

AUTOMATISATION D'UNE MÉTHODE ACOUSTOOPTIQUE POUR LE CONTRÔLE DES VARIATIONS DE L'INDICE DE RÉFRACTION D'UN LIQUIDE

K. FERRIA, S. ABDEREZAG et N. LAOUAR

Laboratoire d'Optique Appliquée, Département d'Optique et Mécanique de Précision

Université Ferhat Abbas – Sétif

E-mail : ferria_k@yahoo.fr

RÉSUMÉ : Nous présentons dans ce travail une nouvelle méthode de mesure de l'indice de réfraction d'un liquide transparent basée sur l'interaction acoustooptique. La propagation des ondes ultrasonores dans un milieu transparent perturbe ce dernier, l'interaction d'un faisceau laser avec ce milieu perturbé provoquant la diffraction de la lumière incidente. Derrière la cellule acoustooptique, un doublet constitué d'une lentille convergente en verre, et d'une lentille liquide divergente; laquelle représente le liquide échantillon; assure la transformée de Fourier spatiale du faisceau lumineux sortant de la cellule. Sur le plan Fourier, apparaît le spectre de diffraction. La mesure de la distance entre les taches de diffraction, au moyen d'une webcam, permettra la détermination de la distance focale équivalente du doublet et ainsi remonter pour mesurer l'indice de réfraction du liquide échantillon. L'imprécision atteinte dans ce cas est de l'ordre de 5.10^{-3} . Néanmoins, cette méthode nécessite chaque fois le déplacement de la caméra pour toute variation du liquide échantillon, ce déplacement induisant par la suite des erreurs de localisation du plan focal, ce qui engendre un effet néfaste sur la mesure de l'indice de réfraction. En vue d'automatiser cette méthode, on a besoin de fixer la caméra et éviter ainsi l'intervention manuelle en mesurant non pas la distance entre les ordres de diffraction, mais le diamètre de la tache diffractée.

MOTS CLÉS : diffraction acoustooptique, réfractométrie des liquides

1/ Introduction

La vitesse de propagation dans le vide d'un rayonnement électromagnétique est une constante indépendante de la fréquence. Mais, lorsque ce rayonnement pénètre dans un milieu matériel, il y subit, au cours de sa propagation, des interactions avec la matière produisant des effets variés d'absorption, de diffusion, de polarisation et de réduction de vitesse, qui, eux dépendent de la fréquence. [1]

La réfractométrie est l'ensemble des techniques optiques de mesure de l'indice de réfraction d'un milieu matériel, défini comme le rapport de la vitesse du rayonnement dans le vide à sa vitesse dans le milieu considéré. [1]

Ajouté à son usage classique pour déterminer les caractéristiques réfringentes des matériaux vitreux ou cristallins entrant dans la composition des systèmes optiques, et du fait que l'indice de réfraction d'un corps dépend de son état physique (gazeux, liquide, visqueux, solide) ainsi que de sa composition chimique, la réfractométrie est aussi susceptible d'apporter une aide dans des processus de production des composants élaborés par les industries chimiques et alimentaires. [1]

Plusieurs méthodes de mesure de l'indice de réfraction des liquides sont mises en œuvre telles que les réfractomètres basés sur la mesure de la déviation ou de l'angle limite d'un faisceau lumineux incident, les interférences, les fibres optiques, sans oublier les méthodes acoustooptiques qui peuvent avoir un apport considérable dans le domaine des mesures suscitées.

L'objectif de ce travail est de présenter une méthode basée sur la diffraction de la lumière par un réseau acousto-optique, permettant la mesure et le contrôle automatique des fluctuations de

l'indice de réfraction d'une solution liquide, dues à une variation de température, de concentration,... etc.

2/ Principe de la méthode

La mesure de l'indice de réfraction par la méthode acousto-optique a été déjà mise au point par la ref. [2] elle consiste à mesurer la distance entre les ordres de diffraction au niveau du plan focal de la lentille liquide.

Le changement du liquide échantillon nécessite un déplacement de la caméra, ce qui rend la méthode manuelle et entraîne par la suite des erreurs sur la valeur mesurée de l'indice de réfraction voir fig.1 :

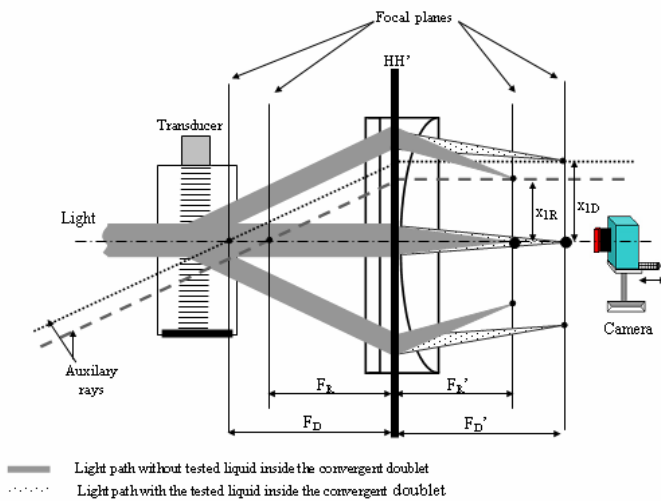


Fig. 1 Déplacement de la camera dans la direction z pour l'enregistrement du spectre de diffraction

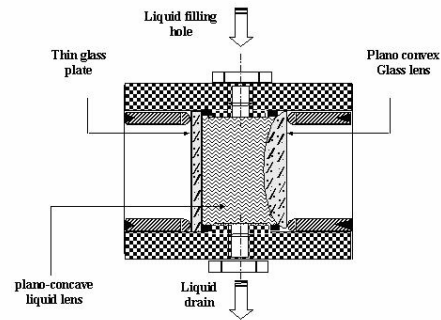


Fig. 2. Doublet convergent comportant la lentille liquide

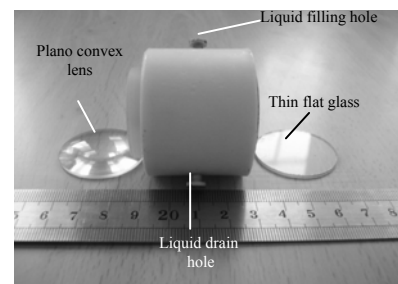


Fig. 3. Image du doublet convergent

L'indice de réfraction est déterminé dans ce cas par la relation suivante :

$$n(\lambda) = r \left(\frac{1}{x_{1D}} - \frac{1}{x_{1R}} \right) \frac{\lambda f_a}{V_a} + 1 \quad (1)$$

r : rayon de courbure de la lentille liquide

x_{1D} : position spatiale du premier ordre de diffraction avec lentille liquide

x_{1R} : position spatiale du premier ordre de diffraction sans lentille liquide.

V_a : Vitesse acoustique.

λ : longueur d'onde du faisceau lumineux.

f_a : fréquence acoustique

le principe d'automatisation de la mesure de l'indice de réfraction est illustré par la figure suivante :

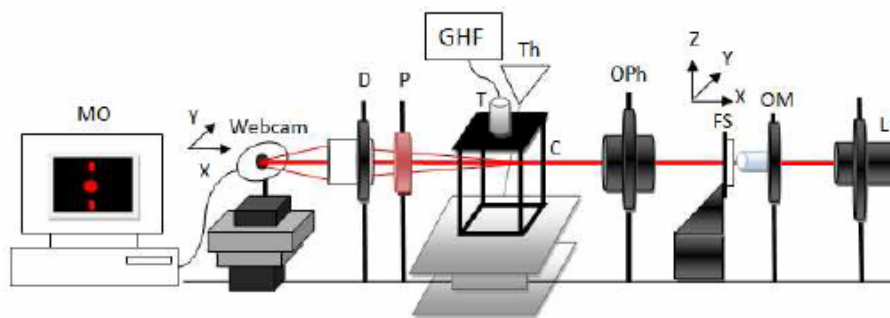


Fig.2 : Montage expérimental.

L : Laser He-Ne, OM : Objectif du microscope, FS : Filtre spatial de diamètre 20 μ m monté sur une table de translation x,y,z, OPh : Objectif photographique, C : Cuvette, Th : Thermomètre, T : Transducteur, GHF: Générateur de haute fréquence, P : Polariseur, D : Doublet convergent, Webcam : montée sur une table de translation x,y, Mo : Micro-ordinateur.

La lumière issue d'un laser He-Ne est focalisée par un objectif de microscope (OM) sur un filtre spatial (FS) de diamètre 20 μ m afin d'éliminer la lumière parasite, (FS) se trouve dans le plan focal objet d'un objectif photographique (OPh). L'association de (OM) et (OPh) permet d'avoir un faisceau lumineux cylindrique et d'intensité uniforme le long de la section.

La lumière traverse ensuite une cellule (C) en verre, contenant de l'eau distillée servant comme un milieu de propagation des ultrasons qui sont émises par un transducteur piézoélectrique (T). Cette propagation donne naissance à la formation d'un réseau de phase actif.

La lumière sortante subit alors le phénomène de diffraction qu'on peut observer à l'infini. Un polariseur (P) est placé derrière la cellule (C) afin d'ajuster l'intensité lumineuse et éviter ainsi la saturation de la caméra.

Le doublet convergent (D) contenant le liquide échantillon est placé derrière (P), pour assurer dans son plan focal la transformée de Fourier de la lumière traversant la cellule acousto-optique.

Au niveau du point focal du doublet est placée une webcam, qui est à son tour reliée à un micro-ordinateur (MO) pour le traitement des images obtenues.

La température est contrôlée par un thermomètre immergé dans la cellule (C).

2-1/Travail préliminaire

Avant d'entamer la mesure de l'indice de réfraction, on doit déterminer en premier lieu une relation théorique entre le diamètre de la tache de diffraction mesurée et le déplacement de la camera comme s'est montré sur la fig.3 :

Les images du spectre de diffraction (fig.4) sont prises pour une fréquence acoustique de 10 MHz et un diamètre du faisceau laser de 5mm.

Le diamètre de la tache de diffraction est mesuré au moyen du logiciel Image-Pro Plus en traçant le cercle, par le choix de 3 points sur le contour de la tache. voir fig.4

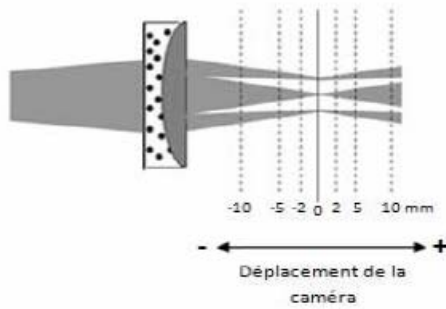


Fig.3: Schéma montrant le déplacement de la caméra le long de l'axe optique.

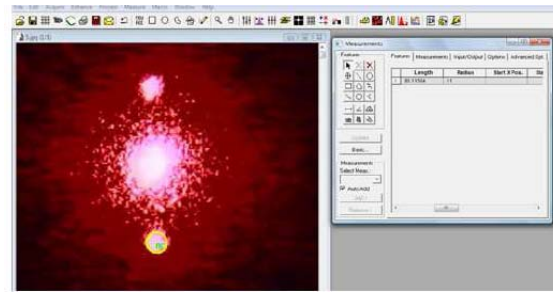


Fig.4: Principe de mesure du diamètre de la tache de diffraction.

La courbe présentant le diamètre de la tache de diffraction en fonction du déplacement de la camera est présenté sur la fig.5

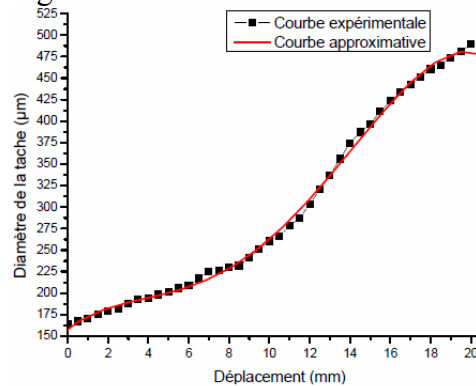


Fig.5 : Diamètre de la tache de diffraction en fonction du déplacement

La relation mathématique polynomiale la plus proche des valeurs expérimentales (un degré de similitude est de 99,8%) donnant le diamètre (D) en fonction du déplacement(d), est obtenue en faisant un fitting, elle est donnée comme suite :

$$D=A+B_1d +B_2d^2+B_3d^3+B_4d^4 \quad (2)$$

D : Diamètre de la tache de diffraction de l'ordre (-1) en (µm).

d : Déplacement de la caméra dans le sens positif en (mm).

A =158,69464 ; **B₁**=17,29409 ; **B₂** = - 3,43335 ; **B₃** =0,37962 .

2-2 / Relation entre le changement du diamètre de la tache et l'indice de réfraction

La différence entre les distances focales du doublet contenant le liquide à étudier (f'_{D2}) et le doublet

contenant l'eau distillée (f'_{D1}) (prise comme référence), représente le premier pas sur le chemin de la détermination de l'indice de réfraction.

$$\Delta f=f'_{D2}-f'_{D1} \quad (3)$$

avec :

$$\frac{1}{f'_{D2}} = \frac{1}{f'_{Lq}} + \frac{1}{f'_l} \quad (4)$$

f'_{Lq} : distance focale de la lentille liquide à étudier

f'_l : distance focale de la lentille en verre

$$\frac{1}{f'_{D1}} = \frac{1}{f'_{eau}} + \frac{1}{f'_l} \quad (5)$$

f'_{eau} : distance focale de la lentille liquide (eau distillée)...

Donc la distance focale de la lentille liquide échantillon peut être obtenue en remplaçant les relations (4) et (5) dans (3)

$$\hat{f}_{Lq} = \frac{\Delta \hat{f} \left(1 + \frac{\hat{f}_{eau}}{\hat{f}_l}\right) + \hat{f}_{eau}}{1 - \Delta \hat{f} \left(1 + \frac{\hat{f}_{eau}}{\hat{f}_l}\right) \frac{1}{\hat{f}_l}} \quad (6)$$

D'après la relation de conjugaison des lentilles minces

$$\frac{1}{\hat{f}_{Lq}} = (n_{Lq} - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (7)$$

Et comme ($R_1 = \infty$), l'indice du liquide échantillon est alors :

$$n_{Lq} = \frac{-R_2}{\hat{f}_{Lq}} + 1 \quad (8)$$

En remplaçant \hat{f}_{Lq} par sa valeur, l'indice sera comme suit :

$$n_{Lq} = 1 + (-R_2) \frac{1 - d \cdot C \cdot \frac{1}{\hat{f}_l}}{d \cdot C + \hat{f}_{eau}} \quad (9)$$

R_2 : Rayon de courbure de la lentille, $R_2 = 40,95\text{mm}$.

$$C = 1 + \frac{\hat{f}_{eau}}{\hat{f}_l} \quad (10)$$

$$\hat{f}_{eau} = \frac{\hat{f}_{D1} \times \hat{f}_l}{\hat{f}_l - \hat{f}_{D1}} \quad (11)$$

$$\hat{f}_{D1} = \frac{x_{D1} \cdot v_a}{\lambda \cdot f_a} \quad (12)$$

$$\hat{f}_l = \frac{x_l \cdot v_a}{\lambda \cdot f_a} \quad (13)$$

Pour valider cette méthode, on a mesuré l'indice de réfraction de quelques liquides par la mesure de la variation du diamètre de la tache de diffraction, en appliquant la relation (9)

Tableau 1 : Valeurs de l'indice de réfraction de quelques liquides mesurées pour une température de 25° et une longueur d'onde de 632.8nm

Liquide	L'indice de réfraction (selon notre travail)	L'indice de réfraction (selon la référence[23])
Eau distillée	1,327	1,33128
Ethanol	1,361	1,35867
Acétone	1,355	1,35563

3/ Application de cette méthode pour le contrôle de l'indice de réfraction :

3.1/ Variation de l'indice de réfraction en fonction de la concentration :

Dans cette expérience on a réalisé le montage de la fig.2 pour une température de 25°C et une fréquence de 10MHz.

Plusieurs solutions salées avec différentes concentrations ont été préparées,

En mesurant le diamètre de la tache de diffraction on peut extraire l'indice de réfraction pour chaque concentration. En commençant par l'eau distillée ensuite 1% de sel pour voir la sensibilité de la méthode puis on élève la quantité du sel jusqu'à une valeur de 22%, avant la saturation de la solution.

L'indice de chaque solution est aussi mesuré par le réfractomètre d'Abbé pour une éventuelle comparaison des deux courbes en fonction de la concentration.

La figure suivante présente les valeurs de l'indice de réfraction mesurées par les deux méthodes :

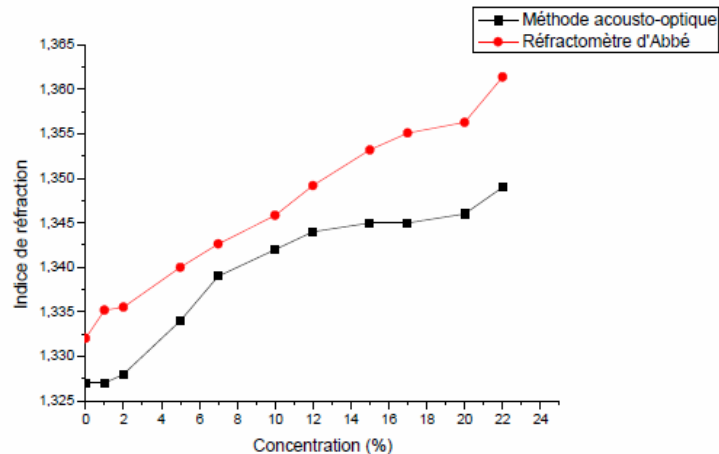


Fig.6: Variation de l'indice de réfraction en fonction de la concentration.

Les deux courbes ayant la même allure; l'indice de réfraction augmente avec l'augmentation de la concentration.

Les valeurs de l'indice calculées par la méthode acousto-optique pour une longueur d'onde de $\lambda=632,8\text{nm}$ sont inférieures à celles du réfractomètre d'Abbé mesurées pour une longueur d'onde de la raie D ($\lambda=589\text{nm}$), ce qui est en accord avec les résultats de l'étude théorique.

La différence entre les deux mesures est de l'ordre du $1/100^{\text{eme}}$

3.2/ Variation de l'indice de réfraction d'une solution en fonction de la concentration en sel, tout en coulant dans le temps :

Le montage réalisé est celui de la fig.2. Cette expérience consiste à faire passer un liquide de différentes concentrations inconnues à travers le dispositif porte échantillon, voir fig.7

Pour vérifier la vitesse de réponse de la méthode acousto-optique pour toute variation de la concentration, on ajoute à chaque fois une solution plus concentrée que la précédente. L'écoulement du fluide est arrêté après chaque 10 s, pour permettre la stabilisation de l'image qui est ensuite captée puis stockée. Cette opération est effectuée pour 6 concentrations différentes de sel en commençant et en terminant par l'eau distillée .

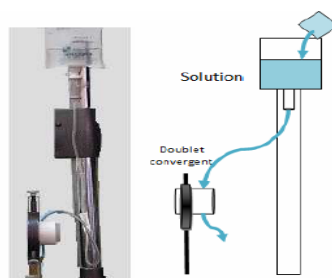


Fig.7 : Principe d'écoulement du liquide à l'intérieur du doublet convergent.

Les valeurs de l'indice de réfraction obtenues en fonction du temps d'écoulement sont présentées sur la figure suivante :

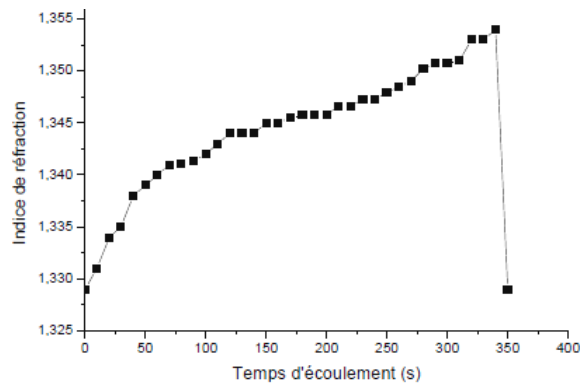


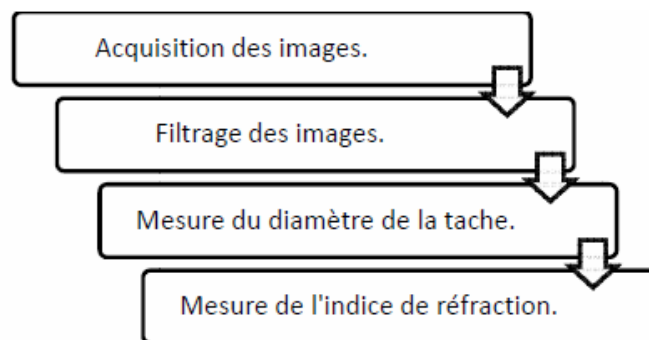
Fig.8 :Variation de l'indice de réfraction d'une solution salée en fonction du temps d'écoulement.

La courbe montre que l'indice de réfraction varie avec le changement de la concentration dès les premières 10s d'écoulement, ce qui confirme que la méthode acousto-optique est sensible à la variation de la concentration même pour des petits intervalles du temps.

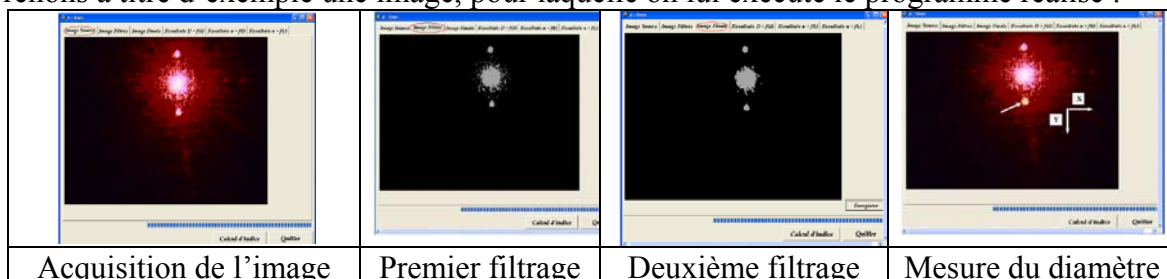
4/ Automatisation de la mesure

Cette partie consiste à réaliser un logiciel en C++ Builder pour calculer l'indice de réfraction, en se basant sur la mesure directe de la variation du diamètre de la tache de diffraction, sans faire bouger la camera, ce qui ouvre la porte à contrôler la fluctuation de l'indice de réfraction d'un liquide due à une variation de température, de pression, de concentration .etc...

Pour cela l'opération passe par plusieurs étapes selon l'organigramme suivant :

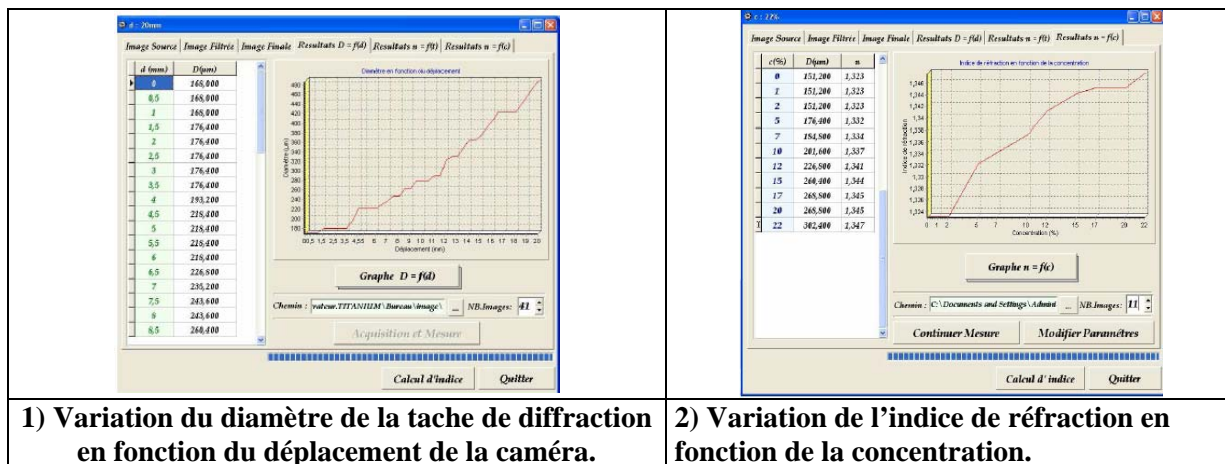


prenons à titre d'exemple une image, pour laquelle on lui exécute le programme réalisé :



4.1/ Automatisation de la mesure pour quelques expériences :

Pour montrer l'utilité de notre logiciel à déterminer l'indice de réfraction des liquides quelque soit les conditions de mesure ; variation de température et de pression, agents polluant..., on a essayé d'automatiser quelques expériences déjà effectuées manuellement :



CONCLUSION

Dans cette expérience, nous avons utilisé une lentille liquide placée entre une lame à faces parallèles et une lentille convergente en verre. Le doublet convergent obtenu est placé juste derrière une cellule acousto-optique, et nous permet d'obtenir la transformée de Fourier spatiale, sur son plan focal, du faisceau lumineux sortant de la cellule.

L'exploitation du spectre de diffraction nous permet de remonter pour mesurer l'indice de réfraction de la lentille liquide, le changement d'un autre liquide échantillon, conduit au changement du plan de Fourier, ce qui par la suite nécessite le déplacement du plan de détection.

Le besoin d'un contrôle continu de l'indice de réfraction nous a conduit à utiliser non pas la fréquence spatiale pour la mesure de l'indice, mais le diamètre de la tache de diffraction, ce qui nous évite l'intervention manuelle pour déplacer le plan de détection et rend la mesure automatique.

Sur cette idée un logiciel en C++ a été mis au point pour répondre à cette exigence. Pour valider ce logiciel, on a changé plusieurs paramètres du liquide échantillon tel que : la concentration en sel, la température, pour lesquels on a observé le comportement de l'indice de réfraction.

Les résultats obtenus comparés à d'autres, tirés de plusieurs références, sont très satisfaisantes.

D'autres travaux dans le futur sont nécessaires, pour affiner et augmenter la résolution de cette méthode pour des faibles valeurs de l'indice de réfraction, et permettre ainsi une mesure sur une ligne industrielle.

Bibliographie

- [1] C. VÉRET, «*Réfractométrie*», Technique de l'ingénieur, R 6 300, pp1-12,2000.
- [2] K. FERRIA, N. BOUAOUADJA, N. LAOUAR «*Acoustooptics method for liquids refractive index measurement*», the 10th School on Acousto-Optics and Applications,12-15 May 2008
- [3] W. BENENSON, J. W.HARRIS, H. STOCKER, H. LUTZ, «*Handbook of physics*»,4eme edition, Horst St_cker, p 345, 200
- [4] S. NEMOTO, «*Measurement of the refractive index of liquid using laser beam displacement*», Applied optics,Vol .31, No.31, pp 6690-6692, 1992.
- [5] A.L. CHAUDHARI, A.D. SHALIGRAM, «*Multi-wavelength optical fiber liquid refractometry based on intensity modulation*», Sensors and Actuators, pp 160-162,2002.
- [6] Yin-ping Miao, Bo Liu, Qi-da Zhao, «*Refractive index sensor based on measuring the transmission power of tilted fiber Bragg grating*»,Optical Fiber Technology 15,pp 233-234,2009.
- [7] Sheng-Hua Lu, Shan-Peng Pan, Tzong-Shi Liu, Ching-Fen Kao «*Liquid refractometer based on immersion diffractometry*»,Optics Express,Vol.15, No. 15,pp 9471-9472,2007.