

# Rétrodiffusion cohérente de la lumière

Alexandra d'Arco

Mémoire de Master 2  
Préparation à l'agrégation  
de Physique-Chimie Option Physique



## Table des matières

I.	Rétrodiffusion cohérente .....	3
1.	Diffusion de la lumière .....	3
2.	Speckle.....	4
3.	Cône de rétrodiffusion.....	4
II.	Montage expérimental .....	5
III.	Observation .....	6
1.	Figure de speckle .....	6
2.	Figure de cône .....	7
IV.	Parallèle avec les miroirs à conjugaison de phase.....	8
V.	Conclusion .....	9
VI.	Bibliographie.....	10

## Table des figures

Figure 1 : Diffusion multiple de la lumière .....	3
Figure 2 : Diffusion simple de la lumière .....	3
Figure 3 : Longueurs caractéristiques.....	3
Figure 4 : Image de Speckle du téflon obtenue avec le montage expérimental présenté dans la partie III .....	4
Figure 5 : Diffusion multiple dans une direction .....	4
Figure 6 : Cône de rétrodiffusion cohérente .....	4
Figure 7 : Chemins direct et inverse .....	4
Figure 8 : Angle $\theta$ .....	5
Figure 9 : Cône de rétrodiffusion cohérente, correspond à une coupe d'une image de cône .....	5
Figure 10 : Analogie avec les trous d'Young.....	5
Figure 11 : Schéma du montage expérimental.....	6
Figure 12 : Photo du montage expérimental.....	6
Figure 13 : Image de Speckle obtenue avec du téflon.....	7
Figure 14 : Histogramme de l'intensité du Speckle en bleu et son fit exponentiel en rouge .....	7
Figure 15 : Image, moyenne et fit du cône de rétrodiffusion pour le papier.....	7
Figure 16 : Image, moyenne et fit du cône de rétrodiffusion pour le téflon .....	8
Figure 17 : Image, moyenne et fit du cône de rétrodiffusion pour le polystyrène .....	8
Figure 18 : Schéma explicatif d'un miroir à conjugaison de phase et comparaison avec un miroir classique .....	9
Figure 19 : Image du faisceau avec un sac plastique devant le miroir .....	9
Figure 20 : Cône de rétrodiffusion avec un sac plastique devant le milieu diffusant .....	9

## Table des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des largeurs à mi-hauteur et libres parcours moyens pour différents milieux diffusants ...	8
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

Ce rapport porte sur la rétrodiffusion cohérente de la lumière. Nous expliquerons le principe de celle-ci, après avoir rappelé le fonctionnement de la diffusion. Puis nous établirons un montage afin d'observer des cônes de rétrodiffusion cohérente dans diverses conditions expérimentales (différents milieux diffusants (papier, téflon, polystyrène)) pour ensuite faire le parallèle avec les miroirs à conjugaison de phase.

## I. Rétrodiffusion cohérente

Le phénomène de rétrodiffusion cohérente apparaît lorsque l'on envoie de la lumière sur un milieu diffusant. Nous observons une surintensité de l'onde diffusée dans la direction arrière. Pour comprendre ce phénomène, nous allons tout d'abord étudier la diffusion de la lumière.

### 1. Diffusion de la lumière

La diffusion de la lumière est un phénomène qui se produit lorsqu'une onde lumineuse traverse un milieu diffusant [1]. La lumière qui traverse la matière est dispersée dans toutes les directions. L'onde incidente, en arrivant dans le milieu diffusant, heurte les diffuseurs et se divise en une multitude d'ondes partielles. Ces ondes partielles se diffusent à leurs tours pour rencontrer les diffuseurs suivants. C'est ce que l'on appelle la diffusion multiple [2]. Sur la Figure 1 est représenté un exemple de parcours d'une onde partielle.

La direction des photons incidents est modifiée aléatoirement à chaque fois qu'ils rencontrent un diffuseur, et la direction de sortie dépend seulement du dernier diffuseur rencontré.

Il existe aussi de la diffusion simple : lorsque le photon incident rencontre un seul diffuseur et ressort immédiatement du milieu (cf Figure 2).

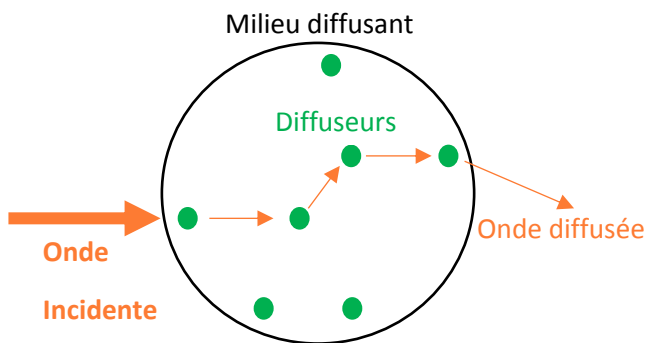


Figure 1 : Diffusion multiple de la lumière

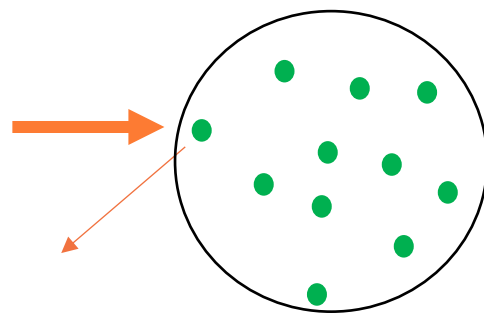


Figure 2 : Diffusion simple de la lumière

### Longueurs caractéristiques

Les longueurs caractéristiques associées à la propagation d'une onde dans un milieu diffusant sont les suivantes :

- $\lambda$  : Longueur d'onde de la lumière incidente
- $n^{-1/3}$  : Distance moyenne entre les diffuseurs
- $\sigma^{1/2}$  : Rayon de la section efficace de diffusion des diffuseurs
- $L$  : Taille du milieu diffusant

A partir de la section efficace de diffusion et de la densité de diffuseurs  $n$ , on peut définir une autre longueur caractéristique appelée libre parcours moyen de diffusion :  $l = \frac{1}{n\sigma}$ . Cette longueur représente la distance moyenne entre deux diffusions.

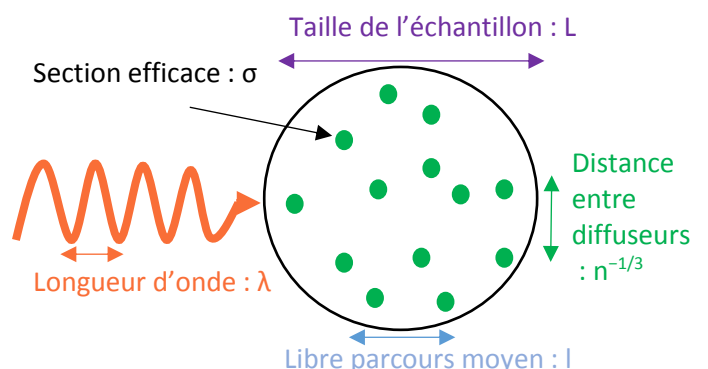


Figure 3 : Longueurs caractéristiques

## 2. Speckle

Lorsque le milieu reçoit une multitude d'ondes, chacun des photons suit un chemin spécifique, les ondes partielles ressortent dans toutes les directions. En sortie du milieu diffusant, et dans une direction donnée, les ondes interfèrent et on observe une figure d'interférence appelée le Speckle (cf Figure 4) [2]. Le Speckle est lié à la marche au hasard des photons lorsqu'on éclaire un milieu aléatoire avec une onde monochromatique. Nous observons cette figure d'interférence seulement avec une source de lumière cohérente temporellement. En effet, une source incohérente (par exemple la lumière blanche) entraîne une moyennisation sur les phases et donc l'absence d'interférences.

La lumière diffusée dans une direction précise est alors la somme des ondes partielles diffusées dans cette direction quel que soit le chemin qu'elles ont suivi dans le milieu. C'est ce qui est représenté sur la Figure 5.

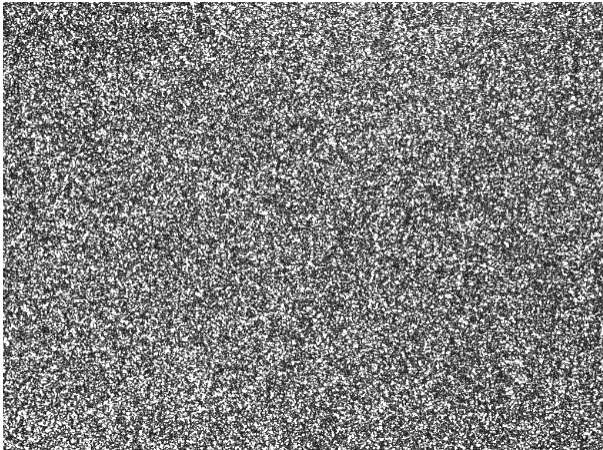


Figure 4 : Image de Speckle du téflon obtenue avec le montage expérimental présenté dans la partie III

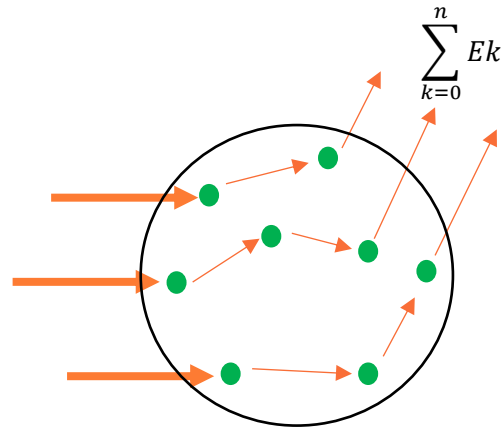


Figure 5 : Diffusion multiple dans une direction

## 3. Cône de rétrodiffusion

Si on fait la moyenne sur les différentes positions possibles pour les diffuseurs (en bougeant l'échantillon par exemple), la figure de speckle bouge, les phases des ondes se moyennent : on obtient une intensité uniforme, appelé le fond plat. Cependant, nous observons également un pic d'intensité (entouré en blanc sur la Figure 6) lorsque l'on regarde dans la direction arrière [3 - 4].

En effet, les deux vecteurs d'onde dans ce cas, présentés en bleu et orange sur la Figure 7 sont de même direction mais de sens opposé. L'onde directe et l'onde retour parcourent la même distance, la différence de marche est nulle, et nous avons alors des interférences constructives, d'où la tache de surintensité. Cependant, seule la diffusion multiple dans la direction arrière produit cet effet, la diffusion simple, elle, n'a pas d'onde retour associée.

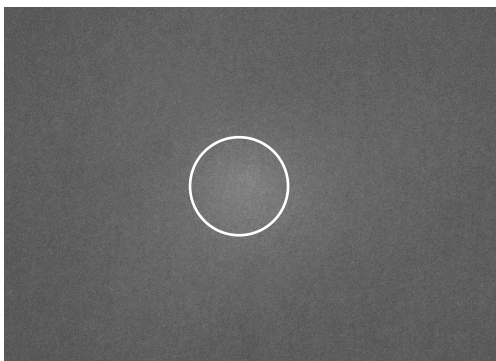


Figure 6 : Cône de rétrodiffusion cohérente

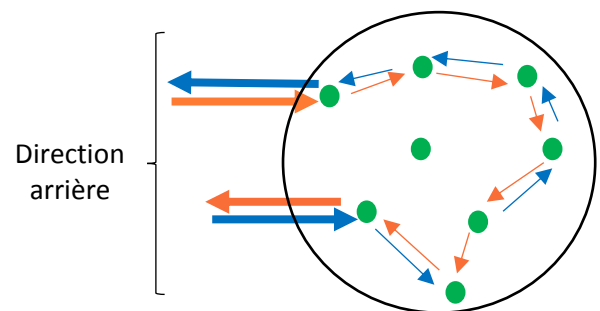


Figure 7 : Chemins direct et inverse

Si l'on trace la courbe de l'intensité en fonction de l'angle  $\theta$  (angle entre l'onde diffusée et l'onde incidente, comme on le voit sur la Figure 8), nous obtenons un pic d'intensité maximale, appelé cône de rétrodiffusion, pour  $\theta = 0$  (direction arrière).

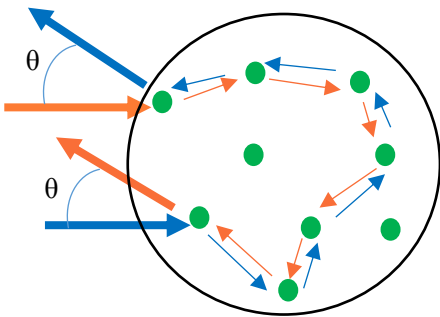


Figure 8 : Angle  $\vartheta$

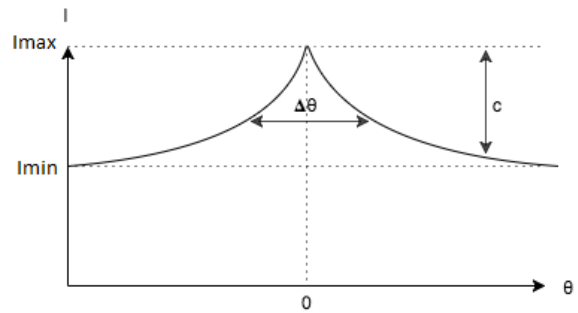


Figure 9 : Cône de rétrodiffusion cohérente, correspond à une coupe d'une image de cône

Il y a alors deux paramètres importants : le contraste des interférences et la largeur à mi-hauteur.

Le contraste est défini comme  $c = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{min}}$ . Sur la courbe de la Figure 9, c'est la hauteur du cône. Il représente à quel point on observe la différence entre le signal et le bruit. La diffusion simple participe au fond de diffusion mais pas au phénomène d'interférence puisqu'elle n'a pas d'onde retour associée. Ce facteur d'amplification est directement lié à la polarisation de l'onde incidente et celle de l'onde détectée.

La largeur à mi-hauteur, notée  $\Delta\theta$ , est donnée par la formule :  $\Delta\theta = \frac{0.7\lambda}{2\pi l}$ . Lorsque l'on mesure celle-ci sur nos courbes, nous pouvons alors avoir accès au libre parcours moyen. Si l'on fait l'analogie avec les trous d'Young, qui seraient les deux diffuseurs d'entrée et de sortie, M1 et M2 de la Figure 10, on comprend alors que la largeur à mi-hauteur dépend de la distance entre les diffuseurs. En effet, pour des trous d'Young représentés sur la Figure 10, la différence de marche est :  $\delta = \sin\theta M1M2$ . Grâce à la formule de Fresnel, et l'approximation des petits angles, l'intensité est :

$I = 2I_0(1 + \cos(2\pi\theta \frac{M1M2}{\lambda}))$ . L'interfrange est alors :  $\theta_i = \frac{\lambda}{M1M2}$ , elle dépend de la distance entre les diffuseurs.

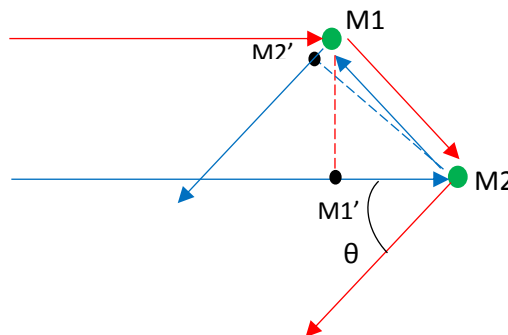


Figure 10 : Analogie avec les trous d'Young

## II. Montage expérimental

Le montage utilisé pour observer le phénomène de la rétrodiffusion cohérente est représenté sur la Figure 11. [5]. Le principe de cette expérience est d'envoyer un faisceau laser, issu d'une source monochromatique de longueur d'onde  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  (polarisé rectilignement), sur un échantillon diffuseur, pour pouvoir mesurer le cône de rétrodiffusion dans la direction arrière.

Pour cela, nous envoyons le faisceau laser sur deux miroirs M1 et M2, permettant de régler la direction et la position de celui-ci. Ensuite, nous utilisons un télescope, constitué de deux lentilles de focales  $f' = 30 \text{ mm}$  et  $f'$

= 150 mm, pour obtenir un faisceau parallèle de l'ordre de 1 cm de diamètre. Une lame séparatrice permet alors d'envoyer une partie du faisceau sur un échantillon (dans une direction différente de celle d'incidence). En l'absence de milieu diffusant, nous plaçons un miroir M3 permettant de trouver la direction de rétrodiffusion. Au retour du milieu diffusant ou du miroir, et en sortie de lame séparatrice, le faisceau laser tape alors un miroir M4 pour changer de direction et arriver sur la caméra CCD (Charge Coupled Device) (4.65 $\mu$ m/pixel), placée au foyer de la lentille d'observation ( $f' = 150$  mm), pour visualiser le faisceau en champ lointain. Lors du passage sur lame séparatrice, le faisceau transmis constitue une source de lumière parasite. Pour atténuer cette lumière, nous plaçons une densité optique à l'angle de Brewster, de manière à couper la polarisation dans le plan d'incidence.

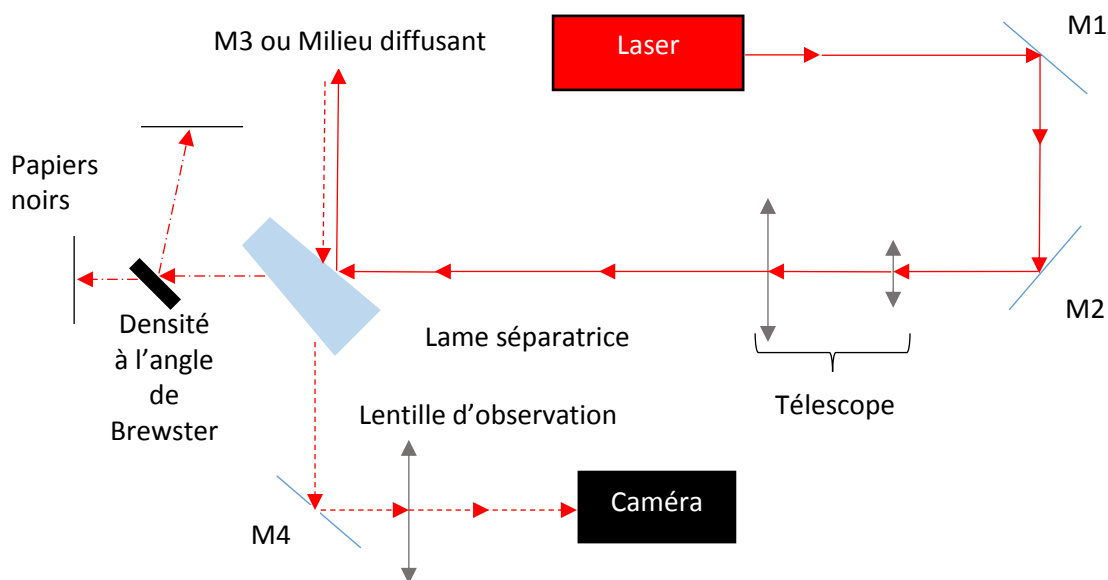


Figure 11 : Schéma du montage expérimental

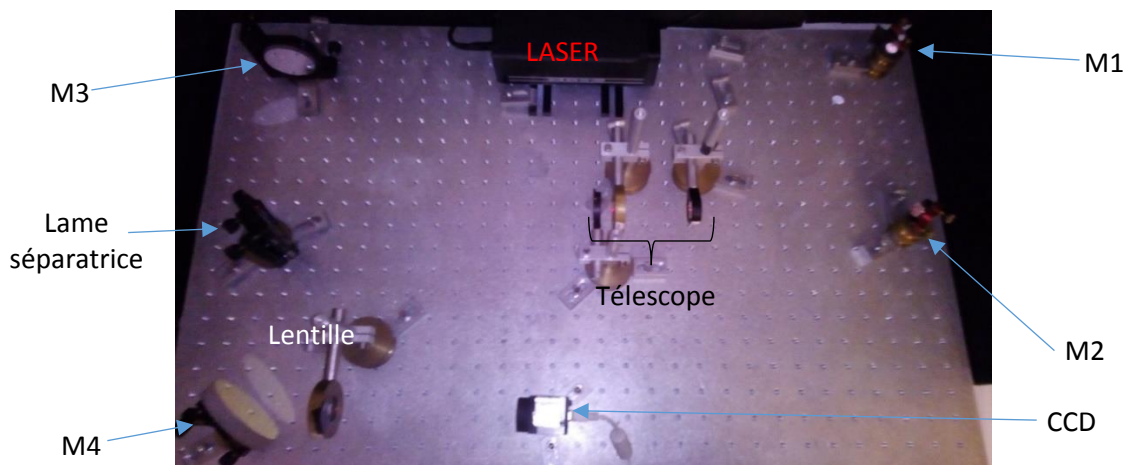


Figure 12 : Photo du montage expérimental

### III. Observation

#### 1. Figure de speckle

Lorsque l'on place un milieu diffusant statique après la lame séparatrice (pas de moyenne), nous obtenons une figure d'interférence dite de Speckle, comme sur la Figure 13. Pour vérifier que nous obtenons bien un speckle, nous faisons une coupe de l'image pour tracer l'intensité en fonction de la position des pixels de l'image. Nous soustrayons une image de fond noir (lorsque le laser est éteint, pour retirer toutes les lumières parasites que capte la caméra) et nous traçons l'historgramme des intensités. Nous devons obtenir une exponentielle décroissante car c'est une propriété du speckle. Sur la Figure 14 est représentée la courbe



expérimentale superposée d'un ajustement exponentiel. Malgré le bruit, la courbe suit bien une exponentielle décroissante. L'image est donc bien une figure de Speckle [3-4].

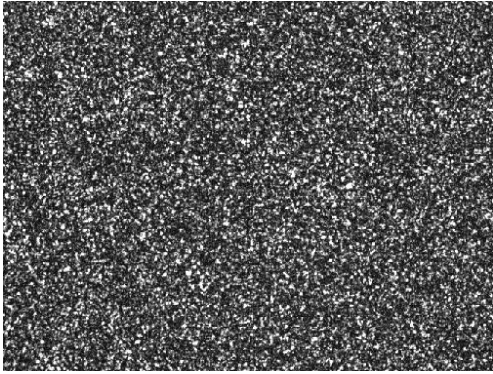


Figure 13 : Image de Speckle obtenue avec du téflon

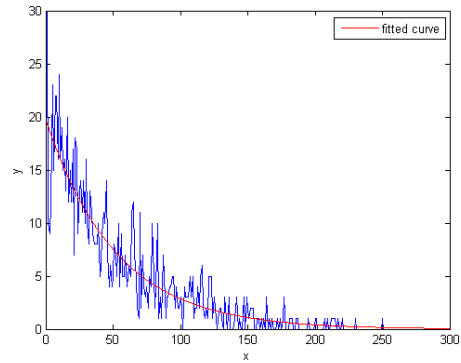


Figure 14 : Histogramme de l'intensité du Speckle en bleu et son fit exponentiel en rouge

## 2. Figure de cône

Lorsque l'on moyenne sur les positions possibles des diffuseurs (en bougeant l'échantillon) nous obtenons une image de cône de rétrodiffusion. Les images avec comme milieu diffusant du papier, du téflon ou du polystyrène sont sur les Figure 15, Figure 16 et Figure 17.

Grâce au logiciel MATLAB, nous créons un programme qui effectue une moyenne angulaire au niveau du pic de surintensité, trace l'intensité en fonction de l'angle et calcule ensuite le contraste. La deuxième image des figures représente les résultats du programme pour une image de cône de rétrodiffusion avec du papier, du téflon et du polystyrène. Pour ensuite obtenir la largeur à mi-hauteur, nous utilisons le logiciel IGOR. Nous modélisons la courbe par la fonction décrivant le cône de rétrodiffusion au niveau des ailes de celui-ci et par une fonction linéaire au niveau du pic du cône. La fonction qui décrit le cône de rétrodiffusion cohérente est la suivante :

$$I(\theta) = 0.41 \frac{1}{(1 + kl\theta)^2} \left( 1 + \frac{1 - \exp(-1.42kl\theta)}{kl\theta} \right)$$

Cette fonction est issue des thèses [2] et [4]. Nous n'ajustons pas toute la courbe par cette fonction car la forme du pic dépend du libre parcours moyen et de la géométrie du milieu. Nous modélisons le pic par une fonction linéaire, comme nous le voyons sur la dernière image des figures ci-dessous.

### a) Papier

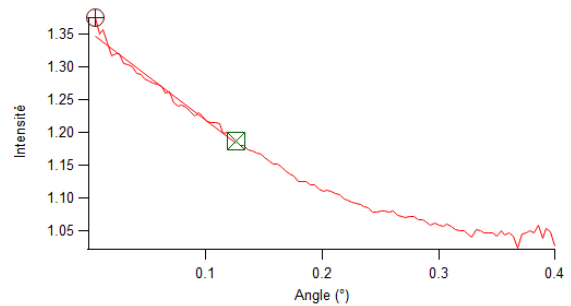
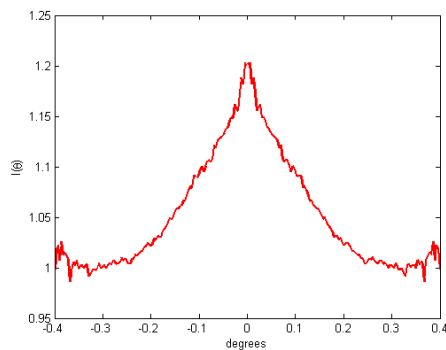
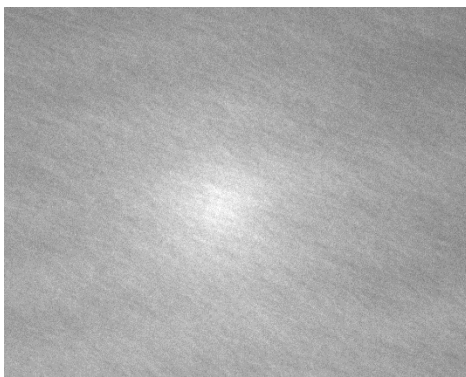


Figure 15 : Image, moyenne et fit du cône de rétrodiffusion pour le papier

$c = 0.2198$  ,  $\Delta\theta = 4.5674$  mrad, rapport signal sur bruit  $\approx 4$ .

b) Téflon

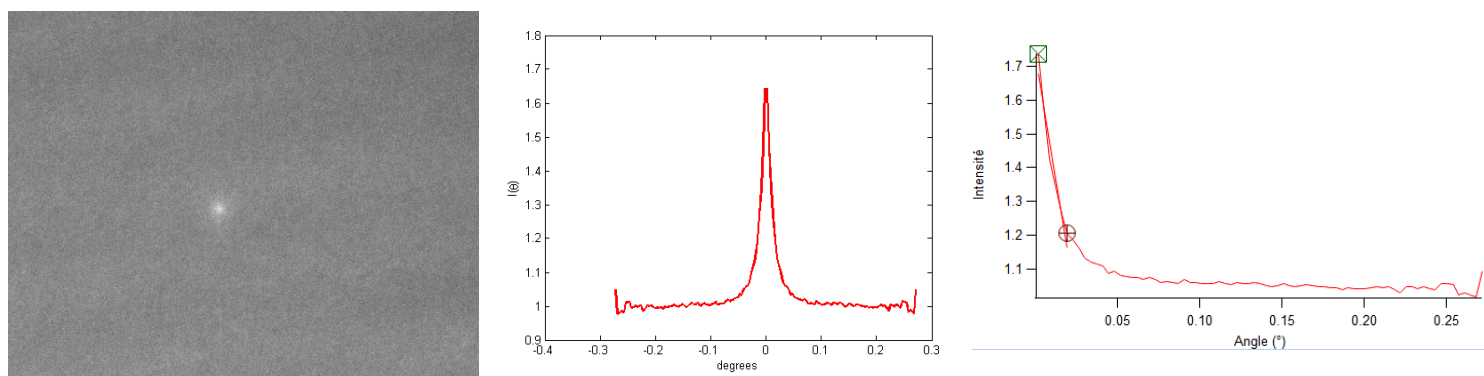


Figure 16 : Image, moyenne et fit du cône de rétrodiffusion pour le téflon

$c = 0.6435$ ,  $\Delta\theta = 0.4382$  mrad, rapport signal sur bruit  $\approx 13$ .

c) Polystyrène

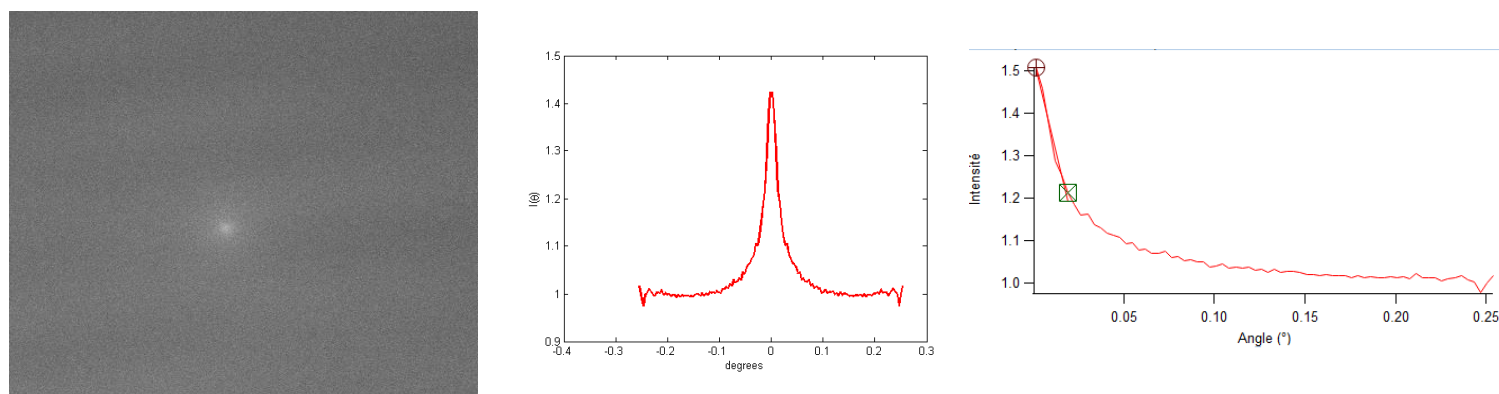


Figure 17 : Image, moyenne et fit du cône de rétrodiffusion pour le polystyrène

$c = 0.4325$ ,  $\Delta\theta = 0.5329$  mrad, Rapport signal sur bruit  $\approx 12$ .

Nous observons que la largeur du cône change avec le milieu diffusant. Le papier possède la largeur de cône la plus importante, le libre parcours moyen  $y$  est donc plus faible contrairement au téflon ou au polystyrène qui ont une largeur à mi-hauteur plus faible et donc un libre parcours moyen plus important [6].

Milieu diffusant	Largeur à mi-hauteur	Libre parcours moyen
Papier	$4.5674 \pm 0.1388$ mrad	$0.1544 \pm 0.0047$ $\mu\text{m}$
Téflon	$0.4382 \pm 0.0053$ mrad	$0.1609 \pm 0.0019$ mm
Polystyrène	$0.5329 \pm 0.0045$ mrad	$0.1323 \pm 0.0011$ mm

Tableau 1 : Récapitulatif des largeurs à mi-hauteur et libres parcours moyens pour différents milieux diffusants

La valeur du libre parcours moyen est utile pour vérifier l'homogénéité d'un milieu. Cette méthode de détermination du libre parcours moyen par rétrodiffusion cohérente est utilisée dans l'industrie pour vérifier l'homogénéité de milieu, notamment du lait.

## IV. Parallèle avec les miroirs à conjugaison de phase

La conjugaison de phase est une transformation physique d'un champ d'onde pour laquelle l'onde résultante a une direction de propagation inverse mais conserve son amplitude et sa phase. Un miroir de conjugaison de phase renvoie donc un faisceau sur lui-même et transforme la phase de l'onde en son opposé. Ainsi, après être passée deux fois par un milieu non homogène (défaut de phase sur la Figure 18), l'onde retrouve son amplitude et sa phase. Le miroir compense la phase contrairement à un miroir classique qui la double. C'est ce que nous



voyons sur la Figure 18. Ce dispositif permet donc une rectification des fronts d'onde déformés lors de leur propagation dans un milieu inhomogène.

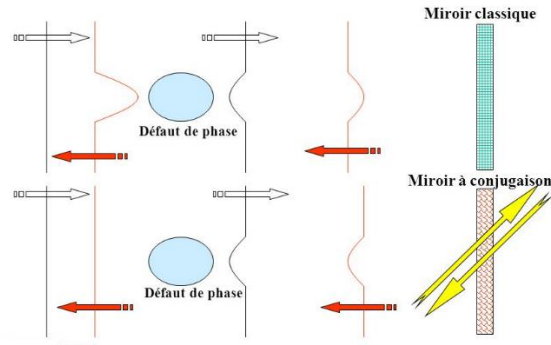


Figure 18 : Schéma explicatif d'un miroir à conjugaison de phase et comparaison avec un miroir classique

Grâce à notre montage, nous pouvons faire le parallèle avec les miroirs à conjugaison de phase. En effet, lorsque nous plaçons un milieu non homogène (un sac plastique par exemple) après la lame séparatrice et avant le miroir, nous observons avec difficulté le faisceau retour sur la caméra (cf Figure 19). Cependant, lorsque nous plaçons notre milieu diffusant (ici du polystyrène) devant le miroir et après le sac plastique, et que nous moyennons sur les configurations, nous observons de nouveau le cône de rétrodiffusion, comme si il n'y avait pas de sac plastique. C'est ce que nous voyons sur la Figure 20 [7].



Figure 19 : Image du faisceau avec un sac plastique devant le miroir



Figure 20 : Cône de rétrodiffusion avec un sac plastique devant le milieu diffusant

L'ajout de milieu diffusant permet donc une rectification des fronts d'onde déformés lors de leur propagation dans un milieu inhomogène (ici, le sac plastique), comme les miroirs à conjugaison de phase. Puisque nous moyennons sur la position des diffuseurs, nous pouvons appeler ce montage miroir à conjugaison de phase moyenne. [8]

## V. Conclusion

Au fil de ce mémoire, nous avons étudié le phénomène de rétrodiffusion cohérente à partir de la diffusion standard. Puis nous nous sommes intéressés à un montage permettant d'observer le cône de rétrodiffusion cohérente, et cela, sur différents milieux diffusants. Le but était d'obtenir le libre parcours moyen des diffuseurs dans ces milieux, utile notamment dans l'industrie pour vérifier l'homogénéité de différents milieux. L'ajout d'un milieu à défaut de phase (le sac plastique) au montage, permet la rectification des fronts d'onde déformés lors de leur propagation dans un milieu inhomogène, soulignant alors l'analogie avec les miroirs à conjugaison de phase.

## VI. Bibliographie

1. Cagnac, B., Faroux, J.P. *Laser : Interaction lumière-atomes*. 2002. Savoirs actuels. Série Physique , ISSN 1255-0175.
2. Bidet, Yannick. *Piégeage et refroidissement laser du strontium : étude de l'effet des interférences en diffusion multiple*. 2002. Chapitre 2.1, pages 155-203. (Thèse)
3. Labeyrie G., Kaiser R., Müller CA., Wiersma DS. and Miniatura Ch., *Observation of coherent backscattering of light by cold atoms*. 2000, Journal of Optics B
4. Chanelière, Thierry. *Diffusion multiple cohérente avec atomes froids de strontium : effet de la saturation sur la rétrodiffusion cohérente, piège magnéto-optique sur raie étroite*. 2004. Chapitre 1.1, pages 17-23. (Thèse)
5. Douja, Estuardo, Antoine. *Vulgarisation sur le thème de la diffusion de la lumière*. 2017.
6. Kastler, Alfred. *La diffusion de la lumière par les milieux troubles : Influence de la grosseur des particules*. 1952, Hermann. ISSN 0365-6861.
7. Moriya, Shiozaki, Kaiser. *Coherent backscattering of inelastic photons from atoms and their mirror images*. 2016, Physical Review A
8. Kaiser, Robin. *Miroir de conjugaison de phase moyenne*. 2004 (Note interne)