

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF
(ALGERIE)**

MEMOIRE

Présenté à l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision

Pour l'Obtention du Diplôme de

MAGISTER

En Optique et Mécanique de Précision

Option: Optique Appliquée

Par

M^{me} MIHOUBI Karima

THEME

**APPLICATION DES TECHNIQUES INTERFÉROMÉTRIQUES
POUR LE CONTRÔLE DES MILIEUX OPTIQUES**

Soutenu le :29-09-2011 devant la commission d'examen:

Pr: Dj. BOUZID

Prof à l'université de Sétif

Président

Dr: A. MEDJAHED

M.C à l'université de Sétif

Rapporteur

Pr: M. BOUAFIA

Prof à l'université de Sétif

Examineur

Dr: S. DJABI

M.C à l'université de Sétif

Dr: A. MANALLAH

M.C à l'université de Sétif

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah tout puissant de m'avoir donné la force, le courage et la patience de mettre en œuvre ce modeste travail.

Le travail présenté dans ce manuscrit a été réalisé au sein du laboratoire d'optique appliqué de l'institut d'optique et de mécanique de précision de l'Université de Sétif.

Ma très vive gratitude va à mon encadreur Dr : A. MEDJAHED. Ses encouragements et ses conseils appréciables ont apportés un secours pour la réussite de ce travail. Je tiens à lui exprimer également mon profond respect pour son soutien, sa patience ainsi que sa générosité.

Je remercie vivement en particulier monsieur H.BENCHEIKH pour son aide précieuse, pour ses conseils, ses remarques et sa persévérance.

Je tiens à remercier aussi tout les techniciens et ingénieurs des laboratoires de l'institut d'optique et de mécanique de précision pour leurs accueils et leurs aides surtout: Z.MDJANEH, T.ben nouiwa, I.TWAFAK, Ayachi, Kamel, Chawki et Mabrouk.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à Monsieur **Dj. BOUZID** professeur à l'université Ferhat Abbas de Sétif, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

Mes remerciements vont également à Messieurs : **M. BOUAFIA** professeur à l'université Ferhat Abbas de Sétif, **S. DJABI** et **A. MANALLAH** Maitres de conférences (A) à l'université Ferhat Abbas de Sétif, qui ont accepté d'être examinateurs de ce travail.

Ce mémoire n'aurait pas pu s'écrire sans l'appui moral de ma famille, de mes amis et de mes collègues. Qu'ils trouvent ici mes sincères remerciements surtout RANIA.

Enfin, ma reconnaissance va également à toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu collaborer durant cette durée. J'ai conscience que les discussions que j'ai eues avec eux, ont apporté de près ou de loin un plus à ce travail.

-Merci bien-

K.M

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A ceux qui me sont les plus chers au monde....

A ceux qui brûlaient une bougie pour illuminer mes chemins ténébreux...

A ceux qui sont synonyme de sacrifice, de générosité, d'affection et d'amour....

Mes très chers parents pour tout ce qu'ils ont investis comme sacrifices pour me voir un jour ce que je suis.

A mes très chères sœurs : Farida et Nawal.

A mes très chers frères : Adel et mounir.

A ma sœur et amie Rania.

A mon mari Khaled.

A mes cousins et cousines.

A tous mes oncles et leurs femmes.

A mes tantes : Zahira et Fouzia

A toute la famille de Mihoubi et Makass.

A tout mes amis.

A toutes les personnes que j'aime et qui m'aiment.

-K.M-

إهداء خاص

أهدى هذا العمل المتواضع إلى من أتمنى أن يجمعني الله بهم
في الآخرة و الذين كنت أتمنى أن يشركوني هذا النجاح
واطلب ممن يقرأ هذا الإهداء أن يدعو لهم بالرحمة

كريمة

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : CONTROLE OPTIQUE PAR DES METHODES INTERFERENTIELLES

I.1. Introduction	3
I.2. Interférométrie	3
I.2.1. Franges d'égalé inclinaison	4
I.2.2. Franges d'égalé épaisseur	5
I.3. Systèmes interférentiels	8
I.3.1. Les systèmes interférentiels par division de front d'onde	8
I.3.2. Les systèmes interférentiels par division d'amplitude	9
A. Systèmes interférentiels à base d'un prisme polarisant	10
B. Systèmes interférentiels à base d'un réseau de diffraction	10
I.4. Les techniques interférométriques pour le contrôle optique	11
I.4.1. L'interféromètre de Twyman-Green	11
I.4.2. L'interféromètre à chemin différents	13
I.4.3. L'interféromètre à incidence rasante	14
I.4.4. L'interféromètre à diffraction de point	14
I.4.5. L'interféromètre à plaque de diffusion	15
I.4.6. L'interféromètre de Fizeau	16
I.4.7. Les interféromètres à dédoublement d'images	17

CHAPITRE II : LES INTERFEROMETRES A DEDOUBLEMENT D'IMAGES

II.1. Introduction	19
II.2. Les type d'interféromètres à dédoublement d'images	19
II.2.1. Les interféromètres à dédoublement Vectoriel d'image	19
II.2.2. Les interféromètres à dédoublement radial d'image	20
II.2.3. Les interféromètres à dédoublement latéral d'image	20

II.3. Les différents interféromètres à dédoublement latéral d'images	25
II.3.1. Interféromètre à décalage latéral à base de l'interféromètre de Mach –Zehnder	26
II.3.2.L'interféromètre de Sagnac	26
II.3.3. Interféromètre à dédoublement d'image à base des réseaux optiques	27
II.3.3.1.Les interféromètres à décalage bi-latéral	27
II.3.3.2.Les interféromètres à décalage tri-latéral(IDTL)	28
II.3.3.3.Les interféromètres à décalage quadri-latéral(IDQL)	30
II.3.4.L'interféromètre de Murty	30
II.3.4.1.Le principe	30
II.3.4.2.Théorie de base	32
II.3.4.3. Applications de l'interféromètre de Murty	33

CHAPITRE III : PROCEDURE EXPERIMENTALE, RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1.Introduction	36
III.2.Les moyens utilisés	36
III.3.Application de l'interféromètre de Murty pour le contrôle de la collimation du faisceau laser	38
III.3.1.Montage expérimental	38
III.3.2.Le principe de l'expérience	39
III.3.3.Résultats expérimentaux	39
III.3.4.Interprétation des résultats	42
III.4.Le choix de l'angle d'inclinaison de la lame à faces parallèles	42
III.5.Contrôle interférométrique des composants optiques	43
III.5.1.Contrôle de l'épaisseur des lames à faces parallèles	43
III.5.1.1.Le principe de l'expérience	44
III.5.1.2.Résultats et interprétations	44
III.5.2.Contrôle d'indices de réfraction des lames plates	47
III.5.2.1.Principe de mesure	48
III.5.2.2.Résultats et interprétations	50

III.5.3. Contrôle d'indices de réfraction des lentilles	52
III.5.3.1. Principe de mesure	53
III.5.3.2. Résultats et interprétations	55
III.5.4. Contrôle de l'indice de réfraction des liquides	56
III.5.4.1. Principe de mesure	57
III.5.4.2. Résultats et interprétations	58

CONCLUSION GENERALE	63
----------------------------	-----------

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Liste des figures

Figure. I.1. Principe de superposition de deux faisceaux lumineux.....	3
Figure. I.2. La marche des rayons par réflexion dans une lame à faces parallèles.....	4
Figure. I.3. Franges d'égalé inclinaison.....	5
Figure. I.4. Interférences localisées avec un coin.....	6
Figure. I.5. Systèmes interférentiels formant des franges d'égalé épaisseur ; a : Lame d'épaisseur variable, b : Coin d'air limité par deux faces planes, c : Coin d'air limité par une face sphérique et une face plane.....	7
Figure. I.6. Le contrôle des surfaces par interférométrie.....	8
Figure. I.7. La figure d'interférence obtenue à partir d'un PDMS sur un substrat de silicium observé par microscopie interférentielle.....	8
Figure. I.8. Principe d'un système interférentiel par division d'un front d'onde.....	9
Figure. I. 9. Interféromètre à lame séparatrice.....	9
Figure. I.10. Système interférentiel à base d'un prisme polarisant.....	10
Figure. I.11. Système interférentiel à base d'un réseau de diffraction.....	10
Figure. I.12. Le schéma de l'interféromètre de Twyman-Green.....	11
Figure. I.13. Les franges obtenues par l'interféromètre de Twyman-Green.....	12
Figure. I.14. Les différentes applications de l'interféromètre de Twyman-Green.....	12
Figure. I.15. Les Interférogrammes obtenu par Twyman-Green pour certaines aberrations typiques de lentilles: (de gauche à droite) ; inclinaison, défocalisation, astigmatisme, coma, et l'aberration sphérique.....	13
Figure. I.16. Le schéma d'un interféromètre à chemin différent utilisé pour tester les grands miroirs concaves.....	13
Figure. I.17. L'interféromètre à incidence rasante en utilisant deux réseaux de réflexion.....	14
Figure. I.18. L'interféromètre à diffraction de point.....	15
Figure. I.19. L'interféromètre à plaque de diffusion utilisé pour tester un miroir concave...	15
Figure. I.20. L'interféromètre de Fizeau pour tester des surfaces planes.....	16
Figure. I.21. Configurations d'essai pour les surfaces concaves et convexes en utilisant un interféromètre de Fizeau.....	17
Figure. I.22. Systèmes de l'interféromètre à décalage latéral(IDL) : les répliques peuvent être basculées (à gauche) ou parallèles (à droite).....	18
Figure. II.1. Franges obtenues par l'interféromètre à dédoublement vectoriel d'image.....	19
Figure. II.2. Franges obtenues par l'interféromètre à dédoublement radial d'image.....	20
Figure. II.3. Le montage utilisé pour l'obtention du dédoublement radial d'images.....	20
Figure. II.4. Les interférogrammes typiques obtenus avec un interféromètre à décalage latéral.....	21

Figure. II.5. Schéma illustrant l'interférométrie à décalage latéral, A : Avec la lumière collimatée ; B : Avec la lumière convergente.....	21
Figure. II.6. Schéma du principe illustrant le front d'onde original et sa copie décalée.....	22
Figure. II.7. Séquence des interférogrammes à déplacement latéral. (a) : Avant le foyer (apparition des franges); (b) : Au foyer (pas de franges); (c) : Après le foyer (réapparition des franges).....	25
Figure. II.8. Séquence des interférogrammes à déplacement latéral, dans le cas d'une inclinaison, (a) : Avant le foyer ; (b): Au foyer ; (c) : Après le foyer.....	25
Figure. II.9. Interféromètre à dédoublement d'image à base de l'interféromètre de Mach-Zehnder.....	26
Figure II.10. Représentation simplifiée de l'interféromètre de Sagnac.....	26
Figure II.11. Principe de l'interféromètre à décalage bi-latéral.....	27
Figure II.12. Principe de sélection de deux ordres diffractés, et donc de deux répliques, par le réseau au moyen d'un masque troué placé dans le plan focal intermédiaire d'un système afocal.....	28
Figure II.13. Principe de l'interférométrie à décalage tri-latéral utilisant un réseau de diffraction.....	28
Figure II.14. Disposition des trois répliques R_i selon un triangle équilatéral et interférogrammes observés lors des interférences séparés de chacun des couples de répliques.....	29
Figure II.15. Interférogramme issu des interférences de trois répliques décalées.....	29
Figure II.16. Schéma général de l'interféromètre à décalage quadri-latéral (IDQL).....	30
Figure II.17. La disposition schématique de l'interféromètre de Murty.....	31
Figure II.18. La marche des rayons dans une lame à faces parallèles.....	31
Figure II.19. La disposition schématique de l'interféromètre de Murty utilisée pour la vérification de la collimation d'une lentille.....	34
Figure II.20. Certains interférogrammes obtenu par interféromètre à décalage latéral.....	35
Figure. III.1. Montage de l'interféromètre de Murty utilisé pour la vérification de collimation du faisceau laser.....	39
Figure. III.2. Le graphe S/t en fonction de l'angle d'incidence.....	43
Figure. III.3. Montage de l'interféromètre de Murty utilisé pour le contrôle de l'épaisseur des lames à faces parallèles.....	44
Figure. III.4. Le schéma de montage utilisé pour mesurer l'indice de réfraction des lames plates, A : Montage schématisé par solid works ; B : Montage montrant la marche des rayons.....	48
Figure. III.5. Le schéma de montage utilisé pour mesurer l'indice de réfraction des lentilles, A : Pour la lentille plan concave ; B : Pour la lentille plan convexe.....	53

Figure.III.6. Les interferogrammes obtenus par la troisième position , A : Pour la lentille plan concave ; B : Pour la lentille plan convexe.....	55
Figure.III.7. Le schéma du montage utilisé pour mesurer l'indice de réfraction des liquides, A : Montage schématisé par solid works ; B : Montage montrant la marche des rayons.....	57
Figure.III.8. La variation de l'indice de réfraction en fonction de l'interfrange.....	61
Figure.III.9. Représentation de l'interférogramme obtenu avec l'huile de Meramia et leur profil.....	62

Liste des tableaux

Tableau.III.1. Les interférogrammes obtenus par l'interféromètre de Murty.....	41
Tableau III.2. Les interférogrammes obtenus de l'angle d'incidence.....	42
Tableau III.3. Présentation des interférogrammes et leurs profils des lames et les images de la règle.....	46
Tableau.III.4. Les résultats des calculs obtenus pour le contrôle d'épaisseur des lames à faces parallèles.....	47
Tableau.III.5. Les interférogrammes obtenus avant et après l'emplacement des lames.....	51
Tableau.III.6. Les résultats des calculs obtenus pour le contrôle des indices de réfraction des lames plates.....	51
Tableau .III.7. Les interférogrammes correspondants aux positions 1 et 2.....	54
Tableau.III.8. Les résultats des calculs obtenus pour le contrôle d'indices de réfraction des lentilles.....	56
Tableau.III.9. les interférogrammes obtenus pour les différentes positions.....	58
Tableau.III.10. les valeurs des positions marquées pour le contrôle d'indices de réfraction de l'eau zemzem.....	59
Tableau.III.11 : les valeurs des positions marquées pour le contrôle d'indices de réfraction de l'eau.....	59
Tableau.III.12 : les valeurs des positions marquées pour le contrôle d'indices de réfraction de l'acétone.....	59
Tableau.III.13. Les valeurs des positions marquées pour le contrôle d'indices de réfraction de l'éthanol.....	60
Tableau.III.14. Les valeurs des positions marquées pour le contrôle d'indices de réfraction de l'huile de camphre.....	60
Tableau.III.15. Les valeurs des positions marquées pour le contrôle d'indices de réfraction de bromo-naphtalène.....	60
Tableau.III.16. Les valeurs des indices de réfraction calculés.....	61

Chapitre I :

Contrôle optique par des méthodes interférentielles

I.1. Introduction

La métrologie est concernée par la mesure au haut niveau de précision. Les avancées en métrologie dépendent de beaucoup de facteurs : des améliorations des connaissances scientifiques, techniques et qualité d'instrumentation. Puisque la métrologie fait une haute impression sur la qualité globale des produits industriels, elle dépend également aux demandes de l'industrie [1, 2].

Aujourd'hui les interféromètres constituent la base de la métrologie dimensionnelle grâce à leur traçabilité vis-à-vis de l'étalon primaire de longueur, leur résolution sub-nanométrique et leur mesure non-destructive sont également un atout important dans beaucoup d'applications [3].

I.2. Interférométrie

L'interférométrie est la technique de mesure basée sur le phénomène d'interférence pour des applications très variées. Elle est mise en œuvre grâce à un dispositif spécifique : l'interféromètre. Il existe plusieurs types et configurations d'interféromètres, mais ils fonctionnent tous selon le même principe de base : ils permettent de superposer deux ondes lumineuses cohérentes (voir la figure I.1). La figure d'interférence qui en résulte dépend de la forme du front d'onde (plans, sphériques, etc...) ainsi que de leur direction de propagation relative [4].

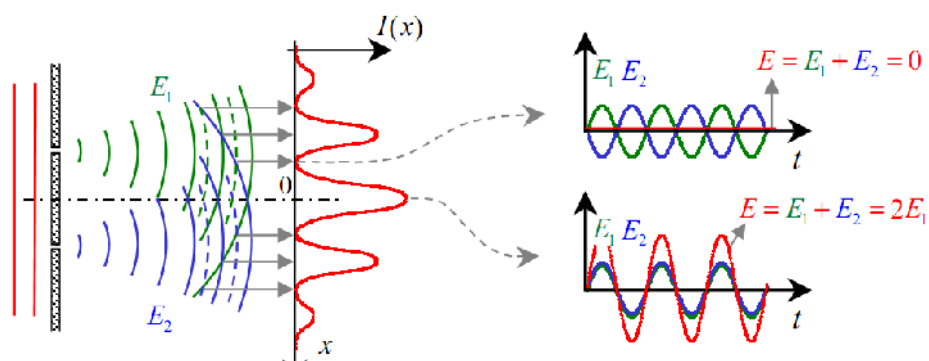


Figure. I.1 : Principe de superposition de deux faisceaux lumineux.

Lorsque l'effet des deux ondes est de réduire l'amplitude, on parle d'interférences **destructives**. Lorsqu'au contraire cela augmente l'amplitude, les interférences sont **constructives** [5].

I.2.1. Frange d'égalé inclinaison

Lorsqu'une lame à faces parallèles, d'épaisseur e et d'indice n , immergée dans l'air, est éclairée par un faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde λ , issu d'une source étendue (Figure I.2), les rayons émergent de la lame dans une direction faisant un angle i avec la normale interfèrent à l'infini et l'intensité dans cette direction est :

$$I = I_0 \sin^2(\phi) \tag{I.1}$$

Une frange est donc caractérisée par une valeur constante de r , donc de i , et elle est due à la lumière incidente sur la lame avec l'incidence i . Pour cette raison, les franges observées sont appelées franges d'égalé inclinaison (la figure I.3) [6].

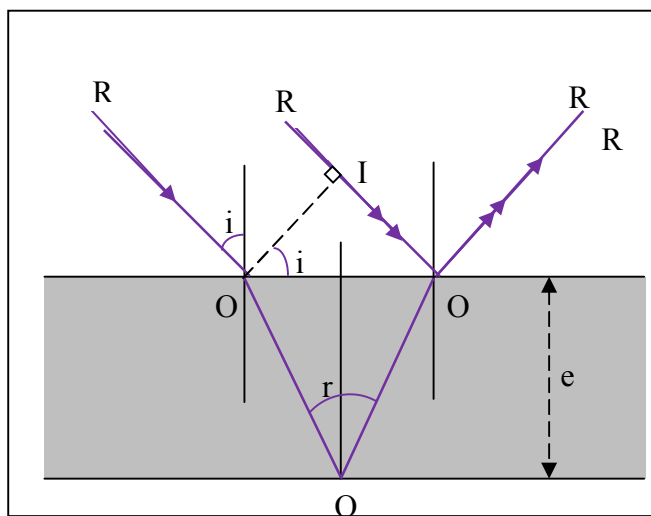


Figure. I.2 : La marche des rayons par réflexion dans la lame à faces parallèles.

Si on suppose que la lame soit à faces parallèles (l'épaisseur est constante), les rayons réfléchis sortent parallèles avec un déphasage égal à :

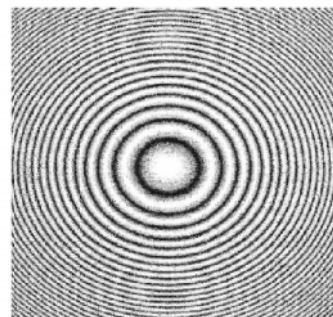
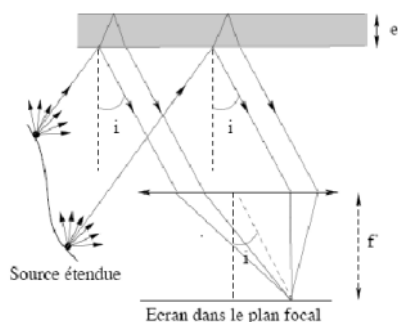
$$\phi = \frac{2\pi\Delta L}{\lambda} + \pi \tag{I.2}$$

Où :

$$\Delta L = 2ne \cos r \tag{I.3}$$

Ce qui induit que les rayons de même inclinaison ne se rencontrent qu'à l'infini : **les interférences sont donc localisées à l'infini.**

Si on éclaire la lame avec une source étendue, les différents rayons issus de points différents de la source ayant la même inclinaison produiront la même intensité. La figure d'interférence sera donc plus lumineuse.



(a) : Projection des interférences dans le plan focal d'une lentille convergente.

(b) : Anneaux d'interférence (simulation)

Figure. I.3 : Franges d'égale inclinaison.

Application : Le traitement anti-reflet

Dans un appareil photo, par exemple, l'objectif est constitué d'une dizaine de lentilles et donc d'une vingtaine d'interface air-verre. Ainsi, à chaque réfraction, c'est 4% de l'énergie qui est perdue par réflexion. Cette réflexion partielle produit une diminution d'éclairement sur la pellicule de plus de 50%. Un traitement anti-reflet peut donc grandement améliorer les performances de l'appareil. Pour cela, on dépose une couche mince de matériau transparent d'indice N (compris entre 1 et n) et d'épaisseur constante. Cherchons l'indice et l'épaisseur qui permettent d'annuler la réflectivité par interférence destructive [7].

I.2.2. Franges d'égale épaisseur

Considérons maintenant une lame mince d'épaisseur variable présentée dans la figure I.4. On suppose cependant que l'épaisseur varie sur une échelle importante devant la longueur d'onde de telle sorte que l'on peut considérer localement la lame d'épaisseur constante.

De plus, si on envoie un faisceau de lumière en incidence faible, on peut utiliser la formule des franges d'égale inclinaison pour obtenir le déphasage :

$$\phi = \frac{4\pi n e(I) \cos r}{\lambda} + \pi \tag{I.4}$$

Où $e(I)$ est l'épaisseur de la lame au point I [8].

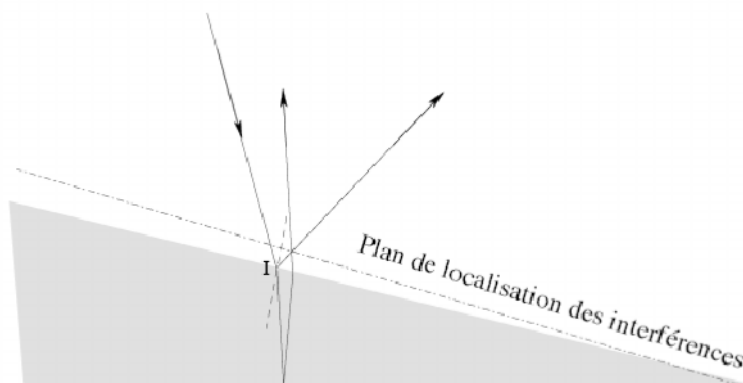


Figure. I.4 : Interférences localisées avec un coin.

On montre que les interférences sont **localisées sur un plan très près de la lame**. On peut voir des franges en dehors de ce plan mais le contraste sera mauvais. Le contraste est optimal dans ce plan. En général, pour visualiser les interférences, il suffit de projeter l'image de la lame sur un écran ou bien observé à l'œil nu la lame (l'œil fait la mise au point sur la lame).

Que voit-on ? Les franges brillantes correspondent à l'ensemble des points tels que $\delta = 2p\pi$ c'est-à-dire à $e(l)=\text{constante}$. Ainsi les franges brillantes sont des lignes d'égale épaisseur : on parle de **franges d'égale épaisseur** ou franges de FIZEAU [9].

Les franges d'égale épaisseur sont obtenues avec trois types de montages interférentiels. Le premier est représenté sur la figure (I.5.a) : il s'agit d'une lame de verre d'indice n et d'épaisseur e légèrement variable. Le second est un coin d'air prismatique constitué de deux lames de verres à faces parallèles, inclinées l'une par rapport à l'autre, définissant une lame d'air prismatique, de petit angle (Figure. I.5.b). Le troisième est un coin d'air limité par une face sphérique et une face plane. Il est formé d'une lentille plan convexe reposant par sa face courbe sur un plan de verre ; la lame d'air d'épaisseur e variable est la couche d'air comprise entre le plan et la face courbe de la lentille. (Figure. I.5.c).

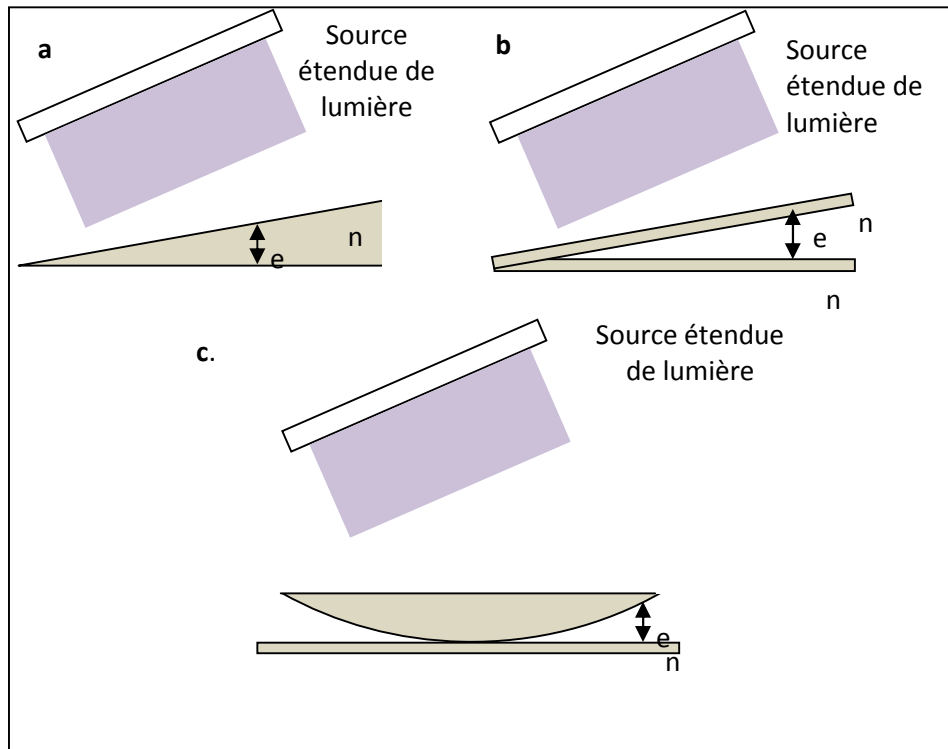


Figure. I.5 : Systèmes interférentiels formant des franges d'égal épaisseur ; **a** : lame d'épaisseur variable, **b** : Coin d'air limité par deux faces planes, **c** : Coin d'air limité par une face sphérique et une face plane.

Application :

1. Le contrôle des surfaces par interférométrie (mesure de faibles épaisseurs, vibrations de surface ...etc) est basé sur l'observation de franges d'égal épaisseur (figure I.6).

Par exemple, le polissage et de contrôle des miroirs pour les astronomes amateurs reposent sur l'interférométrie. On atteint une précision dans le contrôle de l'état de surface de l'ordre du dixième de micron [8].

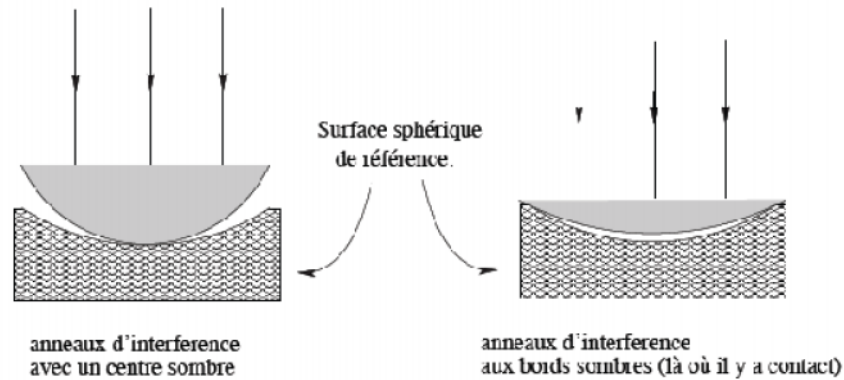


Figure. I.6 : Le contrôle des surfaces par interférométrie.

2. L'étude du contact de micro-gouttes sur un substrat repose sur l'étude des franges d'égal épaisseur observées par microscopie interférentielle. La figure I.7 représente une micro-goutte de PDMS (Polydiméthylsiloxane) sur un substrat de silicium observé par microscopie interférentielle. À partir de la figure d'interférence (a), on peut reconstruire le profil de la goutte (b).

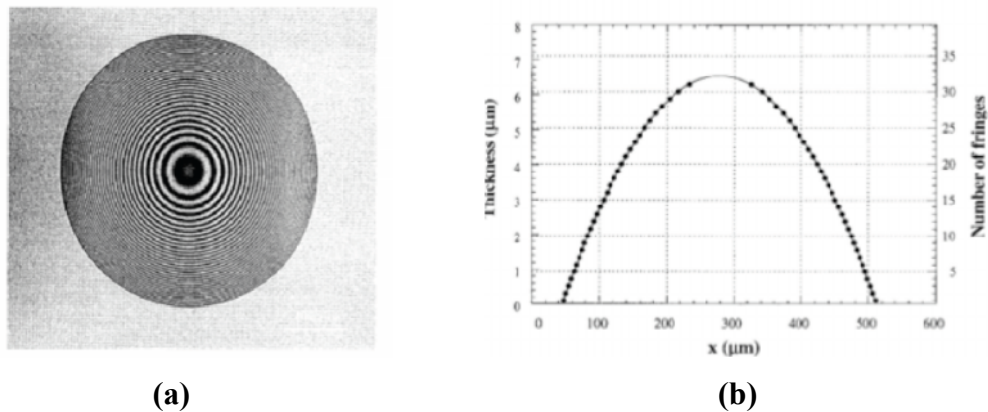


Figure. I.7 : La figure d'interférence obtenue à partir d'un PDMS sur un substrat de silicium observé par microscopie interférentielle.

I.3.Systèmes interférentiels

Pour observer des interférences optiques, il faut au moins deux sources cohérentes. C'est-à-dire deux sources dont les états ondulatoires soient corrélés. Le plus simple consiste à obtenir deux sources identiques à partir d'une source en utilisant les diviseurs de front d'onde ou bien les diviseurs d'amplitude [10].

I.3.1.Les systèmes interférentiels par division de front d'onde

Un faisceau, issu de la source primaire S qui émet une onde d'amplitude A, est divisé en deux faisceaux isolés spatialement et portant des ondes de même amplitude A

(figure I.8). Ces deux faisceaux, S_1 et S_2 , suivent des chemins différents puis se rencontrent pour interférer [11].

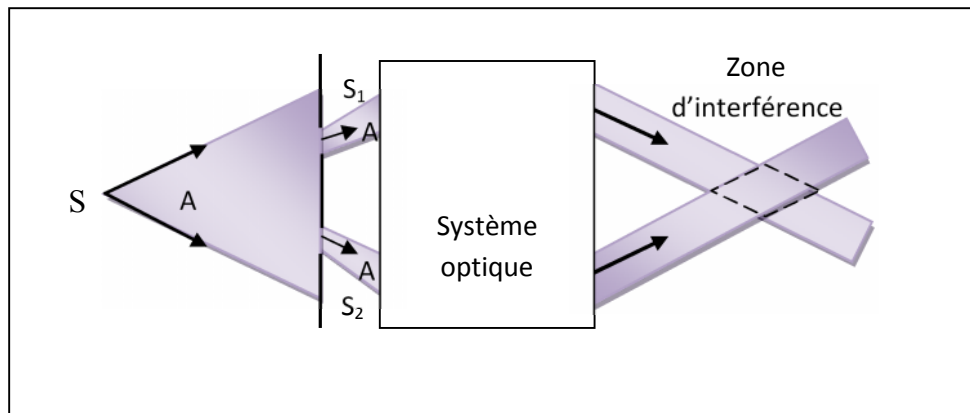


Figure. I.8 : Principe d'un système interférentiel par division d'un front d'onde.

Dans cette famille, le système interférentiel le plus classique est celui des trous de Young. Et il existe également d'autres dispositifs classiques, tels que :
Les miroirs de Fresnel, le miroir de Lloyd et les bilentilles de Billet [11].

I.3.2. Les systèmes interférentiels par division d'amplitude

Un faisceau issu de la source primaire S qui émet une onde d'amplitude A, est séparé par des éléments optiques. Les deux faisceaux, réfléchi (de sommet S_2) et transmis (de sommet S_1) portent des ondes d'amplitudes respectives A_r et A_t . Après des trajets différents, ils se rejoignent dans une région de l'espace (zone d'interférence) où ils sont susceptibles d'interférer [12].

L'exemple le plus célèbre d'un système interférentiel par division d'amplitude est probablement les systèmes interférentiels à lame séparatrice (voir la figure I.9).

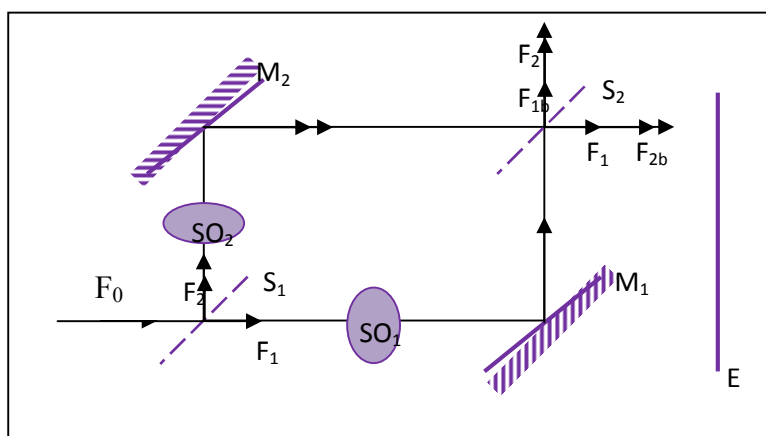


Figure. I. 9 : Interféromètre à lame séparatrice.

Comme il existe aussi d'autres systèmes tels que :

A. Système interférentiel à base d'un prisme polarisant

Un autre appareil qui peut être utilisé est un prisme polarisant, qui produit deux faisceaux polarisés orthogonalement (la figure I.10). Le prisme polarisant peut être construit en appliquant sur un des demi cubes une multicouche qui réfléchit une polarisation et transmet l'autre [13].

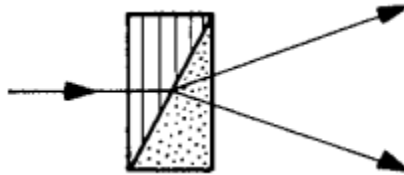


Figure. I.10 : Système interférentiel à base d'un prisme polarisant.

B. Système interférentiel à base d'un réseau de diffraction

Un autre dispositif qui a été utilisé est le réseau de diffraction. Ce dernier produit, en plus du faisceau directement transmis, un ou plusieurs faisceaux diffractés (voir la figure I.11) [13].

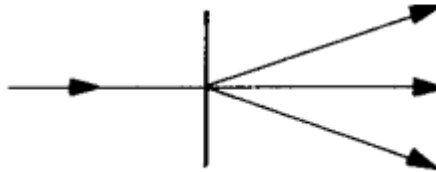


Figure. I.11 : Système interférentiel à base d'un réseau de diffraction.

On peut citer certains interféromètres courants à division d'amplitude, qui sont les suivants :

1. L'interféromètre de Rayleigh.
2. L'interféromètre de Michelson.
3. L'interféromètre de Twyman.Green.
4. L'interféromètre de Mach.Zehnder.
5. L'interféromètre de Sagnac.

I.4. Les techniques interférométriques pour le contrôle optique

La caractérisation et le contrôle des dispositifs et systèmes optiques exigent des outils et des instrumentations spécifiques. La mesure optique est un domaine qui évolue rapidement en raison des innovations et des progrès rapides dans les dispositifs et les systèmes optiques ainsi que les applications émergentes. Dans la suite, on va présenter quelques techniques interférométriques de base à mesure optique [3].

I.4.1. L'interféromètre de Twyman-Green

Cet interféromètre est une configuration légèrement différente d'un interféromètre de Michelson dans lequel la source étendue est remplacée par une source ponctuelle.

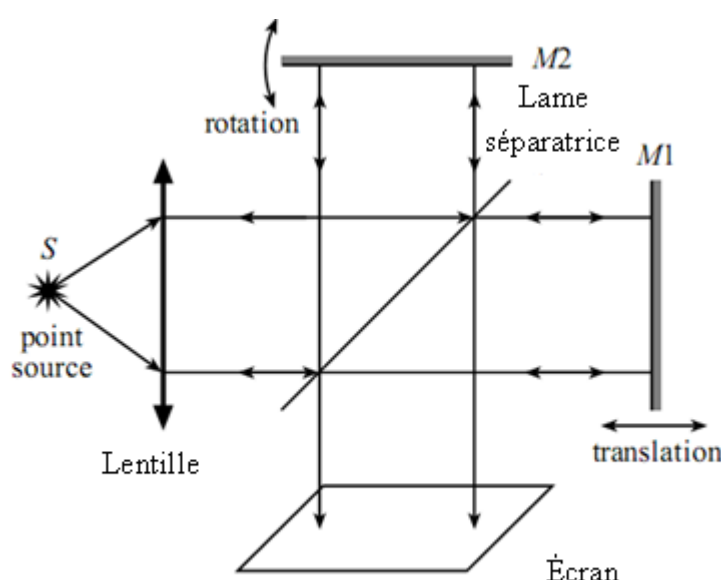


Figure. I.12 : Le schéma de l'interféromètre de Twyman-Green.

Si les miroirs M1 et M2 sont perpendiculaires, et la lame séparatrice inclinée par un angle de 45° par rapport aux deux miroirs (la figure I.12), alors l'interférence est exactement analogue à l'interférence en couche mince à incidence normale.

Ainsi nous obtenons une interférence complète constructive de telle sorte que toute la lumière de la source atteint l'écran lorsque :

$$\Delta L = m\lambda_0/2 \quad (I.5)$$

Où ΔL est la différence de marche entre les deux bras ajustés en déplaçant par exemple M1.

Nous obtenons une interférence complète destructive telle qu'aucune lumière n'atteint l'écran avec la différence de marche est alors égale à :

$$\Delta L = (m + \frac{1}{2})\lambda_0/2 \tag{I.6}$$

Si nous faisons tourner l'un des miroirs (dit M2) comme le montre la figure I.13, on voit des franges d'égale épaisseur sur l'écran, puisque l'angle d'incidence est constant. Cette situation est tout à fait analogue à l'interférence de la lumière collimatée à travers un film mince d'épaisseur variable.

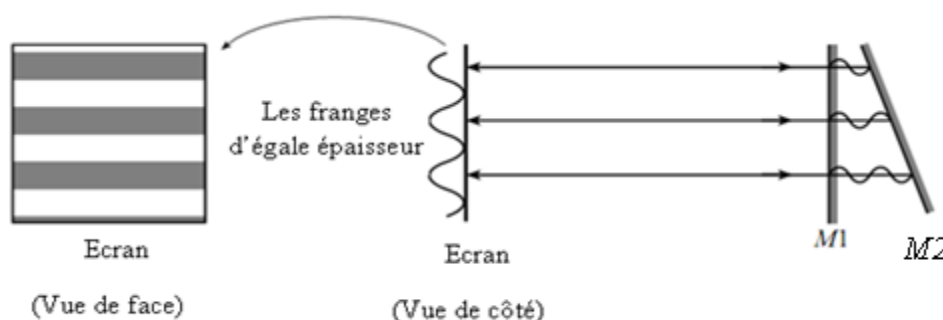


Figure. I.13 : Les franges obtenues par l'interféromètre de Twyman-Green.

L'interféromètre de Twyman-Green est particulièrement utile pour tester des composants optiques, tels que les lentilles, les miroirs (courbes et plats), les prismes et les lames. Souvent, l'un des miroirs est intentionnellement incliné pour créer des franges. La qualité de la composante peut alors être déterminée à partir des changements dans le réseau de franges lorsque le composant est placé dans l'interféromètre (figure I.14).

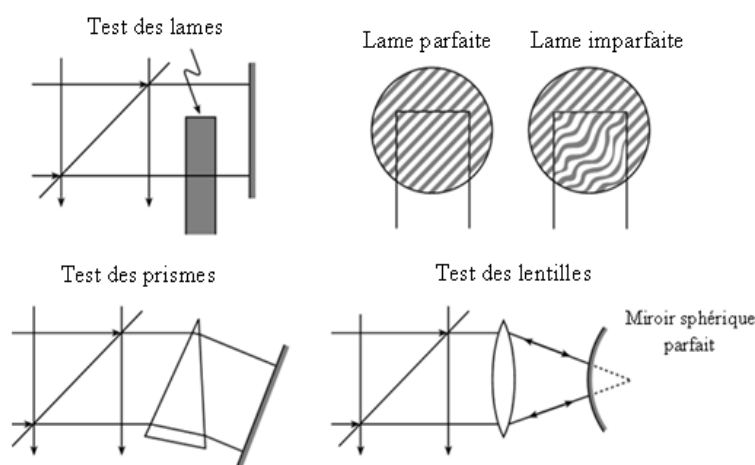


Figure. I.14 : Les différentes applications de l'interféromètre de Twyman-Green.

Les essais des lentilles sont particulièrement importants pour la quantification et la mesure des aberrations des distances focales comme l'indique la figure I.15 [14].

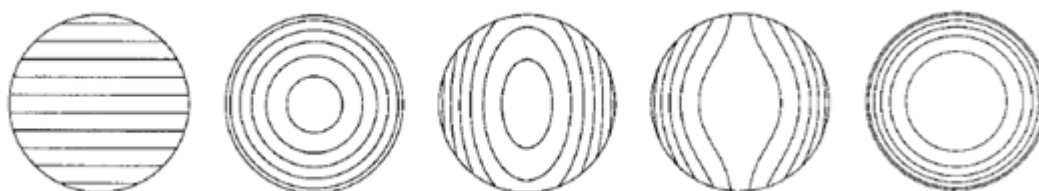


Figure. I.15 : Les interférogrammes obtenus par Twyman-Green pour certaines aberrations typiques de lentilles: (de gauche à droite) ; inclinaison, défocalisation, astigmatisme, coma, et aberration sphérique.

I.4.2. L'interféromètre à chemins différents

Pour obtenir des franges bien contrastées, la taille et la largeur de bande spectrale doivent satisfaire aux conditions de la cohérence spatiale et temporelle. Cependant, avec une source laser, ces problèmes disparaissent, et les franges peuvent être obtenues même avec de grandes différences de chemin optique entre les faisceaux interférés.

La Figure I.16 montre un interféromètre compact à chemin différent qui peut être utilisé pour contrôler les grands miroirs concaves. Cet interféromètre ne contient que des composants optiques de précision, un cube séparateur avec une lentille plan-convexe collée à une de ses surfaces.

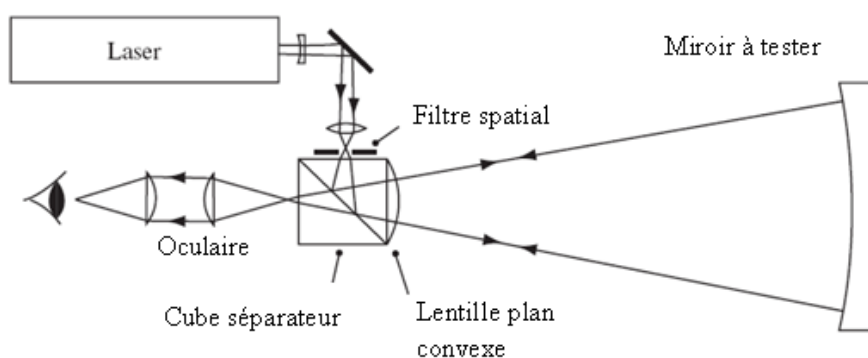


Figure. I.16 : Le schéma d'un interféromètre à chemin différent utilisé pour tester les grands miroirs concaves.

L'image du centre de courbure de la surface convexe de cette lentille se trouve juste en dehors de la face d'entrée du cube. Un filtre spatial est placé au point focal d'un objectif de microscope. Les franges d'interférence sont formées par les faisceaux réfléchis par la surface à tester et la surface sphérique de la lentille collée sur le cube séparateur [15].

I.4.3. L'interféromètre à incidence rasante

Avec les interféromètres classiques, il n'est pas possible d'obtenir des franges d'interférences avec des surfaces rugueuses qui ne donnent pas un reflet spéculaire avec la lumière visible à incidence normale. Une manière de résoudre ce problème consiste à utiliser une grande longueur d'onde. L'interférométrie infrarouge avec un laser CO₂ de longueur d'onde de 10,6 μm a été utilisé pour tester les surfaces asphériques avant le polissage.

Une alternative plus simple avec les surfaces nominaleme^{nt} plates est employée, en éclairant en lumière visible la surface à tester sous un angle rasant.

La basse réflectivité de la surface d'essai peut être compensée au moyen d'un système, comme est représenté sur la figure I.17, en utilisant une paire de réseaux de réflexion blazés, servant à diviser et à recombinaer les faisceaux [16].

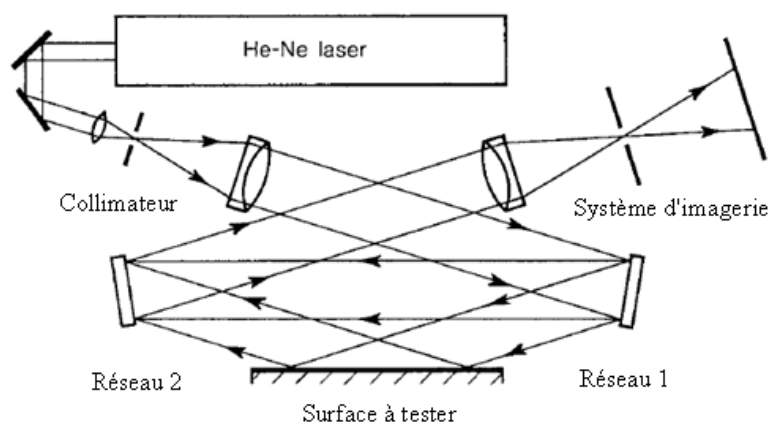


Figure. I.17 : L'interféromètre à incidence rasante en utilisant deux réseaux de réflexion.

I.4.4. L'interféromètre à diffraction de point

L'interféromètre à diffraction de point de la figure I.18 est constitué d'un petit trou se trouvant sur un film dont la transmittance est partielle. Ce dernier est placé au foyer du front d'onde du système à tester. L'interférence a lieu entre le front d'onde à tester (transmis par le film), et l'onde sphérique de référence produite par la diffraction du trou.

Les franges sont similaires à ceux obtenus avec les interféromètres de Fizeau et Twyman-Green.

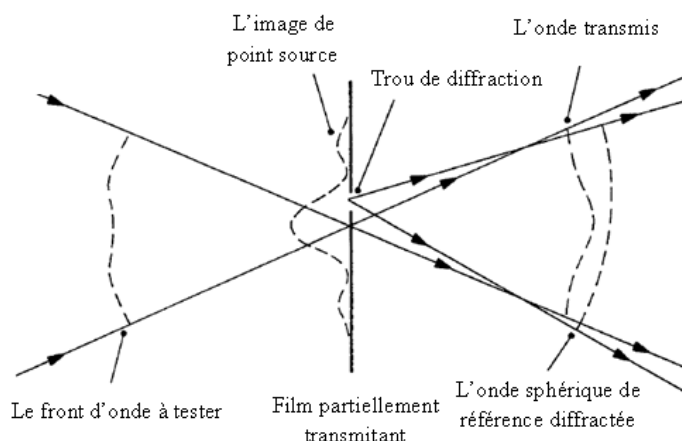


Figure. I.18 : L'interféromètre à diffraction de point.

L'interféromètre à diffraction de point a l'avantage de la simplicité et la facilité d'utilisation. Il peut être utilisé, par exemple, pour tester un objectif de télescope in situ, utilisant une étoile brillante comme une source de lumière. Son inconvénient est sa faible transmittance [17].

I.4.5. L'interféromètre à plaque de diffusion

L'interféromètre à plaque de diffusion permet également l'utilisation du phénomène de diffraction, mais donne un motif de franges qui peut être interprété directement. Pour comprendre son fonctionnement, considérons le système optique représenté sur la Figure I.19, utilisé pour tester un miroir concave.

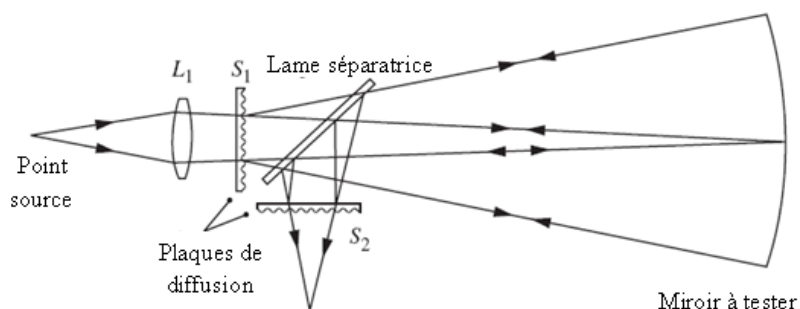


Figure. I.19 : L'interféromètre à plaque de diffusion utilisé pour tester un miroir concave.

Dans cette disposition, une lentille L_1 forme une image d'une source ponctuelle sur le miroir à tester à travers une plaque de diffusion S_1 . La lumière diffusée et focalisée sur le miroir, et ensuite ramenée à une mise au point, au moyen d'une petite lame séparatrice, à une autre plaque de diffusion S_2 qui est identique à S_1 est positionnée de sorte qu'elle coïncide avec son image. L'interférence a lieu entre le front d'onde transmis par S_1 et diffusé par S_2 et le front d'onde diffusé par S_1 et transmis par S_2 .

Le motif d'interférence est similaire à celui produit dans un interféromètre de Twyman-Green [18].

I.4.6. L'interféromètre de Fizeau

Une surface polie plate peut être comparée à une surface de référence standard et des franges d'interférences (franges d'égal épaisseur) formée par le film mince d'air qui les sépare. Cet interféromètre peut être éclairé soit avec une lampe à vapeur de sodium ou à vapeur de mercure (voir figure I.20).

Une méthode simple pour vérifier si la surface d'essai est convexe ou concave est d'appliquer une légère pression à un point près de son bord. Si la surface est convexe, le centre des franges déplacé vers ce point; si la surface est concave, le centre des franges s'éloigne de ce point.

Pour mesurer les erreurs de surface inférieures à une longueur d'onde, l'une des plaques est inclinée légèrement afin de produire un film de coin d'air et afin d'introduire quelques franges. La forme de la frange diamétrale indique alors les écarts de la surface d'une lame plate.

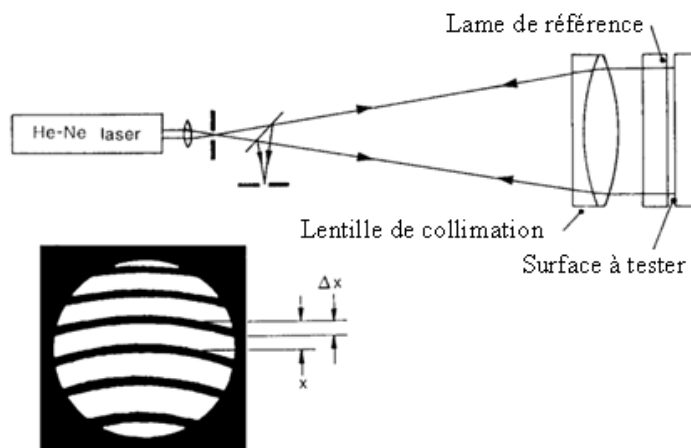


Figure. I.20 : L'interféromètre de Fizeau pour tester des surfaces planes.

En raison du risque d'endommager les surfaces d'essai et de référence, il est souhaitable de ne pas les mettre en contact, mais de les garder séparées par un petit intervalle d'air, d'où la nécessité d'utiliser la lumière collimatée [19, 20].

L'interféromètre de Fizeau possède d'autres applications tels que :

- La vérification de la planéité des lames à faces parallèles.
- La vérification de l'homogénéité du verre optique.
- L'utilisation d'une lentille convergente pour le contrôle des surfaces concaves ou convexes (comme le montre la figure I.21) [21].

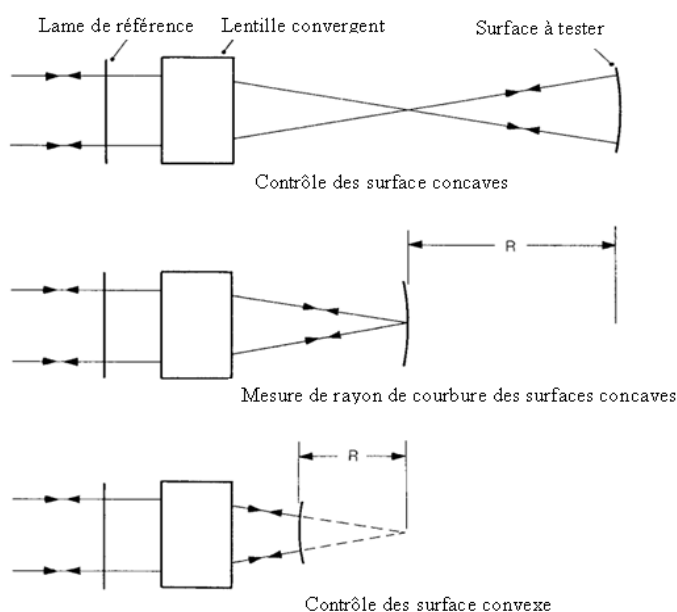


Figure. I.21 : Configurations d'essai pour les surfaces concaves et convexes en utilisant un interféromètre de Fizeau.

I.4.7. Les interféromètres à dédoublement d'images

L'interféromètre à dédoublement d'images présente un avantage particulier, c'est qu'il ne nécessite pas une onde de référence parfaite. Ce type d'interféromètre est simple à réaliser et peut être utilisé pour tester les grandes surfaces.

Un autre avantage de cet interféromètre, c'est qu'il n'est pas sensible aux vibrations, par rapport aux autres interféromètres qui craignent les vibrations [22,23].

La figure I.22 présente un des interféromètres à dédoublements d'images : L'interféromètre à décalage latéral.

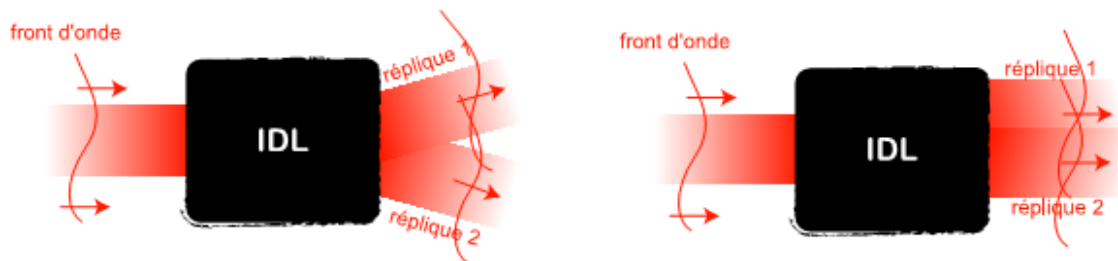


Figure. I.22 : Systèmes de l'interféromètre à décalage latéral(IDL) : les répliques peuvent être basculées (à gauche) ou parallèles (à droite).

Chapitre II :

Les interféromètres à dédoublement d'images

II.1.Introduction

Comme illustré au chapitre I, dans un interféromètre à dédoublement d'images, la figure d'interférence est produite par la superposition de deux images du front d'onde, où il réalise une auto interférence entre un faisceau de lumière et sa copie déplacée dans toutes les directions possibles dans les plans perpendiculaires à la propagation des faisceaux en question [24].

II.2. Les type d'interféromètres à dédoublement d'images

Selon la direction du déplacement de l'image par rapport à sa copie, de nombreux types d'interféromètre à dédoublement d'image ont été décrits, mais trois types sont couramment utilisés [24] :

II.2.1. Les interféromètres à dédoublement Vectoriel d'images

Dans ce type d'interféromètre, l'image est déplacée selon un vecteur \vec{V} (voir la figure II.1) dans le plan perpendiculaire à la propagation d'un déplacement de [25] :

$$|\vec{V}| = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (\text{II.1})$$

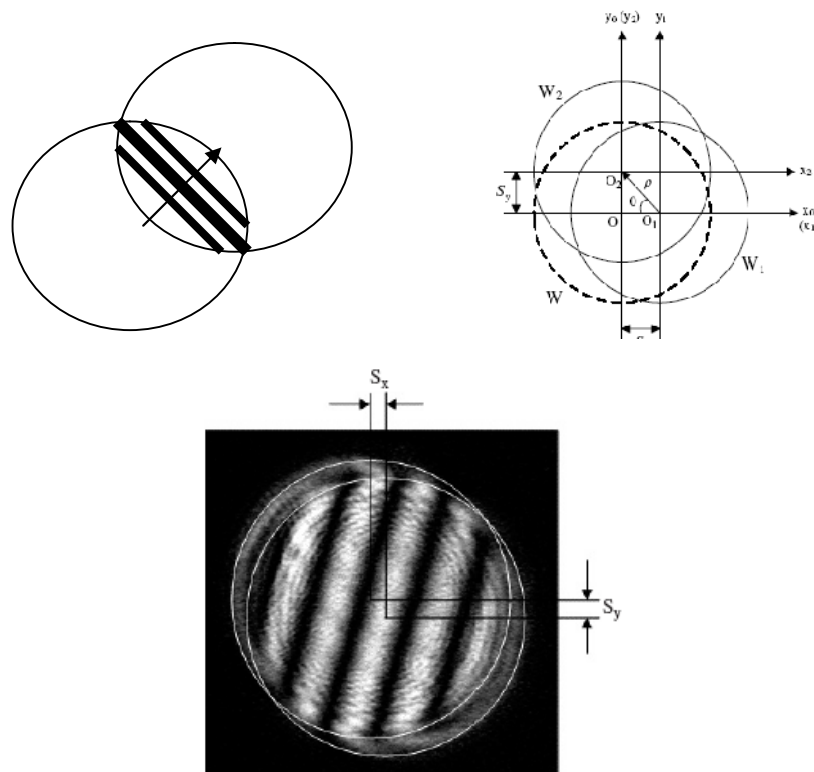


Figure. II.1 : Franges obtenues par l'interféromètre à dédoublement vectoriel d'images.

II.2.2. Les interféromètres à dédoublement radial d'images

Dans un interféromètre à décalage radial, deux images concentriques du front d'onde, de différentes tailles, sont superposées comme le montre (la figure II.2). Le rapport de leurs diamètres est connu comme étant le décalage (shear) S [13, 26].

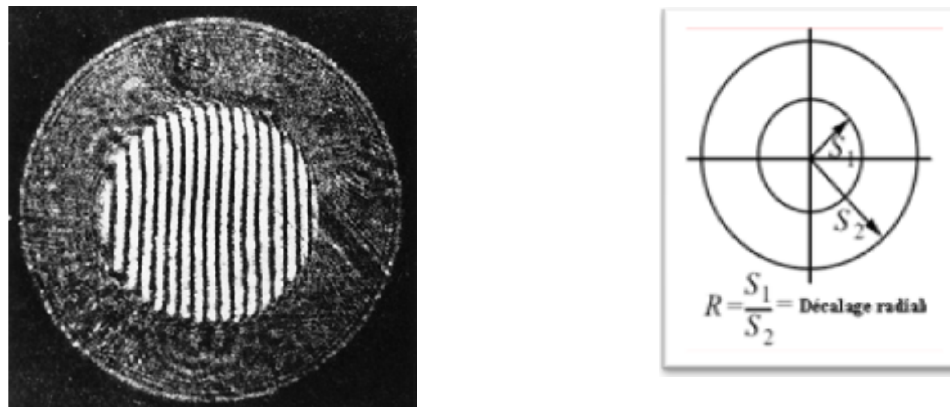


Figure. II.2 : Franges obtenues par l'interféromètre à dédoublement radial d'images.

Le montage utilisé pour l'obtention de l'interféromètre à dédoublement radial d'images est schématisé dans la figure II.3 :

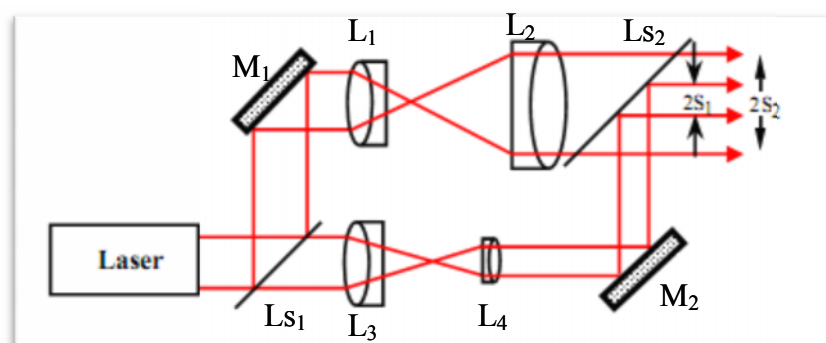


Figure. II.3 : Le montage utilisé pour l'obtention du dédoublement radial d'images.

$M_{1,2}$: Miroirs.

$LS_{1,2}$: Lames séparatrices.

$L_{1,2,3,4}$: lentilles des différents diamètres.

II.2.3. Les interféromètres à dédoublement latéral d'image

Dans un interféromètre à décalage latéral, deux images du front d'onde d'essai, de la même taille, sont superposées avec un petit déplacement latéral mutuel (Soit selon l'axe des x ou l'axe des y), comme le montre la figure II.4 :

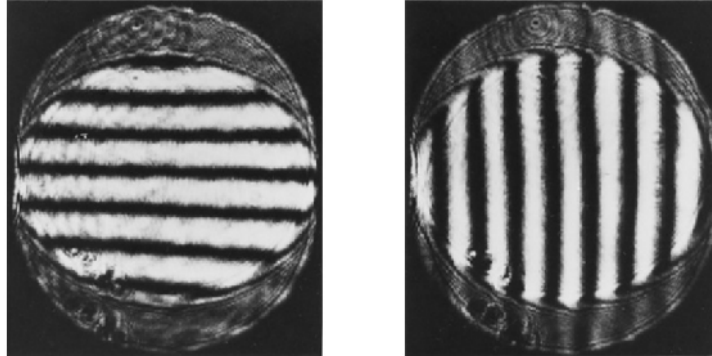


Figure. II.4 : Les interférogrammes typiques obtenus avec un interféromètre à décalage latéral.

Fondamentalement, la méthode de l'interférométrie à décalage latéral consiste à déplacer le front d'onde défectueux latéralement par une petite quantité et l'obtention de la figure d'interférence entre les fronts d'ondes originales et les fronts d'ondes déplacés. La figure (II.5) illustre schématiquement le principe.

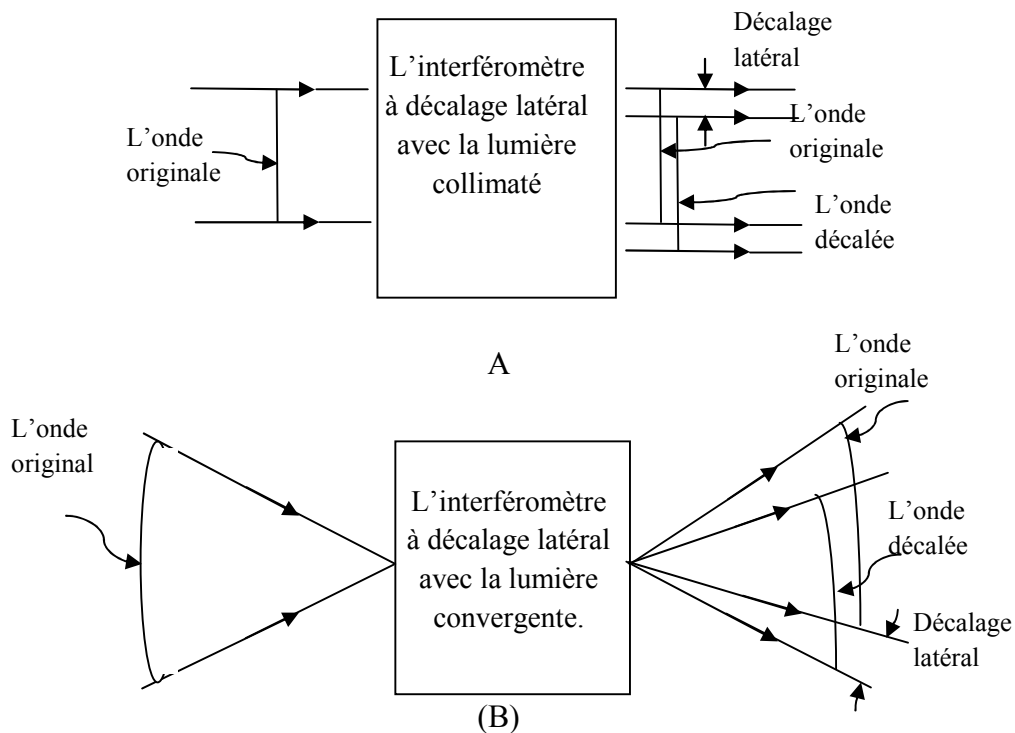


Figure. II.5 : Schéma illustrant l'interférométrie à décalage latéral, A : Avec la lumière collimatée ; B : Avec la lumière convergente.

Si l'onde est plane, le décalage latéral est obtenu par déplacement du front d'onde dans son propre plan. Si l'onde est sphérique, le décalage latéral est obtenu en faisant glisser le front d'onde sur lui-même par la rotation autour d'un axe passant par le centre de courbure du front d'onde sphérique.

Une considération importante dans la conception des interféromètres à décalage latéral est la nature de la source lumineuse. Dans les interféromètres à décalage latéral, les sources peuvent être classées en deux catégories:

- les sources laser, tel que le laser hélium-néon de cohérence spatiale et temporelle très élevée ;
- toutes les autres sources, telles que les lampes à décharge, qui sont temporellement cohérente dans une certaine mesure mais pas spatialement cohérente.

Par conséquent dans ce type d'interféromètre, on peut utiliser les sources non cohérentes telles que la lumière blanche [22, 27-29].

II.2.3.1. Contrôle des Aberrations par interférométrie à décalage latéral :

Dans cette partie, on va essayer de montrer plus de détail sur l'interférométrie à décalage latéral et son application à l'analyse des fronts d'ondes, on va donner aussi les équations qui gouvernent la superposition de deux fronts d'ondes décalés l'un par rapport à l'autre latéralement.

La figure II.6, montre un front d'onde original ainsi que sa copie décalée latéralement.

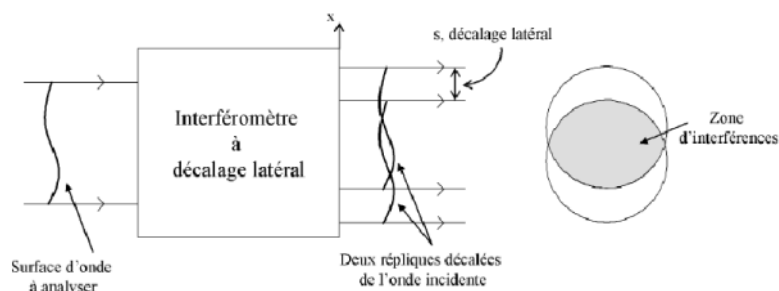


Figure. II.6 : Schéma du principe illustrant le front d'onde original et sa copie décalée.

Le front d'onde est considéré plan pour que les erreurs du front d'onde soient petites. L'erreur du front d'onde peut être exprimée par $W(x, y)$. Lorsque ce front d'onde est décalé dans la direction x par une quantité S , l'erreur du front d'onde décalé est $W(x - S, y)$. La différence de marche résultante W entre le front d'onde original et le front d'onde décalé est $W(x, y) - W(x - S, y)$. Quand S est égal à zéro, il n'y a aucune différence de chemin dans la zone commune des deux fronts d'ondes et par conséquent aucune erreur ne peut être vue.

Maintenant, la différence de chemin W peut être obtenue en divers points sur le front d'onde par la relation habituelle, qui donne le lieu des franges brillantes :

$$W = k\lambda \quad (\text{II.2})$$

Où k est l'ordre des franges d'interférence et λ est la longueur d'onde utilisée. Il est intéressant de noter que, lorsque S est petit, l'équation (II.2) peut être écrite comme :

$$\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)S = k\lambda \quad (\text{II.3})$$

Ainsi l'information obtenue dans l'interféromètre à décalage latéral est l'aberration $\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)$. L'équation devient plus exacte lorsque S tend vers zéro, mais nous avons également vu que la sensibilité diminue lorsque S tend vers zéro. Ainsi nous devons arriver à un certain compromis pour la valeur appropriée de S si l'équation (II.3) est utilisée exactement.

Ce qui va suivre, montre quelques situations spécifiques.

II.2.3.2. Contrôle de la défocalisation par interférométrie à décalage latéral :

L'erreur de front d'onde pour la défocalisation peut être représentée comme :

$$W(x, y) = D(x^2 + y^2) \quad (\text{II.4})$$

Cette situation correspond à une légère défocalisation du système optique de sorte que, au lieu d'un front d'ondes parfaitement plat, un front d'onde sphérique légèrement concave ou convexe. Par conséquent dans cette situation on a :

$$W = 2DxS = k\lambda \quad (\text{II.5})$$

L'équation (II.5) représente un système de franges rectilignes qui sont équidistants et perpendiculaires à la direction x (direction de décalage). Cette situation est montrée dans la figure II.7.a. Les franges droites apparaissent dans la zone commune des deux fronts d'ondes d'intersection. S'il n'y a pas de défocalisation ($D = 0$), toute la zone commune est remplie sans franges et semble être d'une intensité uniforme.

II.2.3.3. Contrôle de l'inclinaison des fronts d'ondes par interférométrie à décalage latéral :

Ce type d'aberration se manifeste lorsque le front d'onde est incliné d'une quantité quelconque. Pour mesurer cette aberration, on réalise une superposition entre le front d'onde déformé et sa copie décalée latéralement. Le décalage est fait perpendiculairement à l'inclinaison (le défaut), la superposition des deux fronts d'onde se traduit par une différence de marche due à l'inclinaison, qui s'écrit comme une fonction linéaire de la coordonnée y . La formule qui exprime la différence de marche dans le cas de l'inclinaison seulement est la suivante :

$$W = Ey = k\lambda \quad (\text{II. 6})$$

Où E est l'angle d'inclinaison entre les fronts d'onde original et décalé, et la ligne d'intersection de ces fronts d'onde est parallèle à l'axe des x .

Si la défocalisation (erreur de focalisation) et l'inclinaison sont présentes simultanément, la différence de chemin optique devient :

$$W = 2DxS + Ey = k\lambda \quad (\text{II. 7})$$

Et cette équation représente un système des franges droites qui ne sont parallèles ni à l'axe des abscisses ni à l'axe des ordonnées. On obtient des franges qui sont parallèles soit à x ou à y , seulement si D ou E sont égales à zéro.

Il est important de montrer la différence entre les deux situations données par les équations (II.5) et (II.7), tel que, lorsque dans l'équation (II.5), on pose $D=0$; cela veut dire qu'il y'a pas d'erreur de défocalisation, cette équation donne donc une figure dépourvue de franges (une intensité uniforme dans la zone commune).

Si un faisceau est mal focalisé et qui ne subit pas une inclinaison, est testé en utilisant une lame à faces parallèles, on distinguera trois situations (figure II.7):

- La première : si on se situe avant le point focal, on voit l'apparition de franges rectilignes verticales ;
- La deuxième : au point focal on remarque une disparition de franges (intensité uniforme) ;
- La troisième : de l'autre côté du point focal, on revoit à nouveau l'apparition de franges rectilignes verticales.

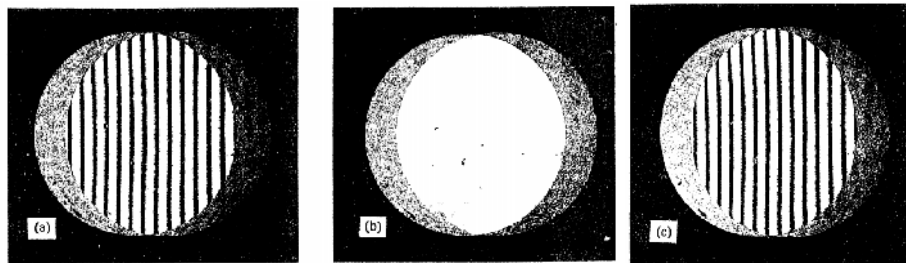


Figure II.7 : Séquence des interférogrammes à déplacement latéral. (a) : Avant le foyer (apparition des franges); (b) : Au foyer (pas de franges); (c) : Après le foyer (réapparition des franges).

Dans l'autre cas, si on utilise un interféromètre qui permet de donner une inclinaison entre les deux faisceaux décalés, plus une erreur de focalisation (Défocalisation); l'équation (II.7) donne une figure de franges rectilignes qui ne sont pas parallèles ni à x ni à y dans le cas général ($D \neq 0$ l'existence d'une défocalisation, $E \neq 0$ l'existence d'une inclinaison). En parcourant la région focale on remarque trois types d'orientation des franges, avant le foyer les franges sont orientées dans le sens des aiguilles d'une montre, et passant par le foyer les franges deviennent parallèles à x et enfin après la position du foyer les franges s'orientent vers le sens contraires des aiguilles d'une montre (La figure II.8) [24].

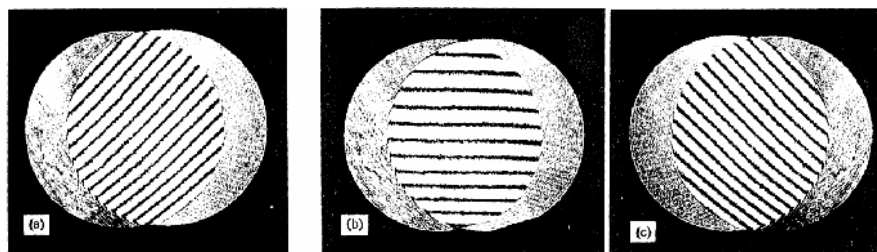


Figure II.8 : Séquence des interférogrammes à déplacement latéral, dans le cas d'une inclinaison, (a) : Avant le foyer ; (b): Au foyer ; (c) : Après le foyer.

II.3. Les différents interféromètres à dédoublement latéral d'images

Il existe plusieurs architectures expérimentales pour réaliser un interféromètre à décalage latéral, mais on se limite à quelques uns :

II.3.1. Interféromètre à décalage latéral à base de l'interféromètre de Mach - Zehnder

Une façon simple consiste à utiliser un interféromètre de type Mach-Zehnder dans lequel on a ajouté deux lames de verre à faces planes et parallèles insérées chacune dans un des bras de l'interféromètre comme le montre la figure II.9 [30].

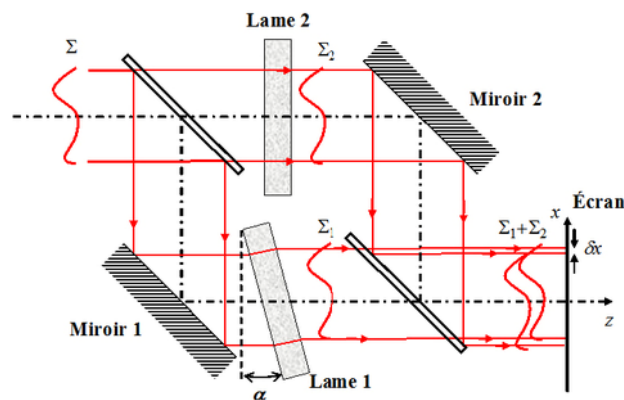


Figure. II.9 : Interféromètre à dédoublement d'image à base de l'interféromètre de Mach-Zehnder.

II.3.2.L'interféromètre de Sagnac

Dans cet interféromètre un faisceau laser incident rencontre un cube séparateur. Ce dernier divise le faisceau incident en deux faisceaux identiques 2 et 3, les deux copies 2 et 3 des faisceaux se propagent dans des directions opposées à travers les bras de l'interféromètre, ce qui donne une différence de marche nulle selon la direction de propagation. Le décalage dans cet interféromètre est obtenu en déplaçant l'un des ses miroirs perpendiculairement à son plan. La figure II.10 schématise le principe [14, 31-33].

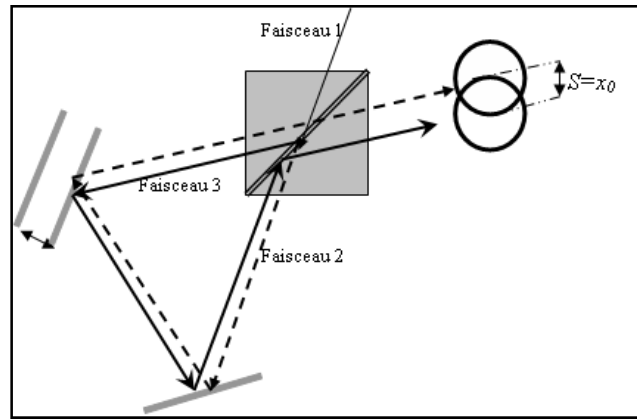


Figure II.10 : Représentation simplifiée de l'interféromètre de Sagnac.

II.3.3. Interféromètre à dédoublement d'images à base de réseaux optiques

A partir de ce type d'interféromètres, plusieurs interféromètres en découlent :

II.3.3.1. Les interféromètres à décalage bi-latéral

Dans le cas de l'interféromètre à décalage bi-latéral décrit par la figure II.11, il faut que seulement deux répliques interfèrent. Dans ces conditions, le réseau idéal ne diffracte que deux ordres symétriques et a donc une transmittance parfaitement sinusoïdale et de moyenne nulle.

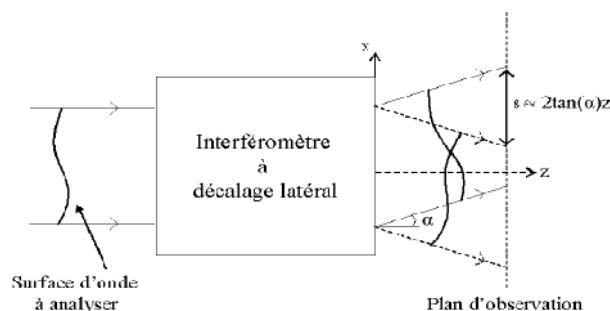


Figure II.11 : Principe de l'interféromètre à décalage bi-latéral.

Réaliser rigoureusement ce type de transmittance est actuellement impossible ; il est toutefois envisageable de sélectionner seulement deux répliques générées par un réseau quelconque par le filtrage au plan focal intermédiaire d'un système afocal.

En effet, l'observation du plan focal d'une première lentille placée après le réseau fait apparaître une série de tâches lumineuses caractéristiques des ordres diffractés par le réseau ; un masque de filtrage permet alors de sélectionner les deux ordres symétriques voulus, puis une deuxième lentille permet d'observer les interférences des deux répliques ainsi filtrées comme indiqué dans la figure II.12 [34].

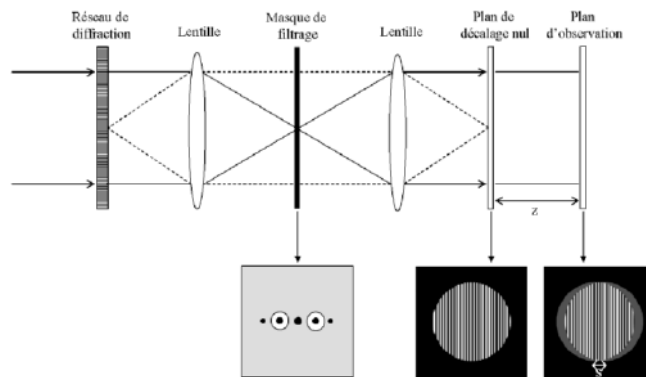


Figure II.12 : Principe de sélection de deux ordres diffractés, et donc de deux répliques, par le réseau au moyen d'un masque troué placé dans le plan focal intermédiaire d'un système afocal.

II.3.3.2. Les interféromètres à décalage tri-latéral (IDTL)

La technique de décalage latéral, permet de mesurer la phase sans utiliser un champ de référence. La seule différence entre le domaine spatial et temporel réside dans la dimension de chacun des espaces. Alors que le domaine temps-fréquence est à deux dimensions, le domaine espace-vecteurs d'onde est à six dimensions ce qui implique d'analyser les interférences spatiales pour deux décalages orthogonaux décalés issus du champ que l'on désire étudier si on veut avoir une mesure mono coupe. Pour réaliser ça, une nouvelle technologie basée sur un réseau en 2 dimensions, qui permet de dupliquer en trois un faisceau (voir la figure II.13). La technique porte le nom de l'interférométrie à décalage tri-latéral (IDTL).

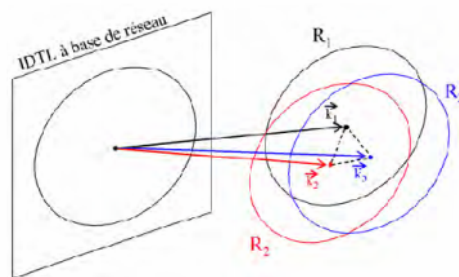


Figure II.13 : Principe de l'interférométrie à décalage tri-latéral utilisant un réseau de diffraction.

On considère ici que les trois répliques $R_{i=1..3}$ sont générées par un réseau de diffraction particulier et sont chacune transportées par des vecteurs d'onde $\vec{K}_{i=1..3}$

dont les extrémités sont disposées aux sommets d'un triangle équilatéral (voir la figure II.14)

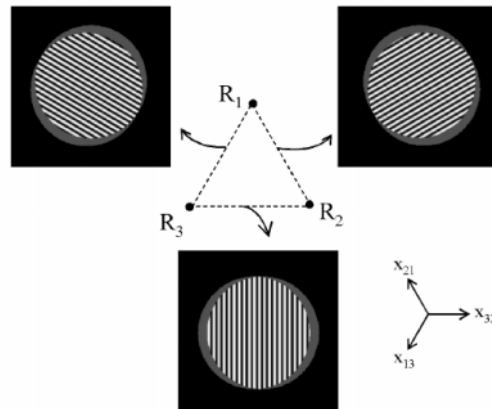


Figure II.14 : Disposition des trois répliques R_i selon un triangle équilatéral et interférogrammes observés lors des interférences séparés de chacun des couples de répliques.

La figure II.15 représente les interférogrammes issu des interféromètres à décalage tri-latéral et les profils sur une rangée de tâches selon les trois directions de décalage [35].

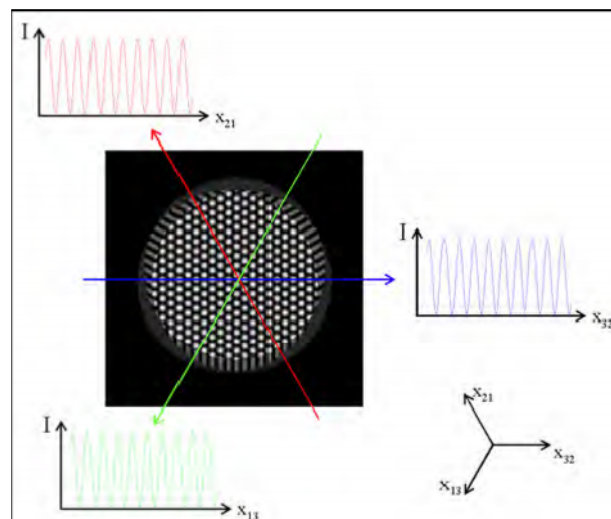


Figure II.15 : Interférogramme issu des interférences de trois répliques décalées.

II.3.3.3. Les interféromètres à décalage quadri-latéral (IDQL)

Ici l'interférence résulte du mélange de quatre ondes décalées d'une quantité S selon les axes x et y . La figure II.16 précise la géométrie retenue. Le réseau a le rôle de répliquer le front d'onde incident que l'on cherche à analyser en quatre répliques. Chaque réplique se propage alors selon un axe incliné par rapport à l'axe optique, et s'écarte des autres répliques, au fur et à mesure de la propagation [36].

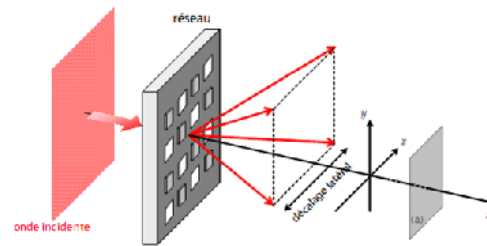


Figure II.16 : Schéma général de l'interféromètre à décalage quadri-latéral (IDQL).

II.3.4.L'interféromètre de Murty

Murty a suggéré l'utilisation d'un laser dans un interféromètre à décalage latéral basé sur une lame de verre, cet interféromètre maintenant est connu dans la littérature sous le nom de l'interféromètre de Murty [37]. C'est cet interféromètre qu'on a utilisé pour réaliser nos expériences.

II.3.4.1.Le principe

La Figure II.7 montre la disposition schématique de l'interféromètre. La lumière du laser est focalisée par un objectif de microscope adapté à un filtre spatial situé au foyer d'une lentille de collimation. Le faisceau collimaté de lumière incidente tombe sur une lame à faces parallèles, qui est normalement utilisée sans aucun revêtement sur les deux faces. La lumière est réfléchiée par la première et la deuxième interface de la lame. La zone commune de la superposition des deux tâches donne naissance à une figure d'interférence [38].

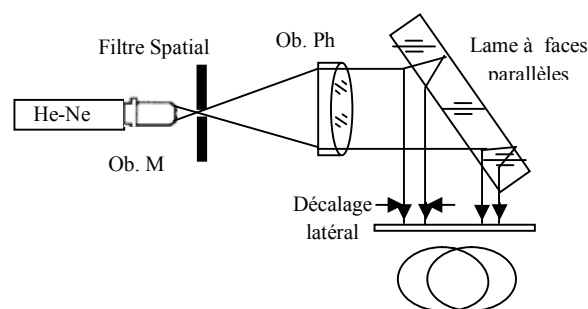


Figure II.17 : La disposition schématique de l'interféromètre de Murty.

Le décalage latéral entre ces fronts d'onde peut être modifié en inclinant la lame.

Ce décalage peut être tiré des marches des rayons à travers une lame à faces parallèles, comme le montre la figure II.18.

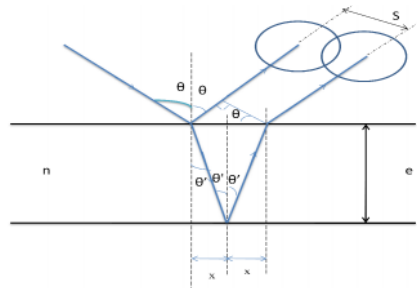


Figure II.18 : La marche des rayons dans une lame à faces parallèles.

On a :

$$\cos \theta = \frac{S}{2x} \quad S = 2x \cos \theta \tag{II. 8}$$

Où :

$$x = e \tan \theta' \text{ donc}$$

$$S = 2e \tan \theta' \cos \theta$$

Avec :

$$\sin \theta = n \sin \theta' \quad \sin \theta' = \frac{\sin \theta}{n} \tag{II. 9}$$

$$\cos \theta' = \sqrt{1 - \sin^2 \theta'} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{n^2}}$$

$$S = \frac{2e \sin \theta \cos \theta}{n \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{n^2}}} = \frac{2e \sin \theta \cos \theta}{n^2 - \sin^2 \theta} \tag{II. 10}$$

On a : $\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$ donc :

$$S = \frac{e \sin 2\theta}{n^2 - \sin^2 \theta} \tag{II. 11}$$

II.3.4.2. Théorie de base

Dans l'interféromètre de Murty, comme dans toute d'autres interféromètres à décalage latéral, le front d'onde interfère avec une copie de celui-ci, déplacé latéralement par une distance S dans la direction x . Le front d'onde peut être représenté par $W(x, y)$ et le front d'onde latéralement déplacée par $W(x - S, y)$. En utilisant le développement de Taylor la différence du chemin optique entre les deux fronts d'onde sera donnée par :

$$W(x, y) - W(x - S, y) = \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right) S - \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}\right) \frac{S^2}{2} + \dots \tag{II. 12}$$

Seulement le premier terme doit être considérée, si S est très petit, de sorte que

$$S \ll 2 \frac{\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)}{\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}\right)} \tag{II. 13}$$

Pour satisfaire à cette condition, le rapport de la pente, donnée par la dérivée première, à la courbure locale, représentée par la dérivée seconde, doit être netit en

tout point de l'ouverture. En d'autres termes, le front d'onde doit être lisse avec de petites aberrations. Ainsi, dans une première approximation, la forme des franges est donnée par :

$$\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right) S = k\lambda \quad (\text{II. 14})$$

Avec k est l'ordre d'interférence et λ représente la longueur d'onde de la lumière utilisée.

Alors que $\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)$ est le gradient du front d'onde, on conclut que les franges d'interférences sont des points dans le front d'onde qui présente un gradient constant dans la direction de déplacement (Shear). Ce gradient représente la composante de l'aberration transversale du rayon TA_x dans la direction du déplacement (Shear), ce qui permet d'écrire :

$$TA_x S = k\lambda \quad (\text{II. 15})$$

Cette dernière expression nous montre que les interféromètres à dédoublement latéral d'image ne donnent pas directement la différence du chemin optique comme les autres interféromètres, mais ils fournissent la valeur de l'aberration transversale TA_x de la direction de déplacement (shear). Les déformations du front d'onde peuvent être obtenues indirectement en intégrant la relation :

$$\frac{\partial W(x,y)}{\partial x} = -\frac{TA_x}{r_{ref}} \quad (\text{II. 16})$$

Avec r_{ref} est le rayon de courbure du front d'onde de référence, où la distance du sommet du front d'onde au plan où l'aberration transversale est mesurée, si le plan n'est pas au centre de courbure du front d'onde.

On peut remarquer que les déformations du front d'onde sur l'ouverture complète ne peuvent être obtenues avec un seul interférogramme. Deux interférogrammes avec des décalages latéraux dans des directions perpendiculaires sont nécessaires [38].

II.3.4.3. Applications de l'interféromètre de Murty

L'interféromètre de Murty a beaucoup d'applications, dont on cite quelques uns :

- le contrôle de lentilles, miroirs sphériques, miroirs paraboliques et des lames plates ;
- Il est utilisé aussi pour la détermination de l'homogénéité des matériaux optiques, la mesure des indices de réfraction des verres et des liquides;
- la détermination de la puissance des verres ophtalmiques, la mesure de la biréfringence des matériaux optiques, la détermination du coefficient de dilatation thermique des barres métalliques.

Cet interféromètre a été utilisé avec aussi une lumière infrarouge, en utilisant un écran qui peut être observée avec une visionneuse infrarouge [39, 40-43].

Vu le grand nombre d'application, on a choisi de montrer seulement l'application de l'interféromètre de Murty pour la vérification de la collimation d'une lentille.

Le schéma de principe de l'interféromètre de Murty pour tester la collimation d'une lentille est représenté sur la Figure II.19. La lumière du laser He-Ne est focalisée par un objectif de microscope adapté à un filtre spatial situé au foyer d'une lentille de collimation.

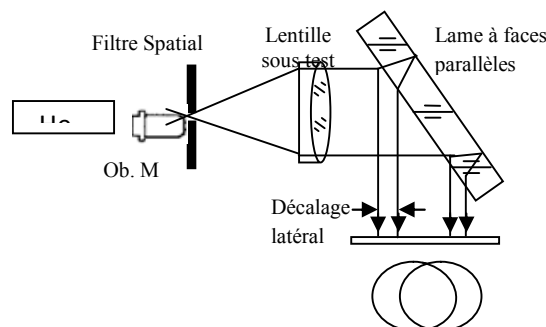


Figure II.19 : La disposition schématique de l'interféromètre de Murty utilisée pour la vérification de la collimation d'une lentille.

Si le faisceau incident montré dans la figure II.19 est collimaté, la superposition des faisceaux réfléchis par les deux faces de la lame à faces parallèles ne donne aucune figure d'interférence, puisque les deux faisceaux se superposent parallèlement et l'interfrange est infini ce qui donne une zone commune uniforme. Par contre, si le

faisceau incident est non collimaté (convergent ou divergent) on voit l'apparition d'une figure d'interférence.

Dans le même sens et comme une autre application de cet interféromètre, on distingue l'analyse des aberrations des fronts d'ondes, comme le montre la figure II.20, cette analyse permet de prédire le type d'aberration qualitativement [27, 28, 44,45].

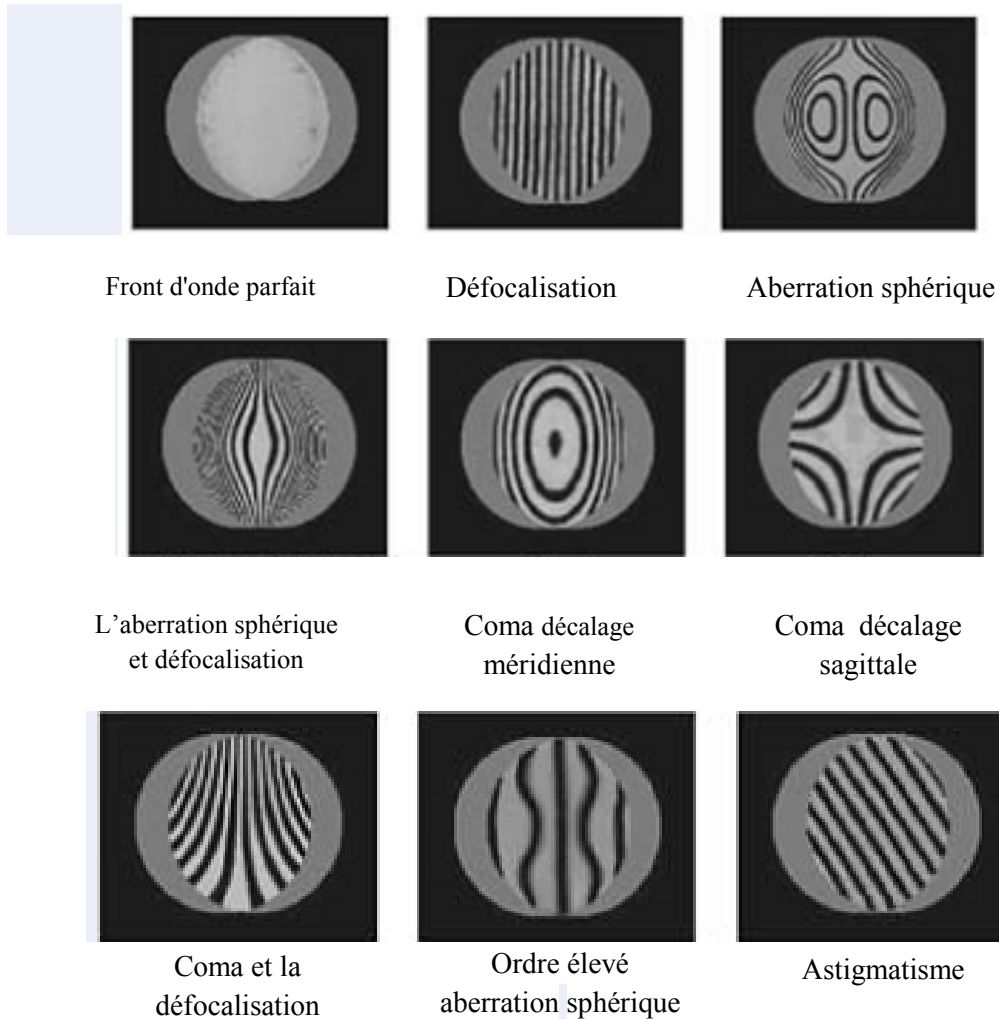


Figure II.20 : Certains interférogrammes obtenus par interféromètre à décalage latéral.

Chapitre III :

Procédure expérimentale, résultats et discussion

III.1.Introduction

L'épaisseur et l'indice de réfraction des composants optiques sont des paramètres importants, pour cela de nombreuses méthodes optiques ont été développées pour les mesurer de façon non destructive [46].

Parmi toutes les méthodes de mesures et de contrôles existantes, les méthodes interférentielles jouent un rôle important, du à la très grande sensibilité des interférences lumineuses.

Notre étude expérimentale vient pour compléter et illustrer les constatations théoriques en se basant sur le bon choix des méthodes de travail et du matériel ; en tenant compte des conditions optimales des expériences et une lecture correcte des résultats.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'un thème de recherche qui consiste à contrôler des milieux optiques par l'application de l'interféromètre de Murty (basé sur une lame à faces parallèles).

Au début , nous présentons une technique interférométrique qui est l'interféromètre de Murty pour la vérification de collimation d'un faisceau laser.

Nous exploitons les interférogrammes qui montrent un contrôle quantitatif de l'épaisseur de différentes lames.

Et à la fin nous présentons des montages interférométriques spécifiques au contrôle et au mesure de l'indice de réfraction des différents milieux (les lames plates, les lentilles et les liquides).

Avant d'entamer les expériences proprement dites, on va énumérer les moyens utilisés pour compléter le déroulement de notre travail.

III.2.Les moyens utilisés

III.2.1. La caméra CCD

La caméra CCD utilisée pour le déroulement de nos expériences est de type SONY, noir et blanc de caractéristiques suivantes :

- Pixel : 500x582 (horizontal x vertical).
- Surface détectrice : 3.3x 4.4 (mm).
- Dimension du pixel : 6.6x 7.57 (mm).

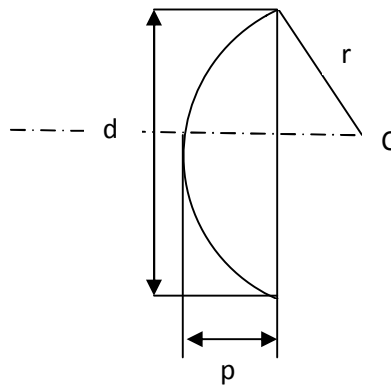
III.2.2. Le réfractomètre d'Abbé

Le réfractomètre d'abbé est un instrument optique destiné à mesurer l'indice de réfraction des liquides et des matériaux transparents.

III.2.3. Le sphéromètre

Est un moyen pour mesurer le rayon de courbure des surfaces concaves ou convexes. Ce dernier peut être calculé à partir du diamètre de la lentille et de l'hauteur de la crête. Selon la relation Pythagore qui vaut :

$$r = \frac{d^2 + 4p^2}{8p} \quad (\text{III.1})$$



p : La hauteur de crête.

d : Est déterminée à partir des abaques.

III.2.4. Le pied à coulisse digital

Le pied à coulisse digital a été utilisé pour mesurer nos épaisseurs est de précision de mesure de l'ordre de 0.01mm.

III.2.5. Le palmer

Le palmer a été utilisé pour mesurer nos épaisseurs, est de précision de mesure de l'ordre de 0.01mm.

III.3. Application de l'interféromètre de Murty pour le contrôle de la collimation du faisceau laser

L'interféromètre de Murty (basé sur une lame à faces parallèles) est utilisé comme exemple pour contrôler la collimation de faisceau laser.

III.3.1.Montage expérimental

La figure (III.1) présente l'arrangement de l'interféromètre de Murty utilisé dans cette expérience. La lumière émise par une source laser He-Ne (30mW, 632.8nm), est élargie par un système composé d'un objectif de microscope de grossissement égal 6.3x, et de focal $f_1=4\text{mm}$, et d'un filtre spatial de $30\mu\text{m}$ de diamètre placé à son point focale. Le faisceau laser obtenu est collimaté par un objectif photographique de focale $f_2=210\text{ mm}$ et un nombre d'ouverture variable. Ce faisceau tombe ensuite sur une lame à faces parallèles incliné de 45° . L'interférence produite entre le faisceau réfléchi par la première face de la lame et le faisceau réfléchi par la face interne de la lame. L'image est captée par une caméra CCD qui est interfacée avec un micro-ordinateur pour enregistrer et stocker les images. L'interface est réalisée par l'intermédiaire de la carte d'acquisition vidéo-capture. L'exploitation des images stockées est assurée par le logiciel Image-Pro Plus (IPP).

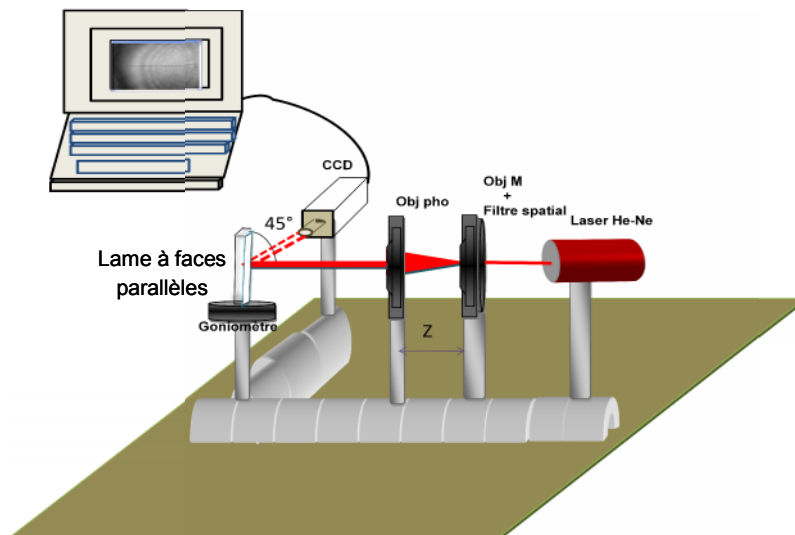


Figure.III.1 : Montage de l'interféromètre de Murty utilisé pour la vérification de collimation du faisceau laser.

III.3.2.Le principe de l'expérience

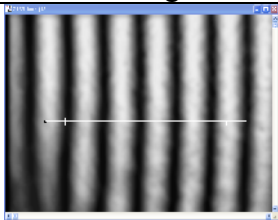
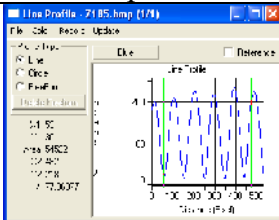
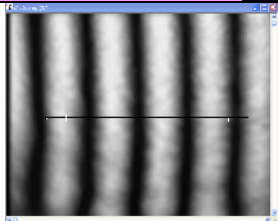
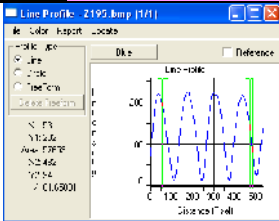
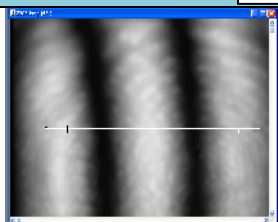
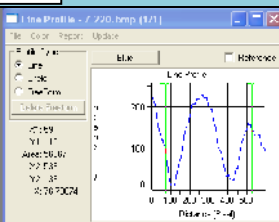
En premier lieu on fait la mise en place de l'interféromètre de Murty et on positionne le système de collimation composé d'un objectif de microscope et d'un objectif photographique.

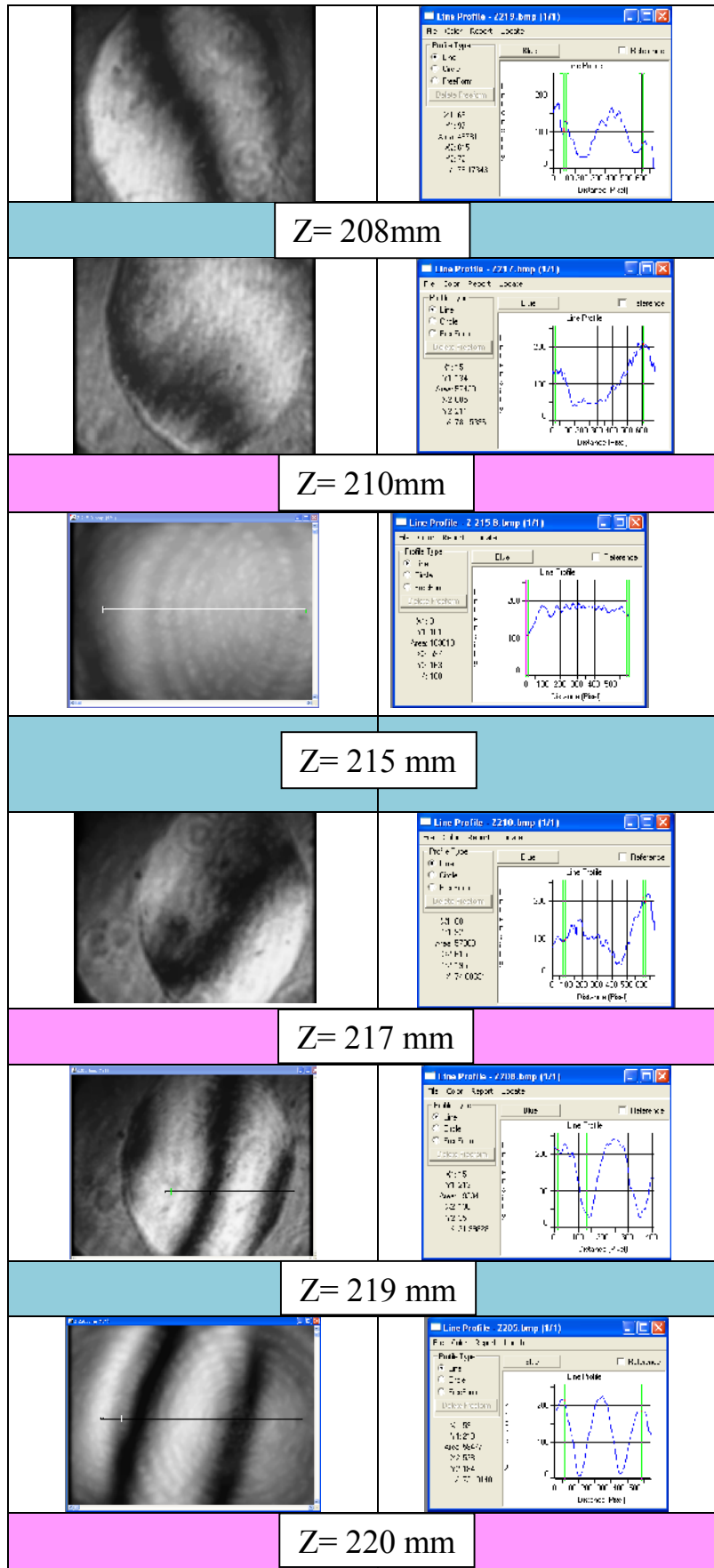
Une bonne collimation (le faisceau est bien parallèle) correspond à une image d'intensité uniforme, là où la collimation se dégrade une figure d'interférence apparaît :

soit pour un faisceau convergent ou divergent. L'apparition des franges d'interférences est due au déphasage (différence de marche entre le faisceau réfléchi par la première et la deuxième interface de la lame). Ce déphasage dépend de l'épaisseur de la lame à faces parallèles utilisée dans l'interféromètre de Murty. Pour vérifier la collimation d'un faisceau laser He-Ne, on fait déplacer l'objectif photographique d'une distance Z par rapport à l'objectif de microscope. On enregistre l'image correspond à chaque distance Z , à une certaine distance, l'image du faisceau obtenue devient uniforme, cette distance correspond à la collimation. Après cette distance, on fait déplacer toujours l'objectif photographique dans le même sens et on enregistre les images pour chaque distance.

III.3.3. Résultats expérimentaux

Les images obtenues par la caméra CCD et leurs profils, en fonction des distances qui leurs correspondent, sont représentées dans le tableau III.1.

Les interférogrammes	Les profils
	
Z= 195 mm	
	
Z= 200 mm	
	
Z= 205 mm	



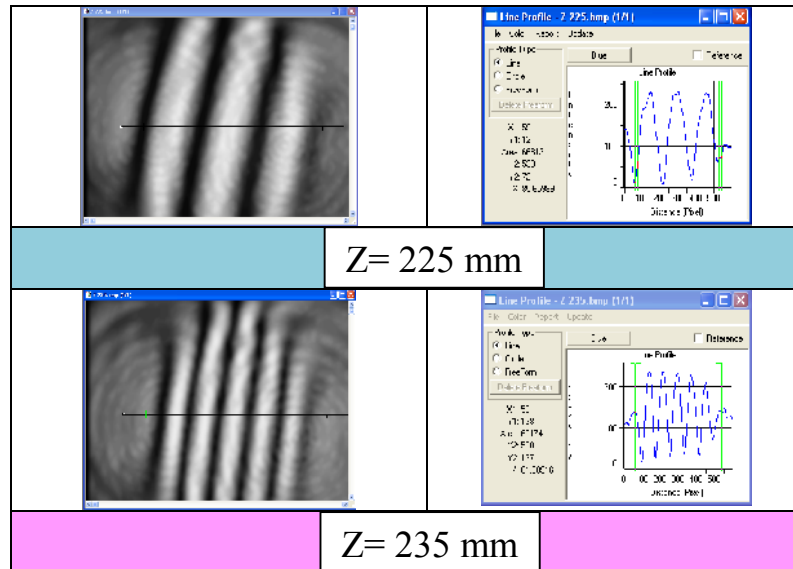


Tableau.III.1 : Les interférogrammes obtenus par l'interféromètre de Murty.

III.3.4. Interprétation des résultats

Les interférogrammes et les profils du tableau précédent montrent que la variation de distribution d'intensité ainsi l'interfrange augmente avec l'augmentation de la distance Z jusqu'à ce que la distribution d'intensité devienne uniforme et cela pour la distance Z égale à 215mm.

Après cette distance les franges commencent à réapparaître de nouveau. Cette réapparition montre la diminution de l'interfrange ainsi que celle du "Shear".

On remarque aussi quand la distance Z est inférieure à 215mm les franges sont orientées vers le côté gauche par contre quand la distance Z est supérieure à 215mm sont orientées vers le côté droit. Ceci peut être expliqué par le fait que dans le premier cas le faisceau est divergent, et dans le deuxième cas le faisceau devient convergent.

En comparant les résultats trouvés aux images montrées dans le chapitre II, on peut dire que le système contrôlé est dépourvu d'aberrations, donc ce système c'est un achromat.

Le but de cette première expérience est de se familiariser avec l'interféromètre de Murty et de vérifier la collimation du faisceau laser pour continuer les autres tâches de travail avec précision.

III.4. Le choix de l'angle d'inclinaison de la lame à faces parallèles

Pour prouver l'argument pour lequel nous avons choisi de travailler avec l'angle 45° , nous avons varié l'angle d'incidence et les interférogrammes obtenus sont présentés dans le tableau III.2.

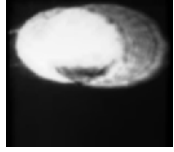


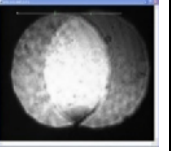
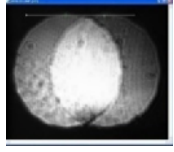



			
Angle 30°	Angle 35°	Angle 40°	Angle 45°
			
Angle 50°	Angle 55°	Angle 60°	Angle 65°

Tableau III.2 : Les interférogrammes obtenus de l'angle d'incidence.

D'après le tableau précédent, on peut remarquer que les interférogrammes des angles de 30° à 40° et aussi de 50° à 65° , présentent le problème d'astigmatisme (les deux tâches sont des ellipses). Par contre pour l'angle 45° , on observe une absence plus au moins parfaite de l'astigmatisme.

A partir des interférogrammes du tableau III.2, on trace le rapport S/t (avec t : est la distance de la zone d'interférence) en fonction de l'angle d'incidence, on obtient l'allure de la courbe présentée sur la figure III.2.

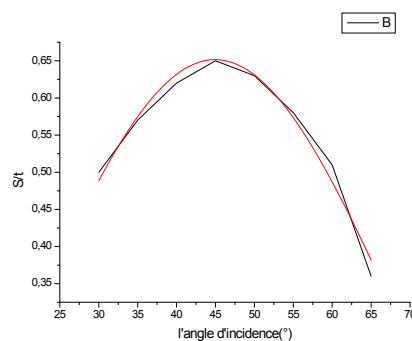


Figure.III.2 : Le graphe S/t en fonction de l'angle d'incidence.

Cette courbe nous montre réellement le choix de notre angle qui est de 45° .

III.5. Contrôle interférométrique des composants optiques

Les mesures des paramètres de la lame à faces parallèles et de la lentille tels que l'épaisseur, rayon de courbure, et l'indice de réfraction sont importants. Nous décrivons une méthode de mesure qui utilise un interféromètre de Murty pour déterminer les paramètres précédents. Une analyse expérimentale détaillée est donnée.

III.5.1. Contrôle de l'épaisseur des lames à faces parallèles

Pour contrôler l'épaisseur des lames à faces parallèles nous avons utilisé un montage semblable au montage de vérification de collimation du faisceau laser.

III.5.1.1. Le principe de l'expérience

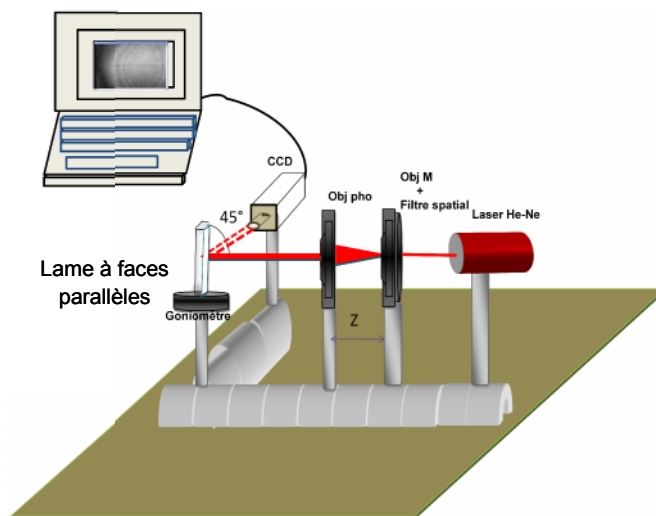
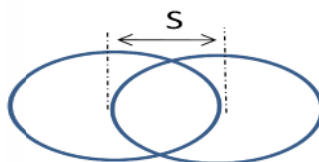


Figure.III.3 : Montage de l'interféromètre de Murty utilisé pour le contrôle de l'épaisseur des lames à faces parallèles.

Le principe de ce montage repose sur l'interférence entre le faisceau réfléchi à partir de la première et la deuxième interface de la lame. La combinaison entre les deux faisceaux produit ce qu'on appelle le "shear" latéral qui présente la distance entre les centres des deux tâches.



Ce dernier dépend de l'épaisseur de la lame. Pour pouvoir comparer les valeurs des épaisseurs calculées à partir des images obtenues et les valeurs des épaisseurs

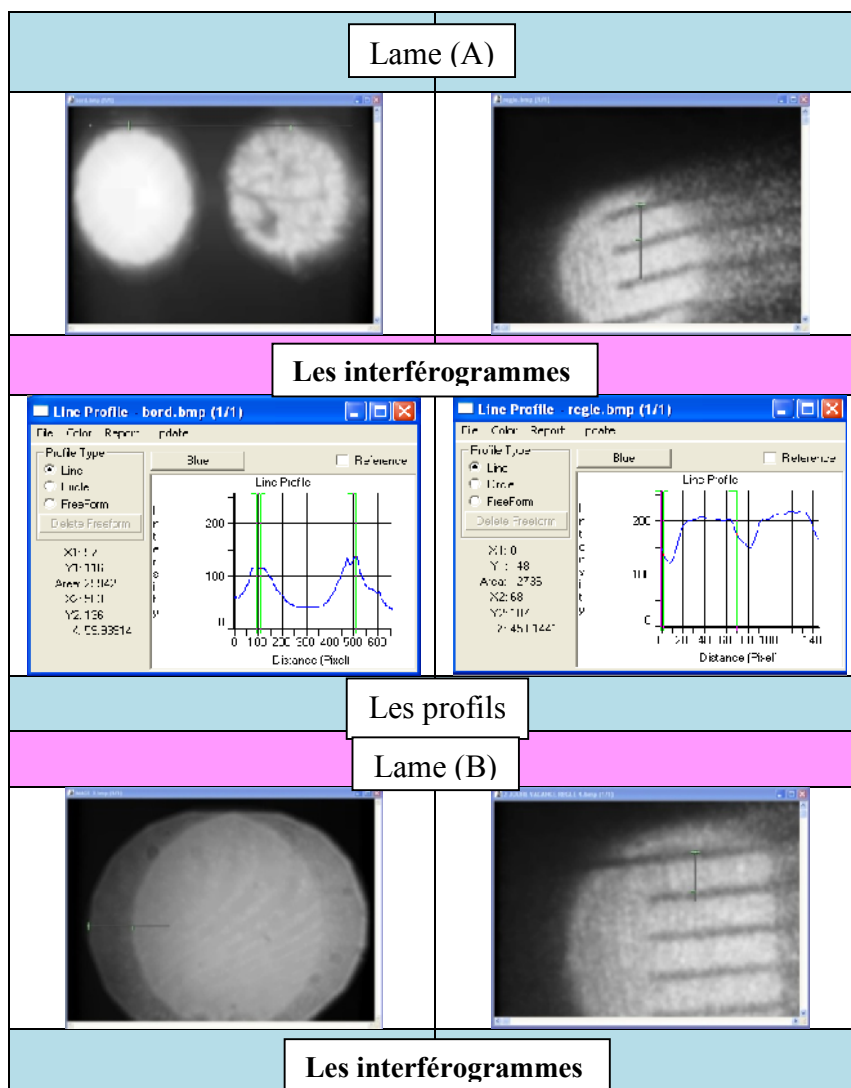
mesurées avec un autre moyen qui est le pied à coulisse digitale, on place une règle graduée à la place de l'échantillon pour convertir les pixels en millimètres.

III.5.1.2. Résultats et interprétations

Dans cette expérience nous choisissons des lames de différentes épaisseurs :

- ❖ lame (A) d'épaisseur $e=8\text{mm}$.
- ❖ lame (B) d'épaisseur $e=1.82\text{mm}$.
- ❖ lame (C) d'épaisseur $e=1.66\text{mm}$.
- ❖ lame (D) d'épaisseur $e=1.02\text{mm}$.

Les interférogrammes, les images des règles, et leurs profils sont représentés dans le tableau III.3.



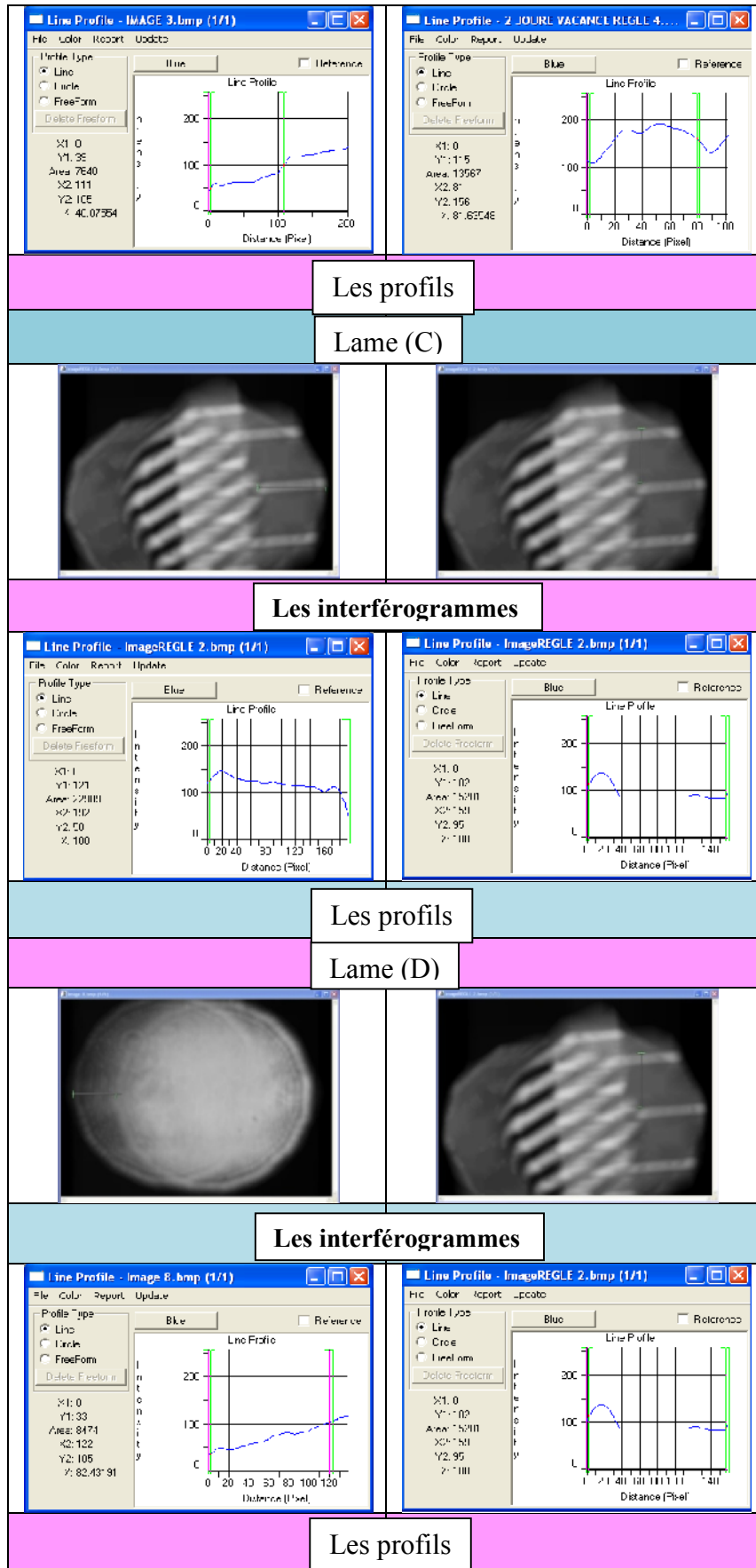


Tableau III.3 : Présentation des interférogrammes et leurs profils des lames et les images de la règle.

La valeur de l'épaisseur e , peut être tirée de la formule **II.11**

$$e = \frac{S\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\sin 2\theta} \quad (\text{III.2})$$

Donc d'après la formule III.2, il suffit de déterminer le shear S pour une incidence de 45° et un indice de réfraction mesurer par le réfractomètre d'abbé pour calculer l'épaisseur de la lame.

Les résultats calculés sont illustré dans le tableau suivant :

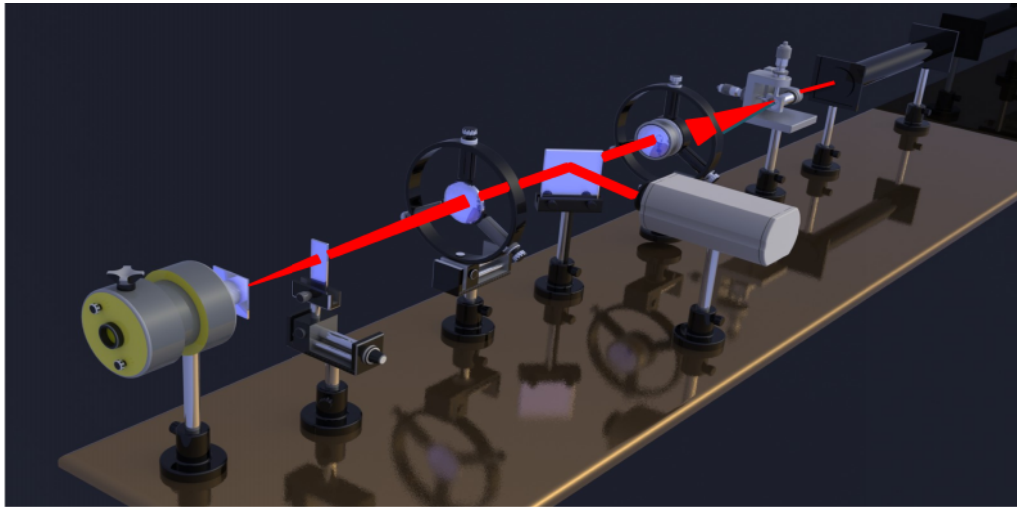
Echantillons	Le shear S (mm)	Θ [°]	L'indice de réfraction	L'épaisseur calculée [mm]	L'épaisseur mesurée [mm]	Erreur Relative [%]
Lame [A]	5.9705	45	1.5170	8.01	8.00	0.12
Lame [B]	1.3703	45	1.5195	1.84	1.82	1.29
Lame [C]	1.2075	45	1.5170	1.62	1.66	2.40
Lame [D]	0.7672	45	1.5185	1.03	1.02	0.98

Tableau.III.4 : Les résultats des calculs obtenus pour le contrôle d'épaisseur des lames à faces parallèles.

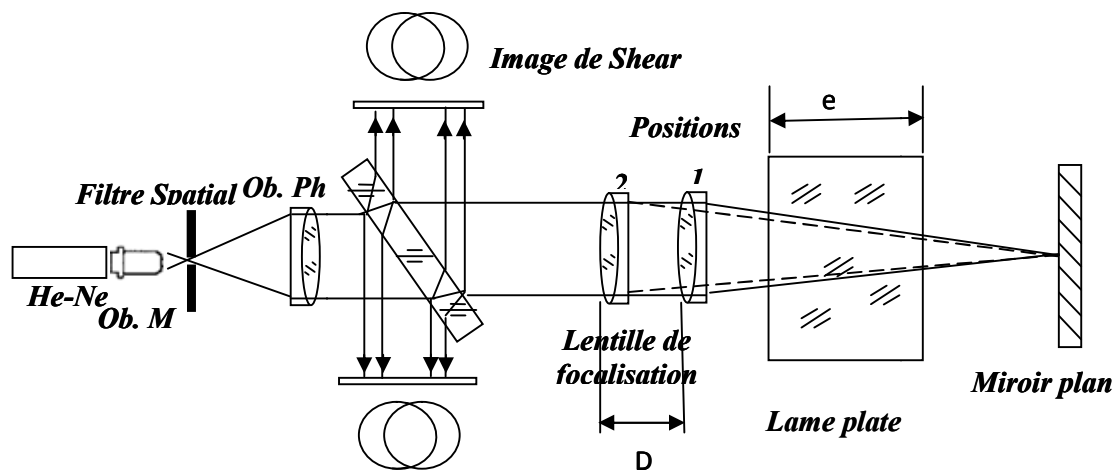
D'après ce tableau on remarque que les valeurs des épaisseurs des lames calculées, sont très proches aux valeurs mesurées par le pied à coulisse digitale. On peut dire que les résultats concordent bien. Donc cette méthode peut être un bon moyen de contrôle des épaisseurs des lames à faces parallèles.

III.5.2. Contrôle d'indices de réfraction des lames plates

Une autre application de l'interféromètre de Murty consiste à contrôler l'indice de réfraction des lames plates avec le montage de la figure III.4.



(A)



(B)

Figure.III.4 : Le schéma de montage utilisé pour mesurer l'indice de réfraction des lames plates, A : Montage schématisé par solid works ; B : Montage montrant la marche des rayons.

III.5.2.1.Principe de mesure

Un faisceau laser bien collimaté tombe sur une lame à faces parallèles. Une lentille de focalisation de distance focale $f = 210$ mm monté sur une table de translation afin de marquer les valeurs de déplacement et placé sur le trajet du faisceau transmis. Ensuite en place un miroir plan dans le foyer de la lentille. Dans cette position, la lumière réfléchié reste collimaté après le passage à travers la lentille. Ceci est indiqué par l'observation des franges horizontales. La position «O» de la lentille est marquée. Pour mesurer l'indice de réfraction des lames plates, on place ces dernières entre la

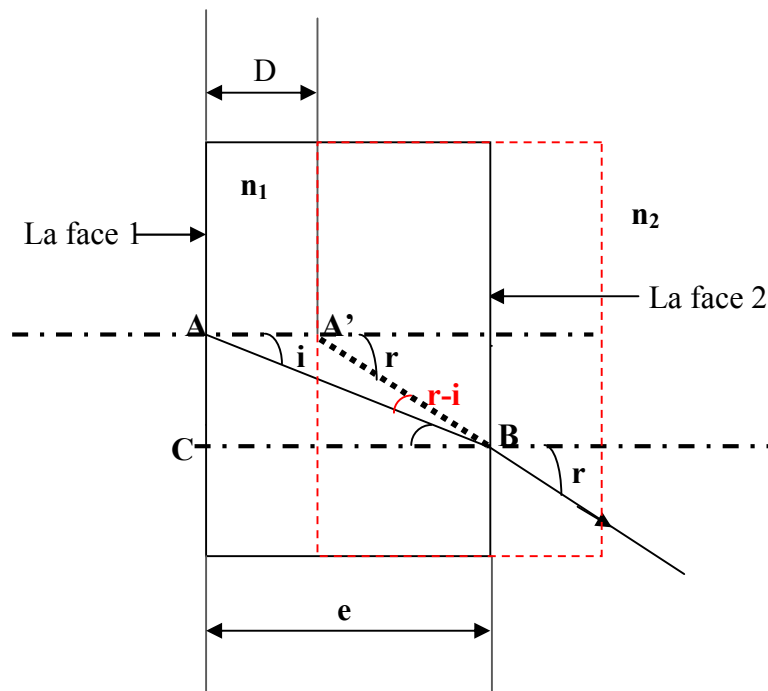
lentille et le miroir, par conséquent, le foyer de la combinaison lentille-lame se déplace le long de l'axe optique par une valeur D donnée par [47] :

$$D = \frac{e(n-1)}{n} \quad (\text{III.3})$$

Telles que e et n sont respectivement l'épaisseur et l'indice de réfraction de la lame. Le déplacement longitudinal du foyer est indiqué par l'inclinaison des franges par rapport à la direction horizontale. Pour rendre les franges à son état initial c-à-d le faisceau réfléchi collimaté, on déplace la lentille au nouveau foyer « \acute{O} ». On note la position \acute{O} de la lentille. La différence entre les deux positions « O » et « \acute{O} » donne la valeur de déplacement D introduit par la lame plate. Si l'épaisseur de la lame « e » est connue, l'indice de réfraction de la lame est calculé par l'équation suivante :

$$n = \frac{e}{(e-D)} \quad (\text{III.4})$$

Cette relation peut être démontré de la manière suivante :



Dans le triangle BAA' , on peut utiliser le théorème de sinus :

$$\frac{AA'}{\sin(r-i)} = \frac{AB}{\sin(180-r)} \quad (\text{III.5})$$

Et à partir du triangle ACB on tire la valeur de AB tel que :

$$AB = \frac{BC}{\cos i} = \frac{e}{\cos i} \quad (\text{III.6})$$

$AA=D$; $\sin(180 - r) = \sin r$, alors :

$$\frac{D}{\sin(r-i)} = \frac{e}{\sin r \cdot \cos i} ; \frac{D}{e} = 1 - \frac{\sin i \cdot \cos r}{\sin r \cdot \cos i} \quad (\text{III.7})$$

Si $i = r = 0$, les rayons incident tombent perpendiculaire à la face 2 et les rayons réfracté sortent perpendiculaire du cette face, alors $\cos i = \cos r = 1$

Dans ces conditions

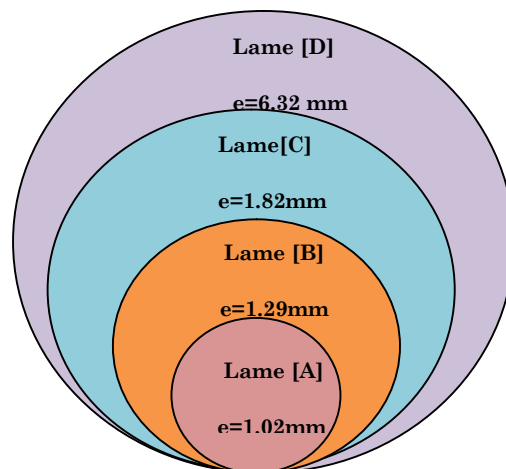
$$\frac{D}{e} = 1 - \frac{\sin i}{\sin r} = 1 - \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{D}{e} = 1 - \frac{1}{n_1} (n_2 = 1 \text{ pour l'air})$$

$$\Rightarrow n_1 = n = \frac{e}{e - D}$$

L'épaisseur de la lame est mesurée par un palmer.

Dans cette tâche nous avons utilisé des lames de différentes épaisseurs.



III.5.2.2. Résultats et interprétations

Les interférogrammes obtenus avant et après l'emplacement des lames sont représentés dans le tableau III.5.

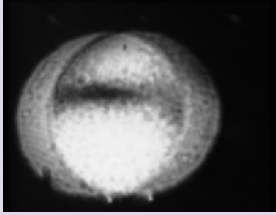
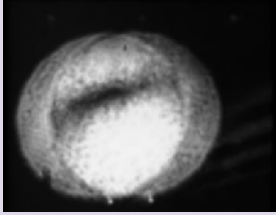
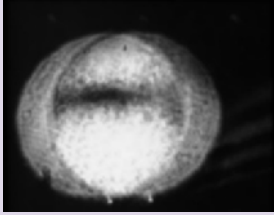
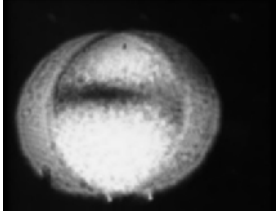
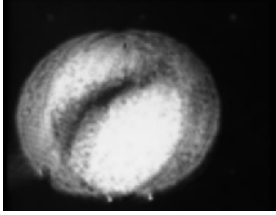
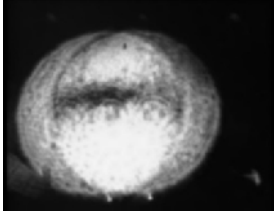
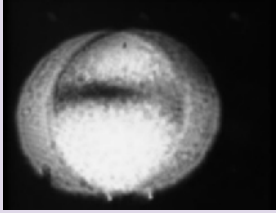
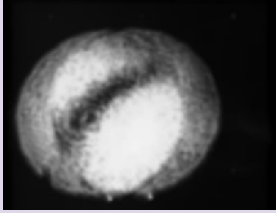
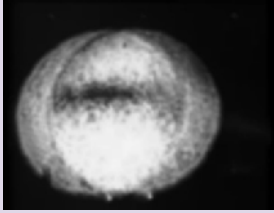



Les lames	Avant insertion des lames	Après insertion des lames	Après déplacement
Lame [A]			
Lame [B]			
Lame [C]			
Lame [D]			

Tableau.III.5 : Les interférogammes obtenus avant et après l'emplacement des lames.

Afin de contrôler nos résultats calculés, nous avons mesuré l'indice de réfraction des lames avec le réfractomètre d'abbé. Le tableau III.6 représente les positions marquées, ainsi que les indices de réfraction calculés et ceux mesurés.

Les échantillons	Position 1 (mm)	Position 2 (mm)	D (mm)	n calculé	n mesuré	Erreur relative [%]
Lame [A]	7.87	7.52	0.35	1.5223	1.5185	0.2502
Lame [B]	4.64	4.20	0.44	1.5176	1.5175	0.0065
Lame [C]	7.92	7.30	0.62	1.5166	1.5195	0.1908
Lame [D]	25.23	28.04	2.81	1.7937	/	/

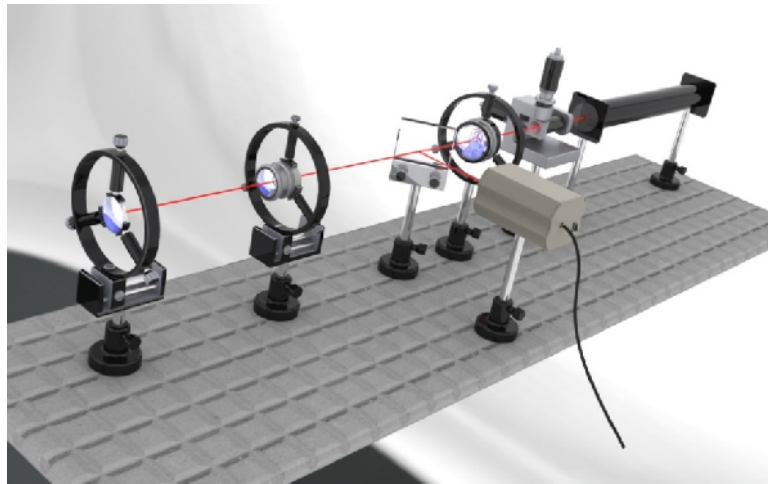
Tableau.III.6 : Les résultats des calculs obtenus pour le contrôle des indices de réfraction des lames plates.

D'après ce tableau nous avons remarqué que les valeurs des indices de réfraction calculées sont très proches des valeurs des indices mesurées, ce qui confirme la validité de cette technique pour le contrôle des indices de réfraction des lame plates.

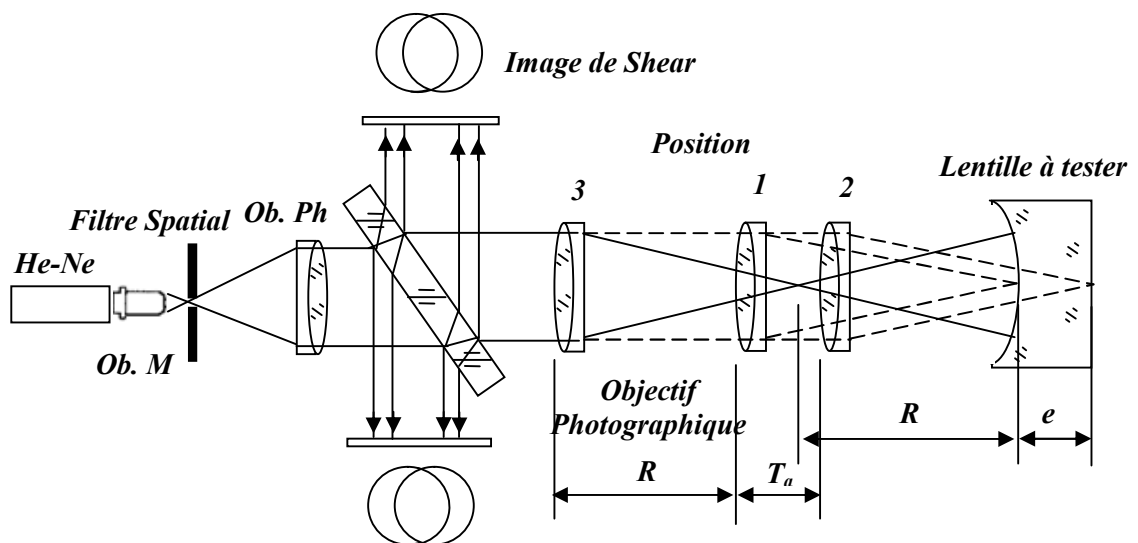
On peut dire aussi que notre interféromètre peut mesurer des indices haut, comme le montre le résultat de la lame D. Ce matériau peut être probablement du SF6 (verre flint).

III.5.3. Contrôle d'indices de réfraction des lentilles

Les schémas de principe de contrôle et de mesure de l'indice de réfraction des lentilles concaves et convexes ainsi que leurs rayons de courbures, sont illustrés par la figure III.5.



A



B

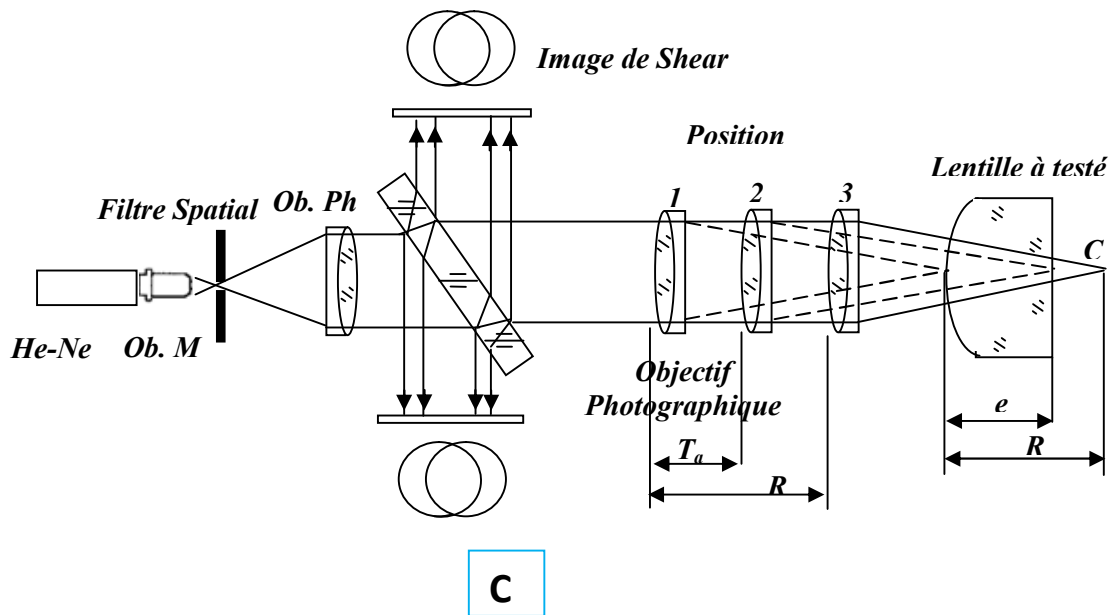


Figure.III.5 : Le schéma de montage utilisé pour mesurer l'indice de réfraction des lentilles, A : Montage schématisé par solid works ; B : Montage montrant la marche des rayons pour la lentille plan concave ; C : Pour la lentille plan convexe.

III.5.3.1. Principe de mesure

La lame à faces parallèles donne un faisceau réfléchi qui forme l'image de référence et un autre transmis en passant par l'objectif photographique fixé sur une table de translation. Ensuite en place notre lentille à tester dans le chemin du faisceau transmis par l'objectif. On déplace l'objectif photographique suivant trois positions :

- La première position correspondant à la focalisation du faisceau sur la première face de la lentille à tester, l'image de cette dernière montre une distribution uniforme d'intensité dans l'une des tâches obtenue. Par contre l'autre tâche présente des franges(correspond à la deuxième face). On marque la valeur de cette position.
- La deuxième position est marquée par le déplacement de l'objectif photographique vers notre lentille à tester. On remarque l'apparition des franges dans la première tâche et une évolution de l'interfrange dans la deuxième tâche jusqu'à ce que qu'on obtenir une distribution d'intensité uniforme. La différence entre la position 1 et 2 donne la valeur de l'épaisseur apparente T_a de la lentille à tester.

Les interférogrammes suivants présentent les positions 1 et 2 pour les surfaces concave et convexe .

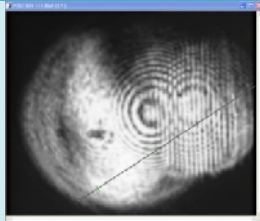
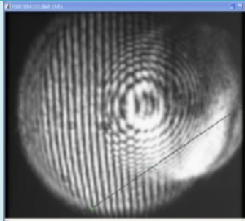
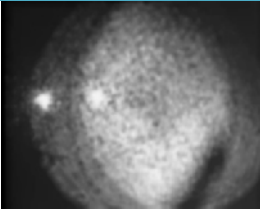
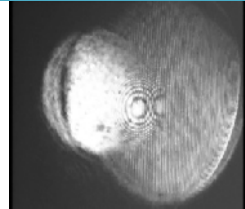
Les lentilles	Position 1	Position 2
Lentille concave		
Lentille convexe		

Tableau .III.7 : Les interférogrammes correspondants aux positions 1 et 2.

On remarque que dans l'interférogrammes de la lentille convexe la réflexion de la deuxième face qui apparait comme deux taches séparées. Ceci est due probablement à l'épaisseur.

- La troisième position est prise quand l'objectif est déplacé vers la lentille à tester dans le cas du contrôle d'une lentille convexe. Par contre dans le cas d'une lentille concave, l'objectif doit se déplacer dans le sens inverse. Ceci est fait dans le but de focaliser la lumière sur le centre de courbure de la surface concave ou convexe. Une image d'une distribution uniforme d'intensité est encore obtenue lorsque le foyer de l'objectif coïncide avec le centre de courbure de la surface concave ou convexe. La position 3 de l'objectif est notée et la distance entre la position 1 et 3 donne le rayon de courbure R de la surface à tester.

L'épaisseur centrale de la lentille à tester T est mesurée à l'aide d'un palmer .

Les figures suivantes présentent les interférogrammes obtenus après la coïncidence du foyer de l'objectif avec le centre de courbure des surfaces à tester.

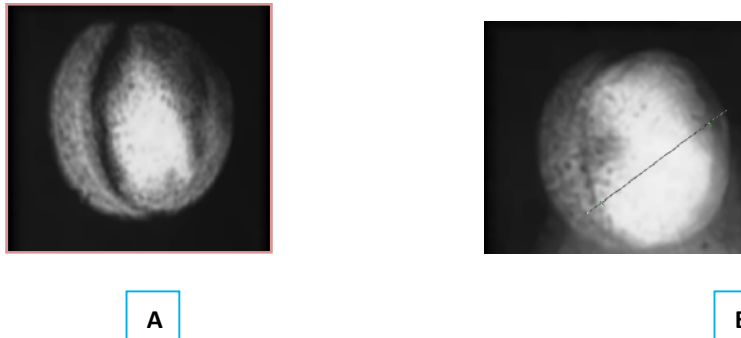


Figure.III.6 : Les interférogrammes obtenus par la troisième position, A : Pour la lentille plan concave ; B : Pour la lentille plan convexe.

Les indices de réfractifs des lentilles concaves et convexes sont calculés à partir des relations (III.8) et (III.9) [48].

- Pour la surface concave

$$n = \frac{T(R+T_a)}{T_a(R+T)} \quad (\text{III.8})$$

- Pour la surface convexe :

$$n = \frac{T(R-T_a)}{T_a(R-T)} \quad (\text{III.9})$$

III.5.3.2. Résultats et interprétations

Les résultats obtenus pour les différentes positions ainsi que les résultats calculés, sont illustrés dans le tableau III.8. Les valeurs trouvées des indices de réfraction et celles des rayons de courbures sont comparées aux valeurs mesurées par le réfractomètre d'abbé et le sphéromètre.

La surface	Position 1 (mm)	Position 2 (mm)	Position 3 (mm)	T _a (mm)	T (mm)	R calculé (mm)	R Mesuré (mm)
Concave	0.00	2.49	53.16	2.4	2.49	53.16	52.14
convexe	0.46	7.87	36.12	7.2	7.41	35.66	35.46
La surface	n calculé		n mesuré		Erreur relative de R [%]		Erreur relative de n [%]
Concave	1.6220		1.6235		1.95		0.09
convexe	1.6169		1.6164		0.59		0.03

Tableau.III.8 : Les résultats des calculs obtenus pour le contrôle d'indices de réfraction des lentilles.

D'après ces résultats, on remarque que les valeurs calculées sont proches des valeurs mesurées ; ceci confirme la validité de cette méthode.

III.5.4. Contrôle de l'indice de réfraction des liquides

Une dernière application de l'interféromètre de Murty a été proposée pour la détermination de l'indice de réfraction haut et bas. Ce dernier est mesuré à partir du montage de la figure III.7.A.

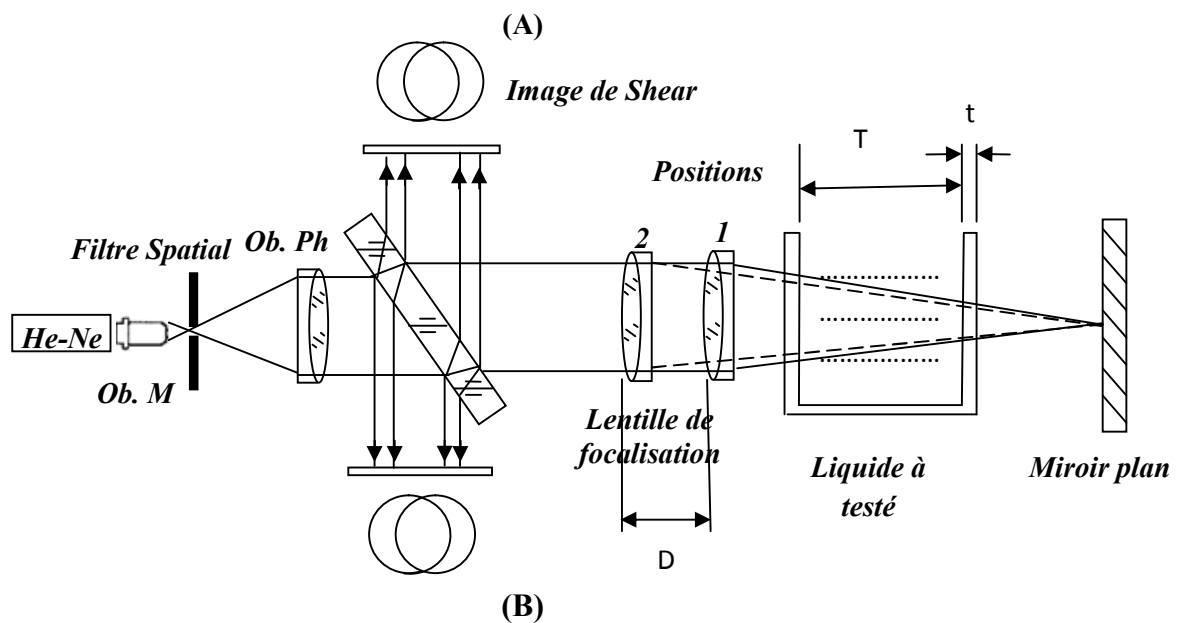
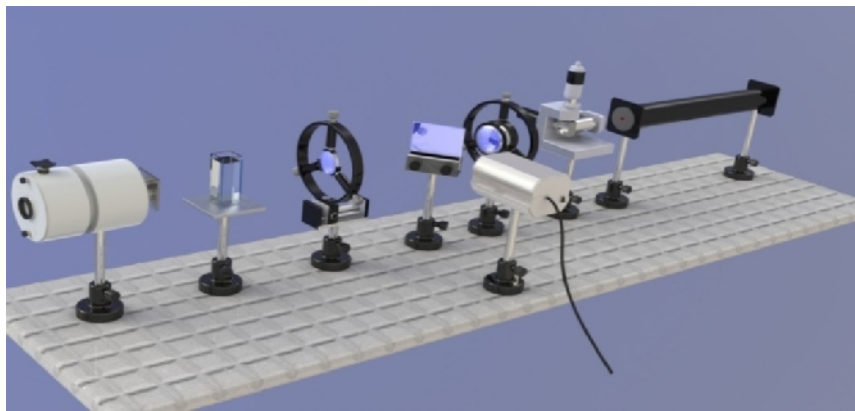


Figure.III.7 : Le schéma du montage utilisé pour mesurer l'indice de réfraction des liquides,
A : Montage schématisé par solid works ; B : Montage montrant la marche des rayons.

III.5.4.1. Principe de mesure

Comme indiqué dans la figure III.7.B, un faisceau laser bien collimaté tombe sur une lame à faces parallèles incliné de 45° . Une lentille de focalisation est placée sur le

trajet du faisceau transmis par la lame. Une cuvette vide est placée dans le trajet du faisceau convergent obtenu par la lentille de focalisation. Un miroir plan est alors placé au foyer de la combinaison lentille-cuvette. Dans cette position la lumière réfléchiée reste collimatée après le passage à travers la cuvette et la lentille. Ceci est indiqué par l'observation des franges horizontales, on marque la première position de la lentille.

Pour mesurer l'indice de réfraction d'un liquide, ce dernier est versé dans la cuvette. Donc ce liquide peut être considéré comme une lame plate d'épaisseur T et d'indice de réfraction N_L . Par conséquent le foyer de la combinaison lentille-cuvette est déplacé le long de l'axe optique. Ceci est indiqué par l'apparition des franges inclinées. Pour rendre les franges à son état initial, on déplace la lentille vers le nouveau foyer, puis on marque la deuxième position. La différence entre les deux positions donne la valeur du déplacement D .


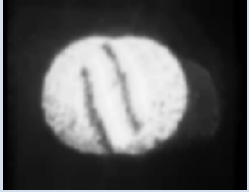

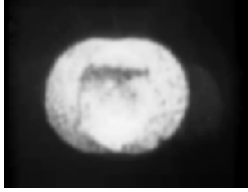

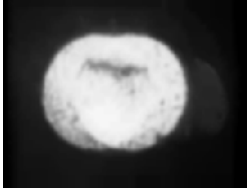
Si la longueur de la cuvette T est connue, l'indice de réfraction du liquide N_L est calculé par la relation III.10 [47]. Cette relation est semblable à la relation III.4.

$$N_L = \frac{T}{T-D} \quad \text{(III.10)}$$

III.5.4.2. Résultats et interprétations

Dans notre étude nous avons choisi six liquides pour contrôler leurs indices de réfraction : L'eau de zemzem, L'eau, Acétone, Ethanol, L'huile de camphre et Bromo-naphtalène.

Pour pouvoir calculer l'écart type, nous avons effectué l'expérience quatre fois pour chaque liquide et le tableau III.9 résume les interférogrammes obtenus pour les différentes positions.

Les liquides	Avant insertion des liquides	Après insertion des liquides	Après déplacement
ZEMZEM			
L'EAU			













L'ACETONE			
ETHANOL			
L'HUILE DE CAMPHRE			
BROMO-NAPHTHALENE			

Tableau.III.9 : Les interférogrammes obtenus pour les différentes positions.

D'après le tableau III.9 on remarque que, les interférogrammes donnés par la colonne centrale montrent une évolution de l'interfrange au fur et à mesure que l'indice de réfraction augmente.

A partir des valeurs des positions marquées et à l'aide de l'équation III.10, nous avons calculé les valeurs de l'indice de réfraction dans une température égale à 24°C. Les résultats de calcul et les valeurs des indices mesurés avec le réfractomètre d'abbé dans une température égale à 23°C sont représentées dans les tableaux suivants :

• L'eau de zemzem

Les expériences	Position 1 (mm)	Position 2 (mm)	D (mm)	T (mm)
expérience 1	20.79	23.28	2.49	10
expérience 2	22.44	24.92	2.48	10
expérience 3	21.19	23.68	2.49	10
expérience 4	22.13	24.62	2.49	10

Tableau.III.10 : Les valeurs des positions marquées pour le contrôle d'indices de réfraction de l'eau zemzem.

- L'eau

Les expériences	Position 1 (mm)	Position 2 (mm)	D (mm)	T (mm)
expérience 1	17.52	20.02	2.50	10
expérience 2	18.23	20.72	2.49	10
expérience 3	18.12	20.60	2.48	10
expérience 4	18.38	20.88	2.50	10

Tableau.III.11 : Les valeurs des positions marquées pour le contrôle d'indices de réfraction de l'eau.

- Acétone

Les expériences	Position 1 (mm)	Position 2 (mm)	D (mm)	T (mm)
expérience 1	18.20	20.82	2.62	10
expérience 2	19.30	21.92	2.62	10
expérience 3	19.46	22.09	2.63	10
expérience 4	17.53	20.15	2.62	10

Tableau.III.12 : Les valeurs des positions marquées pour le contrôle d'indices de réfraction de l'acétone.

- Ethanol

Les expériences	Position 1 (mm)	Position 2 (mm)	D (mm)	T (mm)
expérience 1	22.76	25.41	2.65	10
expérience 2	22.29	24.95	2.66	10
expérience 3	21.79	25.32	2.65	10
expérience 4	21.70	25.05	2.64	10

Tableau.III.13 : Les valeurs des positions marquées pour le contrôle d'indices de réfraction de l'éthanol.

- L'huile de camphre

Les expériences	Position 1 (mm)	Position 2 (mm)	D (mm)	T (mm)
expérience 1	17.42	20.60	3.18	10
expérience 2	17.84	21.03	3.19	10
expérience 3	17.29	20.48	3.19	10
expérience 4	17.72	20.90	3.18	10

Tableau.III.14 : Les valeurs des positions marquées pour le contrôle d'indices de réfraction de l'huile de camphre.

- Bromo-naphtalene

Les expériences	Position 1 (mm)	Position 2 (mm)	D (mm)	T (mm)
expérience 1	24.10	28.06	3.96	10
expérience 2	21.38	26.80	3.95	10
expérience 3	22.78	26.73	3.95	10
expérience 4	24.36	28.33	3.94	10

Tableau.III.15 : Les valeurs des positions marquées pour le contrôle d'indices de réfraction de bromo-naphtalène.

Le tableau III.16 résume les valeurs moyennes des indices de réfraction calculés avec l'écart type et celles mesurés par le réfractomètre d'abbé.

Les liquides	$N_{24}^{632.8}$	N_{23}^D	L'écart type [%]
L'eau de zemzem	1.3310	1.3330	0.090
L'eau	1.3319	1.3335	0.129
Acétone	1.3554	1.3592	0.09
Ethanol	1.3604	1.3656	0.110
L'huile de camphre	1.4673	1.4684	0.127
Bromo-naphtalene	1.6528	1.6532	0.224

Tableau.III.16 : Les valeurs des indices de réfraction calculées.

D'après les résultats présentés dans le tableaux ci-dessous, on remarque que les indices de réfraction calculés par notre technique, sont plus faibles que ceux mesurés à l'aide du réfractomètre d'abbé. Ceci est probablement dû :

-Premièrement à la différence de la température.

-Deuxièmement à la longueur d'onde d'éclairage utilisée, ceci peut être expliqué par la courbe de dispersion qui montre que l'indice de réfraction décroît en fonction de la longueur d'onde.

A l'aide des résultats calculés et à partir des interférogrammes obtenus nous avons essayé de tracer une courbe montrant la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'interfrange .

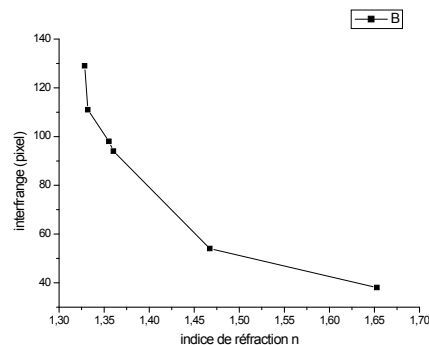


Figure.III.8 : La variation de l'indice de réfraction en fonction de l'interfrange.

A partir de cette courbe, on peut penser, que connaissant l'interfrange, on peut accéder à la valeur de l'indice de réfraction d'un liquide inconnu.

Pour confirmer cette pensée, on a refait l'expérience avec l'huile de Meramia, sans faire de calculs.

L'interférogramme obtenu avec cette l'huile et son profil sont représentés dans la figure III.9.

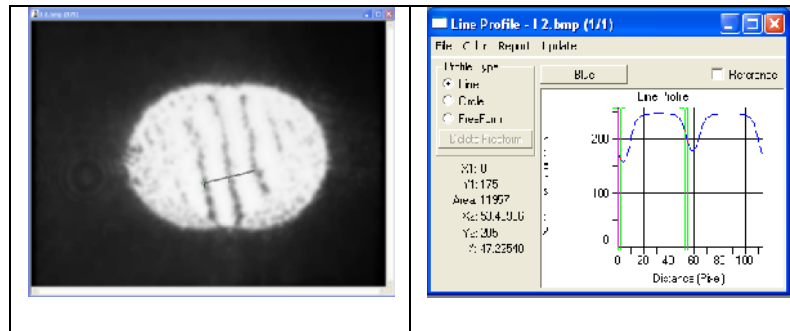


Figure.III.9: Représentation de l'interférogramme obtenu avec l'huile de Meramia et son profil.

A partir de cet interférogramme, on tire la valeur de l'interfrange, puis on la projette sur l'axe des ordonnées (correspondant aux indices).

La valeur de l'indice de réfraction obtenu est de l'ordre de 1.468. Cette valeur a été confirmée à l'aide du réfractomètre d'Abbe.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail nous a permis de contribuer à la compréhension d'une des techniques interférométriques qui est basée sur l'interféromètre de Murty et de lier nos constatations théoriques avec les résultats pratiques.

Dans cette perspective, nous avons fait une étude théorique sur l'interféromètre utilisé. L'ensemble des considérations théoriques a été corrélé avec les expériences faites. Ceci nous a permis de connaître les préoccupations que nous devons prendre lors de l'exécution des expériences.

Dans cette étude, nous avons accédé à plusieurs applications de l'interféromètre de Murty:

- ❖ En premier lieu, nous avons vérifié la collimation de notre faisceau laser afin de continuer les expériences avec précision.
- ❖ En deuxième lieu, nous avons procédé au contrôle et mesure de plusieurs paramètres de différents composants optiques:
 1. Mesure d'épaisseur de plusieurs lames à faces parallèles, où la précision obtenue est très acceptable.
 2. La mesure d'indices de réfraction des lames plates effectuées avec notre méthode concordent bien avec les résultats obtenus avec le réfractomètre d'Abbé.
 3. Les valeurs trouvées des indices de réfractions et des rayons de courbures de deux types de lentille, concave et convexe, montrent une bonne concordance avec celles mesurées avec le réfractomètre d'Abbé et le sphéromètre.
 4. Cette technique a été aussi utilisée pour la mesure des indices de réfraction haut et bas des liquides. Les résultats trouvés sont comparables avec résultats donnés par le réfractomètre.

D'après tous les résultats obtenus, on peut dire que l'interféromètre de Murty est un outil très puissant et très stable pour l'utiliser en métrologie optique. Il donne un accès à plusieurs paramètres optiques.

Comme perspective, nous proposons toujours l'utilisation de l'interféromètre Murty, mais l'extraction des informations (mesurandes) sera meilleure avec le traitement de l'interférogramme (interfrange, ordre d'interférence, etc...).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1].WAKIM. Marwan, «Contrôle de la position et de la vitesse d'une masse à l'échelle nanométrique: application à la balance du watt de LNE», Thèse de Doctorat, Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines, 14 mai 2008.
- [2].APOSTOL.D, DAMIAN.V, LOGOFATU.P, «Nanometrology of Microsystems: interferometry», Romanian Reports in physics, Vol.60, pp.815-828, 2008.
- [3].KAJELL.J.Gasvik, « Optical Metrology», Third edition, West Sussex, England, pp.37-61, 2002.
- [4].BOUHFID. Mounir, « Conception d'un capteur interférométrique et sa caractérisation par imagerie numérique», Thèse de Doctorat, Strasbourg, France, 25 novembre 1998.
- [5].JOËLLE. Surrel, « Optique instrumentale : Optique de Fourier», deuxième édition, édition marketing S.A, Paris, 2007.
- [6].REBMANN.G, «Optique ondulatoire : interférence II», deuxième édition, Paris, 2007.
- [7].ROUSSEL. Jimmy, « Optique ondulatoire : interférence à deux ondes», deuxième édition, édition ENSCR, Paris, Octobre 2009.
- [8].MAUREL. Agnès, « Optique ondulatoire», édition Belin, pp.65-144, Paris, 2003.
- [9].RAUX.P, « Optique ondulatoire», édition LAVAL, France, 2001.
- [10].PAUL.Drude, «The theory of optics», First edition, pp.124-156, New York, 1902.
- [11].B.Max, W.Emil, «Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light», Seven edition, New York, pp.286-409, august 2001.
- [12].KARL. Dieter. Mölles, « Optics», second edition, New Jersey, pp.79-125, 2007.
- [13].HARIHARAN.P, «Basics of interferometry», second edition, Sydney, Australia, pp.221, 2007.

- [14].BOUCHAREINE.Patrick, « Interférences de la lumière : théorie et applications», Techniques de l'ingénieur, traité mesures et contrôle, R 6475, 2002.
- [15]. HARIHARAN.P, «Optical interferometry», second edition, Sydney, Australia, pp.1-7, 2003.
- [16].FEZZAA. Kamel, «Etude et applications de la coherence à L'ESRF par interférométrie à rayon x», Thèse de Doctorat, Université de Grenoble 1, France, 1998.
- [17].R. N. Smartt, W. H. Steel, «Theory and application of Point-Diffraction interferometers», App. Phys, Vol.14, pp.1-14, 1975.
- [18].J. M. Burch, « Optical instruments and techniques», Oriel press, pp.213-229, Newcastle, 1972.
- [19].BLANCHARD.O, «Conception et caractérisation d'un mesureur de longueurs d'onde par interférométrie Fizeau pour des experiences lidar embarquées», Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 1990.
- [20].XIAOLEI. Zhang, KENNETHG. Carpenters, RICHARDG. Lyon, HUBERT. Huet, JOE. Marzouk, GREGORY. Sobyar, «The Fizeau interferometer test bed», IEEEAC paper, 2003.
- [21].T. Stephan. Koev and GHODSSI. Reza, « Advanced interferometric profil measurements through refractive media», Reviw of scientific instruments, Vol.79, pp.1-7, 2008.
- [22].HEILO.Yat, A.R.D.Somervell, T.H.Barnes, « Wave front measurement with a phase shifting lateral shearing sagnac interferometer operating in broadband light», journal of Optics and lasers in engineering, Vol.43,Issue 1, pp.33-41, 2005.
- [23].CHENDEB ELRAI. Marwa, « Interférométrie différentielle radar sur site urbain», Thèse de Doctorat, ESGT : Ecole supérieure des géomètres et topographes, France, Mars 2010.
- [24].MALACARA. Daniel, « Optical shop testing», second edition, Florida, pp.123-198, January 1992.

- [25].G. Paez, M.Strojnik,TORALESGarcia.G, « Vectorial shearing interferometer», App.Opt, Vol.28, Issue 28, pp. 5172-5178, October 2000.
- [26]. C.James, W.Yant, « Modern Optical Testing», College of optical Sciences, University of Arizona, 2006.
- [27].PAL.GHAI.Devinder, VYAS.Sunil,P.Senthilkumaran,R.S.Sihohi, « Shearograms of a singular beam using wedge plate lateral shear interferometer», journal of optics and lasers in engineering, Vol.46, Issue 11, pp.797-801, 2008.
- [28].MALACARA.Daniel,SERVIN. Manuel, MALACARA.Zakarias,« Interferogram analysis for optical testing», second edition, Leon, Mexico, 2005.
- [29].JOSEP. VIDAL. Gonzalez, «improvement of the accuracy of Fizeau interferometer by using lateral shearing», Thèse de Doctorat, Université de Barcelona, 28 Septembre 2008.
- [30].G. Paez, M.Strojnik, and G.G.Toreles, «Superposition Fringe shear interferometry», Appl.Opt, Vol.39, Issue10, pp.5172-5178, 2000.
- [31].ALAIN NICATI. Pierre, « Capteur de courant à fibre optique base sur un interferometer de sagnac», Thèse de Doctorat, Lausanne, 1991.
- [32].W. Lauterborn, T.Kurz, « Coherent optics: Fundamentals and applications», second edition, Berlin, Germany, pp.136-140, September 2002.
- [33].CHUNG-CHIEH. Cheng, M.G.Raymer and H.Heier, « Avariable lateral shearing sagnac interferometer with high numerical aperture for measuring the complexe spatial coherence function of light», journal of modern optics, Vol.47, pp.1237-1246, 2000.
- [34].BRUNO.Toulon, « La mesure d'amplitudes complexes par interférométrie à décalage Multi-latéral», Thèse de Doctorat, Université Paris, 20 Novembre 2009.
- [35].RIVET.Sylvain, «Caractérisation complete d'un faisceau laser impulsional femtoseconde : Mise en évidence et analyse de couplage spatio-temporel dans la propagation linéaire et non linéaire», Thèse de Doctorat, Université Bordeaux, France, 10 Décembre 2001.

- [36].VELGHE.Sabrina, « Les nouvelles dimensions de l'interférométrie à décalage quadri-latéral: l'infrarouge et les surfaces morcelées», Thèse de Doctorat, Université Paris XI, 15 Janvier 2001.
- [37].MURK. Murty, « The use of a single plane parallel plate as a lateral shearing interferometer with a visible gas laser source», App.Opt, 1964.
- [38].R.P.Shukla and MALACARA.Daniel, «Some applications of the Murty interferometer», A review, journal of optics and lasers in engineering, Vol.26, pp.1-42, 1997.
- [39]. R.P.Shukla. D.V.Vdupa, N.C.Das, V.Murty.Mantravadi, « Non-destructive thickness measurement of dichromated gelatin films deposited on glass plates», journal of optics and laser technology, Vol.38, pp.552-557, 2006.
- [40].K.Mastudak, Y.Eijut, «Novel holographic shearing interferometer for measuring lens lateral aberration», App.Opt, Vol.31, pp.3-9, 1992.
- [41].A.S.Devany, «Deviation prism interferometric testing», Optical society of America, 1978.
- [42].HENGYU.Yi, RONGZHU.Zhang, XIAOYANG.Hu, YONG.Peng, KAI.Zhang, MENXUE.Chen, «A novel compensation method for the measurement of radius of curvature», App.Opt, Vol.43, pp.911-915, 2011.
- [43].A.S.Devany, «Using a Murty interferometer for testing the homogeneity of test samples of optical materials», Applied Optics, Vol.10, June 1971.
- [44].R.S.Sirohi, T.Eiju, K.Mastuda, T.H.Barnes, «Multiple beam lateral shear interferometer for optical testing», App.Opt, Vol.34, 1995.
- [45].K.V.Sirian, P.Senthilkumaran, M.P.Kothial, R.S.Sirohi, «Double wedge plate interferometer for collimation testing: new configuration», App.Opt:32(22):4199-203, 1993.
- [46].XIANGJUN.Dai, HAI.Yun, QI.Pu, «Measuring thickness change of transparent plate by electronic speckle pattern interferometry and digital image correlation», Journal of optics communications, Vol.283, pp.3481-3486, 2010.

[47].R.P.Shukla, « Measurement of refractive index of liquid or glass using Murty interferometer», Pure and Appl. Phys, Vol.25, pp.90, 1987.

[48]. R.P.Shukla, G.M.Perera, M.C.George, and P.Venkateswarlu, «Determination of refractive index of a simple negative, positive, or zero power lens using wedged plated interferometer», Journal of Applied Optics, Vol.29, pp.4541-4543, 1990.

ملخص:

في هذه الدراسة قمنا باستخدام تقنية التداخل الضوئي من نوع «مورتي»، حيث تكمن أهميته في عدم تأثره بالاهتزازات الخارجية على عكس الأنواع الأخرى وهذا ما شجعنا على استخدامه في تحديد الخصائص البصرية لمختلف الأوساط (الصلبة و السائلة).

- أولاً قمنا بتحديد التناسق الضوئي لليزر

- ثانياً قمنا بقياس بعض الخصائص البصرية مثل: سمك و قرينة إنكسار أجسام مختلفة (صفائح ، عدسات و سوائل) و قطر الأسطح المقعرة و المحدبة .

هذه الخصائص قيست أيضاً بوسائل أخرى ، و وجدنا النتائج المحصل عليها متماثلة ..

الكلمات المفتاحية: تداخل مورتي – معامل الإنكسار – القياس البصري – التحول الجانبي .

Résumé:

Dans cette étude, on a utilisé une technique interférométrique basée sur la mise en place de l'interféromètre de Murty (interféromètre à décalage latéral d'images).

L'importance principale de cet interféromètre réside dans sa sensibilité et aussi le fait que la surface d'onde analysée interfère avec elle-même, éliminant ainsi le besoin d'une surface d'onde de référence. Ces avantages nous ont encouragés à l'utiliser afin de contrôler et mesurer certains paramètres optiques.

A titre d'application, nous avons pu contrôler la collimation du laser utilisé à partir des interférogrammes trouvés.

D'autres paramètres optiques ont été aussi analysés et mesurés tels que : les indices de réfraction, les épaisseurs de quelques milieux (solides, liquides) ainsi que les rayons de courbure des lentilles concaves et convexes.

Les calculs menés sur ces mesures, ainsi qu'à l'estimation des erreurs, concordent bien avec les résultats trouvés par d'autres dispositifs.

Mots clés: Interféromètre de Murty, Décalage latéral, Contrôle Optique, Interférogramme, Indice de réfraction.