

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
جامعة فرحات عباس - سطيف 1
Université Ferhat Abbas - Sétif 1

THÈSE

Présentée à l'Institut d'Optique et Mécanique de Précision
Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat En Sciences

Option : Optique et Mécanique de Précision

Par

MEZIANE Rahima

THÈME

Topographie non destructive des surfaces par le moiré interférométrique

Soutenue le : 30 / 01 / 2024

Devant le Jury :

Mr. Hamadou Abdelouahab	Prof	Université Ferhat Abbas Sétif 1	Président
Mr. Meguellati Saïd	Prof	Université Ferhat Abbas Sétif 1	Rapporteur
Mr. Bouchrit Sebti	MCA	Université Guelma	Examineur
Mr. Daoud Salah	Prof	Université BBA	Examineur

REMERCIEMENTS

Je remercie ALLAH, le tout-puissant, de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Je remercie mon directeur de thèse Pr. Meguellati Saïd de m'avoir proposé ce thème et de m'avoir apporté de l'aide.

Je désire à présenter sincèrement tout le respect aux membres de jury de m'honorer d'évaluer ce travail : **Pr. Mr. Hamadou Abdelouahab** de l'institut d'optique et mécanique de précision de Sétifde m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse, j'exprime ma reconnaissance au **Pr. Daoud Salah** de l'université Bordj Bou Arreridj, et au **Dr. Bouchrit Sebti**, MCA à l'université de Guelma, qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être membres de jury de cette thèse.

Je remercie également, le Professeur **Fabrice Brémand** de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire de Mécanique des Solides, Université de Poitiers France, je le remercie pour son aide scientifique et les discussions fructueuses et ses conseils.

Ma profonde gratitude va vers ma chère amie et chère collègue **Dr. Messagier Meriem** enseignante vacataire à l'institut d'optique et mécanique de précision Sétif qui est toujours présente et disponible pour m'offrir sa précieuse aide.

Je remercie l'ingénieur responsable de l'AFM **Douibi Hassina** pour ces aides.

Mon grand remerciement est à mon cher frère **Meziane Salah** qui m'a toujours accompagné et ma soutenu durant ma carrière d'études et m'a aidé pour surmonter tous les obstacles que j'ai rencontrés.

Mes vifs remerciements sont également adresser à mon mari **Bereriche Fakhreddine**, pour son aide à finaliser cette thèse.

Je remercie chaleureusement ma chère belle-sœur **Bereriche Samira** pour ces encouragements pour suivre ce travail.

Je remercie grandement les personnes de l'institut d'optique et mécanique de précision de Sétif, pour les échantillons qu'elles m'ont apportés pour enrichir ce travail.

J'avoue un grand et chaleureux merci à toutes les personnes qui me connaissent, de m'avoir encouragé et de me souhaiter la réussite. Mon profond respect et ma reconnaissance à toute personne qui m'a donné la moindre aide.

Table des matières

Remerciements	
Table des matières	
Liste des figures	
Introduction générale	

Chapitre 1

Caractérisation des surfaces

1.1	Introduction.....	4
1.2	Surface.....	4
1.2.1	Définition d'une surface.....	4
1.2.2	L'intérêt de l'analyse de surface.....	5
1.2.3	États de surface.....	5
1.2.4	Géométrie des surfaces.....	6
1.2.4.1	Géométrie nominale.....	6
1.2.4.2	Géométrie réelle.....	6
1.2.4.3	Géométrie spécifiée.....	7
1.2.4.4	Géométrie mesurée.....	7
1.2.5	Différents écarts géométriques de l'état de surface.....	8
1.2.5.1	Écart de forme ou de position.....	8
1.2.5.2	Écarts d'ondulations périodiques.....	9
1.2.5.3	Stries ou sillons.....	10
1.2.5.4	Arrachement de matière.....	10
1.2.6	Défauts des surfaces optiques.....	11
1.2.6.1	Défauts de forme.....	11
1.2.6.2	Rugosité.....	12
1.2.6.3	Défauts locaux.....	13
1.3	Méthodes de caractérisation et de mesure des surfaces.....	13
1.3.1	Méthodes de mesure et de caractérisation par contact.....	14
1.3.2	Méthodes de caractérisation et de mesure sans contact.....	15
1.3.2.1	Profilométrie laser.....	15
1.3.2.2	Méthodes de mesure interférométrique.....	16
1.3.2.3	Principe de la microscopie confocale.....	17
1.3.2.4	Projection des franges.....	18
1.3.2.5	Techniques de moiré interférométrique.....	19
1.3.2.6	Mesure des pentes d'une plaque déformée – Méthode de Ligtenberg.....	20
1.3.3	Comparaison entre la méthode optique et la méthode mécanique (palpage).....	22

2.1	Introduction.....	24
2.2	Le réseau.....	24
2.3	La diffraction.....	25
2.3.1	Définition.....	25
2.3.2	Diffraction par une fente fine.....	26
2.3.3	Diffraction de la lumière par un réseau linéaire à transmission.....	26
2.4	Le moiré.....	28
2.5	Les franges de moiré.....	29
2.5.1	Définition.....	29
2.5.2	Les différents types des franges de moiré.....	29
2.5.2.1	Moiré à réseaux linéaires.....	29
2.5.2.2	Moiré à réseaux circulaires.....	30
2.5.2.3	Moiré à courbes de Gauss.....	30
2.5.2.4	Moiré à réseaux à double périodes.....	31
2.5.2.5	Moiré à réseaux à anneaux de Fresnel.....	31
2.5.3	Schéma mathématique de formation des franges de moiré.....	32
2.6	Les paramètres qui influencent le contraste des franges.....	33
2.6.1	Mode d'éclairage.....	33
2.6.2	Influence du rapport a/p	35
2.6.3	Influence du procédé de fabrication des réseaux.....	36
2.7	Méthode de superposition des réseaux.....	37
2.7.1	Réseaux séparés par un coin d'air.....	37
2.7.2	Réseaux en contact.....	39
2.7.3	Superposition des réseaux par méthode optique.....	40
2.8	Moiré obtenu par la superposition de deux réseaux linéaires à transmission....	41
2.8.1	Réseau linéaire à transmission.....	41
2.8.2	Etude géométrique.....	41
2.8.2.1	Moiré de rotation.....	42
2.8.2.2	Moiré de translation.....	43
2.9	La sensibilité.....	43
2.9.1	Définition.....	43
2.9.2	Les paramètres qui influencent la sensibilité de moiré.....	43
2.9.2.1	L'angle θ	43
2.9.2.2	Le pas de réseau.....	44
2.9.3	Méthodes pour augmenter la sensibilité.....	45
2.9.3.1	Le filtrage spatial.....	45
2.9.3.2	La technique de multiplication de franges.....	46

3.1	Introduction.....	48
3.2	Définition.....	48
3.3	Techniques de topographie de surface.....	49
3.3.1	Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).....	49
3.3.2	Microscope à effet Tunnel (STM).....	50
3.3.3	Microscope à force atomique AFM.....	51
3.3.4	Profilomètre mécanique.....	52
3.3.5	Topographie plein champ et sans contact de films minces nanométriques par interférométrie numérique couleur.....	53
3.3.6	Interférométrie à franges d'égale ordre chromatique FECO.....	54
3.3.7	La microscopie confocale.....	55
3.3.8	Défloctométrie (Réflexion de franges).....	56
3.3.9	Moiré topographique.....	57
3.3.9.1	Introduction.....	57
3.3.9.2	Définition.....	58
3.3.9.3	Moiré d'ombre.....	58
3.3.9.3.1	Principe de la méthode.....	58
3.3.9.3.2	Les applications de moiré d'ombre.....	62
3.3.9.4	Le moiré de projection.....	62
3.3.9.4.1	Définition du moiré de projection.....	62
3.3.9.4.2	Principe de la méthode du moiré de projection.....	63
3.3.9.4.3	Les applications du moiré de projection.....	64
3.3.9.5	Le moiré de réflexion.....	64
3.3.9.5.1	Définition.....	64
3.3.9.5.2	Principe de la méthode du moiré de réflexion.....	65
3.3.9.6	Méthode pour améliorer la précision de mesure par le moiré topographique	66
3.3.9.6.1	Définition.....	66
3.3.9.6.2	Principe de la méthode.....	66
3.3.9.6.3	Exemple de calcul.....	66
3.3.9.7	Applications du moiré topographique.....	67
3.3.9.8	Conclusion.....	70

Chapitre 4 **Topographie non destructive des surfaces par le moiré interférométrique**

4.1	Introduction.....	71
4.2	Objectif de travail.....	71
4.3	Principe de la topographie non destructive basée sur le moiré interférométrique	72
4.4	Topographie des surfaces des composants réfléchissants.....	73
4.4.1	Introduction.....	73

4.4.2	Montage optique de contrôle des surfaces des composants réfléchissants.....	74
4.4.2.1	Principe de détection des défauts.....	76
4.4.2.2	Sensibilité et résolution de la méthode de détection de la technique.....	77
4.4.3	Topographie de la qualité de surfaces des différents composants réfléchissants	78
4.4.3.1	Miroir optique plan.....	78
4.4.3.2	Miroir ordinaire.....	80
4.4.3.3	Spatule en acier inoxydable	80
4.4.3.4	La plaque en acier inoxydable réfléchissante	81
4.4.3.5	Etude comparative de la topographie entre les composants réfléchissants.....	82
4.4.3.5.1	Miroir optique et miroir ordinaire.....	82
4.4.3.5.2	Miroir optique et spatule.....	82
4.4.3.5.3	Miroir optique et la plaque en acier inoxydable	83
4.4.4	Capacités du montage à détecter les défauts	84
4.4.4.1	Détection des défauts de mêmes tailles créés sur la surface d'une plaque réfléchissante en acier inoxydable	84
4.4.4.2	Détection des empreintes créées par l'indenteur Vickers.....	86
4.4.5	Les facteurs influençant la qualité des franges de moiré.....	88
4.4.5.1	Les défauts surfaciques	88
4.4.5.1.1	Les défauts de forme	88
4.4.5.1.2	Défaut de planéité	89
4.4.5.2	Le taux de réflexion de la surface contrôlée.....	91
4.4.5.3	Effet de la taille de la surface contrôlée sur la forme des franges de moiré.....	93
4.4.6	Discussion des résultats.....	94
4.4.7	Mesure de la pente de défaut de forme.....	95
4.4.7.1	Notion de déformation.....	95
4.4.7.2	Évaluation de défaut de forme sur la surface du miroir optique.....	96
4.4.7.2.1	Principe de calcul.....	97
4.4.7.2.2	Calcul du défaut.....	99
4.4.7.2.3	Phase et profondeur.....	100
4.4.8	Interprétation des résultats.....	103
4.4.9	Performances techniques de la méthode.....	103
4.4.10	Application et propriétés de la méthode.....	104
4.5	Topographie des surfaces des composants transparents.....	104
4.5.1	Introduction	104
4.5.2	Montage optique de contrôle des composants transparents.....	105
4.5.3	Principe de détection de la méthode.....	106
4.5.3.1	Détection de défauts	107
4.5.3.2	Sensibilité et résolution de détection.....	108
4.5.4	Topographie de la qualité de surfaces de différents composants transparents	108
4.5.4.1	Film transparent.....	108
4.5.4.4.1	Film transparent à usage courant.....	108
4.5.4.4.2	Film transparent à usage optique.....	110
4.5.5.2	Plaque de verre.....	112

4.5.4.2.1	Influence des différents défauts sur la forme des franges de moiré.....	112
4.5.4.2.2	Effet du taux de transmission d'une plaque de verre à faces parallèles sur la qualité des franges de moiré.....	113
4.5.4.2.3	Effet de l'amplification du défaut sur les franges de moiré.....	114
4.5.4.2.3.1	Cas de la plaque de verre de bonne qualité.....	114
4.5.4.2.3.2	Cas plaque de verre de mauvaise qualité.....	116
4.5.4.3	Plaque en verre organique.....	117
4.5.4.4	Lame en Plexiglas.....	118
4.5.5	Comparaison entre la topographie par moiré et les images par microscope à force atomique (AFM).....	119
4.5.5.1	Le microscope à force atomique (AFM).....	119
4.6.5.2	Topographie de la surface de la plaque de verre.....	119
4.5.6	Technique d'indentation.....	121
4.5.6.1	Indentation	121
4.5.6.2	Détection d'indentation de Knoop.....	122
4.5.7	Discussion.....	124
4.5.8	Méthode de mesure du défaut.....	126
4.5.8.1	Formulation.....	126
4.5.8.2	Phase et profondeur.....	130
4.5.9	Interprétation des résultats.....	133
4.5.10	Résolution de détection du montage.....	133
4.6	Conclusion.....	134
	Conclusion générale.....	136
	Bibliographie	

Liste des figures

Figure 1.1	Géométrie nominale d'une surface	6
Figure 1.2	Géométrie réelle.....	7
Figure 1.3	La géométrie spécifiée et mesurée.....	8
Figure 1.4	Ecart de forme ou de position (ordre 1).....	9
Figure 1.5	Ondulations périodiques (ordre 2).....	9
Figure 1.6	Stries ou sillons (ordre 3).....	10
Figure 1.7	Arrachement de matière (ordre 4).....	10
Figure 1.8	Défauts de formes classiques d'une surface.....	11
Figure 1.9	Méthodes par profilométrie laser.....	16
Figure 1.10	Principe de mesure interférométrique.....	16
Figure 1.11	Principe de la microscopie confocale.....	18
Figure 1.12	Le principe de la projection de franges.....	19
Figure 1.13	Le principe de la superposition de deux réseaux pour l'obtention de l'image de moiré	20
Figure 1.14	Composante suivant l'axe y (vertical) du déplacement.....	21
Figure 1.15	Schéma de principe utilisé pour la mesure des pentes	22
Figure 2.1	Réseau optique parfait.....	25
Figure 2.2	Aucune diffraction ($a \gg \lambda$).....	25
Figure 2.3	Diffraction totale ($a \leq \lambda$).....	25
Figure 2.4	Diffraction de la lumière passant par une fente fine.....	26
Figure 2.5	Diffraction de la lumière par un réseau linéaire à transmission.....	28
Figure 2.6	Phénomène de moiré.....	28
Figure 2.7.a	Moiré à pas constant.....	29
Figure 2.7.b	Moiré de battement.....	29
Figure 2.8	Moiré à réseau circulaire.....	30
Figure 2.9	Moiré à courbes de Gauss.....	30
Figure 2.10	Moiré à réseaux à double périodes.....	31
Figure 2.11	Moiré à anneaux de Fresnel.....	31
Figure 2.12	Formation des franges de moiré.....	32
Figure 2.13	Franges de moiré sont observées en mode d'éclairage incohérent.....	34
Figure 2.14	Franges de moiré sont observées en mode d'éclairage cohérent.....	35
Figure 2.15	L'influence de diaphragme sur le contraste des franges.....	36
Figure 2.16	L'influence de rapport a/p sur le contraste des franges.....	36
Figure 2.17	Franges de moiré différents réseaux.....	37
Figure 2.18	Réseaux séparés par un par coin d'air.....	38
Figure 2.19	Rayon lumineux diffracté deux réseaux.....	39
Figure 2.20	Rayon diffracté trop divergent.....	39
Figure 2.21	Effet d'un coin d'air variable sur le contraste des franges.....	40
Figure 2.22	Superposition optique de deux réseaux.....	40
Figure 2.23	Réseau linéaire à transmission.....	41
Figure 2.24	Spectre de diffraction.....	41

Figure 2.25	Franges de moiré générées par la superposition de deux réseaux linéaires..	42
Figure 2.26	Franges de moiré pour différents angles d'inclinaison.....	42
Figure 2.27	Influence de l'angle θ sur la sensibilité de moiré.....	44
Figure 2.28	Influence de la fréquence des réseaux sur la sensibilité.....	44
Figure 2.29	Image de spectre de diffraction d'un réseau linéaire en transmission.....	45
Figure 2.30	Technique de multiplication des franges.....	47
Figure 2.31	Franges de moiré obtenu avec différents facteurs de Multiplication.....	47
Figure 3.1	Principe de mesure par machine à mesurer tridimensionnelle.....	50
Figure 3.2	Principe de mesure par Microscope à effet Tunnel (STM).....	50
Figure 3.3	Principe de la microscopie à force atomique.....	52
Figure 3.4	a- Topographie de la déformation d'un capteur souple, b-cartographie des contraintes supportées par un film mince.....	52
Figure 3.5	Principe de l'interférométrie numérique couleur.....	53
Figure 3.6	Principe de mesure de la rugosité par l'interféromètre à FECO.....	55
Figure 3.7	Principe de la microscopie confocale.....	56
Figure 3.8	Principe de la déflectométrie.....	57
Figure 3.9	Schéma de principe du moiré d'ombre.....	59
Figure 3.10	Profil de la surface étendue sur des plans parallèles au plan du réseau.....	60
Figure 3.11	Courbes périodiques asymptotique au plan du réseau.....	61
Figure 3.12	Moiré de projection.....	63
Figure 3.13	Schéma de principe du moiré de projection.....	64
Figure 3.14	Principe de la méthode de moiré de réflexion.....	65
Figure 4.1	Franges de moiré.....	73
Figure 4.2	Principe optique du montage expérimental pour le contrôle des surfaces réfléchissantes.....	69 75
Figure 4.3	Montage expérimental pour la topographie des surfaces réfléchissantes....	76
Figure 4.4	Franges de moiré sur le plan d'observation.....	77
Figure 4.5	Figure de moiré du miroir optique plan.....	78
Figure 4.6	Défauts sur surface du miroir optique plan.....	79
Figure 4.7	Topographies de surface d'un miroir ordinaire.....	80
Figure 4.8	Topographie de surface de la spatule.....	81
Figure 4.9	Topographie de surface de la plaque en acier inoxydable.....	81
Figure 4.10	Topographie de surface du miroir optique et de la spatule dans les mêmes conditions.....	83
Figure 4.11	Topographie de surface du miroir optique et de la surface de la plaque en acier inoxydable dans les mêmes conditions.....	84
Figure 4.12	Détection de défauts générés sur la plaque réfléchissante en acier inoxydable.....	86
Figure 4.13	Figures de moiré de la surface de la plaque avant indentation.....	87
Figure 4.14	Images des empreintes créées par deux charges différentes.....	88
Figure 4.15	Images matérialisant le défaut de forme sur une surface réfléchissante.....	89
Figure 4.16	Images matérialisant le défaut de planéité.....	91
Figure 4.17	Influence du taux de réflexion sur l'image de moiré.....	93
Figure 4.18	Topographie de surface d'une plaque réfléchissante suivant les ordres	

	de diffraction du réseau test.....	94
Figure 4.19	Les franges de moiré du miroir optique : (a) Sans défaut; (b) Avec défaut..	97
Figure 4.20	Schéma de principe de calcul.....	97
Figure 4.21	Les franges de moiré de la surface du miroir: (a) Sans défaut; (b) Avec défaut en RGB.....	100
Figure 4.22	Interfranges en Pixel.....	100
Figure 4.23	Calcul de phase Interpolée.....	101
Figure 4.24	Calcul de la pente de défaut.....	102
Figure 4.25	Calcul de de la profondeur de défaut.....	102
Figure 4.26	Montage expérimental avec principe optique de détection.....	106
Figure 4.27	Frangé de moiré matérialisant différents tests.....	107
Figure 4.28	Franges de moiré sans échantillon.....	109
Figure 4.29	Franges de moiré d'un film transparent à usage courant.....	110
Figure 4.30	Franges de moiré d'un film transparent à usage optique.....	112
Figure 4.31	Inspection d'une plaque du verre.....	113
Figure 4.32	Figures de moiré et l'intensité de différents plaques du verre.....	114
Figure 4.33	Franges de moiré de la plaque du verre a bon état de surface avant créé le défaut.....	115
Figure 4.34	Franges de moiré de la plaque de verre à bon état de surface avec un défaut créé et amplifié.....	116
Figure 4.35	Franges de moiré de la plaque de verre de mauvais état de surface avant création de défaut.....	116
Figure 4.36	Franges de moiré de la plaque de verre de mauvais état de surface après création de défaut.....	117
Figure 4.37	Franges de moiré de la plaque de verre organique avant et après la création du défaut.....	117
Figure 4.38	Inspection d'une lame de Plexiglas à son état initial.....	118
Figure 4.39	Inspection d'une lame de Plexiglass après créé le défaut.....	118
Figure 4.40	Topographie de la surface d'une plaque de verre par L'AFM et le moiré topographique.....	121
Figure 4.41	Franges de moiré avant l'indentation.....	123
Figure 4.42	Franges de moiré de l'échantillon après l'application de l'indentation Knoop pour la charge de force de 0,05kgf.....	123
Figure 4.43	Franges de moiré de l'échantillon après l'application de l'indentation Knoop pour la charge de force de 0,2 kgf.....	124
Figure 4.44	Franges de moiré de l'échantillon après l'application de l'indentation Knoop pour la charge de force de 0,8 kgf	124
Figure 4.45	Les franges de moiré de la surface de l'échantillon: (a) avant de créer le défaut; (b) après création du défaut.....	126
Figure 4.46	Schéma de principe de calcul.....	127
Figure 4.47	Les franges de moiré de la surface de l'échantillon en RGB.....	129
Figure 4.48	Interfranges en Pixel.....	129
Figure 4.49	Calcul de phase interpolée.....	130
Figure 4.50	Présentation de la pente de défaut ΔZ 2D.....	131

Figure 4.51	Présentation de la profondeur de défaut Z en 2D.....	132
Figure 4.52	Présentation de défaut en 3D.....	132

Introduction générale

La qualité des composants optiques est devenue une nécessité pour identifier leur aptitude à remplir la fonction à laquelle ils sont destinés, vu le rôle important qu'ils jouent dans l'instrumentation optique de précision utilisée dans différents domaines. Ils sont souvent utilisés pour mesurer, contrôler des produits nécessitant une qualité et une fiabilité élevées des éléments optiques (les lentilles utilisées pour guider les faisceaux laser dans les applications de chirurgie médicale), et mécaniques de haute précision. Les objets transparents et réfléchissants tels que lentilles, prismes, miroirs etc. sont couramment utilisés dans les systèmes optiques, leurs propriétés optiques et géométriques affectent considérablement les performances des systèmes hôtes. Lorsque les objets optiques sont difficiles à contrôler par l'œil humain et que la qualification et la quantification des défauts ne sont pas faciles dans ces objets. Il est nécessaire de rendre le défaut plus visible, ce qui nécessite la mise en œuvre de méthodes appropriées.

Lors du contrôle, l'intégrité du composant doit être préservée, et par conséquent, de nombreuses techniques de contrôle non destructif ont été développées pour inspecter différents composants optiques. Chacune d'entre elles accorde beaucoup d'importance à la taille et à la forme géométrique de l'objet à tester, ainsi qu'à la zone du défaut avec une précision de détection très élevée [1-3].

L'opération de contrôle de la qualité d'une surface doit être précise, rapide et économique afin de garantir une fonctionnalité optimale à la surface. Historiquement, l'état de surface a été évalué visuellement et/ou tactilement, puis mesuré sur un profil à l'aide de capteurs avec un traitement de signal plus ou moins performant.

Dans de nombreux domaines, plusieurs techniques d'analyse de surface (le palpeur classique, La microscope à force atomique, la microscopie confocale, la microscopie interférométrique, le moiré ...) sont utilisées pour contrôler et pour améliorer la qualité des performances des composants aussi bien dans la recherche que dans l'industrie.

Depuis les trois dernières décennies, les méthodes optiques connaissent un essor considérable dans le domaine du contrôle, de la caractérisation et de la mesure industrielle. Plusieurs procédés de contrôle utilisant des méthodes optiques sont actuellement utilisés pour leurs performances et aptitudes à résoudre certains problèmes délicats. Les techniques de mesure et de contrôle utilisant des méthodes optiques sont améliorées de jour en jour, grâce au développement technologique qui a contribué d'une manière très sensible à leur précision de contrôle et leur rapidité d'exécution. Parmi ces méthodes optiques de contrôle, nous sommes intéressés au phénomène de moiré.

Depuis longtemps, le phénomène de moiré était considéré comme un moyen de décor, où il fût utilisé dans les kimonos des japonais par le pliage et l'écrasement d'une étoffe de soie, les plis ne coïncidant pas exactement, donnent un aspect miroitant et changeant lors du mouvement. Ce n'est qu'à partir de la deuxième moitié du vingtième siècle que les scientifiques ont commencé à s'intéresser au phénomène de moiré comme moyen scientifique, où il s'est avéré comme un outil scientifique ayant des champs d'application très vaste. Le phénomène de moiré est un effet de contraste changeant avec la déformation d'objet. Ce phénomène peut être observé dans notre environnement quotidien lorsqu'on regarde à travers deux voilages, ou lorsqu'on se déplace parallèlement à la barrière d'un pont où on observe une ombre qui défile le long du pont.

Le terme moiré est d'origine arabe [4], il provient du mot anglais « Mohair » qui lui-même vient du mot arabe « Moukhayer » (choix).

Le phénomène de moiré est un phénomène purement géométrique, où la superposition de deux ou plusieurs structures géométriques neutres (neutre dans le sens qu'aucune des structures prise séparément ne donne naissance au phénomène de moiré) donne naissance à une structure macroscopique, appelée effet de moiré, qui est caractérisé par des figures géométriques appelées franges de moiré constituées de franges alternativement claires et sombres de formes diverses.

Vue sa grande sensibilité, aux petites variations de déplacement et de torsion, les techniques de moiré pourraient potentiellement être appliquées, allant de la physique (mesure de température, de pression, de fréquence, surveillance des processus et le contrôle de la qualité, la maintenance...), à la mécanique (mesure de flexion, de déformation et la mesure des contraintes), à l'optique (reproduction des images, l'impression des couleurs...), à la métrologie optique (contrôle non destructif et sans contact), et au domaine médical (ophtalmologie, topographie du corps humain) [5] ; où une large gamme de mesures et de contrôles permet d'atteindre une précision de mesure élevée [6–11].

En effet, les appareils tridimensionnelles actuellement existants pour le contrôle des surfaces, font un contrôle suivant une ligne pour déterminer les dénivellations existantes. Pour avoir le maximum d'informations, il faut donc balayer toute la surface de l'objet, puis reconstituer la surface réelle par ordinateur. Cette opération qui prend beaucoup de temps, nécessite un appareillage performant et revient excessivement chère.

Les méthodes optiques utilisant des techniques dites de « champ » permettent d'avoir accès à des cartographies de grandeurs physiques comme les déplacements, les déformations, les

pentés, les courbures ou les coordonnées des points d'une surface. La quantité d'informations que délivre cette classe de méthodes est donc très importante et cela justifie l'intérêt suscité auprès des utilisateurs. L'utilisation de la méthode de moiré pour l'inspection de la surface, peut être considérée comme un cas « intelligent » de lumière structurée. Cette technique est plus rapide qu'une mesure utilisant une machine tridimensionnelle, et le nombre de points de mesure est supérieure d'un facteur de 10000. La méthode de moiré est souvent sans préparation de surface, ce qui rajoute à son intérêt. Les résultats quantitatifs sont obtenus dans des temps proches de la seconde, ce qui est souvent très compétitif par rapport aux techniques concurrentes.

Notre objectif dans cette étude est d'utiliser le phénomène de moiré interférométrique dans des montages optiques pour le contrôle des surfaces réfléchissantes et des matériaux transparents, ainsi que la détection et la mesure des défauts. Cette technique est orientée vers le contrôle des surfaces de l'ordre de quelques mm^2 , jusqu'à des surfaces plus importantes.

Les chapitres de cette thèse sont répartis comme suit:

- le premier chapitre est réservé à un rappel théorique sur la surface, les différents défauts surfaciques et leurs méthodes de mesure et de caractérisations.
- Le deuxième chapitre traite la théorie du phénomène de moiré, les modes de sa génération, et les différents paramètres influençant la sensibilité et la qualité des franges de moiré.
- Le troisième chapitre est consacré à la description de quelques techniques de la topographie non destructive des surfaces et la description du moiré topographique.
- Le quatrième chapitre comporte le travail expérimental ; dont nous présentons les techniques expérimentales utilisées, et les résultats obtenus avec discussions.

Ce chapitre est scindé en deux parties ; la première partie est réservée au développement de montages pour la topographie des surfaces réfléchissantes, et la deuxième partie est réservée au développement de montage pour scanner les surfaces transparentes.

Une conclusion générale qui résume les résultats obtenus.

Premier Chapitre :
Caractérisation des
surfaces

1.1 Introduction

Les défauts de surface, accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts d'aspect visible et les défauts ponctuels (micros défauts).

La première catégorie correspond aux défauts d'aspect, c'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques attire le regard et rend le produit inutilisable ; ici, le contrôle visuel est possible.

La seconde catégorie de défauts auxquels on s'intéresse dans ce travail ce sont les défauts de tailles ponctuelles à l'échelle microscopique ou submicroscopique tel que défauts de planéité, fissures, stries, piqûres, bulles d'air qui ont des effets nocifs sur la qualité fonctionnelle du composant qui peut être une fonction optique ou mécanique. Afin d'améliorer le processus technologique de fabrication il est nécessaire de développer des méthodes de contrôle capable de mettre en évidence ces micros défauts et de les quantifier. Les méthodes de contrôles les plus adaptés à ces situations, sont les méthodes de contrôle non destructives et sans contact.

1.2 Surface

1.2.1 Définition d'une surface

La surface d'un corps solide est la partie de ce solide qui le limite dans l'espace et le sépare du milieu environnant, elle est prépondérante pour assurer des fonctions telles que :

- L'aptitude aux frottements
- La résistance à l'usure ou à la corrosion
- Conduction thermique ou électrique
- Résistance aux contraintes mécaniques
- L'étanchéité statique ou dynamique...etc.

La surface d'un solide constitue une recherche spécifique et un problème de conception, le concept de la surface est perceptible et compréhensible par intuition, il est cependant très difficile à le définir et à le comprendre de façon bien précise, habituellement la définition des surfaces n'est pas claire, en effet ce concept a été défini de plusieurs manière selon la discipline de la science ou de la technologie de l'objet à étudier. La surface d'un solide est habituellement caractérisée par une structure et des propriétés qui diffèrent de l'intérieur du matériau [12].

1.2.2 L'intérêt de l'analyse de surface

Les surfaces et les interfaces jouent très souvent un rôle principal lors de la fabrication ou de l'utilisation des matériaux dans les domaines de l'optique et de la microélectronique. La rugosité, la morphologie et la forme précise des structures résultent en fait des propriétés physico-chimiques des surfaces et/ou des interfaces et de la manière dont elles sont fabriquées. Il est donc d'un intérêt primordial de les analyser pour bien connaître leurs caractéristiques.

Dans de nombreux domaines, plusieurs techniques d'analyse de surface (le palpeur classique, l'AFM, la MEB, la microscopie confocale, la microscopie interférométrique, l'ellipsométrie, ...) sont utilisées pour contrôler la qualité des performances des matériaux aussi bien dans la recherche que dans l'industrie. L'analyse de la morphologie est l'un des moyens de contrôle des matériaux à l'échelle microscopique et parfois à l'échelle nanométrique.

Parmi toutes les techniques, nombreuses sont celles à caractère destructif, ce qui met en avant les techniques optiques qui sont sans contact et donc non-destructives. Il est souvent utile d'avoir recourt à plusieurs techniques afin d'élucider les différents phénomènes de surface, sachant qu'il n'existe pas une technique unique capable de nous fournir toutes les informations sur la morphologie d'une surface.

1.2.3 États de surface

Le terme "état " de surface englobe toutes les irrégularités (les défauts) que peut présenter une surface obtenue à l'aide d'un procédé d'usinage. Ces irrégularités sont classées par ordre de grandeur de leur fréquence spatiale. Les surfaces industrielles produites par des moyens techniques présentent toujours des irrégularités par rapport à la mesure idéale. Ces défauts peuvent être de forme (défauts macro - géométriques, ondulations) ou de petits défauts (défauts micro - géométriques) désignés plus communément sous le nom de rugosité. Pour les décrire en toute rigueur, il faudrait utiliser une fonction continue $z(x, y)$ donnant de l'altitude de chaque point par rapport à la surface idéale.

Connaître l'influence de l'état d'une surface sur le fonctionnement d'une pièce et son comportement dans le temps nécessite de pouvoir caractériser sa géométrie macro et micro voire même nano géométrie dans certains cas, seule la caractérisation des états de surface effectuée sur un profil est normalisée. Le développement des technologies et des équipements permet de disposer d'une représentation tridimensionnelle de la surface (topographie).

La maîtrise de l'état de surface par le choix d'un ou plusieurs paramètres adaptés permettra de garantir la qualité de fonctionnement tout au long de la durée de vie du produit [13].

Les états de surfaces se divisent en deux groupes :

➤ **État physico-chimique**

Ce groupe caractérise le comportement de la surface lors de son interaction avec les milieux qui l'entourent : réaction chimique, oxydation, corrosion.

➤ **État géométrique**

Il englobe tous les défauts de formes ou les écarts micro et macro géométriques qui sont classées sous quatre numéros d'ordre.

1.2.4 Géométrie des surfaces

1.2.4.1 Géométrie nominale

Il s'agit du volume virtuel parfait délimité par des surfaces élémentaires parfaites définies par des côtes nominales (figure 1.1) [14].

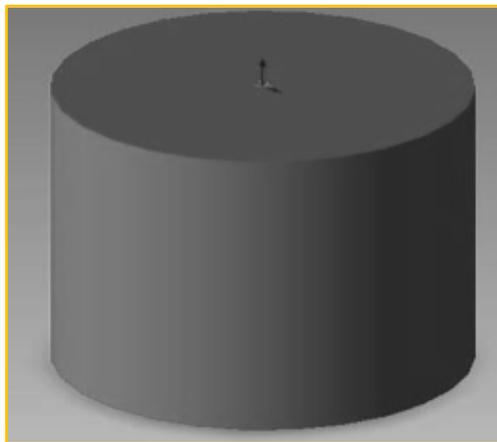


Figure 1.1. Géométrie nominale d'une surface

1.2.4.2 Géométrie réelle

C'est l'ensemble des surfaces obtenues après la mise en œuvre des divers procédés de fabrication (figure 1.2) [14].

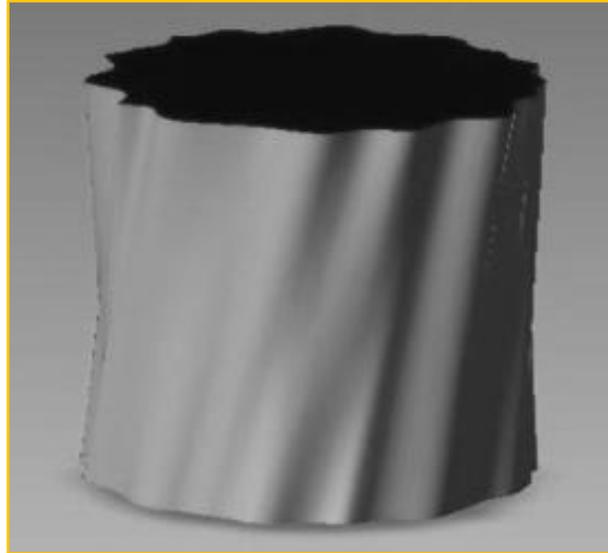


Figure 1.2. Géométrie réelle

1.2.4.3 Géométrie spécifiée

C'est le volume précédent auquel on affecte des tolérances délimitant les frontières théoriques à ne pas dépasser par la pièce réelle. Ce sont les dimensions et spécifications géométriques de position, d'orientation, de battement qui délimite cette géométrie.

1.2.4.4 Géométrie mesurée

C'est l'image de la géométrie réelle résultant de la mesure. Ce résultat est différent selon le type d'appareil utilisé (micromètre, calibre, colonne de mesure, machine à mesurer...) et le protocole de mesure utilisé (position des touches du micromètre, nombre et position des points de palpation, modèle mathématique utilisé par le calculateur...) (figure 1.3).

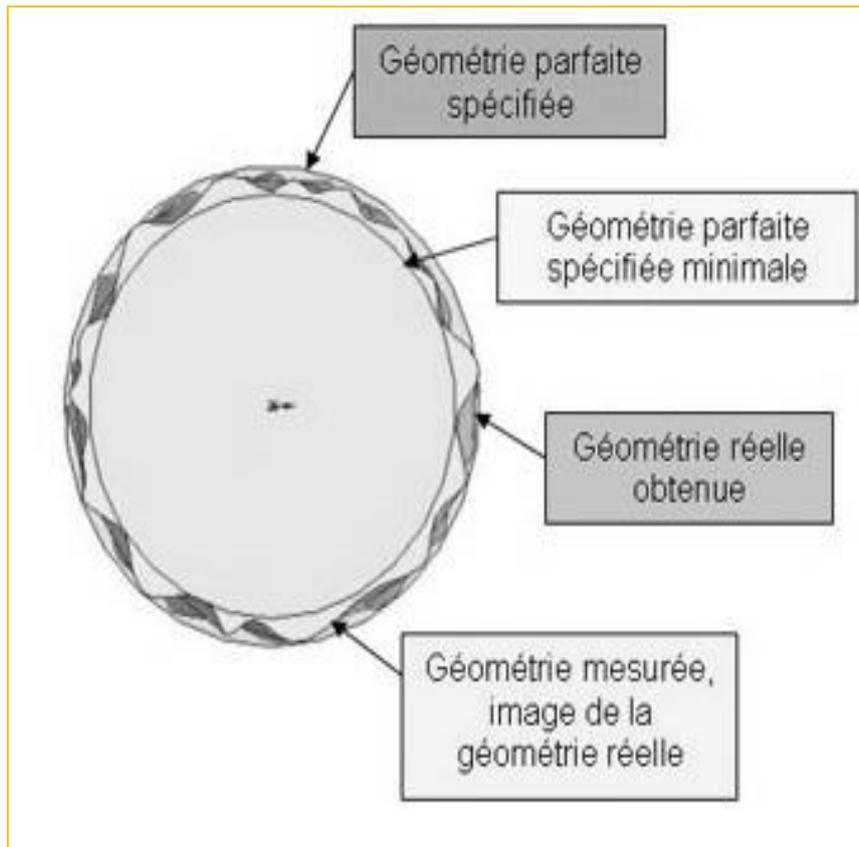


Figure1.3. La géométrie spécifiée et mesurée [14]

Le contrôle de l'état de surface consiste à caractériser la micro-géométrie d'une surface [15].

1.2.5 Différents écarts géométriques de l'état de surface

Il existe quatre ordres pour caractériser l'état de surface, plus l'ordre augmente, plus les défauts étudiés sont petits.

1.2.5.1 Écart de forme ou de position

Défauts du premier ordre, Ils correspondent aux défauts géométriques (de forme) des surfaces (planéité, rectitude, circularité...) et de position (perpendicularité, parallélisme, etc.)

La figure 1.4 montre les écarts de formes ou de positions d'ordre 1.



Figure 1.4. Ecart de forme ou de position (ordre 1) [16]

1.2.5.2 Écarts d'ondulations périodiques

Défauts du deuxième ordre. Ils sont caractérisés par des lignes enveloppes d'ondulations supérieures. Ces défauts sont le résultat des vibrations des machines ou des déformations thermiques.

La figure 1.5 illustre l'écart géométrique d'ordre 2 (ondulations périodiques) [16].

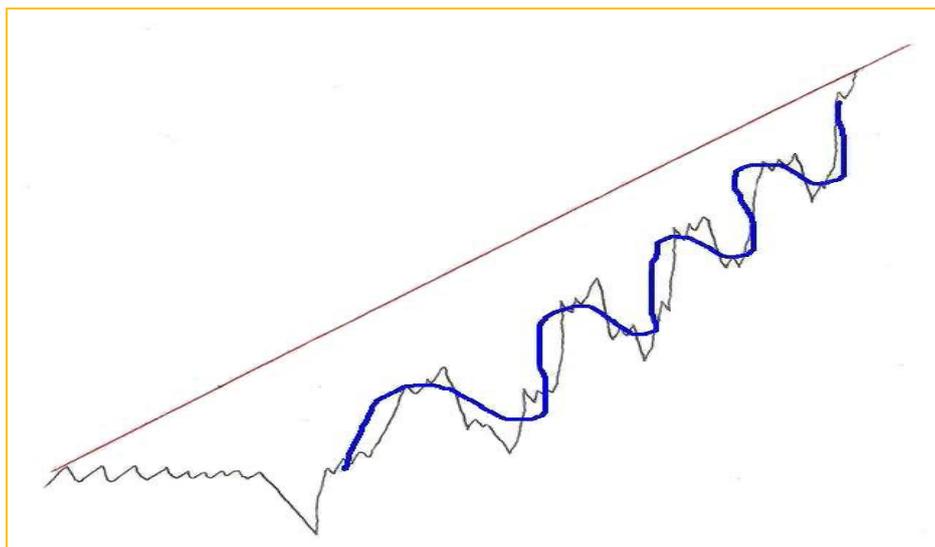


Figure 1.5. Ondulations périodiques (ordre 2)

1.2.5.3 Stries ou sillons

Défauts du troisième ordre, ce sont les stries de rugosité de la surface de la pièce. Ce sont eux qui caractérisent la rugosité (avec les défauts d'ordre 4). Ils sont dus aux vibrations à hautes fréquences de la pièce et de l'outil, et au mouvement d'avance lors de l'usinage.

La figure 1.6 représente l'écart géométrique d'ordre 3 (stries ou sillons) [16].



Figure 1.6. Stries ou sillons (ordre 3)

1.2.5.4 Arrachement de matière

Défauts du quatrième ordre, sont les plus irréguliers et sont souvent accidentels : arrachement de matière, fentes.

La figure 1.7 décrit l'écart géométrique d'ordre 4 (arrachement de matière) [16].



Figure 1.7. Arrachement de matière (ordre 4)

1.2.6 Défauts des surfaces optiques

Les techniques d'usinage des surfaces optiques sont nombreuses, et quel que soit la technique d'usinage, une surface optique n'est jamais parfaite, elle présente toujours des défauts classés selon leurs grandeurs.

1.2.6.1 Défauts de forme

Les surfaces optiques ont été depuis toujours produites par meulage et rodage et polissage, ce qui permet d'obtenir des composants avec d'excellents états de surfaces et très peu d'ondulations. En revanche, elles peuvent engendrer des défauts de forme.

Les défauts de forme dégradent donc la surface d'onde comme les aberrations et réduisent la qualité de l'instrument.

Le défaut le plus classique créé par le rodage est celui appelé couronne concave ou couronne convexe, sa forme est proche de celle d'une surface d'onde affectée par l'aberration sphérique ou de celle d'une période sinusoïde égale à un demi diamètre de pupille.

Les déformations dites en 'selle de cheval' ou défaut de cylindre proviennent souvent des contraintes créées au montage qui se relâchent ensuite au démontage. Elles produisent des surfaces ayant deux rayons de courbure principaux dont la forme est donc très proche de celle d'une surface d'onde entachée d'astigmatisme [17].

La figure 1.8 illustre les différents types de défauts de forme

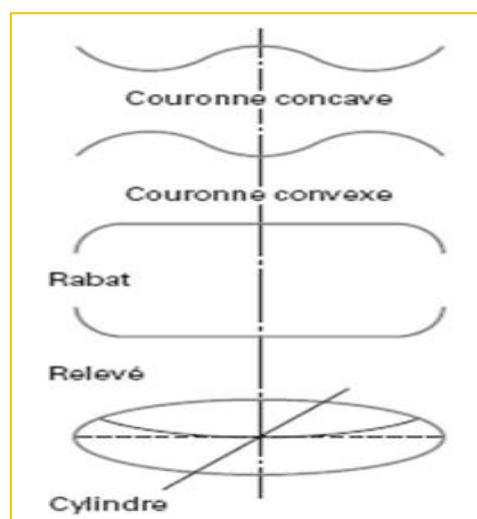


Figure 1.8. Défauts de formes classiques d'une surface [17]

Les différents types de défauts de forme sont :

- **Différence de rayon de courbure**

Le calibre de référence et la surface en cours de fabrication n'ont pas le même rayon de courbure. On obtient des franges circulaires, dites anneaux de Newton. Si les centres de courbure sont confondus, on observe une teinte dite 'teinte plate'. Le nombre de franges obtenues quand les deux surfaces sont en contact, permet de connaître la différence entre les deux rayons de courbure.

- **Défauts de révolution**

La surface est affectée d'un défaut de forme ayant un axe de symétrie. Dans ce cas, les diamètres des anneaux ne suivent pas la loi de Newton, ou si l'on forme un coin d'air, les franges ne sont pas droites. L'écart par rapport à la frange régulière permet de chiffrer le défaut en nombre d'interfranges.

- **Défauts de non-révolution**

Le défaut n'a plus d'axe de symétrie, on chiffre ici la déformation de non-révolution de la surface.

- **Défauts localisés**

Les défauts les plus courants de ce type sont les creux, les bosses, le rabat, le relevé et les facettes. Les franges ne sont plus régulières, mais présentent des variations brutales de pente. L'écart par rapport à la frange régulière caractérise le défaut local.

1.2.6.2 Rugosité

Bien que très performant le polissage optique ne produit jamais des surfaces absolument parfaites, il y a toujours quelques défauts locaux, dus à la matière première, à des chocs, aux ondulations appelées rugosités.

Il existe différents types de défauts de la rugosité

- **Micro-ondulations de la surface**

L'origine de ces défauts n'est pas bien connue, ils sont probablement dus à des phénomènes de rhéologie.

- **Micropiqûres**

Elles sont dues à un polissage insuffisant de la surface qui laisse en superficie les fonds des excavations ainsi que les traces des particules arrachées provenant des langues produites pendant l'ébauchage et le doucissage et qui se rejoignent et forment des éclats qui se détachent. Elles sont mesurées en déplaçant, par exemple, la pointe d'un stylet très fin sur la surface et en comptant le nombre de piqûres pour un déplacement donné.

1.2.6.3 Défauts locaux

Les principaux défauts locaux sont :

- **Les ébréchures** : éclatement des bords et des arêtes.
- **Les rayures et frayures** : sillons continus ou discontinus dont la largeur et la profondeur peuvent être irrégulières, la frayure étant une petite rayure.
- **Les filandres** : défauts superficiels continus linéaires, visibles sous certaines incidences seulement.
- **Les piqures** : défauts ponctuels de surfaces.
- **Les gris localisé** : concentration de piqures de faibles dimensions ne couvrant qu'une partie de la surface.
- **Les bulles crevées** : défauts dus à des inclusions gazeuses dans la matière débouchant sur la surface.
- **Les camps marque et traces** : laissées pour une mauvaises manipulation.

A ces défauts locaux, il faut ajouter les taches d'oxydations locales et les défauts de traitement de surfaces. Les défauts locaux agissent sur les images soit parce qu'ils sont opaques, soit parce qu'ils diffractent de la lumière, leur action dépend essentiellement de la surface qu'ils occupent dans le système optique et le faisceau forme l'image de leurs positions [17]

1.3 Méthodes de caractérisation et de mesure des surfaces

Toute méthode de caractérisation est basée sur un même principe qui consiste d'une part, à envoyer une sonde sur un échantillon afin de créer une interaction sonde-échantillon et d'autre part, une analyse de la réponse que l'on obtient [18,19]. Donc la sonde joue le rôle d'une

excitation qui peut être un faisceau lumineux, faisceau d'électrons, un champ électrique ou magnétique, un palpeur mécanique... etc.

1.3.1 Méthodes de mesure et de caractérisation par contact

Dans l'industrie le moyen le plus utilisé est l'appareil de mesure d'état de surface à palpeur, avec contact de ce dernier sur la surface à caractériser (profilomètres mécanique 2D -3D). Qu'il s'agisse de rugosimètres ou de profilomètres à stylet. Suivant son degré de perfectionnement, ce type d'équipement permet la mesure de tous ou parties des paramètres d'états de surface, ils sont munis d'une unité d'avance, au bout de laquelle se situe un palpeur qui balaye la surface de la pièce suivant plusieurs segments prédéfinis.

Deux instruments de mesure sont nécessaires :

- Un capteur de déplacement suivant x , y ou z dont l'étalonnage ne pose pas de problème particulier, parce que la mesure de l'amplitude du déplacement n'est pas critique.
- Un capteur de faible amplitude et de grande sensibilité mesurant les déplacements suivant z du palpeur au cours de la translation.

La mesure peut être faite en prenant pour référence le système de translation de la machine. Le parallélisme entre la surface étudiée et la translation du palpeur doit alors être très soigneusement ajusté.

Pour une meilleure sensibilité et pour ne pas être gêné par les défauts de forme de la pièce, on peut faire la mesure avec un palpeur différentiel qui donne la différence d'altitude entre le point palpé et une surface moyenne située à proximité. Ces palpeurs sont en général des diamants taillés avec un rayon de courbure de l'extrémité de l'ordre de quelques micromètres. L'amplitude de leur mouvement est limitée à quelques dizaines ou centaines de micromètres, parfois quelques fractions de micromètre.

Dans les méthodes à contact mécanique, la forme du palpeur effectue un filtrage passe-bas qui élimine les défauts dont la période est petite devant le rayon de courbure du palpeur. Ce filtrage est extrêmement complexe et peut difficilement être modélisé. Ce filtrage mécanique est souvent complété par un filtrage électrique ou par un filtrage numérique effectué par le système d'acquisition et de traitement des données. On peut donner de ces derniers une représentation plus simple et plus conforme à la réalité (les filtres électriques travaillant dans

le domaine temporel, et qui exigent la maîtrise de la vitesse du palpeur, et les filtres numériques qui sont le plus souvent associés au traitement des données par ordinateur).

Les instruments conventionnelles de mesure de surfaces utilisant ces méthodes présentent certains inconvénients tels que :

- Technique relativement lente.
- La force du palpeur peut parfois endommager la surface.
- Limitation sur des secteurs de mesure.

Les avantages évidents sont :

- Souplesse pour adopter une large diversité de forme.
- Très haute résolution dans la direction verticale [20].

1.3.2 Méthodes de caractérisation et de mesure sans contact

Les méthodes de caractérisation et de mesure sans contact sont des méthodes optiques caractérisées par le contrôle non destructif. Elles reposent sur l'envoi d'un faisceau lumineux sur la surface de l'échantillon à analyser et sur l'enregistrement de la réponse qui est sous forme d'un faisceau, image etc.

1.3.2.1 Profilométrie laser

Ces méthodes sont très proches de la méthode par contact, à savoir qu'elles nécessitent l'exploration de la surface au moyen d'une série de trajectoires parallèles régulièrement espacées par déplacement de l'échantillon ou de la source. Les coordonnées Z sont acquises à l'aide d'un capteur optique à source laser. La méthode peut être coaxiale ou basée sur le principe de la triangulation suivant que le faisceau émis et le faisceau réfléchi suivent le même trajet ou une trajectoire différente. La figure 1.9 illustre le principe d'un profilomètre laser. La méthode coaxiale nécessite un système de déplacement vertical permettant l'asservissement du point de focalisation du faisceau laser sur la surface. L'exploitation des données, calcul des paramètres et visualisation de la surface, se fait avec les mêmes outils que ceux utilisés par la méthode avec contact [21].

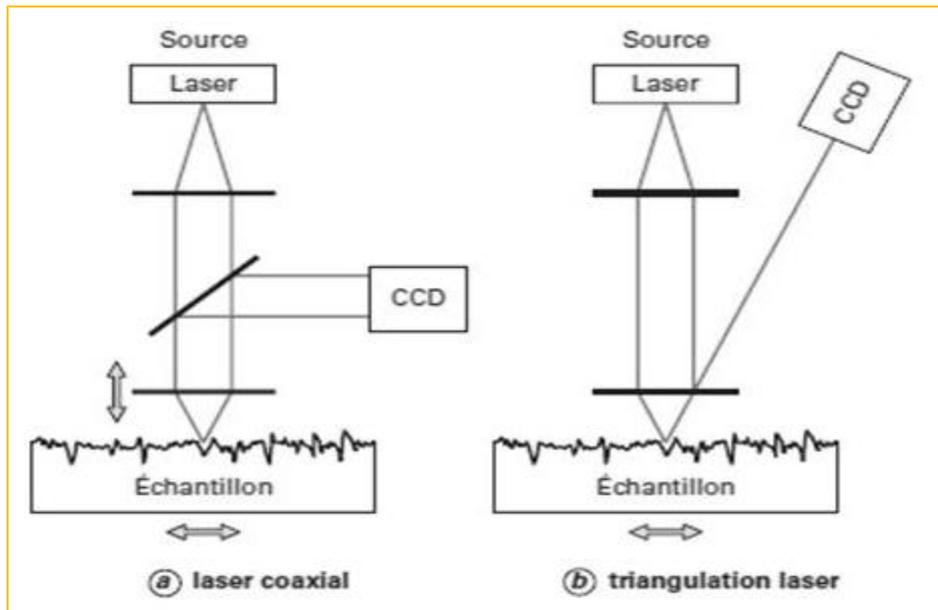


Figure 1.9. Méthodes par profilométrie laser [21]

1.3.2.2 Méthodes de mesure interférométrique

L'interférométrie est habituellement utilisée pour la mesure d'une longueur donnée par comparaison de deux chemins optiques. La figure 1.10 montre d'une façon simplifiée ce principe.

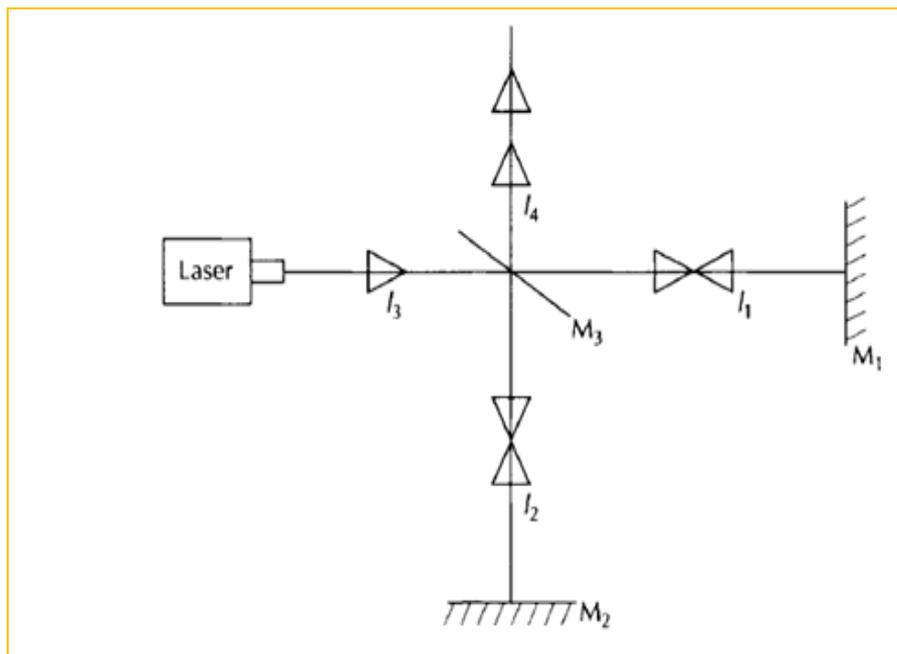


Figure 1.10. Principe de mesure interférométrique [22]

La lumière d'une source est divisée à l'aide d'un miroir séparateur, une partie du faisceau est dirigé sur la pièce, l'autre sur un miroir de référence. Après réflexion, les deux faisceaux sont de nouveau superposés au niveau du miroir séparateur.

Le chemin de référence est $l_3 + l_1 + l_4$ tandis que le chemin d'essai (à mesurer) a une longueur $l_3 + l_2 + l_4$, la comparaison doit se faire entre l_1 et l_2 et leurs combinaison dépend de leurs différences de phase parfois en les additionnant et parfois en les soustrayant sous une lumière cohérente.

Si le miroir M_1 est fixe, la longueur l_2 peut être déterminée en comptant le nombre de maxima vue par l'œil, chaque maxima correspond à une différence de marche de $\lambda/2$ entre l_1 et l_2 , le balayage des deux miroirs M_1 et M_2 est perpendiculaire [22].

1.3.2.3 Principe de la microscopie confocale

Dans la microscopie optique classique, l'image est plate, donnant des informations dimensionnelles latérales (X et Y) mais pas axiales (Z). Le contraste de l'image provient en général des variations de la réflectivité de surface. En limitant la profondeur de champ d'un microscope optique avec un système d'éclairage et d'imagerie optimisé, la microscopie confocale permet d'obtenir des informations quantitatives sur l'axe optique (Z).

Le principe du microscope confocale (figure 1.11) consiste à focaliser, par l'intermédiaire d'un objectif, un faisceau laser qui va éclairer un point de l'échantillon, puis à récupérer, sur un photomultiplicateur, le signal lumineux émis en ce point.

Un diaphragme est placé devant le photomultiplicateur, arrête tout signal ne provenant pas du plan focal. Le signal reçu est amplifié par le photomultiplicateur, traité afin d'améliorer le rapport signal sur bruit, puis numérisé.

L'image est construite point par point grâce à un balayage (X , Y) du champ analysé à l'aide de miroirs de déflection de la source lumineuse. Une platine motorisée déplace l'échantillon suivant l'axe Z permettant la saisie de différents plans optiques dans l'épaisseur de l'objet [23].

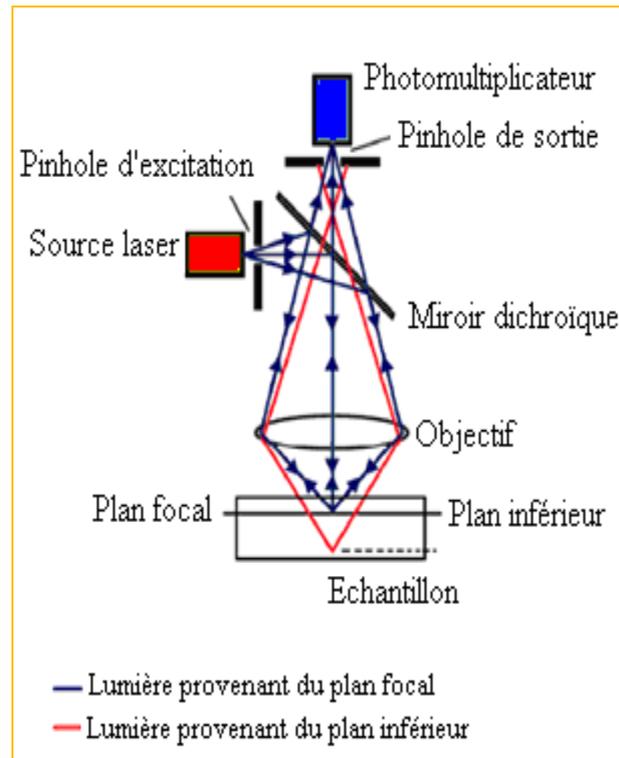


Figure 1.11. Principe de la microscopie confocale [23]

1.3.2.4 Projection des franges

La méthode n'a que très peu de points communs avec les autres techniques optiques. Elle permet d'inspecter des champs très larges et c'est aussi l'une des méthodes les plus robustes par rapport à l'environnement. Le principe est basé sur la projection d'une lumière blanche structurée sous forme de franges à la surface de l'échantillon. Un décalage successif des franges et l'analyse de leur déformation à l'aide d'une caméra CCD permettent de déterminer le relief de la surface [24].

Sur l'échantillon, l'information de hauteur Z par rapport à une surface de référence est transformée en une information de déplacement U_x de la frange, et on a dans le cas le plus simple de la projection collimatée (figure 1.12) :

$$Z = U_x / \tan(A) \quad (1.1)$$

A : est l'angle entre la normale et la frange projetée

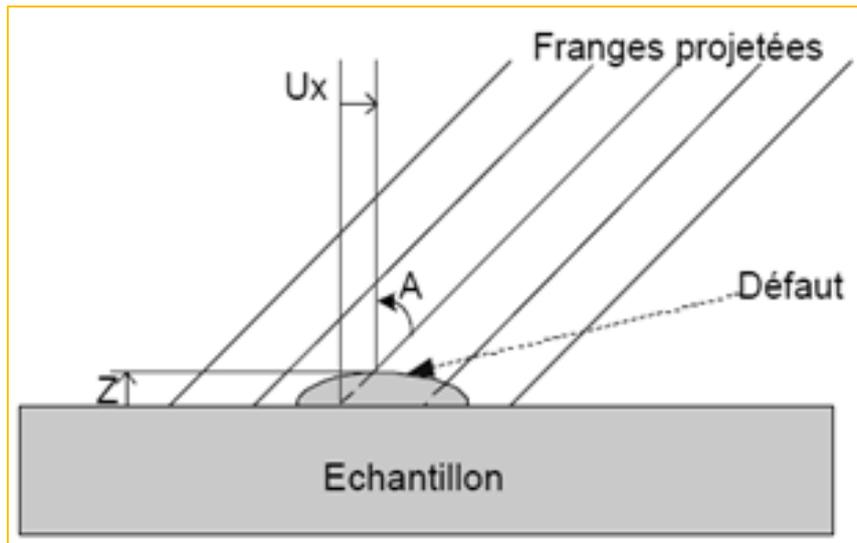


Figure 1.12. Le principe de la projection de franges [24]

Cette méthode permet donc une étendue de mesure plus grande que les méthodes précédentes, c'est à dire plus de 100 millimètres avec une résolution comprise entre 2 et 10 mm.

1.3.2.5 Techniques de moiré interférométrique

Le phénomène de moiré interférométrique est utilisé pour mesurer le relief d'une surface bien déterminée.

Les techniques de moiré interférométrique sont développées pour la mesure des déformations (dans le plan et hors-plan) d'un objet.

Le phénomène de moiré interférométrique consiste dans l'apparition des franges d'interférence représentant le lieu géométrique des points d'égal déplacement de l'objet, qui apparaissent à la superposition optique ou mécanique de deux structures répétitives.

Le principe de moiré interférométrique est basé sur un phénomène optique qui repose sur l'interférence entre deux réseaux linéaires en transmission. Les deux réseaux sont identiques (ont le même pas G et même nature), et l'un est décalé dans son plan par rapport à l'autre d'un angle α .

La superposition des réseaux s'effectue par contact mécanique c'est à dire l'un est placé sur l'autre directement, ou par contact optique.

Dans le cas de contact optique, l'un des réseaux est réel et l'autre virtuel, (image d'un réseau). Et le contact optique est un contact parfait.

Quand les deux réseaux de lignes sont parallèles (l'angle α est nul) on n'observe pas le système de franges.

Quand les réseaux de lignes sont en rotation d'un angle α , on observe les franges de moiré de période similaire T (figure 1.13).

$$T = \frac{1}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (1.2)$$

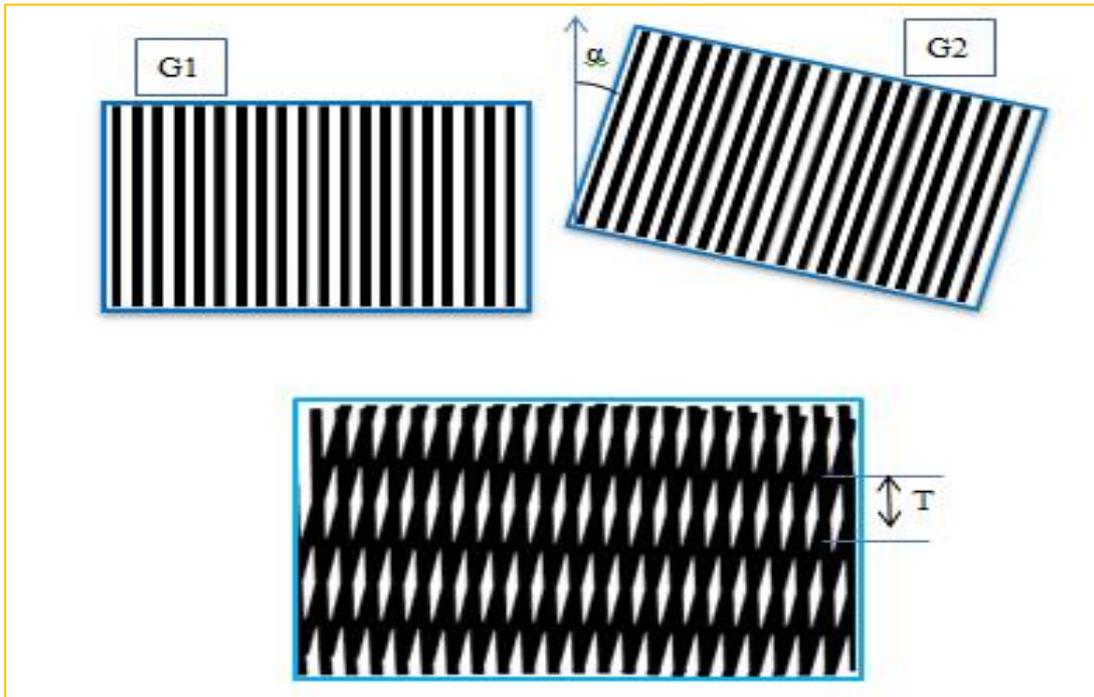


Figure 1.13. Le principe de la superposition de deux réseaux pour l'obtention des franges de moiré

1.3.2.6 Mesure des pentes d'une plaque déformée – Méthode de Ligtenberg

Nous allons réaliser une modification du principe précédent, en utilisant un seul réseau de traits de référence de pas p avec une surface réfléchissante de l'objet. Le réseau objet est donc l'image du réseau témoin réfléchi par la plaque. Lorsque celle-ci est soumise à une déformation hors-plan, la normale à la surface change et donc l'image du réseau se transforme montrant ainsi des franges de moiré. Nous allons maintenant analyser la formation de ces franges. Pour cela, considérons le montage suivant [25] :

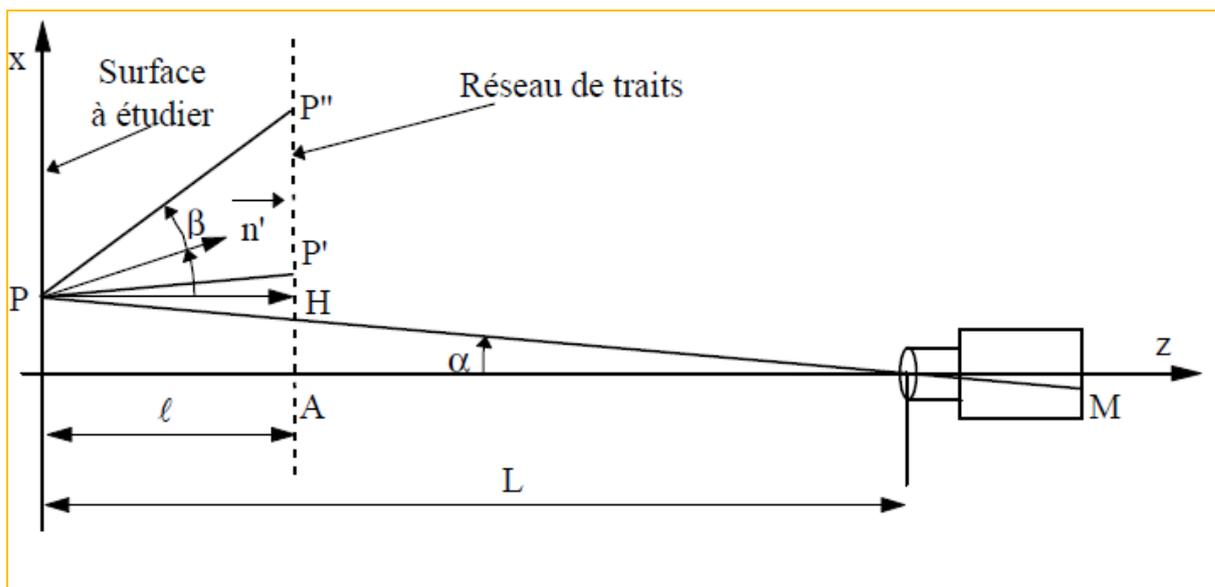


Figure 1.14. Composante suivant l'axe y (vertical) du déplacement [25]

Sur la figure 1.15, on considère avant et après chargement, les deux rayons lumineux qui en arrivent en M sur le plan image de l'appareil d'enregistrement. Ces deux faisceaux arrivent donc du point P de la plaque à étudier sous un angle α . Avant chargement, la normale à la plaque est horizontale et le point du réseau visé est le point P' tel que l'angle H P P' est aussi l'angle α . Après chargement, la normale a tourné d'un angle β tel que, si le nouveau point visé est P'', l'angle H P P'' est égal à 2β . On numérote les lignes du réseau en commençant par le trait 0 au point A ; nous avons alors :

$$A P'' = m p \text{ et } A P' = n p \quad (1.3)$$

Il vient alors que les franges de moiré sont issues de la différence $(m - n) p$ tel que :

$$(m - n) p = A P'' - A P' = H P'' - H P' = l \tan(\alpha + 2\beta) - l \tan \alpha \quad (1.4)$$

On choisit l très grand devant les dimensions de la plaque à étudier et on suppose aussi que les déformations sont faibles, on peut donc assimiler les tangentes aux angles.

$$(m - n) p = 2l\beta = 2l \frac{\partial z}{\partial x} \quad (1.5)$$

On remarque donc que les franges du moiré visible représentent les lignes d'égale pente puisque l'ordre de frange est proportionnel à la dérivée de la déformée z .

En pratique, le montage est légèrement différent puisqu'il faut enregistrer en même temps les états (initial et déformé). Il est présenté dans la figure 1.16.

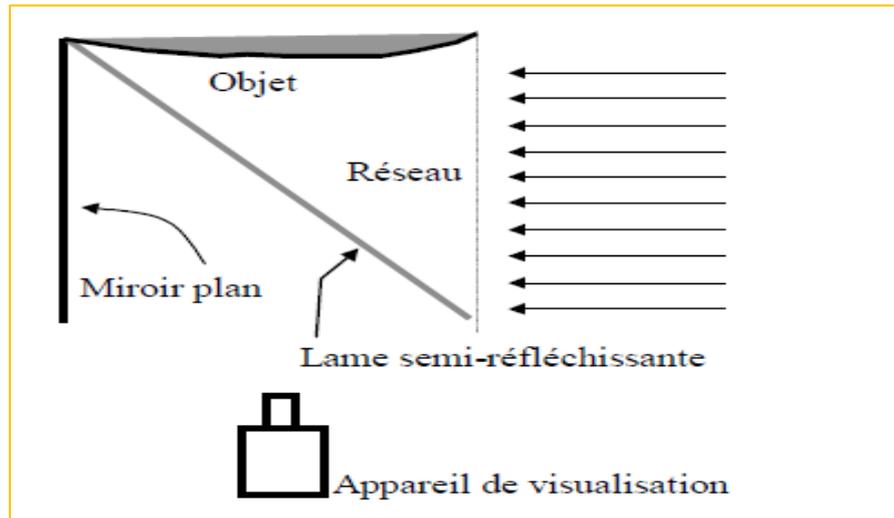


Figure 1.15. Schéma de principe utilisé pour la mesure des pentes

Le miroir plan et la lame semi-réfléchissante donnent une image non déformée du réseau situé en arrière de la surface à étudier. La lame seule, et la plaque donnent une image déformée du réseau située en arrière de la plaque à étudier. Ces deux images se superposent et donnent le moiré que nous avons décrit au préalable.

1.3.3 Comparaison entre la méthode optique et la méthode mécanique (palpage)

Le fait que les méthodes optiques sont strictement fondées sur des lois d'optiques peuvent être un avantage comme elles peuvent être un inconvénient, par exemple si la résolution est fixée alors l'angle opposé à la lentille ne peut pas être changé par conséquent aucun de ces trois éléments : angle, résolution, et le point focale ne peuvent être changé sans affecter les autres.

Avec la méthode de palpement il est possible d'orienter l'angle du palpeur et de changer la dimension de la pointe du palpeur sans affecter l'un vis à vis de l'autre [17].

Méthode mécanique

- *Avantages*
 - Mesure la géométrie

- La dimension de la pointe du palpeur et l'angle de palpeur sont indépendants
- Insensible à l'inclinaison de la pièce
- Enlève les débris et le liquide réfrigérant indésirable

- **Inconvénients**
 - Endommagement possible
 - Vitesse relativement lente
 - La pointe peut se casser

Méthode optique

- **Avantages**
 - Pas d'endommagement
 - La sonde ne peut pas être cassée
 - Le balayage peut être très rapide

- **Inconvénients**
 - Mesure le chemin optique
 - La résolution et l'angle d'inclinaison dépendent l'un de l'autre
 - Ne permet qu'une inclinaison limitée.
 - Mesure tout (utile et inutile).

Deuxième chapitre :
Généralités sur la
technique de moiré

2.1 Introduction

Le moiré, est un phénomène qui peut être observé dans notre environnement quotidien (par exemple dans les plis fins des mailles d'un rideau). Plus tard, ce phénomène est développé pour être exploité comme technique de mesure non destructive et sans contact, grâce à lui, les systèmes de contrôle et de mesure sont devenus plus précis et plus performants.

Lord Rayleigh en 1874 est le premier qui a utilisé le moiré dans la métrologie [26-28], et c'est lui qui a fait la remarque que lors de la superposition de deux réseaux constitués de fils, un système de franges de basse fréquence se produit.

Donc, le moiré est le phénomène qui se produit lors de la superposition de deux structures répétitives [29], telle que la structure d'un réseau.

2.2 Le réseau

Le réseau est un système interférentiel constitué d'un grand nombre de trous ou d'alignement de fentes parallèles, équidistantes et identiques et toute autre forme géométrique (structures géométriques périodiques). On dit qu'un réseau est parfait si le trou est ponctuelle (dans le cas des fentes si la largeur est négligeable). Il peut être défini comme un élément par lequel se produit la propriété d'une démodulation périodique lors de l'incidence d'un faisceau lumineux [30]. En optique, les réseaux utilisés sont caractérisés par l'alternance d'une zone noire et une autre claire, ces réseaux fonctionnent soit par réflexion, on parle de réseau de réflexion. Il se comporte comme une couche gravée sur un plan opaque, qui diffracte la lumière vers l'arrière (figure 2.1a) [31]. Ou soit par transmission, lorsque chaque trou (ou fente) diffracte la lumière vers l'avant (figure 2.1b) on parle alors de réseau en transmission, un réseau est caractérisé par :

Pas (p) : C'est le paramètre qui mesure les espacements des courbes, égal à la somme de la zone transparente et la zone opaque.

La fréquence spatiale F: égale à l'inverse du pas (p); $F = 1/p$.

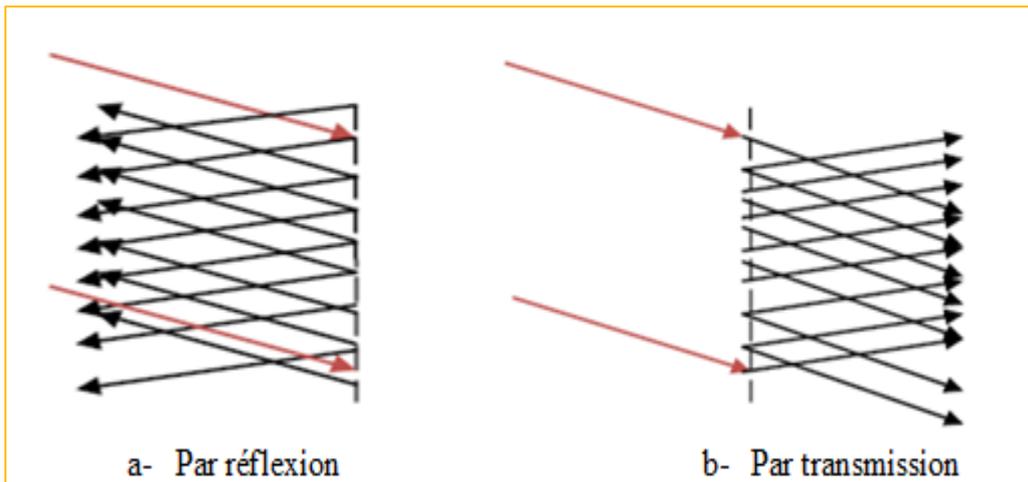


Figure 2.1. Réseau optique parfait

2.3 La diffraction

2.3.1 Définition

Le phénomène de diffraction [32] a été découvert au XVIII^{ème} siècle par le physicien Grimaldi. Il s'agit de connaître la distribution de l'intensité résultante de la superposition des ondes émises par un ensemble de sources lumineuses continues.

La diffraction est le comportement ondulatoire déformant une onde plane en une onde sphérique lorsque celle-ci rencontre un obstacle ou une ouverture. La déformation dépend de la taille de l'obstacle/ouverture a et de la longueur d'onde λ de la lumière. Lorsque la taille de l'obstacle/ouverture est grande comparativement à la longueur d'onde, la déformation est négligeable et l'onde devient de plus en plus sphérique à mesure que la taille de l'ouverture diminue (ou la longueur d'onde augmente) [33].

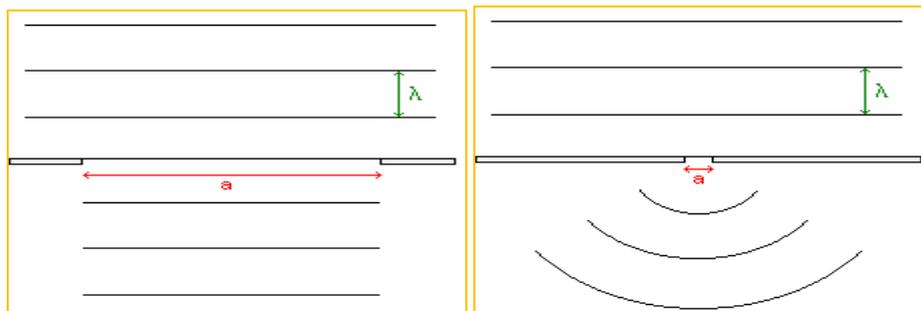


Figure 2.2. Aucune diffraction ($a \gg \lambda$)

Figure 2.3. Diffraction totale ($a \leq \lambda$)

2.3.2 Diffraction par une fente fine

La figure 2.4 présente une figure de diffraction de la lumière passant par une fente fine réglable. On obtient sur un écran une alternance de bandes claires et noires, centrées sur une bande claire correspondant à la projection de la fente elle-même. Le phénomène se produit quand des ondes, se propageant de manière rectiligne, franchissent une ouverture suffisamment petite: il semble qu'un petit élément de l'onde incidente induit une onde circulaire.

L'observation d'une figure de diffraction peut livrer de l'information sur l'objet diffractant, par exemple l'analyse de la figure de diffraction des réseaux utilisés dans la formation des franges de moiré [34].

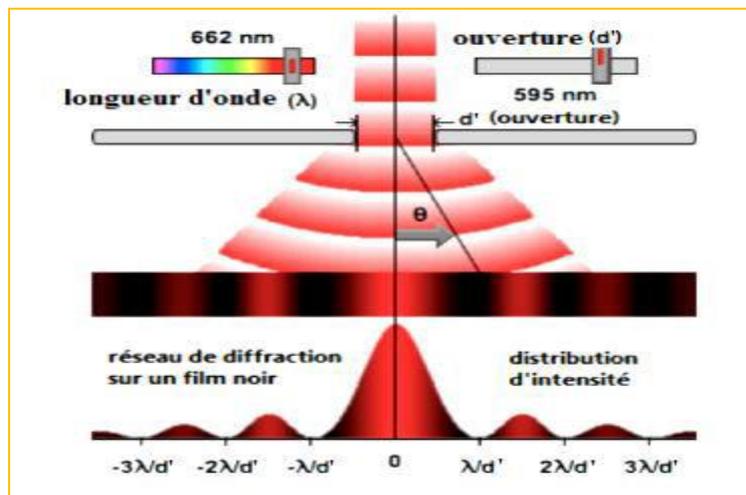


Figure 2.4. Diffraction de la lumière passant par une fente fine [34]

2.3.3 Diffraction de la lumière par un réseau linéaire à transmission

La transmission de la lumière à travers un réseau linéaire à transmission placé dans le plan objet de la lentille donne naissance, à sa sortie, à une structure particulière du réseau qui est constituée par un certain nombre de points étalés sur une ligne droite perpendiculaire aux lignes du réseau au plan focal de la lentille et dont l'intensité diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point centrale appelé ordre zéro.

Cette image du réseau réalisée par la première transformation de Fourier est appelée : spectre de diffraction dont le nombre de fréquence (nombre d'ordre) dépend de la fréquence spatiale du réseau. Plus la fréquence spatiale est grande ou importante plus le spectre est étalé et, par conséquent, le nombre d'ordre est élevé.

Un réseau linéaire à transmission est éclairé par un rayon lumineux cohérent. Après passage par la structure périodique, le faisceau lumineux est divisé par chaque fente en un ensemble de rayons divergents le long de la direction du plan qui est perpendiculaire aux traits du réseau. Ces rayons interfèrent entre eux pour donner naissance à une distribution de lumière dépendante de l'angle de divergence ε . Cet angle est déterminé par les rayons diffractés par rapport à la direction du faisceau lumineux incident [4]

$$I_{\varepsilon} = I_0 \left(\frac{\sin i}{i} \right)^2 \left(\frac{\sin \Omega N}{\Omega} \right)^2 \quad (2.1)$$

I_{ε} : Intensité de la lumière propageant le long d'une direction formant un angle ε avec la normale.

I_0 : Intensité de la lumière envoyée dans la direction $\varepsilon=0$.

$(\sin i/i)^2$: Caractérise la répartition de l'intensité d'une onde plane diffractée par chacune des fentes.

$(\sin N\Omega/\Omega)^2$: Tient compte des interférences issues de toutes les fentes.

N : Nombre de fentes du réseau.

$$i = \left(\frac{\pi a}{\lambda} \right) \sin \varepsilon \quad \Omega = \left(\frac{\pi p}{\lambda} \right) \sin \varepsilon \quad (2.2)$$

Où :

a : Largeur de la bande claire du réseau.

Donc, après passage à travers le réseau, la lumière est décomposée en un ensemble de points lumineux disposée au plan focal de la lentille de Fourier selon une série de Fourier telle que :

$$I(x) = I_0 + I_1 \cos(2\pi x/p) + I_2 \cos(4\pi x/p) + \dots + I_n \cos(2\pi n x/p) \quad (2.3)$$

Où

$I(x)$: Intensité de la lumière transmise suivant l'axe Ox .

Dans le cas où la lumière traverserait successivement deux réseaux qu'ils soient en contact ou séparés par un coin d'air, nous remarquons que le spectre de diffraction est constitué par des

points distribués suivant les lignes dont l'orientation est toujours perpendiculaire aux lignes du réseau correspondant [4].

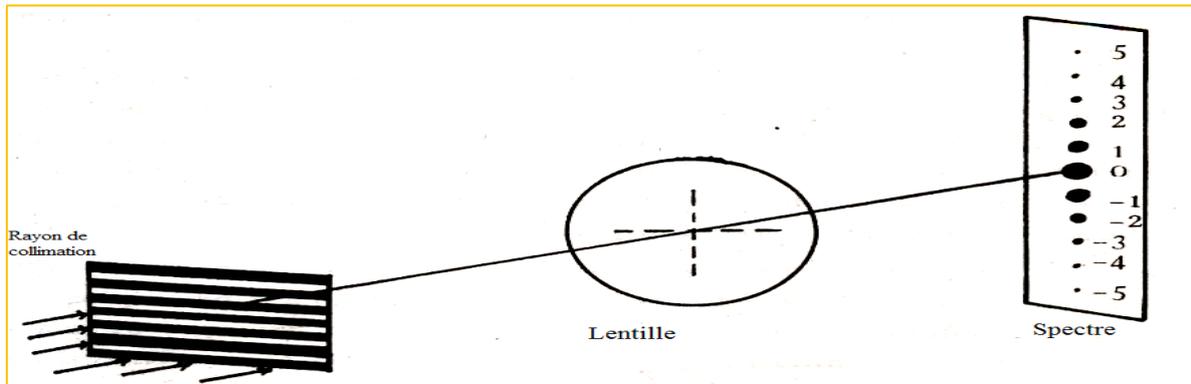
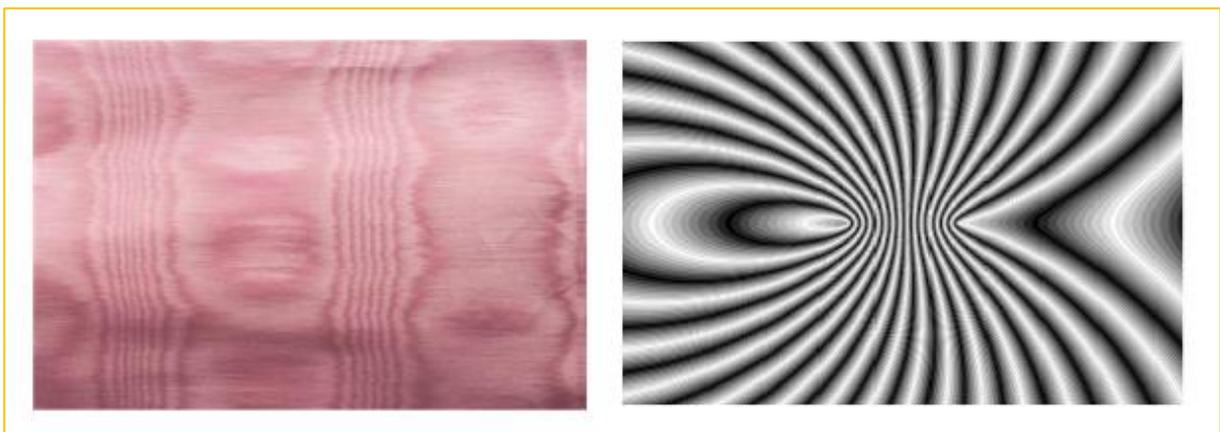


Figure 2.5. Diffraction de la lumière par un réseau linéaire à transmission

2.4 Le moiré

Le moiré est un phénomène purement géométrique [6,35] non linéaire [36] obtenu par la superposition de deux structures microscopiques de fréquences spatiales voisines [37], qui montrent de petites déviations, soit dans la structure elle-même ou dans leurs positions. Donc, le phénomène de moiré est matérialisé par une structure macroscopique obtenue par la superposition de deux structures microscopiques neutres [38-40] (réseaux) et caractérisé par un système de franges qui est généré par les lieux d'intersections des structures périodiques [4].



a- Exemple de moiré sur un tissu en nylon.

b- Franges de moiré

Figure 2.6. Phénomène de moiré [4]

2.5 Les franges de moiré

2.5.1 Définition

Le système des franges de moiré, est matérialisé par la structure macroscopique générée par la superposition de deux structures microscopiques (deux réseaux) décalée l'une par rapport à l'autre par un décalage angulaire ou linéaire.

2.5.2 Les différents types des franges de moiré

Les franges de moiré peuvent être générées à partir de différents types de structures géométriques [4]. On donne un aperçu sur quelques figures de moiré obtenues à partir de différentes structures géométriques pour avoir la possibilité de choisir les réseaux les plus convenables pour la solution du problème posé.

2.5.2.1 Moiré à réseaux linéaires

Le cas le plus simple du phénomène de moiré est produit par la superposition de deux réseaux de lignes parallèles et équidistantes. Les deux réseaux montrent entre eux une inclinaison d'un angle variant entre zéro et quatre-vingt-dix degré ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) (figure 2.7a). Dans le cas où les espacements entre les lignes des deux réseaux ne sont pas constants et varient d'un réseau à l'autre et si l'angle $\theta=0^\circ$, les franges de moiré sont des lignes droites régulièrement espacés et parallèles aux lignes des réseaux utilisés. Ce phénomène est appelé : **Battement** (figure 2.7b), il amplifie les petits déplacements et révèle dans quelle mesure les deux réseaux superposés peuvent être considérés comme identiques [4].

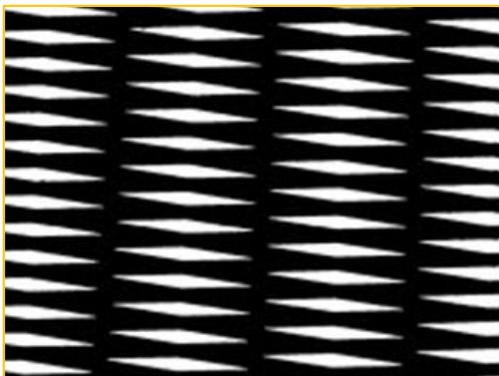


Figure 2.7a. Moiré à pas constant [4]

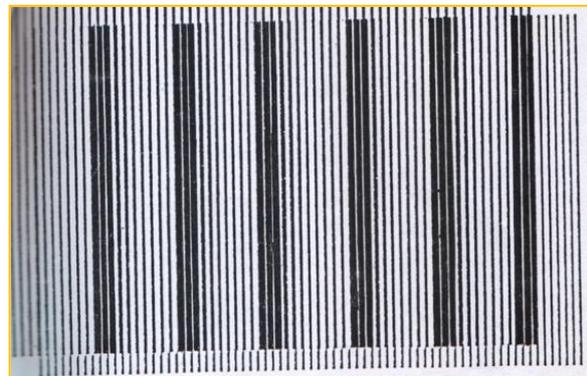


Figure 2.7b. Moiré de battement [4]

2.5.2.2 Moiré à réseaux circulaires

Le phénomène de moiré apparaît aussi lorsqu'on superpose deux réseaux de forme géométrique circulaire (figure 2.8). Une structure des franges de moiré elliptiques apparaît visiblement lorsque les deux cercles s'approchent de plus en plus jusqu'à ce que la distance entre leurs centres diminue [41].

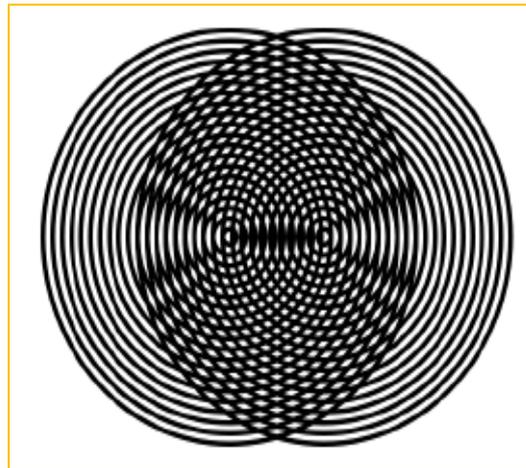


Figure 2.8. Moiré à réseau circulaire [41]

2.5.2.3 Moiré à courbes de Gauss

Ce type de moiré est obtenu par la superposition de deux réseaux, l'un linéaire et l'autre composé de lignes dont les espacements sont représentés selon la courbe de Gauss (figure 2.9). La réduction de décalage entre les deux réseaux augmente la courbure des franges de moiré.



Figure 2.9. Moiré à courbes de Gauss [4]

2.5.2.4 Moiré à réseaux à double périodes

On obtient les franges de moiré en superposant des réseaux constitués par des structures microscopiques quelconques qui se répètent avec une double période (figure 2.10) [4].

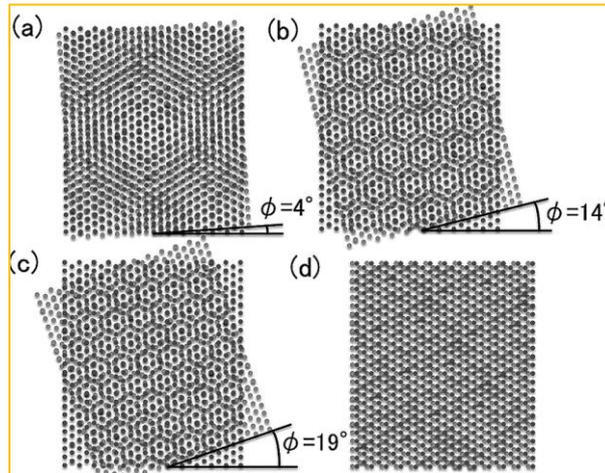


Figure 2.10. Moiré à réseaux à double périodes

2.5.2.5 Moiré à réseaux à anneaux de Fresnel

Le moiré obtenu par la superposition des anneaux de Fresnel est caractérisé par deux types de franges définis en fonction de la distance qui sépare les centres des deux réseaux. Si la distance entre les centres est très petite, alors les franges de moiré sont sous forme de droites (figure 2.11a), par contre si les centres sont éloignés l'un de l'autre, les franges de moiré sont alors des réseaux zonés dont le nombre augmente au fur et à mesure que la distance entre les centres augmente (figure 2.11b) [42,43].

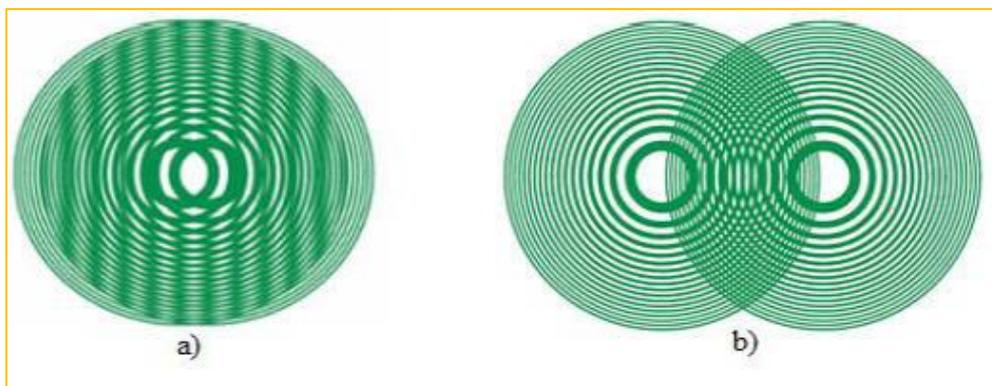


Figure 2.11. Moiré à anneaux de Fresnel

2.5.3 Schéma mathématique de formation des franges de moiré

On considère deux réseaux de lignes droites alternativement opaques et transparentes, dont les pas sont voisins. Quand on superpose ces deux réseaux, on voit apparaître en général un troisième réseau de lignes dont le pas est plus important et que l'on appelle le **moiré visible** [44].

Dans un premier temps, nous allons réaliser une approche mathématique du phénomène de moiré, en supposant que les réseaux de traits peuvent être représentés par des signaux sinusoïdaux I_1 et I_2 parfaits et de périodes **pas** proches p_1 et p_2 .

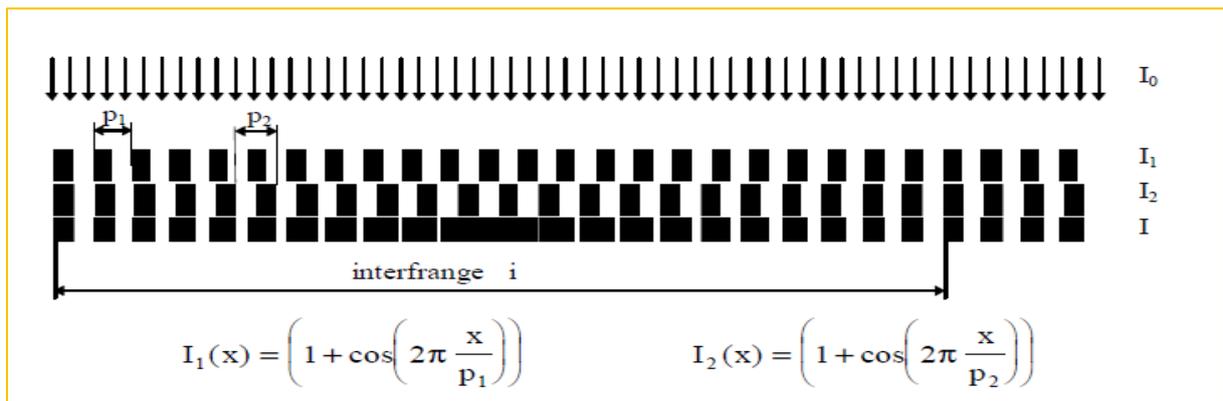


Figure 2.12. Formation des franges de moiré [44]

L'ensemble des deux signaux précédents est éclairé par une onde plane d'intensité I_0 , nous allons calculer l'intensité résultante à la sortie des réseaux. On peut alors remarquer qu'un trait noir de l'un des réseaux arrête définitivement la lumière ; en d'autres termes, nous aurons de la lumière en sortie seulement aux points communs qui laissent passer celle-ci. On en conclut donc que cette superposition peut être schématisée par une multiplication des transparences respectives des réseaux. La définition d'une transparence s'établit comme le rapport de l'intensité sortante sur l'intensité entrante d'un élément optique, il vient donc que :

- avant le premier réseau, nous avons : I_0
- après le premier réseau, nous avons : $I_0 I_1(x)$
- après le deuxième réseau, nous avons : $I_0 I_1(x) I_2(x)$

Ce qui donne:

$$I(x) = I_0 I_1(x) I_2(x) = I_0 \left[1 + \cos\left(2\pi \frac{x}{p_1}\right) + \cos\left(2\pi \frac{x}{p_2}\right) + \cos\left(2\pi \frac{x}{p_1}\right) \cos\left(2\pi \frac{x}{p_2}\right) \right] \quad (2.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_0 \qquad \qquad \qquad (1) \\ I_0 \cos(2\pi \frac{X}{P_1}) + \qquad \qquad \qquad (2) \\ I_0 \cos(2\pi \frac{X}{P_2}) + \qquad \qquad \qquad (3) \\ \frac{I_0}{2} \cos(2\pi \frac{(P_1 - P_2)X}{P_1 P_2}) \qquad \qquad \qquad (4) \\ \frac{I_0}{2} \cos(2\pi \frac{(P_1 + P_2)X}{P_1 P_2}) \qquad \qquad \qquad (5) \end{array} \right.$$

Avec :

- 1 Terme constant
- 2 Premier réseau de traits
- 3 Deuxième réseau de traits
- 4 Moiré soustractif (visible)
- 5 Moiré additif (invisible)

Les cinq termes précédents peuvent physiquement se visualiser facilement, en plus des deux réseaux qui sont évidemment toujours visibles, les deux derniers termes correspondent à des signaux de périodes $p_1 p_2 / (p_1 - p_2)$ et $p_1 p_2 / (p_1 + p_2)$ (appelés respectivement **moiré soustractif** et **moiré additif**). Bien sûr, le moiré soustractif est parfaitement visible parce que sa période est grande comparée aux pas des réseaux, alors que pour le moiré additif la période est plus petite.

2.6 Les paramètres qui influencent le contraste des franges

2.6.1 Mode d'éclairage

Toutes les caractéristiques de la lumière font une partie intégrale de la génération de la figure de moiré. Même si la superposition des réseaux est parfaite, le système de franges de moiré peut être détaillé sans ambages par la théorie géométrique, mais, dans la réalité, on ne peut pas assurer une superposition idéale. La juxtaposition des réseaux peut être mécanique (avec le contact physique des deux réseaux) ou optique (la superposition des images des réseaux). Dans le dernier cas, une telle déviation naît au moment où il existe une irrégularité dans les moyens d'enregistrement, une aberration à l'intérieur du système optique etc. En outre, la relation entre la longueur d'onde et la période des réseaux est considérée suffisante pour ne pas atteindre la limite de la diffraction ($d/\lambda=1$). Au-delà de cette limite, la diffraction et l'interférence contribuent au phénomène de moiré.

Ainsi, le degré de cohérence spatiale et temporelle de la lumière détermine l'influence de l'interférence et de la diffraction sur la figure de moiré [45]. La contribution du bruit dû à la diffraction est dépendante de la cohérence temporelle de la lumière, tandis que l'information indésirable due à l'interférence est reliée à la cohérence spatiale.

Dans la cohérence temporelle, un front d'onde composé de multiples longueurs d'ondes sera diffracté lorsqu'il arrive aux réseaux. Pourtant, chaque longueur d'onde sera détectée à un angle différent pour le comportement caractéristique du réseau, de cette façon on observera une série de figures de moiré identiques avec un décalage entre elles et de couleurs distinctes. On peut éviter cela en mettant un filtre monochromatique qui admet seulement un petit intervalle spectral. De cette manière on observera un système de franges de moiré bien défini.

La cohérence spatiale a un lien direct avec le chemin optique parcouru par la lumière, donc l'intersection entre les deux réseaux, les aberrations dans les lentilles et les défauts dans les matériaux optiques, causeront une interférence dans la figure de moiré. De sorte qu'une source de lumière incohérente présentera une interférence inobservable et par conséquent le bruit dû à l'interférence sera très petit.

Note: L'utilisation de la lumière incohérente est limitée par la finesse des réseaux utilisés [4]. Pour un réseau de nombre de traits qui est inférieur ou égal à 20 traits/mm, le phénomène de moiré est purement géométrique et peut être observé à l'œil nu, mais au-delà de cette fréquence spatiale, le phénomène devient invisible à l'œil nu car l'effet de la diffraction devient dominant et l'utilisation de la lumière cohérente est recommandée.



Figure 2.13. Franges de moiré sont observées en mode d'éclairage incohérent [46]



Figure 2.14. Franges de moiré sont observées en mode d'éclairage cohérent [46]

2.6.2 Influence du rapport a/p

Le contraste des franges de moiré est influencé par la largeur des bandes transparentes et opaques formant le réseau linéaire à transmission [4]. Nous remarquons que l'utilisation d'un diaphragme annule l'effet de la variation du rapport $\frac{a}{p}$ (figure 2.15). Or dans le cas sans diaphragme nous remarquons que plus le rapport $\frac{a}{p}$ tend vers 1 plus le contraste des franges est dégradé et il s'annule lorsque a est égale à p alors $\frac{a}{p}$ sera égale à 1 (figure 2.16). Nous en déduisons que plus la transmittance est faible, plus il en résulte une haute visibilité des franges de moiré, sachant que le contraste est donné par la relation suivante [47] :

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.5)$$

Où :

I_{\max} est l'intensité maximale

I_{\min} est l'intensité minimale.

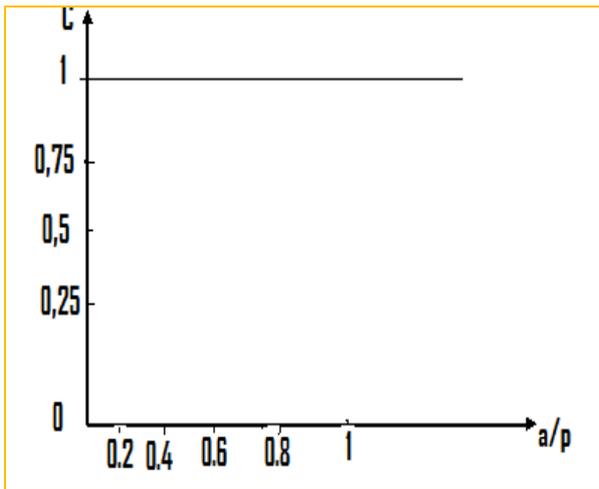


Figure 2.15. L'influence de diaphragme sur le contraste des franges [4]

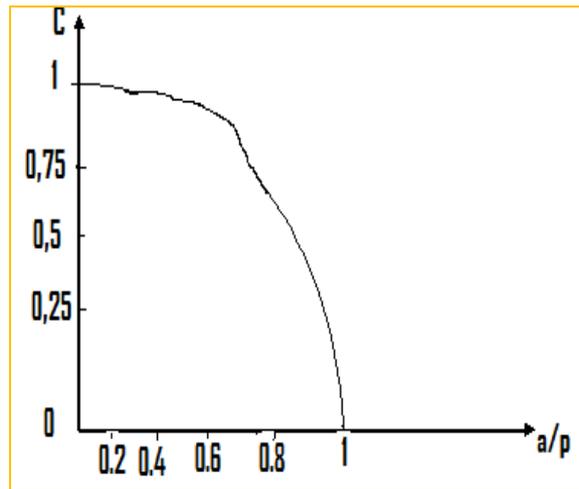


Figure 2.16. L'influence du rapport a/p sur le contraste des franges [4]

2.6.3 Influence du procédé de fabrication des réseaux

Les réseaux peuvent être fabriqués soit par voie photographique soit par évaporation d'un matériau sur une plaque de verre.

- **Méthode photographique**

L'utilisation d'un réseau obtenu par voie photographique peut présenter des défauts qui ont une influence considérable sur le contraste des franges de moiré parce qu'ils ont les inconvénients suivants [4] :

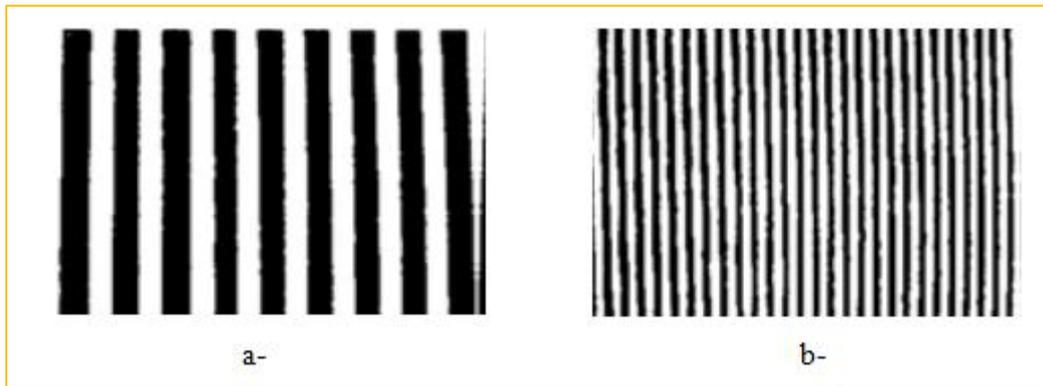
- Les traits opaques de ces réseaux ne sont pas vraiment opaques, cet inconvénient produit le phénomène de diffusion de la lumière et donne ainsi une transmittance différente de zéro.
- La présence des trous microscopiques sur les bandes opaques donne naissance au phénomène de diffraction de la lumière.
- Le noircissement qui s'étale sur la partie transparente.

Ainsi, tous ces inconvénients affaiblissent le contraste des franges de moiré, et pour avoir un bon contraste, il faut que les réseaux satisfont à la loi du « tout ou rien » en ce qui concerne la transmission.

- **Méthode par évaporation d'un matériau**

Les réseaux obtenus par cette méthode exigent un choix optimal de la nature du matériau évaporé sur une plaque de verre, de l'épaisseur des couches minces ainsi que le choix du rapport a/p .

Pour éviter les inconvénients de la première méthode, on utilise des réseaux obtenus par l'évaporation.



a - Réseau à évaporation et b - Réseau photographique

Figure 2.17. Franges de moiré formées par différents réseaux [4]

2.7 Méthode de superposition des réseaux

2.7.1 Réseaux séparés par un coin d'air

Si la lumière traverse deux réseaux qui ne sont pas parfaitement en contact (c'est-à-dire sont séparés par un coin d'air ΔZ) (figure 2.18), le phénomène de moiré a toujours lieu mais il est perturbé par l'effet de la diffraction et le contraste des franges n'est pas uniforme. La première conséquence de la diffraction, est que lorsque la lumière traverse le premier réseau, chaque rayon diffracté émergent du premier réseau génère le même nombre de rayons diffractés en passant par le second réseau (figure 2.19). La deuxième conséquence résulte du fait que certains rayons diffractés d'ordre supérieurs émergent du premier réseau sont trop divergents et ne tombent pas sur le second réseau [48] (figure 2.20). De ce fait, toutes les informations concernant le premier réseau ne sont pas transmises intégralement ; ce qui engendre une différence entre les deux réseaux, c'est-à-dire l'image du premier réseau ne correspond pas exactement à l'objet [4]. Donc, l'effet de la diffraction sur l'aspect des franges de moiré ne peut pas passer inaperçu. En effet, pour l'observation du système de franges de moiré engendré par la superposition de deux réseaux linéaires uniformément éclairés par une source cohérente séparés par un coin d'air ΔZ , il faut satisfaire la condition suivante :

$$\Delta Z = v \frac{P_1 P_2}{\bar{\lambda}} \quad (2.6)$$

Avec :

ΔZ : Distance entre les deux réseaux (coin d'air). Et $P_1 P_2$: Pas des réseaux.

$\bar{\lambda}$: Longueur d'onde moyenne de la lumière utilisée.

$v = 0, \pm 1, \pm 2$ (Ordre de diffraction).

Donc, à toute valeur de v qui fixe l'épaisseur du coin d'air, correspond un et un seul plan (plan de Fourier) où se forme l'image des franges de moiré. La position de ce plan est donnée par :

$$L = \Delta Z / \delta \quad (2.7)$$

δ : Pas différentiel déterminé par :

$$|(P_1 - P_2) / P_1| = |\delta| \ll 1 \quad (2.8)$$

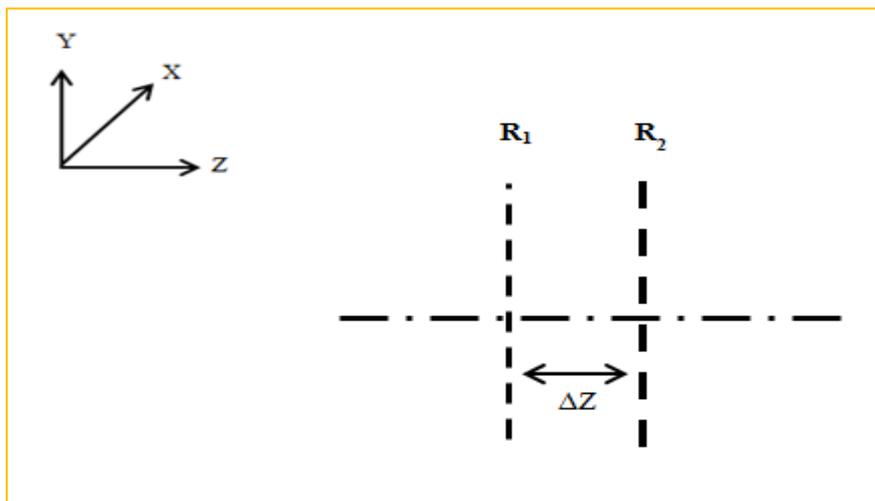


Figure 2. 18. Réseaux séparés par un coin d'air

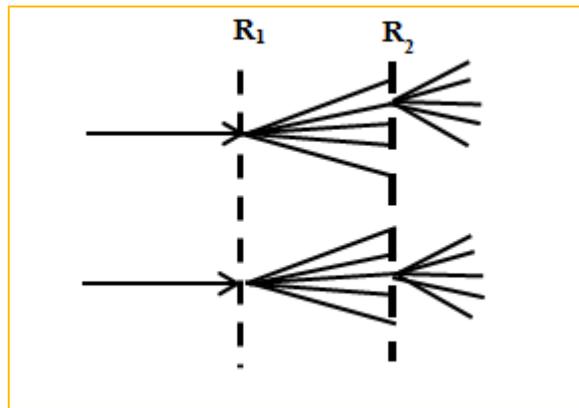


Figure 2.19. Rayon lumineux diffracté par deux réseaux

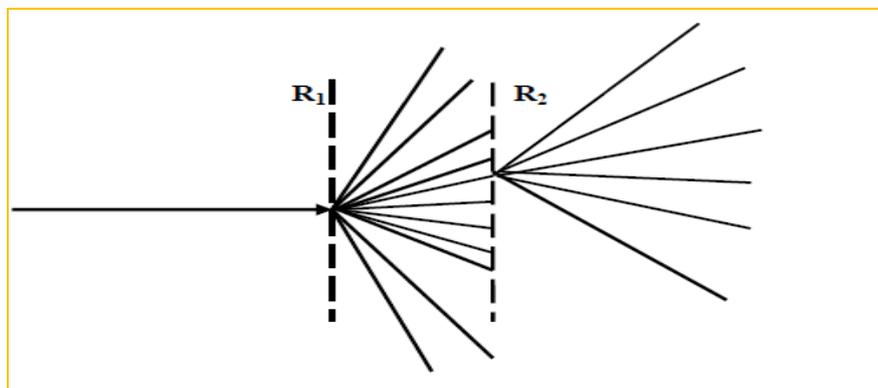


Figure 2.20. Rayon diffracté trop divergent

2.7.2 Réseaux en contact

La superposition de deux réseaux face à face, c'est-à-dire un contact parfait, permet la génération du phénomène de moiré sans que les effets de la diffraction interviennent. Mais, cette condition de contact parfait entre les deux réseaux ne peut être obtenue que par face à face des réseaux. A cause des défauts de planéité des plaques sur lesquelles les réseaux sont gravés et plus particulièrement les plaques photographiques, il en résulte un coin d'air variable entre les deux réseaux superposés. En conséquence, le contraste des franges de moiré n'est pas uniforme (figure 2.21). Donc, il est essentiel de déterminer à partir de quelle valeur maximale du coin d'air le phénomène de diffraction influence le phénomène de moiré. La formule (2.9) nous indique qu'en satisfaisant cette condition, l'effet de moiré n'est pas influencé par la diffraction et l'aspect des franges est purement géométrique [4].

$$\Delta Z_{max} \leq \frac{P_1 - P_2}{16\lambda} \quad (2. 9)$$

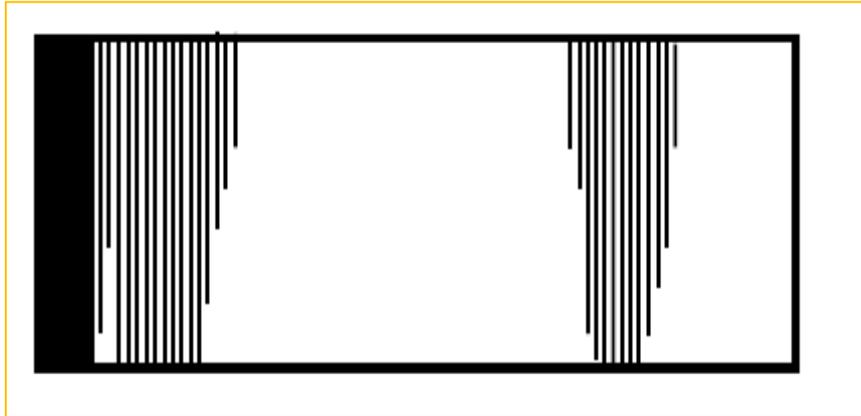


Figure 2. 21. Effet d'un coin d'air variable sur le contraste des franges

2.7. 3 Superposition des réseaux par méthode optique

Pour réaliser une superposition en un contact parfait ($\Delta Z=0$), sur toute la surface du réseau, on utilise la méthode optique. Cette méthode consiste à éclairer un réseau R_1 par un faisceau lumineux qui le traverse, se diffractent et se rassemblent par la lentille L_1 en son plan focal où se forme le spectre de diffraction, ce spectre subit la transformation inverse par la lentille L_2 pour donner l'image du réseau R_1 avec grandissement de 1, et superposée au plan du réseau R_2 , avec une telle méthode on obtient deux réseaux parfaitement en contact, et qui génèrent le moiré et l'observation des franges de moiré se fera sans condition[46].

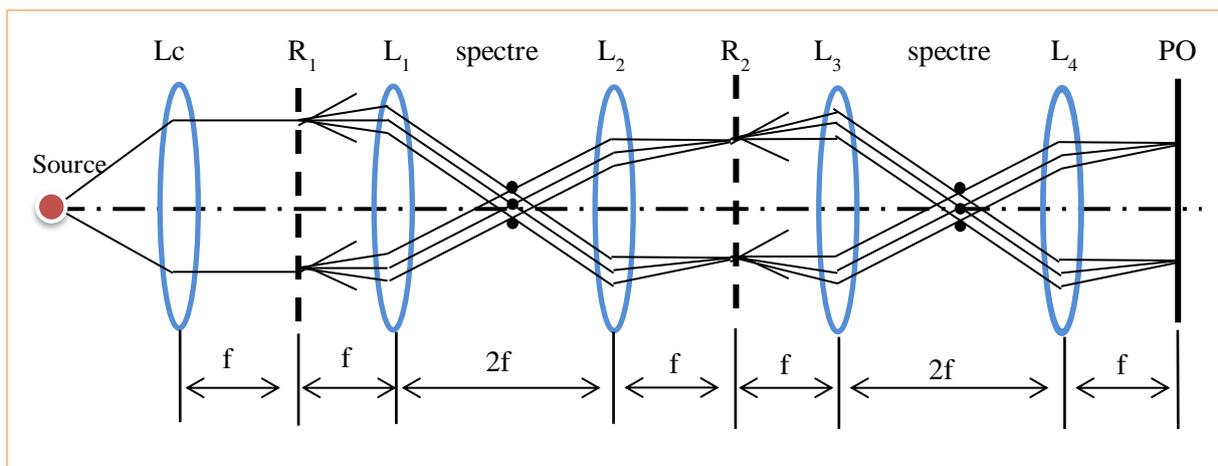


Figure 2.22. Superposition optique de deux réseaux

2.8 Moiré obtenu par la superposition de deux réseaux linéaires à transmission

2.8.1 Réseau linéaire à transmission

C'est un dispositif optique consiste de l'alternance d'une série de fentes opaques et transparentes parallèles entre elles (figure 2.23) dans un ordre régulier et avec une séparation uniforme [49]. Ces réseaux sont caractérisés par une fréquence spatiale F égale à l'inverse de son pas (P); $F = 1/p$.

Un faisceau lumineux qui traverse ces réseaux donne à sa sortie naissance à une structure particulière constituée de spectre d'ordres « spectre de diffraction » (la figure 2.24) dont l'intensité a diminué avec l'accroissement de nombre d'ordres.

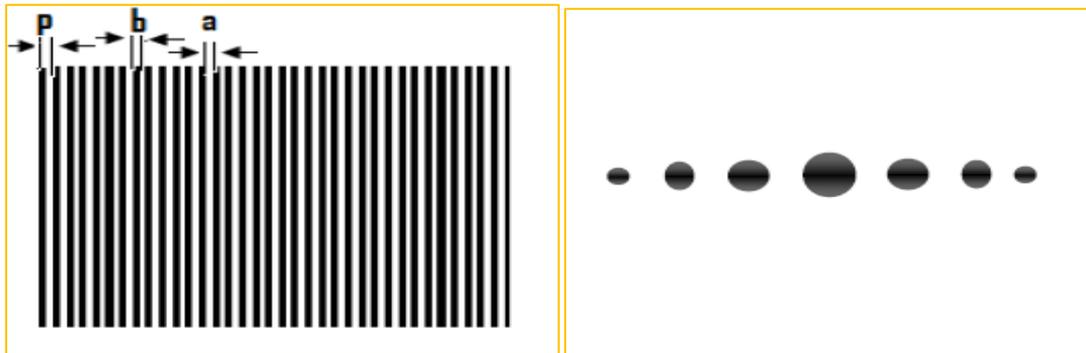


Figure 2.23. Réseau linéaire à transmission

Figure 2.24. Spectre de diffraction

2.8.2 Etude géométrique

Soient deux réseaux linéaires à transmission ayant même fréquence spatiale, l'un est superposé sur l'autre de telle manière que les lignes des deux réseaux soient parallèles entre elles et à l'axe Y (figure 2.25) ; la rotation de l'un des réseaux par rapport à l'autre d'un angle θ donne naissance au phénomène de moiré de rotation et le décalage suivant l'axe x dans cette position nous donne le moiré de translation [45].

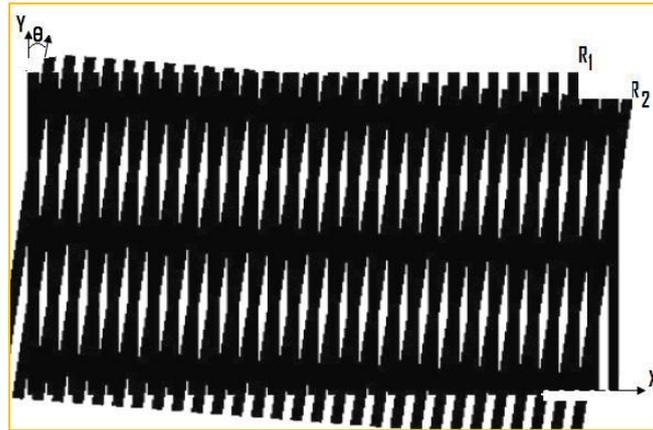


Figure 2.25. Franges de moiré générées par la superposition de deux réseaux linéaires

2.8.2.1 Moiré de rotation

L'inclinaison de l'un des réseaux par rapport à l'autre, lors de leurs superpositions, d'un angle θ donne naissance à des franges de moiré parallèles entre elles, dont la direction est perpendiculaire à la bissectrice de l'angle θ qui est différente de $(2k+1)\pi$ (c.à.d. $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$). Le système des franges est généré par les lieux d'intersection des lignes des réseaux [50]. La variation de l'angle θ provoque un changement important entre les espacements des franges de moiré (figure 2.26). Plus l'angle diminue, lorsqu'on rapproche étroitement le parallélisme entre les traits des deux réseaux, plus les franges de moiré sont espacées et parfois d'une façon irrégulière en conséquence de l'imperfection des traits des réseaux.

Si l'angle est augmenté (tend vers 90°), les espacements des franges sont diminués c'est-à-dire la fréquence des franges de moiré a augmenté avec l'angle.

Quand $\theta = 90^\circ$, les franges disparaissent pour laisser la place à un réseau croisé.



Figure 2.26. Franges de moiré pour différents angles d'inclinaison

1.8.2.2 Moiré de translation

Si les franges de moiré sont apparues (moiré de rotation), le décalage de l'un des deux réseaux par rapport à l'autre suivant l'axe des **X** nous permet d'observer un défilement dans les franges de moiré qui se déplacent perpendiculairement à la bissectrice de l'angle, ce type de moiré est appelé moiré de **translation** qui offre les avantages suivants :

- ✓ Suivi individuel des franges.
- ✓ Les franges sombres sont toujours séparées par les franges claires.
- ✓ La détermination de la vitesse vue que les franges défilent en ordre.
- ✓ Les franges de moiré se compriment et ne viennent jamais se chevaucher, confondre, de passer et leur défilement se fait dans un ordre.

Donc, le phénomène de moiré (rotation ou translation), est un déplacement macroscopique produit par un déplacement microscopique de l'un des deux réseaux.

2.9 La sensibilité

2.9.1 Définition

La sensibilité est l'accroissement de la réponse d'un instrument de mesure divisé par l'accroissement du signal d'entrée [37].

On peut définir aussi la sensibilité d'un instrument de mesure comme étant la plus petite grandeur (déformation, défaut de forme, état de surface...etc.) qui peut être mesurée par cet instrument.

Le phénomène de moiré est utilisé pour mesurer et contrôler ces faibles grandeurs, mais il arrive parfois, quand la grandeur à mesurer est très fine, le phénomène devient insensible. C'est pour cela que des recherches sont toujours en cours pour améliorer la sensibilité de l'effet de moiré.

2.9.2 Les paramètres qui influencent la sensibilité de moiré

2.9.2.1 L'angle θ

θ , est l'angle de rotation d'un réseau par rapport à l'autre, la variation de cet angle a une influence très importante sur la fréquence spatiale des franges de moiré comme montré dans la figure 2.26, sans influence sur la sensibilité comme il est indiqué dans la figure 2.27.

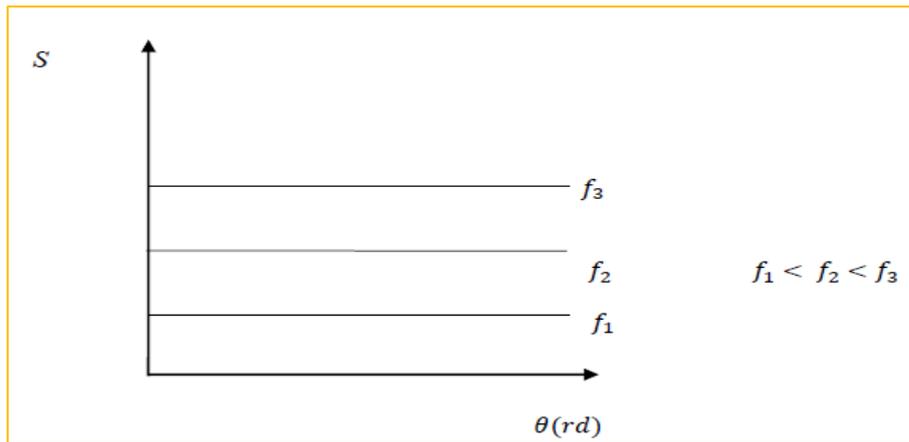


Figure 2.27. Influence de l'angle θ sur la sensibilité de moiré [4]

2.9.2 .2. Le pas de réseau

La sensibilité de système des franges est variée avec la fréquence spatiale des réseaux utilisés de la manière suivante [51] :

- La sensibilité augmente avec la fréquence spatiale des réseaux utilisés (figure 2.28).
- L'augmentation de la fréquence spatiale de l'un des réseaux est suffisante pour augmenter la sensibilité de système des franges.
- L'arrangement des réseaux de fréquence différent n'influence pas sur la sensibilité des franges de moiré.

Alors, plus le réseau a un pas fin, plus la sensibilité est importante, mais, plus il est cher, et pour cette raison, on cherche des techniques pour augmenter la sensibilité sans changement de réseau utilisé.

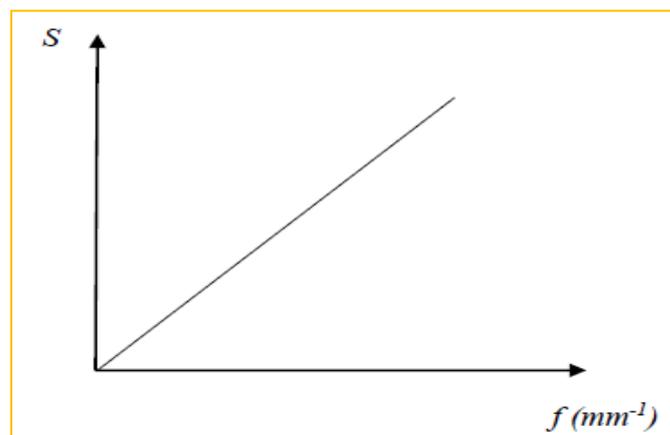


Figure 2.28. Influence de la fréquence spatiale des réseaux sur la sensibilité [4]

2.9.3 Méthodes pour augmenter la sensibilité

2.9.3.1 Le filtrage spatial

Le filtrage spatial est utilisé pour améliorer la sensibilité par l'augmentation de la fréquence spatiale sans changer le réseau source utilisé. Cette technique est faite de manière qu'un rayon lumineux qui traverse un objet se diffracte (transformation de Fourier) pour donner naissance à un spectre d'image formé de plusieurs points (figure 2.29) qui contient toutes les informations sur l'objet. La décomposition de l'objet en ensemble de points nous permet de traiter l'information de sortie et pour déterminer la structure désirée on sélectionne ou on élimine certains ordres du spectre par l'utilisation d'un filtre spatial mobile qui nous permet de changer la fréquence par le déplacement de ce dernier, et par une transformation inverse de Fourier de ce spectre nous formons l'image désirée de l'objet.

La correspondance entre l'objet et son spectre est donnée par la transformation de Fourier. En prenant, par exemple, un réseau sinusoïdal, le développement en série de Fourier s'écrit comme suit [4] :

$$F(x_0, y_0) = 1 + \cos \frac{2\pi x_0}{p} + \frac{1}{3} \cos \frac{2\pi 3x_0}{p} + \frac{1}{5} \cos \frac{2\pi 5x_0}{p} + \dots \quad (2.10)$$

Donc, le réseau peut être présenté par une infinité de lois sinusoïdales dont les périodes sont $[p, p/3, p/5, \dots, p/2n-1]$ et de fréquence spatiale $[0, 1/p, 3/p, 5/p, \dots, 2n-1/p]$.

Donc, le filtrage spatial consiste à former le spectre d'un objet, d'en faire un traitement nécessaire et à retransformer le spectre modifié pour obtenir l'image souhaitée.

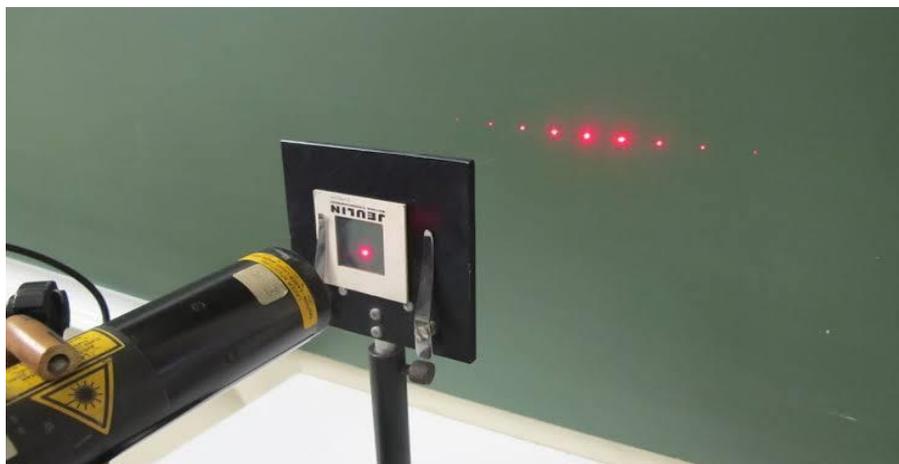


Figure 2.29. Image de spectre de diffraction d'un réseau linéaire en transmission

1.9.3.2 La technique de multiplication de franges

La méthode basée sur la technique de filtrage spatial et son principe de fonctionnement, donné dans la figure 2.30, est la suivante :

- Le réseau source R_1 , incliné dans son plan avec un angle, diffracte le rayon lumineux en un ensemble de rayons émergents dans différentes directions.
- La lentille de Fourier L_1 rassemble l'ensemble des rayons dans son plan focal sous forme d'un ensemble de points discrets.
- La lentille L_2 réalise la transformation inverse pour superposer l'image de réseau R_1 , avec un agrandissement d'une fois, sur le réseau R_2 , avec $\Delta Z = 0$ (contact parfait).
- Le rayon lumineux est diffracté en deuxième fois par le réseau R_2 .
- La lentille L_3 rassemble les rayons émergents par les deux réseaux (par la superposition du réseau R_2 et l'image du réseau R_1).
- Un filtre spatial FS mobile situé dans le plan focal de la lentille L_3 n'admet qu'un spot à la fois constitué de r groupe $(r, 0)$ et $(0, r)$.
- La lentille L_4 donne les franges de moiré correspondantes à l'ordre sélectionné par le filtre.

Les franges de moiré formées par la lumière de groupe $r=n$, contiennent n franges dans la zone ordinairement occupée par une seule frange. Par exemple, si le filtre sélectionne le groupe $r=5$ on obtient cinq franges dans une zone ordinairement occupé par une frange.

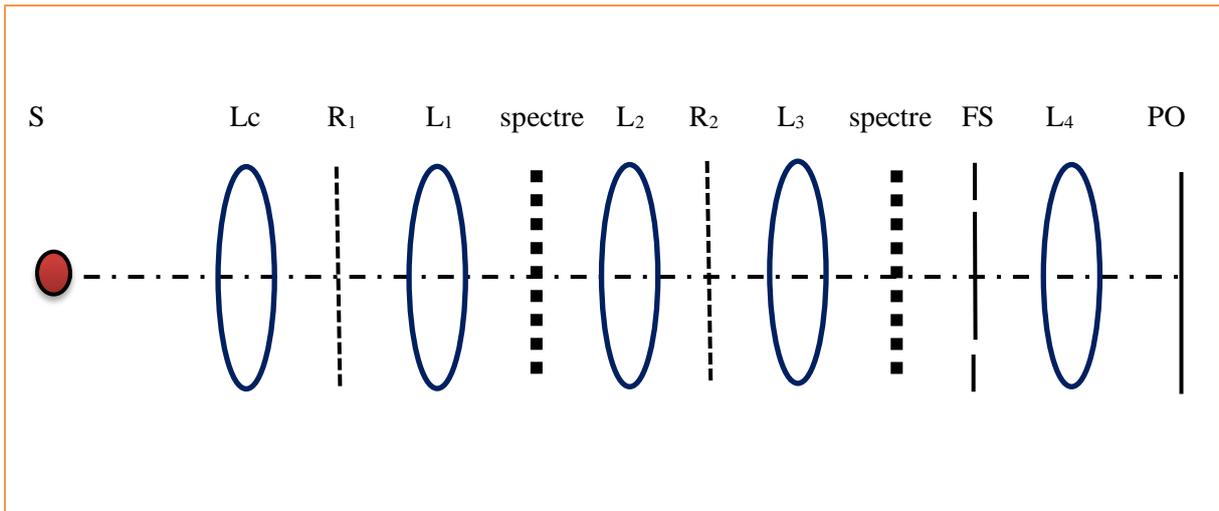


Figure 2.30. Technique de multiplication des franges

Alors à l'aide de cette simple et puissante technique, nous pouvons augmenter la sensibilité de la méthode de moiré, pour mettre en évidence de très faibles déplacements. En multipliant par un facteur M (M entier) le nombre de franges dans l'espace régulièrement occupé par une seule frange (figure 2.31) [39].

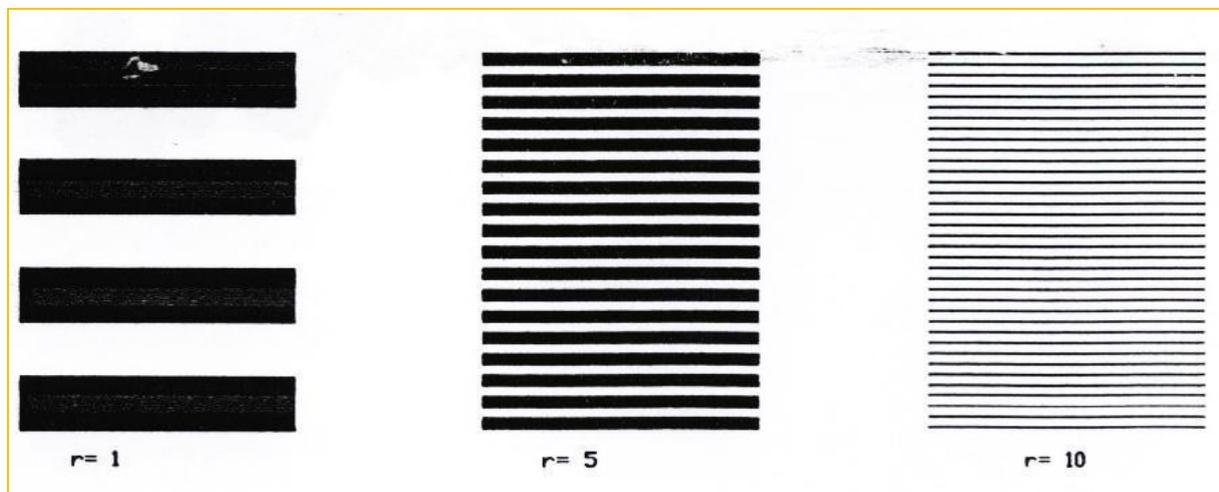


Figure 2.31. Franges de moiré obtenu avec différents facteurs de Multiplication

Troisième Chapitre :
Technique de
topographie non
destructive des surfaces

3.1 Introduction

Quel que soit le produit, les surfaces industrielles comportent des irrégularités. Celles-ci constituent des écarts locaux ou globaux par rapport à une surface idéale appelée surface nominale. Pour caractériser une surface et son comportement, il est nécessaire de mesurer la surface afin de disposer d'une information quantifiée sur sa géométrie [52]. Cette information peut-être de type altitudes ($z(x, y)$), on parle alors de mesure de topographie. Elle peut aussi être une forme dérivée de l'information en altitude, il s'agit alors de mesure de pentes (ordre 1) ou de courbures (ordre 2). Pour définir et caractériser de façon complète une surface, il faudrait que cette information soit continue sur la surface.

Historiquement, la mesure d'une surface a été réalisée d'abord par l'humain à travers une analyse visuelle et/ou tactile. Cette méthode est aujourd'hui encore très répandue notamment pour contrôler la qualité d'aspect d'une surface. Dans un second temps, les moyens de mesure d'état de surface ont permis de mesurer des lignes de points, appelées profils de la surface. En fonction de la typologie de l'objet, ces profils peuvent alors être mesurés linéairement ou parfois circulairement, généralement au moyen de palpeurs mécaniques.

Suite à l'apparition récente de moyens de mesures optiques sans contact capables de mesurer un grand nombre de points avec une bonne résolution latérale et verticale, les techniques de mesure de topographie et de traitement de l'information mesurée se sont développées. On peut désormais procéder à la mesure intégrale d'une surface ou d'une portion de surface à l'échelle de la micro et de la nano-géométrie. Une autre méthode consiste à acquérir l'information directement sur l'ensemble de la zone à mesurer. On parle alors de mesure à champs étendu. Il existe deux catégories principales de moyens de mesure topographique des surfaces, les méthodes de mesure de topographie mécaniques et les méthodes de mesure de topographie optiques.

3.2 Définition

La topographie s'inscrit dans un contexte d'analyse de surface. De nombreuses interactions demeurent sur une surface d'un matériau. Celles-ci jouent un rôle prépondérant dans le comportement du matériau, afin de mieux les comprendre, des analyses de surface sont nécessaires.

Enfin, la topographie de surface se manifeste sous trois niveaux :

- Macrographique, la surface est la limite entre le solide et son environnement

- Microscopique, la surface présente de nombreuses irrégularités et des altérations mécaniques. Celles-ci se superposent aux défauts de forme. Le niveau « microscopique » a pour objectif de la géométrie du profil de rugosité
- Nanométrique, la surface peut être schématisée par un empilement irrégulier d'atomes avec une discontinuité dans l'arrangement des atomes du solide ce qui confère aux atomes de surface une énergie intrinsèque supérieure à ceux du volume.

Par ailleurs, les propriétés et états de surface d'un matériau permettent une adaptation des processus de fabrication.

L'analyse topographique de surface est utilisée pour diverses applications telles que :

- ❖ L'analyse de l'état de surface d'un matériau
- ❖ L'analyse de rugosité
- ❖ L'étude d'un défaut de surface
- ❖ L'identification de phase
- ❖ L'analyse structurale d'une surface

3.3 Techniques de topographie de surface

La mesure de topographie de surface d'une pièce ou d'un composant intervient pour beaucoup sur sa fiabilité et sa précision. Toutes les industries sont concernées et ce quelle que soit la taille de la structure à mesurer tel que : les composants optiques, les véhicules à moteur, l'aérospatial, les semi-conducteurs et le stockage de données. Mesurant avec la résolution de micromètre, nanomètre et subnanomètre dans la direction verticale, les méthodes de topographie sans contact sont énormément supérieures aux méthodes traditionnelles de mesure de contact. Les techniques de topographie des surfaces des pièces sans contact sont nombreuses et sont devenue l'outil préféré pour le contrôle de qualité industriel de la géométrie de pièce de précision et de la finition de surface.

3.3.1 Machine à mesure tridimensionnelle (MMT)

La tête de mesure se positionne en tout point de l'espace, généralement au moyen de trois liaisons glissières ; la position des points à mesurer est définie préalablement par l'utilisateur. La méthode est spécialement destinée à mesurer un écart de forme sur une surface, ou un écart

de localisation entre différentes surfaces d'un objet - Grande flexibilité par rapport au type de surface à mesurer. Le principe de la méthode est illustré dans la figure 3.1.

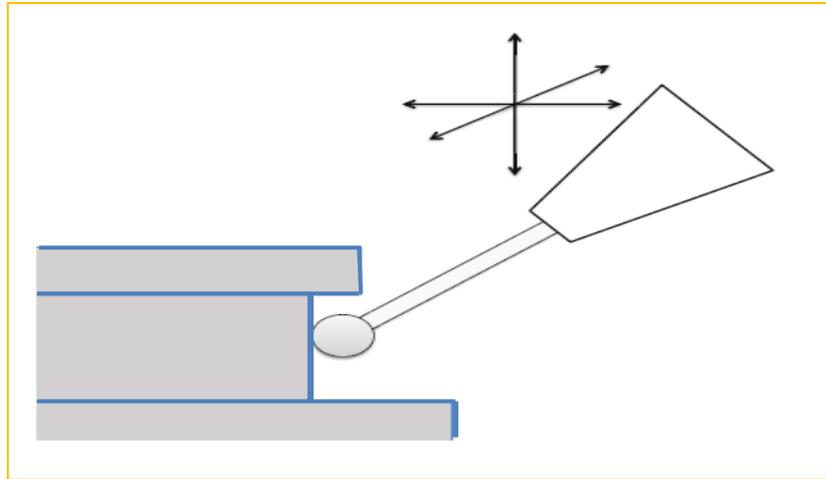


Figure 3.1. Principe de mesure par machine à mesure tridimensionnelle [53]

3.3.2 Microscope à effet Tunnel (STM)

La mesure est réalisée par mesure du courant tunnel dont l'intensité dépend de la distance entre la sonde et la surface. On mesure les variations de courant, ou les déplacements de la sonde (à courant constant), les spécificités de la technique sont :

- Mesure de topographie à l'échelle atomique
- Surfaces conductrices ou semi-conductrices
- Temps d'acquisition long

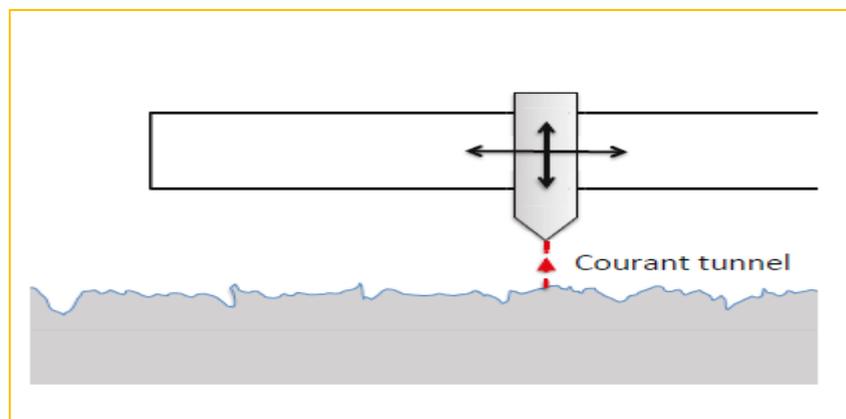


Figure 3.2. Principe de mesure par Microscope à effet Tunnel (STM) [53]

3.3.3 Microscope à force atomique AFM

L'AFM est une technique qui a révolutionné l'étude de la structure et des propriétés des surfaces. Elle est utilisée pour étudier la topographie des surfaces avec la possibilité d'obtenir une résolution à l'échelle de l'atome [54].

Le microscope à force atomique fut inventé, en 1986, par G. Binnig, C.F. Quate et C. Gerber. Son principe consiste à mesurer la force d'interaction entre l'atome du bout de la pointe et les atomes de la surface [55-58]. La pointe est solidaire d'un bras de levier et l'échantillon est déplacé au-dessous de la pointe (figure 3.3).

Quand deux atomes (celui de la pointe et celui de la surface) se font face, ils s'attirent par interaction de Van der Waals; dans l'espace entre deux atomes de la surface, la force d'attraction est moindre. En mesurant la déflexion du bras de levier, on obtient une mesure directe de la force pointe-substrat suivant la loi de Hooke : $F = -kx$, où k est la constante de raideur du ressort et x la déflexion du levier.

La déflexion du bras de levier peut être mesurée par la déflexion d'un faisceau laser réfléchi par un miroir. Le faisceau réfléchi tombe sur deux photodiodes en opposition; une petite déviation du faisceau donnera un signal différentiel aisément mesurable. On pourrait ainsi enregistrer l'amplitude de la déflexion en fonction de la position X et Y, et obtenir une image des forces d'interaction entre la pointe et les atomes de surface.

Un microscope à force atomique opère suivant trois régimes de fonctionnement principaux, à savoir le mode contact, le mode non contact et le mode de contact intermittent.

- 1- Le **mode contact** correspond à des distances pointe-surface faibles de l'ordre de quelques Angstrom \AA , pour lesquelles les forces de contact sont répulsives.
- 2- Le **mode non contact** correspond à des distances pointe-surface importantes de l'ordre de quelques \AA à quelques 100 \AA , pour lesquelles les forces sont attractives (Van der Waals...).
- 3- Le **mode contact intermittent** (*Tapping mode*) correspond à une combinaison des deux modes précédents.

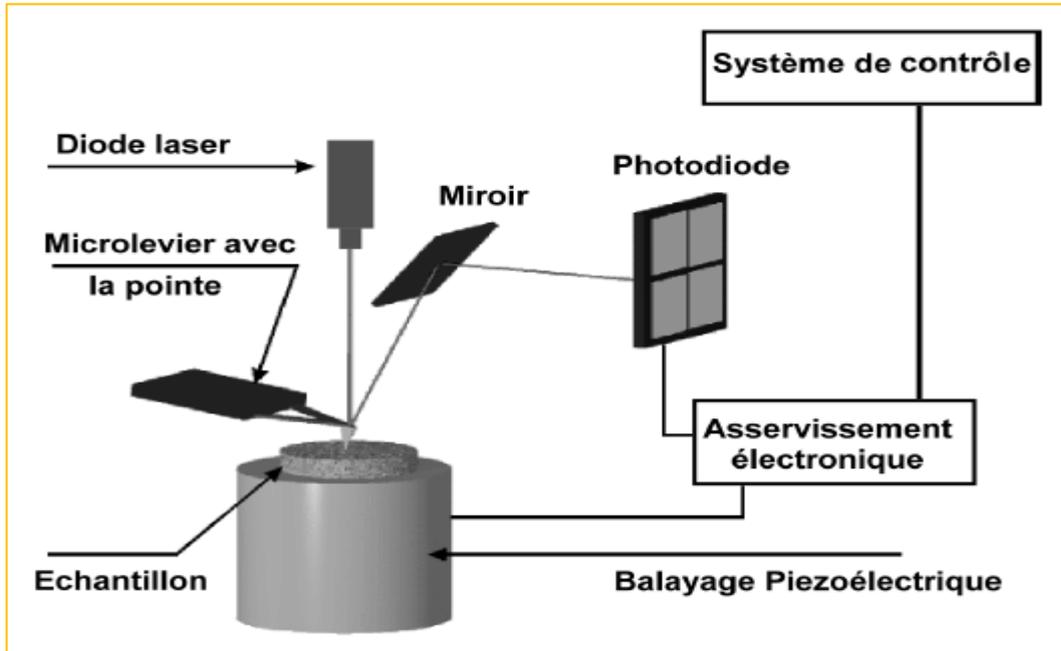


Figure 3.3. Principe de la microscopie à force atomique [59]

3.3.4 Profilomètre mécanique

Le profilomètre mécanique permet de mesurer des rugosités et des épaisseurs avec une précision de l'ordre de 2 nm. Un mode 3D permet de reproduire la topographie de la surface. La résolution latérale est de 0.7 μm . Enfin, Il est également possible de réaliser des mesures de contraintes localisées pour en réaliser une cartographie [60].

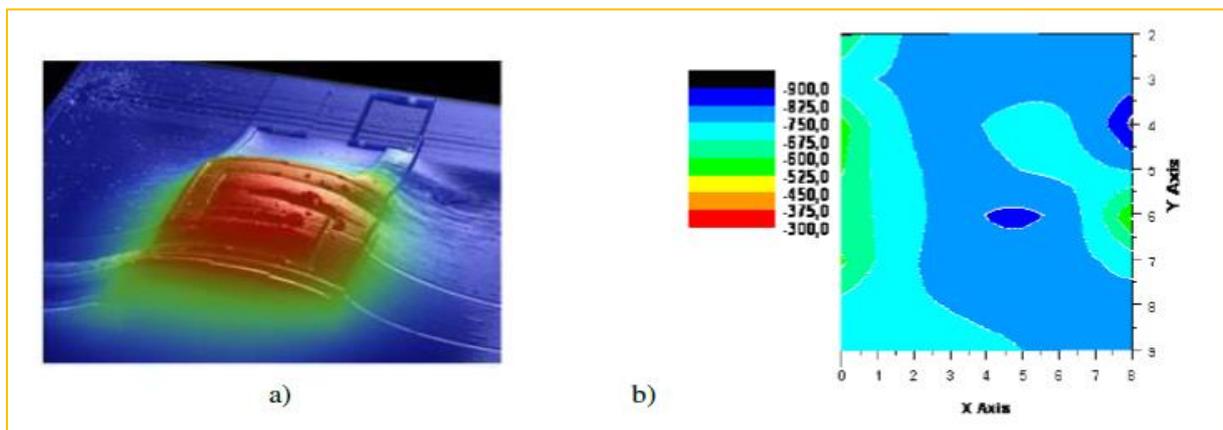


Figure 3.4. a- Topographie de la déformation d'un capteur souple, b- Cartographie des contraintes supportées par un film mince [60]

3.3.5 Topographie plein champ et sans contact de films minces nanométriques par interférométrie numérique couleur

Le dispositif développé permet la réalisation de topographie plein champ et sans contact, de films minces nanométriques par interférométrie numérique couleur. Il est basé sur un arrangement de type interféromètre de Michelson (figure 3.5), le dispositif disposé de deux écrans permettant d'obtenir alternativement le faisceau issu du miroir ou du substrat. Les interférences entre les deux ondes générées par réflexion sur la couche mince et le substrat (écran1 en place, écran 2 enlevé) peuvent être modélisés considérant l'indice (complexe ou non) du film et du substrat.

Les interférences en couleur sont approchées par le modèle développé par l'équipe du Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM) en la mesure des intensités laser obtenues avec le miroir uniquement, en tout pixel du capteur (écran1 enlevé, écran 2 en place). Le dispositif permet ainsi de mesurer l'épaisseur de films minces transparents ou légèrement absorbant (épaisseur $< 1\mu\text{m}$, si on utilise trois longueurs d'ondes : Rouge-Vert-Bleu), déposés sur un substrat. Facilement industrialisable, le dispositif assure une mesure sans contact aucun besoin de référence à la surface de l'échantillon [61].

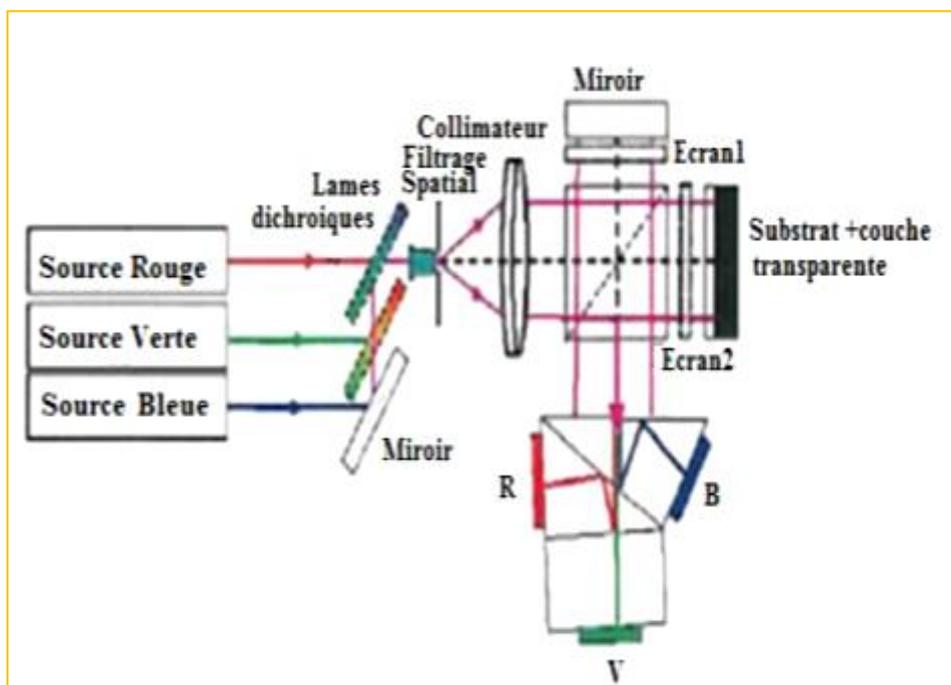


Figure 3.5. Principe de l'interférométrie numérique couleur [61]

3.3.6 Interférométrie à franges d'égal ordre chromatique FECO

Les franges d'égal ordre chromatique FECO (Fringes of Equal Chromatic Order) [62], sont formées lorsqu'un faisceau collimaté de lumière blanche subit de multiples réflexions entre deux surfaces semi-argentées séparées d'une distance d , et dispersé par un prisme.

Les FECO apparaissent comme des traits obscurs et clairs. Les configurations des franges suivent les régimes des longueurs d'ondes spatiales des irrégularités de la paire de surfaces qui forment l'interféromètre.

Dans l'interféromètre à FECO, comme représenté par la figure 3.6, une lumière blanche provenant d'une lampe à Xénon A est colimatée par la lentille L_1 , ensuite traverse un cube séparateur sous incidence normale.

Une partie de la lumière est dirigée vers la paire de surfaces (l'une constitue la surface à contrôler et l'autre est une surface de référence bien polie) où elle subira plusieurs réflexions avant de retourner au cube séparateur, qui transmet le faisceau réfléchi à la deuxième lentille L_2 qui le focalise à son tour à l'entrée de la fente S. Cette dernière se situe au seuil d'un système de dispersion composé d'une lentille de collimation L_3 , un prisme P et une lentille de focalisation L_4 . Le faisceau dispersé est capté par une caméra CCD.

Les informations que contient l'image d'interférence FECO sont transmises à un système de traitement où les déformations et l'ordre des FECO servent d'éléments de base pour la détermination du profil ; le profilage se fait par un tracteur piézo-translateur.

L'interférométrie FECO offre un degré de résolution satisfaisant pour des surfaces très fines, mais deux difficultés majeures se présentent, qui surviennent du fait que l'interférométrie est une technique différentielle.

- 1- La première concerne la surface de référence qui doit être très fine pour que sa rugosité n'influe pas sur les mesures, et la surface à contrôler doit avoir une réflectivité élevée.
- 2- La deuxième est que le mouvement de balayage de l'échantillon est uniquement linéaire.

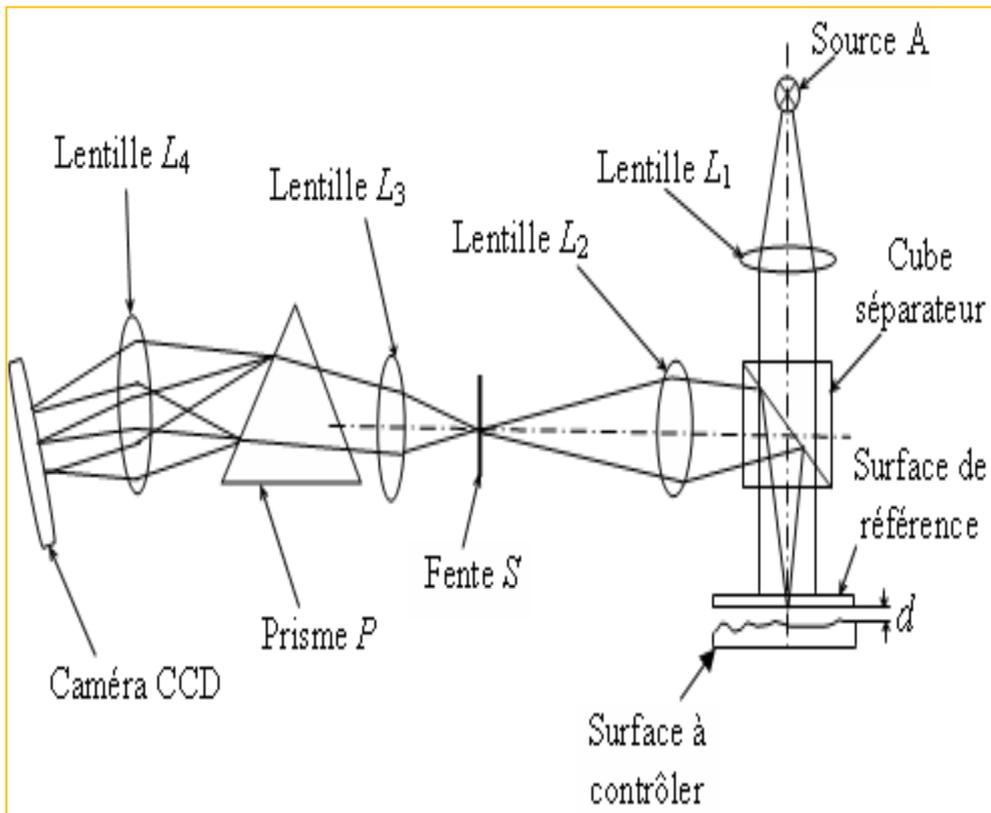


Fig. 3.6. Principe de mesure de la rugosité par l'interféromètre à FECO [23]

3.3.7 La microscopie confocale

Dans la microscopie optique classique, l'image est plate, donnant des informations dimensionnelles latérales (X et Y) mais pas axiales (Z). Le contraste de l'image provient en général des variations de la réflectivité de surface. En limitant la profondeur de champ d'un microscope optique avec un système d'éclairage et d'imagerie optimisé, la microscopie confocale permet d'obtenir des informations quantitatives sur l'axe optique (Z).

Le principe du microscope confocal (figure 3.7) consiste à focaliser, par l'intermédiaire d'un objectif, un faisceau laser qui va éclairer un point de l'échantillon, puis à récupérer sur un photomultiplicateur, le signal lumineux émis en ce point [63,64].

Un diaphragme placé devant le photomultiplicateur (figure 3.7) arrête tout signal ne provenant pas du plan focal. Le signal reçu est amplifié dans le photomultiplicateur, traité afin d'améliorer le rapport signal sur bruit, puis numérisé [65].

L'image est construite point par point grâce à un balayage (X , Y) du champ analysé à l'aide de miroirs de déflexion de la source lumineuse. Une platine motorisée déplace l'échantillon suivant l'axe Z permettant la saisie de différents plans optiques dans l'épaisseur de l'objet.

La microscopie confocale est une technique optique non destructive permettant d'obtenir des coupes optiques non seulement dans le plan (X,Y) mais également suivant un plan (X, Z) parallèle à l'axe optique qui peuvent faire l'objet de reconstructions tridimensionnelles [66]. Ces coupes optiques "virtuelles" n'affectent en rien l'intégralité de l'échantillon contrairement aux coupes physiques nécessaires en microscopie électronique.

Les derniers développements en microscopie confocale fluorescente permettent, par des moyens de marquage basés sur l'utilisation des produits fluorescents, d'observer des structures 3D remarquables.

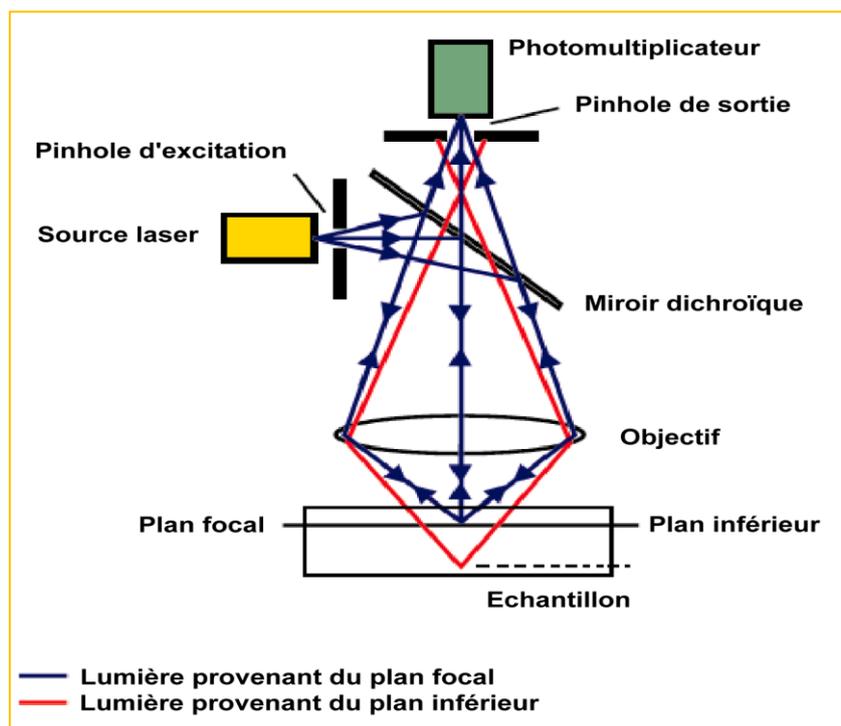


Figure 3.7. Principe de la microscopie confocale [23]

3.3.8 Déflectométrie (Réflexion de franges)

La lumière structurée (franges) est projetée sur un écran, l'analyse des franges réfléchies sur la surface permet d'extraire la pente locale, et par intégration le relief de la surface. Les spécificités de la méthode sont :

- Mesure sur une zone étendue
- Détection de défauts

- Acquisition rapide
- Nécessite de surfaces réfléchissantes

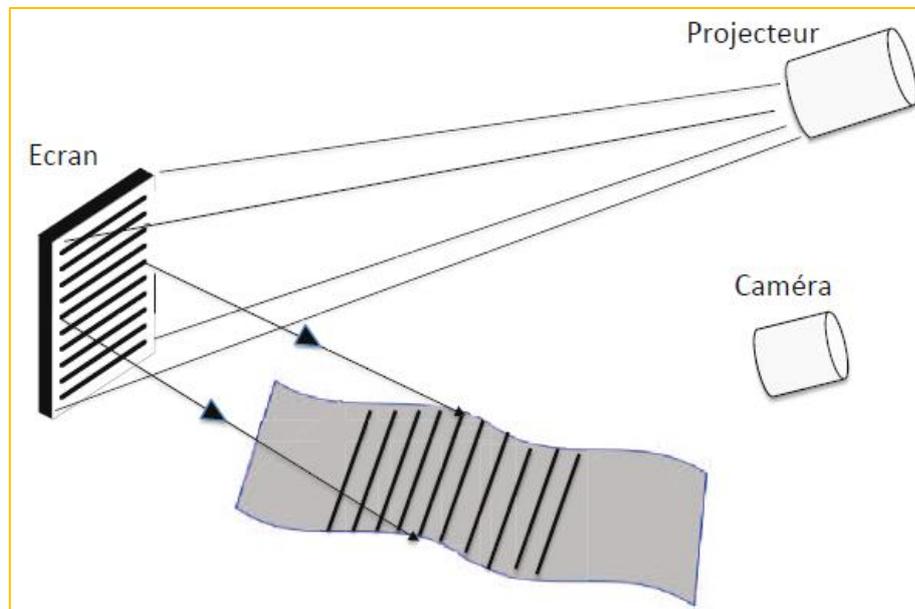


Figure 3.8. Principe de la déflectométrie [53]

3.3. 9 Moiré topographique

3.3. 9.1 Introduction

Le moiré topographique ou contour graphique [67,68] consiste à mesurer la forme d'un objet, sans contact, permettant d'obtenir les coordonnées tridimensionnelles d'un grand nombre de points. Comme il est défini, le moiré est une méthode de mesure qui consiste à exploiter une structure macroscopique (système de franges) obtenue par la superposition de deux ou plus d'une structure microscopique (réseaux). Lorsque les franges de moiré ont suivi les déformations de l'objet à étudier, ces déformations ont évidemment trois composantes dans l'espace δx , δy , δz . En ce moment, il y a deux méthodes pour évaluer ces altérations, dont surgissent les deux configurations les plus exploitées, à savoir, les techniques dans le plan (in-plane techniques) et les techniques hors plan (out-plane techniques). Le nom de chacune décrit clairement son principe. Les techniques dans le plan sont celles qui prennent une mesure sur le même plan en inspection, sur lequel δx et δy , se trouvent, tandis que les techniques hors plan prennent l'information du vecteur perpendiculaire au plan en inspection, c'est-à-dire δz est le déplacement en profondeur « le point vital de la topographie ».

3.3.9.2 Définition

Le moiré topographique [69,70] est une technique de contrôle et de mesure en trois dimensions (3D), à l'aide de laquelle les défauts de formes ont mis en évidence une interférométrie géométrique résultant de la superposition de deux réseaux linéaires, où l'un est utilisé comme réseau de référence (témoin) et l'autre comme réseau test. Afin d'exploiter cette technique pour contrôler les défauts ; il y a trois méthodes principales [45, 71, 72] :

- Le moiré d'ombre.
- Le moiré de projection.
- Le moiré de réflexion.

3.3. 9.3 Moiré d'ombre

3.3. 9.3.1 Principe de la méthode

Le moiré d'ombre aussi appelé « moiré topographique ». Cette méthode est la première application scientifique de la technique de moiré avant 1925 (Mulot). Les travaux dans ce cadre sont réintroduits par de nombreux chercheurs.. Tous ces travaux sont basés sur le principe suivant [73 -76] :

Son principe consiste à superposer un réseau physique de traits (réseau référence) et son ombre projetée sur l'objet étudié (réseau objet) de manière à observer le phénomène de moiré. Le réseau de franges observé correspond aux lignes de niveau de l'objet. Donc l'analyse du phénomène de moiré permet de déterminer le relief de l'objet.

Le schéma de principe du moiré d'ombre est présenté dans la figure 3.9. Il est composé d'une source lumineuse ponctuelle (S lumineuse), d'un système d'observation (O_{bs}) et d'un réseau de traits verticaux de pas Pr placé devant l'objet. Nous pouvons alors bien voir sur le schéma que les ordres de franges de moiré correspondant aux lignes de niveau k du relief de l'objet. Les caractéristiques géométriques du montage du moiré d'ombre sont les suivantes : la distance entre l'objet et la source lumineuse (h_p), la distance entre l'objet et le point d'observation (h_o) et la distance entre la source lumineuse et le point d'observation (d).

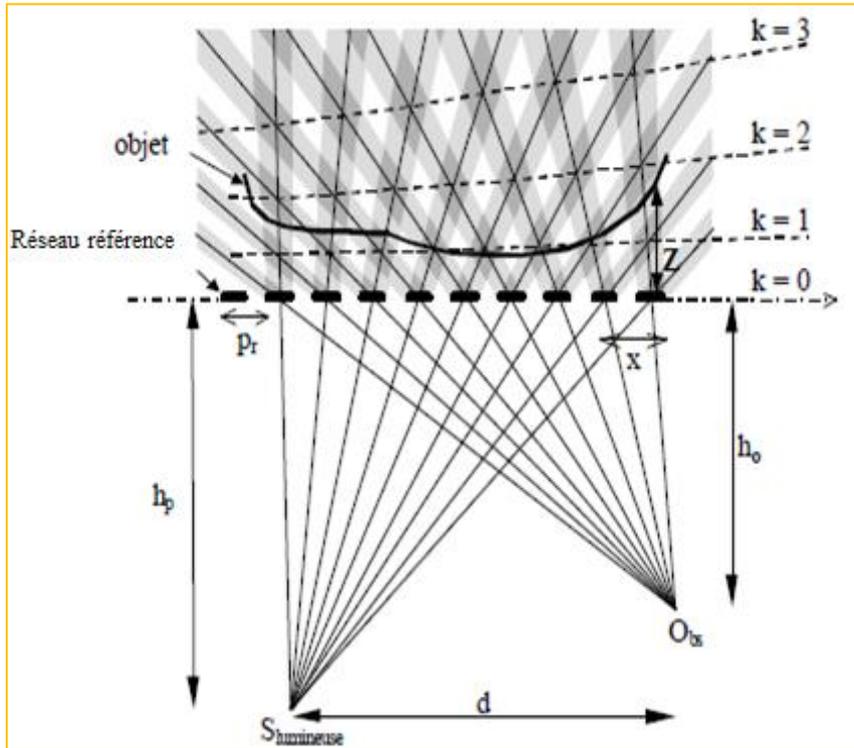


Figure 3.9. Schéma de principe du moiré d'ombre [77]

Le point d'observation du réseau et le point de projection de son ombre sont situés dans l'infinie, dans ce cas, la distance entre le réseau et le point de projection d'ombre est donnée par la formule suivante :

$$Z = \frac{P_r}{\tan\alpha + \tan\beta} \quad (3.1)$$

Où:

P_r : Le pas de réseau.

α : L'angle de projection.

β : L'angle d'observation.

Les conditions d'illumination et d'observation sont générés en 1982, dont les points d'illumination et d'observation de réseau sont localisés dans une distance au fini et de même distance par rapport au plan de réseau (figure 3.10). Dans ce cas, l'équation qui lie le profil de la surface Z_n à la figure de moiré :

$$Z_n = \frac{K_{pr}}{(d - K_{pr})/h_p} \quad (3.2)$$

Où :

K_{pr} : L'ordre de frange.

d : La distance entre la source et le point d'observation.

h_p : La distance entre la source et le plan de réseau.

Si : $d \gg K_{pr}$ et $d/h_p = \tan\alpha + \tan\beta$

$$Z_n = \frac{K_{pr}}{\tan\alpha + \tan\beta} \quad (3.3)$$

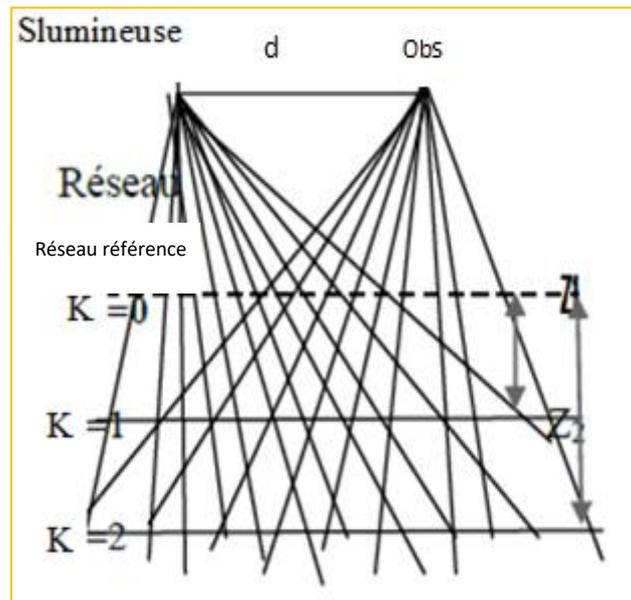


Figure 3.10. Profil de la surface étendue sur des plans parallèles au plan du réseau [77]

Si le point source et le point d'observation (caméra) ne sont pas localisés dans la même distance au plan de réseau, le profil n'étant pas sur des plans mais sur une courbe périodique asymptotique au plan de réseau (figure 3.11).

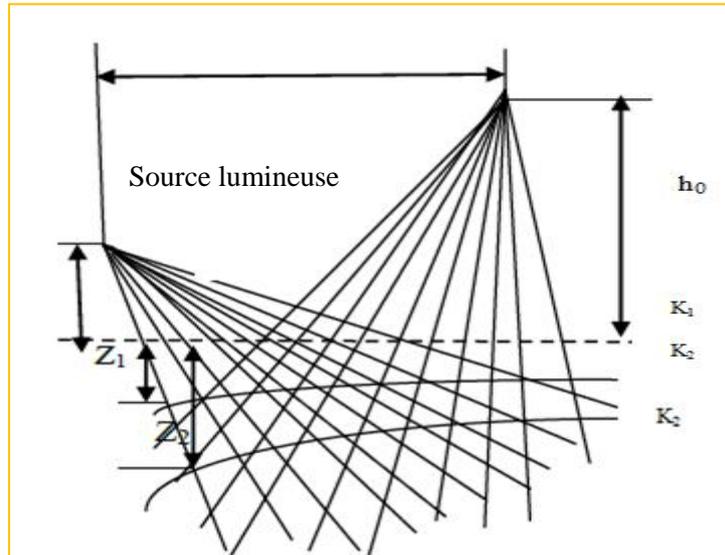


Figure 3.11. Courbes périodiques asymptotique au plan du réseau [77]

Le cas spécial où la distance du réseau à la source ' h_p ' est la même que celle du réseau au point d'observation ' h_o ', loin d'être très aventureuse, est préférable puisque cet arrangement annule l'effet du grossissement occasionné par l'espace Z entre la surface et le réseau référence. Par exemple, si la surface à contrôler est plane, la projection de l'ombre sera agrandie à cause de la divergence de l'ombre dans l'espace et cette erreur peut être éliminée lorsque le réseau de référence et son ombre sont égaux, et cela se produit seulement quand la source et la caméra sont placées à la même distance. L'inégalité provoquée par la divergence de l'ombre est sans aucun doute un effet indésirable du moment qu'il introduit une erreur dans la figure de moiré.

Finalement, certaines considérations pratiques doivent être respectées pour réaliser le montage de moiré d'ombre :

- La source doit posséder le plus possible les propriétés d'une source ponctuelle pour éviter la multiple formation d'ombres.
- La pupille d'observation doit être confinée dans une petite aire.
- Si une des deux, la source ou la pupille d'observation, ne satisfait pas à sa condition ponctuelle, le contraste des franges de moiré tend à diminuer avec ΔZ .

Actuellement, il existe de multiples méthodes de métrologie des objets opaques basées sur la technique de moiré d'ombre, telles que: le décalage de phase, l'utilisation de plaques de

cristaux liquides, l'utilisation de réseaux courbés, la création de patrons électroniques etc. [45].

Le moiré d'ombre permet de mesurer des reliefs ou des déplacements hors plan. La nécessité d'avoir devant l'objet un réseau physique limite cette technique de mesure à des objets de petite taille (de l'ordre de $10 \times 10 \text{ cm}^2$). De plus, si nous utilisons un réseau à 50% (autant de noir que de blanc), le contraste de l'image varie de 0 à 50%. Cela impose que l'objet soit clair et de couleur à peu près uniforme, si l'on veut obtenir de bons résultats expérimentaux. A cela s'ajoutent les deux limitations optiques qui réduisent la capacité de mesure de reliefs. Il est possible d'augmenter cette capacité en prenant un pas de réseau plus grand, mais au détriment de l'exactitude [77].

3.3.9.3.2 Les applications de moiré d'ombre [46] :

Les applications du moiré d'ombre s'orientent essentiellement vers :

- Le diagnostic des maladies qui affectent la conformation du corps,
- Contrôle de qualité dans l'industrie,
- Observation de la boucle des panneaux.

3.3.9.4 Le moiré de projection

3.3.9.4. 1 Définition du moiré de projection

Dans la méthode du moiré de projection, la structure périodique est projetée sur la surface à contrôler pour être mesurée par un projecteur optique. Le système d'observation superpose l'image de réseau projeté sur la surface à contrôler (réseau test); sur un autre réseau appelé le réseau de détection (réseau de référence) situé dans le plan image, et le profil de moiré est formé sur ce plan. Le plan de profil de surface est parallèle au plan de référence si les conditions suivantes sont remplies [72]:

- Les structures projetées et détectées sont des réseaux d'amplitudes linéaires avec une transmittance binaire ou sinusoïdale.
- Les pupilles d'entrée de système sont équidistantes au plan de référence.
- Les axes optiques du système de projection et d'observation sont parallèles.
- Les lignes du réseau utilisé sont parallèles.

- La période de l'image du réseau projeté dans le plan d'observation est égale à la période du réseau de référence.

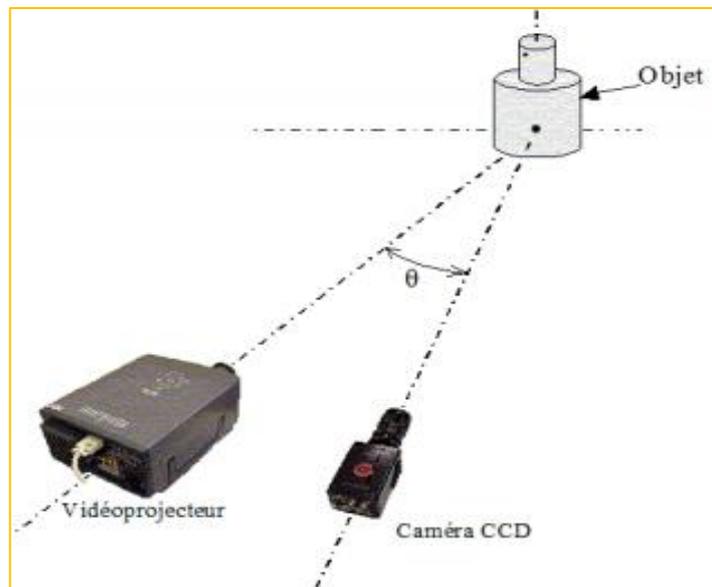


Figure 3.12. Moiré de projection [72]

3.3.9.4.2 Principe de la méthode du moiré de projection

Un réseau de traits parallèles est projeté sur la surface d'objet sous inspection par un vidéoprojecteur [78 -80]. L'analyse de la phase de ce réseau objet permet de déterminer le relief de celui-ci. Un système de rotation permet d'obtenir le relief complet de l'objet. La figure 3.13, explique le principe de la technique ; à l'aide d'un vidéoprojecteur de focale f_p , nous projetons sous un angle α , un réseau de traits parallèles R_1 , de pas P et d'orientation Oy sur l'objet à contrôler. Ainsi, le réseau R_2 (le réseau obtenu sur la surface de l'objet) jaillit avec toute l'information de la surface testée. On fait l'imagerie de ce réseau R_2 , à un angle d'observation, pour produire la superposition de son image R'_2 sur le réseau de détection R_3 . Dans ce cas-là, on obtient le profil de la surface en fonction du patron de moiré qui, dans les conditions adéquates, décrit le contour exact de celle-ci. Le contraste des franges de moiré dépend de la qualité des images R_2 et R'_2 . La définition du réseau projeté décroît lorsque la précision de mesure est augmentée. Puis, de ceci provient un affaiblissement du contraste du système de franges de moiré. Il est aussi possible que les lentilles ne soient pas aptes à transmettre toutes les composantes spectrales du réseau et par conséquent, une réduction de la définition de la figure de moiré obtenue sera engendrée.

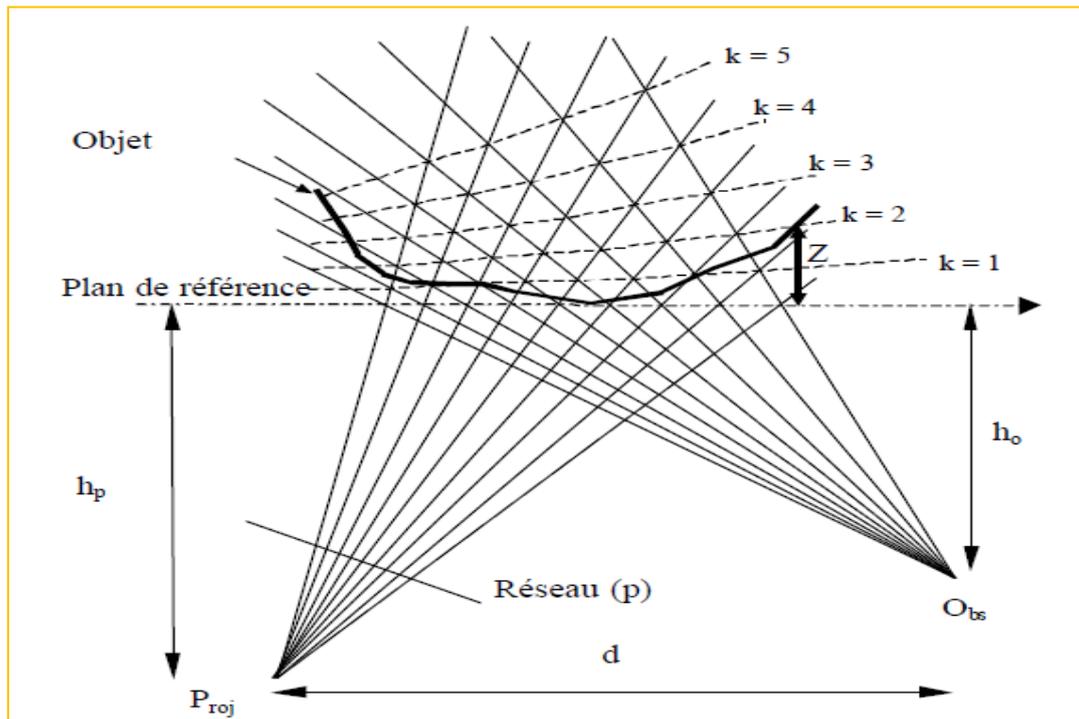


Figure 3.13. Schéma de principe du moiré de projection [77]

3.3.9.4.3 Les applications du moiré de projection [46]

Les applications de la technique de Moiré de projection s'orientent vers :

- Mesure de forme
- Détection des défauts
- Identification des propriétés mécaniques des structures
- Validation de modèles et de codes numériques ;
- Analyse modale expérimentale

3.3.9.5 Le moiré de réflexion

3.3.9.5.1 Définition

Le moiré de réflexion est une méthode typique de l'optique expérimentale pour obtenir les défauts de forme d'une surface réfléchissante [25,81-83], par la production d'un système de franges d'interférences. La méthode est effectivement peut être exploitée dans l'hybride numérique et dans les techniques expérimentales. La technique de moiré de réflexion est décrite par F.K. Ligtenberg 1954, qui consiste à enregistrer sur le même film l'image d'un

réseau réfléchi par l'objet dans deux stades de charge différente. L'une des images est prise dans l'état initial et l'autre est prise après la déformation de l'objet (objet sous une charge).

3.3.9.5.2 Principe de la méthode du moiré de réflexion

La méthode est utilisée uniquement pour des objets avec une surface réfléchissante; [49,84 - 87] un réseau de traits linéaires et de pas constant est projeté sur la surface de l'échantillon qui est disposé à une distance D au support de réseau, et une caméra CCD est placée juste derrière le support réseau. La première exposition est prise à l'état initial de la surface de l'objet, un point de réseau Q est projeté sous un angle sur la surface réfléchissante au point P , et ce point à son tour réfléchit sous le même angle (l'angle de projection est égal à l'angle de réflexion, dans ce cas où la surface est plane) sur une caméra CCD, c.à.d. le point Q sur le réseau est apparu sur le négatif sous forme d'image du point P . Dans la deuxième exposition, au cours de la mise en charge, le modèle se déforme, sa face réfléchissante prend alors une autre courbure (miroir incurvé). Le point P avant la mise en charge est déplacé au point P' dans la nouvelle surface, qui est imagé dans la même position sur le film comme le point P (à cause de petite déflexion). La surface est inclinée, le point P' de la surface correspond au point Q' de réseau (Q' est apparu sous forme d'image de P'). Q' et Q sont imagés sur le même film où la figure de moiré est produite (figure 3.14).

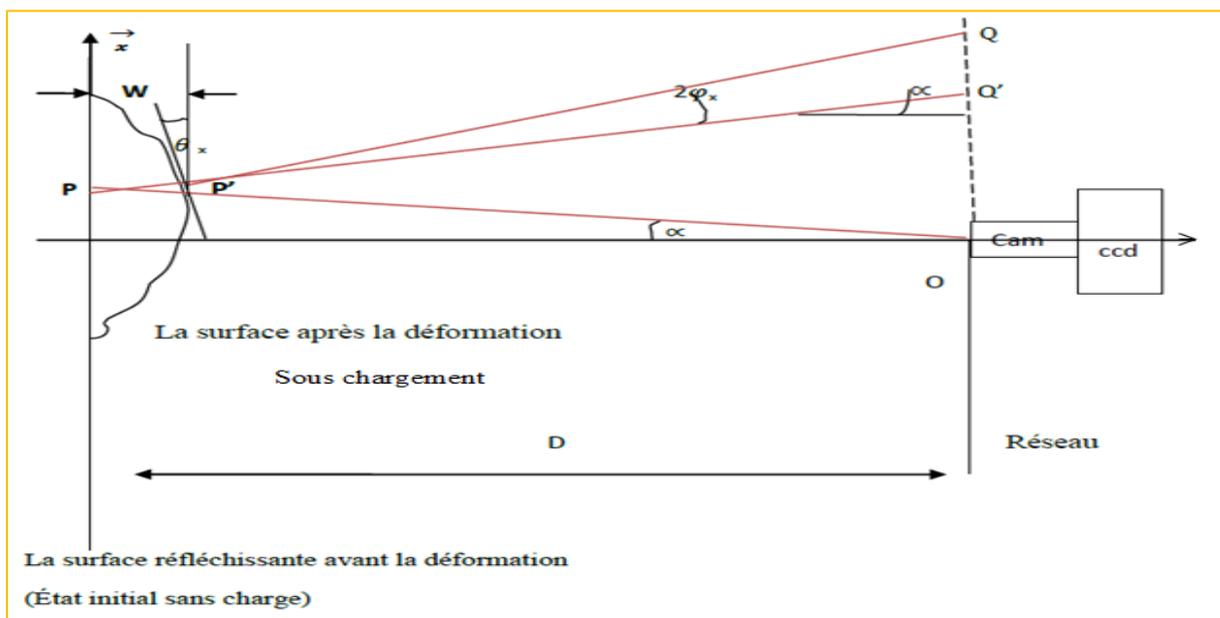


Figure 3. 14. Principe de la méthode de moiré de réflexion

3.3.9.6 Méthode pour améliorer la précision de mesure par le moiré topographique

3.3.9.6.1 Définition

Le moiré topographique est une méthode de mesure tridimensionnelle, son application est aisée mais sa précision n'est pas souvent suffisante. Pour pallier à ce problème, une méthode de mesure tridimensionnelle par modulation de phase est utilisée. Cette méthode, permet d'analyser un réseau de franges souvent rencontré dans les méthodes de mesure optique. Elle transforme ce réseau en un champ de phases. Cette méthode exige plusieurs images d'un même réseau de franges, déphasées les unes par rapport aux autres. Pour cela, nous ajoutons à la phase un déphasage quelconque. La méthode est applicable à différentes formes d'objet et son objectif est dans le contrôle relatif ou absolu de forme, et la méthode peut être utilisée pour tous les types de moiré [52,88 - 91].

3.3.9.6.2 Principe de la méthode

Le principe de la méthode est le suivant : il s'agit de superposer deux réseaux de traits dont l'un des deux est modulé en phase [41] (le réseau à projeter sur la surface à étudier) ce qui nous donne un système de franges modulé (moiré modulé en phase). La mesure de la phase de moiré en chaque point est alors faite de façon similaire à la mesure de phase utilisée en interférométrie holographique [71,72].

3.3.9.6.3 Exemple de calcul

Dans cet exemple expérimental [92], nous prenons trois images du réseau de traits verticaux déphasées d'environ de $2\pi/3$, pour chaque calcul de champ de phases. Ces images sont déterminées par leurs intensités lumineuses en fonction de la position des pixels. Nous obtenons alors un système de trois équations à trois inconnues :

$$I_0(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos (\Phi(x, y))$$

$$I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos (\Phi(x, y) + \Psi_{10}) \quad (3.4)$$

$$I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos (\Phi(x, y) + \Psi_{20})$$

Où :

x et y sont exprimés en mm (correspondant au pixel (i, j)).

A(x, y) : l'intensité

B(x, y) l'amplitude.

Φ (x,y) : la phase contenant l'information qui nous intéresse.

Ψ_{10} et Ψ_{20} : les déphasages ; sont des valeurs constantes. Ils sont réalisés expérimentalement en projetant, avec le vidéoprojecteur, trois images de réseau déphasé. Ces images sont créées numériquement et considérées sans défauts géométriques.

En faisant l'hypothèse que A(x, y) et B(x, y) varient peu sur toute l'image lors de l'introduction des déphasages, On peut déterminer d'après le système d'équations (3. 4) la phase Φ (x, y) par l'équation (3. 5) :

$$\tan\phi(x,y) = \frac{(I_2 - I_1) + ((I_0 - I_2)\cos\Psi_{10} + ((I_1 - I_0)\cos\Psi_{20})}{((I_0 - I_2)\sin\Psi_{10} + ((I_1 - I_0)\sin\Psi_{20})} \quad (3.5)$$

Les valeurs Ψ_{10} et Ψ_{20} sont prises lors de la création des images du réseau.

3.3.9.7 Applications du moiré topographique

Le moiré topographique a divers champs d'applications. En effet le nombre d'application des méthodes de mesure de la topographie de moiré dans l'industrie est en élévation, ces méthodes commencent à jouer un rôle important comme techniques pour l'instrumentation industrielle et autre. Nous citons quelques applications de cette technique :

- Application de la profilométrie de moirée à la reconstruction de profils tridimensionnels de pièces clés dans le domaine ferroviaire. À l'heure actuelle, le moiré profilométrie numérique peut être utilisé dans la détection statique industrielle, et il peut être étendu dans l'avenir à la détection dynamique des roues qui roulent, afin d'améliorer l'efficacité de la détection et de réaliser la détection automatique des trains [93]
- Développements et applications des techniques de moiré pour la mesure de la déformation, la caractérisation de la structure et l'analyse de forme.

En tant que techniques optiques sans contact représentatives, les méthodes de moiré ont été largement utilisées pour visualiser les distributions de déformation des

matériaux, les arrangements de structures et les caractéristiques de forme des objets dans les domaines de la recherche et de l'industrie. Les techniques de moiré sont appliquées à la mesure de la déformation dans le plan et hors plan, à la caractérisation de la structure plane et à l'analyse de la forme tridimensionnelle. Les paramètres de structure périodique plane, les précisions d'alignement, les erreurs de superposition, les défauts ainsi que les distorsions et la sécurité des documents peuvent être détectés avec précision. Les hauteurs ou profondeurs, les formes tridimensionnelles, les profils ou topographies de surface tridimensionnels et la planéité de surface peuvent également être obtenus efficacement. La technique de déphasage et la technique de couleur ont été utilisées pour améliorer la précision de la mesure. Les développements ultérieurs des techniques de moiré sont favorisés par les exigences de mesures de haute précision, à très petite ou grande échelle [94].

- En cristallographie les franges renseignent sur l'alignement des cristaux, et surtout sur les dislocations de cet alignement, par superposition de deux lames très minces de cristaux.
- Le Moiré topographique a été utilisé comme méthode de caractéristiques et application clinique, Depuis 1970, le phénomène de moiré est employé comme méthode de diagnostic clinique dans les analyses topographiques du corps humain. L'objectif de cette étude était de faire une revue de la littérature sur les principales caractéristiques du phénomène de moiré et son utilisation comme méthode topographique pour des applications cliniques, notamment celles liées aux déviations posturales. Une recherche systématique d'articles rédigés en anglais entre 1966 et 2010 a été effectuée selon des critères de sélection préétablis et les études sélectionnées ont fait l'objet d'une analyse de contenu. Les résultats ont montré une évolution de la méthode de topographie Moiré (MT), qui reflète un effort croissant pour améliorer l'exactitude et la précision de la méthode, ainsi que pour faciliter l'interprétation des topogrammes à l'aide de logiciels spécifiques. Les techniques de moiré d'ombre et de projection ont été plus fréquemment utilisées en comparaison avec d'autres techniques. Bien que les applications de moiré topographique incluent : dépistage précoce de scoliose ; la reconstruction non-envahissante de la colonne vertébrale basée sur les topograms; la détection d'autres défauts de forme de la colonne vertébrale (hyperkyphosis, hyperlordosis, dos planaire, gibbosité), évaluation de la surface plantaire de pied [95 96] etc....

Son utilisation comme méthode topographique pour le diagnostic clinique, revient à ses avantages :

- D'être une technique non envahissante, ne comporte pas de rayonnement,
 - Elle n'exige pas d'un professionnel fortement qualifié d'appliquer la méthode,
 - Elle tient compte de l'évaluation rapide d'un grand nombre de période de sujets en peu de temps,
 - C'est une des techniques reproductible et peu coûteuse qui peut substituer l'examen des rayons X.
- En topométrie de précision, il est utilisé pour vérifier si une surface est parfaitement plane ou présente au contraire des cuvettes de profondeur si faible qu'elles sont invisibles, le procédé suivant est employé : à peu près parallèlement à la surface à tester, un réseau de droites parallèles est placé. Au-dessus, une source lumineuse ponctuelle projette l'ombre du réseau sur la surface. En plaçant l'œil près de la source de lumière, la faible parallaxe décale légèrement, par la perspective, le réseau par rapport à son ombre; par conséquent, l'œil de l'observateur verra des franges de moiré qui sont les courbes de niveau de la surface. Si celles-ci sont rectilignes, la surface est parfaitement plane ; mais le moindre défaut de planéité courbera les franges. Un principe analogue est utilisé par les astronomes amateurs qui polissent eux-mêmes le miroir de leur télescope : il s'agit de tester, au cours du polissage, la qualité de la surface, la perfection des franges de moiré indiquant que celle-ci est devenue rigoureusement parabolique. Dans ce cas, le réseau n'est pas superposé par perspective, mais à son image dans le miroir [46].
- Utilisation de la technique de moiré en déflectométrie pour tester des surfaces sphériques et asphériques. Le travail consiste à comparer le test de Ronchi et le Moiré déflectométrie appliquée à un nouveau motif (pattern). Pour ce faire, deux motifs de Ronchi (ronchigrammes typiques) produits par deux règles de Ronchi identiques décalées angulairement et placées à proximité du rayon de courbure d'un miroir. Le résultat obtenu en superposant les deux Ronchigrammes est le nouveau motif, un motif Moiré du Ronchigramme (Moiré-Ronchigramme). Les coefficients polynomiaux d'aberration de Zernike du front d'onde tridimensionnel pour les deux miroirs sont ainsi obtenus. La comparaison des coefficients de Zernike obtenus pour chacune des techniques mentionnées et il est constaté que les résultats avec moins de dispersion sont ceux où la déflectométrie Moiré a été appliquée [97].

- Modèles de moiré à déphasage numérique mono-coup pour la topographie 3D, Une technique simple et robuste de moiré topographique avec capture d'image unique et incorporant un filtrage numérique ainsi qu'une méthode de déphasage numérique en quatre étapes est introduite pour la cartographie de surface tridimensionnelle (3D). Des détails de caractéristiques de l'ordre de dizaines à des centaines de microns peuvent être obtenus en utilisant une lumière structurée générée par interférométrie pour éclairer la surface de l'objet. Par rapport à la méthode de déphasage optique traditionnelle, une méthode de déphasage numérique basée sur le traitement de Fourier est mise en œuvre avec des motifs sinusoïdaux générés par ordinateur dérivés des franges déformées enregistrées. Cela permet une capture unique de l'image qui peut être utilisée pour reconstruire la topographie 3D de la surface. L'imagerie monocoup est simple à mettre en œuvre expérimentalement et évite les erreurs d'introduction des déphasages corrects. La faisabilité de cette technique est vérifiée expérimentalement, et les applications aux surfaces métalliques sont démontrées [98].

3.3.9.8 Conclusion:

Le moiré topographique est une technique de mesure qui peut donner des mesures dans le plan et hors plan pour effectuer cette technique soit en utilisant le moiré d'ombre, le moiré de projection ou le moiré de réflexion. Chaque méthode peut être réalisée soit par la superposition de deux réseaux géométriques (deux réseaux matérialisés) pour donner le moiré géométrique soit par la superposition d'un réseau géométrique et un d'autre obtenu par l'interférence de deux ondes lumineuses ce que nous donne le moiré interférométrique. Soit par la superposition d'un réseau géométrique et d'un réseau holographique appelée le moiré holographique.

Quatrième Chapitre :
Topographie non
destructive des surfaces
par le moiré
interférométrique

4.1 Introduction

La topographie non destructive est une méthode de contrôle qui permet de détecter et localiser des anomalies présentes dans les structures industrielles (pièce, équipement, appareillage...), sans les dégrader ou les détruire. Ces défauts peuvent être créés soit au cours de la production des pièces soit lors de son utilisation. Les techniques de topographie utilisées sont diverses et dépendent de la nature même de la pièce et de la détection envisagée. Pour la topographie des pièces de précisions réfléchissantes ou transparentes, les méthodes d'inspections optiques permettent d'effectuer des contrôles non destructifs et non invasifs ; parmi les plus utilisées, on cite la technique de moiré.

La technique de moiré est une méthode optique de contrôle et de topographie non destructive basée sur le phénomène d'interférence généré par la superposition de deux structures microscopiques en transmission.

Dans la première partie, le travail consiste à utiliser le phénomène de moiré dans un montage optique pour le contrôle des défauts de formes dans différentes surfaces réfléchissantes. L'utilisation des relations mathématiques à partir du montage utilisé pour la quantification des défauts, et calcul de la profondeur d'un défaut capté sur la surface d'un miroir de précision.

La deuxième partie, consiste à développer un montage optique basé le moiré interférométrique pour scanner des composants transparents dans le but de contrôler la qualité du matériau des composants en question. Donc, ce qui revient à détecter des défauts en surface et en volume.

4.2 Objectif de travail

L'objectif principal de ce travail de recherche consiste à mettre au point des montages optiques de détection basée sur la technique de moiré pour la topographie sans contact et non destructive des composants optiques (surface et matériaux) et composants mécaniques pour les surfaces. La topographie optique des surfaces représente un outil très puissant pour surveiller et améliorer la qualité des surfaces fonctionnelles des composants afin de garantir un fonctionnement optimal du point de vue fiabilité et précision. La technique offre la possibilité d'inspecter, détecter, et quantifier des défauts et des changements dans la géométrie de la surface contrôlée. Les défauts de tailles microscopiques ; telle que défauts de forme, empreintes, défauts de planéité, rainures, stries, inhomogénéité, rugosités, contrainte

interne, impuretés, bulles d'air...etc. Ces défauts, peuvent être analysés et mesurés avec une précision dans la gamme micrométrique et submicrométrique.

Le moiré est le leader technique dans la technologie de topographie optique pour la caractérisation des surfaces de précision de dimensions relativement petites et plus importantes avec une résolution dans la gamme nanométrique. Les surfaces à examiner et à contrôler sont réfléchissantes et ou transparentes. Cette technique permet de vérifier la qualité de la surface, sans pour autant la dégrader ou la détruire. Elle permet aussi d'inspecter rapidement des surfaces en temps réel et fournir des résultats sous forme d'images continues du champ d'informations où l'information sur la surface est facilement reconnaissable. La méthode de moiré est une technique d'analyse par voie optique, purement géométrique, non linéaire, simple, stable, économique et visuelle ; obtenue par la superposition de deux structures microscopiques répétitives (réseaux).

Dans notre travail, nous avons exploité la méthode de moiré dans des montages expérimentaux pour le contrôle topographique des surfaces transparentes et réfléchissantes, détecter et déterminer les caractéristiques surfaciques de la pièce contrôlée puis quantifier les erreurs de la surface inspectée.

Le moiré est utilisé dans ce travail afin de déterminer la topographie d'une surface à partir de la répartition des franges de moiré et par conséquent de restituer la forme de l'objet analysé. L'image de moiré est constituée d'un système de franges alternativement brillantes et obscures, La structures des franges suit la forme de l'objet inspecté.

4.3 Principe de la topographie non destructive basée sur le moiré interférométrique

Le moiré topographique est une technique de contrôle et de mesure en trois dimensions (3D), à l'aide de laquelle les défauts de formes sont mis en évidence par une interférence géométrique.

Son principe est basé sur la superposition de deux réseaux linéaires, où l'un est utilisé comme réseau de référence (témoin) et l'autre comme réseau test lié à la surface à contrôler. Cette technique de contrôle s'exploite en trois méthodes principales : Moiré d'ombre, moiré de projection, et moiré de réflexion.

La topographie d'une surface est matérialisée par les franges de moiré de manière à restituer la forme de la surface de l'objet analysé, d'où l'image de moiré qui est constituée d'un système de franges alternativement brillantes et obscures qui décrit la forme de la surface de l'objet. Cependant la structure des franges de moiré varie avec la topographie de la surface inspectée qu'elle soit réfléchissante ou transparente (figure 4.1).

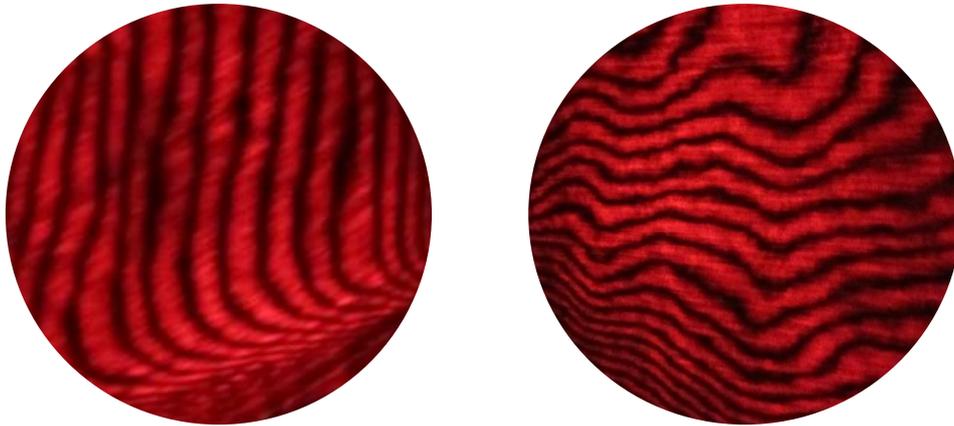


Figure 4.1. Franges de moiré

Dans le travail expérimental, nous nous sommes fixés deux objectifs, en premier la topographie des surfaces réfléchissantes et en second l'inspection de la qualité des composants transparents. Pour la topographie des surfaces réfléchissantes, le montage utilisé est basé sur la combinaison entre le moiré de projection et le moiré de réflexion, qui consiste à projeter l'image du réseau test sur la surface à contrôler, puis la réfléchir et la superposer sur un réseau de référence pour mettre en évidence les imperfections et les déformations auxquelles est sujette cette surface. Tant dis que pour le contrôle des objets transparents, nous avons développé un montage optique basé sur le moiré interférométrique qui travaille par transmission, où l'image du réseau test traverse le matériau du composant transparent, puis elle est superposée sur le plan du réseau de référence ; le système de franges de moiré généré véhicule des informations et renseigne sur la qualité du matériau du composant inspecté.

4.4 Topographie des surfaces des composants réfléchissants

4.4.1 Introduction

Tout composant optique réfléchissant (miroir, lame à face parallèle semi-réfléchissante, ...) met en jeu des surfaces aux interfaces de différents milieux. Ces surfaces, comportent des

défauts surfaciques qui ne sont pas vu à l'œil nu (de forme, d'ondulation, de rugosité...). Les systèmes optiques utilisant un grand nombre de composants souffrent de l'accumulation de ces défauts. Certains domaines d'application nécessitent une qualité particulière de l'état des surfaces optiques.

Dans ce travail, nous présentons une technique non destructive et sans contact pour le contrôle de qualité et d'analyse des surfaces optiques réfléchissantes, dont les dimensions varient de quelques mm² à des tailles plus importantes.

Deux étapes complémentaires permettant le contrôle des surfaces réfléchissantes. La première étape est basée sur la projection de la lumière sous forme de réseau linéaire en transmission sur la surface réfléchissante à contrôler. Elle permet de détecter les défauts de forme, la courbure et la rugosité (quel que soit leur taille). Une surface réfléchissante sans défaut donne une figure des franges qui sont des lignes droites, parallèles et équidistantes. Mais sur une surface qui comporte des défauts, les franges subissent des déformations dans leurs structures. La deuxième étape est basée sur le traitement numérique, cette technique est basée sur la comparaison entre des images sans défauts (comme pièce étalon) et d'autres avec défauts.

Les deux étapes sont particulièrement bien adaptées pour la qualification et la quantification des erreurs sur des surfaces optiques réfléchissantes. A cet effet nous allons décrire dans ce qui suit, le montage optique utilisé pour la topographie des surfaces.

4.4.2 Montage optique de contrôle des surfaces des composants réfléchissants

Pour contrôler des surfaces réfléchissantes nous avons utilisé le montage selon la figure 4.2. Dans ce montage le faisceau Laser He-Ne (30mW) est élargi par le système de lentilles (L_1 et L_2) passe par le diaphragme D_1 utiliser pour éliminer les rayons parasites. En traversant le réseau linéaire en transmission R_1 , le faisceau est diffracté en un ensemble de rayons divergents, passent à travers la séparatrice pour arriver sur la lentille L_3 , ou il subit la première transformée de Fourier pour générer en son plan focal le spectre de diffraction. La lentille L_4 , réalise la transformée inverse pour projeter l'image du réseau R_1 sur la surface à inspectée (ici nous avons utilisé un miroir plan M de qualité optique). L'image du réseau R_1 est réfléchié par le miroir, passe à travers lentilles convergentes (L_3 et L_4) ; puis réfléchié par la séparatrice L_c sur le plan du réseau R_2 . Ce deuxième réseau de référence R_2 est de même nature et même fréquence spatiale que le réseau linéaire en transmission R_1 et il est décalé angulairement dans son plan d'un angle θ (avec $\theta \sim 0^\circ$). Il y a génération des franges de moiré sur le plan du réseau R_2 , qui sont projetées à l'aide du système de lentilles convergentes (L_5 et

L₆) sur le plan d'observation PO, après avoir traversé le filtre spatial FS. Les franges de moiré sur le plan d'observation sont des lignes droites parallèles alternativement brillantes et obscures. Sur le plan d'observation est placée une caméra CCD pour l'acquisition des données et les transmettre vers l'ordinateur pour le traitement des données

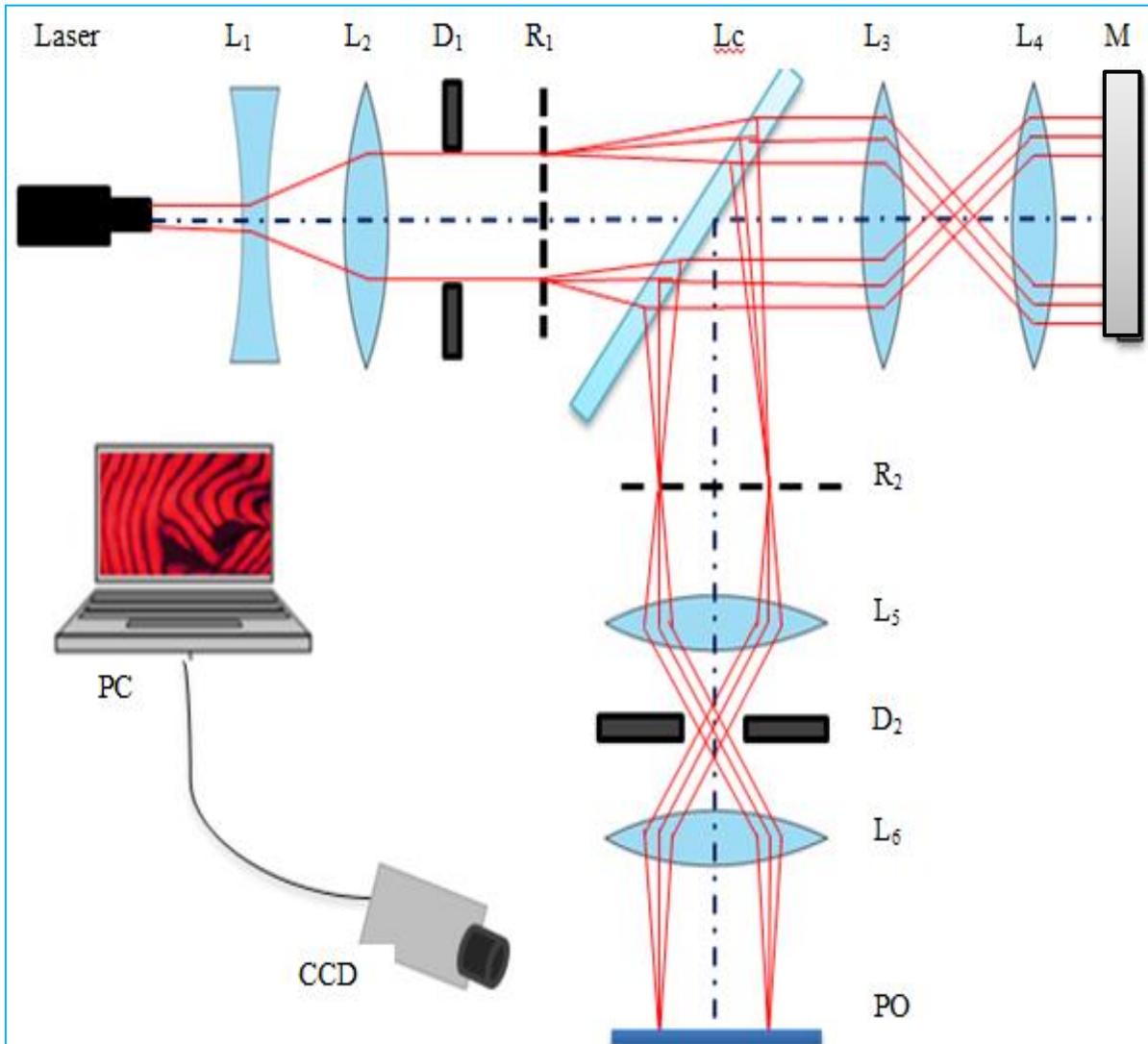


Figure 4.2. Principe optique du montage expérimental pour le contrôle des surfaces réfléchissantes



Figure 4.3. Montage expérimental pour la topographie des surfaces réfléchissantes

4.4.2.1 Principe de détection des défauts

Le faisceau Laser projette l'image du réseau test R_1 sur le miroir plan M (miroir de référence dont le défaut de planéité est inférieur à $\lambda/4$). Les lignes de l'image de réseau palpent optiquement la surface, s'imprègnent des caractéristiques géométriques de la surface contrôlée, puis elle est réfléchi, passe par les lentilles convergentes L_4 et L_3 , réfléchi une seconde fois par la séparatrice L_c pour être projetée sur le plan du réseau référence R_2 avec un grossissement de 1/1. Les franges de moiré apparaissent sur le plan du réseau R_2 et sont projetées à l'aide des lentilles L_5 et L_6 sur le plan d'observation avec le grandissement désiré. Les images parasites sont supprimées à l'aide du diaphragme D_2 situé entre les deux lentilles L_5 et L_6 .

Dans le cas où le miroir optique palpé ne présente pas défauts de forme ou de planéité (soit : la surface est sans défauts ou le montage est insensible aux défauts que comporte le miroir); dans ce cas ; les frange de moiré sont des lignes droites, parallèles et équidistantes alternativement brillantes et sombres, figure 4.4a.

Si la surface à contrôler présente des défauts et détectées par le système, alors les lignes de l'image virtuelle du réseau test R_1 suivent la topographie de l'objet. Toutes déformations dans la forme de l'objet, provoque des déformations dans la structure du réseau virtuelle. La

superposition de l'image du réseau virtuel R'_1 sur le réseau témoin R_2 , génère une structure de franges de moiré qui comporte des variations dans sa structure figure 4.4b. Ces variations dans la structure des franges révèlent la topographie réelle de l'objet inspecté. Ici le palpé de la surface se fait optiquement par la projection de l'image de la structure microscopique sur la surface inspectée. Le contrôle se fait sur toute la surface (un contrôle de champ, contrairement au contrôle suivant une ligne, et le contrôle se fait en temps réel

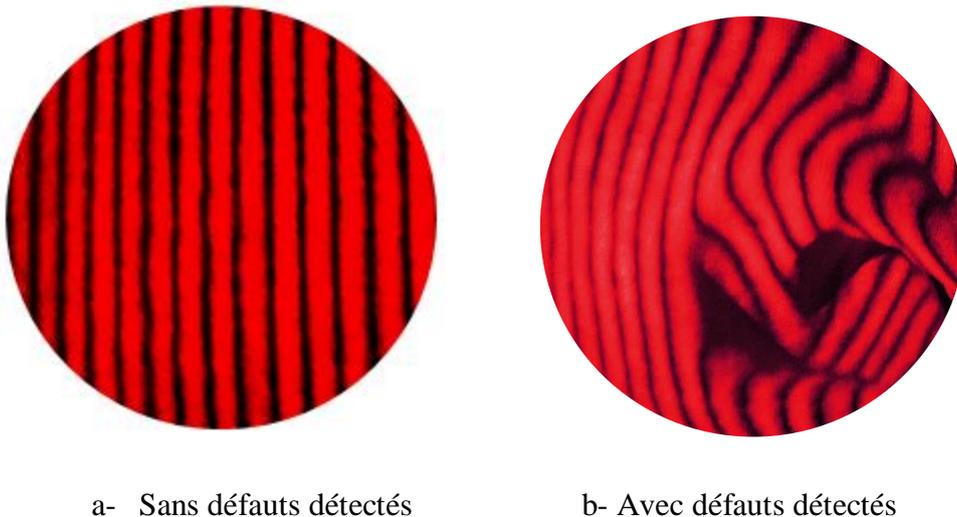


Figure 4.4. Franges de moiré sur le plan d'observation

4.4.2.2 Sensibilité et résolution de détection de la technique

Si la surface inspectée présente des défauts, le réseau virtuel test, palpe la surface, s'imprègne des informations relatives à sa topographie et les véhicule avec lui. Une fois l'image du réseau R_1 superposée sur le réseau référence R_2 il y a apparition d'une structure macroscopique sur le plan du réseau de référence R_2 matérialisée par la variation de la structure des franges de moiré, cette modification dans la structure des franges de moiré, comportent les détails macroscopiques concernant les défauts microscopiques détectés sur la surface. Les franges de moiré, générées sur le plan du réseau R_2 sont projetées par le système optique sur le plan d'observation avec le grandissement désiré.

Il arrive que les défauts aient des grandeurs relativement faibles, la technique de moiré ne peut les mettre en évidence, alors on parle de sensibilité insuffisante du phénomène de moiré. Dans ce cas il faut accroître la résolution de détection, soit par une augmentation de la

fréquence spatiale des réseaux utilisés, soit par la technique de filtrage spatiale basée sur la technique de multiplication de franges.

4.4.3 Topographie de la qualité de surfaces des différents composants réfléchissants

Le montage de la figure 4.2 est utilisé pour la topographie de la qualité surfacique des objets ayant des surfaces réfléchissantes ou relativement réfléchissantes ; ce qui est traité dans ce qui suit.

4.4.3.1 Miroir optique plan

Comme premier échantillon, nous avons utilisé un miroir plan de qualité optique pour déterminer la topographie de sa surface, du point de vue planéité. Pour la topographie de la qualité surfacique du miroir optique plan nous avons utilisés un réseau linéaire en transmission R_1 de fréquence spatiale 100tr/mm (soit un pas de 0.01mm). La structure microscopique virtuelle du réseau constitué de lignes parallèles et équidistantes palpe, la surface du miroir, (l'image du réseau épouse intégralement la forme de la surface du miroir), s'imprègne de sa topographie. L'image est réfléchi par le miroir, le faisceau lumineux fait le chemin inverse, pour superposer l'image du réseau R_1 sur le plan du réseau R_2 , identique au réseau test R_1 . Le réseau R_2 est tourné dans son plan d'un angle θ (avec $\theta \sim 0^\circ$). Il y a génération des franges de moiré sur le plan du réseau R_2 . Le système de frange de moiré est projeté sur le plan d'observation à l'aide des deux lentilles L_5 , et L_6 . Le système de franges projeté sur le plan d'observation est constitué de lignes droites parallèles est équidistantes, figure 4.5.



Figure 4.5. Figure de moiré du miroir optique plan

Dans une deuxième expérience, nous avons utilisés un miroir optique plan, mais qui comporte un défaut. Dans ce cas la figure de moiré est constituée de franges qui présentent une variation dans la structure figure 4.6 ; cette variation matérialise le défaut présent sur la surface du miroir.

D'après les défauts présentés dans les images de la figure 4.6 (a, b, c et d), nous constatons que la forme des franges nous donne des informations sur le défaut suivant les trois coordonnées c'est-à-dire, défauts en trois dimensions 3D. Le nombre de franges déviées donne la quantification de défaut suivant la coordonnée X, la longueur de déviation est donnée selon la coordonnée Y et la profondeur de défaut est donné par l'axe Z.

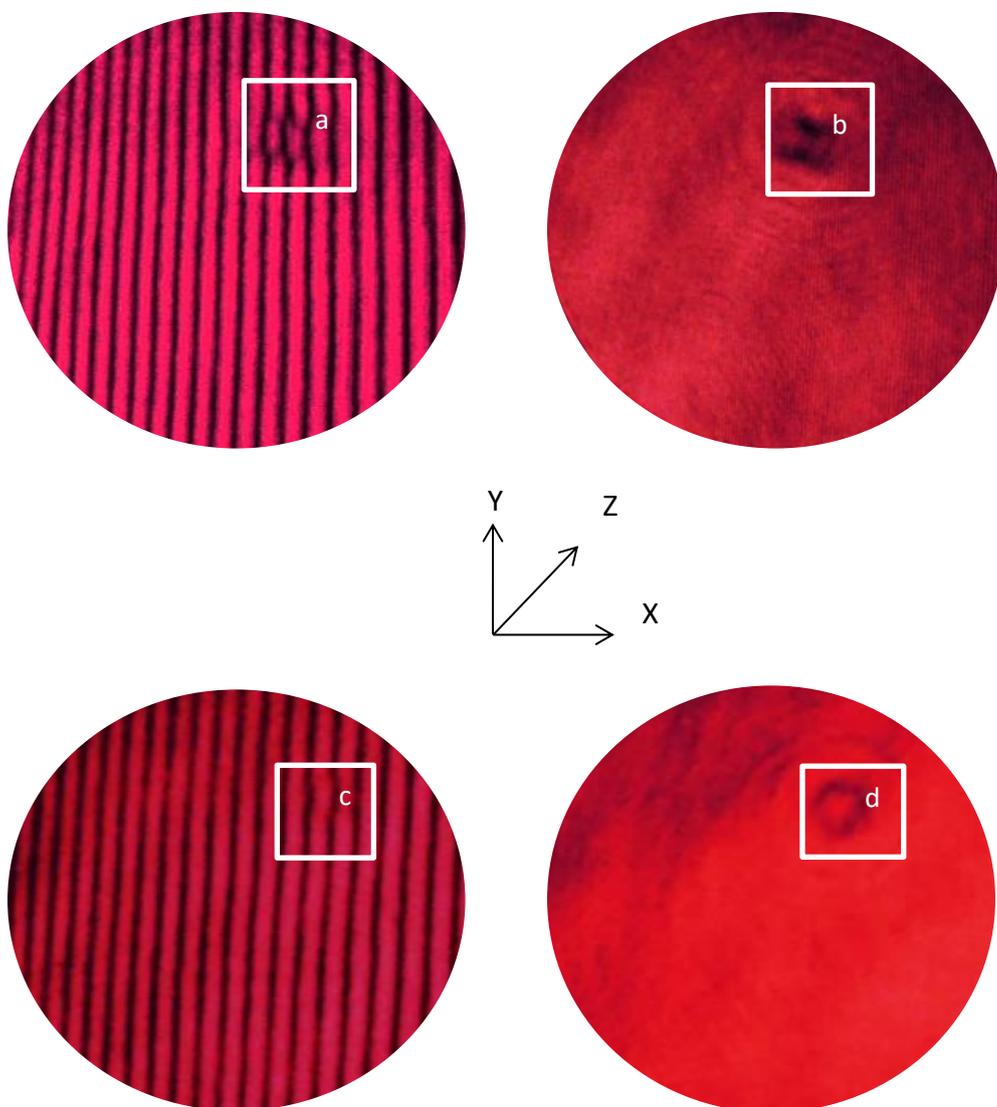


Figure 4.6. Défauts sur surface du miroir optique plan

4.4.3.2 Miroir ordinaire

A titre de comparaison, selon la référence 46, le miroir optique plan substitué par un miroir ordinaire.

La configuration des franges de moiré n'est plus la même, les franges ne sont plus des droites parallèles équidistantes, mais beaucoup plus des lignes courbes ; ce qui montre que la surface du miroir présente des défauts de planéité. Plusieurs régions du miroir ont été palpées, et les différentes images montrent les différences dans la topographie du miroir, ce qui est illustré par la figure 4.7.

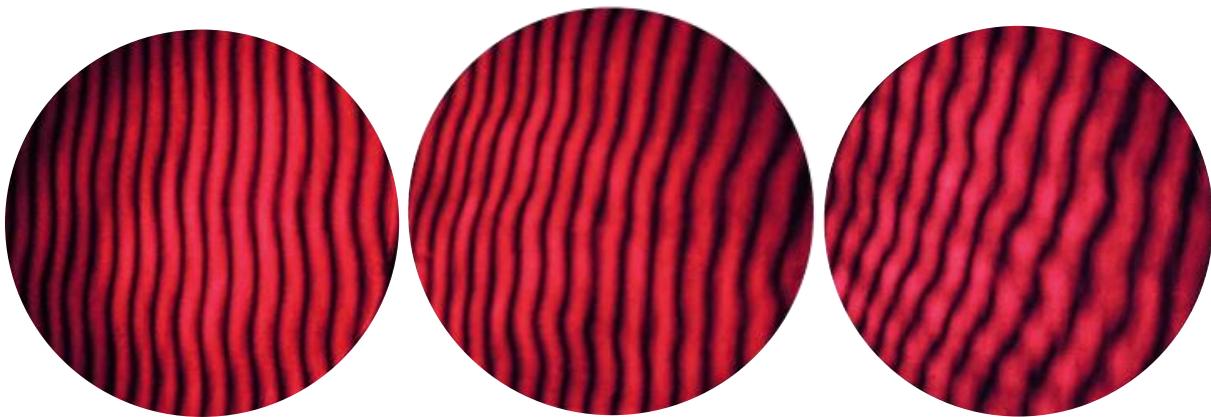


Figure 4.7. Topographies de surface d'un miroir ordinaire [46]

4.4.3.3 Spatule en acier inoxydable

La figure de moiré ci-dessous donne des informations sur la qualité de la surface d'une spatule en acier inoxydable réfléchissante. La forme des franges de la figure 4.8, montre que la spatule possède une surface rugueuse qui réduit sa réflexion. Les zones a et b indiquent que la surface de la spatule comporte des endroits qui ne sont pas plans. Nous en concluons que la planéité et la réflexion de la surface de la spatule ne sont pas uniformes ; Malgré qu'elle apparaisse plane à l'œil nu, et que sa réflexion est uniforme.

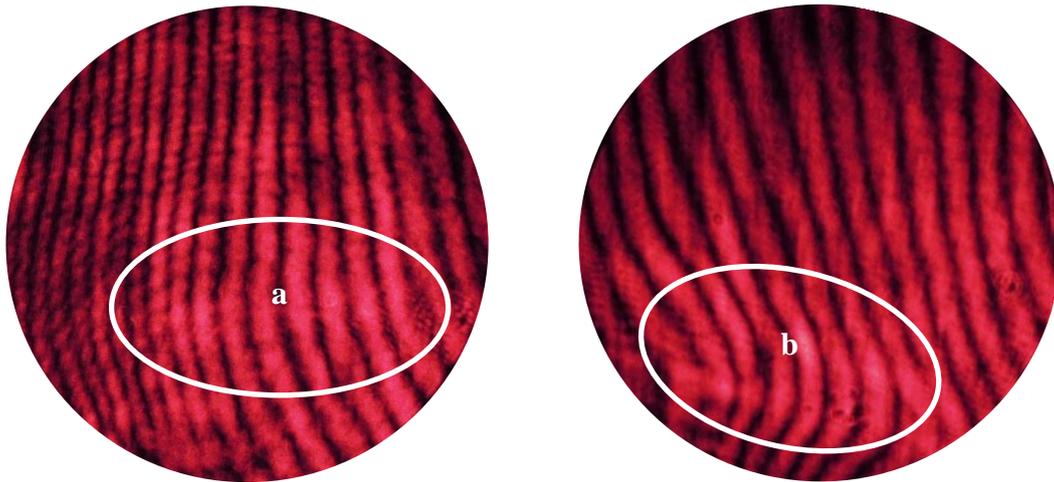


Figure 4.8. Topographie de surface de la spatule

4.4.3.4 La plaque en acier inoxydable réfléchissante

La figure 4.9 représente la topographie de la surface inspectée ; la forme des franges de moiré montre que la surface palpée est rugueuse et comporte des défauts de forme, sur la zone A ; de même, la réflexion de l'échantillon n'est pas uniforme ce qui est montré que la luminosité des franges brillantes n'est pas uniforme le long de la frange (zone B). La surface n'est pas parfaitement plane comme décrit par la zone C. Le balayage de la même surface donne des images différentes ce qui explique que l'état de surface de l'objet contrôlé n'est pas uniforme.

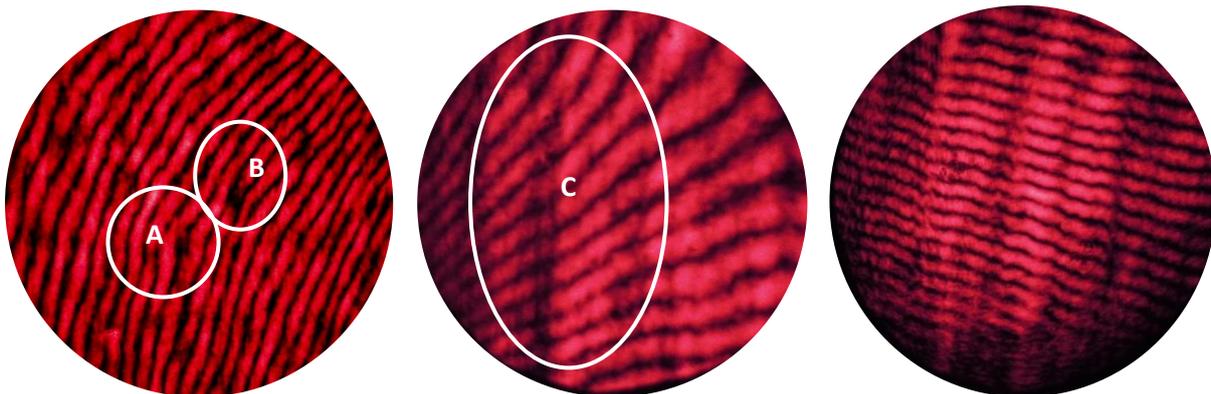


Figure 4.9. Topographie de surface de la plaque en acier inoxydable

4.4.3.5 Etude comparative de la topographie entre les composants réfléchissants

4.4.3.5.1 Miroir optique et miroir ordinaire

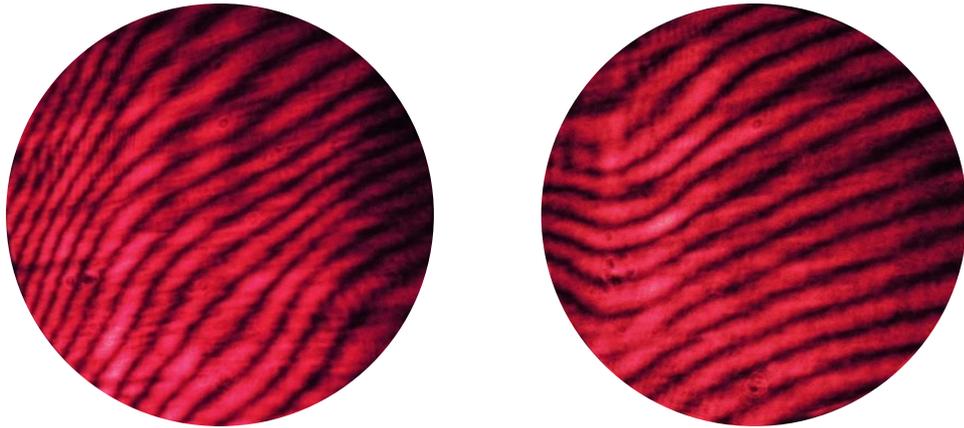
La figure 4.6 et la figure 4.7 montrent les franges de moiré correspondantes respectivement à la surface du miroir optique et celle du miroir ordinaire. Les franges de moiré du miroir optique sont des lignes droites parallèles et équidistantes comportant deux petites déviations correspondantes aux zones de défauts. Par contre, les franges de moiré du miroir ordinaire sont des lignes qui présentent des déviations importantes, de même que la forme des franges. Ceci s'explique par le fait que le miroir optique a une surface de meilleure qualité comparativement à celle du miroir ordinaire. Cette différence dans la topographie des deux échantillons est mise en évidence par le montage de détection.

4.4.3.5.2 Miroir optique et spatule

Pour comparer la surface de la spatule et du miroir optique sans défaut, on a balayé la surface de chaque composant dans les mêmes conditions (même angle entre le réseau test et le réseau référence, utilisé les mêmes réseaux, la même taille de surface inspectée, et le même grossissement d'image sur le plan d'observation). La topographie du miroir optique de la figure 4.10a montre que les franges de moiré ont une forme uniforme. Les franges sont des lignes droites, parallèles et équidistantes alternativement claires et sombres. Mais pour la spatule, des franges représentées sous formes de courbes et de formes aléatoires avec des déviations et des irrégularités selon la figure 4.10b ce qui montre la différence dans la qualité des surfaces des deux échantillons.



a- Franges de moiré du miroir optique



b- Franges de moiré de la spatule

Figure 4.10. Topographie de surface du miroir optique et de la spatule dans les mêmes conditions

4.4.3.5.3 Miroir optique et la plaque en acier inoxydable

Pour comparer la qualité surfacique de la plaque réfléchissante et le miroir optique, on a balayé les surfaces de deux composants dans les mêmes conditions et on a pris les images de plusieurs surfaces de chaque composant. La figure 4.11a montre que les franges de moiré du miroir optique ont la même forme sur toute la surface contrôlée ou les franges de moiré sont des lignes droites parallèles équidistantes alternativement brillantes et sombres. Mais pour la plaque réfléchissante, les franges comportent des déviations et des irrégularités et la forme des franges change avec la surface balayée (figure 4.11b) ce qui explique que la plaque a une surface dont la forme est irrégulière.



a- Franges de moiré du miroir optique



b- Franges de moiré de la plaque en acier inoxydable réfléchissante

Figure 4.11. Topographie de surface du miroir optique et de la surface de la plaque en acier inoxydable dans les mêmes conditions

4.4.4 Capacités du montage à détecter les défauts

4.4.4.1 Détection des défauts de mêmes tailles créés sur la surface d'une plaque réfléchissante en acier inoxydable

Le dispositif optique de la figure 4.2 a été utilisé pour le contrôle topographique de la surface d'une plaque réfléchissante en acier inoxydable.

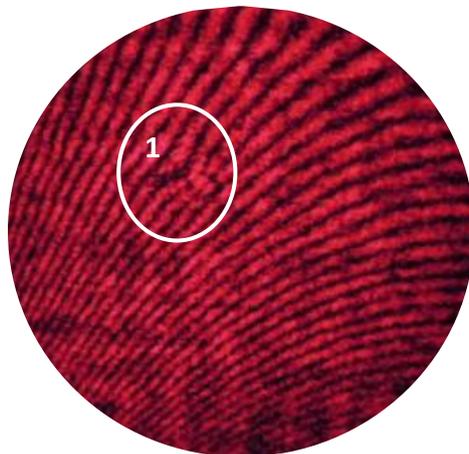
Dans cette expérience nous avons contrôlé la surface de l'échantillon puis nous avons créé des défauts de même taille sur des endroits différents.

La figure 4.12, présente la figure de moiré de plusieurs états, avant et après création des défauts. Dans la figure 4.12a, les figures de moiré présentent des altérations et des déformations, ce qui montre que : la surface n'est pas plane parfaitement et elle comporte des défauts de forme, la luminosité des franges claires pas uniforme le long de la frange ce qui s'est expliqué par la rugosité de la surface (la réflexion n'est pas uniforme sur la surface palpée). Dans la figure 4.12.b, un défaut est créé, et mis en évidence par les franges de moiré (1).

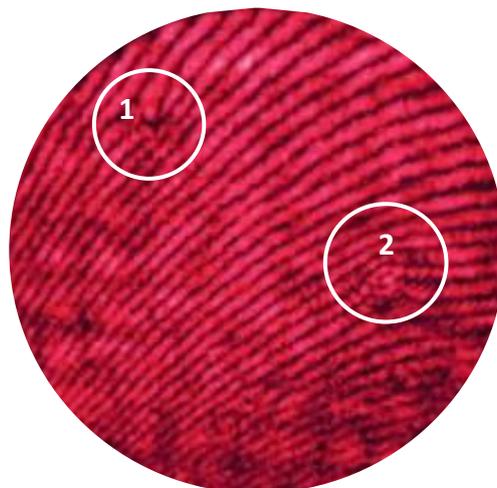
Dans la figure 4.12c et la figure 4.12d, deux défauts (2) et (3) sont créés sur la plaque, est à chaque fois le système détecte les défauts générés.



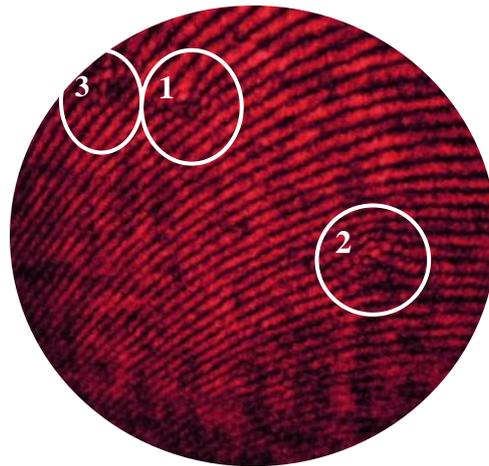
a- Avant de créer le défaut



b- Avec un défaut créé



c- Avec deux défauts créés



d- Avec trois défauts créés

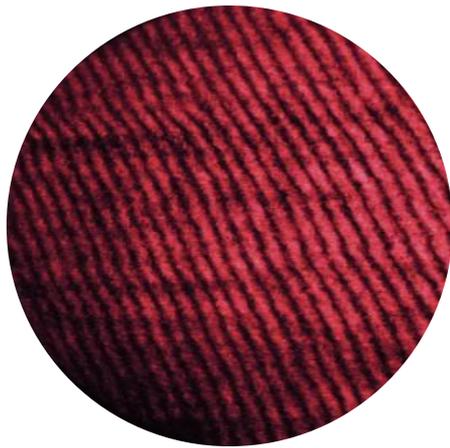
Figure 4.12. Détection de défauts générés sur la plaque réfléchissante en acier inoxydable

4.4.4.2 Détection des empreintes créées par l'indenteur Vickers

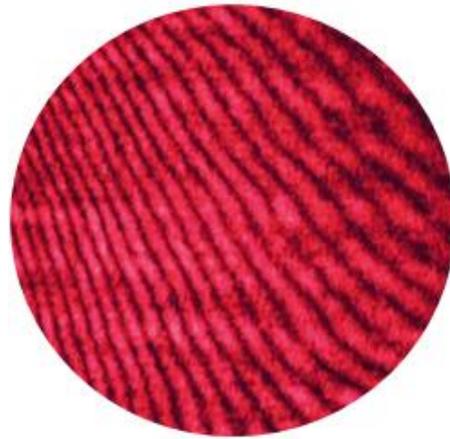
Nous avons utilisé le même dispositif de la figure 4.2 pour détecter des empreintes créées à l'aide de l'indenteur Vickers sur la surface d'une réfléchissante en acier inoxydable. La figure 4.13a, représente la surface sans traitement, nous remarquons que la luminosité des franges de moiré est faible ce qui montre que le taux de réflexion de la surface contrôlée n'est pas suffisant. Pour remédier à ce problème, nous avons déposé une couche mince réfléchissante, la figure 4.13b, montre une meilleure brillance des franges dues à l'amélioration de la réflexion.

Pour connaître l'effet de la charge appliquée sur la taille de l'empreinte créée par l'indenteur Vickers en utilisant la méthode de moiré, la surface de la plaque métallique réfléchissante a été indentée après le dépôt de la couche mince par deux charges différentes.

La figure 4.14a, et la figure 4.14c, montrent les formes et les tailles des empreintes indentées par deux charges différentes 0.2Kgf et 0.3Kgf respectivement. La figure 4.14b et la figure 4.14d montrent les franges de moiré de chaque empreinte. D'après les images de la figure 4.14a, et la figure 4.14c, la taille de l'empreinte est agrandie avec la charge appliquée, ce qui est révélé par une déviation des franges de moiré plus importante. Le défaut mis en évidence par les franges de moiré de la figure 4.14d est plus grand que celui de la figure 4.14b ; ce qui prouve que la technique de contrôle utilisée est fiable.

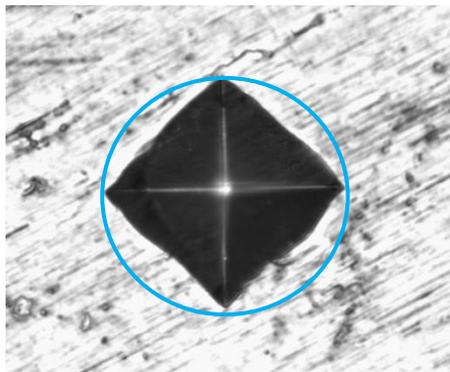


a- Avant le dépôt de la couche mince

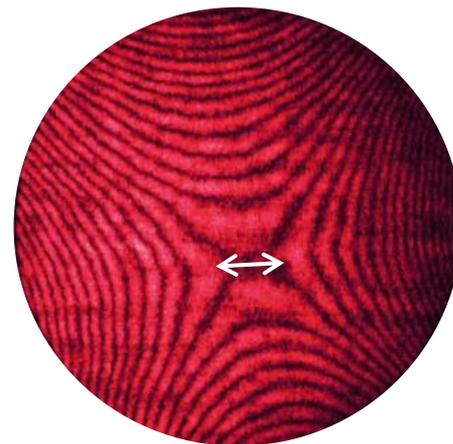


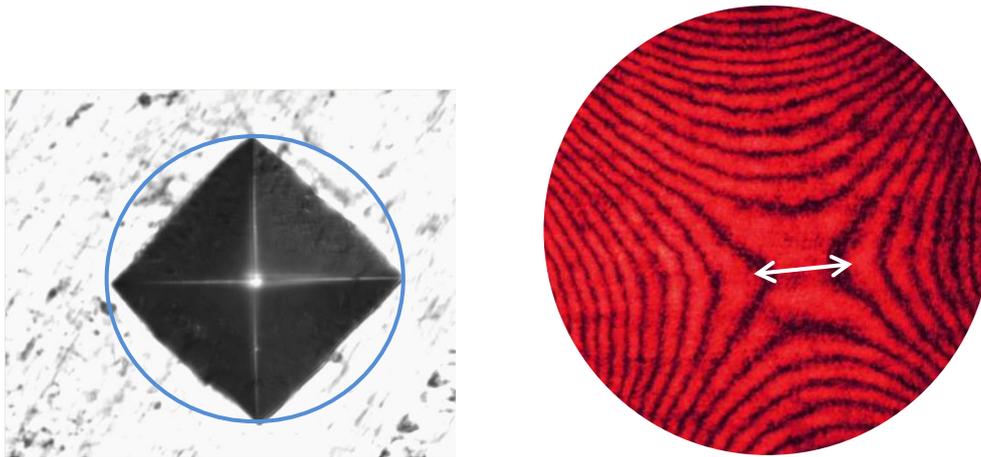
b- Après le dépôt de la couche mince

Figure 4.13. Figures de moiré de la surface de la plaque avant indentation



a- Franges de moiré matérialisant la taille de l'empreinte. b- L'empreinte créée avec la charge 0.2 KgF





c- Franges de moiré matérialisant la taille de l'empreinte. d- L'empreinte créée avec la charge 0.3 Kgf

Figure 4.14. Images des empreintes créées par deux charges différentes

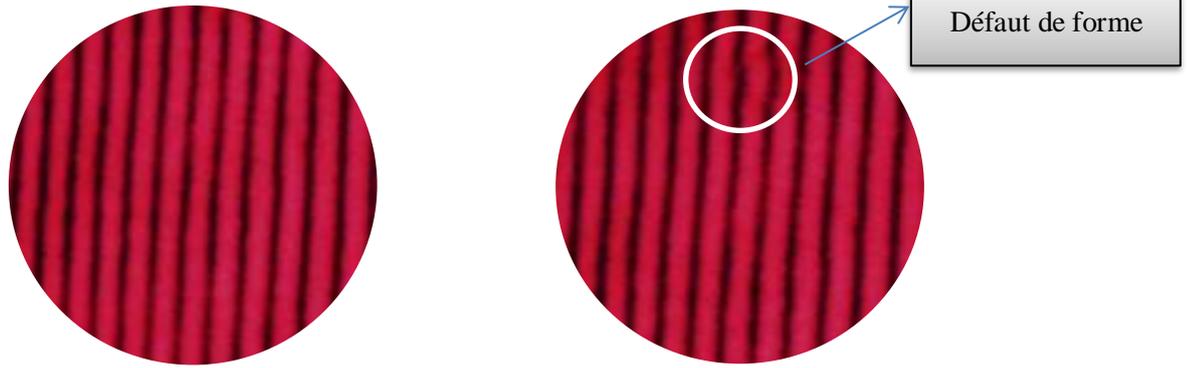
4.4.5 Les facteurs influençant la qualité des franges de moiré

4.4.5.1 Les défauts surfaciques

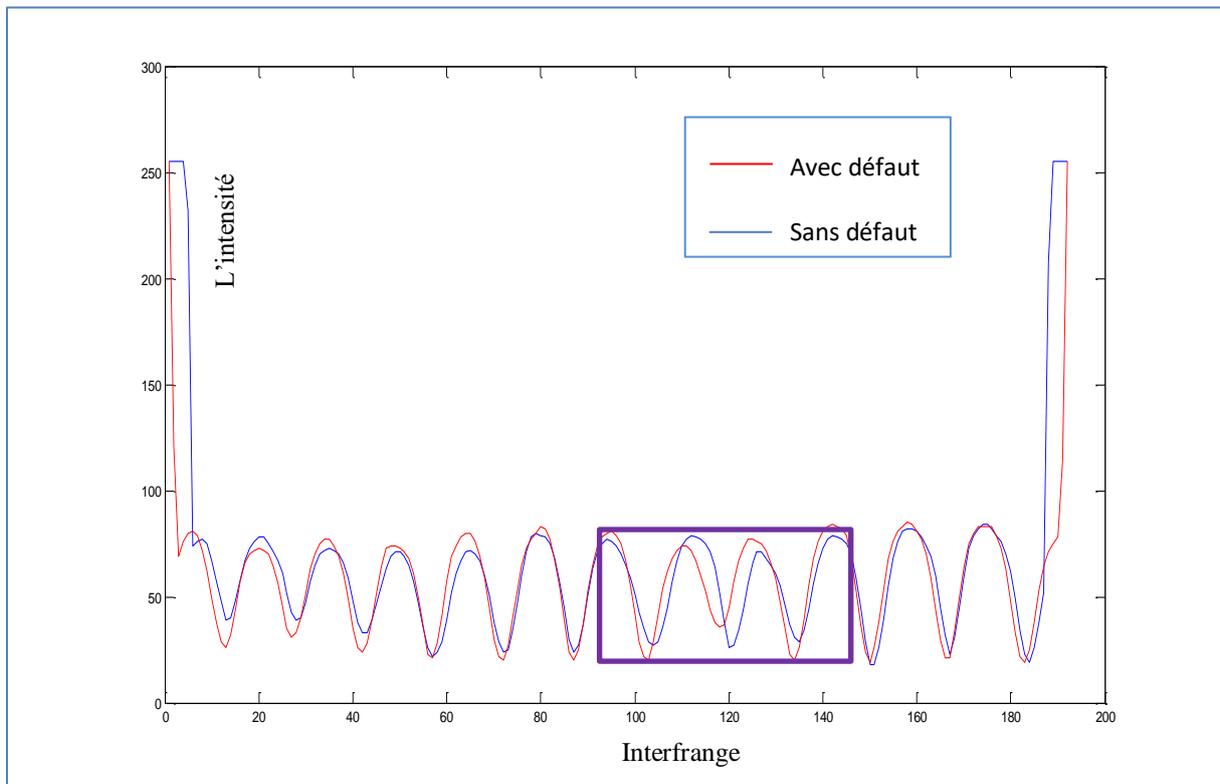
4.4.5.1.1 Les défauts de forme

Le réseau test palpe la surface réfléchissante sous inspection et les lignes de ce réseau s'emprennent de la géométrie de cette surface. Dans le cas de surface sans défaut, les franges de moiré sont des lignes droites parallèles et équidistantes, figure 4.15a. Toute modification dans la géométrie de lignes de ce réseau est matérialisée par les franges de moiré, on obtient des lignes droites parallèles équidistantes avec des déviations dans la zone de défaut (figure 4.15b).

La figure 4.15c. présente les courbes d'intensité et d'interfrange de l'image de moiré de l'échantillon avec et sans défaut de forme. Les courbes de cette figure montrent que l'intensité lumineuse des franges de moiré est environ de 75 pour les deux courbes avec et sans défaut de forme. Dans la zone encadrée, l'intensité lumineuse des franges claires est inférieure de 75 pour les franges de moiré avec défaut (la courbe bleue), l'intensité est réduite sous l'effet de déformation. On remarque que l'interfrange est identique pour les deux cas sauf dans la zone de déformation où le pas des franges n'est pas constant. Le pas des franges a changé suivant la forme de la déformation.



Franges de moiré : a- Sans défaut de forme b- avec un défaut de forme



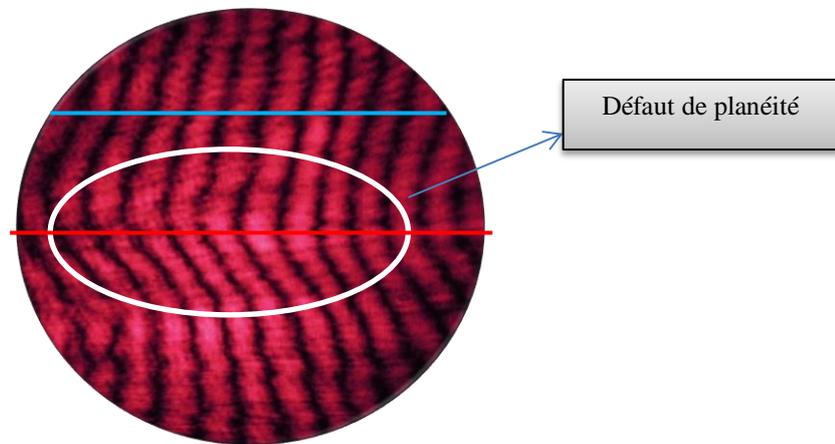
c- Courbes d'intensité des franges et d'interfrange

Figure 4.15. Images matérialisant le défaut de forme sur une surface réfléchissante

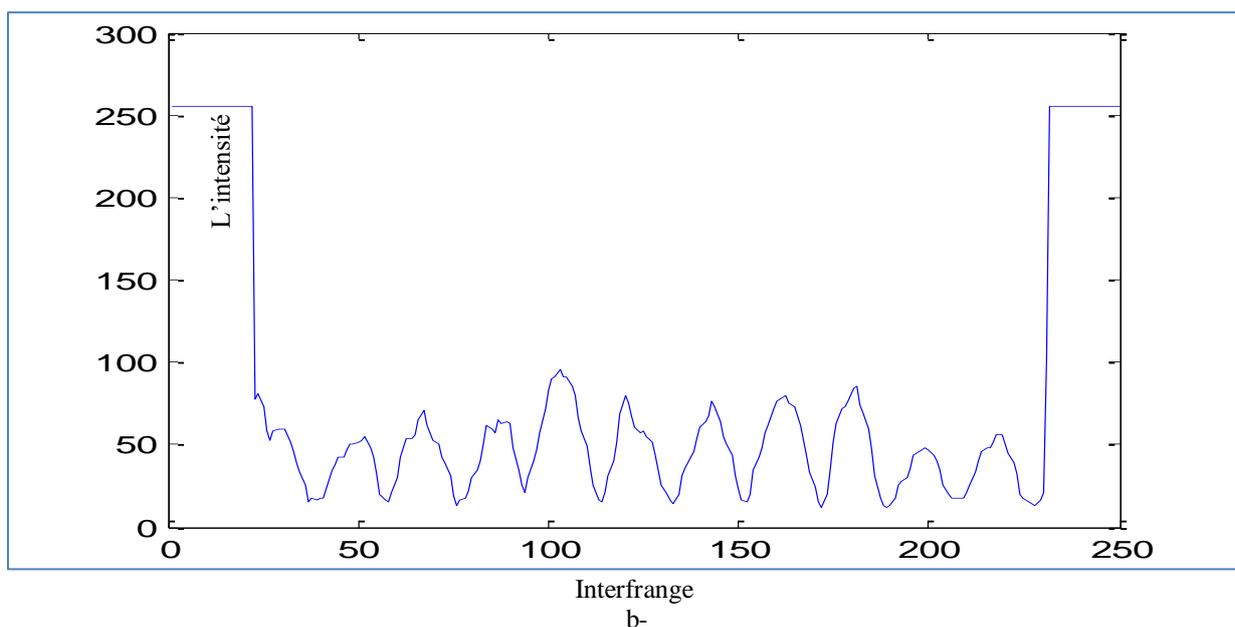
4.4.5.1.2 Défaut de planéité

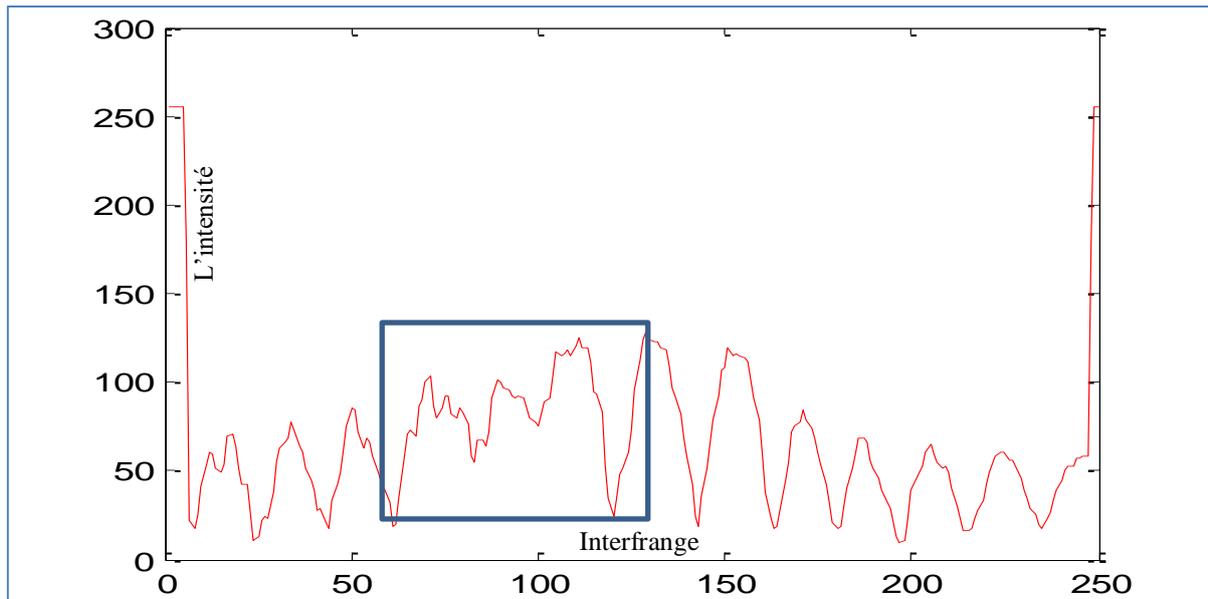
Afin de contrôler la planéité d'un objet réfléchissant, l'image du réseau R_1 est projeté sur la surface à contrôler. Les lignes de l'image du réseau palpent et suivent la forme de la surface,

l'image déformée du réseau virtuel est réfléchié et vient se superposer sur le plan du deuxième réseau R_2 . Il y'a génération des franges de moiré ; la figure de moiré est projetée à l'aide des lentilles L_5 et L_6 sur le plan d'observation PO. L'alignement des franges de moiré matérialise la planéité de la surface réfléchissante contrôlée. La figure 4.16a, montre comment les franges de moiré matérialisent le défaut de planéité d'une surface plane. Les franges de moiré ne sont pas des lignes droites, mais elles suivent la forme de la surface palpée. La courbe de la figure 4.16b, illustre l'interfrange et l'intensité de la figure de moiré (figure 4.16a) sur la ligne bleue, on remarque que le pas des franges est presque identique par rapport à la courbe de la figure 4.16c. Cette courbe suivant la ligne rouge montre que le pas de franges n'est pas régulier et la même chose pour l'intensité lumineuse des franges.



a- Franges de moiré d'une surface avec un défaut de planéité





c-

Courbes d'intensité et de l'interfrange

b- Hors la zone de défaut

c- Sur la zone de défaut de planité

Figure 4.16. Images matérialisant le défaut de planité

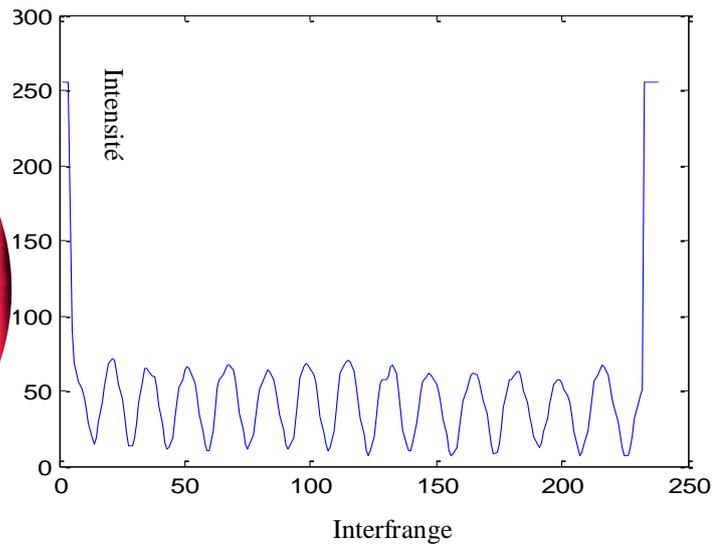
4.4.5.2 Le taux de réflexion de la surface contrôlée

Si le taux de réflexion de la surface à contrôler est insuffisant ou s'il comporte des zones non réfléchissantes, l'image du premier réseau R_1 (réseau test) n'est pas totalement réfléchi et se superpose sur le plan du deuxième réseau R_2 (réseau référence), ce qui est généré des franges de moiré sur le plan de ce réseau de mauvaise qualité. L'image de moiré est projetée sur le plan d'observation. Cette image est caractérisée par la discontinuité des franges et d'une luminosité variable d'un endroit à un autre et le long de la même frange. La figure 4.17 présente les franges de moiré de différents échantillons et chaque figure de moiré est engendrée par sa courbe d'intensité. Les franges de la figure 4.17a, sont des lignes droites parallèles et équidistantes. L'intensité et le pas des franges de moiré sont constants sur toute la surface palpée comme il est illustré par la courbe de la figure 4.17b. Dans la figure 4.17c, les franges sont situées sur le bord de l'échantillon et le centre de la surface est sombre (taux de réflexion est presque zéro) il s'agit donc de la discontinuité des franges et suivant la ligne bleue de la courbe de la figure 4.17d a été obtenue. Cette courbe montre que l'intensité lumineuse des franges claires est nulle entre 75 et 275 (la zone encadrée), cette zone

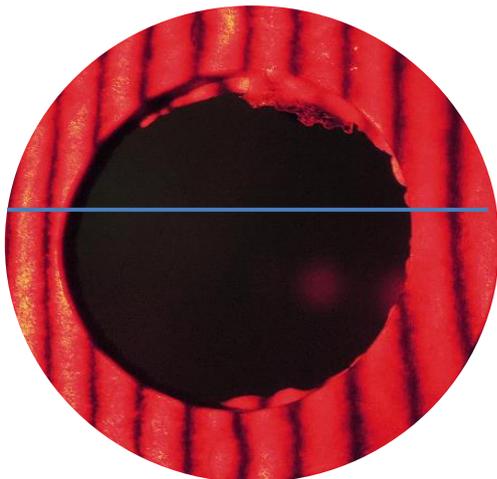
matérialise le centre de la surface et le pas des franges et l'intensité des bords ne sont pas uniformes. La figure 4.17e, montre que la réflexion de la surface palpée est différente d'un endroit à l'autre ce qui est confirmée par l'intensité des franges sombres et claires. Dans les bords (la zone 1 et 2) l'intensité des franges sombres n'est pas nulle elle est environ de 50 il est illustré par la courbe de la figure 4.17f (la courbe correspondante la ligne jaune), et dans le milieu les franges sont des lignes droites alternativement claires et sombres.



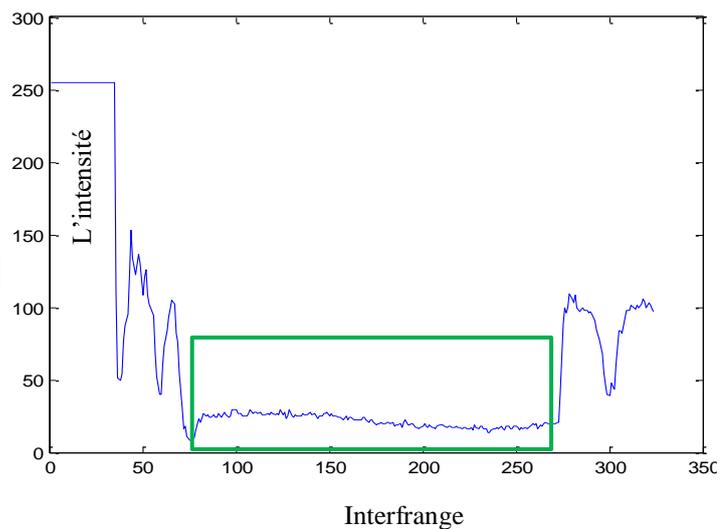
a-



b-



c-



d-

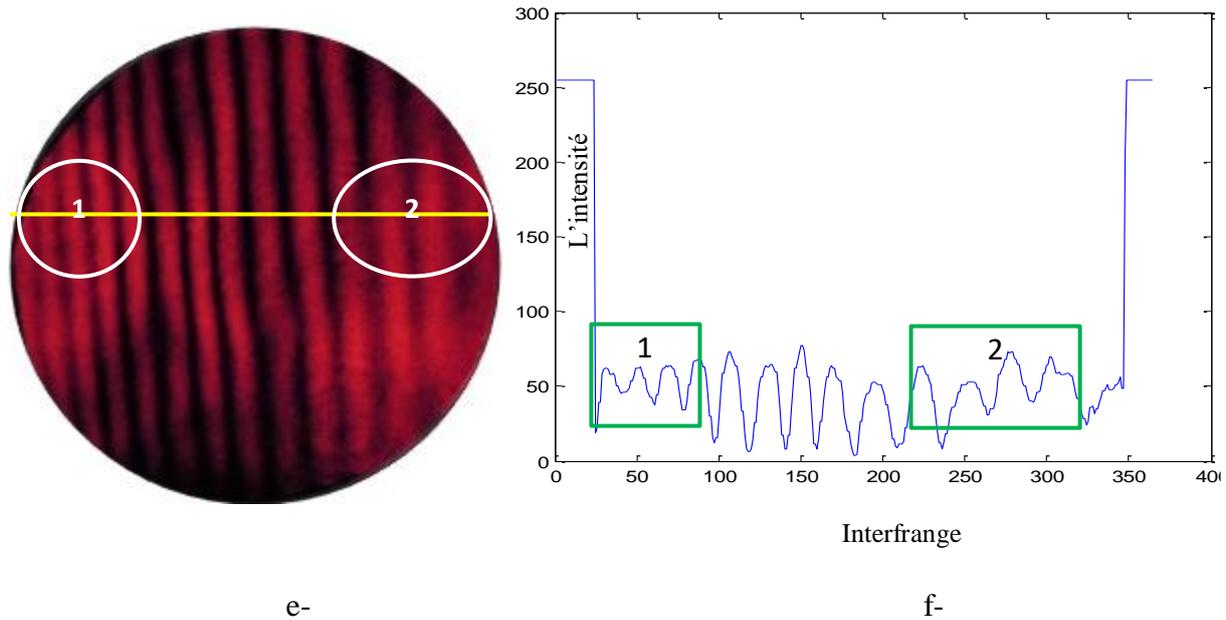


Figure.4.17. Influence du taux de réflexion sur l'image de moiré

4.4.5.3 Effet de la taille de la surface contrôlée sur la forme des franges de moiré

Le montage utilisé dans les sections précédentes, peut être utilisé aussi pour le contrôle des surfaces ponctuelles de quelques millimètres carrés à des surfaces plus importantes. Dans ce cas il suffit de projeter le spectre de diffraction sur la surface à contrôler, déplacer la surface suivant les coordonnées x et y pour positionner l'ordre désiré sur la surface ponctuelle à inspecter. Mais cette technique ne peut se faire que si l'on masque tous les autres ordres c'est-à-dire laisser l'ordre sélectionné et l'ordre zéro. Cette technique de contrôle topographique par réflexion utilisant les ordres de diffraction. À l'aide du système d'élargissement (lentille convergente L_1 et lentille divergente L_2 comme présentées dans le montage utilisé) on peut élargir et réduire la taille de l'ordre qui va inspecter la surface désirée.

La technique est appliquée sur une plaque réfléchissante sur des ordres de diamètre inférieur à un millimètre et plus.

Les images de la figure 4.18, présentent la surface de la même plaque réfléchissante, la première image montre les franges sont des lignes droites parallèles et équidistantes c'est-à-dire la surface ne présente aucun défaut. Mais les deux autres images les franges sont de mauvaise qualité et ne sont pas parallèles et équidistantes.

L'image de la figure 4.18a, est une figure de moiré d'une surface ponctuelle. Le diamètre de l'ordre sur la surface est inférieur à un millimètre ($<1\text{mm}$) ce qui donne une surface inférieure

à 4,14 millimètres carrés (4,14 mm²), donc les défauts doivent être à l'échelle nanométrique d'où la sensibilité du montage n'est pas suffisante pour les détecter. L'image de la figure 4.18b, illustre la topographie d'une surface dont le diamètre de l'ordre sur la surface contrôlé est de 4 mm ce qui donne une surface de 12,56mm², et l'image de la figure 4.18c, montre une image de moiré d'une surface palpée avec un ordre de diamètre de 5 mm ce qui donne une surface de 19,62 mm². D'après la forme des franges des trois images nous concluons, que plus la surface est grande plus les défauts s'agrandissent en taille et en nombre, et plus sont détectables par les lignes de réseau test.

En fonction de l'ordre sélectionné (+1 ; +2 ; +3 ; ...) la technique nous permet à augmenter la résolution de contrôle du montage. En effet selon la fonction caractérisant le réseau, et après diffraction, les harmoniques répartis selon la série de Fourier. Si le réseau est à répartition sinusoïdale, alors l'ordre (+ 1) représente un réseau d'une fréquence spatiale (f) de 1 fois f du réseau initial, l'ordre (+2) représente 2 fois f du réseau initial et ainsi de suite.

$$F(x_0, y_0) = 1 + \cos \frac{2\pi x_0}{p} + \frac{1}{3} \cos \frac{2\pi 3x_0}{p} + \frac{1}{5} \cos \frac{2\pi 5x_0}{p} + \dots$$

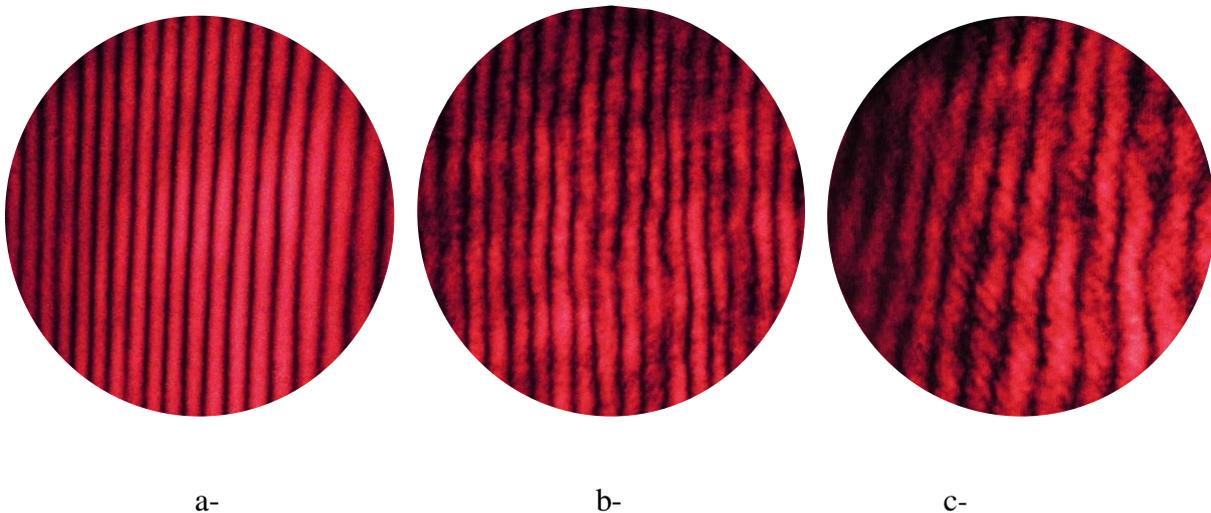


Figure 4.18. Topographie de surface d'une plaque réfléchissante suivant les ordres de diffraction du réseau test

4.4.6 Discussion des résultats

Les résultats présentés dans les sections ci-dessus montrent qu'il y a une relation entre la qualité de la surface et la qualité des franges, de manière que la qualité des franges de moiré

apporte directement de l'information sur la qualité surfacique de l'échantillon réfléchissant, tels que l'alignement et la continuité des franges permettent d'identifier qualitativement le profil de la surface contrôlée.

Dans le cas où les franges de moiré sont des lignes droites parallèles et équidistantes alternativement claires et sombres, on déduit que la surface contrôlée est parfaitement plane et sans défauts de forme, ayant un taux de réflexion élevé et uniforme sur toute la surface palpée (surface homogène). La présence des défauts de forme entraîne les déviations des franges de moiré. L'alignement des franges informe sur le bon état de planéité de la surface, et si la surface n'est pas plane les franges de moiré reprennent la forme de cette surface et seront structurées suivant son état de planéité ; le taux de réflexion de la surface palpée influe donc sur le contraste et la continuité des franges. On obtient une brillance différente entre les franges et aussi le long de la frange elle-même. On remarque aussi que le nombre de défauts détectés influe sur le nombre de déviations des franges de moiré. La variation de la taille des défauts produit la variation de la taille des déviations des franges de moiré. L'image de défaut est présentée sous différentes amplifications ; si l'amplification est grande le défaut détecté devient nettement visible. On note aussi que L'empreinte d'indentation a causé une déviation remarquable des franges de moiré, cette déviation augmente avec l'augmentation de la charge appliquée à la surface de l'objet. La résolution de détection du montage utilisé a permis de détecter la rugosité de la surface d'échelle nanométrique.

4.4.7 Mesure de la pente de défaut de forme

4.4.7.1 Notion de déformation

Il faut bien distinguer la notion de déplacement et celle de déformation, qui est un gradient de déplacement. La langue française ne distingue pas entre le phénomène de déformation (en anglais : déformation), c'est-à-dire le changement de forme sous l'effet d'un chargement, et la grandeur physique décrivant localement ce changement de forme (strain). À noter que le terme anglais peut faire incorrectement penser au terme français contrainte (stress), qui décrit le champ de forces internes dans le matériau déformé, et n'est donc pas une notion simplement cinématique accessible à la mesure.

En tant que grandeur physique, la déformation doit permettre de mesurer un changement de forme. Lors d'un chargement, chaque point \vec{v} d'un corps déformable va se déplacer. Ce

déplacement va être décrit par un champ de vecteurs de déplacement $\vec{u}(\vec{r})$. Le champ de vecteurs de déplacement transporte trois informations.

- Information sur la translation d'ensemble de la zone étudiée ; dans une translation, tous les vecteurs de déplacement sont identiques d'un point à un autre : il n'y a pas de gradient de déplacement ; le vecteur déplacement moyenné sur l'ensemble d'une zone d'intérêt va donc donner la translation de cette zone.
- Information sur la rotation locale de la zone étudiée.
- Information sur la déformation locale.

Ici la déformation est matérialisée par la déformation de l'image du réseau en palpant la surface à contrôler, donc le contrôle est parfait, du fait de la superposition optique du réseau sur la surface de l'objet. L'image du réseau test R_1 véhiculée les informations concernant la forme de l'objet et vient se superposer optiquement sur le réseau référence R_2 ce qui élimine l'influence du coin d'air sur la qualité des franges de moiré. La superposition de l'image déformée du réseau R_1 sur le réseau R_2 engendre des franges de moiré déformées. Le déplacement des lignes constituantes de l'image du réseau R_1 est en fonction de la variation de la forme de l'objet, qui est matérialisée par la variation de forme des franges de moiré.

Cette méthode de mesure est adaptée au contrôle de déformations sur des surfaces de précision. Elle permet de mesurer aussi tout défaut local sur des formes complexes, objets d'orfèvrerie, élément de carrosserie (tôle emboutie ou pièce composite) et sur toutes pièces réfléchissantes, elle quantifie les défauts comme leur conséquence sur l'aspect visuel des pièces contrôlées.

La déformation peut se présenter sous deux formes ; soit un creux, et dans ce cas les franges se déforment et se compriment, soit sous forme de bosse et dans ce cas les franges se déforment s'élargissent au niveau de la déformation par une augmentation de la distance interfrange. Donc tout changement de la forme des franges renseigne directement sur la présence de défaut de forme.

4.4.7.2 Évaluation de défaut de forme sur la surface du miroir optique

Afin d'évaluer le défaut de forme localisé sur la surface du miroir optique, on a choisi le cas de la figure 4.19, où les franges de moiré sont déformées seulement dans la zone du défaut.

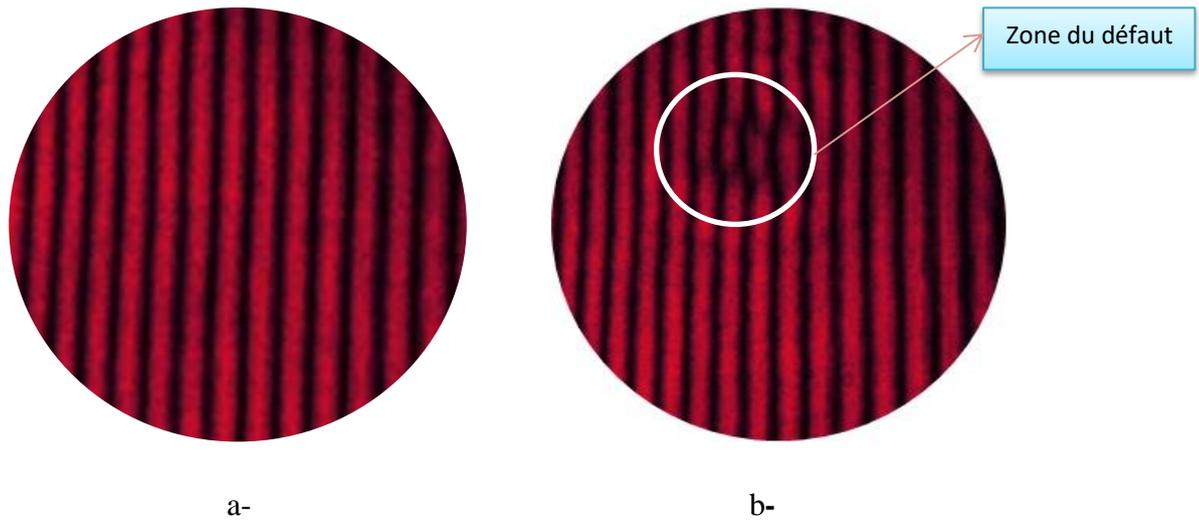


Figure 4.19. Les franges de moiré du miroir optique : (a) Sans défaut; (b) Avec défaut

4.4.7.2.1 Principe de calcul

Le principe de calcul de la pente de déformation est basé sur la méthode de Ligtenberg [24]. L'image du réseau test est réfléchié par le miroir. Lorsque ceci est soumis à une déformation hors-plan, la normale à la surface change et donc l'image du réseau change, et les franges de moiré présenteront des déviations. Pour analyser ces franges, on considère le schéma de la figure 4.20.

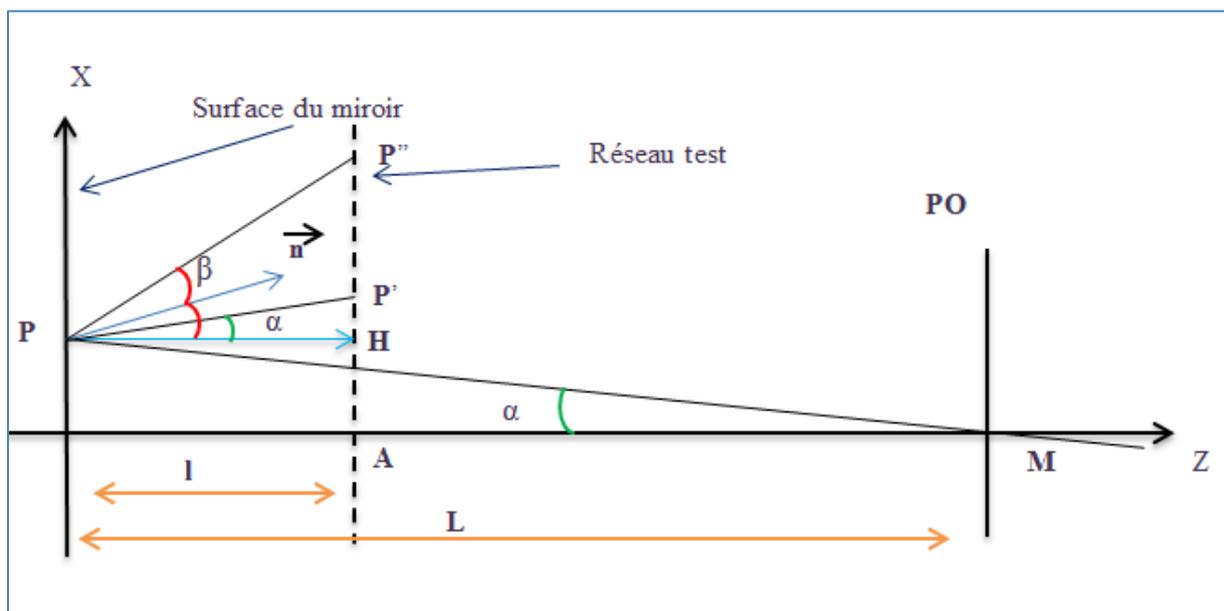


Figure 4.20. Schéma de principe de calcul

Le schéma de la figure 4.20 présente deux états, avant et après chargement, on considère donc les deux faisceaux qui arrivent sur le plan d'observation au point M. Ces deux faisceaux arrivent donc du point P sur la surface du miroir à étudier sous un angle α . Avant chargement, la normale au miroir est horizontale et le point du réseau visé est le point P' tel que l'angle HPP' est aussi l'angle α . Après chargement, la normale a tourné d'un angle β tel que, si le nouveau point visé est P'', l'angle HPP'' est égal à 2β . On numérote les lignes du réseau en commençant par le trait 0 au point A. Nous avons alors :

$$AP'' = m p \text{ et } AP' = k p \quad (4.1)$$

Alors les franges de moiré sont issues de la différence $(m - k) p$ tel que :

$$(m - k) p = AP'' - AP' = HP'' - HP' = l \tan(\alpha + 2\beta) - l \tan \alpha \quad (4.2)$$

On choisit L très grand devant les dimensions du miroir à étudier et on suppose aussi que les déformations sont faibles, on peut donc assimiler les tangentes aux angles.

$$(m - k)p = 2l\beta = 2l \, dz/dx \quad (4.3)$$

$$np = 2l(dz)/dx \quad (4.4)$$

La phase de l'objet est $2\pi m$ et celle de référence est $2\pi k$, La différence de phase entre les deux états est:

$$2\pi(m - k) = 2\pi n = \Delta\varphi \quad (4.5)$$

Et $\Delta\varphi = \varphi_{ob} - \varphi_{ref}$, et φ_{ob} : phase objet (sans défaut); φ_{ref} : phase de référence (avec défaut)

n : nombre de franges. D'après l'équation (4.5):

$$n = \Delta\varphi / 2\pi \quad (4.6)$$

Et d'après les relations (4.4) et (4.6), il en résulte la relation ci-dessous donnée

$$\Delta Z = dz/dx = np/2l \quad (4.7)$$

$$\Delta Z = (\Delta\varphi) \cdot p / 2\pi \cdot 2l \quad (4.8)$$

Et $Z = \Delta X \cdot \Delta Z \quad (4.9)$

ΔX , c'est la différence entre deux valeurs successives de X et elle est constante le long de l'axe X. elle est utilisée pour calculer la phase interpolée

4.4.7.2.2 Calcul du défaut

Cette méthode de contrôle permet à quantifier et à évaluer le défaut en trois dimensions (3D), la déviation des franges donne la profondeur de défaut suivant la coordonnée Z, le nombre de franges déviées donne la largeur de défaut suivant la coordonnée X et la longueur de la déviation exprime la longueur de défaut selon la coordonnée Y.

Pour quantifier le défaut nous avons calculé la pente du défaut ΔZ . Avant de calculer la pente ΔZ il nous faut savoir la phase d'objet (sans défaut) et la phase de référence (avec défaut).

La phase de l'objet est $\varphi_{ob} = 2\pi m$ et la phase de référence est $\varphi_{ref} = 2\pi k$.

La différence de phase a été calculée selon les étapes suivantes :

- Avec le logiciel Matlab les figures des franges de moiré sans et avec défaut (figure 4.19), sont transformées en gris (la figure 4.21).
- Avec le même logiciel on a tracé les courbes d'intensité selon les images de la figure 4.21. La courbe d'intensité de l'objet (avec défaut) est présentée par la figure 4.22a, et la courbe d'intensité de référence (sans défaut) est présentée par la figure 4.22b

La figure 4.22, présente l'intensité des franges de moiré du miroir selon l'axe Y et l'axe X indiquant le nombre de franges et la distance entre elles. Les courbes maximales correspondent à des franges claires et les minimales à des franges sombres. Les distances sont prises entre les maxims et les minimas.

La figure 4.22c, illustre la superposition des deux courbes sans défaut et avec défaut, afin de les comparer. La différence entre elles se situe dans la zone où le défaut a été localisé.

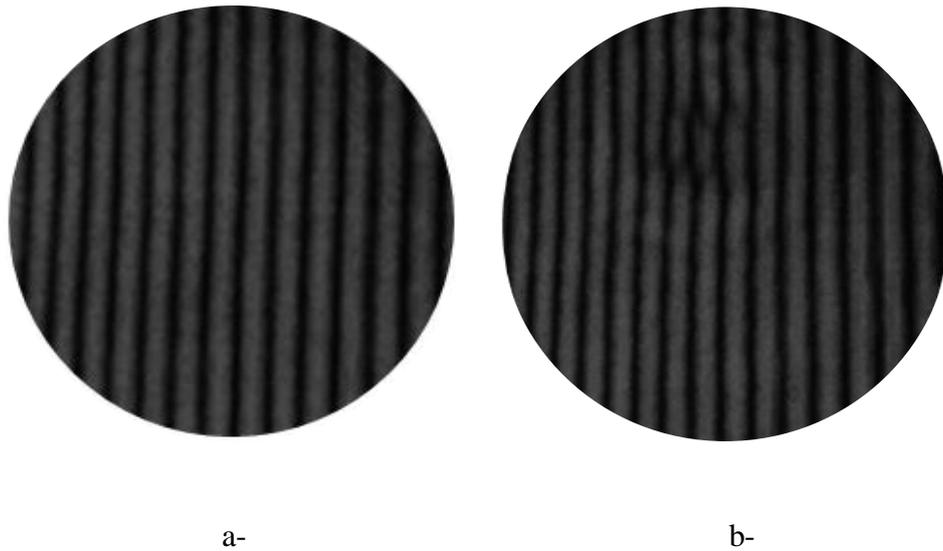


Figure 4.21. Les franges de moiré de la surface du miroir: (a) Sans défaut; (b) Avec défaut en RGB

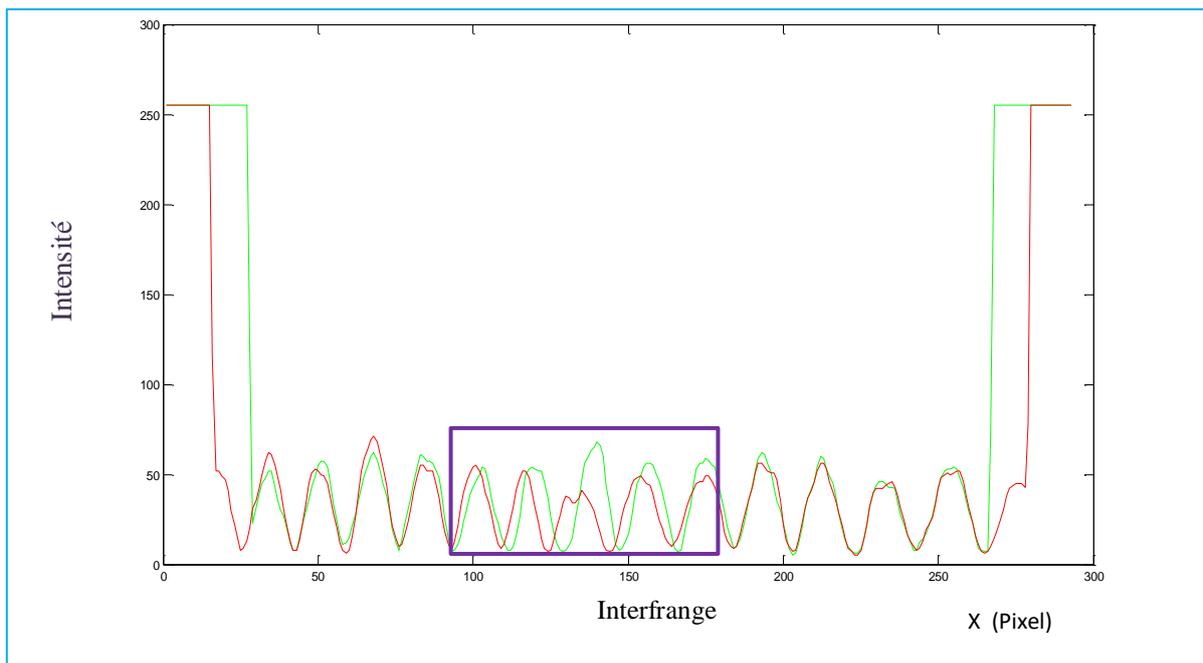


Figure 4.22. Interfranges en Pixel : (—) sans défaut ;(—) avec défaut.

4.4.7.2.3 Phase et profondeur

La phase objet et la phase référence ont été calculées à partir des courbes d'intensité ci-dessus. Pour prendre les mêmes valeurs de X pour la phase d'objet et la phase de référence,

on a calculé la phase objet interpolée (PHIO) avec défaut et la phase référence interpolée PHIR sans défaut.

D'après la figure 4.23 le déphasage interpolé $\Delta\varphi$ calculée entre les deux états est égal à 0 sauf à l'endroit où le défaut a été détecté (zone de défaut). La courbe phase interpolée avec défaut et la courbe phase interpolée sans défaut présentent une forme similaire avec légère différence se situe entre 98 et 170 pixels. La différence de phase entre les deux états (PHIO-PHIR) détermine la phase du défaut.

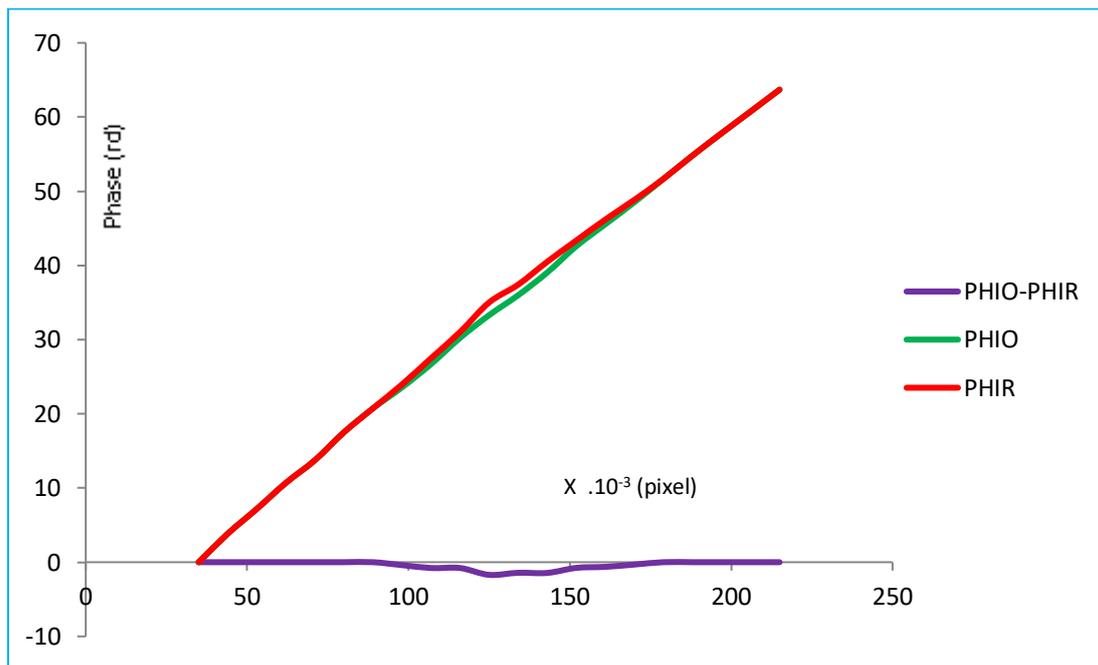


Figure 4.23. Calcul de phase Interpolée : PHIR (phase sans défaut) ; PHIO (phase avec défaut);PHIO-PHIR (différence de phase)

Les valeurs du déphasage de la courbe 4.23 ont été utilisées pour calculer les valeurs de la pente de déformation dz/dx . La courbe de la figure 4.24 présente la quantification de ΔZ en deux dimensions (2D). La pente de déformation est définie par ΔZ le long de l'axe Z, et la largeur du défaut définie par X le long de l'axe X. Alors, ΔZ est compris entre : 0 et $-0,0013 \cdot 10^{-3}$ pixels, et X est compris entre $80 \cdot 10^{-3}$ et $188 \cdot 10^{-3}$ pixels.

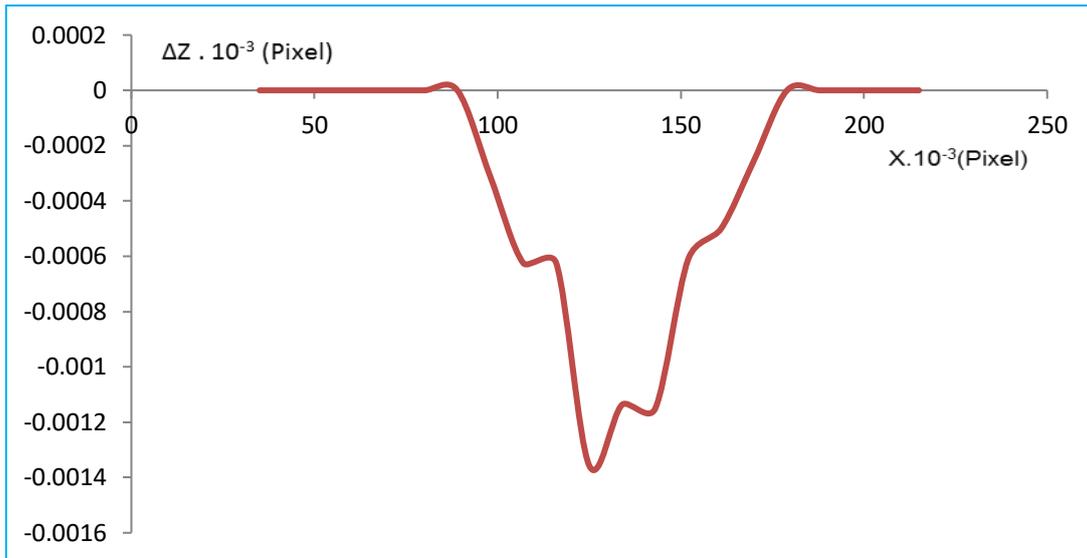


Figure 4.24. Calcul de la pente de défaut

Les valeurs de la pente de déformation de la courbe 4.24 ont été utilisées dans la relation (4.9) pour calculer les valeurs de la profondeur du défaut Z . La courbe de la figure 4.25 présente la quantification de Z en deux dimensions 2D. La profondeur de défaut est définie par Z le long de l'axe Z , et la largeur du défaut définie par X le long de l'axe X . Alors, Z est compris entre 0 et $-0,012 \cdot 10^{-3}$ pixels, et X est compris entre $80 \cdot 10^{-3}$ et $188 \cdot 10^{-3}$ pixels.

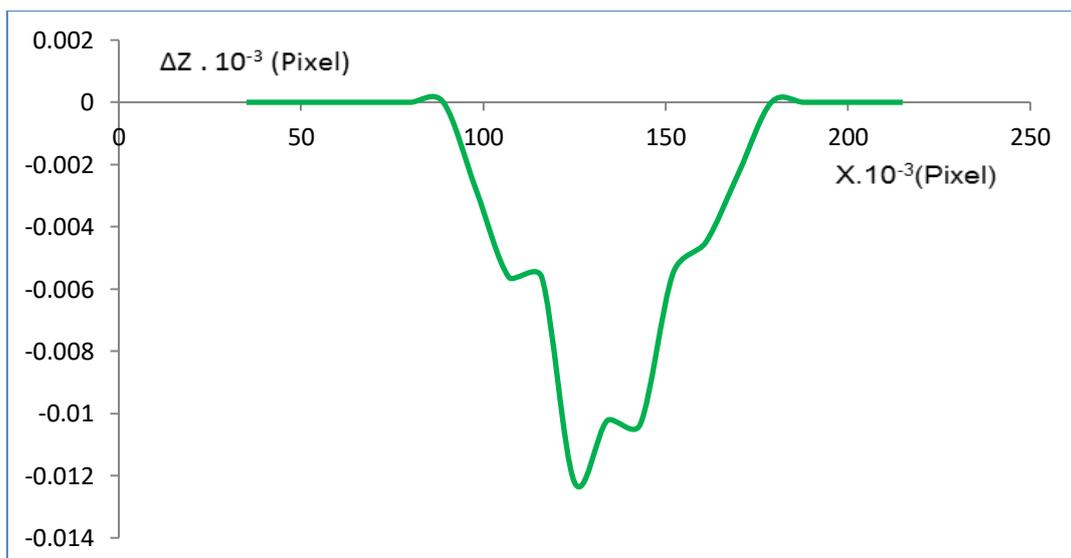


Figure 4.25. Calcul de de la profondeur de défaut

4.4.8 Interprétation des résultats

Le montage optique développé pour le contrôle de surfaces des objets réfléchissants, basé sur le moiré interférométrique, a permis de générer un système de franges de moiré obtenu lorsque l'image du réseau test palpe optiquement la surface réfléchissante à contrôler, puis elle se réfléchit sur le plan du réseau de référence où le système de franges de moiré est formé. L'image du réseau test transporte toutes les informations détectées sur la surface, au réseau de référence. Ces franges contiennent ainsi l'information sur la surface réfléchissante palpée.

Si la surface palpée est de très bonne qualité (sans défaut), les franges de moiré obtenues sont droites, parallèles, équidistantes, et continues ; et si la surface est de mauvaise qualité, il y a présence des anomalies où des défauts, il en résulte que les franges de moiré présentent des déviations à l'endroit où le défaut est présent sur la surface réfléchissante à contrôler. On note aussi que l'intensité lumineuse des franges claires diminue lorsque le taux de réflexion de la surface de la plaque métallique diminue, et pour augmenter la réflexion il suffit de renforcer cette surface par dépôt de couches minces réfléchissantes.

La précision de mesure de la technique nous a permis de détecter des défauts à l'échelle microscopique et nanométrique. Le point le plus profond de défaut sur la surface de miroir est de $0,012 \cdot 10^{-3}$ pixel, ceci revient à la précision de la méthode de mesure qui est due au phénomène de moiré lui-même et à l'amplification du montage expérimental utilisé.

Pour détecter les plus faibles défauts il est indispensable d'augmenter la résolution de détection par l'augmentation de la fréquence spatiale des réseaux optiques utilisés, ou par l'utilisation de la technique de projection des ordres de diffraction du réseau test sur la surface à inspecter.

4.4.9 Performances techniques de la méthode

Cette méthode de contrôle et de mesure est très prometteuse, en premier la rapidité dans le contrôle, et en second la précision de mesure qu'elle permet d'atteindre.

Ici nous n'avons pas utilisé de réseau à fréquence spatiale très élevée, de même que nous n'avons pas fait appel à la technique de multiplication par l'intermédiaire du filtrage spatial, mais par contre nous avons utilisé la sélection des ordres de diffraction sur l'échantillon réfléchissant. Ces techniques sont nécessaires dans le cas où les défauts de forme ou les déformations sont très faibles, donc non ou difficilement détectables. La seule exigence de

cette technique est qu'elle nécessite une surface suffisamment réfléchissante ou vraiment réfléchissante dans le cas où un filtrage spatial est nécessaire. Ceci ne pose pas de problème, surtout si on veut contrôler un procédé de fabrication, dans ce cas il suffit de déposer une couche mince réfléchissante sur la surface à contrôler.

4.4.10 Application et propriétés de la méthode

Cette technique de contrôle peut être utilisée avantageusement pour mesurer les déformations générées par des contraintes sur des pièces fonctionnelles et déterminer l'influence de ces variations sur sa fonction. Elle peut être aussi utilisée pour le contrôle dimensionnel, lorsqu'il s'agit par exemple de quantifier l'erreur de forme pour savoir si une pièce est saine ou réfutable. En effet, il suffit alors de comparer une figure de franges de moiré avec une autre préalablement enregistrée et obtenue à partir d'une pièce considérée comme étalon, ce qui permet un gain de précision, de temps, et d'argent.

Ce système peut être utilisé pour différents types de réseaux (avec des courbes spécifiques qu'il faudra calculer) qui sont adaptés à un étalon donné de telle sorte que le système de franges de moiré est formé de lignes droites parallèles et équidistantes. Une telle figure de moiré est alors très facile à utiliser pour tester la conformité de l'objet à l'étalon, puisqu'il suffit de vérifier si les franges sont rectilignes ou non.

4.5 Topographie des surfaces des composants transparents

4.5.1 Introduction

Les composants optiques transparents (lentille, prisme, lame à faces parallèles, film transparent...etc.) comportent des surfaces, considérés comme parfaites dans la conception optique, mais ne le sont pas dans la réalité. Le domaine optique nécessite une qualité supérieure des composants, et l'optique transparente nécessite une inspection particulière pour assurer un fonctionnement optimal avec une qualité d'image élevée.

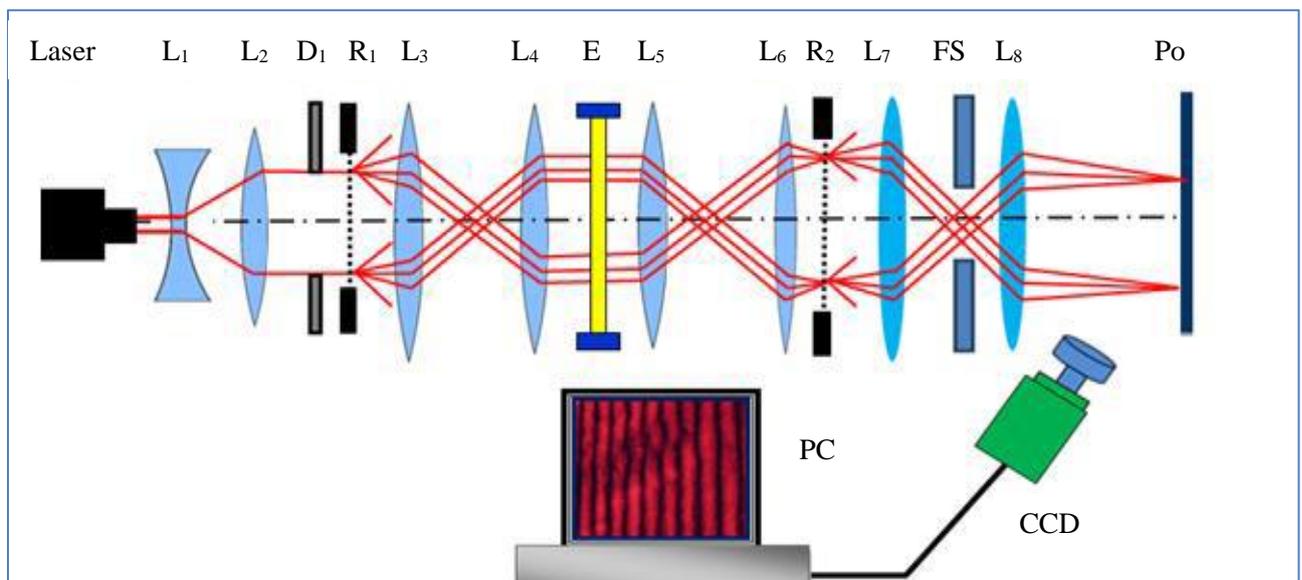
Les défauts susceptibles d'être présents dans le matériau et la surface d'un composant optique transparent, tels que : les rainures, les impuretés, les fissures, les stries, les piqûres, la biréfringence, l'inhomogénéité, défauts de forme...etc. Ces défauts sont de tailles ponctuelles dans la gamme microscopique ou nanométrique, qui ont des effets néfastes sur la qualité fonctionnelle du composant optique. Le problème qui se pose est de développer une méthode

optique de contrôle par transmission, capable de détecter des anomalies qui peuvent perturber la fonction du composant optique.

A cet effet nous avons développé un montage expérimental basé sur le moiré interférométrie qui permet de scanner des surfaces et les matériaux des composants transparents, de tailles allant de quelques mm² à des surfaces plus importantes.

4.5.2 Montage optique de contrôle des composants transparents

Le principe du montage expérimental est illustré par la figure 4.26a, où le faisceau laser He-Ne 35 mw est élargi par le système de lentilles (L_1, L_2), traverse le diaphragme D_1 et arrive sur le réseau linéaire en transmission R_1 (structure périodique test). Le système de lentilles (L_3, L_4) réalise le double transformé de Fourier pour projeter l'image du réseau R_1 sur le plan de l'échantillon E . L'image du réseau R_1 palpe et scan puis traverse l'échantillon E , et vient se superposer sur le plan du réseau R_2 . Le réseau R_2 est décalé angulairement dans son plan d'un angle ($\theta \sim 0^\circ$) ; la superposition et le croisement des lignes des deux réseaux génèrent l'effet de moiré, qui est constitué de lignes droites parallèles et équidistantes alternativement brillantes et obscures sur le plan du réseau de référence R_2 . Les franges de moiré sont projetées sur le plan d'observation PO avec un grandissement G après avoir subi une double transformation de Fourier à l'aide du système de lentilles (L_7, L_8). Le filtre spatial FS est utilisé pour le filtrage spatial et le traitement de l'image. Sur le plan d'observation est disposée une caméra CCD pour l'acquisition et le traitement automatique des données.



a- Principe optique du montage expérimental d'inspection des matériaux transparents



b- Montage expérimental avec échantillon

Avec : 1 : Laser ; 2 et 3 : les lentilles L_1 et L_2 ; 4 : Diaphragme D_1 ; 5 : Réseau test R_1 ; 6 et 7 : les lentilles L_3 et L_4 ; 8 : échantillon ; 9 et 10 : L_5 et L_6 ; 11 : réseau référence R_2 ; 12 : la lentille L_7 ; 13 : FS ; 14 : lentille L_8 ; 15 : plan d'observation P_0 .

Figure 4.26. Montage expérimental avec principe optique de détection

4.5.3 Principe de détection de la méthode

Dans le montage optique expérimental représenté par la figure 4.26a, l'échantillon qui est en matériau transparent qui est placé sur le porte échantillon E. L'image du réseau test R_1 véhiculée par le faisceau laser HeNe palpe, scan, et traverse l'échantillon puis vient se superposer sur le plan du réseau référence R_2 . Cette superposition des deux réseaux génère le système de franges de moiré sur le plan du réseau référence R_2 , qui est projeté sur le plan d'observation P_0 à l'aide du système (L_7 , FS, L_8). Pour un test à blanc, c'est-à-dire sans la présence de l'échantillon, les franges de moiré obtenues sont des lignes droites parallèles et équidistantes alternativement brillantes et obscures figure 4.27.a.

Une fois la fonctionnalité du montage vérifiée, un échantillon est placé sur le porte échantillon E La figure 4.26b. Une fois l'échantillon traversé par le faisceau laser, Si l'échantillon ne présente aucune anomalie ou les défauts sont si faibles qu'ils ne sont pas détectés, alors les franges de moiré sont des lignes droites parallèles et équidistantes alternativement brillantes et obscures figure 4.27b. Si l'image du réseau test a subi une variation dans sa structure dû à la

présence de défauts, cela se matérialise par le changement de la structure des franges de moiré (figure 4.27c).

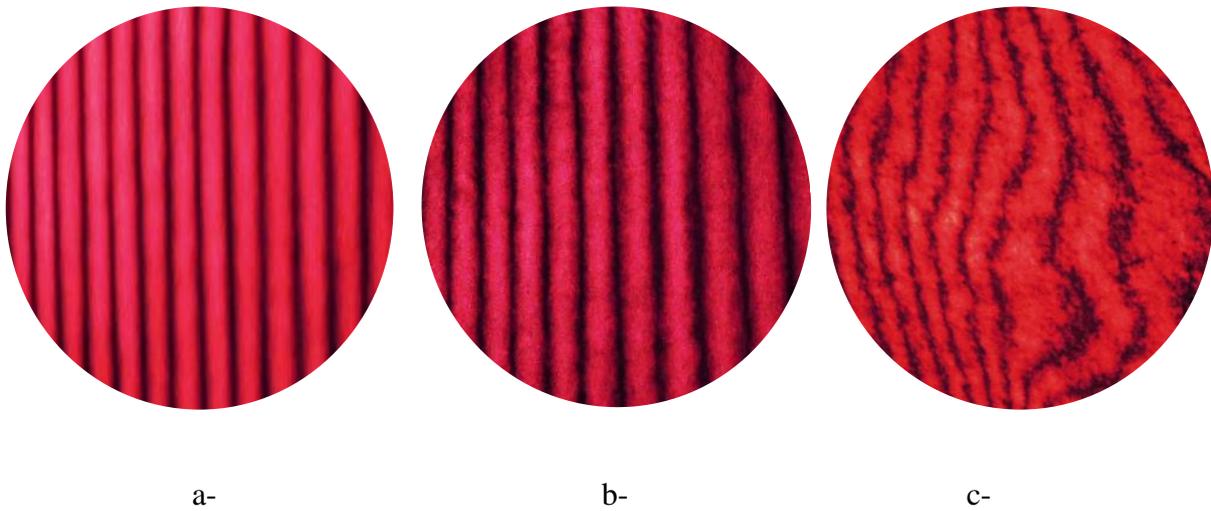


Figure 4.27. Frange de moiré matérialisant différents tests : (a) Sans échantillon, (b) Avec échantillon est sans détection de défaut, (c) échantillon avec détection de défaut.

4.5.3.1 Détection de défauts

Le faisceau laser véhicule l'image la structure microscopique ordonnée du réseau. En traversant le matériau, si la structure du réseau rencontre un obstacle sa trajectoire se trouve déviée. Cette déviation engendre une modification dans la structure de l'image du réseau virtuel R'_1 . Une fois l'image du réseau virtuel R'_1 , superposée sur le réseau R_2 , il y a génération des franges de moiré dont la structure révèle les défauts détectés et leurs importances.

Le défaut de taille microscopique provoque une déviation microscopique dans la structure de l'image du réseau virtuel R'_1 , cette déviation microscopique est amplifiée par le phénomène de moiré, pour le représenter à l'échelle macroscopique, l'image des franges de moiré elle-même est projetée sur le plan d'observation avec grandissement sélectionné.

4.5.3.2 Sensibilité et résolution de détection

Le défaut détecté de taille microscopique est matérialisé instantanément par les figures de moiré sur le plan d'observation à l'échelle macroscopique matérialisant ainsi le défaut initial avec un grossissement allant jusqu'à 1000 fois. Le grossissement est défini par le rapport D_{obs}/p . C'est le rapport entre le pas des franges de moiré sur le plan d'observation D_{obs} et le pas du réseau le plus fin p . Le déplacement microscopique que subit les lignes du réseau en traversant le matériaux est matérialisé par un déplacement macroscopique dans les franges de moiré matérialisé sur le plan d'observation ; ce qui favorise la détection et la mesure des défauts.

4.5.4 Topographie de la qualité de surfaces de différents composants transparents

Le montage expérimental selon la figure 4.26 est utilisable pour détecter des défauts surfaciques et en volume tel que, creux; rainure, rugosité, impureté, empreinte dans différents composants transparents tels que : film optique, lame de verre, les céramique transparentes....

4.5.4.1 Film transparent

4.5.4.1.1 Film transparent à usage courant

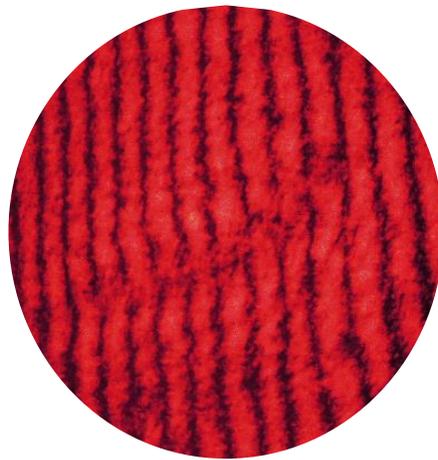
Avant la mise en place du film transparent on a obtenu la figure de moiré sur le plan d'observation.

Les franges de moiré sont présentées dans la figure 4.28, ce sont des lignes droites parallèles et équidistantes alternativement claires et sombres.

On a placé un film à usage courant sur le porte échantillon E. Le film transparent a été palpé en différentes zones, dans la première zone, les franges de moiré obtenues sont des lignes droites, parallèles et équidistantes présentant un défaut montrant que le film est gratté il n'est pas lisse (figure 4.29a), les franges de moiré des autres zones, présentent de déformations (figure 4.29b et figure 4.29c). On peut conclure donc que le film transparent est de mauvaise qualité.



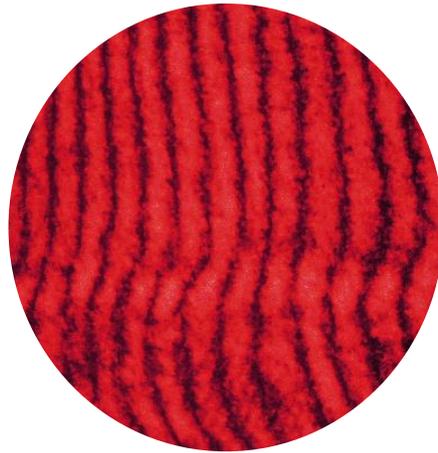
Figure 4.28. Franges de moiré sans échantillon



a-



b-



c-

Figure 4.29. Franges de moiré d'un film transparent à usage courant

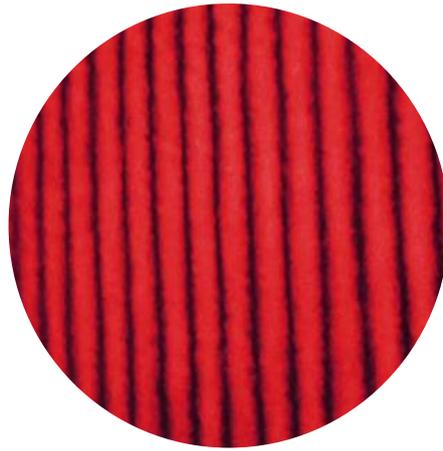
4.5.4.1.2 Film transparent à usage optique

Ce film transparent à usage optique a été testé en trois étapes.

Première étape on a obtenu les franges de moiré à l'état initial, lignes droites parallèles et équidistantes (figure 4.30a), aucune anomalie détectée.

La deuxième étape, ce film subit une déformation intérieure (figure 4.30b) puis une déformation extérieure (figure 4.30d), les franges de moiré correspondantes (figure 4.30c) et (figure 4.30e) sont déformées et tournées respectivement vers l'intérieur ou vers l'extérieur, elles suivent donc la direction de déformation qu'a subi ce film.

La troisième étape consiste à créer un petit défaut de forme sur la déformation (figure 4.30d), il en résulte une autre modification de la topographie du film (figure 4.30f), les franges de moiré obtenues sont déformées dans la zone de déformation et ont matérialisé directement le défaut créé sur la surface du film transparent (figure 4.30g).



a- franges de moiré de film transparent à son état initial



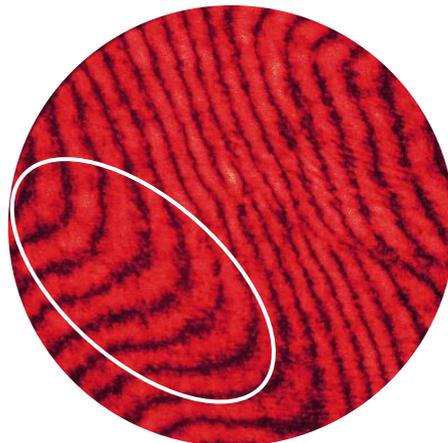
b-



c-



d-



e-

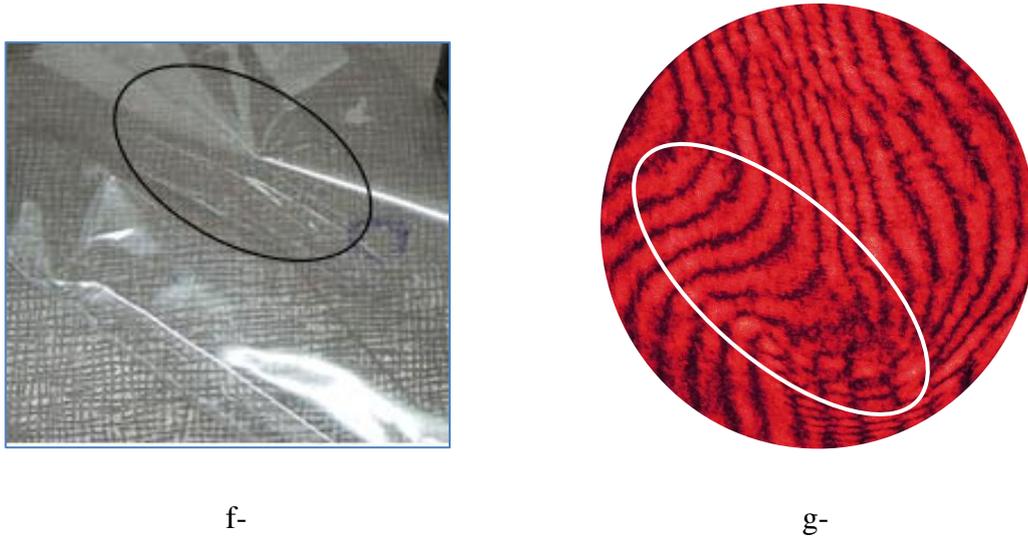


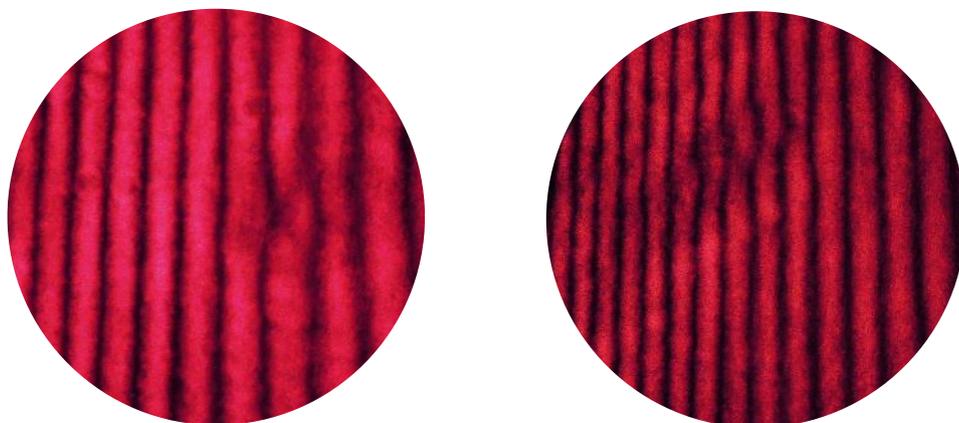
Figure 4.30. Franges de moiré d'un film transparent à usage optique

4.5.4.2 Plaque de verre

4.5.4.2.1 Influence des différents défauts sur la forme des franges de moiré

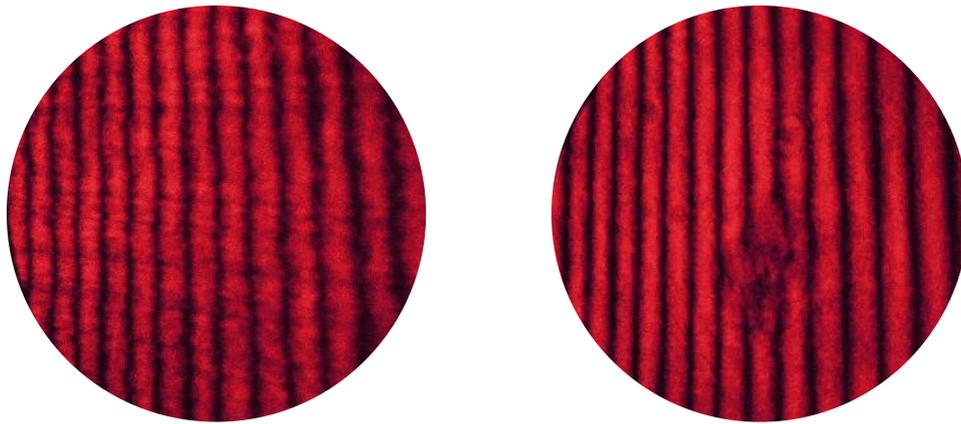
Dans le but de voir l'influence de différents types de défauts sur les franges de moiré, on a utilisé quatre lames de verre présentant différents défauts.

La figure 31, présente les franges de moiré obtenues pour chaque type de défaut. Les figures (4.31a jusqu'à 4.31d), présentent les franges de moiré qui sont déformées distinctement suivant le type de défaut présent sur la surface à tester. On peut dire que la structure des franges de moiré est influencée par l'identité du défaut.



a- creux (défaut de forme)

b- Rainure



c- Rugosité

d- Impureté

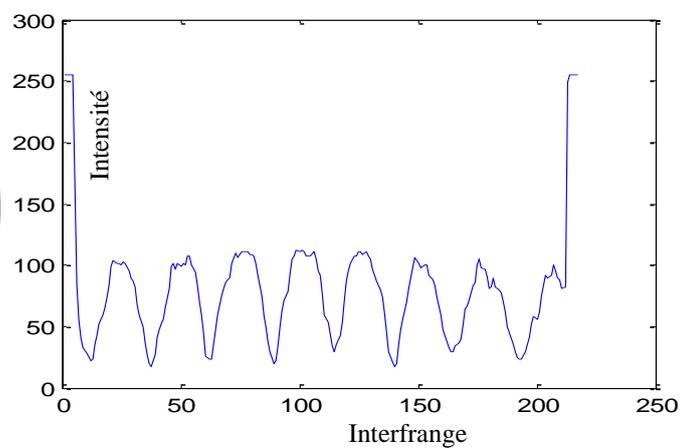
Figure 4.31. Inspection d'une plaque de verre

4.5.4.2.2 Effet du taux de transmission d'une plaque de verre à faces parallèles sur la qualité des franges de moiré

La forme et la brillance des franges de moiré sont influencées par le taux de transmission du composant contrôlé. Afin de mettre en évidence l'effet du taux de transmission sur la qualité des franges de moiré, on a utilisé des plaques de verre à faces parallèles à différentes qualités de surface, et on a évalué l'intensité des franges de moiré obtenues. Les figures de 4.32a jusqu'à 4.32f, montrent que plus la plaque de verre est de mauvaise qualité plus les franges de moiré se présentent de mauvaise qualité et de pas irrégulier, plus leurs intensités se dégradent et sont variables soit entre les franges ou le long de la frange elle même



a-



b-

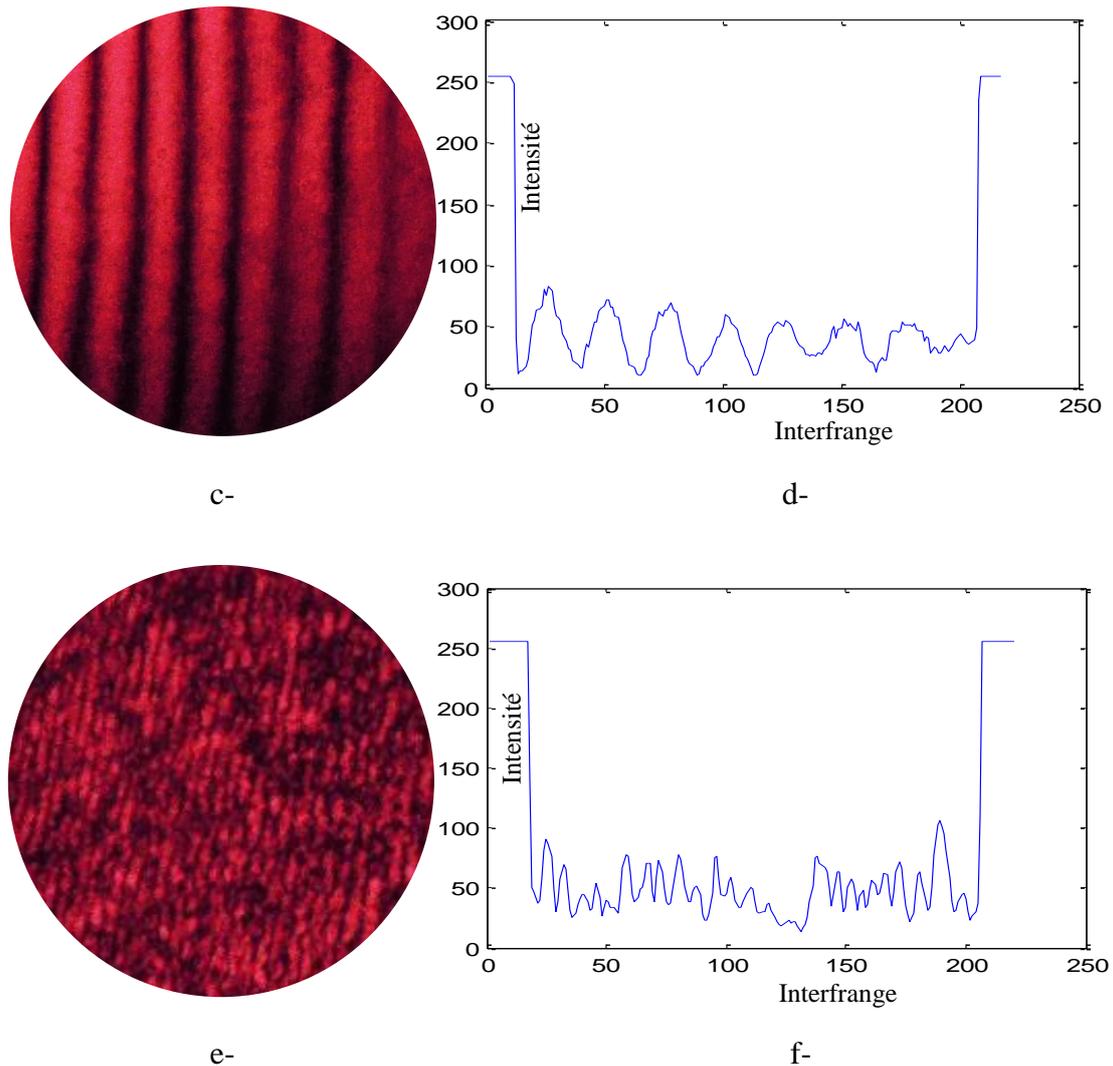


Figure 4.32. Figures de moiré et l'intensité de différents plaques de verre

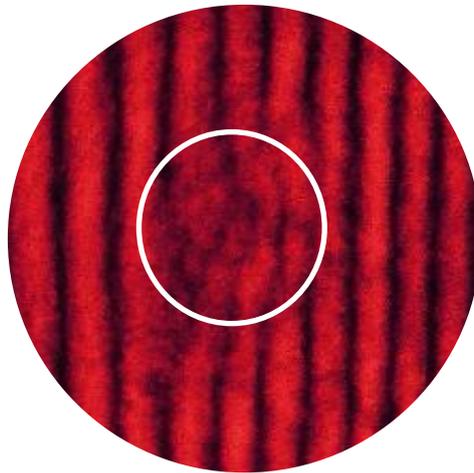
4.5.4.2.3 Effet de l'amplification du défaut sur les franges de moiré

4.5.4.2.3.1 Cas de la plaque de verre de bonne qualité

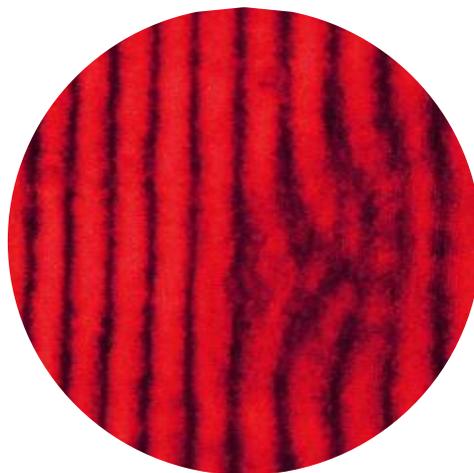
La figure 4.33 présente les franges de moiré d'une plaque de verre de bonne qualité, on a créé sur la surface de cette plaque de verre des défauts amplifiés, respectivement de la figure 4.34a jusqu'à la figure 4.34c, d'après ces figures les franges de moiré obtenues ont matérialisé l'amplification du défaut dans la zone où il a été créé.



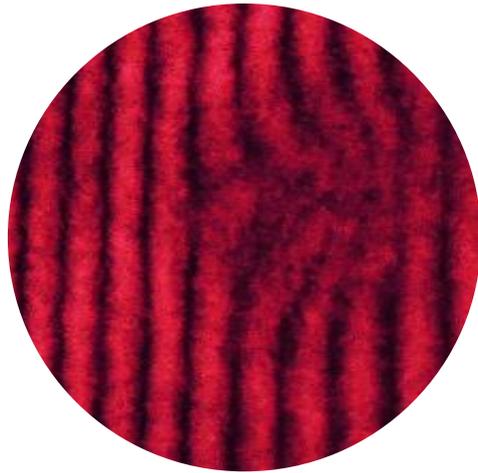
Figure 4.33. Franges de moiré de la plaque du verre a bon état de surface avant créé le défaut



a-



b-



c-

Figure 4.34. Franges de moiré de la plaque de verre à bon état de surface avec un défaut créé et amplifié

4.5.4.2.3.2 Cas d'une plaque de verre de mauvaise qualité

Dans ce cas on a utilisé une plaque de verre de mauvaise qualité (figure 4.35), et on a créé de défauts amplifiés, les franges de moiré obtenues sont montrées de mauvaises qualités mais les défauts créés ont été détectés respectivement suivant le taux d'amplification dans la zone où ils se sont créés (figures 4.36a - 4.36c).



Figure 4.35. Franges de moiré de la plaque de verre de mauvais état de surface avant création de défaut

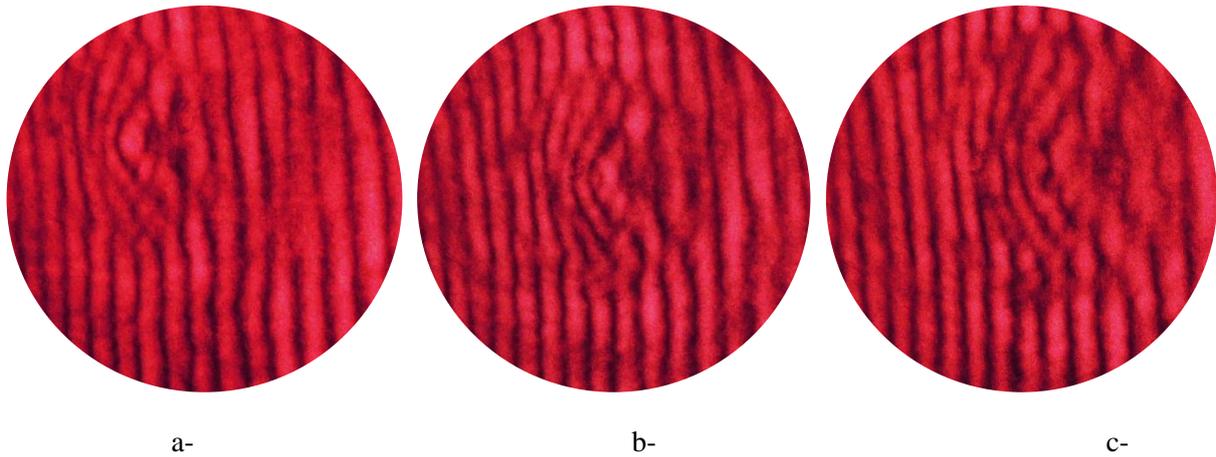


Figure 4.36. Franges de moiré de la plaque de verre de mauvais état de surface après création de défaut

4.5.4.3 Plaque en verre organique

La figure 4.37, présente les images de moiré d'une plaque en verre organique à son état initial et après la création des défauts. Avant de créer le défaut, la surface de la plaque est caractérisée par un système de franges de moiré. Les franges sont des lignes droites, parallèles avec des irrégularités informant que la surface est rugueuse et comporte des rainures ceci est illustré sur la figure 4.37a. Sur la même surface contrôlée un défaut de forme a été créé et les franges de moiré mettent en évidence ce défaut et le matérialisent par les déviations qu'elles ont subi (figure 4.37b). Ensuite, deux défauts ont été créés sur la même surface. Selon la figure 4.37c, les franges de moiré matérialisant les deux défauts par deux déviations clairement distinctes.

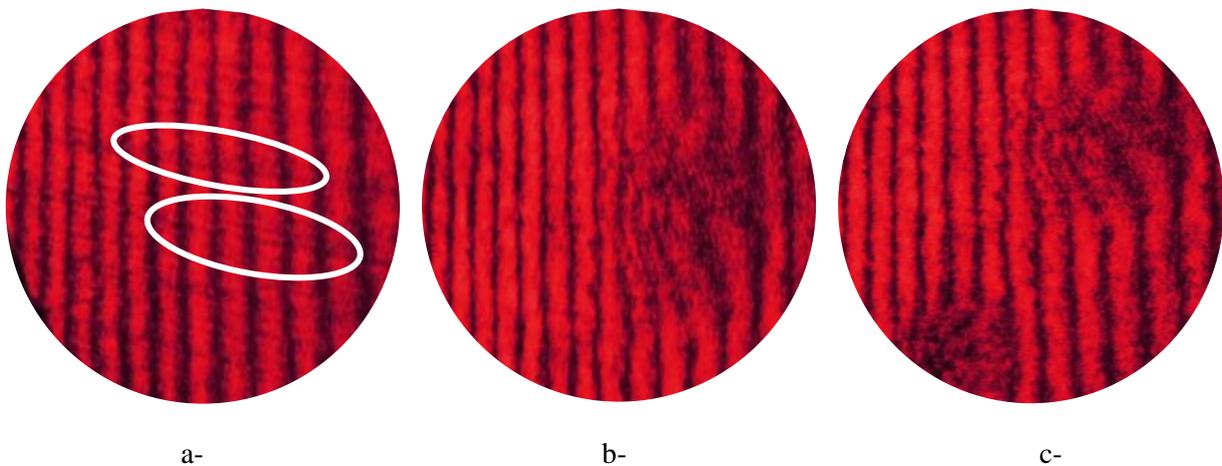


Figure 4.37. Franges de moiré de la plaque de verre organique avant et après la création du défaut

4.5.4.4 Lame en Plexiglas

La figure 4.38 illustre les franges de moiré d'une autre plaque qui est en plexiglas. La forme de ces franges informe que la surface de la lame est rugueuse.

Puis on lui a appliqué une sollicitation en créant un petit défaut, respectivement un grand défaut sur la surface, les franges de moiré se déforment tout autour de l'endroit du défaut créé. La déformation des franges est agrandie effectivement avec la taille de défaut tout autour. Ceci est observable dans la figure 4.39.



Figure 4.38. Inspection d'une lame de Plexiglas à son état initial



Figure 4.39. Inspection d'une lame de Plexiglass après avoir créé le défaut

4.5.5 Comparaison entre la topographie par moiré et les images par microscope à force atomique (AFM)

4.5.5.1 Le Microscope à force atomique (AFM)

Le microscope à force atomique a été utilisé pour détecter le profil et la topographie de la surface d'une plaque de verre

L'AFM permet de mesurer la rugosité de surface (RMS). Le Root Mean Square est une mesure statistique utilisée dans différents domaines ; la racine carrée moyenne de rugosité (Rq) est une fonction qui prend la place de ces mesures. La rugosité RMS d'une surface est similaire à la moyenne de rugosité, à la seule différence étant la quadratique moyenne des valeurs absolues de profil de rugosité de surface. La fonction Rq est définie comme suit :

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L |Z^2(x) dx|} \quad (4.10)$$

Avec $Z(x)$ la fonction qui décrit le profil de la surface analysée en termes de hauteur (Z) et la position (x) de l'échantillon sur une longueur d'évaluation "L".

4.5.5.2 Topographie de la surface de la plaque de verre

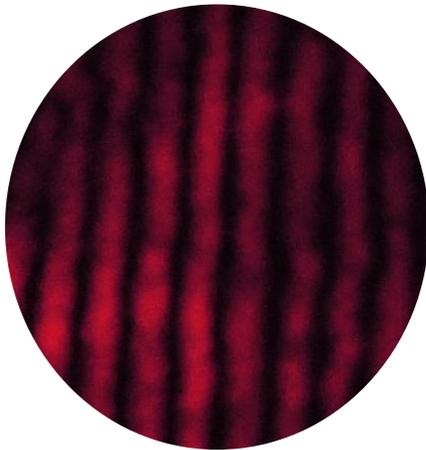
Dans ce qui suit nous allons comparer la topographie d'une plaque de verre caractérisée par les franges de moiré et par microscopie à force atomique ; les résultats sont illustrés par la figure 4.40 .

La forme des franges de moiré de la figure 4.40a est presque uniforme sur la surface palpée avec de faibles déviations ; en comparant avec l'image donnée par l'AFM (figure 4.40b), elle présente une faible rugosité sur toute la surface balayée entre 0 et 318,08 nm, ceci confirme que la rugosité est presque uniforme sur cette surface.

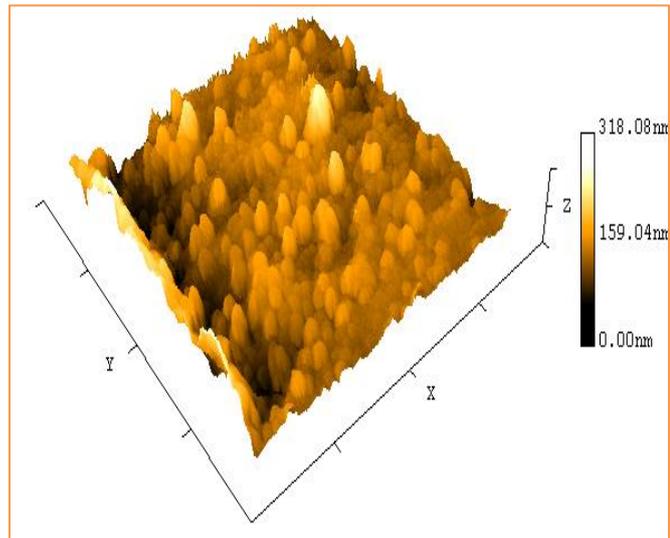
La figure 4.40c, les franges de moiré montrent que la déviation des franges n'est pas constante sur toute la surface, suivant l'image par AFM (figure 4.40d), la surface comporte des endroits avec une rugosité très élevée et d'autres moins. La rugosité atteinte est de 555,82 nm, ce qui explique que la rugosité de la surface est importante sur des endroits et faible sur d'autres endroits.

Les franges de moiré de la figure 4.40e, sont de très mauvaise qualité ce qui montre que la surface palpée est de mauvais état de surface. En comparant avec l'image donnée par l'AFM

(figure 4.40f) toute la surface est rugueuse, et elle est variable d'une zone à une autre. La rugosité mesurée de la surface balayée est entre 0 et 588,66 nm.



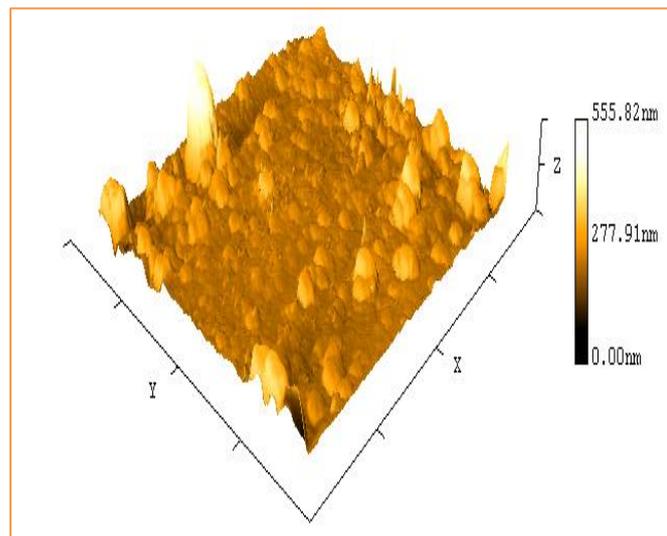
a-



b-



c-



d-

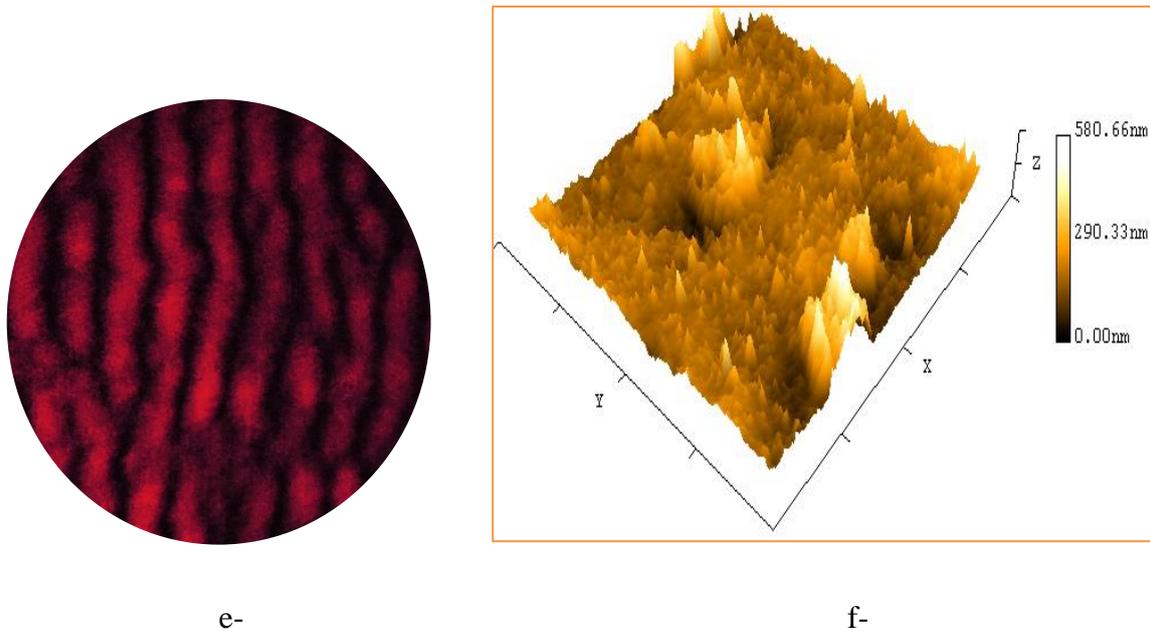


Figure 4.40. Topographie de la surface d'une plaque de verre par L'AFM et le moiré topographique

4.5.6 Technique d'indentation

4.5.6.1 Indentation

La technique d'indentation a été étudiée et largement appliquée pour détecter et déterminer les propriétés mécaniques du matériau telles que la rigidité et la dureté, en outre, la méthode d'indentation est également une méthode d'essai non destructive [99].

Le principe du test par indentation consiste à appliquer un indenteur de forme connue (boule, cône ou pyramide) sur la surface du matériau à tester. Sous l'action de la charge d'indentation, le pénétrateur s'enfonce dans le matériau, produisant des déformations élastiques et plastiques dans la zone de contact. Lorsque le pénétrateur est retiré, une indentation résiduelle est observée. Plus la charge appliquée est élevée, plus la taille de l'indentation est grande [100].

L'application de la charge d'indentation peut être continue ou discontinue. Dans le premier cas, l'indentation résiduelle est observée après retrait de l'indenteur à l'aide d'un microscope optique. Pour une indentation continue, la charge appliquée progressivement et le déplacement de la pointe du pénétrateur mesuré en temps réel en fonction de la charge.

Le test d'indentation instrumentée est actuellement largement utilisé pour diverses applications et à différentes échelles (macro, micro et nanomètre). Pour des charges n'excédant pas 1kgf, la dureté d'indentation est souvent appelée micro-indentation. La nano-indentation

fait référence à un test de dureté avec une charge inférieure à 1N et la taille de l'indentation est à l'échelle nanométrique. Actuellement, les pénétrateurs Vickers, Knoop sont fréquemment utilisés dans les tests de micro-indentation [101].

Pour la micro-indentation et la nano-indentation, une expérience spéciale et un effort considérable sont nécessaires pour obtenir une bonne précision. L'indentation est un bon test alternatif pour les matériaux fragiles. Les tests d'indentation Knoop sont des méthodes standard pour la caractérisation des matériaux en raison du fait qu'ils fournissent une méthode simple, peu coûteuse, non destructive et objective d'évaluation des propriétés de base à partir de petits volumes de matériaux [102].

La déformation résiduelle de la surface après des indentations sphériques a été étudiée en utilisant le moiré à décalage de phase et l'interférométrie Twyman Green [101]. Dans ce travail, l'intérêt s'est porté sur les tests expérimentaux d'indentation de Knoop.

4.5.6.2 Détection d'indentation de Knoop

Dans cette partie, nous nous appuyerons sur les tests expérimentaux d'indentation pour voir son effet sur les franges de moiré. Ils ont été exécutés avec l'indenteur Knoop. Le premier cas est utilisé, où l'application de la charge d'indentation est continue. L'image de l'empreinte pour les différents tests d'indentation a été vue au microscope optique. Les tests d'indentation ont été effectués sous différentes charges. Dans la première étape, la plaque du verre a été utilisée comme objet à étudier. Les franges de moiré de la plaque du verre avant l'indentation sont présentées sur la figure 4.41. Les franges sont des lignes droites parallèles et équidistantes alternativement claires et sombres. Après la première étape, sur la plaque du verre a été appliquée une indentation à l'aide de l'indenteur Knoop Tukon 2500. Cette indentation a été agrandie avec un objectif microscopique de 50x/0,55. Les images d'indentation ont été collectées respectivement avec des charges de force de 0,05 kgf, 0,2 kgf, 0,8 kgf comme donné dans les figures (42a, 43a, 44a). La topographie de la surface a été matérialisée par la déformation de la structure des franges de moiré représentées par les figures (42 b, 43 b, 44 b) en fonction des charges appliquées respectivement.

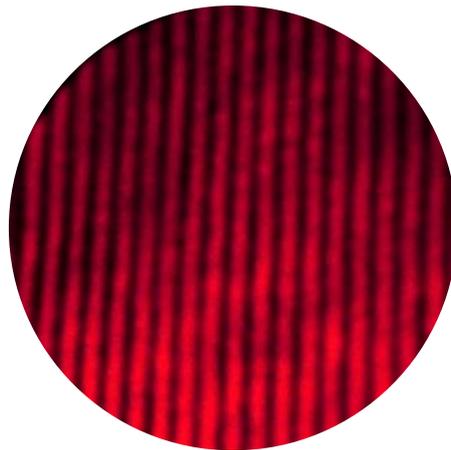
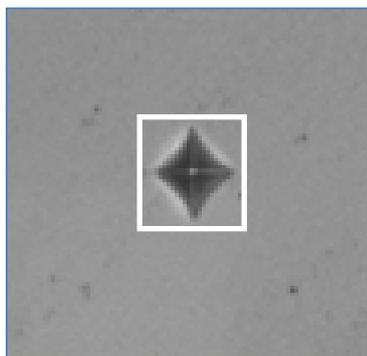
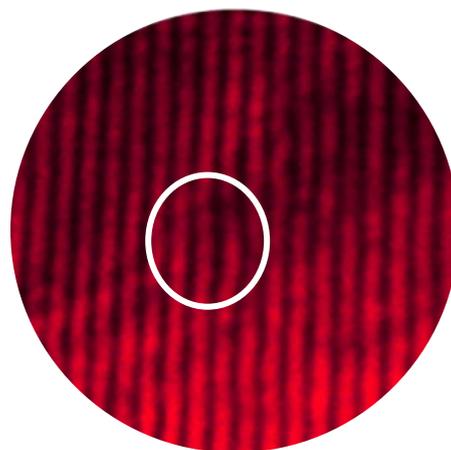


Figure 4.41. Franges de moiré avant l'indentation



a-



b-

Figure 4.42. Franges de moiré de l'échantillon après l'application de l'indentation Knoop pour la charge de force de 0,05kgf : (a) image d'indentation ;(b) Détection d'indentation par les franges de moiré

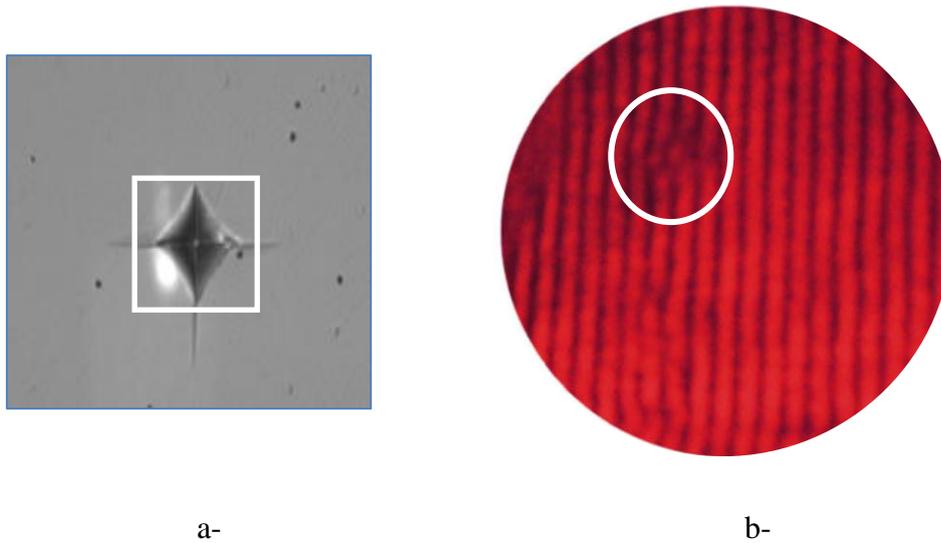


Figure 4.43. Franges de moiré de l'échantillon après l'application de l'indentation Knoop pour la charge de force de 0,2 kgf : (a) image d'indentation ;(b) Détection d'indentation par les franges de moiré

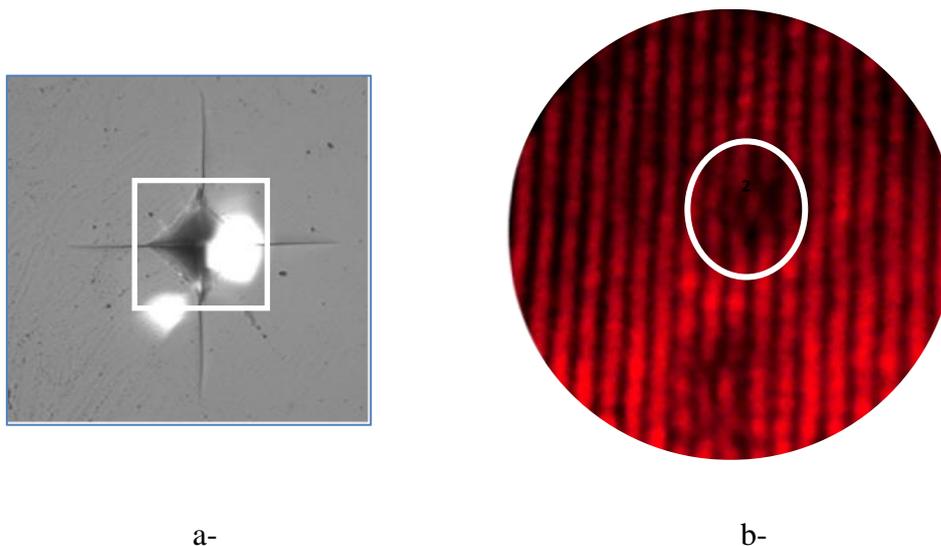


Figure 4.44. Franges de moiré de l'échantillon après l'application de l'indentation Knoop pour la charge de force de 0,8 kgf : (a) image d'indentation ;(b) Détection d'indentation par les franges de moiré

4.5.7 Discussion

Les franges de moiré, matérialisant les défauts, représentés ci-dessus sont déformées dans leur structure car le défaut est localisé sur la surface à contrôler. Cette déformation dépend de la

position et de la taille du défaut présent et l'état de surface de l'échantillon. La brillance des franges claires est dépendante de taux de transmission de la surface palpée. Cependant, ces résultats montrent que les franges de moiré matérialisent le type de défaut et qu'elles peuvent les différencier distinctement. La qualité des franges de moiré dépendante de la qualité optique de l'objet inspecté.

Les résultats de moiré obtenus dans cette section ont montré ainsi que les franges de moiré détectent la rugosité de la surface en changeant de leurs structures géométriques. La qualité des franges se change avec la qualité de la surface traversée. Quand la rugosité de la surface est élevée la qualité des franges est très mauvaise. La topographie de la surface de la plaque du verre par le microscope à force atomique montre que le montage utilisé a une capacité à détecter des défauts à l'échelle microscopique et nanométrique.

Les résultats d'indentation montrent que les franges de moiré matérialisent l'indentation en fonction de la charge appliquée, se déforment à l'endroit où l'indentation a été réalisée par l'application de l'indenteur. Au fur et à mesure que la charge augmente, les franges se déforment de plus en plus. Le changement de forme des franges est matérialisé par le fait que l'image du réseau test subit une variation par la présence de défaut. Lorsque le réseau test est projeté sur la surface de l'objet à contrôler, il se déforme selon la forme de la surface inspectée, ce qui permet d'obtenir une information sur l'état de surface de l'objet. Cependant, l'image de réseau test (réseau déformé) se superpose sur le plan de réseau référence, cette superposition provoque la génération des franges moiré qui présentent un motif d'interférence [103]. Dans la littérature, des réseaux sont imprimés à l'intérieur de l'échantillon transparent [104]. Par contre, ici, la superposition de l'image du réseau déformé avec le réseau de référence est réalisée par contact optique par transmission. Par rapport à la littérature [105] le contact optique entre les réseaux est fait par réflexion.

Les résultats des franges de moiré présentant l'indentation sont importants. Ils augmentent la précision des résultats du domaine d'indentation, et ils sont complémentaires aux résultats trouvés dans la littérature. En perspective, appréhender une étude comparative entre les propriétés mécaniques des objets transparents avec les propriétés optiques des franges de moiré. De cette manière, augmenter la précision des résultats pour caractériser mécaniquement le matériau examiné, en déterminant ses propriétés locales.

4.5.8 Méthode de mesure du défaut

4.5.8.1 Formulation

Pour valider la méthode proposée dans ce travail, il est nécessaire d'évaluer la taille du défaut présent sur la surface de l'échantillon. L'attention particulière est portée sur le défaut créé sur la surface de l'échantillon présenté sur la figure (4.31a). Ensuite deux états ont été considérés (figure 4.45), avant et après la création du défaut.

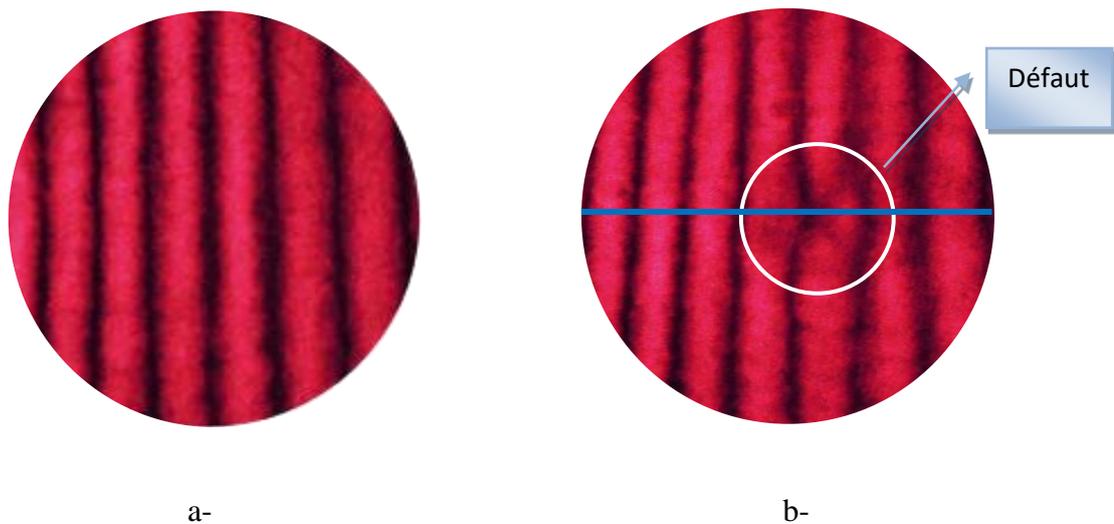


Figure 4.45. Les franges de moiré de la surface de l'échantillon: (a) avant de créer le défaut; (b) après création du défaut

La figure 4.46 montre le schéma géométrique explicatif du montage pour déterminer les relations mathématiques pour le calcul du défaut sur la surface transparente. Le principe de calcul est basé sur le principe de Ligtenberg appliqué à une surface transparente [106] comme expliqué dans la section suivante :

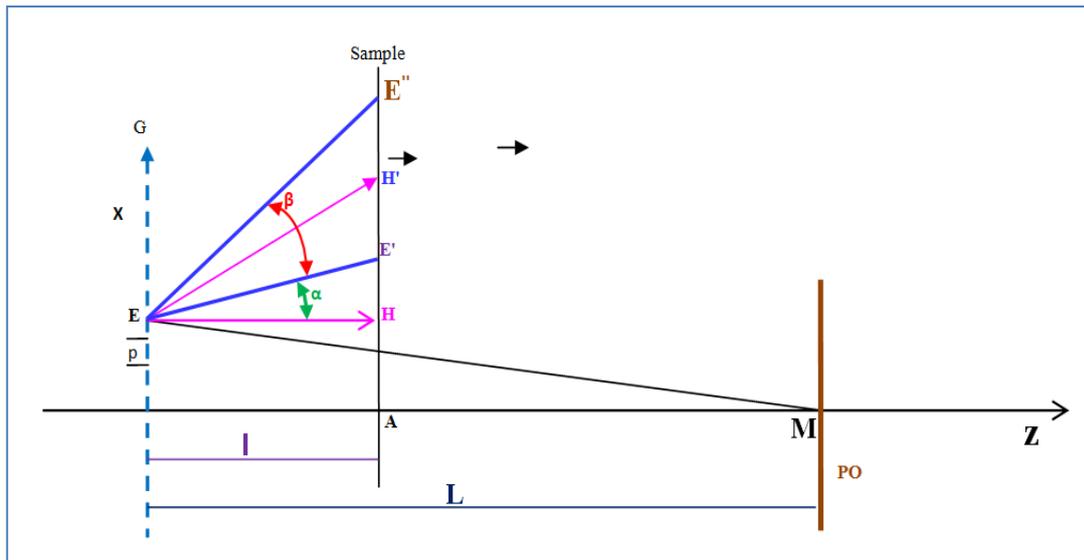


Figure 4.46. Schéma de principe de calcul

Ce diagramme montre l'espace entre le réseau test et l'échantillon (espace de projection ou espace de contrôle). Le départ se fait avec une surface avant chargement, les rayons lumineux issus du point E du réseau G de pas p arrivent au point M du plan d'observation. La normale EH du réseau est perpendiculaire à la surface de l'échantillon au point H. Le point E est projeté sur la surface à contrôler au point E', tel que l'angle HEE' soit défini par α . Après chargement, la normale subit une rotation d'angle β pour donner EH'. EE' il est également tourné d'un angle β défini par E'E''. L'angle HEE'' est défini par $(\alpha+\beta)$. Les lignes du réseau sont numérotées à partir de la ligne 0 au point A :

$$AE' = kp \text{ et } AE'' = mp \quad (4.11)$$

k, m ; nombre de ligne de réseau, et p: pas de réseau test.

Il vient alors que les franges de moiré sont issues de la différence $(m - k)p$ tel que :

$$(m - k)p = AE'' - AE' = HE'' - HE' \quad (4.12)$$

$$HE'' - HE' = l \tan(\alpha + \beta) - l \tan \alpha \quad (4.13)$$

l : la distance entre le réseau et l'échantillon et elle est ; est très grande devant les dimensions de la plaque à étudier et on suppose aussi que les déformations sont faibles, on peut donc assimiler les tangentes aux angles, donc :

$$(m-k) p = l \beta = l \frac{dz}{dx} \quad (4.14)$$

$$np = l(dz)/dx \quad (4.15)$$

La phase de l'objet est $2\pi m$ et celle de référence est $2\pi k$, La différence de phase entre les deux états est:

$$2\pi (m-k) = 2\pi n = \Delta\varphi \quad (4.16)$$

Et $\Delta\varphi = \varphi_{ob} - \varphi_{ref}$, et φ_{ob} : phase objet (après chargement); φ_{ref} : phase de référence (avant chargement).

n : nombre de franges. D'après l'équation (4.16) on peut écrire n comme suit :

$$n = (\Delta\varphi) / (2\pi) \quad (4.17)$$

Et d'après les équations (4.15) et (4.17), il en résulte la relation ci-dessous donnée par :

$$\Delta Z = dz/dx = p \Delta\varphi / 2\pi l \quad (4.18)$$

Selon le diagramme de la figure 4.46, β présente l'angle de la pente de déformation entre X et Z, présenté sous la forme dz/dx . Le calcul a été effectué à partir du montage expérimental, et a donné comme résultat la relation de l'équation (4.18) quantifiant le défaut.

Le logiciel Matlab a été utilisé pour obtenir les courbes de la figure 4.48, celle-ci présente l'intensité des franges selon l'ordonnée, et l'abscisse X indiquant le nombre de franges et la distance entre elles. Le long de cet axe la distance entre les franges, est donnée avec ce logiciel en pixels. Les maximas des courbes correspondent à des franges claires et les minimas à des franges sombres. Les distances sont prises entre les maximas et les minimas selon les étapes suivantes : la figure des franges de moiré avant la création du défaut, figure 3.45a, est transformée en gris comme donné dans la figure 4.47a, puis tracer la courbe

d'interfrange. Le même procédé appliqué aux franges de moiré de la figure 4.45a, a été appliqué aux franges de moiré après la création du défaut figure 4.45b,

La figure 4. 48, montre la superposition des deux courbes avant la création du défaut et après la création du défaut, afin de les comparer. La différence entre eux se situe dans la zone où le défaut a été créé. Il est représenté par le rectangle vert dans l'intervalle entre 75 et 175 pixels.

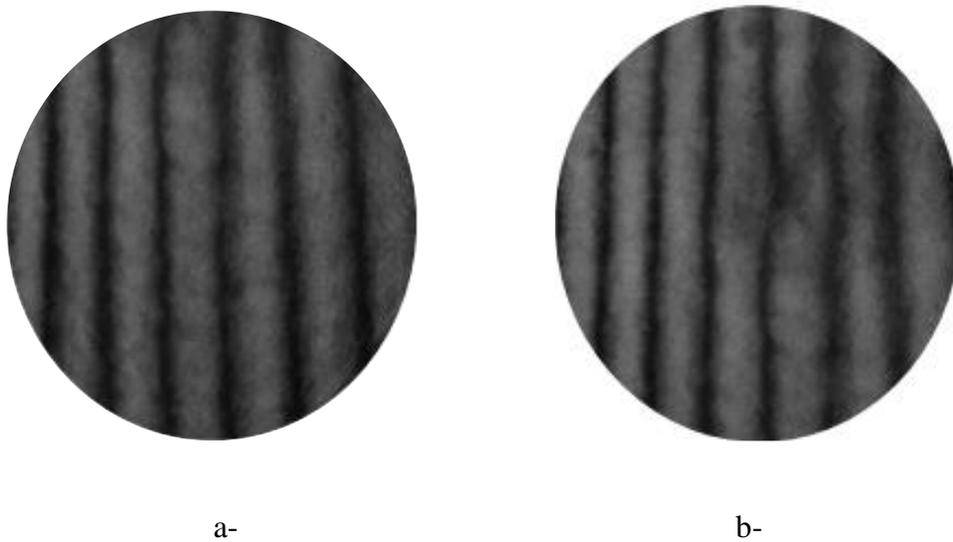


Figure 4.47. Les franges de moiré de la surface de l'échantillon : (a) avant la création du défaut; (b) après la

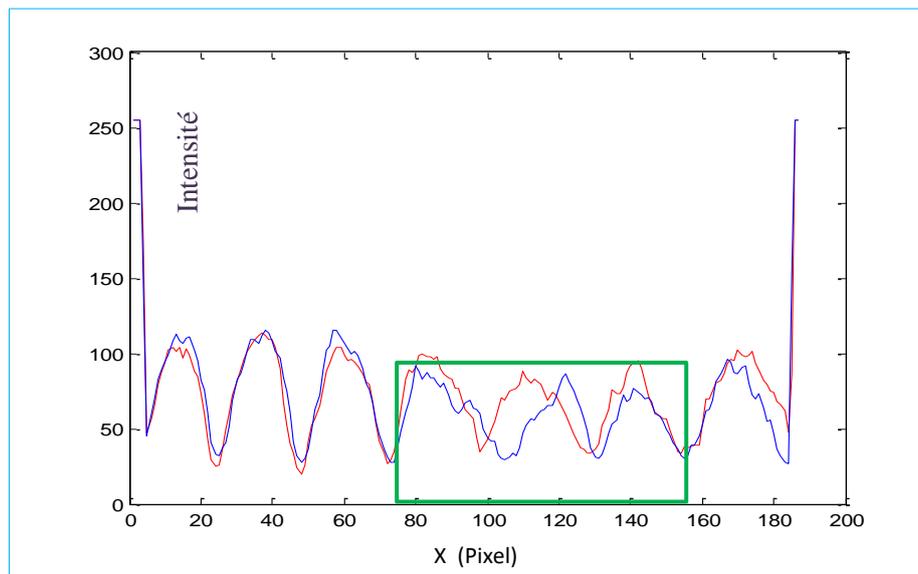


Figure4.48. Interfranges en Pixel (— avant la création du défaut et — après la création du défaut)

4.5.8.2 Phase et profondeur

La phase de la surface est calculée avant création du défaut et après création du défaut, le long de la ligne horizontale bleue selon la figure 4.45b qui passe par le défaut. Pour obtenir des résultats plus précis, les courbes de phase ont été tracées par le logiciel Excel, ils sont présentés dans la figure 4.49. Les phases de surface ont été calculées par la phase interpolée objet (PHIO), après de créer le défaut, et la phase interpolée référence (PHIR) avant de créer le défaut. La phase interpolée a été utilisée pour prendre les mêmes valeurs de X pour la phase objet et la phase de référence. Le déphasage interpolé $\Delta\varphi$ calculé entre les deux états est égal à 0 sauf à l'endroit où le défaut a été créé (zone de défaut). Les deux courbes présentent une forme similaire avec légère différence se situe entre 75 et 150 pixels. La différence de phase entre les deux états (PHIO-PHIR) détermine la phase du défaut. Cette différence de phase nous permet d'extraire la profondeur du défaut, la profondeur en chaque point de la surface testée et la largeur du défaut par rapport au volume du défaut, a été mesuré par la différence entre deux images de franges (image de franges de surface sans défaut et image de franges de surface avec défaut créé).

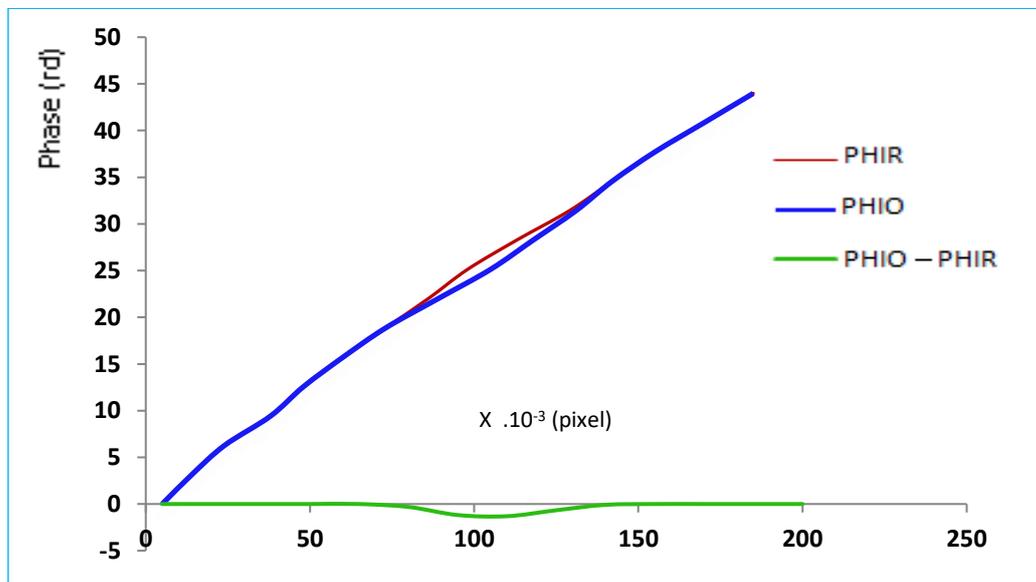


Figure 4.49. Calcul de phase interpolée: PHIR (phase interpolée avant de créer le défaut) ; PHIO (phase interpolée après de créer le défaut); PHIO-PHIR (différence de phase)

La figure 4.50 montre la courbe quantifiant la pente de défaut en 2D. Cette courbe est tracée en substituant les valeurs $\Delta\varphi$ par rapport à l'équation (4.18) pour obtenir la pente de

déformation dz/dx . Selon la figure 4.50, la pente de déformation est définie par ΔZ le long de l'axe Z, et la largeur du défaut définie par X le long de l'axe X. Alors, $\Delta Z \cdot 10^{-3}$ est compris entre 0 et $-0,002 \cdot 10^{-3}$ pixels, et X est compris entre $75 \cdot 10^{-3}$ et $150 \cdot 10^{-3}$ pixels.

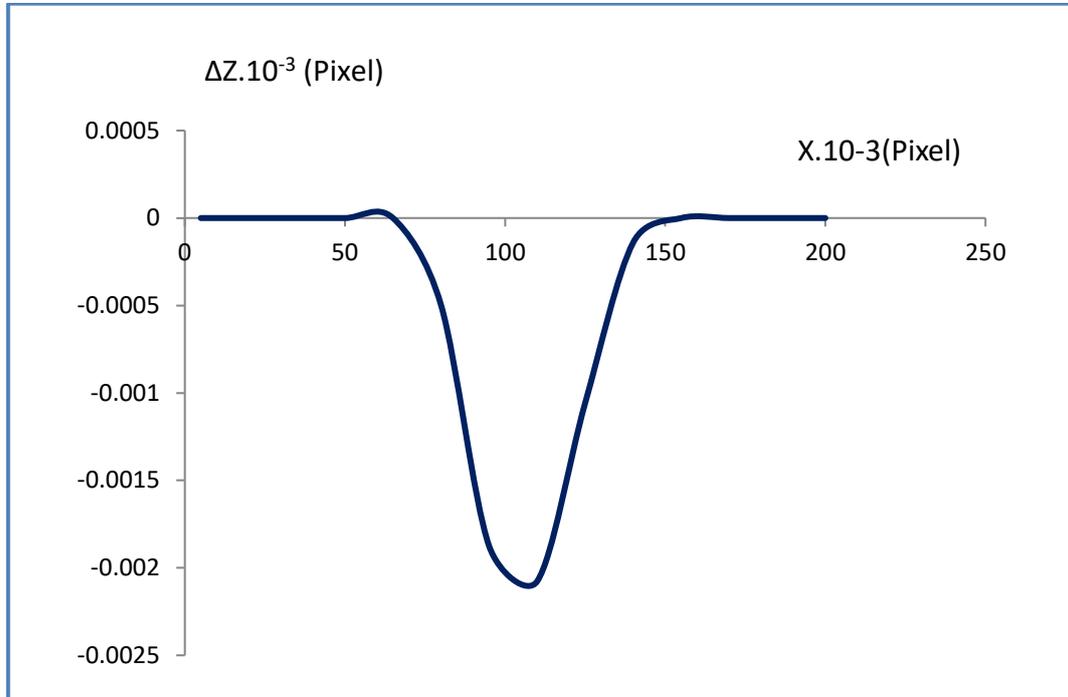


Figure 4.50. Présentation de la pente de défaut ΔZ en 2D

La courbe de la figure 4.51 présente les valeurs de défaut Z en 2D. Cette courbe est tracée en substituant les valeurs ΔZ dans l'équation suivante : $Z = \Delta X \cdot \Delta Z$ pour obtenir la profondeur de déformation Z. ΔX est la différence entre deux valeurs successives de X et elle est constante le long de l'axe X, et elle est utilisée pour prendre les mêmes valeurs de X pour la phase objet et la phase de référence. Selon la figure 4.52, la déformation est définie par Z le long de l'axe Z, et la largeur du défaut définie par X le long de l'axe X. Alors, $\Delta Z \cdot 10^{-3}$ est compris entre 0 et $-0,024 \cdot 10^{-3}$ pixels, et X est compris entre $75 \cdot 10^{-3}$ et $150 \cdot 10^{-3}$ pixels

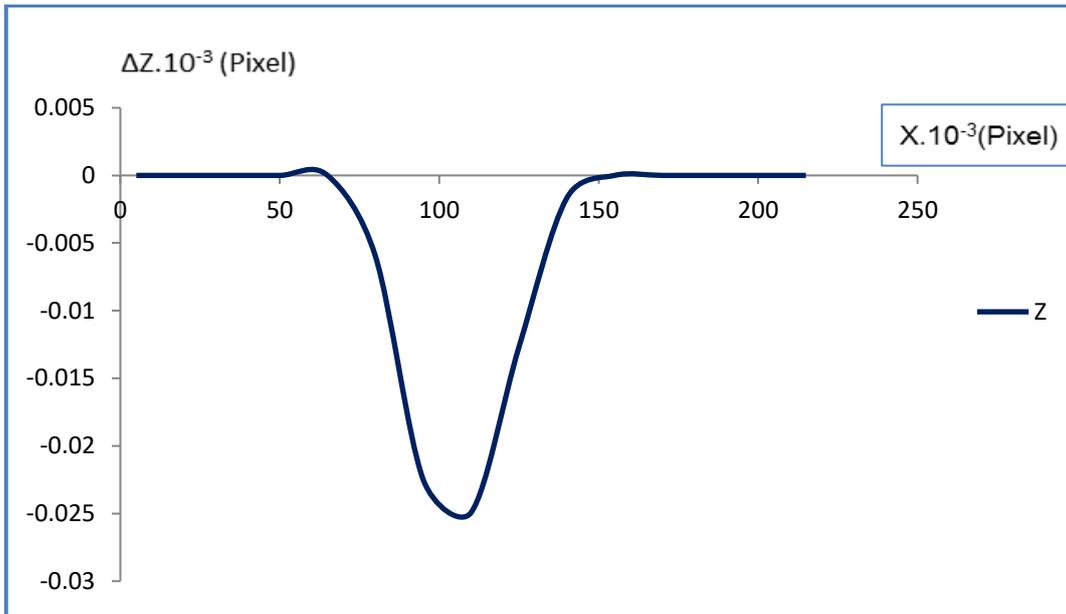


Figure 4.51. Présentation de la profondeur de défaut Z en 2D

Comme il a été expliqué, la méthode permet de quantifier le défaut selon les trois dimensions, c'est-à-dire le défaut peut être présenté en 3D. Le nombre de franges déviées donne la quantification de défaut suivant la coordonnée X, la longueur de déviation est donnée selon la coordonné Y et la profondeur de défaut suivant l'axe Z. La figure 4.52 montre la présentation en trois dimension (3D) de défaut détecté sur la surface du verre selon la figure 4.46b.

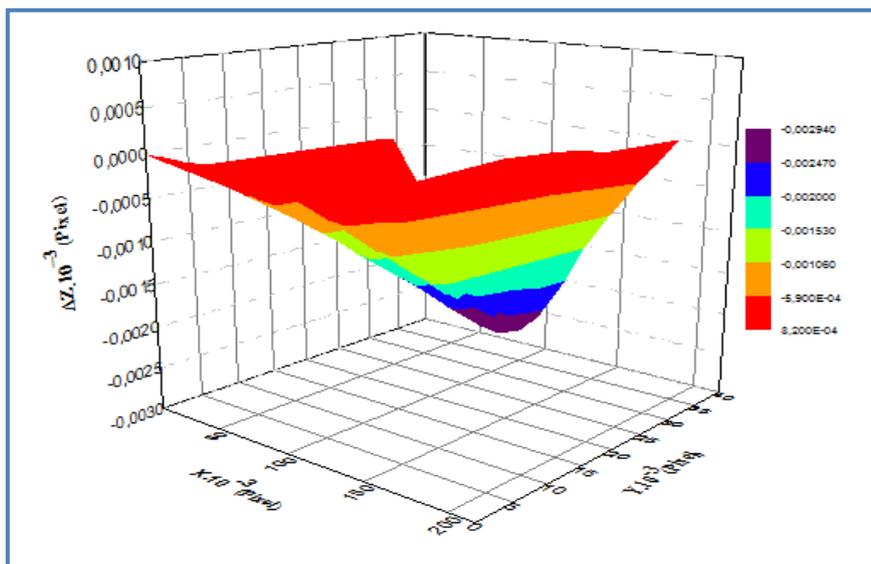


Figure 4.52. Présentation du défaut en 3D

4.5.9 Interprétation des résultats

Le montage optique développé pour le contrôle de surfaces des objets transparents, basé sur le moiré interférométrique, a permis de former un système de franges de moiré obtenu par la superposition de l'image du réseau test sur le réseau de référence.

De ces franges résulte l'information sur la surface de l'objet contrôlé de manière que si la surface de l'objet transparent traversé par l'image du réseau test est de très bonne qualité, et ne présente aucun défaut, les franges de moiré formées sont droites, parallèles, équidistantes, et continues. Par contre si la surface est de mauvaise qualité, renferme des anomalies où des défauts (de forme, de planéité, des impuretés, rugosités...), alors l'image du réseau test informe sur les irrégularités qu'elle a rencontrée dans sa trajectoire ; il en résulte des franges de moiré présentant des irrégularités et des déviations dans leurs formes.

Ces défauts ont des effets sur la structure et la qualité des franges de moiré, ce qui signifie que les caractéristiques de tout type de défaut présent sur la surface et le taux de transmission de la lumière par cette surface ont été identifiés et matérialisés qualitativement et quantitativement par des franges de moiré .

Les franges de moiré ont réagies aussi avec l'empreinte d'indentation de type Knoop, de manière que la déformation des franges est localisée dans la zone où la charge a été appliquée sur la surface, elle a varié avec la variation de la charge appliquée.

La précision de mesure de la technique est à l'échelle microscopique et nanométrique, le défaut de forme le plus profond localisé sur une surface de plaque de verre est de $0,012.10^{-3}$ pixel, ceci montre que la précision de la méthode de mesure est due au phénomène de moiré lui-même et à l'amplification du montage expérimental utilisé.

La résolution de détection du montage augmente en augmentant la fréquence spatiale des réseaux optiques utilisés, ou par l'utilisation de la technique de projection des ordres de diffraction du réseau test traversant la surface de l'échantillon à contrôler.

4.5.10 Résolution de détection du montage

La technique utilisée et le montage offrent une double possibilité, qui facilite l'amplification du défaut ainsi que sa détection même si sa taille est très petite.

- ✓ La première possibilité est que la double amplification est générée d'abord par l'effet de moiré, où la déformation microscopique est matérialisée par une déformation macroscopique des franges de moiré.

- ✓ La seconde est réalisée par le montage optique. Le contrôle d'une surface spécifique en fonction de la taille de l'ordre de diffraction transmis. Il suffit de projeter le spectre de diffraction sur la surface à contrôler, et de déplacer la surface selon les coordonnées x et y pour positionner l'ordre souhaité sur la surface transparente à contrôler. Et selon l'ordre sélectionné des harmoniques de la série de Fourier (+1 ; +2 ; +3 ; ...), la résolution de contrôle du montage sera augmentée si on laisse passer qu'un seul ordre avec l'ordre zéro. Cette technique de contrôle topographique par transmission utilisant des ordres de diffraction est nouvelle dans la littérature pour inspecter la surface d'un objet transparent à résolution accrue. De plus, la résolution de détection dépend de la fréquence spatiale des réseaux utilisés, il suffit facilement d'ajuster plusieurs ordres, en changeant donc le pas du réseau utilisé. Pour obtenir la résolution à la hauteur de notre montage utilisé, nous appliquons la seconde possibilité qui est la technique de multiplication des franges, basée sur le filtrage spatial.

4.6 Conclusion

Grâce aux montages optiques basés sur le moiré interférométrique qui sont utilisés respectivement pour la topographie de surfaces des objets réfléchissants et transparents nous pouvons mentionner les points suivants :

- Détecter, localiser et identifier différents types de défauts présents sur les surfaces étudiées.
- L'intensité lumineuse des franges de moiré claires est proportionnelle au taux de réflexion et au taux de transmission de la surface contrôlée,
- Les franges de moiré matérialisent les empreintes créées par l'indenteur de type Vickers pour les objets réfléchissants, et le type Knoop pour les objets transparents, dans la zone où l'indentation a été créée par l'application de la charge. La variation de la charge appliquée se matérialise par l'amplification de la déformation des franges, donc les franges obtenues sont par conséquent adaptées aux essais d'indentation.
- Quantifier le défaut suivant les trois dimensions (en 3D) avec une résolution de détection qui peut être dans la gamme nanométrique.
- La résolution de détection dépend de la fréquence spatiale des réseaux utilisés, et peut donc être adaptée à la taille des défauts à détecter.
- Pour détecter les plus faibles défauts sur la surface des objets réfléchissants ou les objets transparents il suffit d'augmenter la résolution de détection par l'augmentation

de la fréquence spatiale des réseaux optiques utilisés ou par l'utilisation de la technique de projection des ordres de diffraction de l'image du réseau test sur la surface à inspecter.

- Le calcul du défaut est mesuré à l'échelle microscopique et nanométrique.

Conclusion générale

L'inspection topographique des surfaces par les méthodes optiques ne se fait pas par contact, donc les profils des surfaces ne sont pas endommagés, et ont donné de bons résultats. D'autre part, l'association d'outils informatiques et de traitement d'images ont apporté des meilleures performances à ces techniques. Le traitement mathématique des données a été une étape intermédiaire entre la phase expérimentale est l'évaluation finale de la qualité de la surface ou du composant contrôlé.

Les techniques de topographie des surfaces des pièces sans contact sont nombreuses et sont devenues l'outil préféré pour le contrôle de qualité industriel de la géométrie de pièce de précision et de la finition de surface. L'objectif visé par ce travail est l'utilisation du moiré pour la mesure topographique des surfaces réfléchissantes et transparentes.

Dans la première partie du travail expérimental, un montage optique pour la topographie non destructive des surfaces réfléchissantes a été utilisé, ce montage est caractérisé par la combinaison simultanée entre le moiré de projection et le moiré de réflexion. Par la suite, nous avons développé un montage basé sur le moiré de projection pour contrôler des composants transparents.

Les méthodes de contrôle que nous proposons, dans ce travail, sont basées sur la technique de moiré interférométrique, en effet, ces méthodes consistent à projeter la structure microscopique (réseau) sur la surface à inspecter. L'image du réseau s'imprègne de la topographie de la surface et vient se superposer sur le réseau de référence pour générer les franges de moiré. Le défaut détecté sur la surface par l'image du réseau et amplifié par l'effet de moiré qui joue ici le rôle de microscope de mouvement, et le grandissement généré par le montage optique. Donc le défaut microscopique, est représenté en grandeur macroscopique, ce qui facilite la détection et le traitement de l'information.

La méthode de moiré topographique utilisée dans les deux montages nous permet de quantifier les défauts de forme détectés en 3D ; Le principe de calcul de la profondeur de défaut est basé sur le principe de Ligtenberg appliqué sur une surface réfléchissante.

Les résultats fournis par les franges de moiré présentent des variations dans leur structure qui matérialisent le type de défauts et permettent de bien les distinguer. Dans le cas de l'indentation, les franges de moiré obtenues ont été déformées là où l'indentation a été réalisée par l'application de l'indenteur. Les forces radiales d'indentation montrent leur effet sur la forme des franges de moiré. Les franges de Moiré obtenues sont donc adaptées avec les tests d'indentation effectués sous différentes charges.

Les méthodes de mesure des défauts par les montages utilisés ont donné des informations sur les défauts, et la topographie des mêmes surfaces par le microscope à force atomique ont prouvé la validité de la méthode proposée. La résolution de détection de ces configurations peut atteindre nanomètre. Elle dépend de la fréquence spatiale des réseaux utilisés, et peut donc être adaptée à la taille des défauts recherchés.

Ce procédé de contrôle simple, rapide et précis peut être exploité avantageusement dans les laboratoires de recherche comme dans l'industrie.

Car l'industrie est l'un des secteurs qui attachent une importance croissante à la qualité de surface, comme la qualité de surface des objets réfléchissants et transparents (surface des composants optiques, détection de défaut du verre et du miroir optique, planéité de surface pour les dépôts sur verre, les miroirs...). Cela nécessite le développement de nouveaux outils de caractérisation plus précis, pratiques, fiables, efficaces et faciles à utiliser avec application et à moindre coût. Ainsi, dans ce travail, le procédé proposé est facile à installer et à utiliser, ne nécessite pas d'équipements complexes, et est moins coûteux.

L'utilisation de ces montages expérimentaux permet d'inspecter des surfaces qui peuvent être de quelques mm² à des surfaces plus importantes. Actuellement, un grand effort est fait pour produire des réseaux de haute densité de plusieurs milliers de traits/mm, ainsi, la résolution de détection est élevée et par conséquent une grande précision dans la mesure.

Cette technique optique de contrôle peut être utilisée pour mesurer les déformations générées par des contraintes sur des microcomposants, et déterminer l'influence fonctionnelle, de ces variations sur la fonction.

Cette méthode a une application pratique et améliore largement la capacité d'inspection des objets réfléchissants et transparents, à l'échelle micrométrique ou nanométrique. Les résultats obtenus sont des résultats très satisfaisants avec un haut degré de précision. En fait, il suffit de comparer une image de moiré avec une image préalablement enregistrée, obtenue à partir d'une pièce considérée comme un étalon, ce qui nous permet un gain de précision, de temps et d'argent. Et aussi, pour vérifier la présence ou l'absence de défauts par les méthodes mentionnées, il suffit de placer l'échantillon à examiner dans le trajet du faisceau laser. Le grossissement obtenu peut être de 1000 fois.

Enfin, nous concluons que notre thèse s'est articulée sur le développement des techniques de topographie optique pour l'analyse et la caractérisation non destructive des surfaces optiques de précision réfléchissantes et transparentes.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Wang Z, Du H, Park S, Xie H, Three-dimensional shape measurement with a fast and accurate approach, *Applied Optics* 48 (6): 1052–1061,(2009)
- [2] Jin Y, Wang Z, Zhu L, Yang J, Research on in-line glass defect inspection technology based on Dual CCFL, *Procedia Engineering* 15 :1797 – 1801,2011.
- [3] Liu S, Liu Z), Double transmission-mediums based geometric phase analysis for determining the two surface profiles of transparent object, *Optics and Lasers in Engineering* 80 :17–23,2016.
- [4] Meguellati, S, Détermination des paramètres des matériaux par la méthode de moiré, thèse de doctorat, institut d'optique et mécanique de précision, université de sétif, 2007.
- [5] Seo K-B, Kim B-M and Kim E-S, Digital holographic microscopy based on a modified lateral shearing interferometer for three-dimensional visual inspection of noscale defects on transparent objects.*Nanoscale Research Letters* 9 (1): 471, 2014.
- [6] Lehman M, Superposition of Cantor gratings II: Fractality of the moiré profiles, *Optik* 116 (6): 281–287, 2005.
- [7] Xie H, Liu Z, Fang D, Dai F, Shang H, Development Nano-moiré method with high-resolution microscopy at FML. *J Opt. Las. Eng* 43 (8): 904–918, 2005.
- [8] Junfei L, Youqi Z, Jianglong W, Yang X, Zhipei Wu, Qinwei Ma, Shaopeng Ma, Formation mechanism and a universal period formula for the CCD moiré formation mechanism and a universal period formula for the CCD, *Optics Express* 22 (17): 20914– 20923, 2014.
- [9] Chen Y-y, Zheng G-ge, Yu Y, Gu F, Diagnosis of arc plasma jet flowing into air by integrating moiré and emission tomography, *Optics Communications* 315: 183–187, 2014.
- [10] Lee S, Talbot interferometry for measuring the focal length of a lens without moiré fringes. *Journal of the Optical Society of Korea* 19 (2): 165–168, 2015.
- [11] Saveljev V, Kim S-K, Probability of the moiré effect in barrier and lenticular autostereoscopic 3D displays, *Optics Express* 23(20): 25597–25607, 2015.
- [12] Whitehouse, David, *Surfaces and their measurement*, London: Hermes Penton science, 2002.
- [13] Bouchareine, P., *Métrie des surfaces, technique de l'ingénieur*, pp.27-37, R1390, septembre 1999.

Bibliographie

- [14] David J Whitehouse, Handbook of Surface and Nanometrology, Institute of Physics Publishing, 2003.
- [15] Raphet, B., États de surface Caractérisation, Techniques de l'Ingénieur, vol R 1 230 pp.01-22, 2005.
- [16] Tom R. Thomas, Rough Surfaces Second Edition, Imperial College Press, Sweden, (1999).
- [17] Lakhdari F, contribution à l'étude de la surface et de la subsurface optique endommagée par des abrasifs, thèse de doctorat, institut d'optique et mécanique de précision, université de Sétif, 2017.
- [18] A. Cornet & J. P. Deville, Physique et ingénierie des surfaces, EDP Sciences, (1998).
- [19] O. Çolak, C. Kurbanoğlu, & M. C. Kayacan, Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods, Materials and Design, pp. 628–657, 2007.
- [20] Hicks T R and Atherton P D, The micropositioning book, London: Penton Press, 2000.
- [21] Raphet Bernard, États de surface : Caractérisation, Technique de l'ingénieur, Doc R1230, 2005.
- [22] Brodeman R, Roughness Form and Waviness Measurement by Means of Light Scattering, Prec. Eng 8, PP. 221-226, 1986.
- [23] A. Manallah, analyse et caractérisation des surfaces Et interfaces des matériaux diélectriques, Métalliques et semiconducteurs, thèse de doctorat, institut d'optique et mécanique de précision, université de sétif, 2007.
- [24] MARIOGE (J.P.). – Contrôle des systèmes optiques. E 4 050. Traité Electronique, vol. E4 (1999).
- [25] Sirohi R.S, Optical methods of measurement wholfield techniques, chapter 9: The Moiré Phenomenon, CRC Press Taylor & Francis Group Boca London NewYork, 2009.
- [26] KJELL J. GASVIK, Optical Metrology Third Edition, John Wiley & Sons, PP173-190,2002.
- [27] K.C. Yuk, T.H. Lee, S. Chang, A moiré method of visualizing electromagnetic force lines, Optic 119, PP 473–476, 2008.
- [28] K. Creath and J. C. Wyant, Optical Shop Testing (Moiré and Fringe Projection) Techniques, Second Edition, Edition Daniel Malacara, PP 653-685, 1992.

Bibliographie

- [29] Shaolin Zhou, Yongqi Fu, Xiaoping Tang, Song Hu, Wangfu Chen, and Yong Yang, Fourier-based analysis of moiré fringe patterns of superposed gratings in alignment of nanolithography», *Opt. Soc. Am*, Vol. 16, N° 11, PP 7869 – 7880, 2008.
- [30] Francisco Jose Torcal-Milla, Luis Miguel Sanchez-Brea, Eusebio Bernabeu, Diffraction of gratings with rough edges, *Opt. Soc. Am*. Vol. 16 N°. 24, PP19757-19769, 2008.
- [31] Agnès Maurel, *Optique ondulatoire*, Belin, Paris, PP 101-102, 2003.
- [32] Éric Desmeules, Denis Roynard, *Optique ondulatoire*, Masson, Paris Milan Barcelone, 1997, PP 195-196.
- [33] Marc Séguin, *Physique XXI Tom C*.
- [34] Guillaud, P, *Microscopie Photonique Principes et Applications*, M2 Informatique – Imagerie –IBIO, Université Pierre et Marie Curie –Paris6, 2010.
- [35] E. Keren and o. Kafri, Diffraction effects in moiré deflectometry, *J.opt. Soc. Am. A*. vol. 2, N° 2, PP 111- 120, 1985.
- [36] Yves Surrel, *Les techniques optiques demesure de champ : essai de classification*, Techlab, 4c, la Tannerie BP 30055 57000 METZ, France, *Classification des techniques optiques*, 1re soumission à I2M, 2005.
- [37] Yves Surrel, *Images optiques; mesures 2D et 3D*, *Optique C1— 18851*, Polycopié de cours— 2003/2004 Conservatoire National des Arts et Métiers, chaire d'instrumentation, PP 71-72, 133- 137.
- [38] Hua Du, Huimin Xie, Zhiqiang Guo, Bing Pan, Qiang Luo, Changzhi Gu, Haichang Jiang, Lijian Rong, Large-deformation analysis in microscopic area using micro-moiré methods with a focused ion beam milling grating, *J. Opt. Las. Eng.* 45, PP 1157–1169, 2007.
- [39] Raphaël Moulart, René Rotinat, Fabrice Pierron, Gilles Lerondel, On the realization of microscopic grids for local strain measurement by direct interferometric photolithography, *Opt. Las. Eng.* 45, PP 1131–1147, 2007.
- [40] Raül R. Cordero, Manuel François, Ignacio Lira, Cristià Vial-Edwards, Whole-field analysis of uniaxial tensile tests by Moiré interferometry, *J. Opt. Las. Eng.* 43, PP 919–936, 2005.
- [41] Triconnet. K, *Identification des propriétés mécaniques à partir de mesure de champs dans un matériau multi-phase*, Thèse de doctorat, L'école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 25/06/ 2007.

Bibliographie

- [42] Oster, G., *The Science Of Moiré Patterns*, Edmund Scientific CO, Barrington, New Jersey, Copyright 1964.
- [43] B. Fabrice, C. Mario, P. Doumalin, D. Jean-Christophe, G. Arnaud, V. Valéry, *Moiré : Mesures en mécanique par méthodes optiques*, Techniques de l'Ingénieur, R 1 850v2, <https://doi.org/10.51257/a-v2-r1850>
- [44] <http://www.mathkang'cite> pdf les moiré 9 pages, Mirifiques et mirobolants moirés, © 2002, ACL -Les éditions du kangourou
- [45] Roberto Cristian Heredia Ortiz, *Topographie, par les techniques de moiré, de surface de milieux transparents comme application à la cornée humain : vérification du principe*, Thèse de grade de maîtres sciences (M. Sc.), U Laval. D de Physique, Canada, 1998.
- [46] M. Messageir, *Topographie sans contact de précision des surfaces réduites par la technique de moiré*, Thèse de doctorat, Optique et Mécanique de Précision, Sétif, 2022.
- [47] Perrochet, J.-F., *Etude de Franges de Moiré en vue d'une application en ophtalmologie*, Now. Rev. Optique, t. 4, no 3, pp.137-145, 1973.
- [48] Cloud, Gary L., *Simple Optical Processing of Moiré-grating Photographs*, Experimental Mechanics, 1980.
- [49] Gerald Oster, *Representation and solution of optical problems by moiré patter*, Micrownes Res Ins, Symp ser USA 14, PP 59-69, 1964.
- [50] Zbigniew Jaroszewicz, Andrzej Kołodziejczyk , Alejandro Mira, Rodrigo Henao Salvador Bará, *Equilateral hyperbolic moiré zone plates with variable focus obtained by rotations*, Opt. Soc. Am, Vol. 13, N° 3, PP 918 - 925, 2005.
- [51] Huimin Xie, Zhanwei Liu, Daining Fang, Fulong Dai, Haixia Shang, *Development nano-Moiré method with high-resolution microscopy at FML*, j. Opt. Las. Eng. 43, PP 904–918, 2005 .
- [52] B Raphet, *Etats de surface - Mesure*, Techniques de l'Ingénieur, pages 1–17, 2006
- [53] Gaetan Le Goic, *Qualité géométrique & Aspect des surfaces approches locales et globales*, Thèse de doctorat, Systèmes et Matériaux pour la mécatronique (SYMME), Université de Grenoble, France, 2012
- [54] [file:///microscopea force atomique.htm](file:///microscopea%20force%20atomique.htm)
[Http://engalere.free.fr/Projets/projetiut/nanotechnologies/applications et perspectives.htm](Http://engalere.free.fr/Projets/projetiut/nanotechnologies/applications%20et%20perspectives.htm).

Bibliographie

- [55] C. Bai, Scanning Tunneling Microscopy and its application, Spring Series in Surface Sciences 32, Shanghai Scientific and technical publishers, 1992.
- [56] D. Landolt, Corrosion et chimie de surfaces des matériaux, Traité des matériaux No.12, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne 1993.
- [57] G. Binning, C. F. Quate & Ch. Gerber, Atomic force Microscopy, Physical Review Letters, Vol.56, No. 9, pp. 930–933, 1986.
- [58] G. Coulon, Imagerie de surface de polymères : microscopie à force atomique, Techniques de l'Ingénieur, Traité Plastiques et Composites, Article AM 3280, Vol. AM, 2000.
- [59] A. Benatmane, Développement de la microscopie interférométrique pour une meilleure analyse morphologique des couches minces et épaisses des matériaux semiconducteurs et optiques, Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur Strasbourg, 2002.
- [60] Caractérisation_fare.pdf, Unité de caractérisation des matériaux et surfaces. MateriaNova : Centre de recherche spécialisé dans le développement et l'étude des nouveaux matériaux. Université de Mons et de la Faculté Polytechnique de Mons, Belgique.
- [61] Topographie plein champ et sans contact de films minces, 11/12/2014. www.ouestvalorisation.fr.
- [62] M. Born & E. Wolf, Principles of optics, electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction, 7th Ed., Pergamon, London, 1999.
- [63] J. P. Pérez, La microscopie : techniques d'étude en biologie, Collection 128, Nathan, Paris 1994.
- [64] D. K. Schröder, Semiconductor material and device characterization, 3^{ème} Edition Wiley-Interscience Publication, New York, 2006.
- [65] G. Roblin, Microscopies optiques à balayage, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesures et Contrôle, article R 6714, Vol. RAB, 1999.
- [66] WIKIPÉDIA, L'Encyclopédie libre, [http:// www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).
- [67] Tomasz Kotwicki, Edyta Kinel, Wanda Stryla, Andrzej Szulc1, Discrepancy in clinical versus radiological parameters describing deformity due to brace treatment for moderate idiopathic scoliosis, BioMed Central Ltd, PP1-18, 2007.
- [68] J. S. Daruwalla, P. Balasubramaniam «Moiré topography in scoliosis, it's accuracy in detecting the site and size of the curve» J. Bone and joint Surgery, Vol. 67-B, N° 2, PP 111-113, 1985.

Bibliographie

- [69] J. M. BAUMLIN, Topographie moiré par modulation de phase, *J. Opt.*, vol. 17, N° 2, PP 77-80, 1986.
- [70] Jan A. N. Buytaert, Joris J.J. Dirckx, Phase shifting moiré topography using optical demodulation on liquid crystal matrices, *J. Opt. Las. Eng.*, 03.018, PP 1016-1026, 2009.
- [71] Daria Paveleva, Ákos Antal, projection colour moiré technique for 3.D Surface reconstruction, *periodica polytechnica Ser. Mech. Eng.*, Vol. 50, N°. 2, PP 115-123, 2006.
- [72] Jussi Paakkari, On-line flatness measurement of large steel plates using moiré topography, Thèse de grade Docteur, University of Oulu. départements électrotechnique Electrical Engineering 1998.
- [73] Jianxin Gao, Wei Xu, Jianping Geng, 3D shape reconstruction of teeth by shadow speckle correlation method, *Opt. Las. Eng.* 44, PP 455–465, 2006.
- [74] J. J. C. Martínez-Antón, H.Canabal, J.A.Quiroga, E. Bernabeu, M. Álvaro Labajo, V. Cortés Testillano, Enhancement of surface inspection moiré interferometry using flexible reference gratings, *Opt. Soc. Am.*, Vol. 8, N° 12, PP 649-654.
- [75] Jose A. Gómez-Pedrero, Juan A. Quiroga, M. José Terron-Lopez, Daniel Crespo, Measurement of surface topography by RGB Shadow-Moiré with direct phase demodulation, *J. Opt. Las. Eng.* 44, PP 1297–1310, 2006.
- [76] Katia Genovese, Carmine Pappalettere, Whole 3D shape reconstruction of vascular segments under pressure via fringe projection techniques, *J. Opt. Las. Eng.* 44, PP 1311- 1323, 2006.
- [77] C Cyril Brèque, Développement et mise en œuvre de méthodes optiques pour la mesure de relief et de champ de déformations en vue de la modélisation d'organes biologiques, thèse de doctorat, Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées, l'Université de Poitiers France, 1992.
- [78] W. Van Paepegem, A. Shulev, A. Moentjens, J. Harizanova, J. Degrieck, V. Sainov, Use of projection moiré for measuring the instantaneous out-of-plane deflections of composite plates subject to bird strike, *J. Opt. Las. Eng.* 46, PP 527–534, 2008.
- [79] Weon-Jae Ryu, Young-June Kang, Sung-Hoon Baik, Shin-Jae Kang «A study on the 3-D measurement by using digital projection moiré method» *Optic* 119, PP 453– 458, 2008.

Bibliographie

- [80] Cyril BREQUE, Fabrice Bremand «application du moiré de projection et du suivi de marqueurs aux biomatériaux» XVème Congrès Français de Mécanique, LMS U. Poitiers - UMR 6610 CNRS, 181- 186, 2001.
- [81] T. A. Mykhaylyk , N. L. Dmitruk , S. D. Evans , I. W. Hamley & J. R. Henderson, Comparative characterisation by atomic force microscopy and ellipsometry of soft and solid thin films, *Surface and interface analysis*, Vol. 39, pp. 575–581, 2007.
- [82] D. Franta, & I. Ohlídal, Comparison of effective medium approximation and Rayleigh–Rice theory concerning ellipsometric characterization of rough surfaces, *Optics Communications*, Vol. 248, pp. 459–467, 2005.
- [83] J. C. Maxwell Garnett., *Colours in metal glasses and in metallic films*, *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, Vol. 203, pp. 385–420, 1994.
- [84] Violeta Kravcenkiene, Loreta Saunoriene, Minvydas Ragulskis, Arvydas Palevicius, Liutauras Ragulskis, directional conjugate smoothing of reflection moiré images, *ISSN 1392 – 124X*, Vol.34, N° 2, PP 120-124, 2005.
- [85] Gary Cloud, Réflexion Moiré, *J. Compilation. Opt. Meth, Soc. Exp. Mech. Part 23*, PP 19- 22, 2006.
- [86] Minvydas Ragulskisa, Loreta Saunorienea, Jurate Ragulskiene, Interpretation of fringes produced by time average reflection moiré on a circular disk, *J. Opt. Las*, 44, PP 1209–1218, 2006.
- [87] Joris J. J. Dirckx, Jan A. N. Buytaert, Sam A. M. Vander Jeught, Implementation of phase-shifting moiré profilometry on a low-cost commercial data projector, *J. Opt. Las. Eng.*, Vol. 48, N°2, PP 244-250, 2009.
- [88] Huimin Xie, Haixia Shang, Fulong Dai, Biao Li, Yongming Xing, Phase shifting SEM moiré method, *Opt. Las. Tech.* 36, PP 291–297, 2004.
- [89] L.R. Watkins, Phase recovery from fringe patterns using the continuous wavelet transform, *Opt. Las. Eng.* 45, PP 298–303, 2007.
- [90] Abhijit Patil, Rajesh Langoju, Pramod Rastogi, An integral approach to phase shifting interferometry using a super-resolution frequency estimation method, *Opt. Soc. Am.*, Vol. 12, N°. 20, PP 4681- 4697, 2004.
- [91] F. Nicolas, S. Coëtmellec, M. Brunel, D. Lebrun, Suppression of the Moiré effect in subpicosecond digital in-line holography, *Opt. Soc. Am.*, Vol. 15, N°. 3, PP 887- 895, 2007.

Bibliographie

- [92] Abhijit Patil and Pramod Rastogi «Estimation of multiple phase in holographic moiré in presence of harmonics and noise using minimum-norm algorithm» *Opt. Soc. Am.* Vol. 13, N° 11, PP 4070- 4084, 2005.
- [93] M. Ruyu, L. Jiniong, H. Kailang, T. Tao, Z. Yu and G. Xiaong ,, Application of moiré profilometry in three-dimensional profile reconstruction of key parts in railway,, *Sensors(Basel)*, Vol 22 N° 7, Mars 2022, 2498.
- [94] W. Qinghua, T. Hiroshi and X. Huimin, Development and applications of moiré techniques for deformation measurement, structure characterization and shape analysis, Vol.8, N°.3, *Recent patents materials science*, PP 188- 207, 2015.
- [95] Porto, F., Gurgel, Jonas.L., Russomano, T., and Farinatti, Paulo T.V., *Moiré Topography: From Takasaki Till Present Day, Recent Advances in Scoliosis* Edited by Dr Theodoros Grivas, In Tech, pp.103-118, 2012.
- [96] Porto, F., Gurgel, Jonas.L., Russomano, T., and Farinatti, Paulo T.V, *Moiré Topography: Characteristics and clinical application*, Vol 32 N° 3, PP 422-424, 2010.
- [97] J.A. Hernandez, A. N Jaramillo, Ronchi and moiré patterns for testing spherical and aspherical surfaces using deflectometry, Vol. 57 N° 34, *Applied Optics*, PP 9963- 9971, 2018.
- [98] G.Haiyn, Zh Haowen, P. Banerrjee;; *Single-shot digital phase-shifting moiré pattern topography;;* Vol.60, N° 4, *Applied Optics*, PP A84-A92, 2021.
- [99] Zhou L, Zhou J , Wang S , He L, Wang X, Evaluating the tensile deformation and stress of hyperelastic material based on transparent indentation method, *Materials and Design* 193, 108804, 2020.
- [100] Pertuz A, *L'indentation Vickers et Knoop des matériaux massifs ou revetus : dureté , tenacité et adhérence*, doctoral thesis in mechanics, University of science and technology Lille 11/12/2003.
- [101] Feng C, *Development of a transparent indenter measurement system and indentation analysis for material mechanical property evaluation*, Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. Department of Mechanical and Aerospace Engineering West Virginia University Morgantown, West Virginia, 2005.
- [102] Zisis Th, Giannakopoulos A.E, *Analysis of Knoop indentation strain hardening effects*, *International Journal of Solids and Structures* 48: 3217– 3231, 2011.

Bibliographie

- [103] Saveljev V, Kim J, Son J-Y, Kim Y, Heo G, Static moiré patterns in moving grids, *Scientific Reports*10:14414. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70427-x>.
- [104] Xiaohua Tan, Wei Qiu, Yilan Kang, Donghui Fu, Xiaolei Li, Xia Xiao, Experimental Analysis On Soft Materials contact Problems by Digital Moiré and Embedded –Grating Methods, *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 28, No. 3, 2015.
- [105] Messagier M, Meguellati S, Mahgoun H, Fringe pattern denoising using two-dimensional variational mode decomposition (2d-vmd) method for inspection of flatness of reduced surfaces, *Experimental Techniques* 46:27–41, 2022.
- [106] R. Meziane, S Meguellati, M. Messagier, Precision inspection of transparent component quality, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, Vol 125, N° 3, PP 1731- 1741, 2023.

Résumé

Le présent travail a pour objectif la topographie non destructive des surfaces par le moiré interférométrique. Ce pendant nous avons développé des montages expérimentaux basés sur le moiré interférométrique pour la topographie non destructive et le contrôle des surfaces réfléchissantes et transparentes. Cette méthode de contrôle offre des performances extrêmement importantes qui donnent des possibilités de détecter et de mesurer des défauts d'une grandeur submicrométrique sur des surfaces de l'ordre de quelques mm² jusqu'à des surfaces plus importantes. Le principe de ce travail consiste à projeter la structure microscopique (réseau) sur la surface à inspecter. L'image du réseau s'imprègne de la topographie de la surface et vient se superposer sur le réseau de référence pour générer les franges de moiré. Le défaut détecté sur la surface par l'image du réseau est amplifié par l'effet de moiré et le grandissement généré par le montage optique. Donc le défaut microscopique est représenté en grandeur macroscopique, ce qui facilite la détection et le traitement automatique des données.

Mots-clés : Moiré, réseaux, diffraction, topographie non destructive, surface.

Abstract

The objective of this work is the non-destructive topography of surfaces by interferometric moiré. However, we have developed experimental setups based on interferometric moiré for non-destructive topography and the control of reflective and transparent surfaces. This control method offers extremely high performance, which gives the possibility of detecting and measuring defects of a submicrometric size on surfaces of the order of a few mm² up to larger surfaces. The principle of this work consists in projecting the microscopic structure (grating) on the surface to be inspected. The grating image is impregnated with the topography of the surface and is superposed on the reference grating to generate the moiré fringes. The defect detected on the surface by the grating image is amplified by the moiré effect and the magnification generated by the optical setup. Therefore, the microscopic defect is represented in macroscopic magnitude, which facilitates the detection and automatic processing of the data.

Keys words: moiré, gratings, diffraction, non-destructive topography, surface.

المخلص

الهدف من هذا العمل هو الطوبوغرافية الغير المدمرة للأسطح بواسطة المخير التداخلي. لذا، فقد قمنا بتطوير إعدادات تجريبية تعتمد على المخير التداخلي من أجل تبوغرافية الغير المدمرة والتحكم في الأسطح العاكسة والشفافة. توفر طريقة التحكم هذه أداءً عاليًا للغاية مما يتيح إمكانية اكتشاف وقياس العيوب ذات الحجم دون الميكرومتر على الأسطح التي يتراوح حجمها بين بضعة مم² وحتى الأسطح الأكبر. يتمثل مبدأ هذا العمل في إسقاط الهيكل المجهرى (الشبكة) على السطح المراد فحصه. يتم تشريب الصورة المحززة مع تضاريس السطح ويتم تثبيتها على الشبكة المرجعية لتكوين اهداب المخير. يتم تضخيم الخلل المكتشف على السطح بواسطة الصورة المحززة بتأثير المخير والتكبير الناتج عن الإعداد البصري. لذلك يتم تمثيل الخلل المجهرى بالحجم العياني، مما يسهل الكشف والمعالجة الآلية للبيانات.

الكلمات المفتاحية : المخير، حواجز شبكية، حيود، طوبوغرافية الغير مدمرة، سطح.