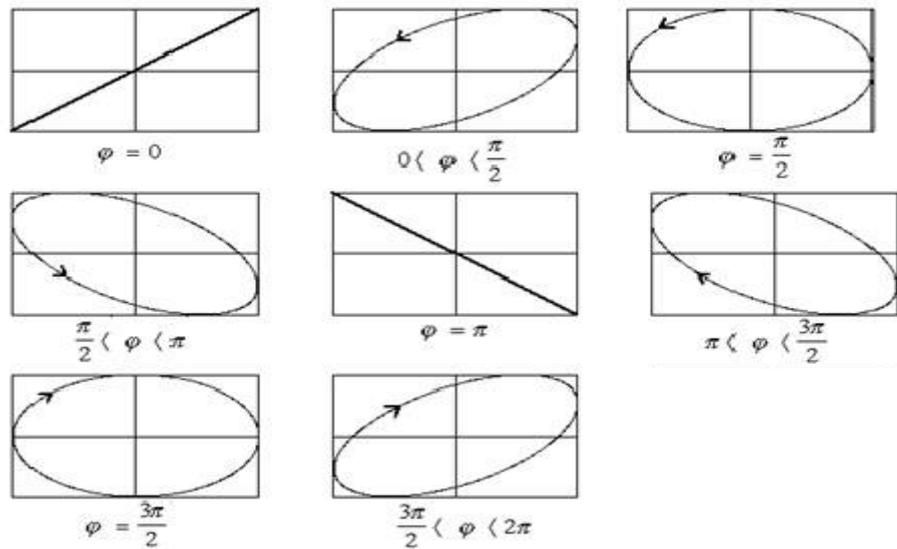


Figure 1.3 : Etats de polarisation pour plusieurs valeurs de déphasage.

I.6 Interaction lumière –matière :

Quand les rayons lumineux tombent sur la surface d'une matière (opaque ou transparente) une partie est réfléchiée, le reste se propageant dans la matière. Cette partie peut être soit absorbée soit diffusée par les constituant de la matière. Enfin, une partie peut être transmise à travers la matière [48].

I.6.1 Réflexion :

C'est le phénomène qui se produit quand une onde lumineuse tombe d'un milieu optiquement plus dense vers un milieu moins dense. Donc l'onde incidente est renvoyée dans le milieu d'incidence. On distingue entre réflexion spéculaire, réflexion diffuse et réflexion totale.

a- Réflexion spéculaire :

Dans le cas de la réflexion spéculaire, le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale à la surface de séparation sont dans un même plan dont l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion [48].

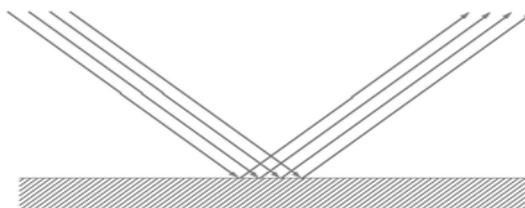


Figure 1.4: Réflexion spéculaire

b- Réflexion diffuse :

La réflexion diffuse caractérise la lumière réfléchiée par une surface irrégulière (présente des fluctuations de hauteur aléatoire "surface dite rugueuse"), qui renvoie l'énergie incidente dans une multitude de directions [48].

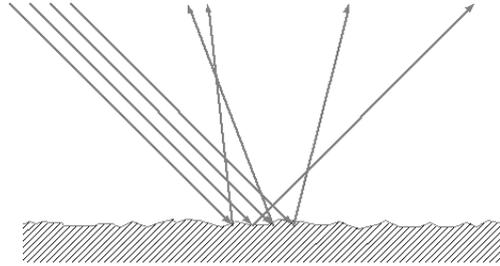


Figure 1.5: Réflexion diffuse

C- Réflexion totale :

Il y a réflexion totale lorsque le rayon lumineux qui passe d'un milieu plus dense vers un milieu moins dense au sens optique traverse la limite de ces milieux sous un angle supérieur à un certain angle limite, toute la lumière est réfléchiée par la surface[48].

Si l'angle d'incidence est supérieur à un certain angle limite, toute la lumière est réfléchiée par la surface [4].

Pour caractériser la réflexion, on introduit le facteur de réflexion qui est égal au quotient des intensités des ondes réfléchiée et incidente.

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad (1-48)$$

Où :

I_r : Intensité réfléchiée.

I_i : Intensité incidente.

I.6.2 Transmission :

Lors de l'incidence d'une onde lumineuse sur une surface diélectrique, il apparaît en même temps que l'onde réfléchiée, une onde transmise. La transmission est caractérisée par un facteur de transmission qui est le quotient des intensités des ondes réfléchiées et incidentes. Elle est donnée par [9] :

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad (1-49)$$

Ou :

I_t : Intensité transmise.

I_i : Intensité incidente.

Comme pour la réflexion, la partie du flux qui se propage dans le second milieu de la direction correspondant à l'optique géométrique, est appelée transmission régulière, spéculaire ou géométrique de la surface. Par contre celle qui se propage dans toutes les directions autres que celles correspondant à l'optique géométrique est appelée transmission diffuse.

I.6.3 Absorption :

Quand une onde lumineuse tombe sur une surface, il y a réflexion et/ou transmission. En faisant le bilan énergétique, on constate qu'une partie de l'énergie est perdue. L'une des causes de cette perte est l'absorption : quelques photons cèdent leurs énergies au milieu. Cette énergie participe au réchauffement ou à l'ionisation des atomes. Il a été montré que le flux émergent reste proportionnel au flux incident tant que l'absorption n'est pas élevée. Le facteur d'absorption est donné par [9] :

$$A = \frac{\phi_a}{\phi_i} \quad (1-50)$$

Ou :

ϕ_a : Flux émergent

ϕ_i : Flux incident.

Une autre cause de perte d'énergie lors de la propagation de la lumière dans un milieu est la diffusion qui sera étudiée dans ce chapitre.

I.7 Diffusion de la lumière :

Les phénomènes de diffusion de la lumière interviennent lorsque des hétérogénéités structurales apparaissent soit dans le volume du milieu de propagation, soit à la surface de séparation entre deux matériaux de caractéristiques optiques différentes.

Les inhomogénéités de volume traduisent des variations plus ou moins locales de l'indice de réfraction et les hétérogénéités en surface correspondent à la rugosité des interfaces.

Dans les deux cas de figure, les phénomènes de diffusion sont liés à l'interaction de la lumière avec une répartition aléatoire de structures volumiques ou superficielles engendrant des modifications dans la direction de propagation d'une partie du faisceau lumineux [6].

I.7.1 Définition :

La diffusion est une interaction de la lumière avec la matière au cours de laquelle la direction du rayonnement incident et sa polarisation sont modifiées. La lumière ainsi diffusée porte l'information de dépolarisation [37].

La diffusion est le phénomène qui se produit lorsque un objet apparaît coloré. La lumière du soleil est réémise dans toutes les directions par l'objet et certaines fréquences sont réémises plus que d'autres. La diffusion explique notamment pourquoi le ciel est bleu, le soleil est jaune à midi et rouge au coucher [38].

Toute onde qu'elle que soit sa nature électromagnétique comme la lumière, acoustique ou encore quantique, diffuse de façon générale quand elle se propage dans un milieu hétérogène [6]. Un milieu est dit optiquement hétérogène, si son indice de réfraction ne reste pas constant et varie d'une façon irrégulière dans le milieu [7].

La lumière ne diffuse pas toujours dans un milieu hétérogène. Pour qu'il y ait diffusion, il faut aussi que la taille des objets diffusants ou l'échelle typique de variation de l'indice, ne soit pas trop petite devant la longueur d'onde, car dans ce cas l'onde se propage en ligne droite comme si le milieu était homogène.

Un milieu est optiquement homogène, si son indice de réfraction ne dépend pas des coordonnées et reste constant dans tout le volume du milieu [6,7].

I.7.2 Diffusion de la lumière par une surface rugueuse :

La surface porte beaucoup d'informations sur les propriétés physique, chimique, thermique, et optique d'un corps solide qu'elle limite [9].

L'interaction de la lumière avec une surface plane lisse est un problème dont la description est simple. La réflexion ou la réfraction sont décrites géométriquement par les lois de Snell-Descartes, les modifications de phase et d'amplitude sont données par les lois de Fresnel. Toutefois, ces lois simples sont loin de rendre compte de tous les phénomènes observés. Ainsi, dans le cas d'un miroir de qualité optique, il est possible de voir le point d'impact d'un faisceau sans qu'il soit nécessaire de placer son œil sur le chemin du faisceau réfléchi... ce qui est en contradiction avec les lois de Snell-Descartes. La lumière observée est de la lumière diffusée par la surface. Cela est dû à une très faible rugosité dont la hauteur quadratique moyenne est de quelques angstroms. Malgré cette très faible valeur, la surface diffuse de la lumière est détectable par l'œil [47].

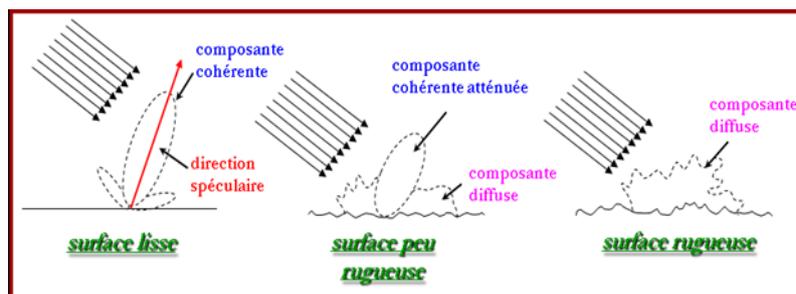


Figure I.6: Diffusion de la lumière par différents états de surfaces

La lumière diffusée par une surface rugueuse contient des informations sur la rugosité de la surface.

I.7.2.1 Représentation d'une surface rugueuse :

Partons du constat qu'une surface réelle n'est jamais parfaitement lisse mais toujours altérée par différents types de défauts qui se répartissent aléatoirement sur toute la surface. Selon leur nombre et leur amplitude, une surface s'écarte alors plus ou moins d'un plan moyen et on la qualifie souvent de plus ou moins rugueuse. Autrement dit, on appellera rugosité l'écart par rapport au niveau de référence qui matérialise la surface idéale. La rugosité, dont les irrégularités géométriques sont telles que la distance entre deux pics est inférieure à 500 μm , est constituée de stries et de sillons (défauts pseudo-périodiques), de piqûres, d'arrachements et de marques d'outils (défauts apériodiques). La rugosité traduit enfin ce que l'on appelle l'état de surface. Cet état de surface est principalement dû aux procédés d'élaboration (usinage, polissage, moulage,...)[8].

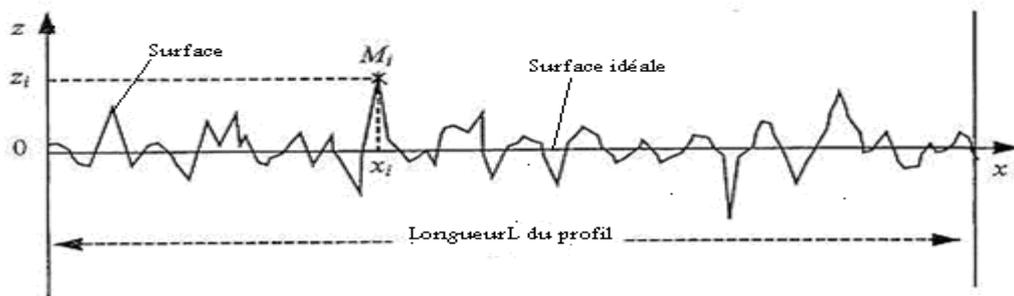


Figure 1.7 : Représentation schématique d'une surface rugueuse.

I.7.2.2 Paramètres caractérisant la rugosité :

A partir d'un profil de longueur L dit "profil rugueux", il est possible de définir différents paramètres statistiques et fonctions permettant de caractériser au mieux une surface rugueuse [8]:

❖ **l'écart moyen arithmétique R_a du profil :**

Il représente la moyenne arithmétique des écarts $|z_i|$ du profil par rapport à la ligne moyenne ;

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (1-51)$$

❖ **la hauteur quadratique moyenne δ aussi notée R_q :**

Elle représente la racine carrée de la valeur moyenne des carrés des écarts Z_i par rapport à la ligne moyenne ;

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1-52)$$

❖ **la fonction d'autocorrélation $G(\tau)$ des aspérités de la surface :**

Si on admet que le profil de rugosité de la surface est donné par la fonction $z(\rho)$, où ρ est la distance mesurée sur une ligne droite le long de la surface. La fonction d'auto variance est calculée à partir du profil de surface par l'expression suivante [9] :

$$G(\tau) = \frac{1}{Le} \int_0^{Le} z(\rho)z(\rho + \tau)d\rho \quad (1-53)$$

Ou :

$G(\tau)$: Fonction d'auto variance.

Le : Longueur d'évaluation.

τ : Distance du changement latéral du profil.

Si $\tau = 0$, la fonction d'auto variance est positive et elle est égale à la rugosité quadratique moyenne δ^2 . La version normalisée de la fonction d'auto variance est nommée fonction d'auto corrélation $C(\tau)$ donnée par :

$$C(\tau) = \frac{G(\tau)}{\delta^2} \quad (1-54)$$

❖ **la longueur de corrélation σ :**

Elle représente la distance moyenne séparant deux motifs voisins d'aspérités. Ce paramètre est défini à partir de la fonction d'autocorrélation, comme étant la distance séparant le point où la valeur de cette fonction est maximale (c'est-à-dire à l'origine) et celui où la valeur est diminuée d'un rapport e lorsque G est définie par une exponentielle [8]:

$$G(\tau) = \frac{G(0)}{e} \quad (1-55)$$

Pour des mesures de diffusion ou autres, on définit :

❖ **la densité spectrale de puissance (dsp) :**

Elle est définie comme la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation :

$$|\mathcal{S}(k)|^2 = TF[G(\tau)] \quad (1-56)$$

On peut également montrer que la rugosité est liée à la dsp par la relation :

$$\mathcal{D}^2 = \int_{k=0}^{k=+\infty} |S(k)|^2 2\pi k dk \quad (1-57)$$

Avec k la fréquence spatiale (inverse de la période spatiale).

Enfin, il faut noter que ces paramètres statistiques ne permettent en aucun cas de remonter au profil réel de la surface (creux, bosses, stries ou sillons) mais représentent uniquement une indication moyenne de l'état de surface considérée pour une gamme donnée de fréquences spatiales [8].

Décrivons brièvement les effets de la rugosité. Lorsque la valeur de la hauteur quadratique moyenne de la surface augmente, on observe une diminution de la réflectivité spéculaire (c'est-à-dire dans la direction donnée par les lois de Snell-Descartes) et une augmentation de la lumière diffusée. Parallèlement, l'absorption de lumière (lumière transformée en chaleur) augmente. Des phénomènes d'absorption très importants peuvent apparaître pour des surfaces métalliques lorsque l'on diminue la réflectivité de l'interface air-milieu opaque. En ce qui concerne la répartition dans l'espace de la lumière diffusée, elle dépend fortement de la structure transverse de la rugosité [47].

I.7.3 Modélisation de la lumière diffusée par une surface rugueuse :

La diffusion par une surface rugueuse a été largement étudiée et de nombreuses approches ont été développées. On peut classer ces méthodes en deux grandes catégories : les méthodes asymptotiques et les méthodes rigoureuses [17].

1-les méthodes asymptotiques :

Sont aussi appelées méthodes approchées. Les plus connues sont la méthode de perturbation ou la méthode de Kirchhoff. Aucune méthode asymptotique n'est totalement générale, ni totalement rigoureuse [18].

- **La méthode de Kirchhoff:**

Cette méthode est valable pour des rugosités telle que $\sigma < \frac{\lambda}{3}$ et $\tau_c > \lambda$. cette approximation est basée sur l'approximation des plans tangents. Le facteur de réflexion (et de transmission) local en un point particulier de la surface est supposé être celui d'un plan infini tangent à la surface en ce point.

- **La méthode des faibles perturbations:**

Cette méthode est valable pour des rugosités telles que $\sigma < \frac{\lambda}{20}$ et $\tau_c > \sigma$. C'est une méthode idéale utilisée pour le calcul de champ diffusé en réflexion et en transmission dans le cas des faibles rugosités que la surface soit métallique ou diélectrique. Elle permet dans le cas du métal de prendre en compte les effets des plasmons de surface et aussi la nature vectorielle des ondes électromagnétiques. Comme l'expression du champ diffusé est analytique et explicite, le calcul est extrêmement rapide.

2- les méthodes rigoureuses :

Englobent entre autre, la méthode des moment (MM) et les méthodes des éléments finis (MEF) et les différences finies (FDTD).

Les méthodes rigoureuses présentent l'inconvénient de nécessiter une place mémoire qui augmente avec les dimensions de la surface étudiée. La résolution de ces méthodes requiert ainsi, dans certain cas, un temps de calcul qui peu s'avérer très important (18).

- **La méthode par éléments finis:**

Cette méthode consiste à discrétiser l'équation d'Helmholtz dans l'espace et à résoudre numériquement avec les conditions aux limites. Elle est applicable dans toutes les formes de particules mais dans un domaine fini, leurs précisions est fonction du maillage qui doit être choisi en fonction de la forme des particules.

- **La méthode de différences finies dans le domaine temporel (FDTD) :**

Cette méthode consiste à discrétiser les équations de Maxwell, en espace et en temps, puis à les résoudre à partir des valeurs initiales. Elle est appliquée dans toutes les formes de particules mais dans un domaine fini.

- **Les méthodes modales :**

Sont basées sur la décomposition des champs sur une base de fonctions orthogonales. L'application des théorèmes intégrales permet de retrouver les liens entre les coefficients de décompositions des champs. Un exemple est la méthode de T-Matrix [1].

1.7.4 Diffusion de la lumière par particule :

Quand la lumière interagit avec un agrégat de particules, la lumière diffusée dépend de nombreux paramètres : la taille des particules comparées à la longueur d'onde, leurs propriétés optiques (absorption, indice de réfraction, conductivité), leurs formes, l'orientation de l'agrégat par rapport à l'onde incidente, la densité en particules de l'agrégat, etc.

Les premières théories développées (fin XIX et début XX), pour traiter la diffusion de lumière par particule et qui sont très utilisées, sont la théorie de Rayleigh et la théorie de Lorenz-Mie [1].

1.7.4.1 Théorie de Rayleigh :

La diffusion de Rayleigh concerne la diffusion de la lumière par des particules très petites comparées à la longueur d'onde. En raison de la très petite taille de particule, on assume que la forme de la particule n'a pas d'influence [15].

En effet, lorsque la particule est soumise à une onde plane monochromatique, de longueur d'onde λ , le champ électrique de cette onde induit dans la particule à un moment dipolaire oscillant [14]. Donc toutes les molécules oscillent en phase sous l'effet du champ électrique incident. Le vecteur champ électrique diffusé par la particule dans une direction est la somme,

en phase, des champs dus aux molécules. Ces interférences nécessairement constructives font que l'intensité en diffusion de la particule est le produit de l'intensité d'une de ses molécules par le carré de leur nombre [9].

La section efficace en diffusion angulaire d'une petite particule de rayon « r » (donc de volume V) et comportant « N » molécules par unité de volume, est donc égale à :

$$\xi_p(\theta) = (N_m V)^2 \cdot \xi_{mol}(\theta) \quad (1-58)$$

$$\xi_p(\theta) = \frac{(16\pi^4 r^6)}{\lambda^4} \left(\frac{(n^2 - 1)}{n^2 + 2} \right)^2 \cdot \sin^2 \theta \quad (1-59)$$

$$\xi_p = \frac{128\pi^5 r^6}{3\lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \quad (1-60)$$

Où ξ_p : section efficace en diffusion angulaire de la particule.

θ : Angle entre l'axe du dipôle et la direction d'émission.

N_m : Nombre de molécules :

V : Volume de la particule

r : Rayon de la particule

λ : Longueur d'onde

n : Indice de réfraction de la particule

$\xi_{mol}(\theta)$: Section efficace en diffusion angulaire de la molécule donnée par :

$$\xi_{mol}(\theta) = \frac{9\pi^2}{N^2 \lambda} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \cdot \sin^2 \theta \quad (1-61)$$

Dans le cas de diffusion Rayleigh de la lumière naturelle, si les particules du milieu sont électriquement isotropes et n'absorbent pas de lumière, l'intensité de la lumière diffusée par une unité de volume du milieu sous l'angle par rapport à la propagation de la lumière incidente, est donnée par [9] :

$$I_\theta = a \frac{N_0 V^2}{D^2 \lambda^4} (1 + \cos^2) i_0 \quad (1-62)$$

Où I_0 : Intensité de la lumière incidente.

λ : Longueur d'onde de la lumière incidente.

D : Distance entre le volume diffusant et le point d'observation

N_0 : Nombre de particules par unité de volume du milieu.

V : Volume d'une particule.

a : Coefficient dépendant du degré d'hétérogénéité du milieu trouble c'est-à-dire des indices de réfraction des particules et du milieu où elles se trouvent (n et n_0), lorsque $n = n_0$, $a = 0$.

Il résulte de cette formule que toutes les autres conditions étant égales, l'intensité de la lumière diffusée est inversement proportionnelle à la puissance quatre de la longueur d'onde.



Figure I.8 : Diffusion de Rayleigh.

Pour cette raison, dans la lumière diffusée la radiation de petites longueurs d'ondes prédomine. Dans le cas de lumière transmise, c'est la radiation des grandes longueurs d'onde qui prédomine. La lumière bleue est à peu près diffusée avec une intensité 10 fois plus grande que la lumière rouge. C'est la raison qui explique l'observation de la couleur du ciel bleue pendant la journée, mais peut paraître rouge quand on regarde directement vers le ciel l'aube ou au coucher du soleil [9].

I.7.4.2 Théorie de Mie :

Le premier à avoir résolu le problème de la diffusion de la lumière par une particule sphérique en utilisant la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell est Gustav Mie en 1908 [16].

La théorie de la diffusion de mie concerne la diffusion d'une onde électromagnétique par une particule de forme sphérique homogène dont le rayon est du même ordre de grandeur que l'onde incidente [15].

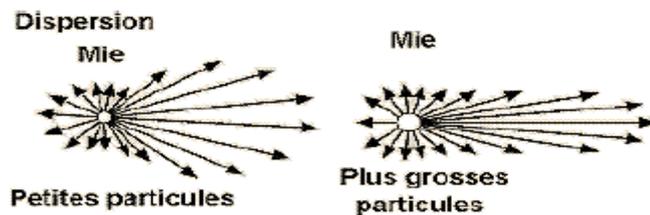


Figure I.9: Diffusion de Mie.

Cette théorie montre que l'intensité de la lumière diffusée en fonction de la longueur d'onde, décroît fortement à partir d'une longueur d'onde environ égale à la taille de la particule. Au dessus de cette valeur, elle ne dépend pratiquement pas de la longueur d'onde du rayonnement [9].

La théorie de Mie est beaucoup plus complexe que celle de la diffusion Rayleigh. La plupart des notions introduites dans la théorie de la lumière incidente et la dimension de la particule sont deux paramètres qui déterminent le paramètre « q » qui est l'un des paramètres de base de la théorie de Mie qui est donnée par [9].

$$q = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (1-63)$$

Avec :

r : Rayon de la particule

λ : Longueur d'onde de la lumière incidente.

Si q tend vers 0, on se ramène dans la théorie de la diffusion Rayleigh. Si q est très grand, par exemple pour le cas des gouttes de pluie, éclairées par une lumière visible, le phénomène est expliqué par les lois de diffraction, de réflexion et de réfraction [9]

Les deux modèles (théories de mie et Rayleigh) sont très performants mais possèdent deux limites importantes [1] :

D'abord ils ne rendent pas compte des propriétés de diffusion de particules n'ayant pas une symétrie sphérique, ensuite ils ne peuvent être utilisés que dans le cas où les particules sont suffisamment espacées entre elles pour que leurs interactions puissent être négligées. C'est à dire que ce sont des modèles adaptés à l'étude de la diffusion de milieux peu denses.

Cependant, de nouveaux besoins ont vu le jour concernant la diffusion de la lumière par des particules non sphériques et dans des milieux plus denses, comme par exemple l'interaction de la lumière avec des matières biologiques. Dans ce cas là, on parle de la diffusion multiple.

I.6.4.3 La diffusion multiple :

La diffusion multiple se produit si la densité des particules est grande ou si les particules sont près les uns aux autres à comparer à la longueur d'onde. Chaque particule fait non seulement des éparpillements la lumière incidente, mais la lumière est diffusée par les autres aussi.

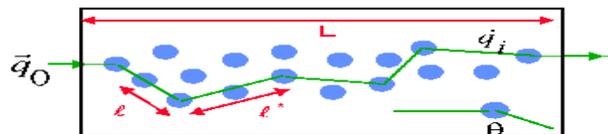


Figure I.10: Exemple d'un chemin de diffusion multiple.

Par exemple en nuages, seulement 10% de la lumière diffusée est due à la diffusion simple, le reste est dû à la diffusion multiple. Plusieurs critères peuvent être employés pour identifier le procédé de diffusion multiple. Il y a diffusion multiple quand l'augmentation du nombre de particules n'induit pas la même augmentation de l'intensité diffusée. La diffusion multiple peut également être identifiée et quand l'extinction augmente plus rapidement que le nombre de particules. La diffusion multiple est également la cause d'une diminution du degré de polarisation [1].

Chapitre II

Généralités sur les polymères

II.1 Introduction:

Les polymères appartiennent à une science qui a pris son essor dans les années 40, car pendant la guerre, il est apparu nécessaire de fabriquer certains matériaux qui manquaient alors.

Avant 1940, il y avait déjà eu des sursauts. Les premiers soubresauts de la chimie des polymères sont apparus dès les années 1900.

A cette époque, on distinguait les molécules organiques en deux catégories:

- Les cristalloïdes
- Les colloïdes

Les cristalloïdes sont des composés organiques cristallisables, de température de fusion et de masses molaires définies.

Les colloïdes sont des molécules visqueuses, ne cristallisant pas et ayant des températures de fusion mal définies. Lorsque l'on mesurait leur masse molaire, on la trouvait supérieure à 100 000 atomes. Cela renforçait l'idée que ces molécules étaient des agrégats. Les chimistes allemands appelaient cette chimie, la chimie des saletés (« Schmutzen Chemie »).

En 1925, Staudinger déclare que les colloïdes sont une association de plus de 100 000 atomes de carbones reliés entre eux par des liaisons covalentes. A l'époque, c'est une hérésie. (Théorie de la chimie moléculaire)

Au début des années 1950, Carothers et Flory admettent et montrent que des édifices covalents de masse molaire supérieure à 100 000 atomes existent.

C'est le fondement de la théorie des polymères.

Dès cette époque, on a établi la notion de polymères [19].

II.2 Définition :

Les polymères, appelés aussi matières plastiques ou simplement plastiques, sont des matériaux organiques composés essentiellement d'atomes de carbone et d'hydrogène [20].

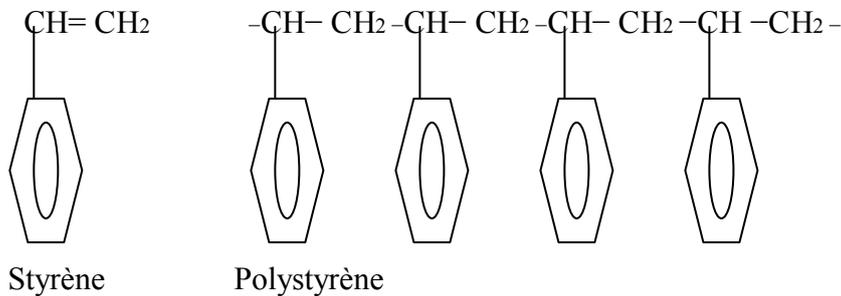
Ils sont constitués de molécules dont la taille est plus grande que celle de la majorité des espèces moléculaires. Ils existent dans la nature ou peuvent être synthétisés, ils sont aujourd'hui devenus incontournables dans de nombreuses applications à cause de :

- leur facilité de mise en œuvre pour obtenir des produits finis,
- leur faible coût,
- leur propriété thermique, mécanique, électrique,... [25].

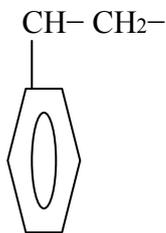
II.3 Structure d'un polymère :

II.3.1 Macromolécule 'et unité constitutive' (ou « mère ») :

Le mot polymère est dérivé du mot grec signifiant « plusieurs parties » (manyparts). Il est formé par la jonction de plusieurs petites unités chimiques connues sous le nom de monomères «parties uniques » (single parts) [21,22]. Exemple :



L'unité constitutive de ce polymère est constituée par le groupe d'atomes suivant:



Les polymères peuvent être d'origine biologique (par exemple, protéines, cellulose, ADN, et ARN), ou d'origine synthétique (par exemple, polyéthylène, polystyrène, nylon, et polyester).

II.3.2 Dimensions et masses des macromolécules :

La taille de la macromolécule d'un polymère est caractérisée soit par sa masse molaire M , soit par son degré de polymérisation [23].

❖ Masse molaire d'une macromolécule :

Dans la famille des polymères, les propriétés dépendent fortement de la taille des chaînes de macromolécule ; aussi il est essentiel de caractériser leurs dimensions.

On appelle masse molaire M d'un polymère, la masse d'une mole de polymère. Elle est exprimée en $Kg \cdot mol$ [23].

❖ Degré de polymérisation :

Le degré de polymérisation est le nombre « n » de molécule de monomère formant la macromolécule de polymère [24].

On appelle aligomère, une macromolécule dont le degré de polymérisation est petit (2 à 20 monomères).

On distingue les homopolymères (formés à partir d'un seul type de motif de répétition) et les copolymères (formés à partir de plusieurs types de motifs de répétition) [25].

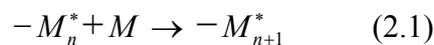
II.4 Synthèse des polymères :

On distingue habituellement deux grandes méthodes de synthèse des polymères :

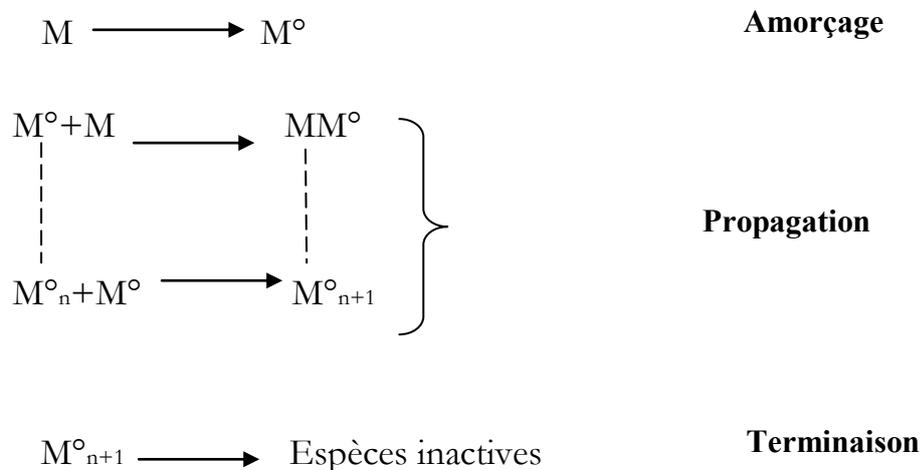
- La polymérisation en chaîne, pour produire par exemple le (Polyéthylène, le polystyrène, le polypropylène).
- La polycondensation (polymérisation par étapes, pour Produire par exemple le PET (Polyéthylène téréphtalate) [26,27]

II.4.1 Polymérisation en chaîne :

Une réaction de polymérisation en chaîne, est une réaction conduisant à la formation de polymères par additions successives de monomères sur une extrémité active de la chaîne macromoléculaire (centre actif noté *) [28]. On peut la schématiser par :



La « chaîne cinétique » commence par l'élaboration du centre actif qui constitue le site d'amorçage, capable d'attaquer une première molécule de monomère. L'ensemble de ces deux événements constitue la *réaction d'amorçage* proprement dite. La molécule formée reste porteuse d'un centre actif de même nature et est donc capable d'attaquer une nouvelle molécule de monomère, et ainsi de suite. La chaîne cinétique se poursuit donc par un grand nombre de réactions de cette nature, dites *réactions de propagations*. Elle se termine par la destruction du centre actif, dite *réaction de terminaison*. Ces différentes étapes sont schématisées ci-dessous :



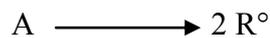
Le centre actif peut être un radical libre (Polymérisation radicalaire), un carbocation (Polymérisation cationique) ou un carboanion (Polymérisation anionique).

1- La polymérisation radicalaire :

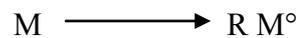
La polymérisation par voie radicalaire est une réaction qui, comme son nom l'indique, fait intervenir comme espèce réactive R^* appelée *radical libre*. Cette technique trouve son succès dans sa facilité de mise en oeuvre [29], la durée de réaction est très courte et la formation des polymères de hauts poids moléculaires est aussi rapide.

a) **L'amorçage** : nommée également *initiation*, elle comprend deux réactions successives :

- ❖ La génération de radicaux (dits primaires) à l'aide d'une substance dénommée amorceur A.



- ❖ L'addition du radical primaire sur une première unité monomère M pour former le premier maillon de la chaîne polymère en croissance.



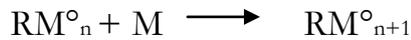
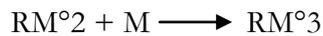
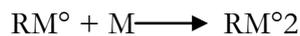
Cette étape apporte l'énergie nécessaire à l'activation d'un certain nombre de chaînes radicalaires. Elle est le plus souvent chimique, grâce à la décomposition thermique d'un amorceur. Elle peut aussi être photochimique et, dans ce cas, l'activation est provoquée par un rayonnement (UV Gamma, X).

- ❖ **L'amorçage chimique** est le plus souvent utilisé au niveau industriel. Son principe est que dans le milieu réactionnel, il existe des molécules capables de se composer thermiquement ou par des réactions chimiques en radicaux libres. Son avantage est la vitesse à laquelle les amorceurs se décomposent en radicaux et la possibilité de leur réaction avec les monomères [30].

- ❖ **L'amorçage thermique**, en général utilisé spécifiquement dans un certain intervalle de température, en fonction de la cinétique de décomposition des amorceurs thermiques.

- ❖ **L'amorçage photochimique** : L'activation photochimique est l'une des méthodes les plus efficaces pour créer des espèces réactives et amorcer ainsi des réactions chimiques pouvant conduire à la synthèse de nouveaux matériaux bien définis ; les échantillons sont exposés à un rayonnement lumineux : le plus souvent c'est le rayonnement UV, mais aussi par radiation γ ou par bombardement par un faisceau d'électrons (EB). Elle implique en général l'utilisation de photo amorceurs qui sont excités par le rayonnement et permettent la production de radicaux ou de carbonations, soit directement, soit indirectement par des processus de transfert d'énergie. Un des problèmes rencontrés et difficiles à résoudre est l'effet inhibiteur de l'oxygène sur les polymérisations radicalaires [30]

b) La propagation : La propagation se fait par additions successives de molécules de monomères sur la partie active de la chaîne croissante. Cette réaction se fait en une fraction de seconde et ramène à une géante molécule, avec un radical libre au bout de la chaîne. Un processus est maintenant indispensable qui va terminer la grande chaîne, la réaction de terminaison [31].



c) La terminaison : La réaction de terminaison consiste en la destruction du centre actif qui est localisé à l'extrémité de la chaîne en croissance et peut, en principe, se faire de différentes façons (chocs sur une paroi, réaction avec des impuretés, etc.). Cette réaction peut s'effectuer suivant deux mécanismes, couplage ou dismutation.

Dans le cas d'une polymérisation, cette réaction arrête la croissance des chaînes macromoléculaires ; les macromolécules sont ainsi terminées.

2-La polymérisation cationique:

La partie active est un carbocation, où un des atomes de carbone porte une charge positive, associée à un contre-ion chargé négativement.

Les monomères peuvent être :

- Des oléfines (isobutylène).
- Des éthers vinyliques $CH_2 = CHOR$.
- Des carbures insaturés (styrènes, indène, benzofurane).
- Des composés hétérocycliques (oxirane, tétrahydrofurane, cyclosiloxane).

Le groupe R doit être donneur d'électrons (isobutylène, éther vinylique) ou stabiliser le cation par résonance (styrène, indène)[32].

3-La polymérisation anionique :

La partie active est un carbanion (l'un des atomes de carbone porte une charge négative) ou un oxanion (la charge négative est portée par un atome d'oxygène) associé à un contre-ion Me^+ , chargé positivement et souvent métallique.

La polymérisation peut se faire par ouverture d'une double liaison (styrène, diènes, acrylonitrile, vinylpyridine) ou d'un cycle (oxirane, lactone, lactame....) [33].

II.4.2 Polycondensation :

Dans ce type de polymérisation, les macromolécules résultent de réactions successives entre les fonctions antagonistes portées par des molécules plurifonctionnelles (fonctionnalité ≥ 2). La réaction se produit dans les conditions où réagissent habituellement les fonctions organiques consternées, par simple chauffage ou en présence d'un catalyseur convenable. Les condensations qui, généralement, éliminent à chaque étape un tiers constituant, comme l'eau, un alcool ou un hydracide, interviennent au départ entre molécules monomères puis, au fur et à mesure de l'avancement de la réaction, entre les molécules polymères formées, pour conduire (théoriquement) au stade ultime de l'unique macromolécule[28].

Trois types de réaction de polycondensation sont distingués :

- ❖ Réactions qui se font avec élimination du produit de condensation.
- ❖ Réactions sans formation de produit secondaire de réaction.
- ❖ Polymérisation par recombinaison des radicaux.

II.5 Classification des polymères :

On peut classer les matériaux polymères suivant différents critères. Le point de vue thermique conduit au classement des matériaux polymères organiques en matériaux thermoplastiques et matériaux thermodurcissables. Le point de vue mécanique introduit les notions de solides viscoélastiques et d'élastomères. On peut aussi examiner le matériau en s'intéressant à sa structure physique ou à sa structure chimique : dans le premier cas, les notions de matériau semi cristallin et de matériau amorphe sont introduites ; dans le second, c'est la structure moléculaire en chaîne d'atome qui est à prendre en considération [34].

1-Selon leur origine: on peut les classer en trois catégories [35]:

- ❖ **Les polymères naturels :** Sont issus des règnes végétal ou animal ; les exemples les plus connus, la famille des polysaccharides (cellulose, amidon...) celle des protéines (laine, soie...), le caoutchouc naturel, etc.
- ❖ **Les polymères artificiels :** Sont obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés, les esters cellulosiques ont toujours connus une certaine importance économique.
- ❖ **Les polymères synthétiques :** Totalement issus du génie de l'homme, sont obtenus par polymérisation de molécules monomères.

2- Selon leur structure macromoléculaire :

La structure d'une macromolécule, du point de vue nature chimique et de point de vue conformation spatiale, a un rapport essentiel avec les propriétés finales attendues pour l'utilisation du matériau (pur ou composite) élaboré à partir de cette macromolécule. L'arrangement moléculaire a un rôle fondamental dans la structure des macromolécules. Une chaîne de polymère représentée simplement en termes de perles liées ensemble (molécules ou monomères), peut avoir plusieurs types de structures [36].

❖ **Polymères à molécules linéaires :**

En générale, ils sont formés de molécules dites linéaires dont le squelette principal de la chaîne est constitué par des atomes de carbone ou par d'autres groupes d'atomes. La molécule linéaire peut être flexible et souple [21].



Figure II .1 : Polymère à molécule linéaire

❖ Polymère à molécule ramifiée :

Le squelette d'une molécule linéaire peut comporter des branches latérales, c'est-à-dire d'autres molécules identiques branchées latéralement sur le squelette de la chaîne principale. Dans ce cas, la macromolécule ramifiée comporte plusieurs extrémités (>2) [21].



Figure II.2 : Polymère à molécule ramifiée

❖ Polymère à molécule réticulée :

On peut construire un réseau tridimensionnel de macromolécules en les reliant chimiquement entre elles. La jonction ou « pontage » entre chaînes principales peut se faire :

- soit par un ou quelques atomes : S, O, C....., c'est le pontage chimique,
- soit par des brins de chaînes plus ou moins longs.

Le point de jonction entre deux chaînes est appelé le nœud de réticulation [21].



Figure II.3 : Polymère à molécule réticulée

3-Selon leur comportement thermomécanique:

On distingue ainsi trois grandes classes de polymères :

❖ Les thermoplastiques :

Les thermoplastiques sont constitués de macromolécules linéaires ou ramifiées, liées entre elles par des liaisons physiques. Ces matières sont solides à température ambiante. Elles se ramollissent à la chaleur jusqu'à un état plastique dans lequel elles se laissent plus facilement se déformer. Ce processus est réversible, c'est-à-dire que les thermoplastiques se rigidifient de nouveau au refroidissement. Selon la régularité de leur chaîne, ces polymères peuvent se cristalliser (thermoplastiques semi-cristallins) ou non (thermoplastiques amorphes) [37].

Ce qui caractérise un matériau thermoplastique est la possibilité, après avoir subi un état thermomécanique, d'être ramené par des moyens physiques à l'état initial [34].

❖ **Les thermodurcissables :**

Les matières thermodurcissables diffèrent nettement des matières thermoplastiques, non seulement du point de vue de la structure chimique, mais aussi des technologies de mise en forme requises. Les principaux représentants de la famille des thermodurcissables sont les polyesters insaturés (UP), les époxydes (EP), les phénoplastes (phénol-formaldéhyde PF, notamment), les aminoplastes, les acrylates et les silicones (SI). Ces matières trouvent des applications, en particulier après renforcement par des fibres, pour l'élaboration d'équipements industriels et sportifs, mais aussi dans la construction aéronautique et d'engins spatiaux.

Les thermodurcissables sont stables même à des températures relativement élevées et présentent en général une bonne tenue vis-à-vis des milieux agressifs. Ils ne peuvent jamais revenir à l'état initial quand leur température a été augmentée [37].

❖ **Les élastomères :**

Les polymères de la 3^{ème} famille, celle des élastomères, se distinguent par les faibles valeurs des forces d'attraction entre les chaînes et de leurs modules élastiques (à température ambiante) et par leur capacité élevée de déformation (quelques centaines de pour cent).

Les élastomères sont des composés macromoléculaires dont les propriétés sont étroitement liées à leur nature chimique et au caractère aléatoire de la distribution des chaînes moléculaires. Le caoutchouc naturel et les caoutchoucs synthétiques appartiennent à cette famille [38].

4-Selon leurs microstructures :

Il existe trois grandes catégories de polymères : les polymères cristallins, semi cristallins et amorphes

❖ **les polymères cristallins :**

L'état cristallin est caractérisé par l'existence d'un ordre à grande distance. Les chaînes ayant adopté une conformation régulière en zig-zag plan ou en hélice, s'empaquettent de façon ordonnée et compacte. On connaît une grande diversité de formes cristallines mais la plus répandue est la lamelle. L'épaisseur de la lamelle, c'est-à-dire la longueur du segment de chaîne entre deux replis successifs, est typiquement de quelques dizaines de motifs monomères (environ 10 nm)[3]. Les polymères cristallisent lorsqu'ils ont une structure régulière (arrangements réguliers des chaînes macromoléculaires) en une température de fusion T_f fixe. Cette caractéristique met en évidence un état cristallisé. Les chaînes de polymère exercent entre elles des forces attractives qui assurent la stabilité de l'édifice cristallin [25].

Comme il réside souvent des irrégularités (des ramifications par exemple), le polymère ne cristallise que partiellement. On dit alors de lui qu'il est semi cristallin.

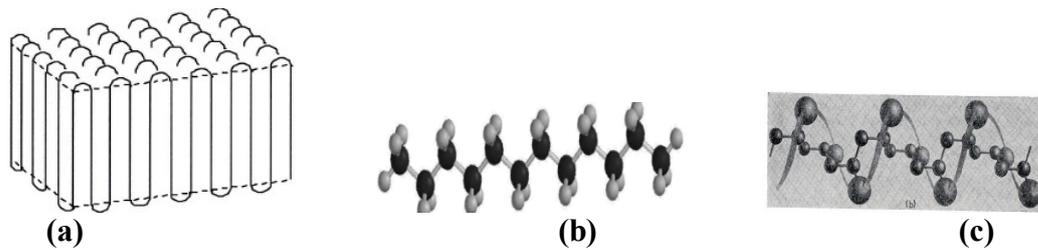


Figure II.4 : Différentes formes cristallines : a) lamelle ; b) : zig zag ; c) : hélice.

❖ les polymères amorphes :

L'état amorphe des matériaux polymères est caractérisé par l'absence d'ordre à grande distance. Il n'y a pas de distance constante entre les macromolécules et aucune régularité dans l'arrangement et l'orientation, et ceci en raison de la structure et de la disposition aléatoire des chaînes individuelles [37].

Les spécialistes des polymères ont souvent comparé les chaînes des polymères amorphes à un plat de spaghettis cuits, avec cependant une longueur de chaîne très supérieure à la longueur du spaghetti par rapport à son diamètre [25].

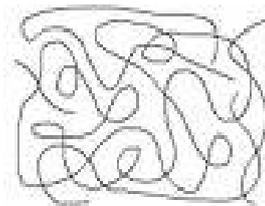


Figure II.5 : Schéma de la structure d'un polymère amorphe.

En fait les polymères amorphes sont constitués de chaînes macromoléculaires enchevêtrées pouvant comporter plusieurs centaines de milliers d'unités de répétition. Lors du refroidissement consécutif à la polymérisation, le matériau reste à l'état de liquide surfondu jusqu'à une température qui dépend de la cinétique de refroidissement appelée température de transition vitreuse T_g . La température de transition vitreuse correspond au passage d'un polymère de l'état vitreux à l'état caoutchoutique. Cette transition vitreuse ne se produit que dans les polymères amorphes) [38].

En dessous de T_g , la forte viscosité ne permet pas les réarrangements de la matière que nécessiterait l'établissement de l'équilibre thermodynamique.

On distingue donc deux domaines de comportement : vitreux (hors équilibre) en dessous de T_g et caoutchoutique (équilibre métastable) au dessus.

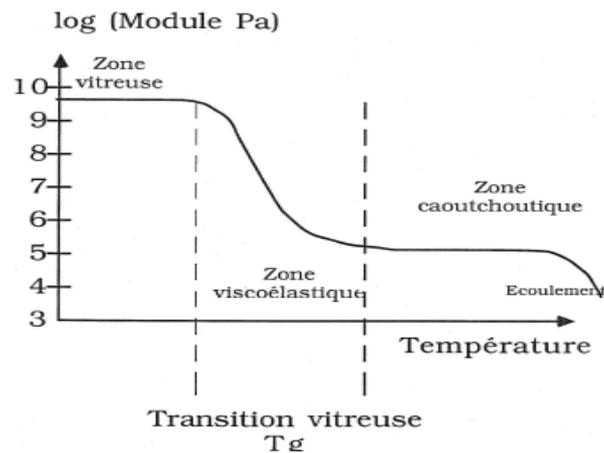


Figure II.6 : Schémas du comportement d'un polymère amorphe en fonction de T_g

❖ **les polymères semi cristallins :**

Dans un polymère semi-cristallin on rencontre des variables de domaine cristallisés et de domaine amorphes. La fraction cristalline est contenue dans les lamelles alors que la fraction amorphe elle est en dehors des lamelles [25].

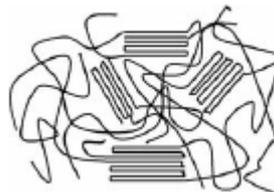
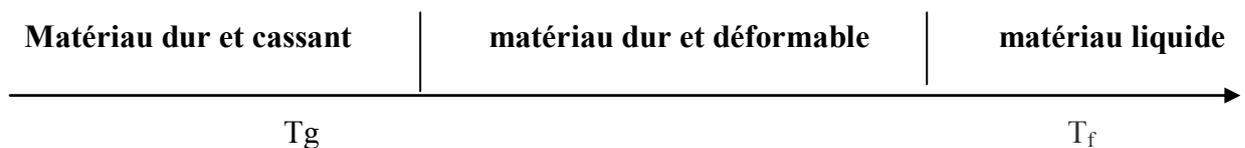


Figure II.7: Schéma d'un polymère semi-cristallin.

Un polymère semi-cristallin possède deux températures caractéristiques [25] :

- La température de transition vitreuse T_g correspondant à la mise en mouvement des zones amorphes ;
- La température de fusion T_f des zones cristallines.

Les caractéristiques mécaniques d'un polymère semi-cristallin sont essentiellement déterminées par la température d'utilisation par rapport à T_g et T_f



La mise en forme d'un polymère semi-cristallin ne peut se faire qu'à une température supérieure à sa température de fusion.

II.6 Propriétés des polymères :

II.6.1 Propriétés mécaniques :

Le succès des polymères provient en partie de la facilité avec laquelle on peut leur donner des formes voulues (d'autant plus à l'état fondu). Ils sont très malléables, très plastiques, d'où leur nom. En fait, cette plasticité varie dans une large gamme, des plus rigides, durs et cassants, aux plus mous (pâtes) ou élastiques (élastomères) [37].

Les propriétés mécaniques des polymères peuvent être mesurées en traction, en compression, en flexion ou en torsion. Dans tous les cas, la réponse mécanique du polymère dépend de la température et des conditions de contrainte auxquelles il est soumis.

Les essais de traction permettent de déterminer qualitativement si un matériau est fragile ou ductile, rigide ou souple. Ils permettent aussi de quantifier certaines propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité, la résistance maximale ou la contrainte et l'allongement à la rupture en traction. [38]

II.6.1.1 Les différents types de comportements mécaniques :

Il y a principalement deux types de déformation : la déformation élastique et la déformation visqueuse (ou plastique). La déformation élastique se caractérise par la linéarité entre la force nécessaire à l'élongation et le taux d'élongation, les déformations étant réversibles. La déformation plastique (ou visqueuse) se caractérise par une déformation résiduelle permanente après le relâchement des contraintes ayant provoqué ces déformations ; il s'agit donc d'une déformation irréversible.

Dans le cas des polymères, ces deux types de déformation se superposent, c'est pourquoi on parle de matériaux viscoélastiques.

Les comportements mécaniques des matériaux peuvent être classés dans deux catégories principales, le comportement fragile et le comportement ductile. Un matériau est considéré fragile lorsqu'il se casse dans son domaine élastique, c'est-à-dire sans subir de déformation plastique avant la rupture. Un matériau est considéré ductile lorsqu'il peut subir de grandes déformations plastiques avant la rupture [38].

II.6.1.2 Facteurs ayant une influence sur les propriétés mécaniques des polymères :

- La cristallinité (ou taux de cristallinité) correspond au pourcentage en poids de phase cristalline dans le matériau.
- La température de transition vitreuse (T_g) correspond à la température à laquelle le polymère passe de l'état vitreux à l'état caoutchoutique.
- Le taux de réticulation correspond à la densité de liaisons pontales entre les chaînes [38].

Les propriétés mécaniques décrivent leur comportement vis à vis des sollicitations mécaniques telles que pressions, étirements, torsions, frottements, chocs et effets de la pesanteur. Autrement dit est-ce que la structure et la forme du polymère sont stables dans le temps, même s'il est un peu bousculé. Certains polymères seront appréciés pour leur bonne stabilité

dimensionnelle (par exemple les polyesters aromatiques). D'autres, les élastomères, seront recherchés pour leur élasticité qui leur confère une excellente capacité d'absorption des chocs. On les emploie dans les pneus, les semelles de chaussures, les matelas, les fibres textiles élasthanne(polyuréthane)[39].

II.6.2 Propriétés électrique et électro- optique :

Le comportement électrique d'un matériau caractérise sa réponse à l'application d'un champ électrique statique ou alternatif.

Les matériaux polymères sont généralement non conducteurs de l'électricité et de nombreuses applications électroniques ou électrotechniques reposent sur cette propriété.

Cette qualité d'isolation de la plupart des polymères a été exploitée depuis de nombreuses années ; conjointement à leur bonnes propriétés mécaniques (flexibilité et ténacité) ainsi qu'à leur facilité de mise en œuvre par exemple pour la réalisation de câble basse ou haute tension et haute fréquence, de connecteurs, de condensateurs à haute performance en films minces, de substrat, de circuits intégrés etc.

Plus récemment des applications dans le domaine de l'électronique, de la communication ou de l'énergie ont été développées suite à la mise en évidence de propriétés électro-optiques spécifiques des polymères tels que conduction électroluminescence, piézo-électrique, photovoltaïque etc.[40]

Par exemple certaines molécules de polymères, rigides et allongées, sont susceptibles de s'orienter sous l'effet d'un champ électrique. Cet effet est utilisé dans des dispositifs d'affichage comportant des polymères de structure cristal liquide.

Lorsque le champ n'est pas appliqué, les molécules sont en désordre local, le matériau est opaque et d'apparence laiteuse. Lorsque le champ est appliqué, les molécules s'orientent dans la même direction et laissent passer la lumière. Le matériau devient transparent [39].

II.6.3 Propriétés optiques :

On peut englober les propriétés optiques d'un matériau polymère dans sa transparence (par exemple : étuis de CD, bouteilles d'eau), sa translucidité, son opacité et sa coloration [39].

Certains polymères possèdent des propriétés optiques fort intéressantes. Pour qu'ils puissent transmettre la lumière, ces polymères doivent être amorphes, car toute zone cristallisée joue le rôle d'un centre de diffusion (le coefficient de transmission lumineuse diminue donc fortement dès qu'une certaine cristallisation apparaît) [41].

Les principaux phénomènes responsables de ces propriétés sont :

a- L'absorption :

Elle correspond à une perte d'énergie lumineuse lors de la propagation du rayonnement dans le matériau polymère.

Il y a absorption des photons par divers mécanismes dus à l'interaction « rayonnement –matière solide » : par exemple l'énergie lumineuse est absorbée sous forme d'agitation thermique ou d'excitation de niveaux énergétiques (électron ou atome).

Pour une couche de matière d'épaisseur de , le flux de photon incident ou le flux lumineux I_0 diminue de dI et devient $I_0 + dI$ (avec dI négatif) soit [42]:

$$dI = -I_0 k de \quad (2.2)$$

$$\frac{I}{I_0} = \exp - ke \quad (2.3)$$

Cette expression est la loi de Norton - Beer et permet de définir le coefficient d'absorption lumineuse k appelé aussi le coefficient d'atténuation qui exprime la diminution de l'intensité lumineuse.

b- La diffusion de la lumière :

La diffusion de la lumière est liée à l'indice de réfraction n du polymère qui dépend de sa densité selon l'équation suivante :

$$n = \frac{1 + 2R \rho / M}{1 - R \rho / M} \quad (2.4)$$

M : masse molaire de l'unité constitutive de la macromolécule.

ρ : Masse spécifique du polymère.

R : Réfraction molaire.

S'il existe dans ce polymère des variations de densité, il en résulte une variation d'indice, donc une déviation du rayon lumineux et par suite une perte des qualités optiques. La propagation de ce rayon est perturbée par les inhomogénéités dont les dimensions sont égales ou supérieures à la longueur d'onde du rayonnement incident. A l'échelle inférieure, il ne se passe aucune déviation. Si ces inhomogénéités sont très grandes alors le rayon peut être réfracté et partiellement réfléchi.

La diffusion est un phénomène de redistribution de la lumière au sien du polymère. Il est à l'origine du phénomène de translucidité (un matériau translucide laisse également passer les rayons lumineux mais il diffuse la plupart de ces rayons, on peut voir à travers l'objet mais on ne peut rien distinguer parfaitement). Il n'y a pas de perte d'énergie lumineuse du rayon lumineux au cours de sa propagation comme dans l'absorption, par contre la diffusion abaisse la transparence du polymère. Celui-ci peut apparaître moins lumineux [42].

II.6.4 Propriétés de protection physique et chimique :

Ces propriétés englobent des caractéristiques diverses : imperméabilité aux liquides et aux gaz, résistance chimique aux solvants, résistance aux rayons ultraviolets. Les polymères sont employés pour la fabrication d'imperméables, d'emballages, de boîtes de conservation, de flacons pour les laboratoires, de citernes, de gaines de câbles, pour l'enduction de tissus, etc...[39]

Chapitre III

Partie expérimentale

III.1 Objectif du travail

L'objectif de notre travail consiste à étudier la diffusion de la lumière à travers des échantillons en polymère. Les paramètres variables sont :

- Les conditions de préparation des échantillons,
- L'angle de diffusion,
- l'état de polarisation,
- La longueur d'onde.

Pour cela, on a divisé ce chapitre en deux parties :

- Une première partie sera consacrée à la préparation des échantillons,
- Une deuxième partie étudiera la diffusion de la lumière.

III.2 Préparation des échantillons :

Les échantillons sont préparés au niveau du laboratoire de polymères de l'institut de chimie.

III.2.1 Polymère utilisé :

Le polymère utilisé est le « polycarbonate » qui est un matériau remarquable par sa capacité d'absorber beaucoup d'énergie sans se rompre.

Sa transparence exceptionnelle en fait un matériau de choix pour remplacer le verre et concurrencer le plexi. C'est pourquoi on l'utilise comme vitrage de sécurité. La plus grande utilisation du polycarbonate se trouve particulièrement dans l'industrie du disque compact.

Il offre une qualité optique tout à fait comparable à celle des autres matériaux organiques.

Le polycarbonate ou (PC) est commercialisé

- Soit sous forme de granulés.
- Soit sous forme de demi-produit [49].

III.2.2 Quelques propriétés essentielles du polycarbonate :

Transition vitreuse : 145°C
Résistance à la traction : 60 MPa
Allongement à la rupture : 6 %
Rigidité (module) : 2.5 GPa

Du point de vu chimique le polycarbonate présente des avantages qui le rendent particulièrement intéressant pour l'optique ophtalmique par :

Son excellente résistance aux chocs

Son indice de réfraction élevé ($n=1.591$).

Sa grande légèreté (densité = 1.20).

Sa protection efficace contre les UV (coupure UV à 385 nm).

Sa grande résistance à la chaleur (point de ramollissement supérieur à 140°C) [49].

Dans ce travail on a partagé les échantillons utilisés en deux catégories :

- Les échantillons épais.
- Les échantillons films (minces).

III.3 les échantillons épais :

III.3.1 conditions de préparation :

Le polycarbonate utilisé est sous forme de granulés. Il à été mis dans l'étuve pendant 48 heures afin de dégager les gaz contenus.



Figure 3.1: Vue globale du polycarbonate granulé utilisé.

III.3.2 Moyens utilisés :

Les moyens utilisés sont :

1-le moule : c'est un moule en acier de forme carré constitué d'orifices et disposé sur une plaque en acier recouverte de papier aluminium. La matière (le polycarbonate) est déposée au niveau des orifices. Après ce dépôt une seconde plaque en acier recouvre le moule pour être déposée au niveau de la presse hydraulique automatique (chauffante).

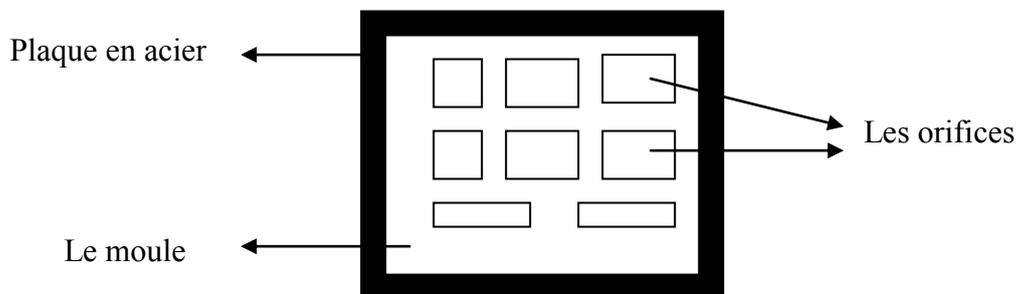


Figure 3.2: Représentation du moule

2-la presse hydraulique automatique (chauffante) :

Elle est composée de deux plateaux chauffants (inférieure et supérieure) de grande surface, solide et durables. Le plateau supérieur est fixe, quant au plateau inférieur il est mobile. Ils viennent se coller entre eux afin d'appliquer une chaleur également répartie sur toute la surface du moule.

L'activation de cette presse se fait automatiquement.

Lorsque le moule est installé dans la presse, il subit trois phases.

-Le préchauffage : consistant à obtenir une température fixe sur toute la surface de l'échantillon pour qu'il fonde intégralement.

-le dégazage : permettant de dégager le vide contenu dans le polymère.

-la pression : consistant d'obtenir des caractéristiques de planéité et d'état de surface des échantillons en même temps qu'une saine matière (absence de porosités ou de vide)

Le réglage de la presse s'est opéré de la manière suivante :

-Réglage de la température à 260°C (qui est la température de fusion du polycarbonate)

-Maintien de la pression à 150 Pa.

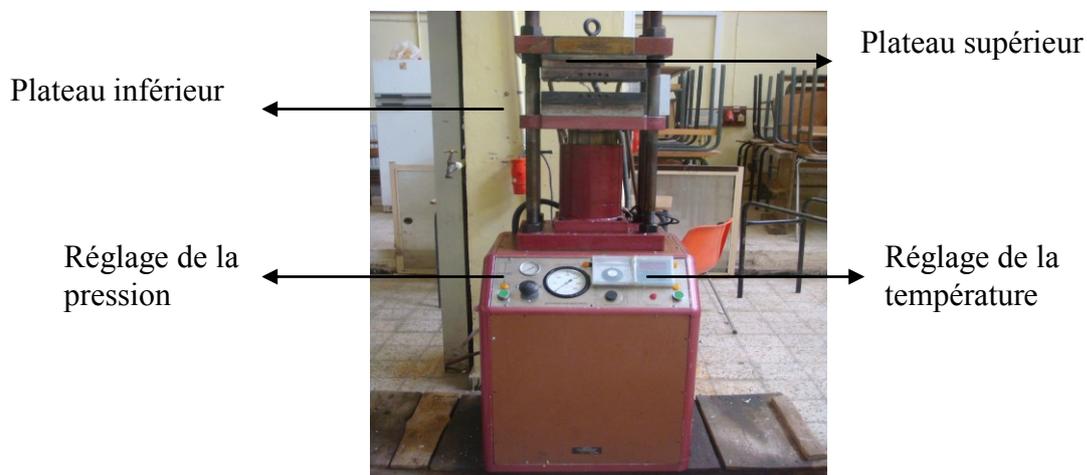


Figure 3.3 : la presse hydraulique automatique

Après retrait du moule de la presse, nous avons effectué un refroidissement brusque par eau. Après cela nous avons retiré les échantillons contenus dans les orifices du moule.

Nous avons renouvelé cette opération à trois reprises en faisant varier le temps de préchauffage et celui de la pression.

✚ Echantillons 1 épais :

- temps de préchauffage : 8min
- temps de pression : 10min.

✚ Echantillons 2 épais :

- temps de préchauffage : 12min
- temps de pression : 15min

✚ Echantillons 3 épais :

- temps de préchauffage : 15min
- temps de pression : 20min



Figure 3.4: Vue globale d'un échantillon épais.

III.4 les échantillons films (minces) :

Ils sont composés de polycarbonate de formes granulées, dopés de différents pourcentages de dioxyde de titane.

Le TiO_2 que nous avons utilisé est de forme rutile.



Figure 3.5 : Dioxyde de Titane rutile.

III.4.1 Moyens utilisés :

Les moyens utilisés sont :

1-La balance numérique : Afin de peser les différentes quantités de polycarbonate et de TiO_2 .



Figure 3.6: La balance

C'est une balance de capacités de pesée de 400 g. Elle possède un plateau de pesée de diamètre 120 mm. Elle est idéale pour les pesées simples, des tâches de laboratoires aux applications de contrôles de procédé ou administratives. Avec seulement 2 touches de fonction, elle est très simple à utiliser.

2-L'extrudeuse : Il s'agit d'un équipement qui permet la transformation des matériaux par extrusion

Elle est composée de :

- Trémie d'alimentation : endroit qui assure l'entrée du produit à transformer.
- Une vis sans fin ou vis d'Archimède.
- Fourreau : corps principal de l'extrudeuse dans lequel tourne la vis sans fin.
- Filière : extrémité de l'extrudeuse qui donne la forme finale au produit.
- Système de chauffage et de refroidissement car le fourreau doit être régulé en température.
- Un groupe d'entraînement : composé d'un moteur réducteur et d'un diviseur de couple, qui fournissent la puissance mécanique nécessaire à la rotation des vis.

Une extrudeuse assure simultanément plusieurs fonctions dont :

- le pompage de la matière,
- le malaxage,
- le forçage du matériau à travers la filière.

Ces 3 fonctions sont obtenues par la vis sans fin dont le pas et le diamètre varient afin de comprimer le matériau lors de son avance.



Figure 3.7 : L'extrudeuse

Les différentes quantités de polycarbonate sous forme de granulés et le TiO_2 arrivent à l'entrée de l'extrudeuse.

Ils sont versés dans la trémie pour alimenter la vis de l'extrudeuse.

Dans l'extrudeuse la matière est chauffée et ramollie grâce à la vis sans fin qui se trouve dans le fourreau pour rendre la matière malléable, la vis entraîne la matière vers la sortie.

La tête de sortie de l'extrudeuse donne sa forme à ce qui en sort. La matière sort en continu, elle est refroidie pour être coupée à la longueur voulue (granulés).

3-Le broyeur : il s'agit d'une machine étudiée pour broyer tout type de déchet, comme par exemple les matières plastiques .Le broyage réduit le volume des déchets
Ainsi, la matière obtenue après extrusion est broyée en très petits morceaux.



Figure 3.8 : Le broyeur

4- Le moule : il s'agit de deux petites plaques en acier recouvertes de papier aluminium.
Une petite quantité de la matière obtenue après broyage est déposée à l'intérieur des deux plaques pour être ensuite déposée au niveau de la presse manuelle.

5-La presse manuelle : elle est identique à la presse hydraulique automatique sur le plan de la conception, toutefois le réglage est fait manuellement.

On a procédé à quatre essais pour obtenir les échantillons à l'état final.

Tous les échantillons sont élaborés dans les mêmes conditions de travail :

- température de fusion :..... 250 C°
- temps de préchauffage :..... 9 min
- temps de pression :..... 9 min
- Refroidissement brusque (trempage dans de l'eau)

✚ Echantillon 1 films (mince) :

Composition chimique : polycarbonate pure

✚ Echantillon 2 films (mince) :

Composition chimique : polycarbonate + TiO_2
(150g de polycarbonate contenant 0,15 gr de TiO_2)

✚ Echantillon 3 films (mince):

Composition chimique : polycarbonate + TiO_2
(150g de polycarbonate contenant 0,3 gr de TiO_2)

✚ Echantillon 4 films (mince) :

Composition chimique : polycarbonate + TiO_2
(150g de polycarbonate contenant 0,5gr de TiO_2)



Figure 3.9: Vue globale d'un échantillon films (mince).

III.5 Analyse microscopique :

1- Observation microscopique de la poudre de TiO_2 :

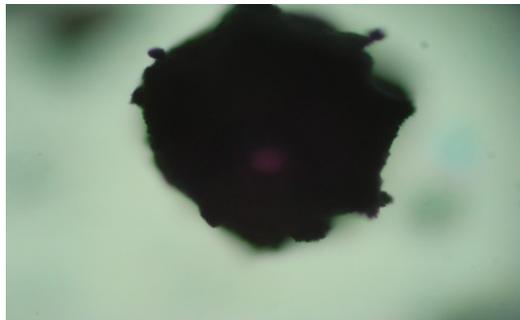
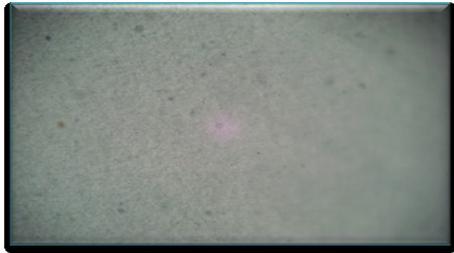


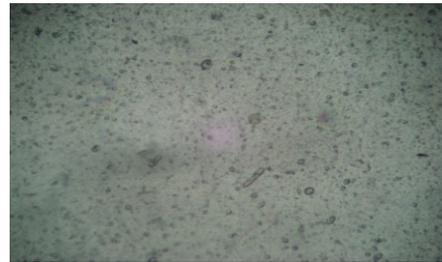
Figure 3.10: Vue détaillée(X400) d'un agrégat de particule de la poudre de TiO_2

2- Observation des échantillons :

a- Pour les échantillons films minces :



Échantillon 1



Échantillon 2



Échantillon 3



Échantillon 3

Figure 3.11: Vue détaillée(X400) des échantillons films minces

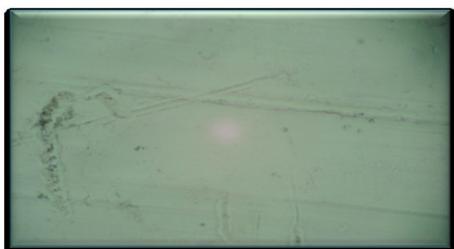
b- Pour les échantillons épais :



Échantillon 1



Échantillon 2



Échantillon 3

Figure 3.12: Vue détaillée(X400) les échantillons épais

III.6 l'étude de la diffusion :

III.6.1 Mesure N° 1:

Pour effectuer les mesures de l'intensité lumineuse transmise en fonction de l'angle de diffusion, on a utilisé le montage expérimental présenté sur la figure suivante :

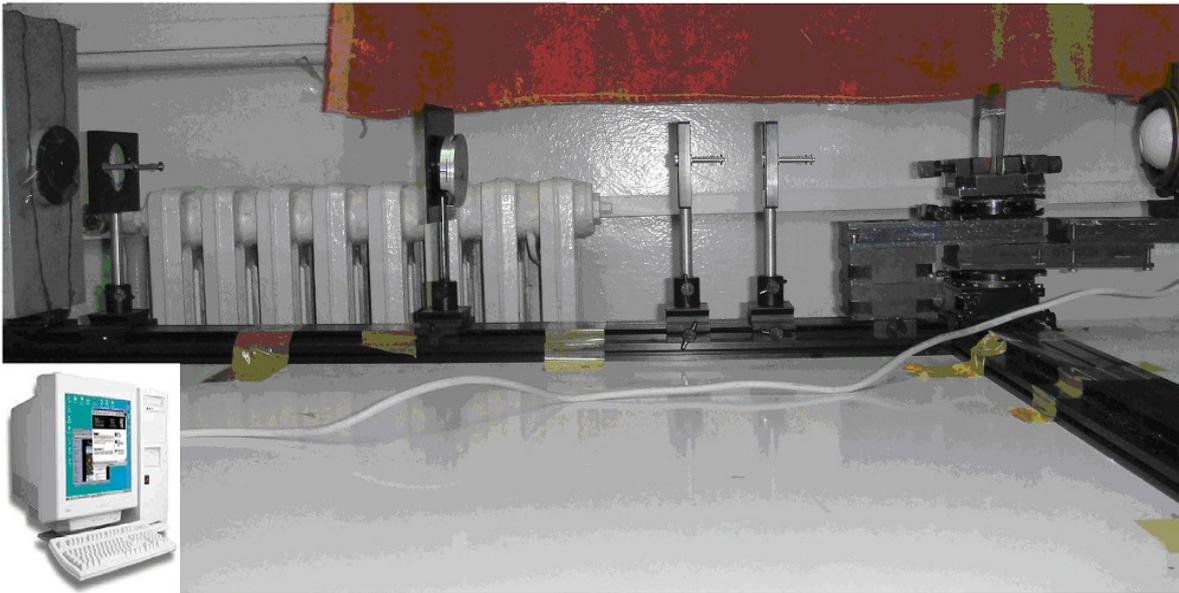


Figure3.13 : Montage expérimental.

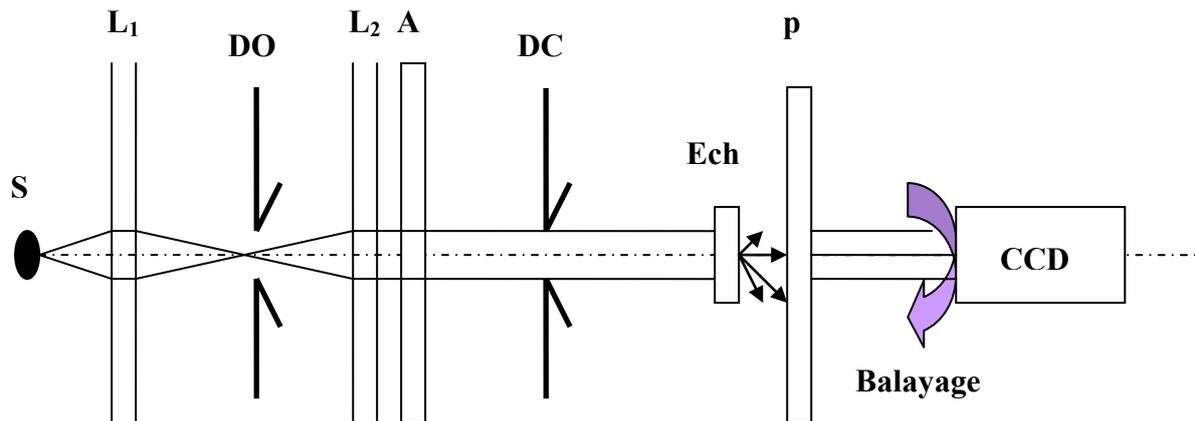


Figure3.14 : Schéma du montage expérimental.

Ce montage se compose de :

S: Source de lumière blanche à xénon.

L₁: lentille de focale $f=100\text{mm}$.

DO: Diaphragme d'ouverture.

A: Atténuateur.

L₂: Lentille de focale $f= 100\text{mm}$.

P : Polariseur.

EC : Échantillon

CCD : Camera CCD.

DC: Diaphragme de champ

La procédure expérimentale se déroule de la manière suivante :

La source de la lumière blanche émet des rayons qui tombent sur la lentille (L1) pour les focaliser sur la fente fixe du diaphragme d'ouverture (DO). Les rayons sortant de la fente tombent sur l'atténuateur (A) pour diminuer l'intensité de ces derniers. Ensuite ils seront dirigés vers la lentille (L2) afin qu'ils sortent focalisés et parallèles.

Le faisceau parallèle traverse la fente fixe du diaphragme de champ (DC). Ensuite il se dirige vers le polariseur pour qu'il permette d'avoir les deux polarisations p et s par rapport au plan d'incidence, finalement il tombe sur l'échantillon. Ce dernier se trouve au centre de rotation du goniomètre sur lequel est fixé un petit bras. Sur ce bras et à une distance fixe on place une caméra CCD.

On capte les images de la lumière transmise par l'échantillon en faisant varier l'angle entre la position du bras et le faisceau incident dans un intervalle allant de 0° à 90° avec un pas de 5° .

La camera CCD est reliée à un micro-ordinateur.

L'image captée est enregistrée et sauvegardée sous le logiciel « Image Toul », ensuite elle est transformée au niveau du gris en utilisant les fonctions : «color-to-grayscale» puis«processing».

Ci-dessous nous avons reproduit des images captées pour quelques angles de diffusion

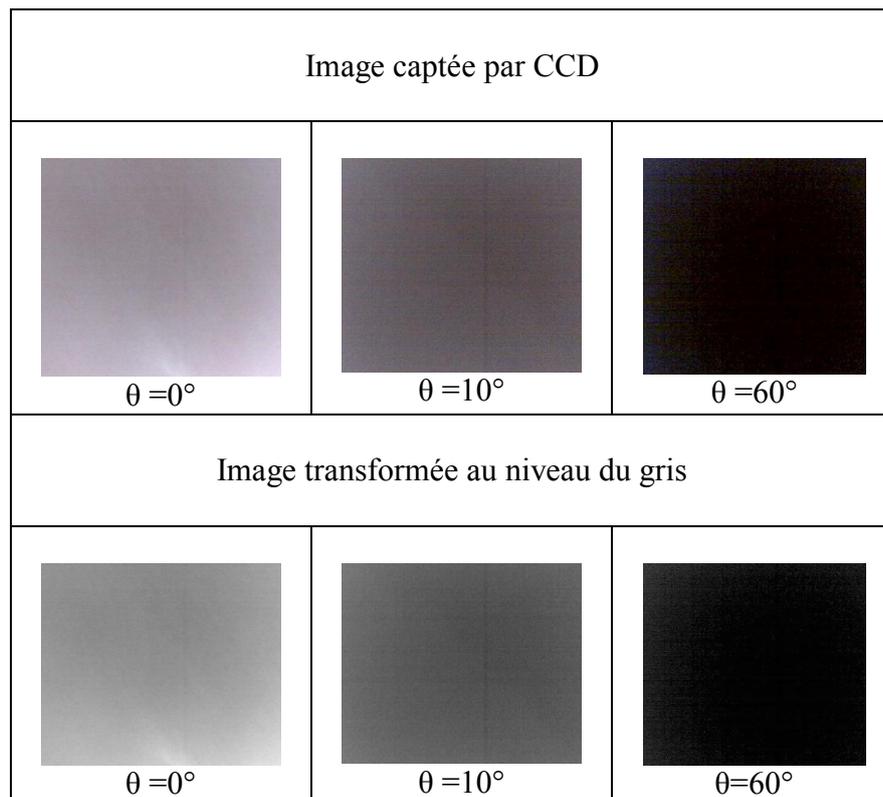


Tableau 3.1 : Images captées par CCD et transformées au niveau du gris.
(Échantillon 2 films minces)

On mesure l'intensité transmise correspondant à chaque angle de diffusion pour les différents échantillons à l'aide d'un programme adapté au modèle considéré.

Après avoir obtenu les intensités transmises correspondant à chaque angle, on cherche l'intensité maximale pour la diviser sur les intensités obtenues. On trace les courbes de diffusion à l'aide du logiciel de type « Origine ». Pour pouvoir mieux interpréter les résultats obtenus on applique le lissage des courbes avec le même logiciel on utilise les fonctions 'Analysis' puis 'Fit Polynomial'.

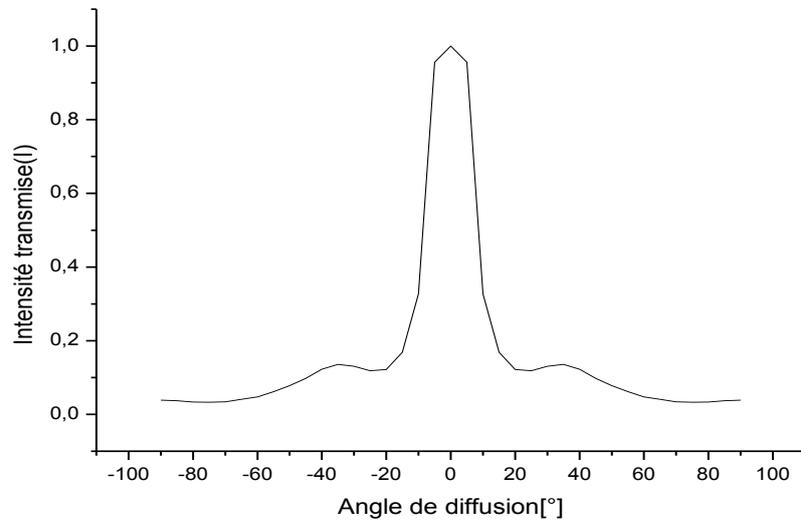
Les intensités ont été mesurées dans un intervalle de 0° à 90° . Par contre les courbes ont été tracées dans un intervalle allant de 0° à 180°

Les courbes obtenues (courbes de la variation de l'intensité transmise en fonction de l'angle de diffusion avec leurs lissages) sont représentées dans les pages qui suivent.

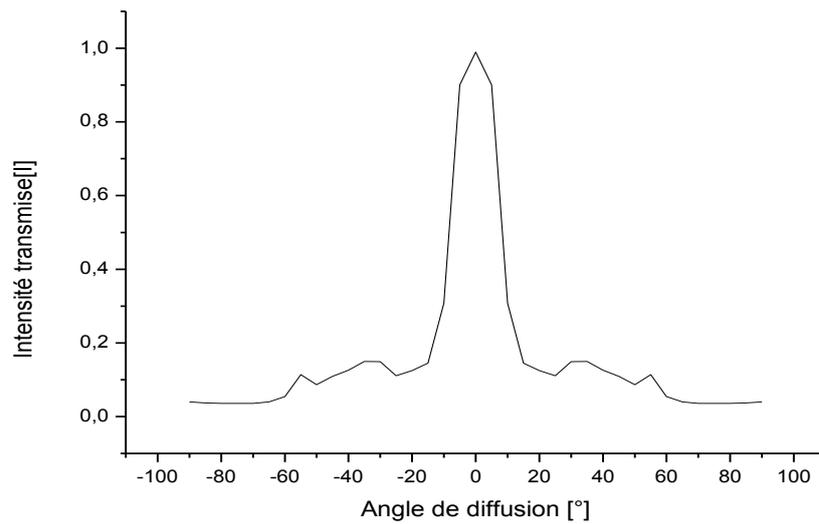
III.6.1.1 Résultat de mesure N° 1 :

A. Pour les échantillons films (minces) :

❖ Échantillon 1 :



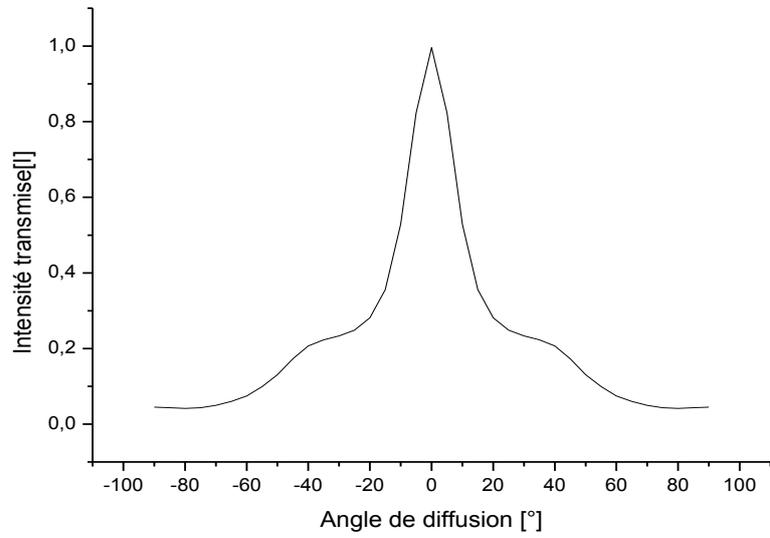
-a-



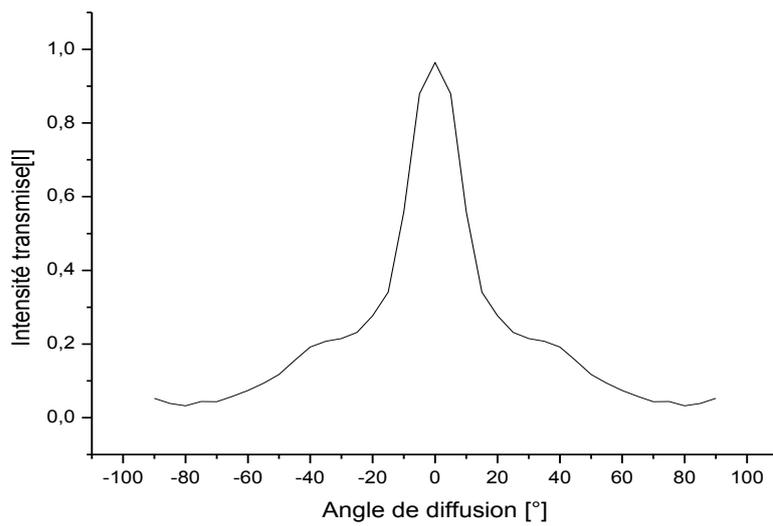
-b-

Figure 3.15 : Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

❖ **Echantillon 2 :**



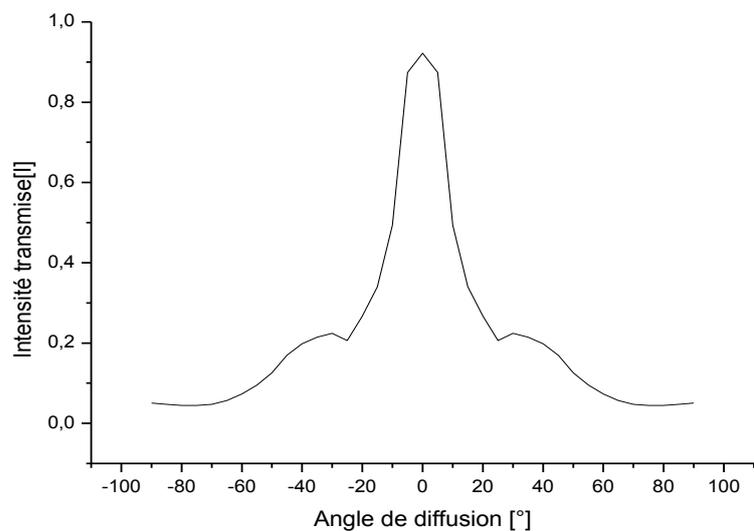
-a-



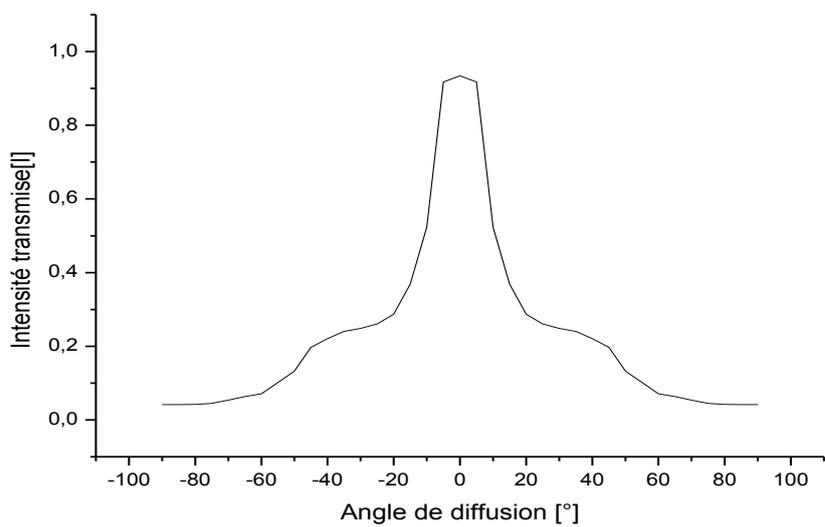
-b-

Figure 3.16 : Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

❖ Echantillon 3 :



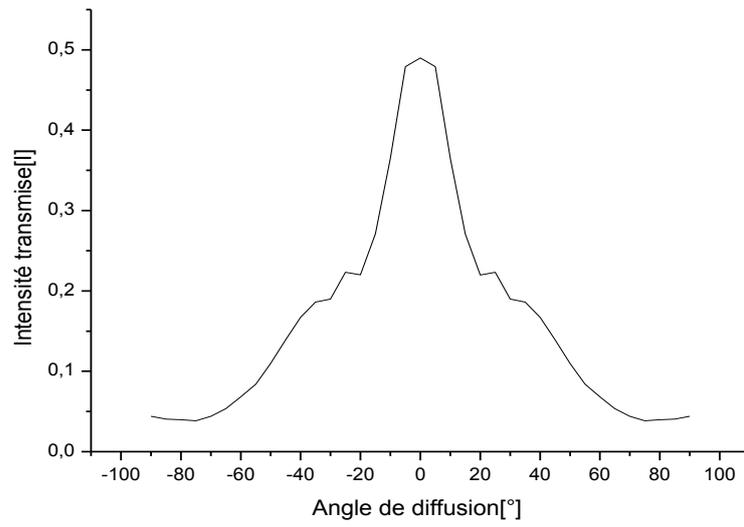
-a-



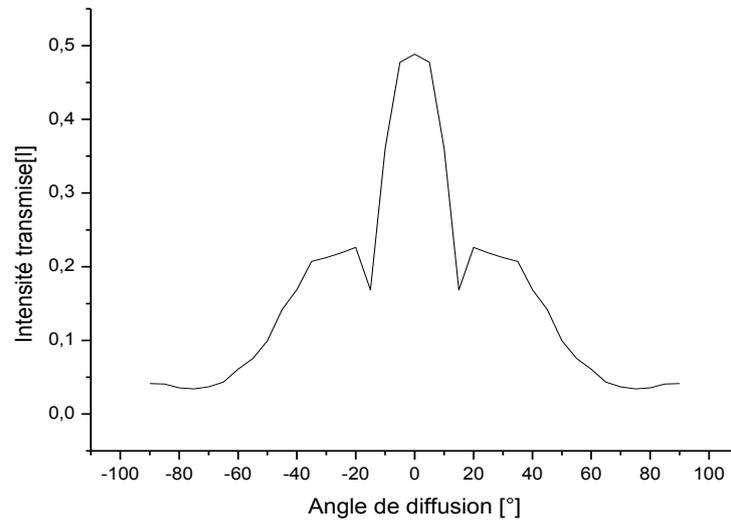
-b-

Figure 3.17: Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

❖ Echantillon 4 :



-a-

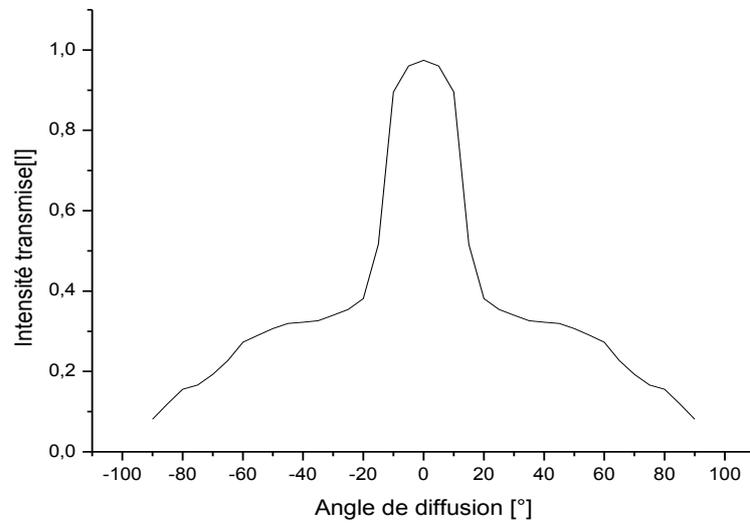


-b-

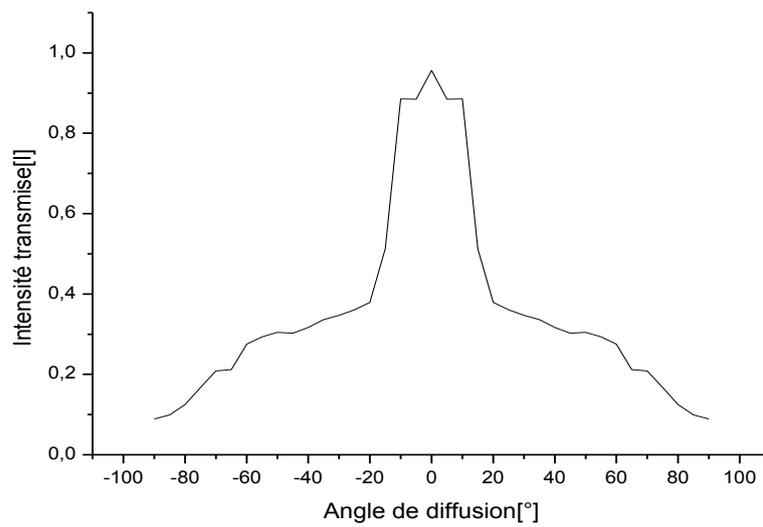
Figure 3.18: Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

B- Pour les échantillons épais :

❖ Echantillon 1 :



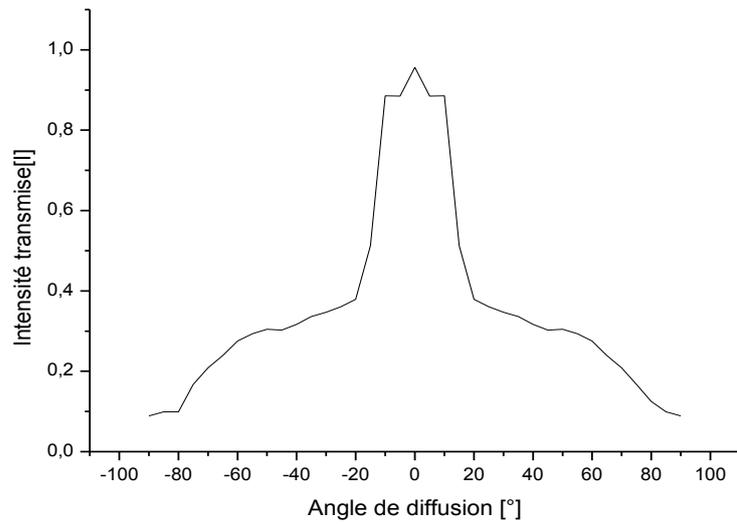
-a-



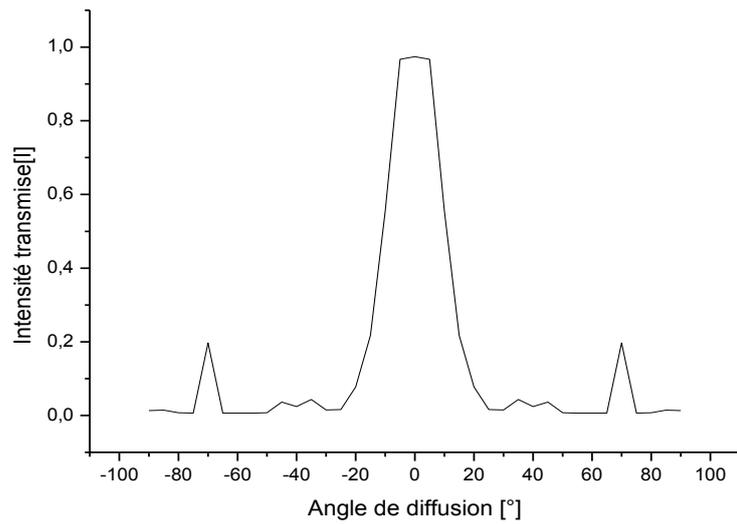
-b-

Figure 3.19 : Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

❖ Echantillon 2 :



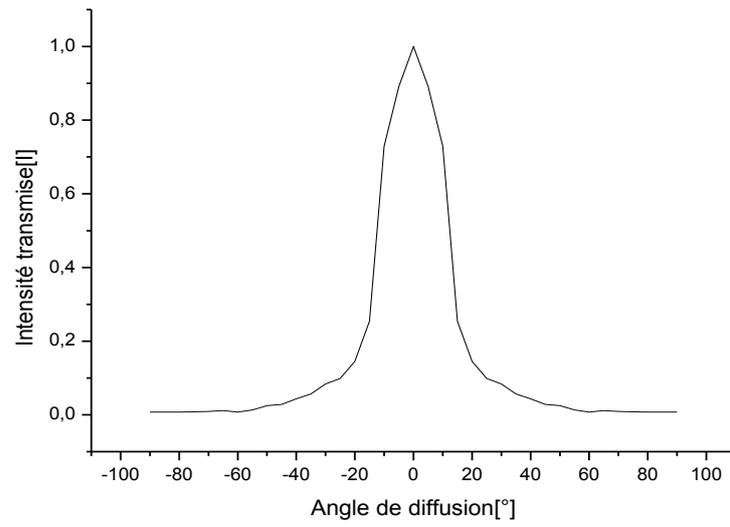
-a-



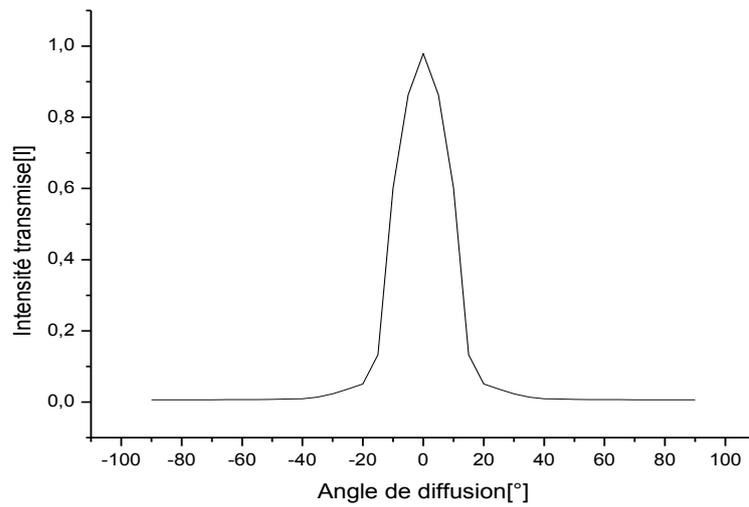
-b-

Figure 3.20 : Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

❖ **Echantillon 3 :**



-a-



-b-

Figure 3.21 : Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

III.6.1.2 Discussion et interprétation des résultats de la mesure N° 1 :

L'observation des différentes courbes de l'intensité transmise en fonction de l'angle de diffusion, laisse apparaître la même allure pour les différents échantillons (Films mince et épais).

En générale nous remarquons que les courbes portent des différences d'une courbe à l'autre. Ces différences peuvent s'expliquer par :

✚ Pour les échantillons films (mince) :

Dans l'échantillon N°1, constitué de polycarbonate pur et ne contenant aucune particule de poudre de TiO_2 , l'intensité transmise reste presque stable avec la variation de l'angle de diffusion. Le phénomène de diffusion est faible

Si nous incorporons de la poudre de TiO_2 , l'allure des courbes s'élargit au fur et à mesure que le pourcentage de TiO_2 augmente dans l'échantillon et le phénomène de diffusion apparaît plus clairement. La poudre de TiO_2 contient des particules de l'ordre de quelques micromètres. Dans ce cas la diffusion est provoquée par ces particules et par l'inhomogénéité qu'elle inclus dans l'échantillon. Donc l'inhomogénéité provoque une variation de l'indice de réfraction à l'intérieure de l'échantillon qui laisse apparaître le phénomène de diffusion plus clairement.

Nous continuerons à développer les résultats obtenus, en nous basant sur le calcul des aires des courbes obtenues par le lissage, en les traçant avec le logiciel « origine ». Avec ce dernier nous calculerons l'aire de chaque courbe. Cette opération se fait en e utilisant les fonctions « calcul » puis « intégrale ».

Les résultats obtenus pour les différents échantillons sont représentés dans le tableau suivant :

Aires(pixel) Echantillons	Polarisation (<i>P</i>)	Polarisation (<i>S</i>)
Echantillon 1	30.63689	30.37117
Echantillon 2	41.36089	40.66158
Echantillon 3	43.01431	40.88494
Echantillon 4	49.85223	48.71686

Tableau 3.2: Représentation des aires pour les échantillons films (minces)

L'observation des résultats repris dans le tableau ci-dessus nous a permis de confirmer que les particules de TiO_2 augmentent la diffusion de la lumière. Cela est vérifié en observant l'aire de chaque courbe qui s'accroît avec le pourcentage de TiO_2 incorporé.

Par ailleurs, nous remarquons que les aires des courbes dans le cas où la polarisation est parallèle sont plus importantes que dans le cas où elles sont perpendiculaires.

De cette remarque on peut conclure que la diffusion de la lumière apparaît mieux dans le cas où la polarisation est parallèle.

✚ Pour les échantillons épais :

Les courbes de diffusion varient d'un échantillon à l'autre en fonction des conditions de préparation de chacun d'eux.

L'allure des courbes diminue au fur et à mesure que le temps de préchauffage et de pression des échantillons augmente. Un tel résultat peut être interprété du point de vue structural par la présence de zone cristalline qui joue le rôle de centre de diffusion.

La diffusion de la lumière dans ce cas est due à la microstructure de la matière. Il existe des variables de domaines cristallisés qui influent sur la diffusion.

Pour le développement des résultats enregistrés, nous avons procédé de la même manière que dans le cas des échantillons films en nous basant sur le calcul de l'aire des courbes obtenue par lissage.

Les résultats obtenus sont repris dans le tableau ci-après :

Aires (pixel) Echantillons	Polarisation (<i>P</i>)	Polarisation (<i>S</i>)
Echantillon 1	66.75476	65.33252
Echantillon 2	65.47613	64. 6309
Echantillon 3	29.23218	22.86357

Tableau 3.3 : Représentation des aires pour les échantillons épais

L'observation des résultats repris dans le tableau ci-dessus, nous permet de constater que les zones cristallines existants dans la matière augmentent la diffusion de la lumière. Cela est démontré par la décroissance de la surface des courbes, au fur et à mesure de l'augmentation du temps de préchauffage et du temps de pression.

En outre, nous remarquons que l'aire des courbes est plus importante dans le cas où la polarisation est parallèle que dans le cas d'une polarisation perpendiculaire. La diffusion de la lumière apparaît mieux dans le cas d'une polarisation parallèle que dans le cas d'une polarisation perpendiculaire.

III.6.2 Mesure N° 2 :

Le même montage expérimental que dans les premières mesures a été utilisé pour la mesure N°2, à la seule différence que nous avons procédé à la variation de la longueur d'onde en utilisant des filtres interférentiels.

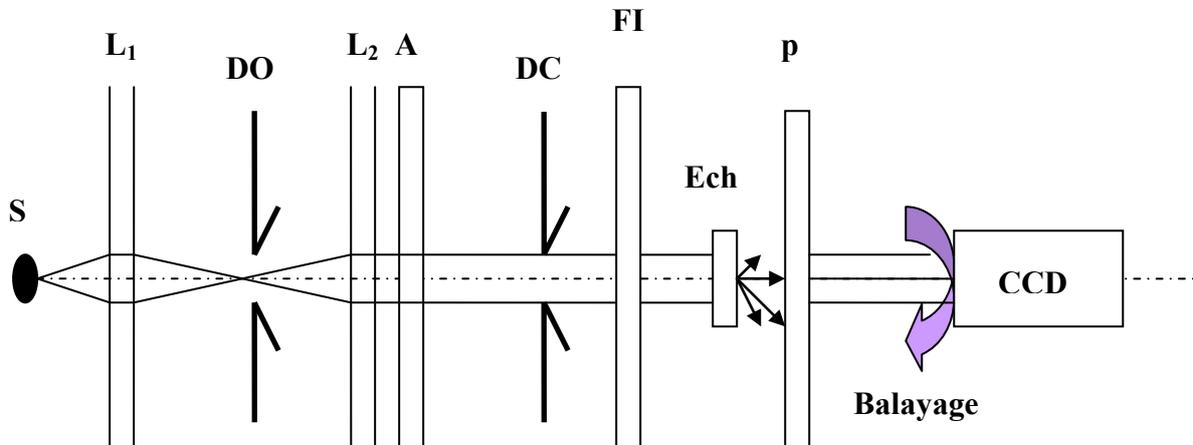


Figure 3.22: Schémas du montage expérimental pour différentes longueurs d'onde.

Ce montage se compose de :

S: Source de lumière blanche à xénon.

L₁: lentille de focale $f=100\text{mm}$.

DO: Diaphragme d'ouverture.

A: Atténuateur.

L₂: Lentille de focale $f=100\text{mm}$.

P : Polariseur.

Ech : Échantillon

CCD : Camera CCD.

DC: Diaphragme de champ

FI : filtre interférentielle

Nous avons utilisés trois filtres interférentiels différents :

($\lambda = 670 \text{ (nm)}$, $\lambda = 590 \text{ (nm)}$, $\lambda = 470 \text{ (nm)}$).

On a la mesure de l'intensité transmise en fonction de l'angle de diffusion pour chaque longueur d'onde.

La procédure de mesure est identique à celle des premières mesures.

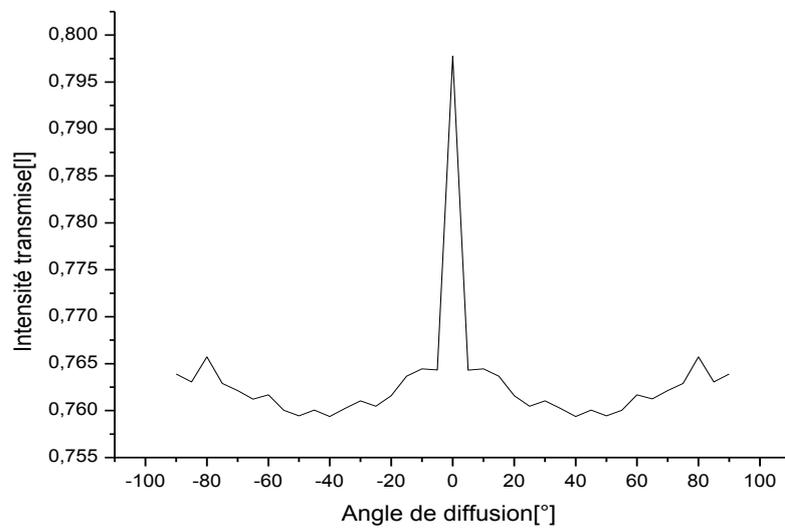
Les courbes obtenues sont représentées dans les pages suivantes :

III.6.2.1 Résultat de mesure N° 2 :

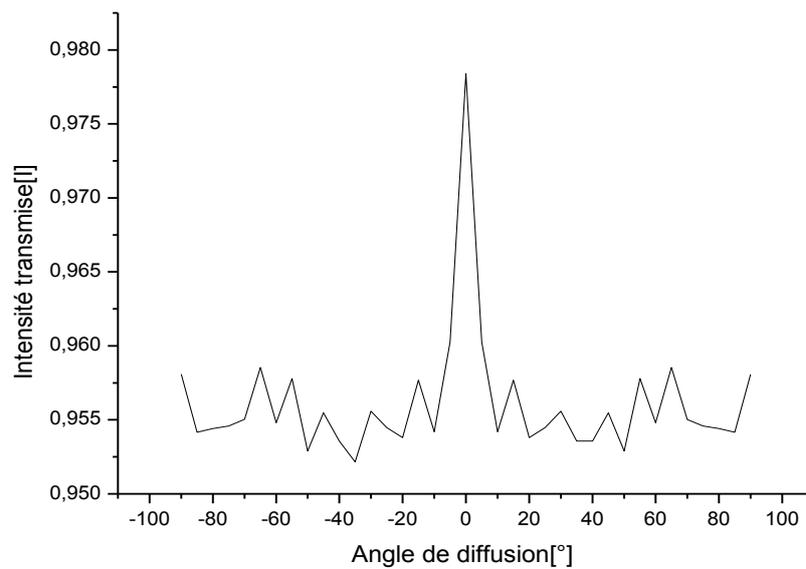
A--pour les échantillons films (mince):

1- $\lambda=670\text{nm}$

❖ Echantillon 1 :



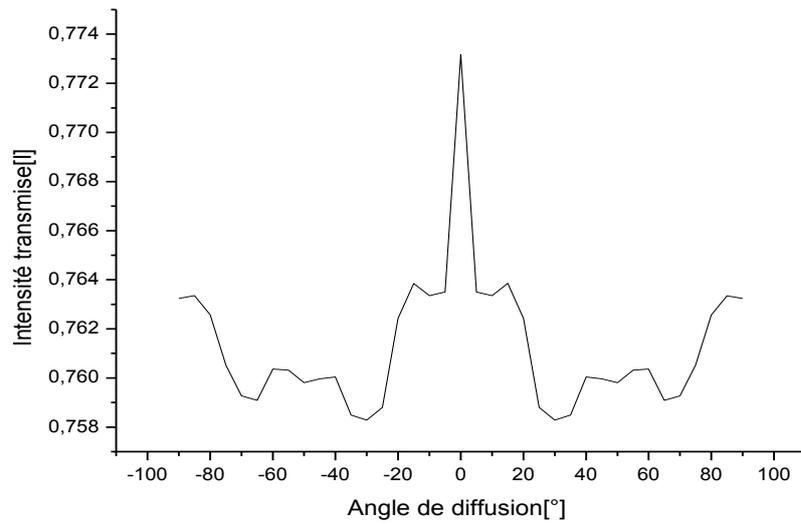
-a-



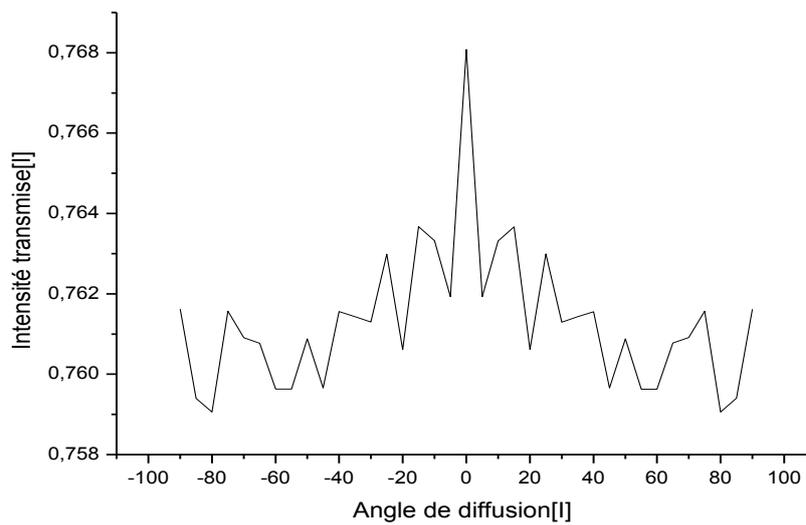
-b-

Figure 3.23 : Variation de l'intensité transmise [I] en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

❖ Echantillon 2 :



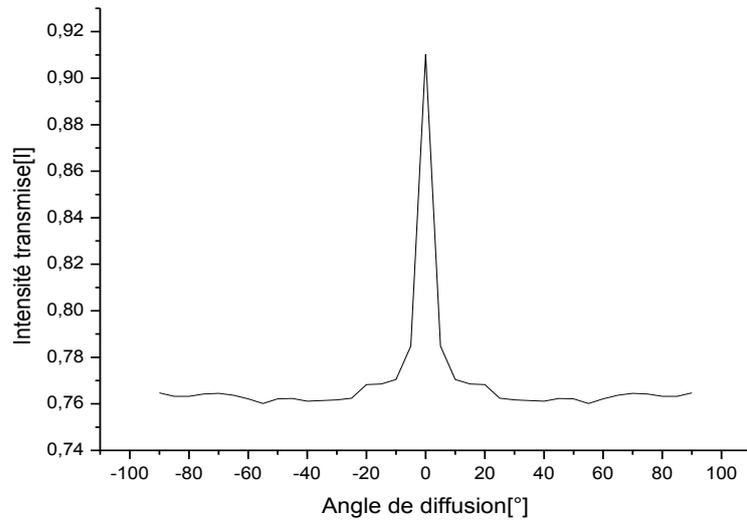
-a-



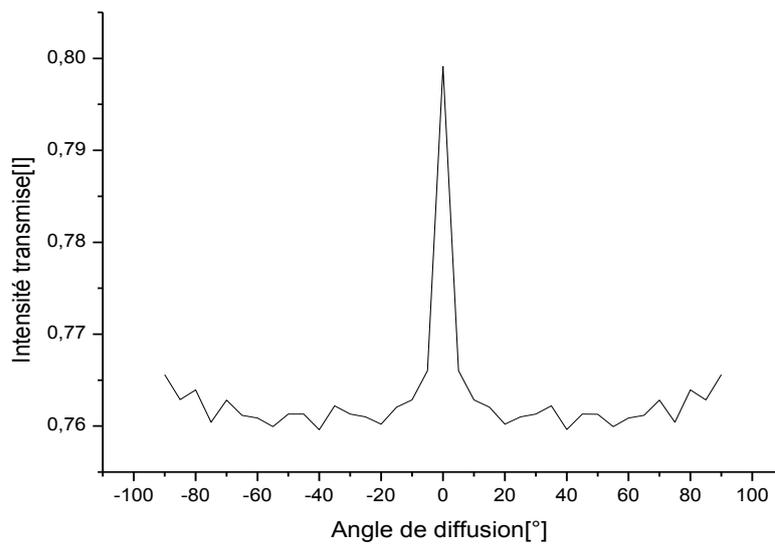
-b-

Figure 3.24 : Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

❖ **Echantillon 3 :**



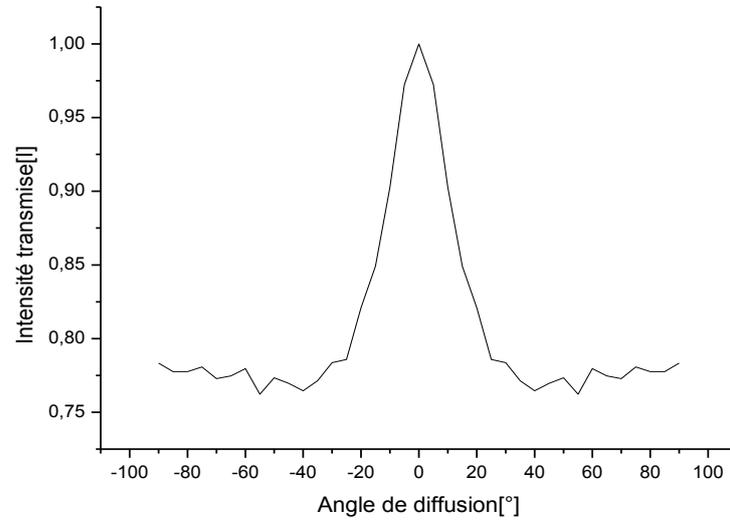
-a-



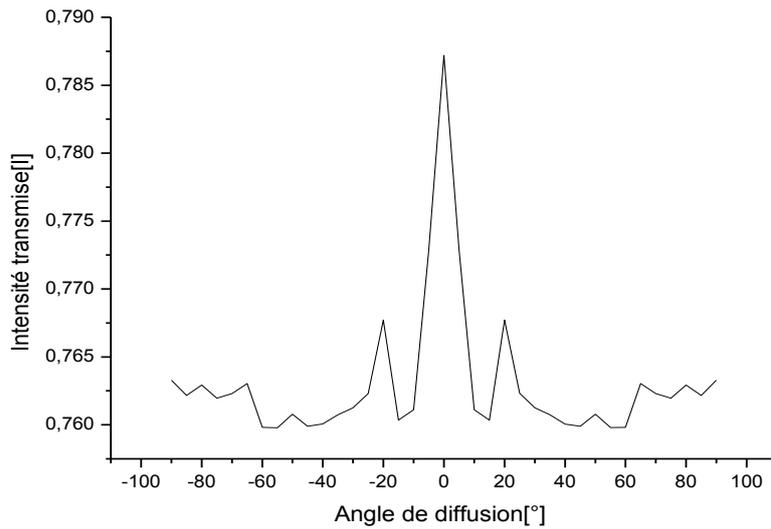
-b-

Figure 3.25 : Variation de l'intensité transmise [I] en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

❖ Echantillon 4 :



-a-

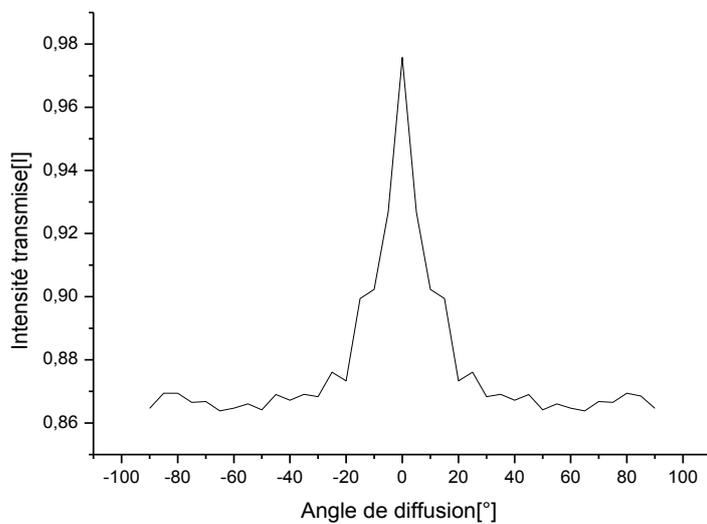


-b-

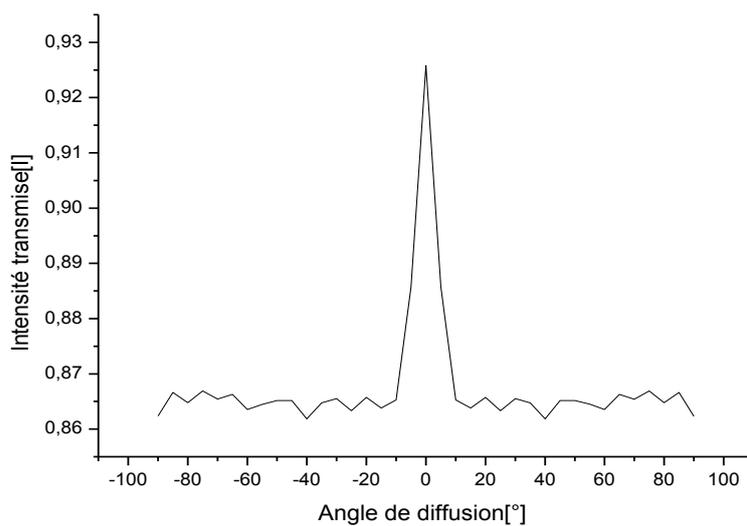
Figure 3.26 : Variation de l'intensité transmise [I] en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

2- $\lambda=590$ (nm) :

❖ Echantillon 1 :



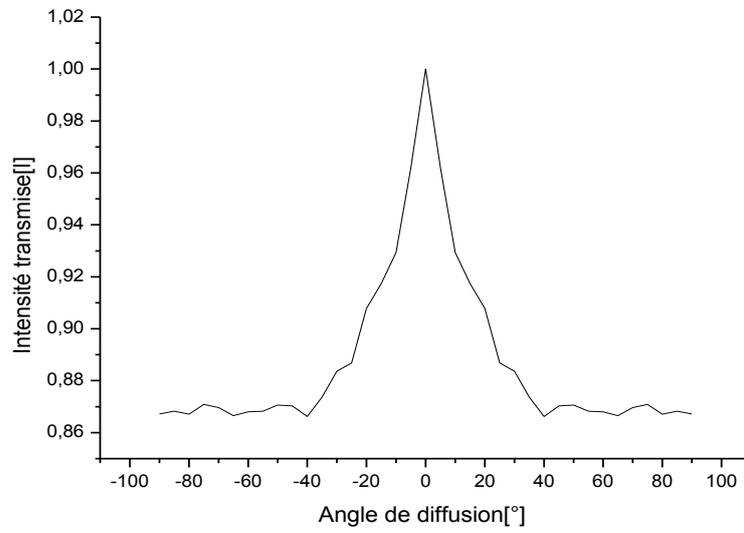
-a-



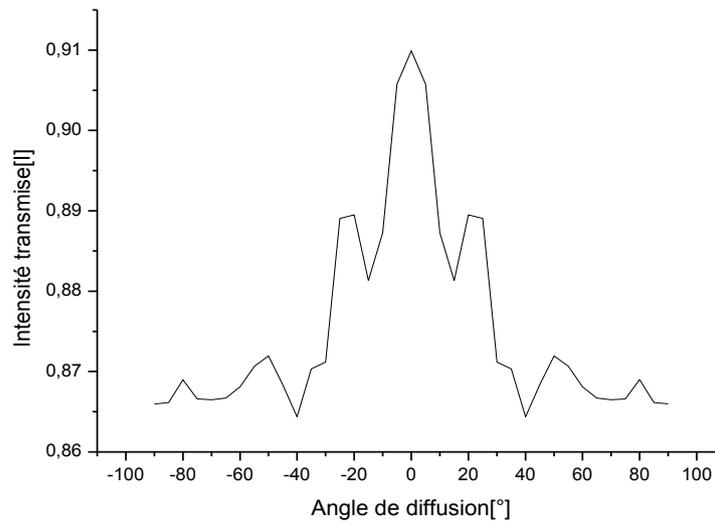
-b-

Figure3.27 : Variation de l'intensité transmise [I] en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

❖ Echantillon 2 :



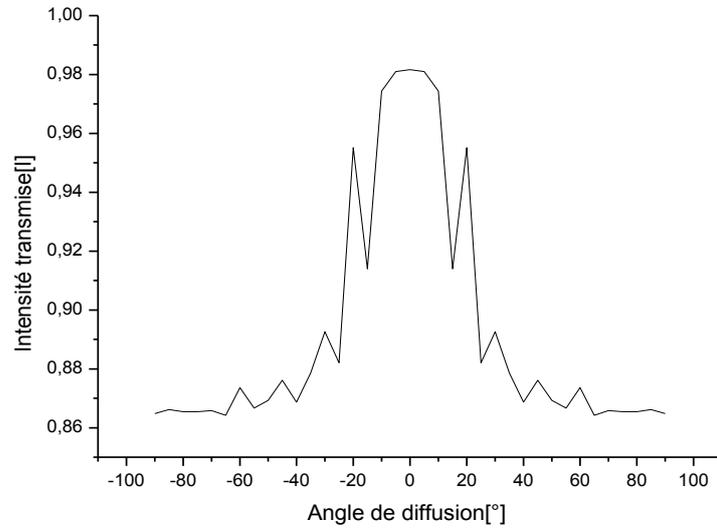
-a-



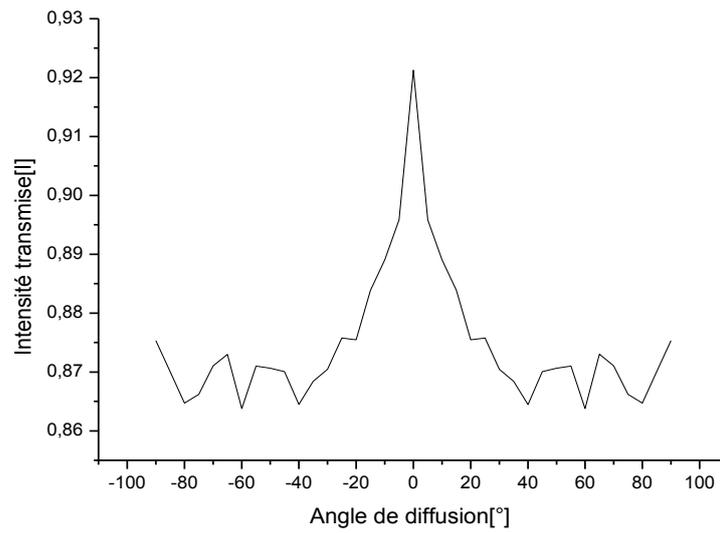
-b-

Figure 3.28 : Variation de l'intensité transmise [I] en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

❖ Echantillon 3 :



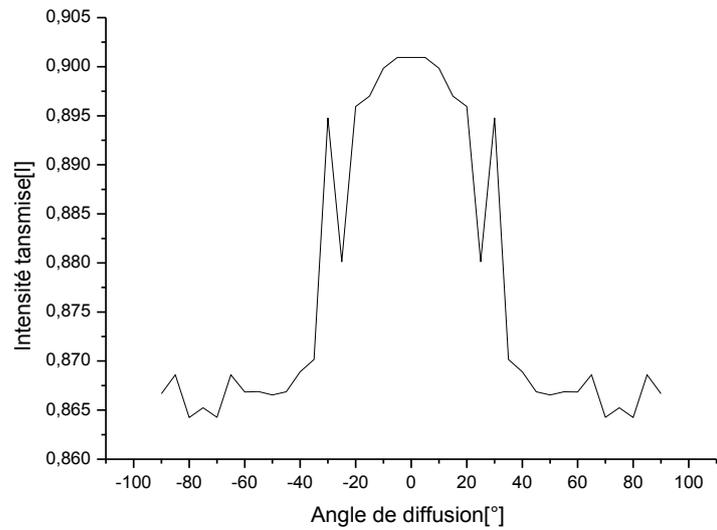
-a-



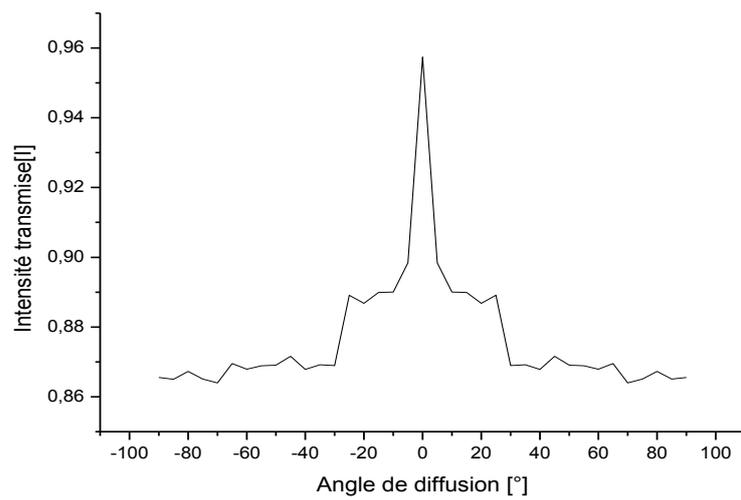
-b-

Figure 3.29 : Variation de l'intensité transmise [I] en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

❖ **Echantillon 4 :**



-a-

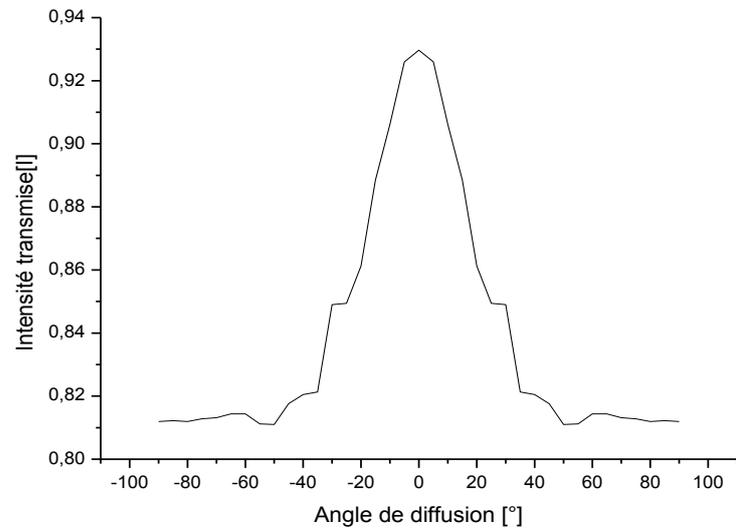


-b-

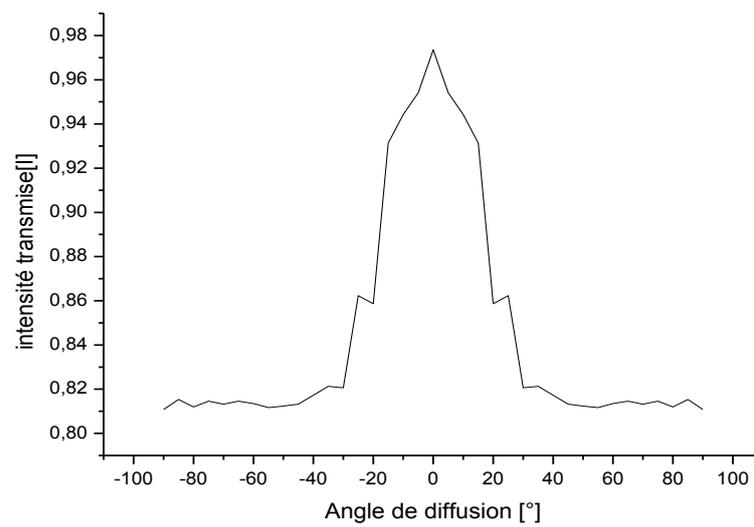
Figure 3.30 : Variation de l'intensité transmise [I] en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

3 - $\lambda=470(\text{nm})$:

❖ Echantillon 1 :



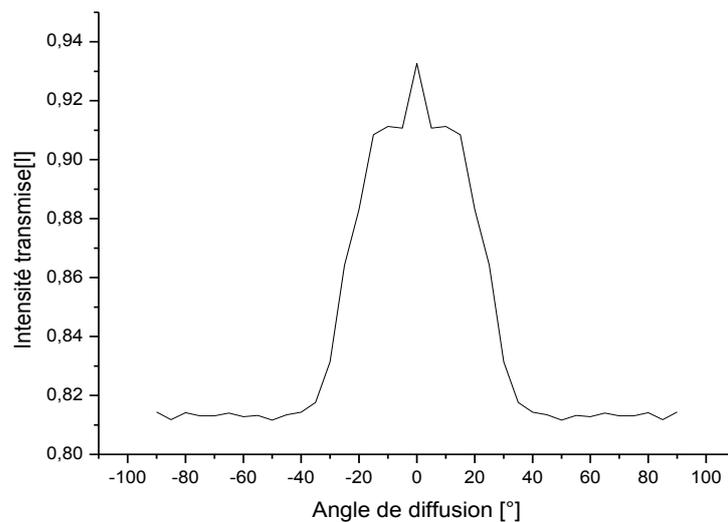
-a-



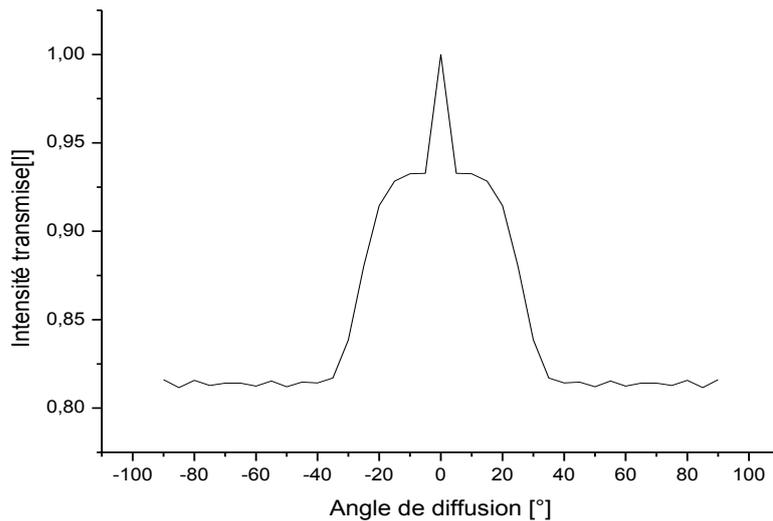
-b-

Figure 3.31: Variation de l'intensité transmise [I] en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

❖ Echantillon 2 :



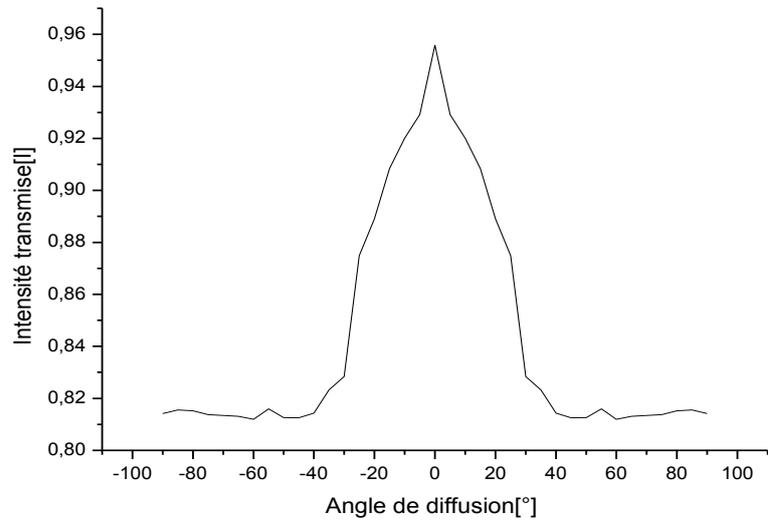
-a-



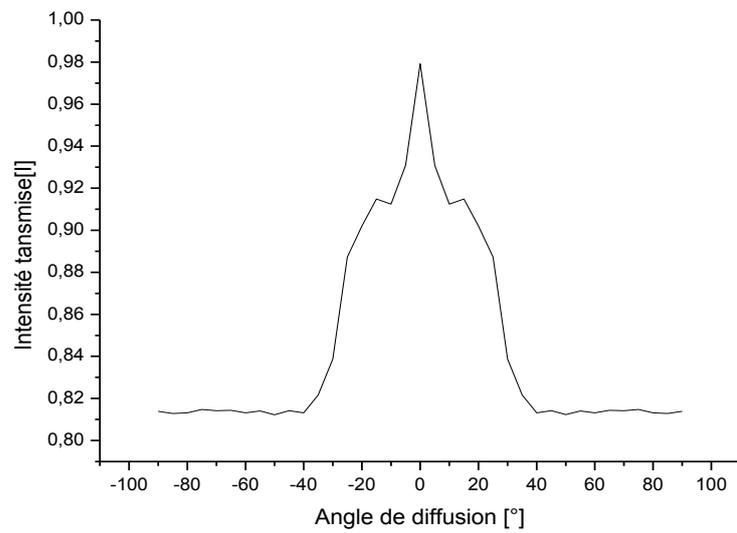
-b-

Figure3.32: Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

❖ **Echantillon 3 :**



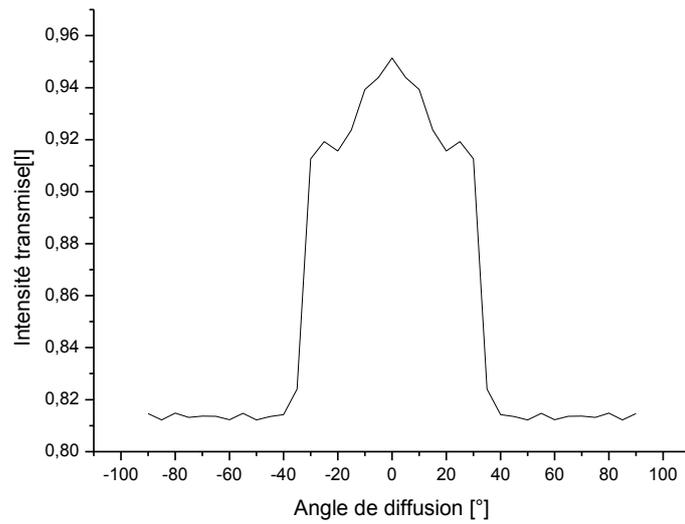
-a-



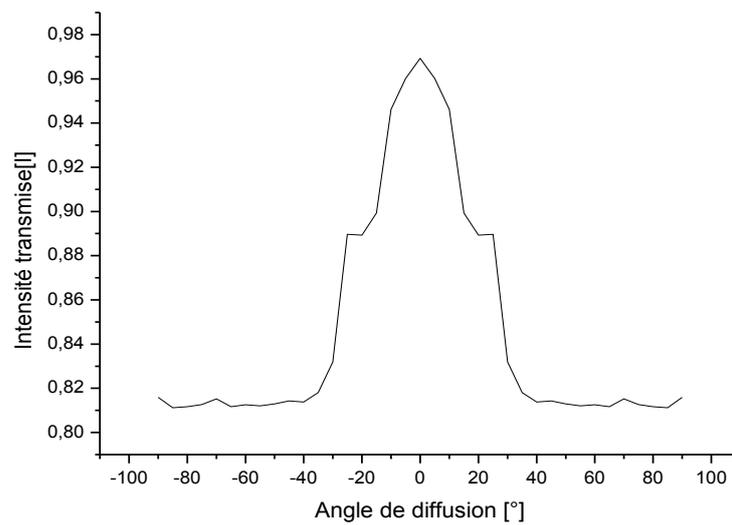
-b-

Figure 3.33: Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

❖ Echantillon 4 :



-a-



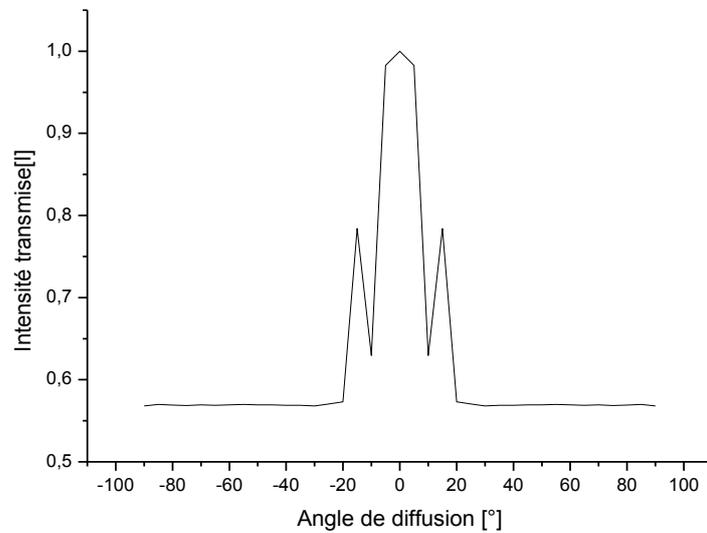
-b-

Figure 3.34 : Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

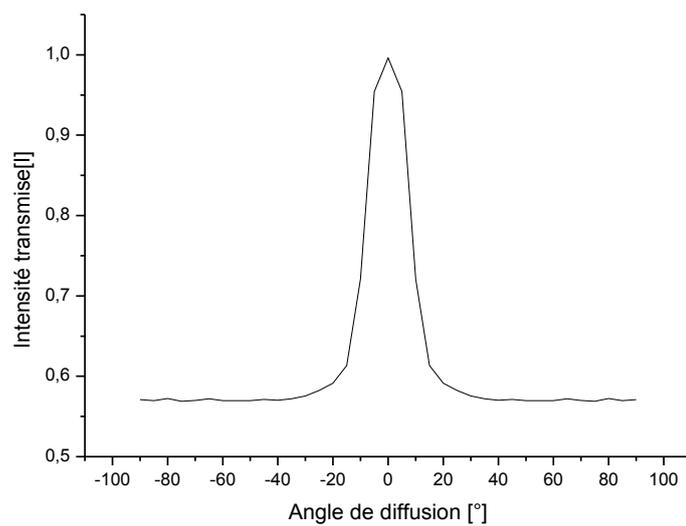
B- pour les échantillons épais :

1- $\lambda=670\text{nm}$

❖ Echantillon 1 :



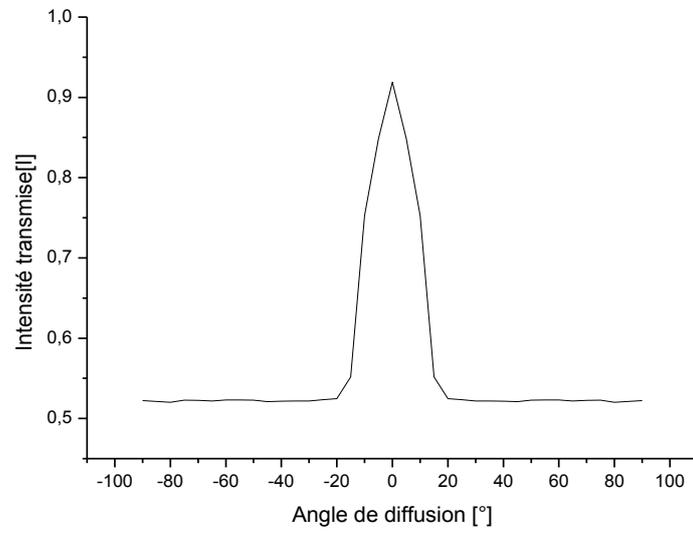
-a-



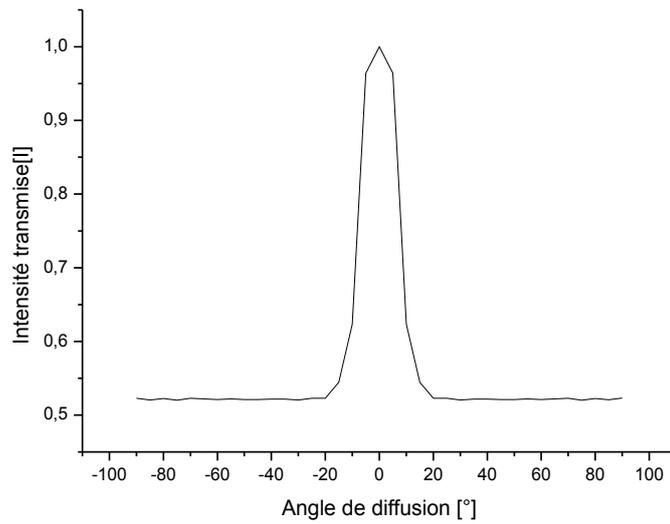
-b-

Figure 3.35 : Variation de l'intensité transmise [I] en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

❖ Échantillon 2 :



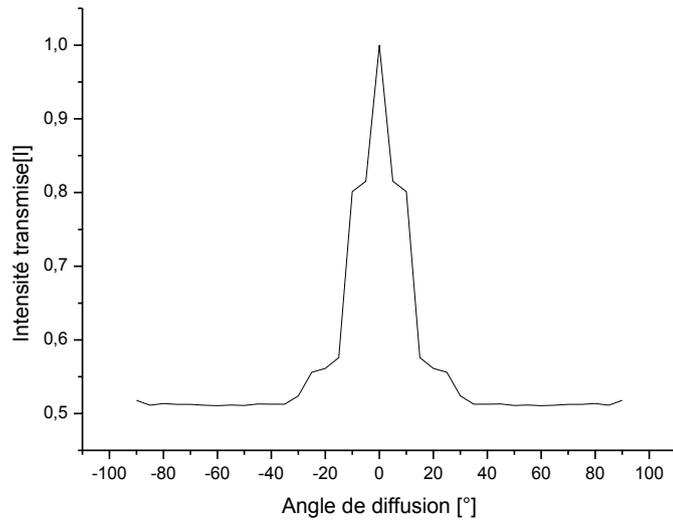
-a-



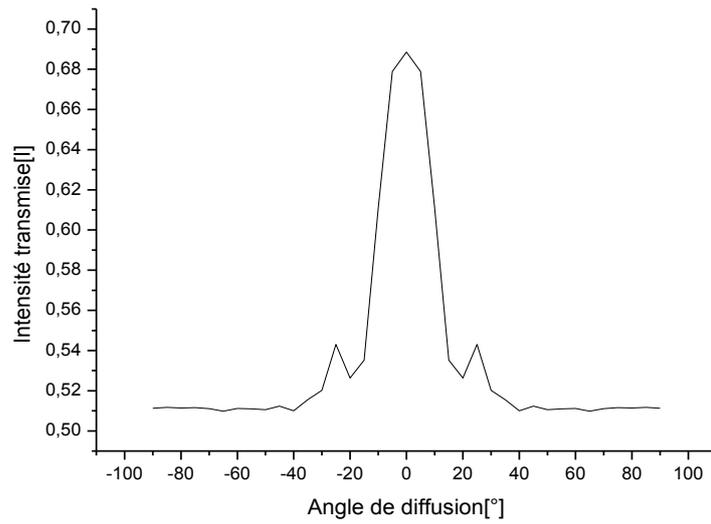
-b-

Figure 3.36 : Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

❖ Échantillon 3 :



-a-

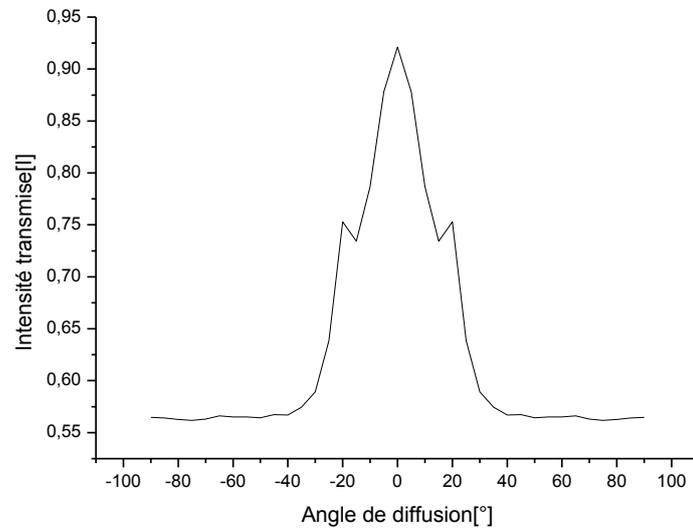


-b-

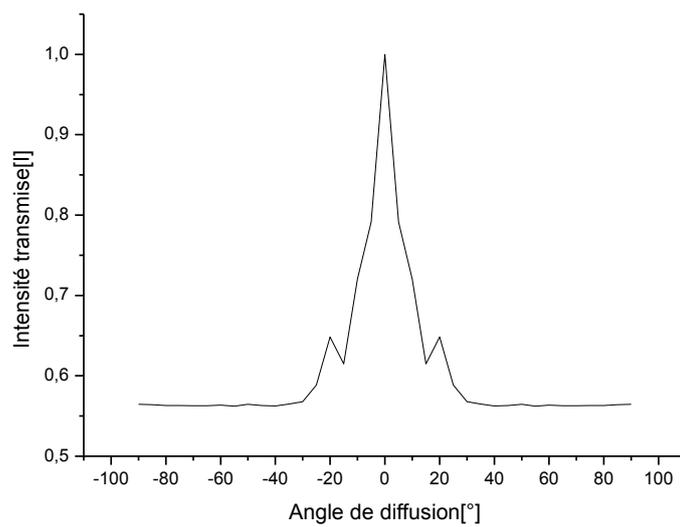
Figure 3.37 : Variation de l'intensité transmise [I] en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

2- $\lambda=590$ (nm) :

❖ Echantillon 1 :



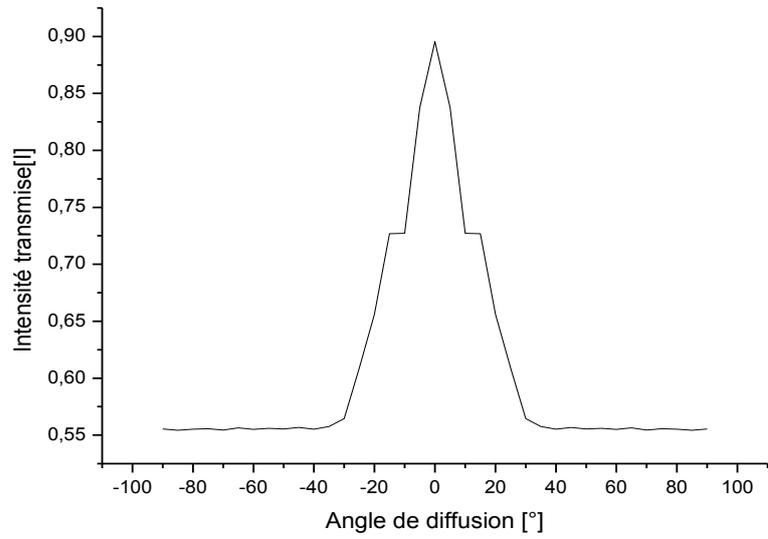
-a-



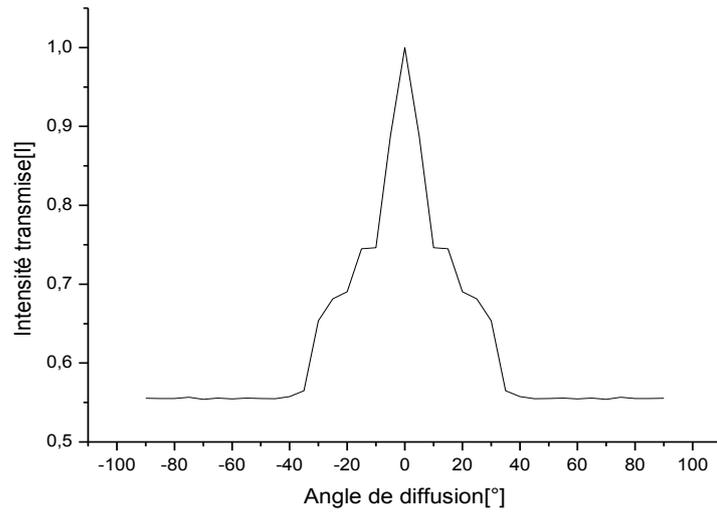
-b-

Figure 3.38 : Variation de l'intensité transmise [I] en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

❖ **Echantillon 2 :**



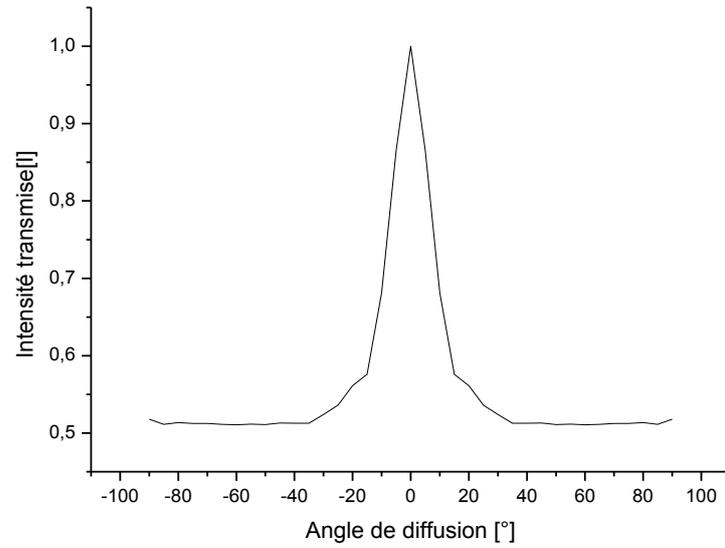
-a-



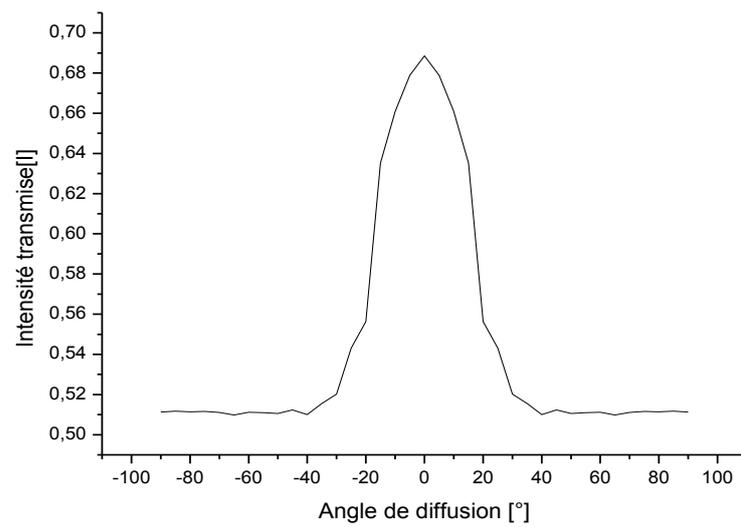
-b-

Figure 3.39 : Variation de l'intensité transmise $[I]$ en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

❖ **Echantillon 3 :**



-a-

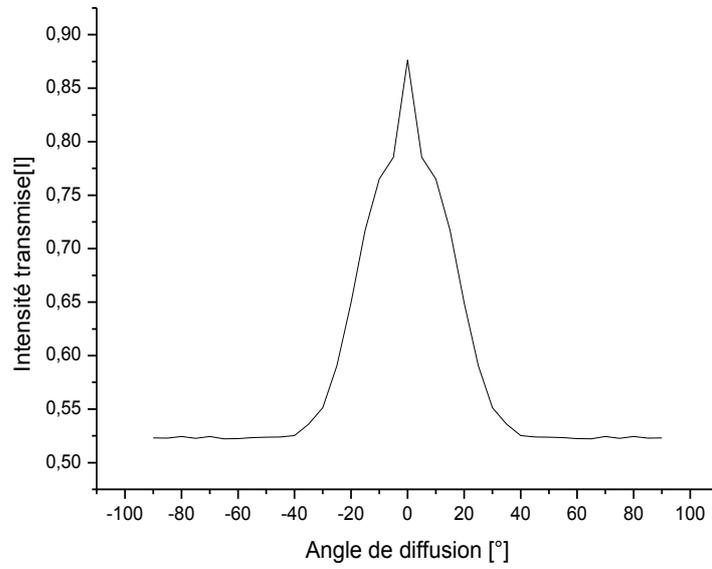


-b-

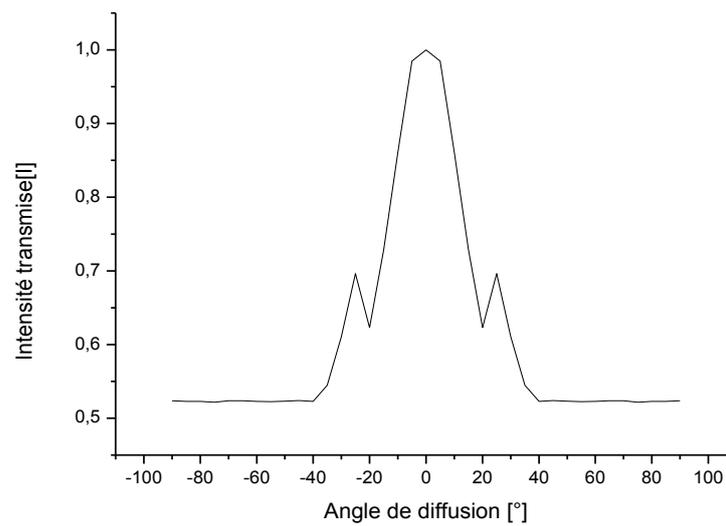
Figure 3.40 : Variation de l'intensité transmise en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

3- $\lambda=470(\text{nm})$:

❖ Echantillon 1 :



-a-



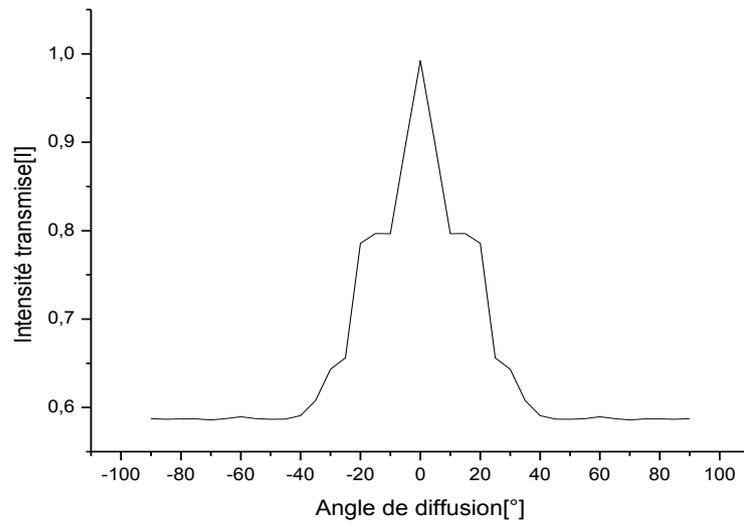
-b-

Figure 3.41 : Variation de l'intensité transmise en fonction de l'angle de diffusion pour une :

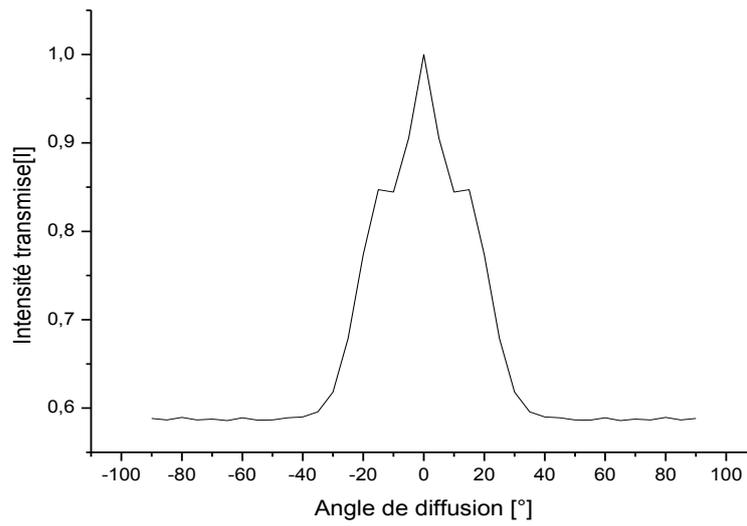
-a- Polarisation parallèle (p)

-b- Polarisation perpendiculaire (s)

❖ **Echantillon 2 :**



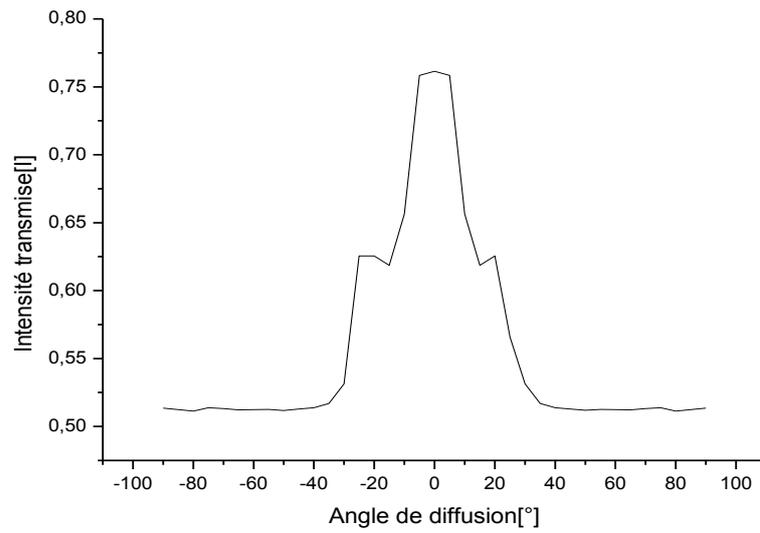
-a-



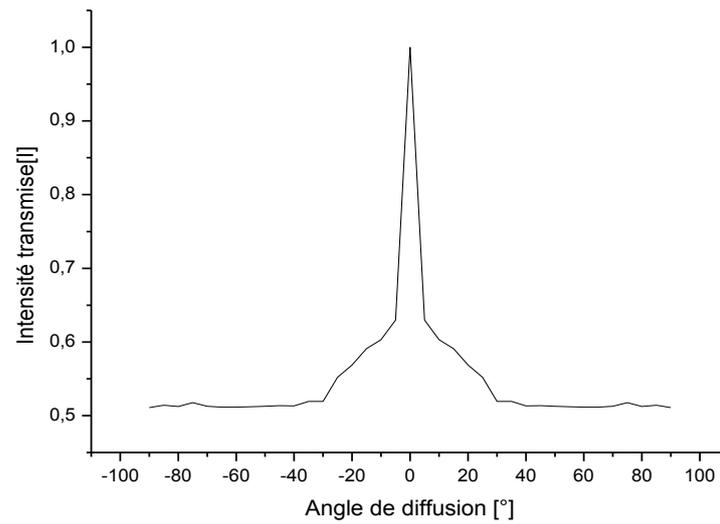
-b-

Figure 3.42 : Variation de l'intensité transmise en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (*p*)
-b- Polarisation perpendiculaire (*s*)

❖ Echantillon 3 :



-a-



-b-

Figure 3.43 : Variation de l'intensité transmise en fonction de l'angle de diffusion pour une :
-a- Polarisation parallèle (p)
-b- Polarisation perpendiculaire (s)

III.6.2.2 Discussion et interprétation des résultats de mesure N°2 :

✚ Pour les échantillons films (minces) :

Afin de mieux interpréter les résultats obtenus, on calcule les aires des courbes de la même manière que les mesures N°1

Les résultats obtenus pour les différents échantillons sont représentés dans le tableau suivant :

Aires (pixel) Echantillons	$\lambda = 690(\text{nm})$	$\lambda = 590(\text{nm})$	$\lambda = 470(\text{nm})$
Echantillon 1: <i>Polarisation // (p):</i> <i>Polarisation \perp (s) :</i>	137.02207 137.0317	151.11445 150.40715	156.18475 156.02139
Echantillon 2: <i>Polarisation // (p):</i> <i>Polarisation \perp (s) :</i>	137.32212 137.27436	152.18952 151.31796	157.79825 157.6070
Echantillon3: <i>Polarisation // (p):</i> <i>Polarisation \perp (s) :</i>	138.42068 137.32169	152.21974 151.96688	157.8965 157.72044
Echantillon4: <i>Polarisation // (p):</i> <i>Polarisation \perp (s) :</i>	145.10502 137.34344	153.95925 153.5502	160.82563 157.80275

Tableau 3.4 : Représentation des aires pour les échantillons films (pour les différentes Longueurs d'onde)

L'allure des courbes s'élargit au fur et à mesure que le pourcentage de Tio2 augmente dans l'échantillon.

Les résultats obtenus dans ce cas ont les mêmes interprétations que les premières mesures sauf que chaque échantillon a un comportement différent de l'autre envers les différentes longueurs d'onde. L'élargissement des courbes pour la longueur d'onde $\lambda = 670$ nm se différencie des autres longueurs d'onde ($\lambda = 590$ nm et $\lambda = 470$ nm) ; il est moins large. L'élargissement le plus large est celui de $\lambda = 470$ nm.

Dans ce cas on peut constater que les courtes longueurs d'ondes sont les plus diffusées.

En général, en observant les courbes il apparaît qu'il existe un grand nombre de pics (surtout lorsque $\lambda = 690$) cela est due à l'existence du phénomène d'interférences.

✚ Pour les échantillons épais :

Pour pouvoir mieux interpréter les résultats obtenus, on calcule les aires des courbes de la même manière que les mesures N°1.

Les résultats obtenus pour les différents échantillons sont représentés dans le tableau suivant :

Aires (pixel) Echantillons	$\lambda = 690(\text{nm})$	$\lambda = 590(\text{nm})$	$\lambda = 470(\text{nm})$
<i>Echantillon 1:</i>			
<i>Polarisation // (p):</i>	111.53731	113.43558	119.34139
<i>Polarisation \perp (s) :</i>	110.96674	109.1029	118.46338
<i>Echantillon 2:</i>			
<i>Polarisation // (p):</i>	101.95574	113.0069	110.40022
<i>Polarisation \perp (s) :</i>	101.85525	109.58633	105.30021
<i>Echantillon3:</i>			
<i>Polarisation // (p):</i>	100.25145	100.35129	100.66644
<i>Polarisation \perp (s) :</i>	96.40423	98.20422	98.69734

Tableau 3.5:Représentation des aires pour les échantillons épais (pour les différentes longueurs d'onde).

L'allure des courbes diminue au fur et à mesure que le temps de préchauffage et de pression des échantillons augmente.

Mêmes interprétations que les premières mesures sauf que chaque échantillon a un comportement différent de l'autre. L'élargissement des courbes pour la longueur d'onde $\lambda = 470(\text{nm})$ est le plus large.

Conclusion générale

Ce mémoire nous a permis d'avoir de plus amples connaissances sur les matériaux polymères ainsi que l'application du phénomène de la diffusion de la lumière pour caractériser ces matériaux.

Pour cela, on a appliqué une méthode optique consistant à mesurer l'intensité transmise en fonction de l'angle de diffusion. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un montage expérimental optique et les résultats sont illustrés sous forme de courbes.

Nous avons étudié la diffusion de la lumière à travers des échantillons préparés en polymère (le polymère que nous avons utilisé est le polycarbonate). Ces derniers ont été préparés au niveau du laboratoire de polymères de l'institut de chimie.

Pour voir le comportement de la diffusion de la lumière sur les matériaux polymères, nous avons préparé deux types d'échantillons (l'un épais, l'autre mince)

- Les échantillons épais sont obtenus en faisant varier les conditions de préparations.
- Les échantillons films minces : les conditions de préparations sont fixes, mais ils sont dopés de différents pourcentages de TIO_2

Les résultats obtenus ont montré que :

- Pour les échantillons épais c'est la microstructure du polymère qui influe sur la diffusion de la lumière. D'après les résultats obtenus on a constaté que lorsque le temps de préchauffage des échantillons diminue la diffusion de la lumière augmente. Cela est dû à l'existence des variables de domaines cristallisés dans le polymère qui joue le rôle de centre de diffusion.
- Pour les échantillons films minces la poudre de TIO_2 contient des particules de l'ordre de quelques micromètres. Dans ce cas la diffusion est provoquée par ces particules et par l'inhomogénéité qu'elles incluent dans l'échantillon. Donc l'inhomogénéité provoque une variation de l'indice de réfraction à l'intérieure de l'échantillon et la diffusion augmente au fur et à mesure que le pourcentage de TIO_2 augmente dans l'échantillon

En ce qui concerne la polarisation on constate que la diffusion de la lumière est plus importante lorsque la lumière est polarisée parallèlement (les courbes de l'intensité transmise en fonction de l'angle de diffusion dans le cas d'une polarisation parallèle (p) sont plus larges que les courbes de la polarisation perpendiculaire (s)).

Par ailleurs, lorsqu'on a utilisé différentes longueurs d'onde ($\lambda=670(\text{nm})$, $\lambda=590(\text{nm})$, $\lambda=470(\text{nm})$), on a constaté que chaque échantillon se comportait d'une manière différente par rapport à l'autre. La longueur la plus diffusante de la lumière est constatée lorsque $\lambda=470(\text{nm})$.

Cette étude est une illustration des possibilités offertes pour l'étudier de la diffusion par les matériaux polymères qui sont très utilisés dans de nombreux domaines, dans notre vie quotidienne. On a caractérisé ces matériaux à partir de différents paramètres influant sur la diffusion telle que leur microstructure.

En général, la diffusion de la lumière constitue un phénomène très important pour caractériser la matière.

Annexes

-Les intensités transmises [I] en fonction de l'angle de diffusion :

-Les échantillons films :

Echantillon 1 :

[θ°]	Polarisation (p)	Polarisation (s)
0	1	0,98945
5	0,95603	0,90078
10	0,32704	0,30801
15	0,16846	0,14517
20	0,12212	0,12471
25	0,11821	0,11114
30	0,13025	0,14909
35	0,13583	0,14944
40	0,1226	0,12576
45	0,09753	0,10914
50	0,07819	0,08651
55	0,06194	0,11399
60	0,04759	0,05439
65	0,04103	0,04
70	0,0341	0,03602
75	0,03302	0,03571
80	0,03343	0,03598
85	0,03692	0,0367
90	0,97736	0,03971

Echantillon 2:

[θ°]	Polarisation (p)	Polarisation (s)
0	0,99573	0,96449
5	0,82398	0,87953
10	0,52832	0,55861
15	0,35576	0,34101
20	0,28143	0,27697
25	0,24852	0,23158
30	0,23342	0,21512
35	0,22284	0,20711
40	0,2065	0,19171
45	0,17275	0,15514
50	0,13039	0,11748
55	0,09957	0,09364
60	0,07447	0,07383
65	0,06026	0,05753
70	0,04943	0,04329
75	0,04356	0,04397
80	0,04163	0,03219
85	0,04301	0,03891
90	0,04479	0,05256

Echantillon 3:

[θ°]	Polarisation (p)	Polarisation (s)
0	0,93404	0,92215
5	0,91744	0,87382
10	0,52345	0,49377
15	0,36849	0,33986
20	0,28693	0,26713
25	0,26028	0,20623
30	0,24837	0,22431
35	0,24038	0,21454
40	0,22075	0,1983
45	0,19711	0,16949
50	0,13228	0,12565
55	0,10147	0,09544
60	0,07102	0,07308
65	0,0635	0,05698
70	0,0537	0,04741
75	0,04503	0,0447
80	0,042	0,04448
85	0,04151	0,04712
90	0,0414	0,05023

Echantillon 4 :

[θ°]	Polarisation (p)	Polarisation (s)
0	0,48993	0,48834
5	0,47901	0,47754
10	0,36478	0,36038
15	0,27089	0,16846
20	0,21992	0,22609
25	0,22324	0,21864
30	0,18982	0,21221
35	0,18622	0,20704
40	0,16702	0,16858
45	0,13914	0,14192
50	0,10953	0,09937
55	0,08402	0,07546
60	0,06826	0,06092
65	0,05361	0,04319
70	0,04402	0,0369
75	0,03852	0,03398
80	0,03985	0,03556
85	0,04045	0,04064
90	0,04392	0,04127

-Les échantillons épais :

Echantillon 1 :

[θ°]	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,96864	1
5	0,8635	0,86841
10	0,02949	0,28868
15	0,21534	0,19007
20	0,18377	0,15823
25	0,17597	0,15935
30	0,18144	0,16148
35	0,17413	0,16367
40	0,16062	0,15273
45	0,12543	0,13651
50	0,09915	0,10084
55	0,08107	0,07676
60	0,05865	0,06124
65	0,04523	0,04733
70	0,03449	0,04128
75	0,02783	0,03886
80	0,03282	0,04107
85	0,03694	0,03953
90	0,03514	0,03801

Echantillon 2:

[θ°]	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,91042	0,87231
5	0,85746	0,78293
10	0,29886	0,24989
15	0,20241	0,18123
20	0,17984	0,15218
25	0,17747	0,15331
30	0,18322	0,15369
35	0,15678	0,1561
40	0,17475	0,14561
45	0,14951	0,12376
50	0,12119	0,09325
55	0,08621	0,0721
60	0,06449	0,05443
65	0,05126	0,03752
70	0,04574	0,03448
75	0,04052	0,03762
80	0,04093	0,03949
85	0,04053	0,04086
90	0,0414	0,03946

Echantillon 3:

[θ°]	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,96948	0,97198
5	0,85399	0,87304
10	0,31893	0,33156
15	0,19123	0,18825
20	0,15817	0,15089
25	0,15563	0,1471
30	0,16356	0,15117
35	0,16283	0,15109
40	0,15586	0,13547
45	0,12787	0,11747
50	0,09832	0,0902
55	0,07894	0,06961
60	0,06142	0,05675
65	0,05026	0,04834
70	0,04324	0,04214
75	0,03923	0,03917
80	0,03899	0,03712
85	0,04132	0,04117
90	0,04122	0,04104

Pour $\lambda=670(\text{nm})$:

-Les échantillons films :

Echantillon 1 :

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,91013	1
5	0,78487	0,97242
10	0,77047	0,90273
15	0,76854	0,84911
20	0,76827	0,82096
25	0,76243	0,78578
30	0,76172	0,78358
35	0,76141	0,77136
40	0,76114	0,76458
45	0,76231	0,76958
50	0,76218	0,77334
55	0,76015	0,76221
60	0,76215	0,77966
65	0,76371	0,77469
70	0,76454	0,7728
75	0,76423	0,78075
80	0,76328	0,77764
85	0,76466	0,78337
90	0,77261	0,83171

Echantillon 2:

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,79912	0,7872
5	0,76602	0,77287
10	0,76284	0,76112
15	0,76205	0,76035
20	0,76019	0,76772
25	0,761	0,76231
30	0,76131	0,76125
35	0,7622	0,76074
40	0,75961	0,76006
45	0,76131	0,75989
50	0,7613	0,76079
55	0,75993	0,75979
60	0,76087	0,75981
65	0,76116	0,76304
70	0,76282	0,76231
75	0,76041	0,76196
80	0,76394	0,76293
85	0,76286	0,76217
90	0,7656	0,76329

Echantillon 3:

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,79775	0,78051
5	0,76432	0,76606
10	0,76445	0,7612
15	0,76366	0,76399
20	0,76159	0,7609
25	0,76047	0,76143
30	0,76103	0,76232
35	0,76024	0,75958
40	0,75937	0,76071
45	0,76006	0,76223
50	0,75944	0,76018
55	0,76004	0,76408
60	0,76168	0,76169
65	0,76123	0,76468
70	0,76214	0,76188
75	0,76289	0,76152
80	0,76573	0,76139
85	0,76306	0,76119
90	0,76389	0,76431

Echantillon 4 :

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,777	0,76808
5	0,7635	0,76193
10	0,76335	0,76332
15	0,76385	0,76367
20	0,76243	0,76061
25	0,7588	0,76299
30	0,75828	0,7613
35	0,75849	0,76143
40	0,76004	0,76156
45	0,75981	0,75966
50	0,76032	0,7609
55	0,76036	0,75963
60	0,75909	0,76077
65	0,75927	0,76091
70	0,76053	0,76157
75	0,76257	0,75906
80	0,76335	0,7594
85	0,76324	0,76162
90	0,76257	0,76053

-Pour $\lambda = 590(\text{nm})$:

-Les échantillons films :

Echantillon 1 :

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	1	0,90992
5	0,96188	0,90576
10	0,92935	0,88949
15	0,91735	0,88906
20	0,90775	0,88727
25	0,88682	0,88132
30	0,88364	0,87118
35	0,87363	0,87033
40	0,86623	0,86437
45	0,87032	0,86838
50	0,87061	0,87194
55	0,86825	0,87065
60	0,86803	0,8681
65	0,8665	0,8667
70	0,86965	0,86648
75	0,87085	0,8666
80	0,86712	0,86899
85	0,86824	0,86614
90	0,86721	0,86597

Echantillon 2:

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,90096	0,89844
5	0,90082	0,89002
10	0,89985	0,88993
15	0,89701	0,88679
20	0,89478	0,8891
25	0,89595	0,87042
30	0,88012	0,86894
35	0,87016	0,86918
40	0,8689	0,86788
45	0,86686	0,87162
50	0,86654	0,86908
55	0,86688	0,86891
60	0,86685	0,86792
65	0,8686	0,86954
70	0,86427	0,86401
75	0,86524	0,86509
80	0,86425	0,8673
85	0,86861	0,8658
90	0,86667	0,86552

Echantillon 3:

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,98163	0,92125
5	0,98098	0,89583
10	0,96658	0,88905
15	0,95518	0,88385
20	0,91396	0,87549
25	0,8821	0,87577
30	0,89346	0,87045
35	0,87861	0,86839
40	0,86871	0,86448
45	0,87614	0,87005
50	0,86928	0,87063
55	0,86671	0,87099
60	0,87365	0,86378
65	0,8642	0,873
70	0,86578	0,87104
75	0,86549	0,86618
80	0,86547	0,86646
85	0,86616	0,87006
90	0,86479	0,87533

Echantillon 4 :

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,92578	0,97577
5	0,88573	0,90229
10	0,86529	0,89943
15	0,86576	0,88877
20	0,86382	0,87331
25	0,86331	0,87609
30	0,86553	0,86832
35	0,86476	0,86907
40	0,86185	0,86716
45	0,86516	0,86902
50	0,86507	0,86416
55	0,86449	0,86604
60	0,86355	0,86469
65	0,86627	0,86384
70	0,86542	0,86676
75	0,86604	0,86653
80	0,86479	0,86592
85	0,86663	0,86503
90	0,86234	0,86465

-Pour $\lambda=470$ (nm):

-Les échantillons films :

Echantillon 1 :

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,94949	1
5	0,94571	0,95068
10	0,96375	0,93438
15	0,90738	0,93186
20	0,8675	0,92123
25	0,87961	0,90615
30	0,86706	0,85661
35	0,83876	0,83914
40	0,83795	0,83047
45	0,83501	0,83146
50	0,82823	0,82959
55	0,82847	0,83144
60	0,83167	0,83047
65	0,83173	0,83174
70	0,83044	0,8317
75	0,83012	0,83213
80	0,82919	0,83047
85	0,82952	0,8302
90	0,82919	0,83119

Echantillon 2:

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,9729	0,98992
5	0,97165	0,98055
10	0,96947	0,96631
15	0,96394	0,91912
20	0,95934	0,91844
25	0,94337	0,90855
30	0,93519	0,84955
35	0,84158	0,83541
40	0,83154	0,83109
45	0,83084	0,83164
50	0,82952	0,83024
55	0,83206	0,82934
60	0,82954	0,82987
65	0,83094	0,82897
70	0,83097	0,83259
75	0,83051	0,82997
80	0,83213	0,82892
85	0,8295	0,83032
90	0,83203	0,83328

Echantillon 3:

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,99455	0,99428
5	0,97622	0,97435
10	0,94896	0,96434
15	0,93964	0,95116
20	0,90797	0,87693
25	0,8935	0,88067
30	0,84603	0,8381
35	0,84077	0,83874
40	0,83166	0,83462
45	0,82984	0,83049
50	0,82994	0,8296
55	0,83335	0,82898
60	0,82924	0,83077
65	0,83039	0,83188
70	0,83076	0,83047
75	0,83104	0,83186
80	0,83259	0,82924
85	0,83289	0,83264
90	0,83151	0,82802

Echantillon 4 :

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,95418	0,95261
5	0,93072	0,95241
10	0,93012	0,94814
15	0,92784	0,93774
20	0,90189	0,93399
25	0,916	0,89896
30	0,84911	0,85637
35	0,83503	0,83437
40	0,83166	0,83157
45	0,83077	0,83201
50	0,82892	0,82935
55	0,83056	0,83266
60	0,83005	0,82969
65	0,83131	0,83146
70	0,83039	0,83146
75	0,83039	0,83012
80	0,83158	0,83308
85	0,82902	0,82882
90	0,83167	0,8334

-Les échantillons épais :

Pour $\lambda = 590(\text{nm})$:-

Echantillon 1 :

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,82496	0,92119
5	0,77158	0,8177
10	0,66992	0,68737
15	0,6696	0,68635
20	0,60444	0,63597
25	0,56076	0,66143
30	0,54823	0,60212
35	0,5136	0,52026
40	0,51147	0,5135
45	0,51293	0,51112
50	0,51161	0,51127
55	0,51222	0,51186
60	0,51127	0,51093
65	0,51257	0,51171
70	0,51078	0,51034
75	0,51178	0,51286
80	0,51155	0,51133
85	0,5105	0,5112
90	0,51169	0,53936

Echantillon 2:

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,83562	0,90716
5	0,79644	0,71816
10	0,71359	0,65345
15	0,81433	0,58804
20	0,66617	0,55781
25	0,57929	0,53381
30	0,53449	0,51511
35	0,52124	0,51234
40	0,51434	0,51035
45	0,51465	0,51073
50	0,51181	0,51208
55	0,51265	0,51001
60	0,51266	0,50968
65	0,51355	0,5106
70	0,51083	0,51052
75	0,50972	0,51084
80	0,51036	0,51081
85	0,51168	0,51183
90	0,5122	0,51218

Echantillon 3:

$[\theta^\circ]$	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	1	0,68862
5	0,68542	0,67882
10	0,6814	0,66009
15	0,57609	0,63519
20	0,56113	0,55632
25	0,53601	0,54302
30	0,52408	0,52014
35	0,51268	0,51554
40	0,51258	0,51
45	0,5129	0,51234
50	0,51097	0,5106
55	0,5112	0,51094
60	0,51061	0,51118
65	0,51117	0,50976
70	0,5125	0,51107
75	0,5123	0,51158
80	0,51363	0,51139
85	0,51136	0,5117
90	0,51178	0,51126

Pour $\lambda=470$ (nm):-

Echantillon 1 :

[θ°]	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,85888	0,97988
5	0,76974	0,96484
10	0,74963	0,84306
15	0,70279	0,71419
20	0,63625	0,6823
25	0,57855	0,61054
30	0,54012	0,59862
35	0,52505	0,5304
40	0,5148	0,51693
45	0,51347	0,51277
50	0,51323	0,51259
55	0,51277	0,5119
60	0,51204	0,51222
65	0,51176	0,51309
70	0,51391	0,51321
75	0,51218	0,51114
80	0,51379	0,51223
85	0,51241	0,51224
90	5,1032	0,51315

Echantillon 2:

[θ°]	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,86549	0,87227
5	0,78161	0,78966
10	0,6947	0,73883
15	0,68537	0,73644
20	0,6687	0,6747
25	0,57229	0,58798
30	0,56105	0,53924
35	0,53002	0,51967
40	0,5153	0,51451
45	0,51192	0,51377
50	0,51158	0,51189
55	0,51232	0,5114
60	0,51408	0,51108
65	0,51223	0,51368
70	0,51111	0,51255
75	0,51201	0,51176
80	0,51328	0,51421
85	0,51198	0,51171
90	0,5123	0,51312

Echantillon 3:

[θ°]	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,76158074	1
5	0,75832016	0,62964298
10	0,65640244	0,60308442
15	0,62545522	0,59109804
20	0,6186765	0,56863967
25	0,56573966	0,5520586
30	0,53140308	0,51930853
35	0,51687726	0,51919521
40	0,51382786	0,5132458
45	0,51283887	0,51345184
50	0,51185503	0,51276676
55	0,51250406	0,51200441
60	0,51240619	0,51143265
65	0,51225166	0,51154082
70	0,51319944	0,51280797
75	0,51375575	0,51275646
80	0,51135538	0,51229802
85	0,51238043	0,51414723
90	0,5134776	0,51085058

Pour $\lambda=670$ (nm):-

Echantillon 1 :

[θ°]	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,95443333	0,93590575
5	0,89322273	0,91987281
10	0,67497627	0,73393354
15	0,57392046	0,58906864
20	0,55351197	0,53627789
25	0,54506652	0,53378983
30	0,53863189	0,53168786
35	0,53525371	0,53240639
40	0,53352172	0,53241711
45	0,53464778	0,53291044
50	0,53323217	0,53292116
55	0,5331571	0,53342521
60	0,53304985	0,53287826
65	0,5354253	0,53236349
70	0,53350028	0,53287826
75	0,53234741	0,53225625
80	0,53551646	0,5326745
85	0,53308203	0,53336086
90	0,53444402	0,53152699

Echantillon 2:

[θ°]	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	0,93902655	0,91446236
5	0,86720539	0,87780107
10	0,76895936	0,63678676
15	0,56363042	0,55642363
20	0,53609558	0,53420809
25	0,53476575	0,53414374
30	0,53310347	0,53181655
35	0,53301768	0,53287826
40	0,53277102	0,53291044
45	0,53240639	0,5322777
50	0,53406867	0,5322348
55	0,53455127	0,53316246
60	0,53436359	0,53224552
65	0,53314637	0,53337158
70	0,53402577	0,53360752
75	0,53428316	0,53146264
80	0,53146264	0,53370404
85	0,53243856	0,53193452
90	0,53356462	0,53429388

Echantillon 3:

[θ°]	Polarisation (<i>p</i>)	Polarisation (<i>s</i>)
0	1	0,91446236
5	0,94382571	0,87780107
10	0,93701573	0,63678676
15	0,87878235	0,55642363
20	0,82554654	0,53420809
25	0,6606914	0,53414374
30	0,57916468	0,53181655
35	0,55307763	0,53287826
40	0,53558617	0,53291044
45	0,53327506	0,5322777
50	0,53348955	0,5322348
55	0,53310347	0,53316246
60	0,53440112	0,53224552
65	0,53436359	0,53337158
70	0,53398287	0,53360752
75	0,53532342	0,53146264
80	0,53189162	0,53370404
85	0,5321919	0,53193452
90	0,53323217	0,53429388

Bibliographie

- [1]. S.Lecler, "Etude de la diffusion de la lumière par des particules sub-microniques", Thèse de doctorat d'Etat, Université Louis Pasteur Strasbourg I Strasbourg (2005).
- [2]. R. Elalofi, "propagation du rayonnement en milieu diffusant: étude de transition entre régime balistique et régime diffusif et des fluctuations temporelles d'intensité", Thèse de doctorat d'Etat, Université de Metz. (2003).
- [3]. J.L.Contaz, " Optoélectronique Tèrahertz ", EDP science 2006.
- [4]. H. Stocker, F.Jundt, G.Guillaume, " Toute la physique", 2^{ème} tirage. Dunod édition Paris (1999).
- [5]. C.Amara, " Introduction à l'étude de la diffusion de la lumière par les rugosités par des surfaces optiques", école d'été système optique.
- [6].S.Durant, "Propagation de la lumière dans les milieux aléatoires: rôle de l'absorption, de la diffusion dépendante et du couplage surfase-volume ", Thèse de doctorat d'Etat, Ecole Centrale Paris (2003).
- [7]. B.Yavorski, A.Detlaf, "Aide mémoire de physique ", Edition AMIR, Moscow, (1980).
- [8]. Z.Silvestri, " Caractérisation physico-chimique de surface des 'étalons de masse", Thèse de doctorat d'Etat, Institut National de Métrologie octobre (2005).
- [8].H.J.MathieuA, E.Bergman, R.Gras, "Traité des matériaux : Analyse et technologie des surfaces ", Tome 4, PPUR presses polytechnique, (2003).
- [9]. N.Adjouadi, "Etude de la diffusion de la lumière par un verre sodo-calsique érodé par sablage", Thèse de Magister, IOMP (UFA) ,2003.
- [10]. A. Bedidi, B. Cervelle, "Diffusion de la lumière par des particules minérales "Cah. Orstom, sér. Pédol, vol. XXVIII, no 1, 1993 : 7-14
- [11].N.Pinel, " Etude de modèles asymptotiques de la diffusion des ondes électromagnétiques par des interfaces naturelles- Application `a une mer recouverte de pétrole - ", Thèse de doctorat ,Ecole polytechnique de l'université de Nantes (2006).
- [12].B.Wyncke, "Représentation des états de polarisation des ondes lumineuse ", EPU édition (2003).
- [13].F.Onofri, "diffusion de la lumière en mécanique de fluide", 5ème Ecole d'Automne, Vélométrie et Granulométrie Laser en Mécanique des Fluides St-Pierre d'Oléron,(2005).
- [14].M.Laug, "Traitement optique du signal et des images ", Céladues édition (1980).

- [15].D.Mondelain, "Lidar linéaire et non-linéaire dans l'infrarouge moyen", Thèse de doctorat d'état. Lyon I, (2001).
- [16].J.L.Constavi, B.Poterie, J.C.Loured et R.Martain, "Absorption et diffusion du rayonnement en milieu particulaire" Rev. Englen, Journée de thermique (2001).
- [17]. F. Koudobgo, P.F.Combes, H.J. Mamestat, "Etude des interactions entre une onde électromagnétique, un objet canonique et une surface rugueuse", Comité international de radioélectricité scientifique, (2005).
- [18] F. Koudobgo, " Etude des diffusions de surfaces et de volume par une surface rugueuse diélectrique ", Thèse de doctorat, université de Toulouse III, Paul Sabatier (2002).
- [19]. M.Garrega, " Rappel sur l'histoire et les propriétés particulières des polymères", Rubrique : matériau adaptatif pp [173-175].
- [20]. R.Dekiouk, " Etude et relation de l'influence de la vitesse de déformation sur la dimension fractale et sur la ténacité dans le cas d'un Polycarbonate", Thèse de Doctorat, Université de Metz, France, juillet (1997).
- [21]. A. Ram, "Fundamentals of polymer engineering", Ed. Plenum Press; Chapter 1; 1-3 (1997).
- [22]. P. A. Miran, F. A. Bovey, L. W. Jelinsky, "Encyclopedia of physical science and technology", Third Ed. Polymers, 857-901.
- [23].P.Combette, "physique des polymères ; structure fabrication emploi".Tome 1.Hermann Edition (2005).
- [24]. J.P.Mercier, P.Godard, "Chimie organique : une initiation", 2^{ème} Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes PPUR, (2001).
- [25]. J. Mesplede, "Thermodynamique Matériau PC ", Bréal, (2004).
- [26]. "Polyaddition," Wikipédia, l'encyclopédie libre. (2006), <<http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Polyaddition&oldid=6434897>>.
- [27]. "polymères," Microsoft® Encarta® 2006 [CD]. Microsoft Corporation (2005).
- [28]. E. Maréchal, " Polycondensation et polyaddition ", Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et composites ; A M 3 042.
- [29]. G. Odian, "Principle of polymerization", Wiley Interscience (1991).
- [30]. C. Decker, " Polymérisation sous rayonnement UV ", Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et composites ; A M 3 044.
- [31]. A. Ram, "Fundamentals of polymer engineering", Ed. Plenum Press; Chapter 2; 14-28 (1997).

- [32]. J. Verdu, "Polymérisation sous rayonnement principes ", Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et composites ; A M 3 043.
- [33]. A. Guyot, "Polymérisation ", Techniques de l'ingénieur, traité Génie des procédés, J 5 830.
- [34]. M.Garrega, "Les polymères de la molécule à l'objet ", EDP.Grenoble (1999).
- [35]. M. Fontanille, Y.Gnanou, " Chimie et physico-chimie des polymères ", Dunod, Paris, (2002).
- [36]. I. Teraoka, "Polymer Solutions: An introduction to physical properties", Wiley Interscience, 1-10 (2002).
- [37]. Peter William Atkins, Monique Monnet, Julio de Paula "Chimie Physique". 2^{ème} édition. De boeck.2004.P794.
- [38]. H.Kausch, N.Heymans, C.Plummer, P.Decroly, " Traité des matériaux - Volume 14 Matériaux polymères : propriétés mécaniques et physiques", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR) (2001).
- [39]. A .Boudet, " Voyage au coeur de la matière plastique", 1^{ère} édition, CNRS Editions (2003).
- [40].I .Stevenson, G.Seytre, G.Botteux " Comportement électrique des polymères quelques application en électronique et électrotechnique". 34 journées d'étude de polymères, Lorient, France, (2006).
- [41]. P.Combette, E .Isabelle, "Physique des polymères : propriété mécanique ", Tome 2 .PPUR (2003).
- [42].R.M.A.Azem "Ellipsometry and polarized light" North-Holland (1986).
- [43].M.boren and E.wolf "principle of optics" (1999).
- [44].J.P.Mathieu " optique électromagnétique" société d'édition d'enseignement supérieur Paris IV (1965).
- [45].E.A.Sornsini, R.A.Chipman, "Alignement and calibration of an infrared achromatic retarder using FTIR Mueller matrix spectropolarimetry", Proc. SPIE, 28-34 (1997).
- [46]. Jean-Jacques Greffet, " Diffusion par une surface rugueuse ", Ecole Supérieure d'Optique. Spécialité Optique et Photonique
- [47].F.Boulvert, G.Brun, B.Boulbry, B.Jeune, J.Cariou " Analyse de la peau par exploration polarimétrique spectrale ", Université de Bretagne Occidentale (2003).
- [48].C. Douglas. Giancoli, " Physique générale: Ondes, optique et physique moderne ", De Boeck Université, 1993
- [49]. Christian Marais, " L'âge du plastique: découvertes et utilisations", Editions L'Harmattan (2005).

