

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

**MESSAGIER Meriem**

## THÈME

***Topographie sans contact de précision  
des surfaces réduites par la technique de moiré***

Soutenue le : 28 /02 / 2022

### Devant le Jury :

Mr. Chorfa Abdellah	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. Bencheikh Abdelhalim	Prof	Université BBA	Examineur



*À travers ce travail je remercie la principale personne 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. Chorfa Abdellah** de l'institut d'optique et mécanique de précision de Sétif de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse, j'exprime ma reconnaissance au **Pr. Bencheikh Abdelhalim** 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.*

*Ma profonde gratitude va vers ma chère amie et accompagnante d'études universitaires **Dr. Mahgoun Hafida, MCA** à l'institut d'optique et mécanique de précision qui était toujours présente et disponible pour m'offrir sa précieuse aide, elle nous a quitté dernièrement «**رحمها الله وأسكنها فسيح جنانه**».*

*Je remercie également mes collègues de laboratoire les Doctorantes Meziane Rahima et Gharzouli Asma avec qui j'ai participé aux conférences.*

*Je remercie grandement les personnes de l'institut d'optique et mécanique de précision, pour les échantillons qu'elles m'ont apportés pour enrichir ce travail, mes collègues les doctorantes Mounir Hassena et Hakimi soumaya, ainsi la responsable de laboratoire de conception Mezghiche Fouzia, sans oublier l'étudiante Master 2 en métrologie M<sup>elle</sup> Benyamina samah promotion 2017-2018.*

*J'avoue un grand et chaleureux merci à toutes les personnes qui me connaissent soit de l'institut d'optique et mécanique de précision soit hors, de m'avoir encouragé et de me souhaiter la réussite du fond de leur cœur.*

*Je tiens également à remercier toute personne qui m'a donné la moindre aide trouve ici mon profond respect et ma reconnaissance. En fin j'ai l'honneur de remercier toute personne qui trouvera dans ce mémoire un pas de recherche.*

**Messagier Meriem** . 



# Dédicaces



*Je dédie ce travail :*

*En hommage à mon défunt père et défunte mère,  
défunt frère et ma défunte sœur, Qui m'ont apporté  
toute aide durant mes études je leur doit ma présente  
réussite.*

*À ma chère sœur et Mes chers frères qui n'ont jamais  
cessé de m'encourager durant la préparation de cette  
thèse et leur soutien de m'aider à la terminer.*



# TABLE DES MATIERES

<i>Introduction générale</i> .....	1
Chapitre 1 : Technique de moiré.....	5
1.1. Le moiré .....	5
1.1.1. Généralités .....	5
1.2. Franges de moiré .....	6
1.3. Franges de moiré générées par différentes structures .....	7
1.3.1. Introduction .....	7
1.4. Réseau de diffraction.....	11
1.4.1. Généralités .....	11
1.4.2. Réseaux par transmission .....	12
1.4.3. Réseaux par réflexion.....	13
1.4.4. Relation fondamentale des réseaux .....	13
1.5. Superposition de deux réseaux de lignes parallèles de même pas .....	15
1.5. 1. Description mathématique du phénomène de moiré .....	15
1.5.2. Superposition de réseaux linéaires de transmission sinusoïdales [26].....	20
1.6. Figure de diffraction d'un seul réseau .....	21
1.6.1. Théorie d'Abbe.....	21
1.6.2. Spectre de diffraction d'un réseau.....	23
1.7. Filtrage optique dans le plan de Fourier.....	25
1.7.1. Cas de réseau et trame .....	25
1.7.2. Cas d'une grille [15].....	26
1.8. Les facteurs influençant l'observation des franges de moiré.....	27
1.8.1. Influence du mode d'éclairage.....	27
1.8.2. Effet de diffraction .....	29
1.8.3. Contraste des franges .....	34
1.9. Sensibilité.....	35
1.10. Les techniques de moiré d'exploration .....	35
1.11. Topographie de Moiré .....	35
1.11.1. Généralités .....	35
1.11.2. Principe.....	36
1.11.3. Localisation des franges .....	36
1.11.4. Moiré de projection .....	36
1.11.5. Moiré d'ombre .....	38

1.11.6. Moiré de réflexion.....	40
1.12. Moiré interférométrique .....	41
1.12. 1. Principe.....	41
1.12.2. Technologie portative de l'interférométrie de moiré.....	42
1.13. Obtention d'un moiré holographique.....	44
1.13.1. Principe[59] .....	44
1.14. Champ d'applications de moiré .....	45
1.15. Conclusion.....	47
Chapitre 2 : Techniques de topographie de surface .....	49
2.1. Introduction .....	49
2.2. Techniques optiques de topographie de surface .....	50
2.2.1. Généralités .....	50
2.2.2. Microscopie à Force Atomique (AFM) .....	51
2.2.3. Système de mesure topographique par triangulation .....	54
2.2.4. Le Premier microscope double cœur associant la technologie confocale et interférométrie [74] .....	55
2.2.5. Principe de base de la technique optique d'Optimap <sup>TM</sup> [75].....	59
2.2.6. Microscope d'interférences [62] .....	60
2.2.7. Profilomètre mécanique .....	61
2.2.8. Profilomètres Optiques .....	61
2.2.9. Topographie plein champ et sans contact de films minces nanométriques par interférométrie numérique couleur [82] .....	66
2.3. Notion de défauts .....	67
2.3.1. Caractérisation de défaut de surface .....	69
2.3.2. Classification des défauts topographiques .....	70
2.3.3. Interaction lumière-surface [91] .....	71
2.3.4. Technique de détection de tous petits défauts et micro défauts [92] .....	72
2.3.5. Corrélation d'images .....	72
2.3.6. Interférométrie holographique .....	73
2.3.7. Contrôle par réflexions des franges .....	74
2.4. Topographie de surface par moiré .....	75
2.4.1. Généralités .....	75
2.4.2. Détermination de la topographie de moiré .....	75
2.4.3. Moiré projeté (moiré de projection).....	77

2.4.4. Moiré d'ombre .....	78
2.4.5. Topographie de surface par la méthode de moiré de réflexion [24].....	79
2.5. Les applications de la topographie de moiré.....	80
2.6. Conclusion.....	80
Chapitre 3 : Topographie des surfaces réduites par la technique de moiré .....	83
3.1. Introduction .....	83
3.2. L'objectif de la partie expérimentale.....	84
3.2.1. Introduction .....	84
3.2.2. Etat du problème .....	84
3.3. Développement du système de contrôle et techniques de mesures .....	85
3.4. Choix de la solution optimale .....	90
3.4.1. Choix de la solution .....	90
3.4.2. Principe de fonctionnement.....	90
3.4.3. Sensibilité de la méthode et résolution de détection.....	91
3.4.4. Topographie et détection des défauts de formes des surfaces réduites.....	91
3.4.5. Echantillons traités.....	92
3.5. Résultats expérimentaux .....	92
3.5.1. Franges de moiré de la surface du miroir optique plan .....	92
3.5.1.1. Influence de l'angle entre les réseaux sur l'orientation des franges de moiré.....	92
3.5.1.2. Franges de moiré du miroir optique plan obtenues pour le cas du déplacement du plan d'observation .....	94
3.5.2. Franges de moiré de la surface des différentes plaques réfléchissantes .....	95
3.5.3. Franges de moiré d'un film transparent mince pour habillement.....	101
3.5.4. Franges de moiré d'un film transparent mince pour recouvrement de nourriture .....	102
3.5.5. Comportement des franges de moiré via le défaut crée à la surface de l'objet.....	103
3.5.6. Etude de la planéité des différentes surfaces réfléchissantes .....	106
3.5.7. Influence de l'angle entre les deux réseaux sur le défaut .....	110
3.5.8. Contrôle de surface des différentes lames de verre.....	110
3.5.9. Influence de l'angle entre les deux réseaux sur la détection du défaut d'une lame de verre .....	112
3.5.10. Détection et localisation de la forme du défaut sur la surface à inspecter .....	115
3.5.11. Mesure des défauts de formes .....	123
3.6. Effet du bruit sur les franges de moiré .....	125
3.6.1. Détection et localisation du défaut.....	125

3.6.2. Solution optimisée .....	125
3.7. Interprétations des résultats .....	132
3.8. Conclusion.....	133
Conclusion générale.....	135
<i>Bibliographie</i>  .....	138
Listes des Conférences.....	145

## Listes des figures

Figure 1.1. Chemise rayée montrant l'effet de moiré [9] .....	6
Figure 1.2. Franges de moiré obtenues par superposition de deux peignes .....	6
Figure 1.3. Franges de moiré formées par une haie et son nombre .....	7
Figure 1.4. Moiré Antique [15] .....	7
Figure 1.5. Moiré à courbes de Gauss .....	8
Figure 1.6. Franges de moiré obtenues par superposition de deux cercles concentriques .....	8
Figure 1.7. Franges de moiré de forme d'araignée.....	9
Figure 1.8. Franges de moiré obtenues par superposition de deux cercles de Fresnel .....	9
Figure 1.9. Franges de moiré entre deux réseaux de traits de pas et d'orientation différents.....	10
Figure 1.10. Franges de moiré obtenues par superposition de deux réseaux de lignes parallèles de pas légèrement différents .....	10
Figure 1.11. Franges de moiré formées par superposition de deux couches se composant des courbes avec les modèles identiques d'inclination .....	11
Figure 1.12. Réseau de diffraction [21].....	12
Figure 1.13. Réseau par transmission.....	13
Figure 1.14. Réseau par réflexion .....	13
Figure 1.15. Relation fondamental du réseau de transmission .....	14
Figure 1.16. Réseau par réflexion .....	14
Figure 1.17. Réseau (vue en coupe) [23] .....	14
Figure 1.18. Superposition de deux réseaux de lignes parallèles de même pas .....	15
Figure 1.19. Modèle des franges de moiré entre deux réseaux linéaires .....	16
Figure 1.20. Réseau vertical(a), réseau incliné(b), franges de moiré (c): résultat de la superposition. ....	17
Figure 1.21. Présentation des franges de moiré dans un repère x et y [25] .....	18
Figure 1.22. La lumière diffractée par un réseau en faisceaux de différents ordres de diffraction .....	22
Figure 1.23. Deux premiers ordres de diffraction traversent l'objectif (lentille) .....	22
Figure 1.24. Spectre de diffraction d'un réseau éclairé par faisceau laser [28].....	23
Figure 1.25. Spectre du réseau forme un ensemble de points discrets [30].....	23
Figure 1.26. Diffraction d'un réseau de bandes verticales parallèles à l'axe des Y .....	24
Figure 1.27. Spectre de diffraction d'un réseau (de bandes horizontales) au plan de Fourier [32,33] .....	24
Figure 1.28. Filtrage dans le plan de Fourier et image correspondante du réseau [34] .....	25
Figure 1.29. Image d'une trame en fonction de divers filtrage [34,35].....	26
Figure 1.30. Image de la grille et composantes spectrales dans le plan focal .....	26
Figure 1.31. Aspect de l'image avec une fente placée à l'horizontale .....	27
Figure 1.32. Aspect de l'image avec une fente retournée à la verticale.....	27
Figure 1.33. Franges de moiré observées en mode d'éclairage incohérent à différents angles de rotation $\theta$ par superposition directe de deux réseaux de 25 traits/mm.....	28
Figure 1.34. Franges de moiré obtenues en mode d'éclairage cohérent.....	29
Figure 1.35. Conditions pour l'observation du phénomène de diffraction [38] .....	30
Figure 1.36. Diffraction de la lumière passant par une fente fine [39].....	31
Figure 1.37. Influence du pas du réseau sur la figure de diffraction [40].....	31
Figure 1.38. Deux réseaux séparés par un coin d'air [41].....	32
Figure 1.39. Schéma présentant le principe du contact optique de deux réseaux.....	34
Figure 1.40. moiré de projection .....	37
Figure 1.41. Les franges de moiré montrent la différence entre deux surfaces sphériques [49] .....	38
Figure 1.42. Moiré d'ombre [52] .....	39
Figure 1.43. Principe du moiré d'ombre[26].....	40
Figure 1.44. Principe de la méthode de moiré de réflexion.....	41

Figure 1.45. Moiré interférométrique [56] .....	42
Figure 1.46. Technologie portative de l'interférométrie de moiré (PEMI 2010-X) [57,58] .....	43
Figure 1.47. Schéma de principe du portative de l'interférométrie de moiré.....	44
Figure 1.48. Schéma de moiré holographique.....	45
Figure 1.49. Technique de moiré d'ombre dans la médecine [47] .....	47
Figure 2.1. Microscope à force atomique [70] .....	51
Figure 2.2. Microscope à force atomique (institut d'optique et mécanique de précision).....	52
Figure 2.3. Principe de l'AFM [71] .....	53
Figure 2.4. Fonctionnement de l'AFM [70].....	53
Figure 2.5. Topographie d'une feuille d'aluminium obtenue par AFM [70] .....	54
Figure 2.6. Schéma de principe.....	55
Figure 2.7. Le profilomètre 3D, LEICA DCM 3D [74] .....	56
Figure 2.8. Principe du profilomètre 3D, Leica DCM 3D [74].....	58
Figure 2.9. Profilométrie confocale par le cas de l'interférométrie à décalage de phase (PSI) et de l'interférométrie a balayage vertical (VSI) .....	59
Figure 2.10. Modes de fonctionnement du microscope .....	59
Figure 2.11. Schéma de principe de base de la technique optique [75].....	60
Figure 2.12. Microscope d'interférence Zygo [62].....	61
Figure 2.13. a) Topographie de la déformation d'un capteur souple, b) cartographie des contraintes supportées par un film mince [76].....	61
Figure 2.14. Application horlogerie, image 3d - 470 $\mu\text{m}$ x 350 $\mu\text{m}$ , z : 20 $\mu\text{m}$ [77] .....	62
Figure 2.15. Profilomètre optique Micro XAM-800.....	62
Figure 2.16. Profilomètre optique Wyko NT 1100 [79,80].....	64
Figure 2.17. Principe du microscope interférométrique [81] .....	64
Figure 2.18. Étalement d'une huile silicone sur du verre.....	65
Figure 2.19. Mesure d'une marche de couche de langmuir-blodgett. 20 couches d'acide arachidique ont été déposées (l'échantillon fait environ 240 x 180 $\mu\text{m}$ ).....	65
Figure 2.20. Mesure de rugosité d'une surface de polymère cristallisé (pp) [79] .....	65
Figure 2.21. Principe de l'interférométrie numérique couleur .....	66
Figure 2.22. Différents types de défauts de surface [85].....	67
Figure 2.23. Metrotom de Carl Zeiss .....	68
Figure 2.24. Loi de la réflexion de Descartes.....	69
Figure 2.25. Les quatre premiers ordres de défauts superficiels. ....	71
Figure 2.26. Phénomène de la réflexion [91] .....	71
Figure 2.27. Détection d'un tout petit défaut au moyen d'un éclairage par bandes lumineuses [92].....	72
Figure 2.28. Corrélation d'images .....	73
Figure 2.29. Interférométrie holographique [93].....	73
Figure 2.30. Contrôle par réflexion des franges.....	74
Figure 2.31. Principe de contrôle par réflexion des franges [94] .....	75
Figure 2.32. Déformation d'un réseau liée à l'inclinaison surface.....	76
Figure 2.33. Principe de la technique de topographie de moiré de projection .....	77
Figure 2.34. Une grille projetée sur morpho cypris [96].....	77
Figure 2.35. Moiré de projection l'ensemble est piloté par ordinateur [96].....	78
Figure 2.36. Observation directe d'un essai de surface plate avec indentation de 350 $\mu\text{m}$ .....	79
Figure 2.37. Topographie de surface via moiré de réflexion [24].....	80
Figure 3.1. Première variante .....	85
Figure 3.2. Deuxième variante .....	86
Figure 3.3. Troisième variante .....	87
Figure 3.4. Quatrième variante.....	88
Figure 3.5. Cinquième variante .....	89

Figure 3.6. Franges de moiré obtenues à différents angles de rotation entre les deux réseaux .....	93
Figure 3.7. Franges de moiré du miroir optique plan (état avant le déplacement du plan d'observation) .....	95
Figure 3.8. Franges de moiré du miroir optique plan après deux différents déplacements du plan d'observation .....	95
Figure 3.9. Franges de moiré de surface des différentes plaques inoxydables .....	96
Figure 3.10. Franges de moiré de deux plaques en mélange d'aluminium .....	97
Figure 3.11. Franges de moiré de la première face de la plaque métallique .....	98
Figure 3.12. Franges de moiré de la deuxième face de la plaque métallique .....	99
Figure 3.13. Franges de moiré de la surface de deux CD différents .....	100
Figure 3.14. Franges de moiré de la surface d'une plaque réfléchissante avant et après sollicitation.....	101
Figure 3.15. Housse plastique en rouleau pour vêtements [102].....	101
Figure 3.16. Franges de moiré de la surface de la housse plastique en rouleau pour vêtements .....	102
Figure 3.17. film transparent mince pour recouvrement de nourriture [103].....	102
Figure 3.18. Franges de moiré du film transparent mince pour recouvrement de nourriture .....	103
Figure 3.19. Franges de moiré pour la surface d'une plaque en verre et une en acier .....	104
Figure 3.20. Franges de moiré de la surface de plexiglass .....	105
Figure 3.21. Détection et localisation de la forme des défauts sur la surface inspectée du plexiglass .....	106
Figure 3.22. Franges de moiré de la surface du miroir optique plan.....	107
Figure 3.23. Franges de moiré pour balayage de surface du miroir ordinaire 1 .....	108
Figure 3.24. Franges de moiré de la surface du miroir ordinaire 2 .....	109
Figure 3.25. Franges de moiré de la surface du miroir ordinaire 3 .....	109
Figure 3.26. Influence de l'angle de rotation sur le défaut (film transparent mince en plastique) .....	110
Figure 3.27. Franges de moiré de la surface de la première lame de verre à faces parallèles .....	111
Figure 3.28. Franges de moiré de la surface de deux lames de verre (effet de l'outil de rodage) .....	111
Figure 3.29. Franges de moiré de la surface d'une lame de verre (fissurée) à faces parallèles.....	112
Figure 3.30. Franges de moiré de la surface d'une lame de verre mince .....	113
Figure 3.31. Effet de variation d'angle entre les réseaux sur la détection du défaut .....	114
Figure 3.32. Obturer un des ordres.....	115
Figure 3.33. Localisation de deux défauts de tailles différentes sur la surface inspectée.....	115
Figure 3.34. Localisation de défaut composé.....	116
Figure 3.35. Détection différents défauts voisin sur la même surface inspectée.....	116
Figure 3.36. Localisation de faibles défauts sur chaque surface inspectée .....	117
Figure 3.37. Localisation de faibles défauts voisins sur la même surface.....	117
Figure 3.38. Localisation de défauts sur la surface inspectée par ne pas laissé passer un des ordres (central ou +1).....	118
Figure 3.39. Principe de sélection des ordres.....	119
Figure 3.40. Échantillon en céramique.....	120
Figure 3.41. Franges de moiré projetées sur la surface d'un échantillon en céramique .....	120
Figure 3.42. Franges de moiré du miroir optique plan .....	120
Figure 3.43. Deux lames circulaires à faces parallèles en polymère .....	121
Figure 3.44. Franges de moiré de la surface de deux lames circulaires à faces parallèles en polymère .....	122
Figure 3.45. Détection par deux ordres (central et +1) du retouche locale du doigt sur la surface inspectée d'une lame de verre.....	123
Figure 3.46. Franges de moiré par amplification de sensibilité .....	124
Figure 3.47. Franges de moiré de la surface du miroir optique plan.....	126
Figure 3.48. Signal du profil pour le miroir sans défaut .....	128
Figure 3.49. Signal du profil pour le miroir avec défaut.....	129
Figure 3.50. Images résiduelles obtenues par trois manières différentes : .....	130
Figure 3.51. Franges de moiré débruitées pour le plastique avec défaut.....	131
Figure 3.52. Profil pour le plastique avec défaut .....	131

Figure 3.53. Images Résiduelles du film en plastique transparent mince avec défaut ..... 132

## *Introduction générale*

Les surfaces fonctionnelles des composants optiques et mécaniques sont importantes pour garantir la fonction avec précision, ces mêmes surfaces sont aussi des zones vulnérables, qui sont soumises à plusieurs contraintes (corrosion, oxydation, usure, contamination...). C'est aussi des zones déterminantes dès qu'on aborde des problèmes de formes, de réflexion, de contact, d'adhérence, de lubrification, de frottement. La connaissance précise de la qualité de la surface par une observation, et une analyse à l'échelle microscopique constitue l'étape nécessaire pour assurer la qualité des produits, avec toutes les conséquences commerciales qui en découlent [1]. Dans l'ensemble des secteurs industriels, les surfaces des matériaux doivent généralement être contrôlées régulièrement en cours de production, en cours de fonctionnement ou lors de la maintenance afin de déterminer s'il y a modification de l'état de surface, afin d'éviter d'éventuels arrêts de production [2].

Le rôle des surfaces dans les technologies modernes justifie le nombre très important de nouveaux instruments apparus pour les caractériser [3]. Les techniques employées ne doivent évidemment pas endommager la structure. Actuellement le contrôle des pièces avec précision est devenu une nécessité pour le développement de systèmes de mesure de plus en plus performants. De nombreuses méthodes ont été développées au cours de ces dernières décennies et ont toutes été regroupées sous le terme de Contrôle Non Destructif (CND) [2].

Selon la précision exigée, le type de matériau, ainsi que l'accessibilité et l'importance de la zone à contrôler, une méthode sera préférée à une autre pour obtenir les meilleurs résultats possibles.

Les techniques optiques de contrôle qui sont non destructives et sans contact telles que les méthodes interférométriques : l'holographie, Speckle, les techniques de projection des franges, et la technique de moiré s'imposent dans une large variété d'applications. Actuellement elles sont largement utilisées dans la production de systèmes automatisés de contrôle pour mesurer les déplacements et inspecter les surfaces, car elles présentent des avantages significatifs de qualité, de fiabilité, de sensibilité, et offrent une excellente précision.

Compte tenu de la nature de la surface, la topographie de surface joue un rôle important dans plusieurs phénomènes physiques et tribologiques comme l'optique, la mécanique de contact, les frottements, et l'usure [4]. L'information perçue est essentiellement une représentation de

la topographie de la surface, le traitement le plus immédiat de cette information consiste à identifier l'objet (ou la surface).

En effet la topographie de surface ne peut être déterminée le plus souvent que par des méthodes non destructives et sans contact, les méthodes optiques, basées sur la technique de moiré, sont particulièrement bien adaptées, et permettent de déterminer la topographie de surfaces plus ou moins grandes, par un balayage, avec une résolution élevée.

La technique de moiré est un procédé utilisant les propriétés des interférences géométriques entre deux réseaux à pas très fins. Elle permet de visualiser et de mesurer les déplacements puis les déformations aussi bien dans les domaines élastiques que plastiques moyennant un traitement mathématique des données [5].

Caractériser plus précisément les défauts, a fait de la technique de moiré une solution adéquate pour ce but; vu ses différents avantages, son extrême sensibilité aux petits déplacements, variations, ou distorsions, recouvrement des structures. Son utilisation de plus en plus fréquente dans les recherches fondamentales et appliquées a mis en évidence son importance ce qui lui a permis d'envahir différents domaines par ses diverses applications tant en: métrologie optique, physique, mathématiques, médecine etc.... Un des effets spectaculaires du moiré est de magnifier considérablement les mouvements et les déformations, c'est-à-dire le mouvement et les déformations des franges sont très supérieures à la déformation de la grille active.

Notre but à travers cette thèse est de développer une méthode optique basée sur le moiré interférométrique, pour le contrôle instantané et en temps réel, la topographie des surfaces ayant des dimensions réduites de quelques  $\text{mm}^2$ . C'est une technique, dont la sensibilité dépend de la fréquence spatiale des réseaux utilisés, ce qui permet au système d'avoir une haute résolution d'exploration. La surface est palpée optiquement, ce qui permet un contrôle de champ, ou tous les points de la surface sont explorés à l'échelle microscopique, et le résultat est matérialisé à l'échelle macroscopique par le système de franges de moiré, ce qui permet un traitement automatique et rapide des données.

Ce travail comporte trois chapitres :

Le premier chapitre, est consacré au phénomène de moiré, ses diverses caractéristiques, et d'évoquer les différentes techniques de moiré qui en dérivent avec leurs applications dans différents domaines.

Le deuxième chapitre, exhibe quelques techniques optiques qui ont contribué à étudier la topographie de surface, et qui ont trouvé un intérêt croissant, non seulement dans la recherche

en laboratoire mais aussi dans des applications industrielles, exceptionnellement la topographie de surface par la technique de moiré.

Le troisième chapitre, est réservé à un développement théorique de montages appropriés, afin d'arriver à une solution satisfaisante qui nous permet de réaliser un travail expérimental concernant la topographie de surface, et la recherche des différents paramètres qui influencent ses performances de détection et de résolution. Différents types d'échantillons en fonction de leurs applications ont été topographiés; et enfin le regroupement des résultats trouvés et la discussion établie pour chaque échantillon.

Ce travail se termine par une conclusion générale.

# *chapitre 1*

# *Technique de moiré*



## *Chapitre 1 : Technique de moiré*

### **1.1. Le moiré**

#### *1.1.1. Généralités*

Le moiré vient du mot :

⇒ **Anglais** «Mohair» [6,7], ⇒ d'origine arabe « **mukhayear** » le mot « choix » [7]

⇒ **En français désigne:** moire, moirer, moiré [6].

Dans un dictionnaire, le mot moiré est défini par l'aspect d'un tissu sur lequel, comme la soie, des ombres très mobiles se dessinent sur la trame.

Le moiré est un phénomène qui se produit naturellement dans la vie courante lorsque le jour passe au travers d'au moins deux épaisseurs de rideau, en regardant les plis ou l'ourlet d'un rideau de nylon dont on voit des familles des courbes qui évoluent en suivant les mouvements des rideaux. Il permet aussi d'expliquer le phénomène de tramage que l'on a lorsque l'on numérise « scanne » une image composée de points (comme une photo de quotidien), ou bien l'effet étrange produit par une chemise à rayures à la télévision (superposition de la trame de la chemise et de la trame de l'écran) [8].

D'une manière générale, le moiré est un phénomène qui est défini comme étant un effet d'optique résultant d'interférences géométriques entre deux réseaux, et il apparaît lors de la superposition de différents motifs présentant chacun une périodicité. Pour le mettre en évidence il suffit pour cela de prendre deux transparents sur lesquels sont disposés de grilles de même pas ou différents. La manipulation consiste à faire tourner ou translater l'un des transparents par rapport à l'autre; on voit alors se dessiner différents motifs. On observe plus précisément des franges claires et sombres qui s'atténuent selon le mouvement réalisé.

La figure 1.1, présente l'image d'une chemise à fines rayures à gauche (a), l'image à droite (b) présente la chemise acquiert un motif moiré, lorsqu'elle est numérisée prise par appareil photo numérique, on voit des ondulations qui n'apparaissent pas sur l'image de gauche [9].



**Figure 1.1.** Chemise rayée montrant l'effet de moiré [9]

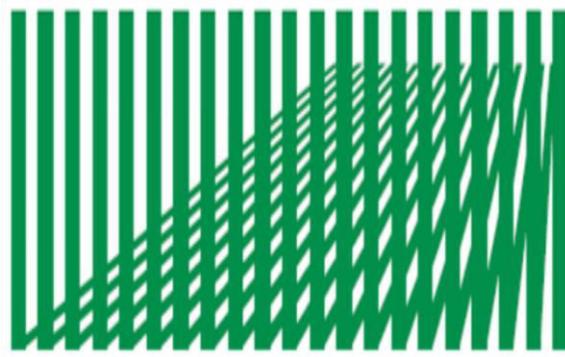
## 1.2. Franges de moiré

Les franges de moiré vont apparaître lors de la superposition de deux ou plusieurs structures périodiques; ces structures peuvent être soit des lignes droites ou de courbes, motifs périodiques radiaux ou concentriques, . . . [10]. Il en résulte de cette superposition la formation des zones claires et sombres, ce sont les franges de moiré. Les franges claires de moiré sont justement les régions où les zones microscopiques sont les plus larges, tandis que les franges sombres sont les régions où les zones sont les plus maigres. En effet ce qui caractérise l'effet de moiré, c'est que la structure macroscopique est obtenue par superposition de deux structures microscopiques neutres [11]. La figure 1.2, présente un simple exemple, montrant les franges de moiré produites par la superposition de deux peignes [12].



**Figure 1.2.** Franges de moiré obtenues par superposition de deux peignes

Une haie formée de poteaux, éclairés par le soleil, a une ombre elle aussi formée de segments de lignes parallèles entre elles. Lorsque la haie se superpose à son ombre, une nouvelle famille de lignes courbes apparaît, ceci est illustré par la figure 1.3. On observe des franges à pas très large et dont l'orientation est perpendiculaire à celle des traits des poteaux: ce sont les franges de moiré [13,14].



**Figure 1.3.** Franges de moiré formées par une haie et son nombre

### **1.3. Franges de moiré générées par différentes structures géométriques**

#### *1.3.1. Introduction*

Les figures de moiré connues par les franges de moiré peuvent être générées par différents types de structures géométriques appelées réseaux, on parle donc de moiré géométrique, ces réseaux sont: des réseaux circulaires, des réseaux linéaires, etc.

La superposition de deux familles de figures produit une nouvelle génération de l'intime combinaison des deux familles précédentes, il apparaît ainsi les franges de moiré. Des dessins de moiré sont aussi susceptibles d'apparaître chaque fois qu'une structure répétitive se superpose sur une autre structure répétitive.

Présentons donc quelques types de franges de moiré.

◆ Moiré antique :

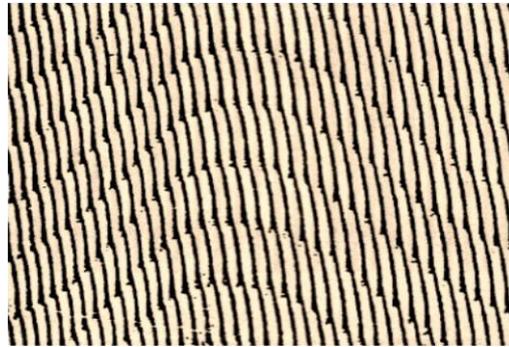
Tissus catés (côtelés et rigides, pliés et pressés l'un sur l'autre), avec un petit angle entre les plis donnent des dessins périodiques (figure 1.4).



**Figure 1.4.** Moiré Antique [15]

◆ Moiré à courbes de gauss [7]

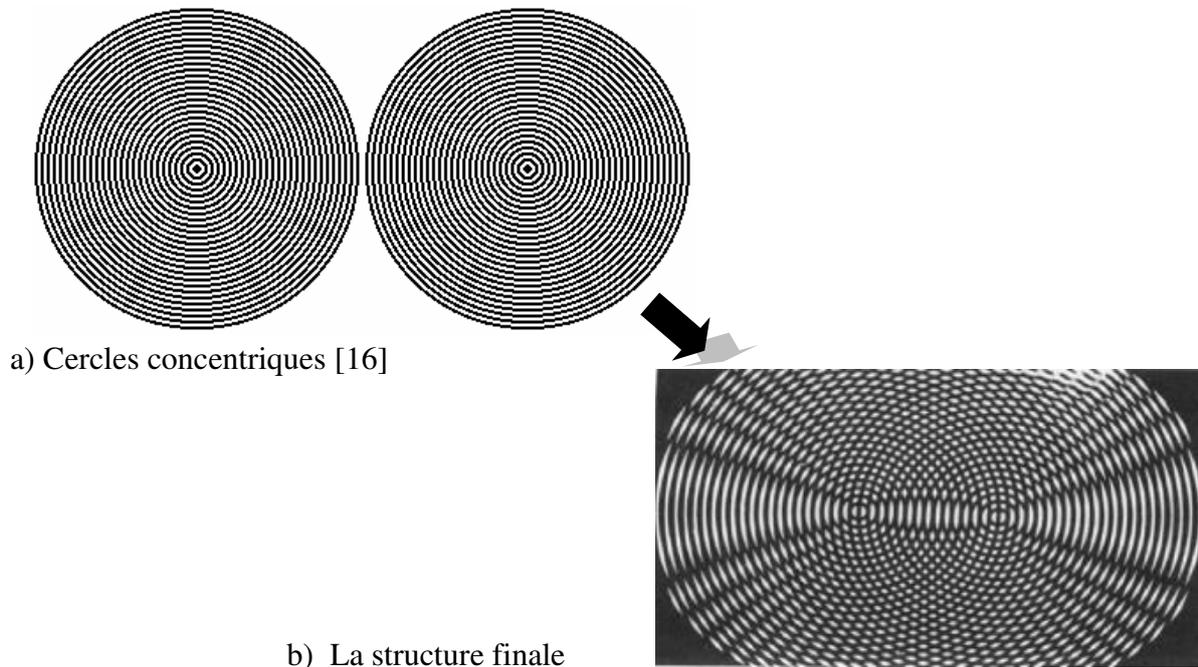
On parle de moiré à courbes de Gauss lorsque les franges de moiré sont obtenues par la superposition d'un réseau à lignes équidistantes inclinées d'un angle par rapport à un second réseau composé de lignes disposées selon la distribution de Gauss (figure 1.5).



**Figure 1.5.** Moiré à courbes de Gauss

◆ **Superposition de deux cercles concentriques**

La figure ci-dessous montre l'apparition des franges de moiré lors de la superposition de deux cercles concentriques (figure 1.6a) qui vont s'interférer afin de faire apparaître visiblement ces franges. 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 de plus en plus (figure 1.6b) [13].



**Figure 1.6.** Franges de moiré obtenues par superposition de deux cercles concentriques

- **Cercles Concentriques +lignes parallèles** [13,14]

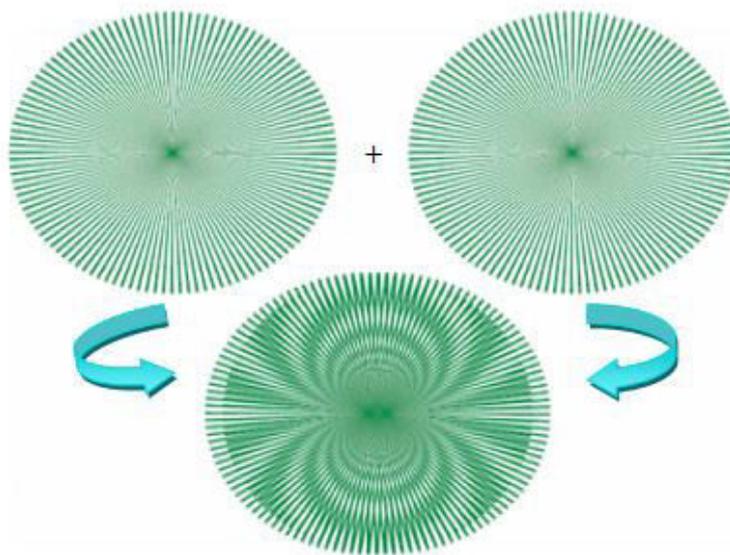


Figure 1.7. Franges de moiré de forme d'araignée

- **Cercles de Fresnel** [13,14]

La superposition des cercles de Fresnel donne naissance aux franges de moiré suivant deux cas :

La figure 1.8a montre les franges de moiré, ce sont des droites verticales et parallèles, c'est le cas où les centres des cercles sont proches. Si les centres s'éloignent ce sont des cercles centrés dans la région entre les deux centres (figure 1.8b).

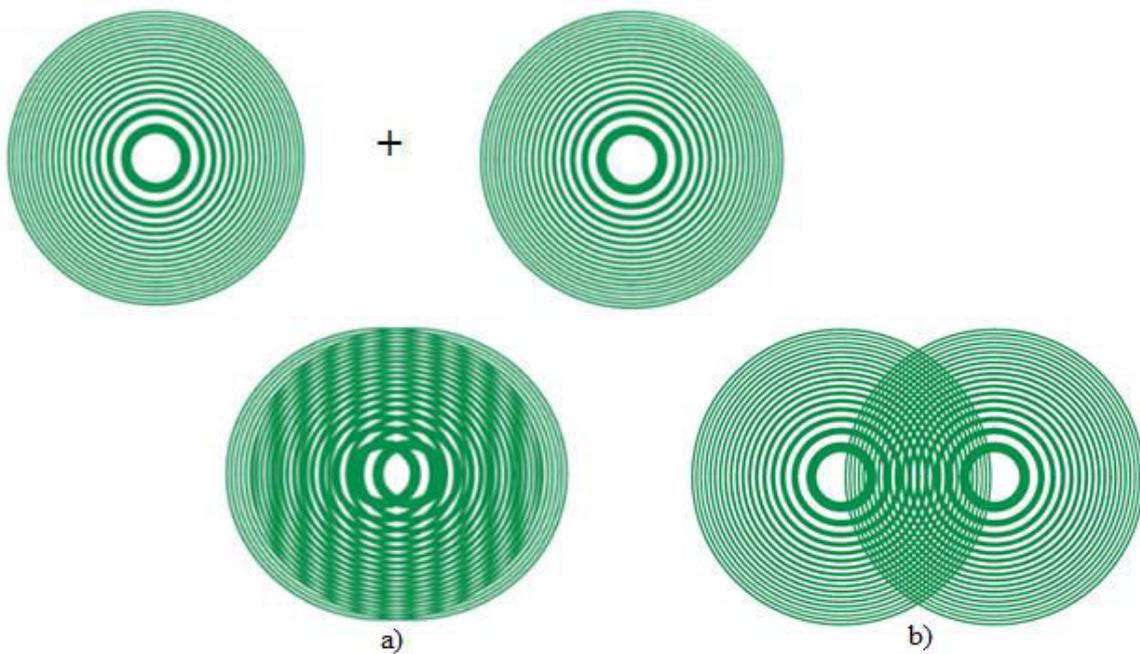


Figure 1.8. Franges de moiré obtenues par superposition de deux cercles de Fresnel

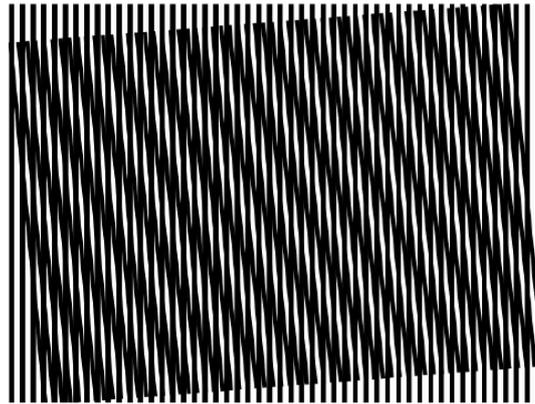


Figure 1.9. Franges de moiré entre deux réseaux de traits de pas et d'orientation différents

- **Superposition de deux réseaux de lignes parallèles de pas légèrement différents [17]**

Soit la figure 1.10 présente  $P_1$  et  $P_2$  les pas du réseau 1 et réseau 2 respectivement, l'intervalle entre deux lignes de moiré consécutives, désigné par  $d$  comporte  $m$  lignes de pas  $P_1$  du réseau 1 et  $m+1$  lignes du réseau de pas  $P_2$  :

$$mP_1 = (m \pm 1)P_2 = d \quad (1.1)$$

Après élimination  $m$  alors  $d$  sera :

$$d = \frac{P_2 P_1}{|P_1 - P_2|} \quad (1.2)$$

Dans ce cas les franges de moiré sont parallèles aux lignes de réseaux contrairement au moiré formé par une rotation relative des deux réseaux on parle donc de moiré de battement.

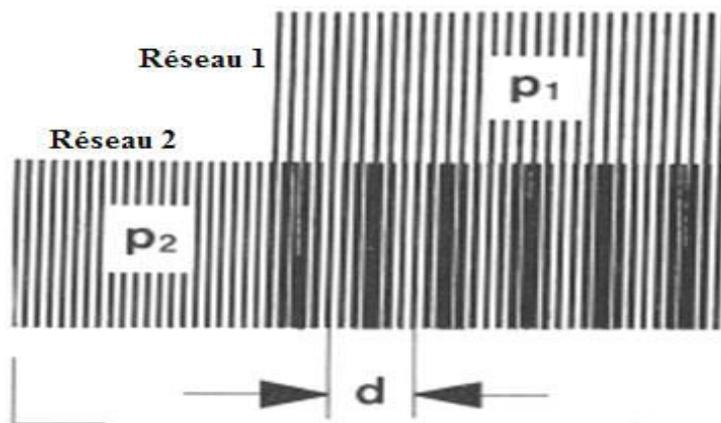
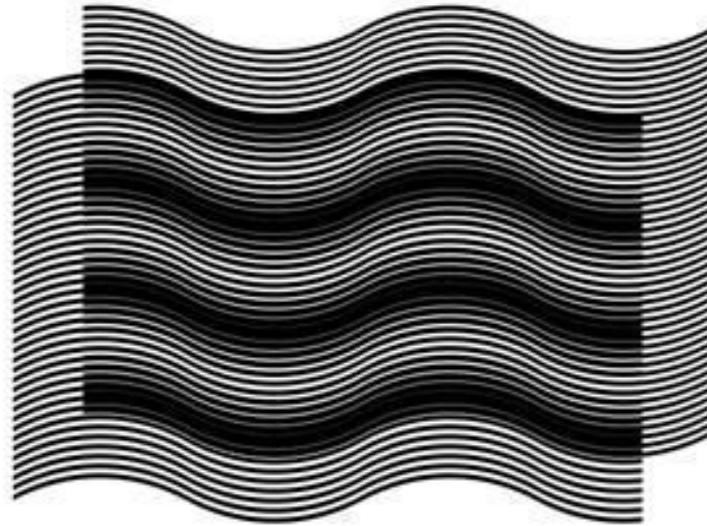


Figure 1.10. Franges de moiré obtenues par superposition de deux réseaux de lignes parallèles de pas légèrement différents

La figure 1.11 présente les franges de moiré obtenues par la superposition de deux couches se composant des courbes avec les modèles identiques d'inclination [18].



**Figure 1.11.** Franges de moiré formées par superposition de deux couches se composant des courbes avec les modèles identiques d'inclination

### 1.4. Réseau de diffraction

#### 1.4.1. Généralités

Les réseaux générant les franges de moiré représentent la partie vitale et fondamentale de la technique de moiré, il est donc nécessaire de connaître leurs caractéristiques.

Un réseau est une surface plane ou concave sur laquelle ont été tracés des traits équidistants. Les premiers réseaux optiques furent fabriqués par Fraunhofer en 1821, en utilisant une plaque de verre recouverte de noir de fumée (particule de carbone très fins). Un diamant rayait la plaque pour tracer les traits [19]. D'autres parts un réseau est une pièce de verre plan rayée de motifs périodiques nommés traits, il est caractérisé selon la figure 1.12 par :

- ✓ Le nombre de traits par mm qu'il comporte.
- ✓ Son pas  $p$  qui est la distance séparant deux motifs diffractant consécutifs.
- ✓ La largeur de la bande opaque,  $b$ .
- ✓ La largeur de la bande transparente,  $a$ .

L'inverse du pas  $p$  définit, la densité  $n$  du réseau ou la fréquence spatiale  $f$  du réseau ; celle-ci s'exprime en « traits par millimètre », ce qui correspond à l'unité :  $\text{mm}^{-1}$  [6,20].

Le nombre total  $N$  de traits interceptés par un faisceau et de largeur  $L$  est défini par :

$$N = n.L \quad (1.3)$$

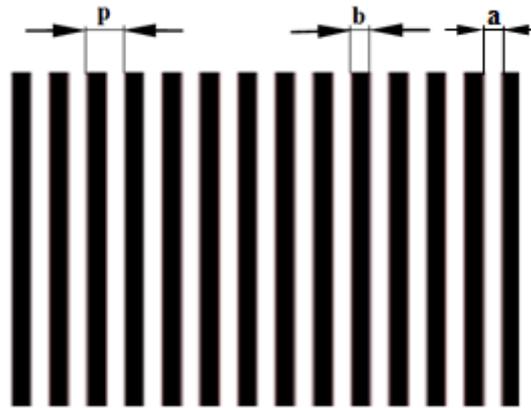


Figure 1.12. Réseau de diffraction [21]

Un réseau est encore défini comme un dispositif périodique qui impose à une onde plane incidente (réfléchiée ou transmise) une variation périodique d'amplitude et/ou de phase.

En optique on trouve : réseaux gravés, réseaux obtenus par photogravure, par dépôt de couche minces ..... Actuellement, d'excellents réseaux sont réalisés à partir de l'interférence d'ondes planes : ce sont les réseaux holographiques (réseaux sinusoïdaux dont la transmittance est proportionnelle à l'intensité du phénomène d'interférences). On distingue deux types de réseaux [22]:

- Réseaux par transmission
- Réseaux par réflexion

#### 1.4.2. Réseaux par transmission

Les réseaux par transmission se répartissent en réseaux, d'amplitude et de phase :

- **Un réseau d'amplitude par transmission (a)** : s'obtient en gravant des traits à l'aide d'une pointe de diamant sur une lame de verre recouverte d'un dépôt métallique opaque (aluminium). On obtient une alternance de traits transparents (coefficient de transmission  $t=1$ ) et de bandes opaques (coefficient de transmission  $t=0$ ).
- **Un réseau de phase par transmission (b)** : s'obtient en traçant des traits sur de lame en verre à l'aide d'un diamant. Cette fois, ne sont pas le coefficient de transmission et l'amplitude de l'onde qui varient périodiquement, mais l'épaisseur de verre et la phase de l'onde.



Figure 1.13. Réseau par transmission

### 1.4.3. Réseaux par réflexion

**Les réseaux par réflexion** sont gravés sur une surface métallique et induisent une variation périodique du coefficient de réflexion. Ils présentent deux avantages :

- ◆ Ils n'utilisent pas de support de verre dont les défauts entraînent l'hétérogénéité d'indice, et dont l'indice varie avec la longueur d'onde.
- ◆ Ils sont utilisables dans les domaines de l'U.V et de l'I.R, domaines où le verre est absorbant.

Ce sont eux qui sont utilisés dans les spectrographes.

IL existe d'autres réseaux appelés **les réseaux à échelottes**, se sont des réseaux par transmission ou par réflexion, constitués d'une suite périodique de marche. Ils sont calculés pour renvoyer un maximum d'énergie dans un seul ordre de diffraction pour une longueur d'onde et un angle d'incidence donné [22].



Figure 1.14. Réseau par réflexion

### 1.4.4. Relation fondamentale des réseaux

a) Réseau par transmission [23]

Relation fondamentale des réseaux (par transmission) :

Pour que les rayons interfèrent de façon constructive (déphasage =  $m2\pi$ )

$$a(\sin \theta - \sin \theta_0) = m\lambda \quad (1.4)$$

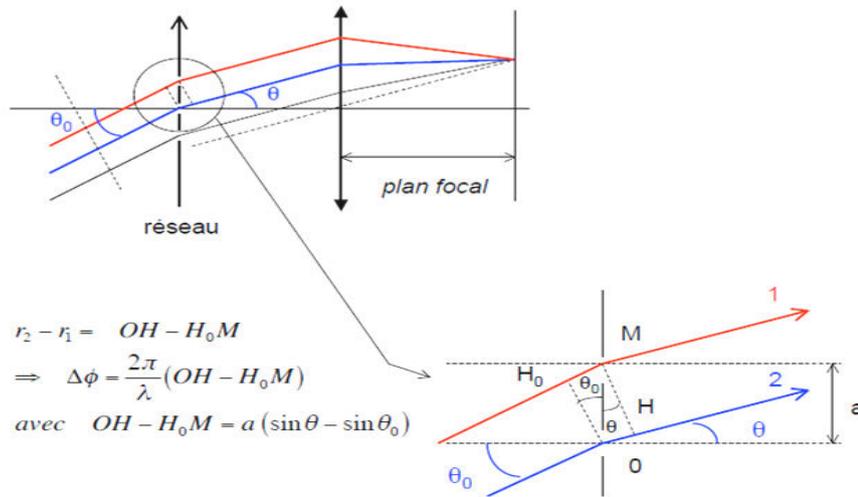


Figure 1.15. Relation fondamentale du réseau de transmission

b) Réseau par réflexion

Relation fondamentale des réseaux (par réflexion) :

Pour que les rayons interfèrent de façon constructive (déphasage =  $m2\pi$ )

$$a(\sin\theta - \sin\theta_0) = m\lambda$$

$$\text{ou } a(\sin\theta + \sin i) = m\lambda \text{ avec } i = \theta_0 - \pi \quad (1.5)$$

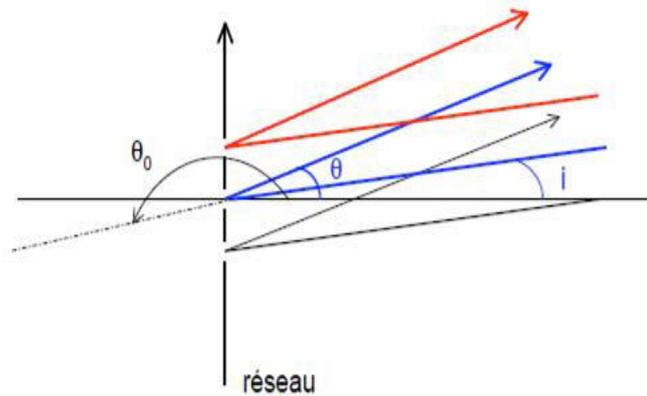


Figure 1.16. Réseau par réflexion

Soit une source ponctuelle, à l'infini, qui éclaire le réseau. Chaque fente diffracte la lumière, les rayons issus des différentes fentes interfèrent entre eux (figure 1.17).

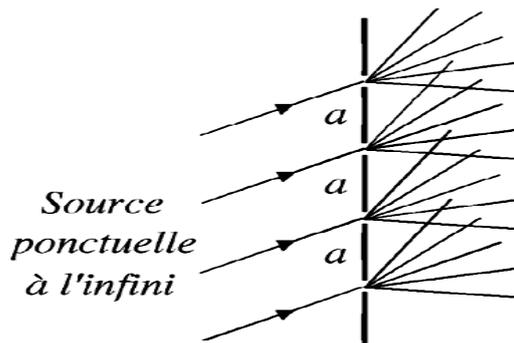


Figure 1.17. Réseau (vue en coupe) [23]

### 1.5. Superposition de deux réseaux de lignes parallèles de même pas

La figure 1.18 présente la superposition de deux réseaux de lignes parallèles et de même pas, suivant la variation d'angle de l'un par rapport à l'autre formant ainsi moiré de rotation.

a), présente deux familles de courbes qui sont perpendiculaires.

b), une des deux familles est inclinée d'un angle  $45^\circ$ , et l'autre famille se voit clairement et séparément.

c), une des deux familles est inclinée d'un petit angle de telle façon que leurs directions sont presque voisines et apparaît donc des lignes transversales, on voit des lignes horizontales (qui sont formées par l'intersection des droites des deux familles c'est-à-dire à l'intersection entre les réseaux des deux familles), alternativement claires et sombres se sont les franges de moiré qui créent un effet de contraste.

Ce qui caractérise ces franges est que le contraste change selon l'angle de rotation entre les deux réseaux des deux familles, il est dû à l'apparition de lignes claires et sombres. D'autre part l'angle entre les deux réseaux contrôle la distance entre ces lignes [13,14].

- ▶ Cas de la figure 1.18a, si l'angle est proche de  $90^\circ$  : Dans ce cas, il n'y a presque pas de contraste.
- ▶ Si les lignes ne sont ni trop éloignées, ni trop proches c'est le cas de la figure 1.18b, c'est-à-dire entre ces deux positions, on distingue clairement l'effet de contraste.
- ▶ De même si l'angle est proche de  $0^\circ$  cas de la figure 1.18c : les lignes sombres et claires deviennent de plus en plus éloignées.

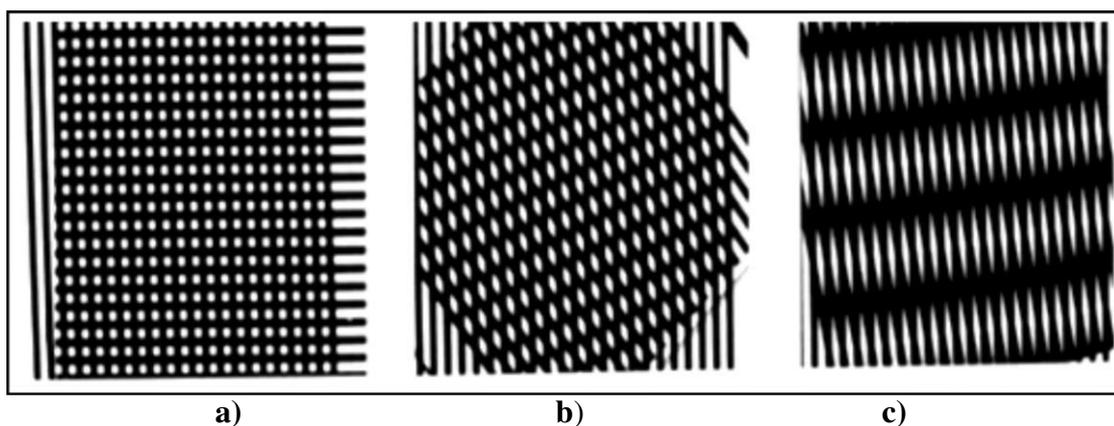


Figure 1.18. Superposition de deux réseaux de lignes parallèles de même pas

#### 1.5. 1. Description mathématique du phénomène de moiré

##### A) Le Modèle de Franges de Moiré entre deux réseaux linéaires [6, 13]

D'une manière générale, pour mettre en évidence les franges de moiré il faut avoir évidemment les équations des courbes initialement dans un repère convenablement choisi.

Géométriquement, chaque réseau présente une famille de courbes, qui est indexée.

Prenons le cas de la figure 1.19, on a deux types de figures à lignes parallèles; la première famille satisfait la relation  $F(x,y)=\psi(h)$ , et la 2<sup>ème</sup> famille  $G(x,y)=\Phi(k)$ .

$F(x,y)$  et  $G(x,y)$  se sont des fonctions qui déterminent les éléments des figures.

$\psi(h)$  et  $\Phi(k)$  déterminent l'espace des éléments.

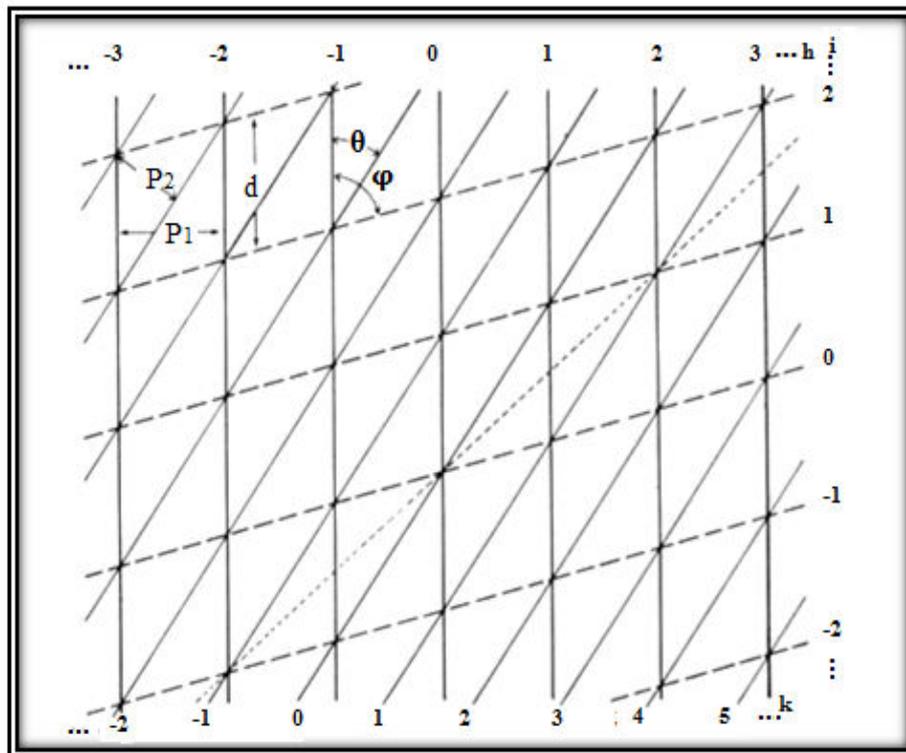


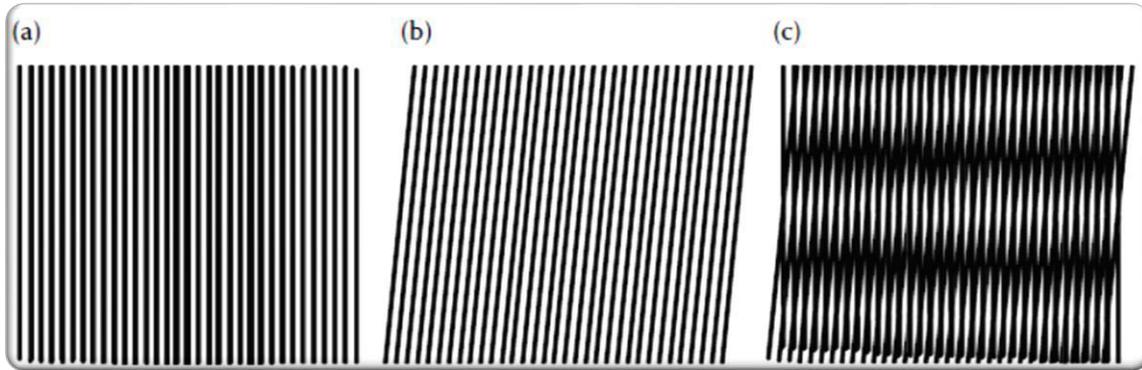
Figure 1.19. Modèle des franges de moiré entre deux réseaux linéaires

Les relations mathématiques [24] entre les paramètres des réseaux et les franges de moiré sont établies par l'application de la géométrie analytique élémentaire selon différentes notations. Si on considère la figure 1.20a, dont la première famille de lignes parallèle à l'axe des ordonnées et ayant la période  $P_1$ .

L'équation du premier réseau est décrite comme suit :

$$x = hP_1 \quad (1.6)$$

Les diverses lignes du réseau sont identifiées par l'indice  $h$ , et prennent les valeurs  $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ , le deuxième réseau de période  $P_2$  (figure.1.20b), est incliné à l'axe des ordonnées sous un angle, les lignes de ce réseau est d'indice  $k$ , prennent les valeurs  $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$



**Figure 1.20.** Réseau vertical(a), réseau incliné(b), franges de moiré (c): résultat de la superposition.

L'équation de cette 2<sup>ème</sup> famille est donnée par :

$$y = x \cotg \theta - \left( \frac{P_2 k}{\sin \theta} \right) \quad (1.7)$$

Le moiré résultant (figure1.20c), est une famille indexée par  $i$  et satisfait à la relation

$$\theta(h,k) = i \text{ tel que } h-k = i$$

En éliminant  $h$  et  $k$  nous obtenons l'équation de moiré :

$$y = \frac{x((P_1 \cos \theta) - P_2)}{P_1 \sin \theta} + \left( \frac{P_2 i}{\sin \theta} \right) \quad (1.8)$$

En se référant à l'équation (1.7), l'équation (1.8) peut s'écrire par:

$$y = x \cot \varphi + (i d / \sin \varphi) \quad (1.9)$$

Avec  $d$ , la distance qui détermine le pas des franges de moiré obtenues dans le plan image, il s'agit de la distance entre deux franges claires ou sombres respectivement, on parle donc d'interfrange, et  $\varphi$  est l'angle que font les franges de moiré avec l'axe des Y.

Où  $d$  et  $\varphi$  s'expriment par les équations suivantes :

$$d = \frac{P_1 P_2}{\sqrt{(P_1^2 + P_2^2 - 2P_1 P_2 \cos \theta)}} \quad (1.10)$$

$$\sin \varphi = \frac{P_1 \sin \theta}{\sqrt{(P_1^2 + P_2^2 - 2P_1 P_2 \cos \theta)}} = \frac{d}{P_2} \sin \theta \quad (1.11)$$

Si on suppose que les pas des deux réseaux du plan objet sont égaux et égal à  $p$ , alors le pas des franges de moiré obtenues peut s'écrire :

$$d = \frac{p}{2 \sin(\frac{\theta}{2})} \quad (1.12)$$

**B) Franges de moiré obtenues par différents angles formés entre deux réseaux à lignes parallèles équidistantes**

Les franges de moiré formées sont définies par la forme générale [25] :

$$l - rm = n \quad (1.13)$$

Où  $r$  : est un nombre rationnel qui détermine le sens d'orientation des franges tel que :

Pour  $r = 1$  et  $r = -1$  on obtient respectivement les équations suivantes :

$$l - m = n \quad (1.14)$$

$$l + m = n \quad (1.15)$$

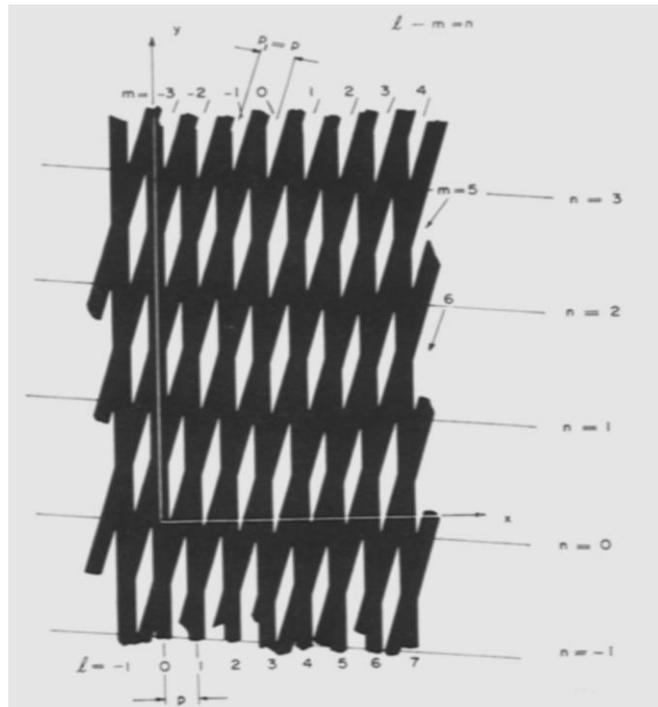


Figure 1.21. Présentation des franges de moiré dans un repère x et y [25]

▶ **L'angle entre les deux réseaux :**

Les franges de moiré obtenues pour différents angles entre deux réseaux de même pas, de lignes parallèles équidistants de manière que :

➤ Les franges sont :

✓ visibles pour les angles égaux à  $\pm 30^\circ$ .

✓ Difficiles à les distinguer pour les angles  $\pm 45^\circ$ .

➤ Les franges formées pour angles de rotation  $\pm 180^\circ$ , sont similaires à celles obtenues pour angles  $\pm 30^\circ$ .

➤ Les franges obtenues pour angles égaux à  $\pm 30^\circ$ , sont définies par l'équation,  $l-m = n$ .

**C) Franges de moiré obtenues par superposition du réseau de référence et du réseau déformé [24]**

En métrologie, le phénomène de moiré résulte par la superposition d'un réseau de référence et d'un réseau monté sur l'objet qui est soumis à la déformation, par conséquent, on observe alors le moiré entre réseau déformé et réseau non déformé. On peut également obtenir un modèle de moiré entre deux réseaux déformés (c-à-d, quand deux états déformés de l'objet sont comparés).

Il est ainsi instructif d'étudier la formation de moiré entre réseau déformé et non déformé et pour apprendre comment extraire les informations sur la déformation à partir du modèle de moirage alors la déformation est représentée par une fonction  $f(x, y)$ , on assume qu'elle varie lentement. Le réseau déformé peut être exprimé comme suit :

$$x + f(x, y) = mP_1 \quad (1.16)$$

Avec  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$

Ce réseau est superposé au réseau de référence présenté par l'équation :

$$x = nP_1 \quad (1.17)$$

Avec  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$

Ce qui produit dans les franges de moiré le résultat suivant:

$$f(x, y) = KP_1 \quad (1.18)$$

Avec  $K = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$

Alors les franges de moiré présentent le contour de la fonction  $f(x,y)$  de période  $P_1$ . Dans ce cas, les éléments dans les deux réseaux sont parallèles à l'axe des ordonnées montrant une lente variation du réseau déformé.

- La superposition du réseau déformé au réseau de référence orienté d'un angle  $\theta$  avec l'axe des  $y$ . les équations des deux réseaux sont exprimés respectivement par :

$$x + f(x, y) = mP_1 \quad (1.19)$$

$$y = x \cot \theta - \left( \frac{nP_1}{\sin \theta} \right) \quad (1.20)$$

Lorsque le réseau est incliné d'un petit angle tel que  $\cos \theta \approx 1$  et  $\sin \theta \approx \theta$ , le modèle de moiré est exprimé par :

$$y + \frac{f(x,y)}{\theta} = K \frac{P_1}{\theta} \quad (1.21)$$

Cette équation montre que la période et la fonction de déformation du réseau de moiré sont amplifiés par le facteur  $1/\theta$ .

### *1.5.2. Superposition de réseaux linéaires de transmission sinusoïdales [26]*

Si on considère un réseau linéaire de fréquence constante et de transmission sinusoïdale  $t_1$  exprimée par :

$$t_1(x, y) = a + a \cos \left( \frac{2\pi}{p} \right) x \quad (1.22)$$

Où  $p$  est la période du réseau et  $0 < a < 1/2$ .

Si le réseau est modulé par une fonction de modulation  $\psi(x)$ , elle égale au quotient entre le déplacement des lignes du réseau de sa position initiale  $u(x)$  et la période du réseau. Dans ce cas  $t_1$  de l'équation (1.17) s'exprime donc par l'équation :

$$t_2(x, y) = a + a \cos 2\pi \left( \frac{x}{p} + \psi(x) \right) \quad (1.23)$$

Avec 
$$\psi(x) = \frac{u(x)}{p} \quad (1.24)$$

Le terme  $u(x)$  présente le déplacement.

Si les deux réseaux sont en contact c'est-à-dire sont superposés la transmittance résultante est égale au produit des deux transmittances prises séparément tel que :

$$t(x, y) = t_1 \cdot t_2 = a^2 \left\{ \left\{ 1 + \cos \frac{2\pi x}{p} + \cos 2\pi \left[ \frac{x}{p} + \psi(x) \right] + \frac{1}{2} \cos 2\pi \left[ \frac{2x}{p} + \psi(x) \right] + \frac{1}{2} \cos 2\pi \psi(x) \right\} \right\} \quad (1.25)$$

Les trois premiers termes représentent les réseaux originaux, le quatrième terme représente le deuxième réseau en double fréquence, tandis que le cinquième terme dépend seulement de la fonction de modulation, c'est ce terme qui décrit les franges de moiré.

D'autres part, la combinaison des deux réseaux par addition (ou soustraction) en photographiant les deux réseaux par double exposition sur le même négatif est donnée par :

$$t(x, y) = t_1 + t_2 = 2a \left\{ 1 + \cos \pi \psi(x) \cos 2\pi \left[ \frac{x}{p} + \frac{1}{2} \psi(x) \right] \right\} \quad (1.26)$$

Dans cette équation le terme  $\cos \pi \psi(x)$  décrit les franges de moiré modulant l'amplitude du réseau original. Pour les deux équations (1.25 et 1.26), les maxima présentent les franges brillantes tel que :

$$\psi(x) = n, \text{ avec } n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

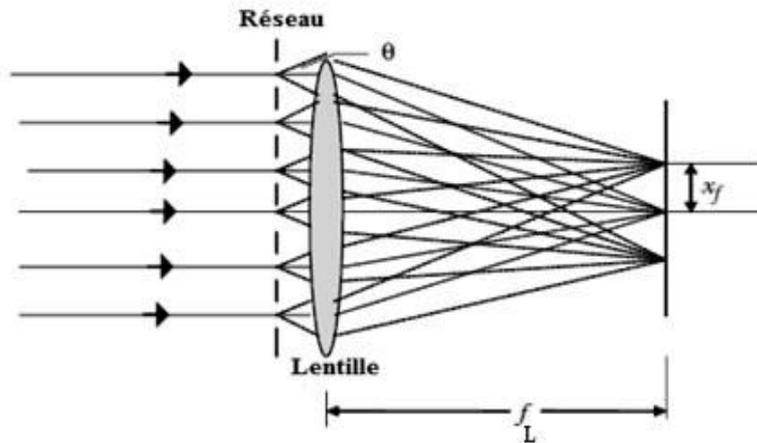
Et les minimas (franges sombres),  $\psi(x) = n + 1$ , avec avec  $n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

## **1.6. Figure de diffraction d'un seul réseau**

### *1.6.1. Théorie d'Abbe*

Ernest Abbe a développé une théorie, appelée habituellement la théorie d'Abbe du microscope, qui permet le calcul de la puissance de résolution d'un objectif quand l'objet est illuminé par une lumière cohérente. Sa prétention principale était que la structure de l'objet de fréquence spatiale présente des actions comme un réseau de diffraction, une fois illuminée par une source lumineuse cohérente.

Si l'objet agit en tant que réseau de diffraction, la lumière sera diffractée en plusieurs faisceaux de différents ordres de diffraction. Dans ce cas l'image peut être considérée comme le modèle d'interférence résultant de la superposition de tous les faisceaux diffractés (figure 1.22) [24].

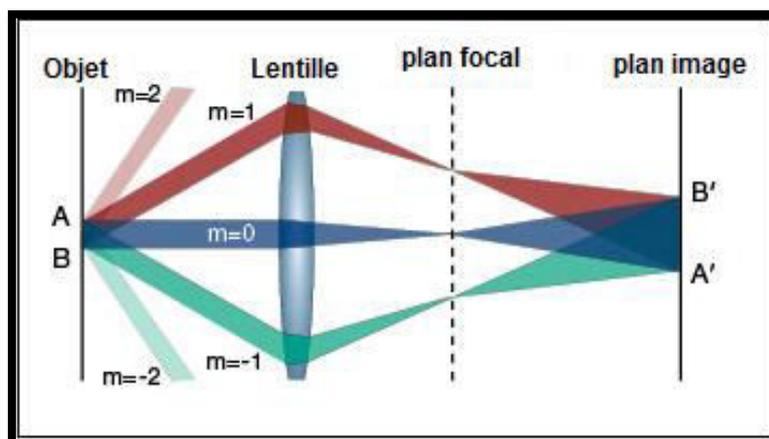


**Figure 1.22.** La lumière diffractée par un réseau en faisceaux de différents ordres de diffraction

Si l'objectif est si petit, seulement l'ordre nul de la diffraction traverse l'objectif, alors aucune interférence n'a lieu au plan d'image, et donc aucune image formée.

La structure d'objet est d'abord détectée au plan image quand l'objectif est assez grand pour laisser les deux premiers ordres de diffraction de le traverser. Dans ces conditions, l'image n'est pas une reproduction exacte de l'objet (figure 1.23), car les ordres de diffraction de grandeur plus que l'ordre 1 n'atteignent pas le plan image.

Quand l'objectif est plus grand, de sorte que les ordres de diffraction +2 et -2 traversent l'objectif, l'image ressemblera plus étroitement à l'objet, dans ce cas-ci, l'image a un profil sinusoïdal de fréquence spatiale égale à celle de l'objet [27].



**Figure 1.23.** Deux premiers ordres de diffraction traversent l'objectif (lentille)

1.6.2. Spectre de diffraction d'un réseau

En se référant à la théorie d'Abbe, considérons la lumière du laser hélium-néon (couleur rouge) de longueur d'onde 632.8nm, traverse un réseau de diffraction, elle sera diffractée en un ensemble d'ordres multiples appelé spectre de diffraction (figure1.24).

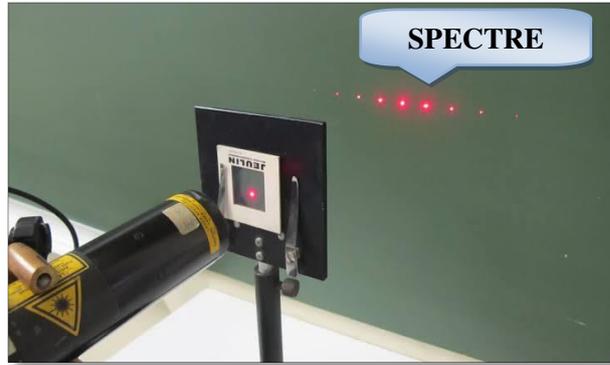


Figure 1.24. Spectre de diffraction d'un réseau éclairé par faisceau laser [28]

Si un objet caractérisé par une transparence éventuellement complexe  $t(x_0, y_0)$ , et éclairé en lumière parallèle, chaque point de cet objet diffracte de la lumière, la figure de diffraction obtenue est un spectre de fréquences spatiales de l'objet, formée soit à l'infini soit dans le plan focal d'une lentille. Mathématiquement, la correspondance entre l'objet et la figure obtenue dans le plan focal image n'est autre que la transformée de Fourier à un facteur de phase près. Ce facteur de phase vaut 1 lorsque l'objet est situé dans le plan focal image du plan spectral de la lentille [29].

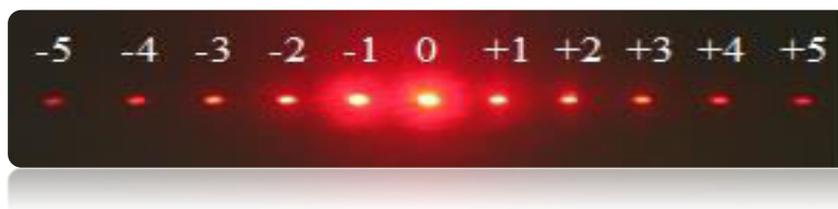


Figure 1.25. Spectre du réseau forme un ensemble de points discrets [30]

Sa décomposition en séries de Fourier s'écrit [7] :

$$F(x_0, y_0) = 1 + \cos 2\pi \left( \frac{x_0}{p} \right) + \frac{1}{3} \cos 2\pi \left( \frac{3x_0}{p} \right) + \frac{1}{5} \cos 2\pi \left( \frac{5x_0}{p} \right) + \dots + \frac{1}{2n+1} \cos 2\pi \left( \frac{(2n+1)x_0}{p} \right) \quad (1.27)$$

Les fréquences spatiales associées à ce réseau forment un ensemble discret  $(0, 1/p, 3/p, 5/p, \dots, 2n-1/p)$ , ces points sont situés en :  $x=0, x=\lambda f/p, x=3\lambda f/p, \dots, x=(2n-1)\lambda f/p$

$f$  : distance focale de la lentille,  $x$  : coordonnée dans le plan de Fourier

■ 1<sup>er</sup> Cas :

Réseau constitué seulement de bandes alternativement opaques et transparentes parallèles à l'axe des  $Y$ . il est illustré par la figure 1.26; son spectre de diffraction formé est perpendiculaire aux traits du réseau. La figure de diffraction d'un réseau peut être liée de façon simple à la forme de celui-ci par la transformée de Fourier [31].

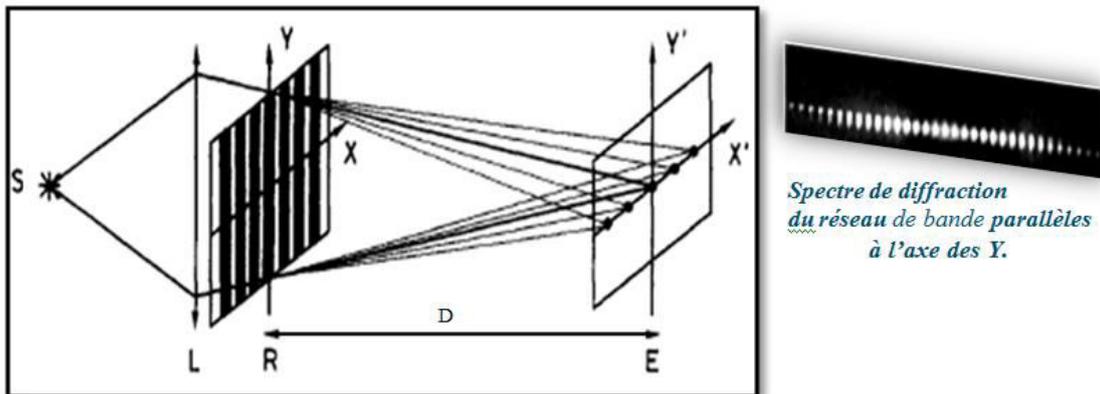


Figure 1.26. Diffraction d'un réseau de bandes verticales parallèles à l'axe des  $Y$

■ 2<sup>ème</sup> Cas :

Le réseau est constitué de bandes alternativement opaques et transparentes, horizontales et parallèles à l'axe des  $z$  (figure 1.27).

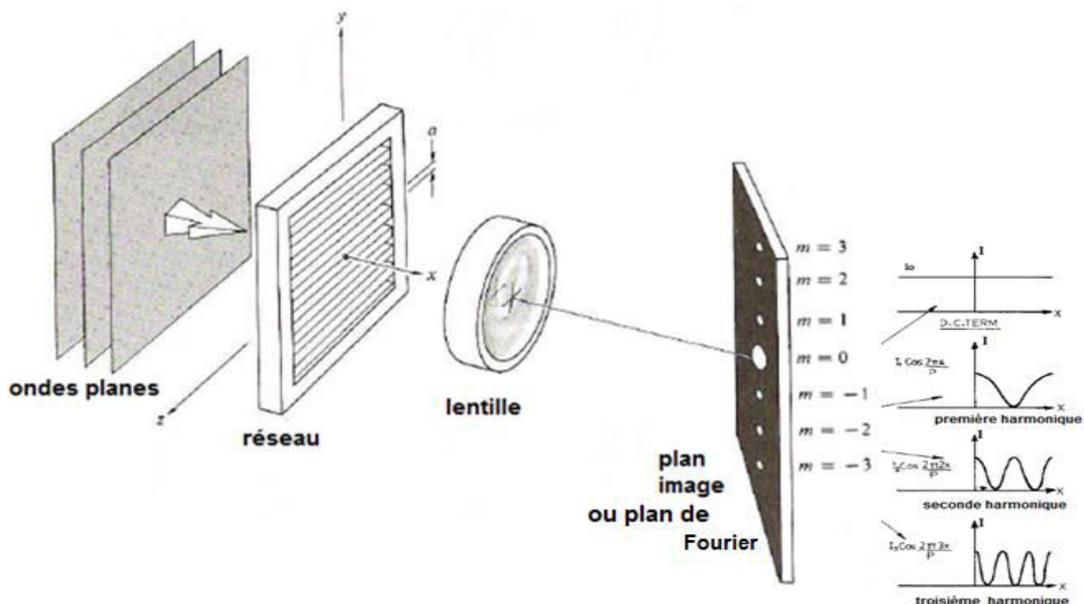


Figure 1.27. Spectre de diffraction d'un réseau (de bandes horizontales) au plan de Fourier [32,33]

## 1.7. Filtrage optique dans le plan de Fourier

### 1.7.1. Cas de réseau et trame

Chaque terme de l'expression en séries de Fourier correspond à l'ordre de diffraction, le modèle de diffraction fourni la possibilité de sélectionner quelques ordres c'est-à-dire certains termes contribuent à la formation de l'image (figure 1.28) et (figure 1.29).

On parle donc de filtrage spatial, c'est dans ce plan de Fourier (PF) que l'on dispose de filtres (fentes, diaphragmes, écrans, pastilles opaques...), ne laissant passer que certains ordres désirés. On se rend compte de la puissance des méthodes de filtrage spatial dont on peut envisager plusieurs types de filtrage en éliminant certaines fréquences spatiales où :

- l'ordre zéro (central) correspond à la fréquence fondamentale dont l'éclairement de l'image est uniforme;
- si nous laissons passer que l'ordre zéro et l'ordre voisin nous obtenons le réseau;
- si nous laissons que deux ordres éloignés nous obtenons un réseau de pas petit que le pas du réseau objet, on parle donc de multiplication des franges.

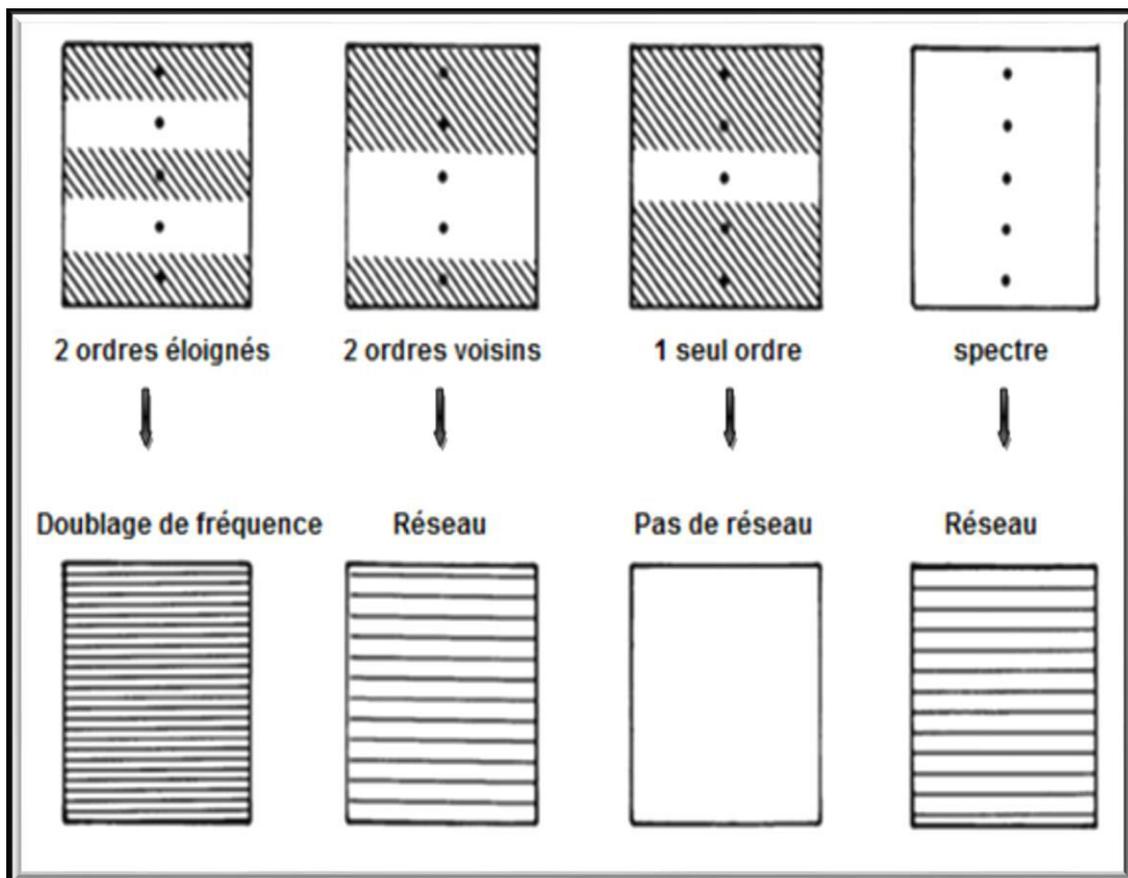


Figure 1.28. Filtrage dans le plan de Fourier et image correspondante du réseau [34]

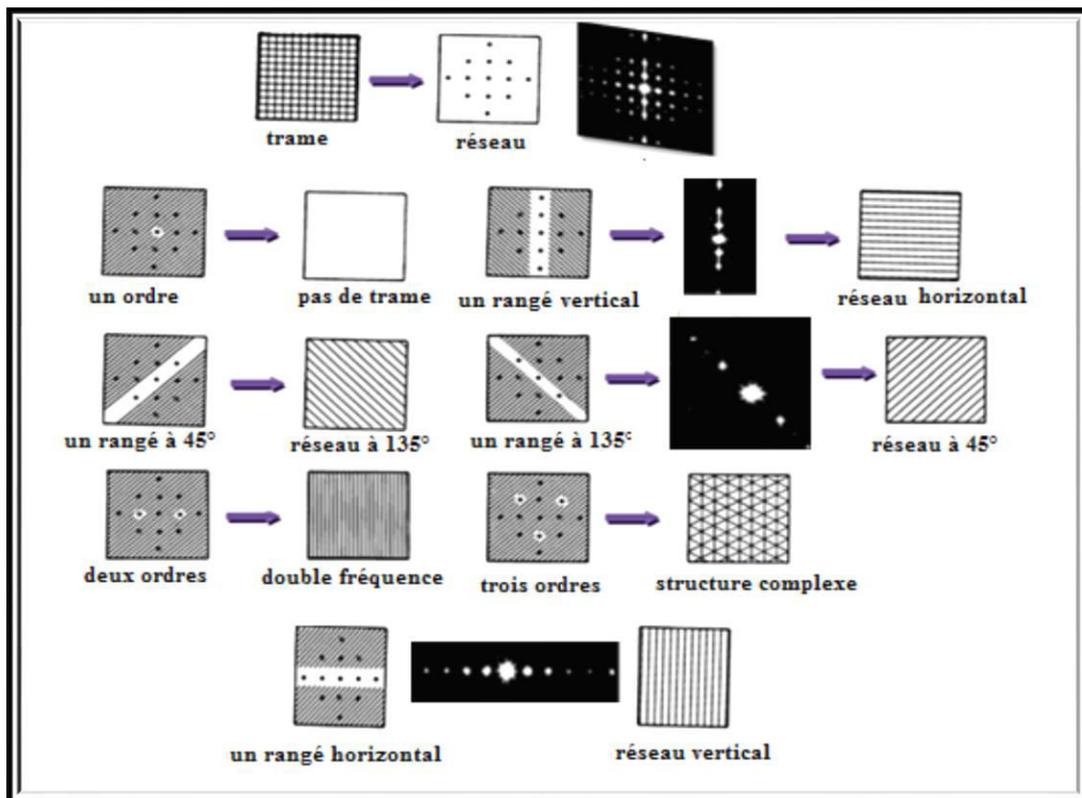


Figure 1.29. Image d'une trame en fonction de divers filtrage [34,35]

### 1.7.2. Cas d'une grille [15]

Considérons l'expérience réalisée par Abbe (1893) et Porter (1906). Une grille placée dans le plan objet d'une lentille convergente (figure 1.30). Dans le plan focal on retrouve le spectre de la grille (voir les grains « formation des images », partie: « propriétés des lentilles relatives à la transformation de Fourier »). Les composantes spectrales se propagent du plan focal vers le plan image, interfèrent entre elles, pour former une image qui est une réplique atténuée de l'objet.

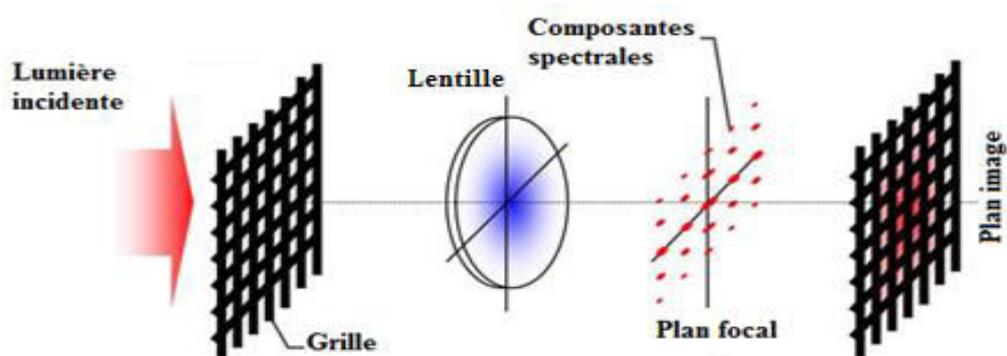


Figure 1.30. Image de la grille et composantes spectrales dans le plan focal

En plaçant divers obstacles (diaphragmes, fentes, écrans) dans le plan focal, il est possible de modifier le spectre (donc l'image) de différentes façons. En mettant une fente horizontale (figure 1.31), l'image ne contient que la structure verticale de la grille.

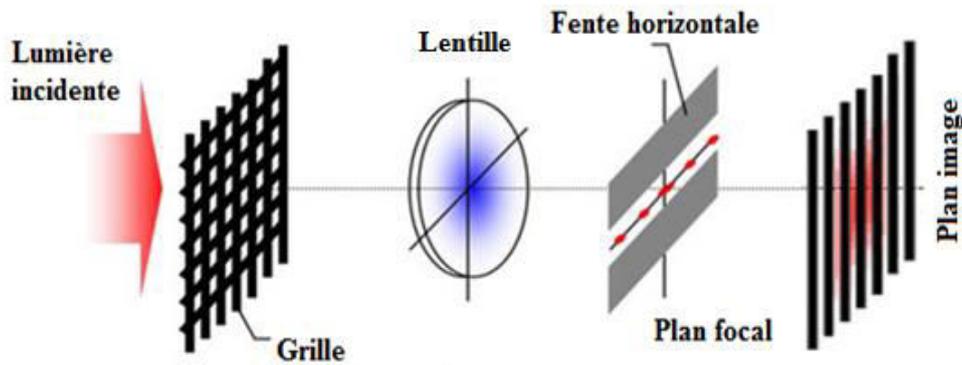


Figure 1.31. Aspect de l'image avec une fente placée à l'horizontale

En retournant la fente à la verticale (figure 1.32), l'image ne contient que la structure horizontale de la grille.

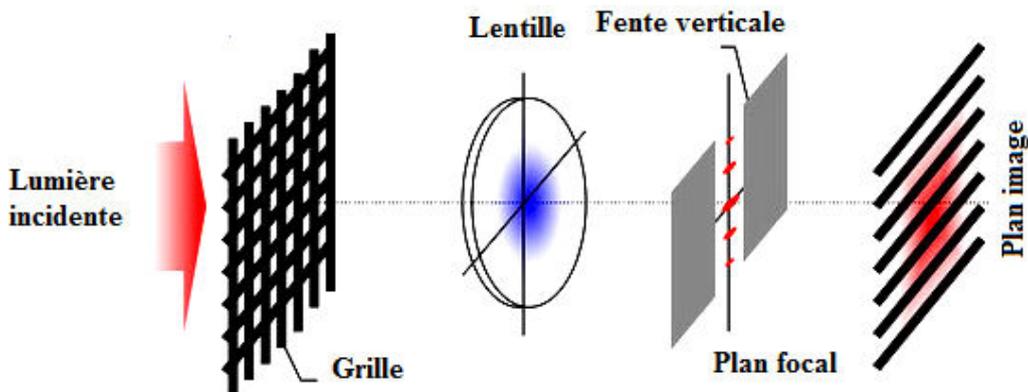


Figure 1.32. Aspect de l'image avec une fente retournée à la verticale

## 1.8. Les facteurs influençant l'observation des franges de moiré

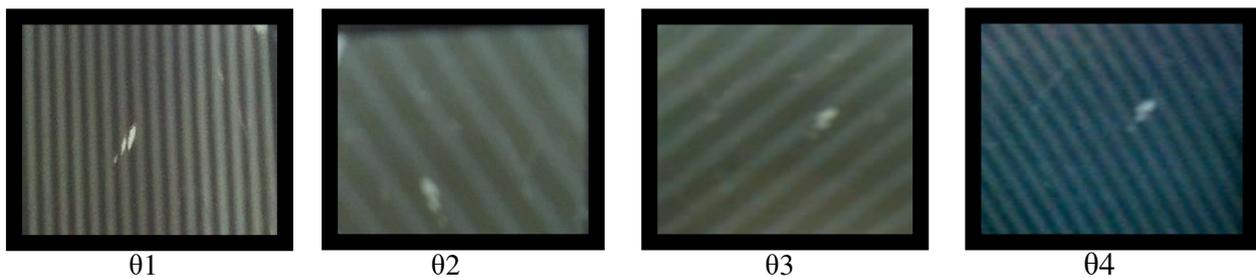
Il s'agit des facteurs définissables qui influent d'une manière considérable et directe sur l'observation des franges de moiré.

### 1.8.1. Influence du mode d'éclairage

Le mode d'éclairage est un facteur très important dans l'observation des franges de moiré, on distingue les modes d'éclairage cohérent et incohérent.

### 1.8.1.1. Eclairage incohérent

L'observation des franges de moiré en mode d'éclairage incohérent est liée à la fréquence spatiale des réseaux utilisés, c'est-à-dire que le phénomène de moiré n'est observable à l'œil nu qu'à une certaine fréquence spatiale ne dépassant pas 40 traits/mm (figure 1.33) [7, 36] au-delà de cette valeur l'effet de moiré est invisible, alors l'emploi d'une lumière cohérente est recommandé.

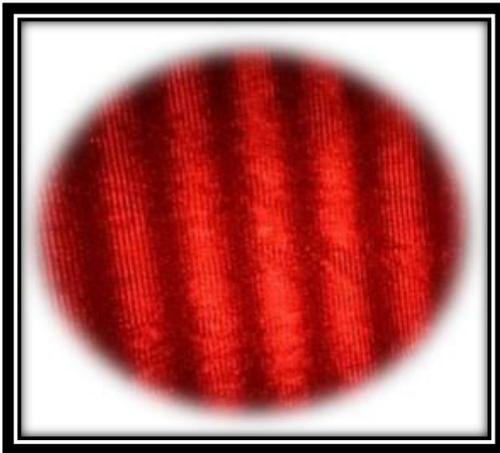


**Figure 1.33.** Franges de moiré observées en mode d'éclairage incohérent à différents angles de rotation  $\theta$  par superposition directe de deux réseaux de 25 traits/mm

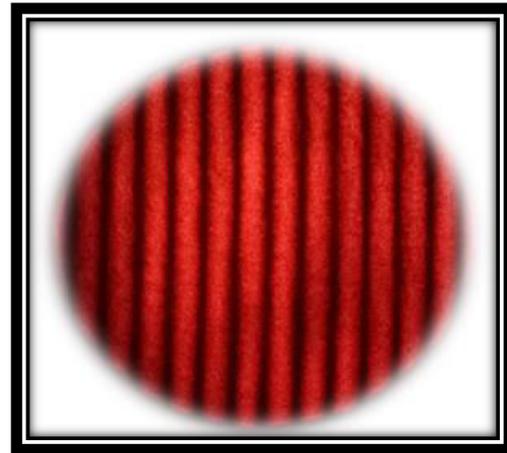
### 1.8.1.2. Eclairage cohérent

Ce mode d'éclairage nécessite l'utilisation des réseaux de fréquences spatiales assez grandes, les franges de moiré non seulement sont visibles mais les traits des réseaux sont aussi visibles contrairement au mode d'éclairage incohérent, en plus ce mode d'éclairage permet de traiter l'information contenue dans le spectre de diffraction qui est composé d'ordres distincts l'un de l'autre et les distances séparant les différents ordres.

La figure 1.34 présente les franges de moiré obtenues en utilisant l'onde chromatique laser de longueur d'onde 632,8nm ; dans le cas de la figure 1.34a les franges de moiré sont obtenues par superposition de deux réseaux de fréquences spatiales 25 traits/mm, et dans le cas de la figure 1.34b les franges de moiré sont obtenues par superposition de deux réseaux de fréquences spatiales 100 traits/mm.



a) Réseaux de fréquence 25traits/mm



b) Réseaux de fréquences 100traits/mm

**Figure 1.34.** Franges de moiré obtenues en mode d'éclairage cohérent

### 1.8.2. Effet de diffraction

#### 1.8.2. 1. La diffraction

La diffraction est un « étalement » ou un changement de direction de propagation qui survient quand une onde (mécanique, sonore, ou lumineuse) traverse une ouverture ou rencontre un obstacle [20].

- Cas d'onde lumineuse:

Le phénomène de diffraction joue un rôle décisif dans la formation des images puisque tout système optique limite irrémédiablement l'étendue de l'onde incidente, par exemple notre outil d'observation : l'œil.

La diffraction est souvent présentée comme un phénomène gênant, qui limite le pouvoir de résolution des instruments d'optique. Toutefois, la diffraction peut aussi être mise à profit pour créer des faisceaux lumineux ayant des propriétés intéressantes [37].

La figure 1.35 [38], présente les conditions nécessaires pour observer le phénomène de diffraction par une fente. D'après la figure 1.35a, la dimension de l'ouverture  $d_1 \gg \lambda$ , le phénomène de diffraction est secondaire et négligeable.

La figure 1.35b, le cas où  $d_1$  est de l'ordre de  $\lambda$ , permet l'observation du phénomène de diffraction, la figure 1.35c,  $d_1 \ll \lambda$  c'est-à-dire l'ouverture est de dimension négligeable devant la longueur d'onde, le résultat pas de diffraction, la fente se comporte donc comme une source secondaire, l'écran n'est pas éclairé uniformément.

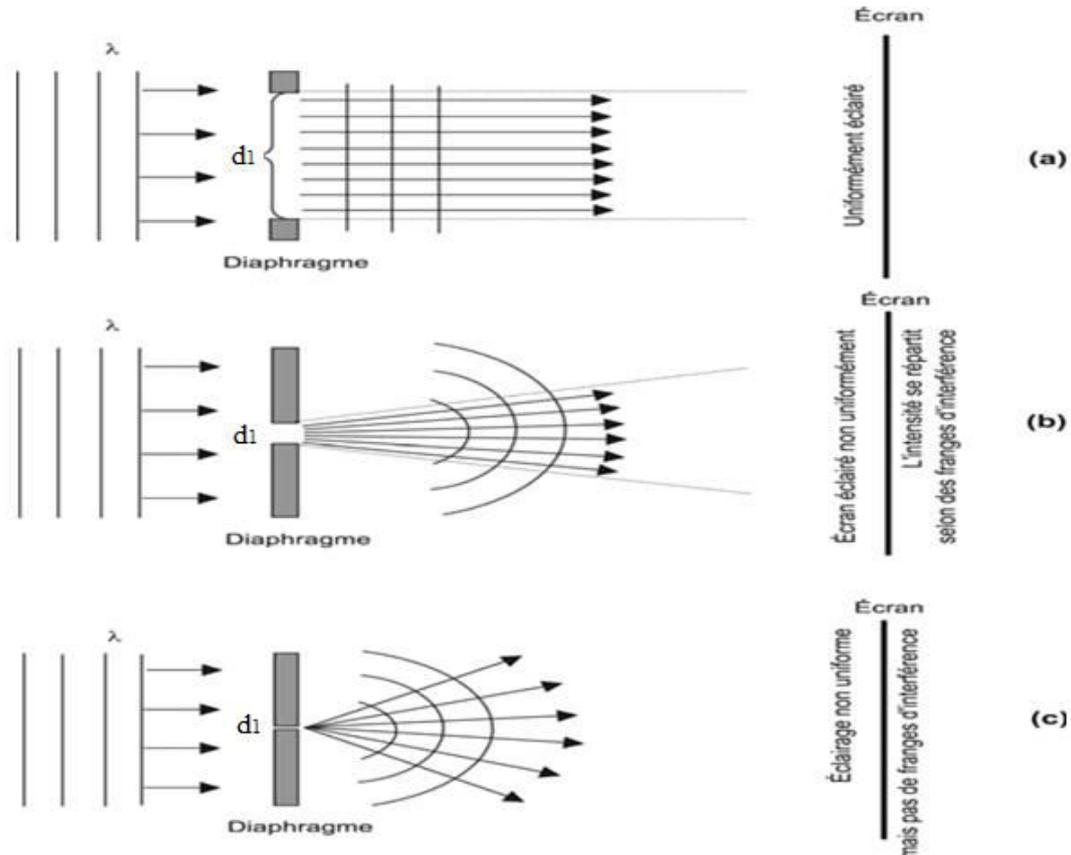


Figure 1.35. Conditions pour l'observation du phénomène de diffraction [38]

### 1.8.2. 2. Diffraction par une fente fine [39]

Présentons la figure de diffraction de la lumière passant par une fente fine réglable (figure 1.36). 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 produisant quand des ondes, se propageant de manière rectiligne, franchissent une ouverture suffisamment petite: il semble qu'un petit élément de l'onde incidente induise une onde circulaire.

L'ouverture angulaire ( $\Delta\alpha$ ) de l'onde diffractée est inversement proportionnelle à la dimension de l'ouverture ( $\Delta x$ );  $\lambda$  étant la longueur d'onde incidente on a :

$$\Delta\alpha \cdot \Delta x \cong \lambda \quad (1.28)$$

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.

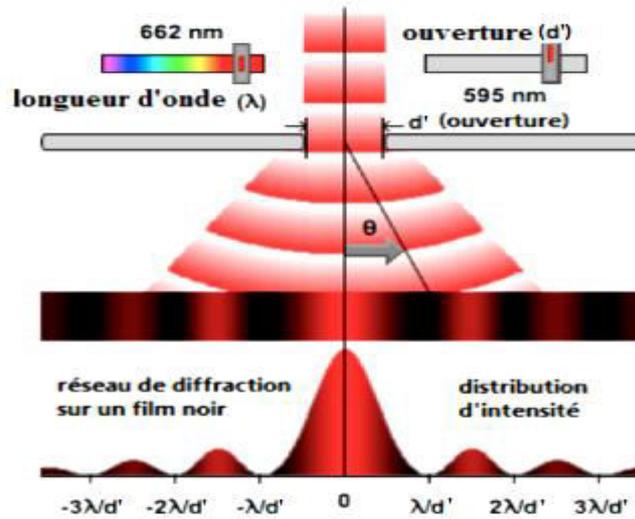


Figure 1.36. Diffraction de la lumière passant par une fente fine [39]

I.8.2.3. Influence du pas du réseau sur la figure de diffraction

Plus la fréquence spatiale du réseau devient importante plus l'angle de divergence des hautes harmoniques augmente, par conséquent la distance entre l'ordre central et les autres ordres devient importante, par conséquent il faut utiliser des lentilles de faible distance focale et de grande ouverture numérique pour capter le maximum des hautes fréquences c'est à dire un nombre d'ordres suffisant permettant de transmettre toutes les informations concernant le réseau. La figure 1.37 présente l'influence du pas de réseau sur la divergence des hautes harmoniques [40].

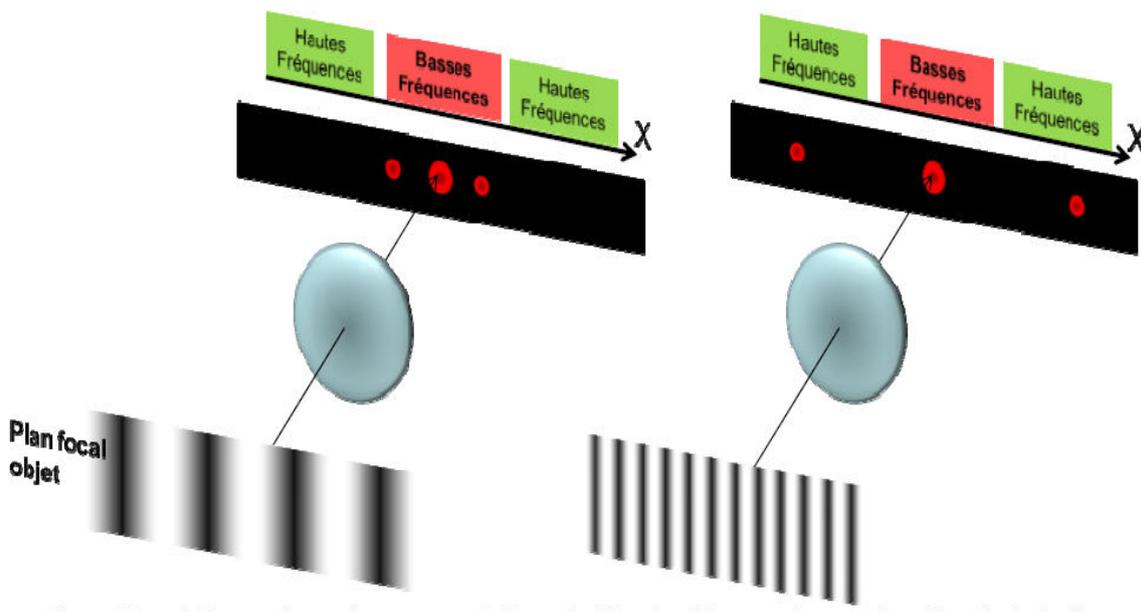


Figure 1.37. Influence du pas du réseau sur la figure de diffraction [40]

1.8.2. 4. Disposition des réseaux

Une étude approfondie de l'effet de moiré et de ces applications a été faite par Guild. Il a traité en particulier les influences dues aux défauts des réseaux et aux défauts de positionnement relatif de ceux-ci (réseaux non en contact parfait) [31].

1.8.2.4.1. Superposition de deux réseaux séparés par un coin d'air

Habituellement, la lumière collimatée illumine le champ entier de deux réseaux qui ne sont pas en contact c'est-à-dire que les réseaux sont séparés d'un coin d'air (figure 1.38). Dans ce cas-ci, un champ entier des rayons sera diffracté par le premier réseau, et un deuxième champ par le deuxième réseau, généralement les rayons diffractés par le premier réseau se focaliseront à un point légèrement déplacé des rayons diffractés au deuxième réseau [41]. Le moiré est perturbé par l'effet de diffraction de manière que certains rayons diffractés d'ordre supérieur émergent du premier réseau sont trop divergents et ne tombent pas sur le deuxième réseau. Il en résulte que les informations concernant le premier réseau ne sont pas transmises entièrement, ce qui engendre que l'image du premier réseau ne correspond pas exactement à l'objet [7]. Il ressort que la prise en considération des phénomènes de diffraction s'avère indispensable dans la formation des franges de moiré lorsqu'il existe un coin d'air entre les réseaux [42]

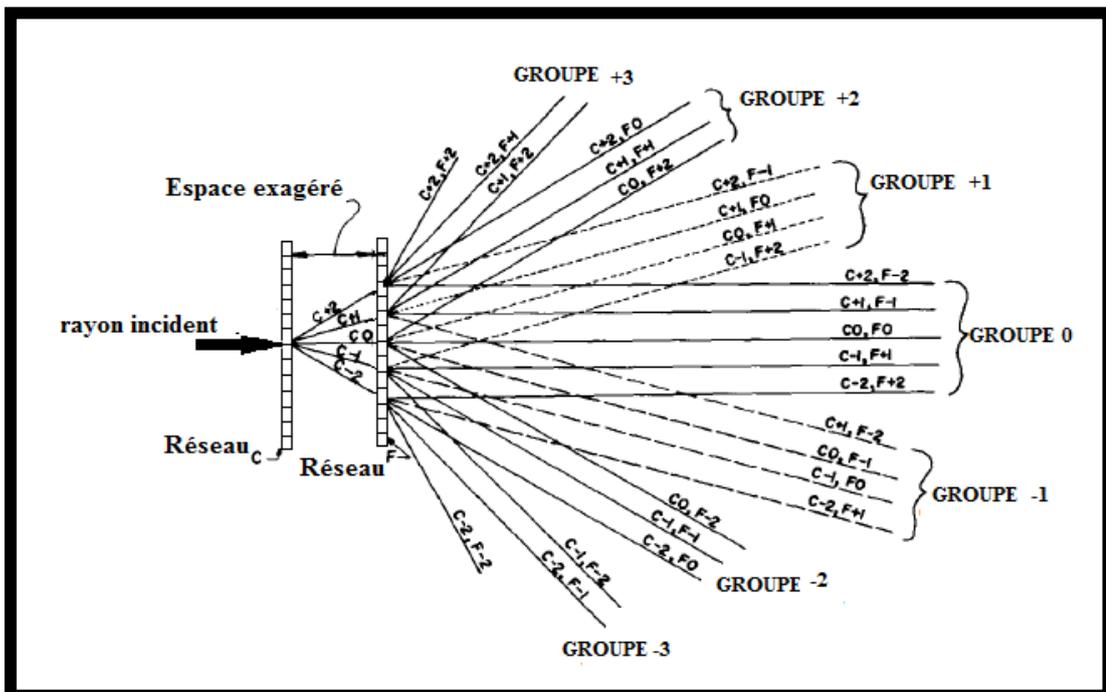


Figure 1.38. Deux réseaux séparés par un coin d'air [41]

### 1.8.2.4.2. Influence des défauts des réseaux en contact géométrique

Le contact rigoureux entre deux réseaux influe sur les franges de moiré, car il est difficile d'assurer un contact parfait vu la qualité de surface de chaque réseau selon le mode de leur fabrication, ceci revient aux facteurs dus aux défauts de planéité des plaques sur lesquelles sont gravés particulièrement les plaques photographiques, ou l'uniformité des couches déposées. Ceci conduit à l'existence d'un coin d'air variable lors de la superposition des réseaux. En séparant progressivement les réseaux on peut se demander à partir de quel moment les effets de diffraction perturbent les franges de moiré.

L'aspect des franges est purement géométrique jusqu'à une épaisseur du coin d'air  $\Delta Z$  qui vaut [42] :

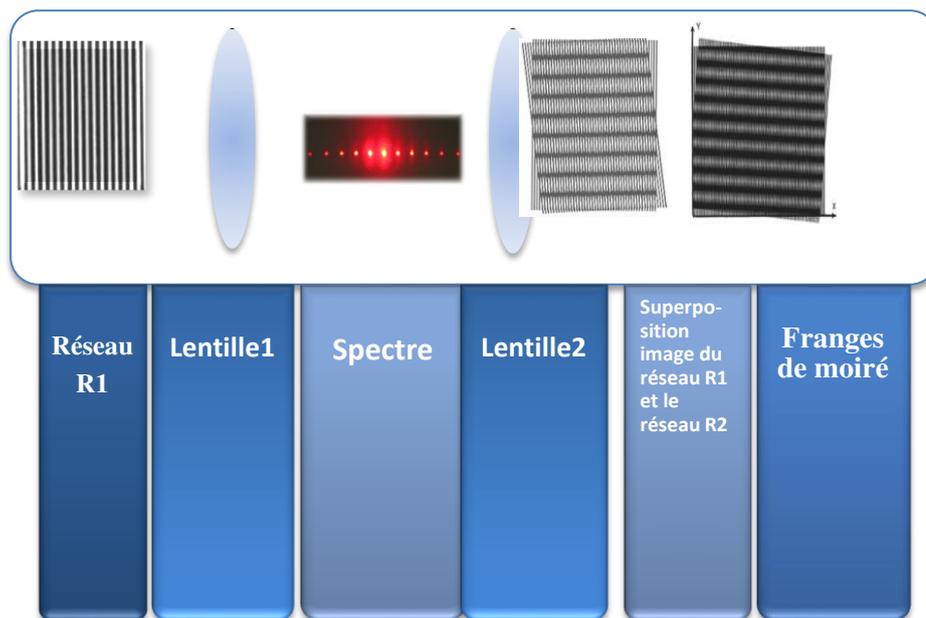
$$\Delta Z \leq \frac{P_1 \cdot P_2}{16\lambda} \quad (1.29)$$

$P_1$  et  $P_2$  : sont les pas des réseaux ,

$\lambda$  : longueur de la lumière utilisée.

### 1.8.2.4.3. Superposition de deux réseaux par voie optique

Lorsque les réseaux sont rigoureusement en contact, les effets de diffraction n'interviennent pas, alors la réalisation d'un contact parfait  $\Delta Z=0$  entre deux réseaux générant le moiré nécessite un système optique adapté à assurer ce contact, de manière que le rayon lumineux en traversant le premier réseau R1 à transmission est diffracté en un ensemble de rayons émergents dans différentes directions, qui sont rassemblés par une lentille qui réalise une transformation de Fourier en son plan focal matérialisée par un ensemble de points discrets. Une deuxième lentille réalise une transformation de Fourier inverse pour superposer l'image du réseau R1 avec grossissement de 1 sur le deuxième réseau R2 légèrement incliné dans son plan d'un angle  $\theta$ . Le rayon lumineux subit une seconde diffraction par les deux réseaux parfaitement en contact et enfin on obtient sur l'écran les franges de moiré (figure 1.39).



**Figure 1.39.** Schéma présentant le principe du contact optique de deux réseaux

### 1.8.3. Contraste des franges

Le contraste est défini par le degré de distinction entre des zones de luminosité différente sur une photographie, c'est-à-dire la différence de luminosité entre les zones claires et les zones sombres, désigné par  $C$ , et défini par l'équation (1.30) [31].

$$C = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (1.30)$$

$I_{\max}$  : intensité lumineuse maximale

$I_{\min}$  : intensité lumineuse minimale

La valeur du contraste est comprise (au sens large) entre 0 et 1. Un contraste de 1 permet de bien discerner les franges lumineuses des franges sombres, et un contraste nul (égal à zéro) signifie que l'intensité est uniformément répartie.

L'information que contient les franges de moiré est importante; son bon traitement est lié à la bonne qualité des franges c'est-à-dire le contraste. La bonne visibilité des franges de moiré dépend du rapport  $a/b=1$ , c'est le rapport entre la largeur de la bande opaque  $b$  et la largeur de la bande transparente  $a$  [7,12]. En éclairage parfaitement cohérent (laser), le contraste des franges n'est maximum que dans les plans de Fourier [43]. L'amélioration du contraste des franges de moiré est acquise par filtrage de Fourier et la multiplication des franges, ce qui permet l'obtention de leur haute qualité. D'un autre côté la croissance de la fréquence du réseau est limitée par la longueur d'onde du laser.

### 1.9. Sensibilité

En cas général la sensibilité est un paramètre exprimant la variation du signal de sortie d'un appareil de mesure en fonction de la variation du signal d'entrée c'est-à-dire c'est le quotient de la variation d'une indication d'un système de mesure par la variation correspondante de la valeur de la grandeur mesurée [36]. Un appareil est d'autant plus sensible qu'une petite variation de la grandeur à mesurer provoquera un changement plus grand de l'appareil de mesure. Pour le cas de la méthode de moiré la sensibilité étant le plus petit déplacement qui puisse être mesuré.

La technique de moiré dépend de la fréquence spatiale des réseaux utilisés, et sa sensibilité est élevée avec des réseaux à pas fin [44], alors l'augmentation de la sensibilité peut se faire par un filtrage spatial pour augmenter la fréquence spatiale des réseaux utilisés [7], et l'application de la technique de multiplication des franges s'avère nécessaire pour augmenter la sensibilité [32,45].

### 1.10. Les techniques de moiré d'exploration

Les techniques de moiré sont des procédures basées sur le phénomène de moiré, elles diffèrent de la manière de générer le phénomène de moiré et de l'utiliser d'avantage dans l'analyse topographique, ces techniques sont :

- ▶ Moiré dans le plan : moiré de translation, moiré de rotation, moiré de battement etc....
- ▶ Moiré hors plan : moiré d'ombre, moiré de projection, moiré de réflexion
- ▶ Moiré interférométrique
- ▶ Moiré holographique
- ▶ Moiré microscopique

### 1.11. Topographie de Moiré

#### 1.11.1. Généralités

Le moiré peut être utilisé pour étudier la topographie des surfaces on parle donc de topographie de Moiré connu par le moiré hors plan ou le moiré topographique. La topographie de moiré, depuis sa naissance est devenue un outil de contrôle en métrologie tridimensionnelle [46]; en conséquence les franges de moiré forment les lignes de contour ou les courbes de niveau de la surface de l'objet à analyser; formant ainsi la topographie de moiré désignée en anglais par **MT**, qui est une des techniques optiques basée sur l'effet de moiré [47].

### *1.11.2. Principe*

Le principe reste toujours le même : un réseau de traits, déformé par la forme d'un objet, interfère spatialement avec un second réseau non déformé pour former des franges de moiré.

Dans un premier temps, les réseaux utilisés étaient constitués de lignes droites séparées d'un pas constant, ce qui permet d'interpréter dans un cas de figure, les franges comme des lignes de niveaux [46].

Maintenant, différentes configurations de projections sont utilisées pour des applications très diverses. L'interprétation des franges reste l'aspect le plus délicat. La précision de mesure par un système de moiré est fixée par l'interfrange, c'est-à-dire la distance, suivant la direction d'observation, qui sépare deux franges observées sur l'objet. L'interfrange dépend du pas du réseau projeté sur l'objet. **MT** contient différentes techniques de moiré telles que :

- ▶ moiré d'ombre
- ▶ moiré de projection
- ▶ moiré de réflexion

### *1.11.3. Localisation des franges*

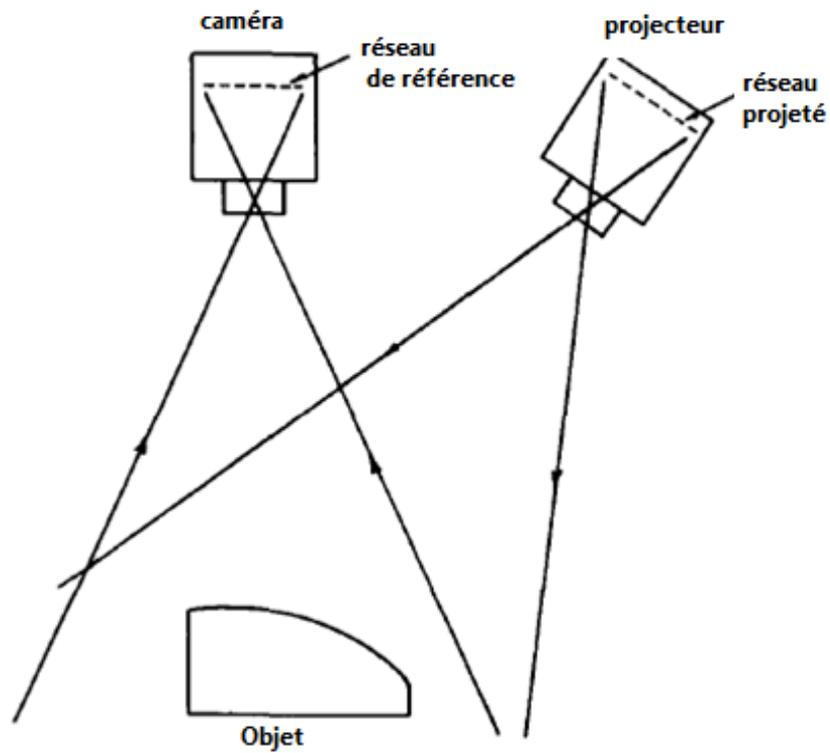
En général les franges de moiré topographique ne sont pas localisées sur la surface de l'objet à tester, mais formées à une distance devant ou derrière la surface. Il a été suggéré que l'attention particulière est portée à la dépendance de localisation des franges sur l'angle de surface de l'objet et la distance de placement [48].

### *1.11.4. Moiré de projection*

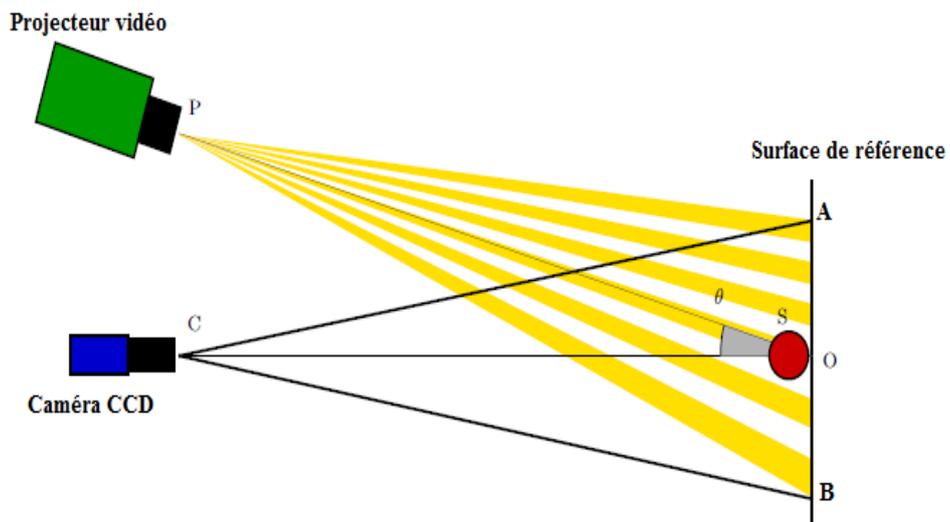
La technique de moiré de projection a eu sa place parmi la famille des méthodes de projection de la lumière structurée qui permettent d'obtenir le relief d'un objet. La plupart des auteurs ont décrit le principe de cette technique selon la figure 1.40a.

Son principe, consiste à projeter un réseau sinusoïdal de lignes parallèles sur la surface de l'objet, le réseau projeté est observé à travers le réseau de référence placé en face de l'observateur. L'interférence entre le réseau projeté et le réseau de référence génère les franges de moiré qui apparaissent sur la surface de l'objet [49]. Ces franges contiennent l'information sur le profil de la surface [50]. D'autre part selon la figure 1.40b, le moiré de projection est déterminé d'une manière qu'un réseau de traits parallèles est projeté à la surface d'un objet à l'aide d'une vidéo projecteur ou d'un projecteur de diapositives. L'objet joue le rôle de déphaseur de réseau. L'analyse, à l'aide d'une caméra CCD, 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 [51].



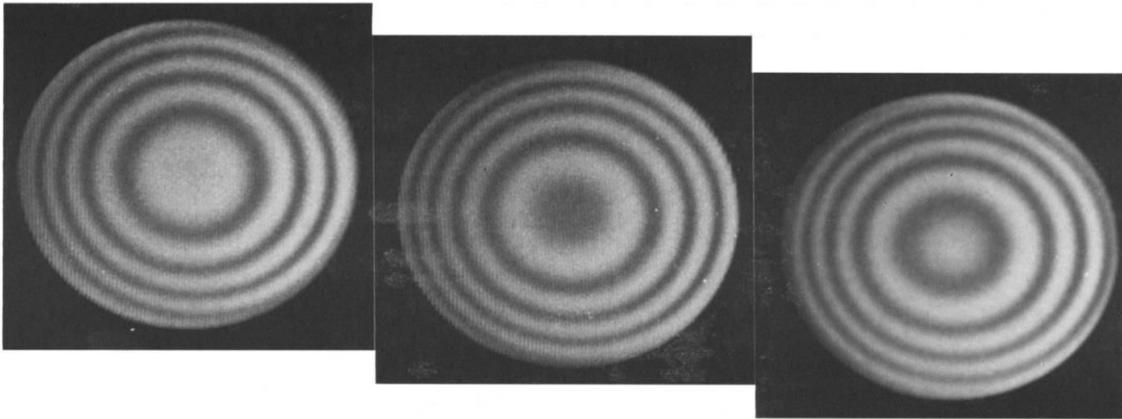
a) [50]



b) [51]

Figure 1.40. moiré de projection

Donnons un exemple de moiré de projection dont des photographies ont été prises à trois positions différentes du réseau de référence (figure1.41).



**Figure 1.41.** Les franges de moiré montrent la différence entre deux surfaces sphériques [49]

### ■ Les applications de la technique

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

#### 1.11.5. Moiré d'ombre

Il s'agit d'une dérivée (conceptuellement, pas historiquement) de la mesure de forme par projection de frange. Son Intérêt est extrêmement facile à réaliser et peu onéreux.

Pas de décalage de phase temporel possible (spatial : pas évident . . .) [6].

Comparons à la technique de moiré de projection, la technique de moiré d'ombre est une technique relativement simple et moins onéreuse [50].

C'est une technique qui utilise un seul réseau, placé près de l'objet et éclairé obliquement par une source de lumière pour avoir l'ombre du réseau. L'ombre du réseau est projeté sur la surface de l'objet, de manière à visualiser directement le moiré entre le réseau de référence et son ombre. Les franges de moiré représentent alors les lignes de niveaux de la surface de l'objet par rapport au plan du réseau de référence figure 1.42 [52]. La différence d'altitude entre deux franges consécutives est en fonction des paramètres géométriques du montage

expérimental. Cette technique est généralement utilisée pour des objets de petites tailles (20 x 30 cm). Pour des tailles plus importantes le moiré de projection bien que moins précis est utilisé. Pour cette étude, la précision est primordiale. L'ombre du réseau est déformé conformément au profil de la surface à tester. Le réseau de base offre à la méthode une bonne précision et une simple préparation; car le réseau projeté et le réseau de référence sont les mêmes. Cette technique présente l'inconvénient est que le réseau de référence a la même taille que l'objet mesuré [53].

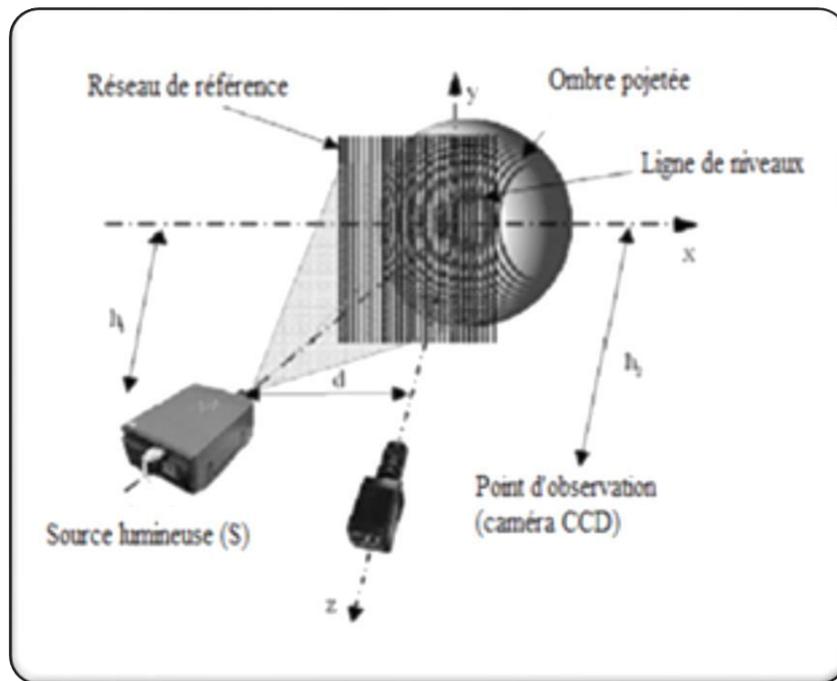


Figure 1.42. Moiré d'ombre [52]

Le principe du moiré d'ombre selon la figure 1.43, le réseau est éclairé sous un angle d'incidence  $\theta_1$  prit par rapport à la normale au réseau, et observé sous angle  $\theta_2$  [26].

Nous pouvons observer le point  $p_0$  du réseau qui est projeté à un point  $p_1$  de la surface qui est projeté ou vu au point  $p_2$  du réseau ; ceci est équivalent à un déplacement du réseau relativement à son ombre et qui est égal à :

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y})(\tan \theta_1 + \tan \theta_2) \quad (1.31)$$

Avec  $h(x, y)$  est la hauteur ou l'altitude entre le réseau et le point  $p_1$  de la surface [26].

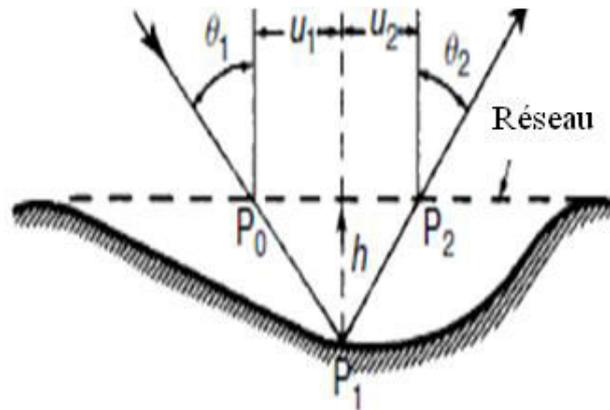


Figure 1.43. Principe du moiré d'ombre[26]

❖ **Quelques applications**

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.

1.11.6. *Moiré de réflexion*

Pratiquement, la méthode de moiré de réflexion a été proposée par Ligtenberg [32]; la figure 1.44 [54], montre le principe de cette méthode. Le réseau est illuminé par une source lumineuse, projeté sur la surface de l'objet qui le réfléchit à travers la séparatrice et capté son image en première position par la caméra. Puis en deuxième position, le réseau est déformé suivant l'inclinaison de la surface de l'objet déformé; l'image du réseau déformé est captée par la caméra. La superposition des deux états du réseau (avant et après la déformation de la surface de l'objet) forme les franges de moiré. Les franges obtenues sont les lignes d'égale pente de la surface déformée.

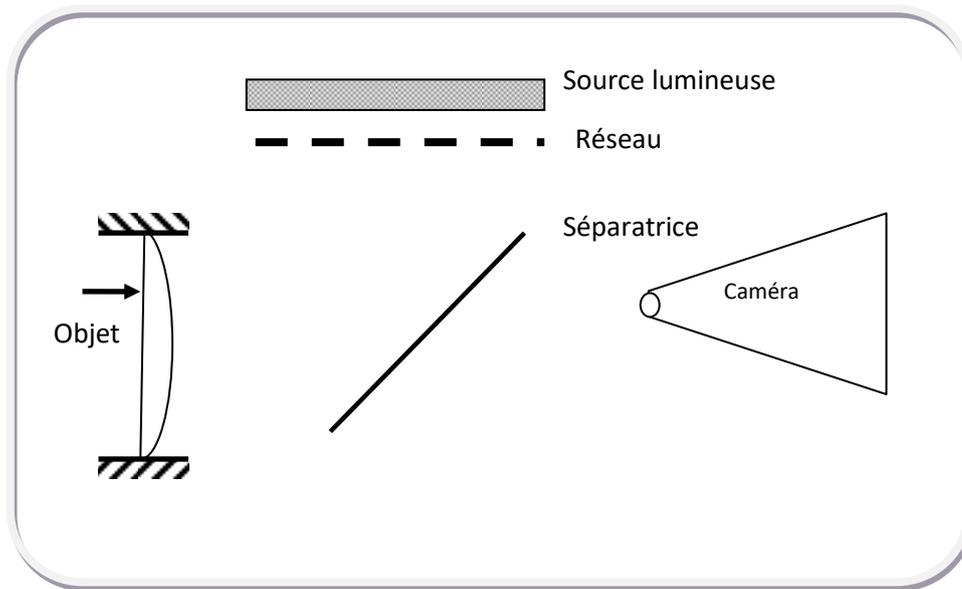


Figure 1.44. Principe de la méthode de moiré de réflexion

## 1.12. Moiré interférométrique

Il s'agit tout simplement du phénomène de moiré généré par une méthode optique basée sur le phénomène d'interférence ce qu'on appelle moiré interférométrique.

### 1.12. 1. Principe

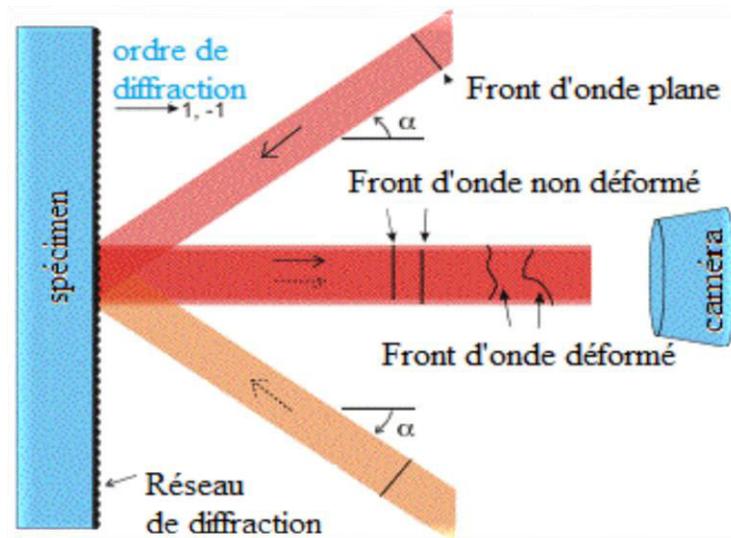
La génération du moiré interférométrique est produite par l'utilisation d'un réseau formé sur le modèle (échantillon) et un réseau virtuel (formé par interférences de deux faisceaux lumineux issus de la même source laser [55]). Son pas est  $p$  et de fréquence  $f$  :

$$f = \frac{2 \sin \alpha}{\lambda} \quad (1.32)$$

Avec  $\alpha$  : l'angle entre la direction du rayon d'ordre zéro et le rayon d'ordre +1 ou -1,

$\lambda$  : la longueur d'onde de la lumière utilisée (exemple laser).

Lorsque l'échantillon ou le modèle à étudier est déformée par l'application d'une force, le réseau formé sur l'échantillon se déforme aussi et par conséquent sa fréquence et l'orientation de ses lignes changent systématiquement. Le réseau virtuel reste inchangé appelé réseau de référence. La condition nécessaire pour obtenir les franges de moiré est que la superposition d'un réseau de référence et d'un réseau échantillon est satisfaite (figure 1.45).



**Figure 1.45.** Moiré interférométrique [56]

### 1.12.2. Technologie portable de l'interférométrie de moiré

C'est une technologie portable de l'interférométrie de moiré, en anglais est désigné par : portable engineering moiré interferometry (PEMI) (figure 1.46) PEMI 2010-X [57].

C'est un instrument innovateur pour des mesures entières de champ de déplacement et de contrainte. C'est un outil unique et puissant pour des analyses micromécaniques des matériaux et des structures, pour la recherche, le développement et l'éducation.

#### 1.12.2.1. Le dispositif

- ◆ Facile à utiliser,
- ◆ Compact et portable,
- ◆ Des franges stables et de haute qualité,
- ◆ La mesure in-situ et en temps réel,
- ◆ Champ entier et de haute résolution.

#### Ses spécifications

- sensibilité :  $0.417\mu\text{m}/\text{ordre de frange}$
- gamme de rapport optique : 0.7-0.8 x
- zone d'essai maximum : 45mm de diamètre, poids : 22.5kg dimensions : 0.3x 0.3 x 0.18m
- ordre de frange de la sensibilité 0.4117

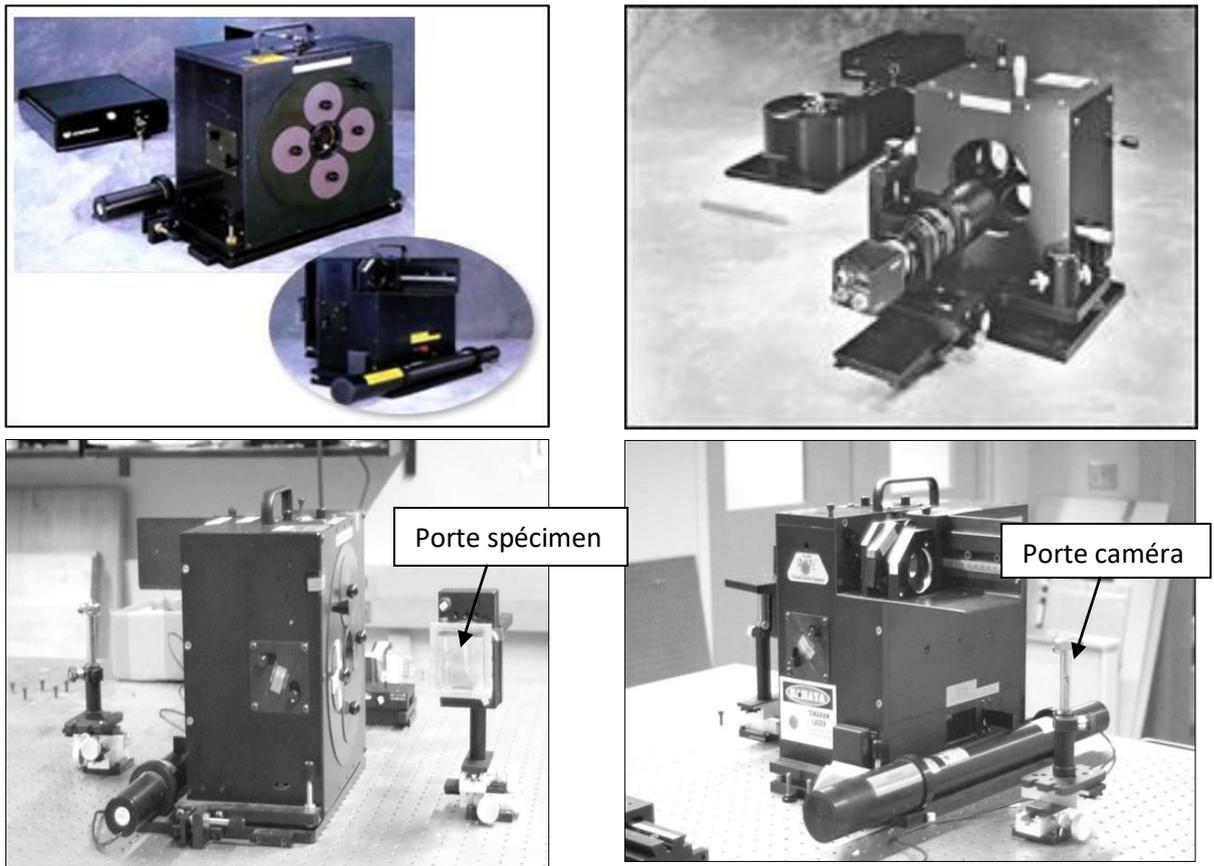


Figure 1.46. Technologie portable de l'interférométrie de moiré (PEMI 2010-X) [57,58]

#### 1.12.2.2. Principe de fonctionnement

La figure 1.47 présente le schéma de principe de l'interféromètre de construction portatif de moiré (PEMI 2010-X), dont la variation de quatre faisceaux de l'interféromètre est illustré. Le rayon laser simple entre dans PEMI, est réorienté pour frapper à l'incidence normale un réseau de diffraction de lignes transversales. Ce réseau interne de référence a une fréquence égale à 1200 traits/mm. Les ordres de diffraction  $\pm 1$  dans les directions d'U et de V sont réfléchis par les miroirs  $U_1$ ,  $U_2$  et  $V_1$ ,  $V_2$  respectivement pour former un réseau de référence virtuelle sur le spécimen. La fréquence de ce réseau virtuel est deux fois celle du réseau interne, ou 2400 traits/mm. Les réseaux de spécimen utilisés dans cette étude ont une fréquence de 1200 traits/mm. Puisque la fréquence du réseau virtuel  $f$  est deux fois celle du réseau spécimen, un premier modèle nul peut être réalisé avec ce montage. Les obturateurs devant le spécimen permettent les faisceaux (horizontaux et verticaux) d'U et de V de s'isoler pour former leurs réseaux respectifs de référence sur le spécimen [58].

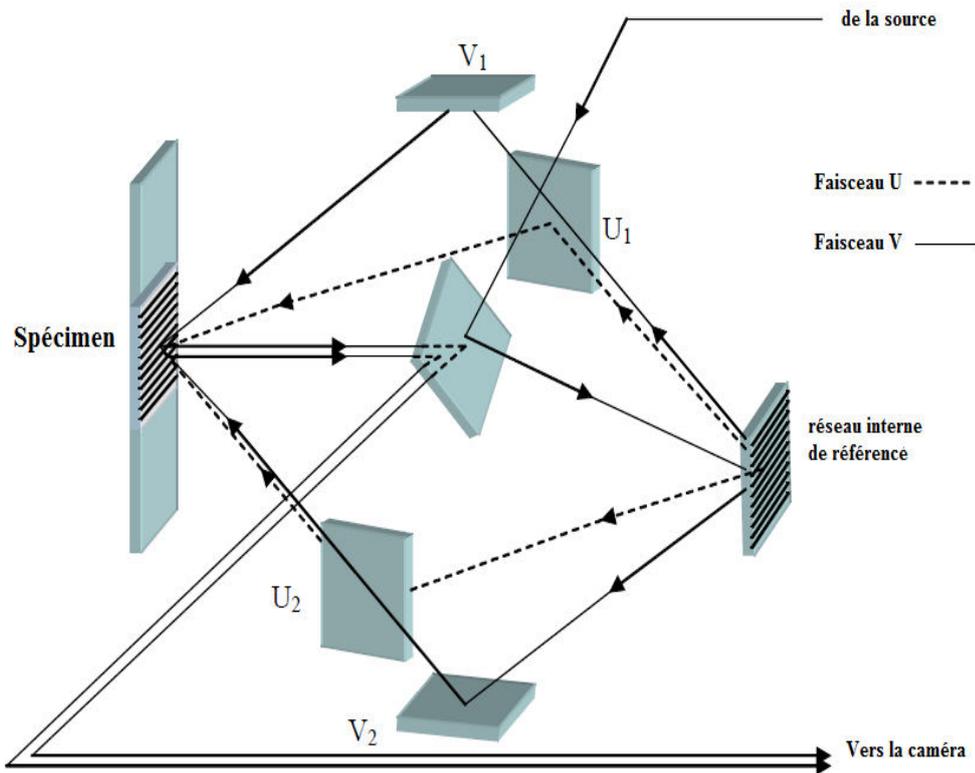


Figure 1.47. Schéma de principe du portable de l'interférométrie de moiré PEMI 2010-X [58]

1.12.2.3. Ses applications :

- ✦ L'analyse de déformation mécanique
- ✦ Mesures thermomécaniques de contrainte
- ✦ Coefficient efficace de dilatation thermique
- ✦ Identifier les emplacements de risque/faiblesse de conception
- ✦ Fiabilité d'évaluation
- ✦ Compléter et vérifier les modèles/simulations

## 1.13. Obtention d'un moiré holographique

### 1.13.1. Principe[59]

Il s'agit d'éclairer l'hologramme d'un objet pris en double exposition par deux ondes de référence mutuellement incohérentes. Ces deux ondes sont légèrement décalées, ce qui permet de produire un dédoublement de la figure d'interférences. Le moiré, résultant de la superposition en intensité de ces interférogrammes identiques mais décalées, est relié au gradient, suivant la direction du décalage, du déplacement représenté par les franges d'interférences. Le principe de cette méthode, qui tire profit des propriétés de reconstruction des surfaces d'ondes par holographie, est illustré par la figure 1.48 [59,60].

L'hologramme (H) est éclairé simultanément par deux ondes de référence mutuellement incohérentes,  $\Sigma R_1$  et  $\Sigma R_2$  faisant un angle  $\Delta\theta$ . A chacune de ces références correspond la restitution dans l'ordre + 1 d'une figure d'interférence. Ces figures sont décalées latéralement de  $\delta x = Z \Delta\theta$  et forment un angle égal à  $\Delta\theta$ .

L'œil perçoit alors une modulation de la figure d'interférence originale par des courbes représentant les points ayant la même valeur de dérivée première, l'accroissement du gradient entre deux courbes successives vaut :

$$\Delta \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \frac{\lambda}{2n_0 \delta x} \quad (1.33)$$

Avec  $n_0$  : indice relatif du milieu dans lequel se propagent les ondes.

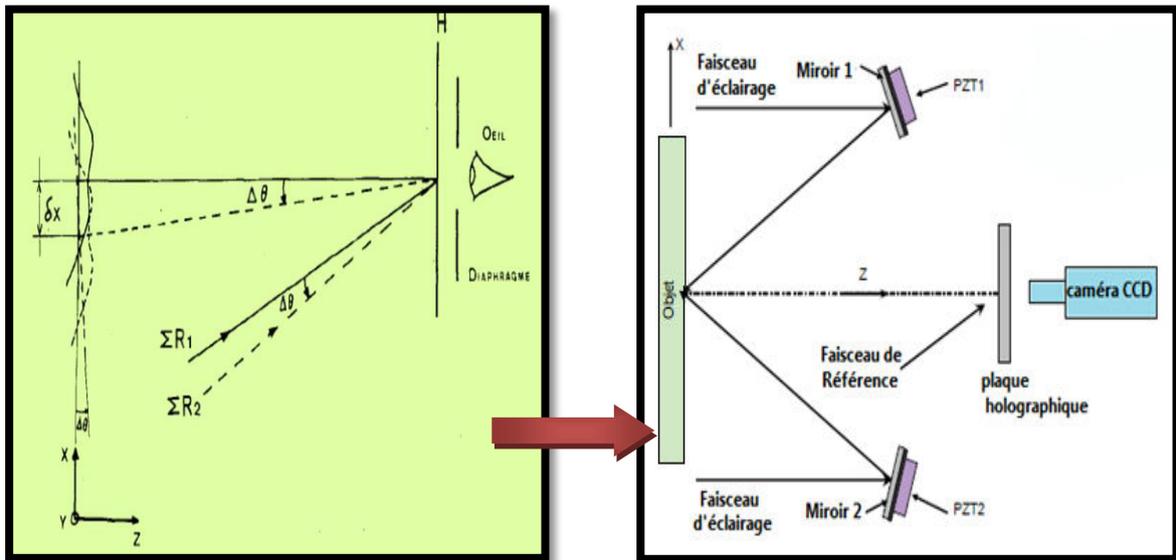


Figure 1.48. Schéma de moiré holographique

Remarque : il est nécessaire que l'œil résolve la fréquence porteuse, c'est dire la figure d'interférences primaire représentative des flèches, afin de distinguer le moiré holographique.

### 1.14. Champ d'applications de moiré

Le moiré est un phénomène bien connu des expérimentateurs; ses applications varient conformément à la technique de moiré appropriée au domaine d'application, particulièrement le milieu de travail [11].

- 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.

- Ce phénomène est utilisé par les ingénieurs pour mettre en évidence des déformations infinitésimales dues à une contrainte mécanique ou thermique (en aéronautique), notamment pour visualiser la dilatation sur une tôle chauffée, par exemple en superposant le réseau de référence au réseau déformé par dilatation, et font apparaître des franges de moiré, qui renseignent sur la dilatation.
- 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.
- Le domaine médical a prit part de l'application de la technique de moiré au début des années soixante dix; le phénomène de Moiré a été utilisé comme méthode de diagnostic clinique dans des analyses topographiques du corps humain [61]. Dès cette date la méthode a commencé à être employée pour des buts médicaux dont elle a prouvé suffisamment ses applications cliniques et extrêmement utiles en tant une technique de diagnostic complémentaire. Ces applications incluent : dépistage précoce de scoliose (Pearsall et autres, 1992, Takasaki, 1982, années et autres, 2003) ; la reconstruction non-envahissante de la colonne vertébrale basée sur les topograms (Dzielinski et autres, 1990); la détection d'autres défauts de forme de la colonne vertébrale (hyperkyphosis, hyperlordosis, dos plane, gibbosité), évaluation de la surface plantaire de pied [47] 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.



**Figure 1.49.** Technique de moiré d'ombre dans la médecine [47]

### 1.15. Conclusion

Ce chapitre a pour but de connaître le phénomène de moiré et de mettre en évidence la technique de moiré, alors nous avons donné les caractéristiques du phénomène de moiré, ainsi que les franges de moiré, ses différentes techniques et ses applications. En soi, les méthodes de moiré offrent des solutions à une large étendue de problèmes de mesure. Pendant qu'une gamme croissante des systèmes de moiré devient disponible dans le commerce, la technologie atteint une étape particulièrement intéressante du développement. Plus les produits récents exploitent des effets de moiré en mesure de:

- La forme de surface,
- La contrainte,
- L'horizontalité et de l'alignement.

Le moiré commence à connaître une deuxième vie grâce à la croissance des technologies d'acquisition d'images, de calcul et à la diminution de leurs coûts.

*chapitre 2*  
*Techniques*  
*de topographie de surface*



## *Chapitre 2 : Techniques de topographie de surface*

### **2.1. Introduction**

Les surfaces en contact physique ou optique se trouvent dans la plupart des machines ou dispositifs. L'étude des surfaces de contact, la tribologie, décrit les interactions des surfaces. Les facteurs primordiaux dans de telles interactions sont les propriétés des matériaux, la topographie de la surface, et les conditions de contact. Afin de comprendre les phénomènes tels que la qualité de la fabrication, l'usure, la friction, et la lubrification, la quantification de la topographie de la surface est importante. De plus, le design des surfaces, telles que les surfaces de miroirs optiques, nécessite un contrôle de la texture de la surface à une échelle très fine [62].

La notion de qualité de la surface englobe deux aspects importants [63]:

- ✓ La topographie de la surface : le défaut de planéité et la rugosité.
- ✓ La métallurgie de la surface (microstructures et propriétés mécaniques, physiques et chimiques de la couche superficielle influencée.

Vouloir caractériser l'intégralité d'une surface ou d'une portion de surface est l'objectif recherché pour connaître son relief, sa texture et ses défauts de surface. Les avancées technologiques repoussent toujours la connaissance et la mesure des états de surface. Ces dernières années ont vu un grand développement d'équipements destinés à la quantification de la topographie de surface, grâce à l'évolution [64]:

- Des appareils de mesures tridimensionnelles à contact.
- De la microscopie à haute résolution.
- Du traitement d'image et de l'information.

La mesure tridimensionnelle des états de surface dépasse le cadre du contrôle qualité des surfaces sur des produits industriels. L'image tridimensionnelle permet d'augmenter les possibilités d'analyse de la texture des surfaces. Elle est destinée davantage à la recherche et à l'expertise [64].

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 quelque soit la taille de la structure (du picomètre au centimètre) à mesurer allant de l'optique, à la médecine aux véhicules à moteur, l'aérospatial, les semi-conducteurs et le stockage de données [65].

La métrologie des surfaces joue un rôle essentiel dans le contrôle de composants optiques, mécaniques ou électroniques. Il existe diverses méthodes qui permettent de caractériser les surfaces par leurs propriétés géométriques macroscopiques (forme : planéité ; rectitude ou circularité), et microscopiques (rugosité) [3].

La vaste étendue de balayage vertical de plus de 70mm permet de mesurer les surfaces séparées par de larges marches ou profondément encastrées, comme par exemple pour les plates formes de forages. La rapidité et la précision sur de vastes surfaces font des interféromètres l'outil optimal pour le contrôle qualité, sur des tests ponctuels ou sur des mesures en direct [65].

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 du signal plus ou moins performants (profilométrie), et enfin mesuré sur une partie de la surface [64].

En général la topographie a pour objet la description et la représentation locale de formes de la surface à étudier. L'étude de la topographie des surfaces apparaît dans de très nombreux domaines scientifiques et technologiques : surfaces optiques, mécanique du contact, déformation des matériaux, tribologie, surfaces biologiques, contrôle qualité, métrologie, perception...

Compte tenu de la nature de la surface, la caractérisation de la topographie d'un objet peut être réalisée par diverses techniques comme les systèmes optiques et mécaniques. En mode mécanique, le stylet de mesure est en contact avec la surface, contrairement aux systèmes optiques où la mesure est réalisée sans contact par faisceau lumineux. La topographie ne peut être déterminée que par des méthodes non destructives sans contact. Diverses techniques optiques permettent de topographier la surface dont chacune d'elles présente ses propres caractéristiques, selon les dimensions de la surface à contrôler [65,66].

## **2.2. Techniques optiques de topographie de surface**

### *2.2.1. Généralités*

La topographie de surface des composants jouent un rôle significatif dans une gamme d'applications de technologie, par conséquent un grand nombre d'instruments qui mesurent l'anomalie des composants ont été développés, particulièrement les instruments optiques.

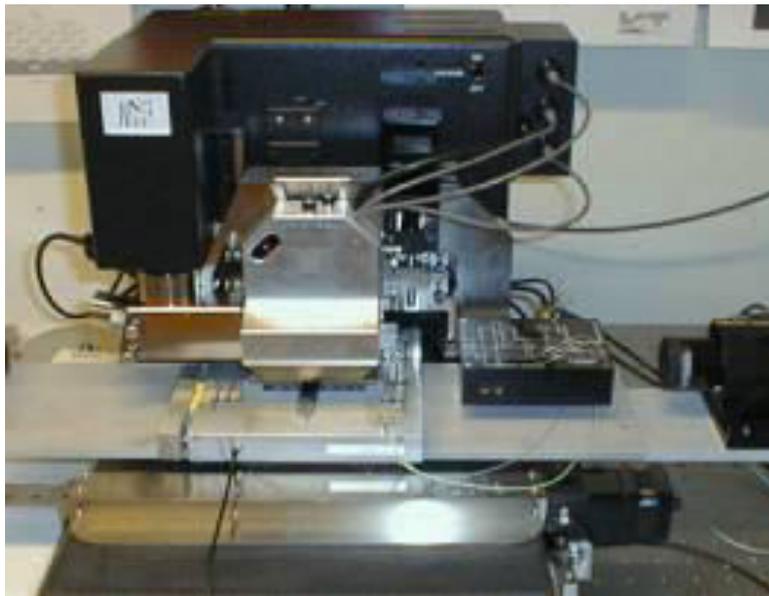
Ces instruments optiques se déclinent en une grande variété de méthodes. Les méthodes optiques de topographie de surface, sont en mesure d'enregistrer la structure topographique

des surfaces sans contact et sans endommager l'état de surface [66-68] dont on évoquera dans cette partie.

De nombreux procédés optiques, comme les techniques basées sur l'interférométrie, la triangulation laser, ou la microscopie confocale permettent de mesurer finement la topographie couvrant toutes les échelles de mesure jusqu'à la résolution atomique (exemple microscope à force atomique « AFM ») [69].

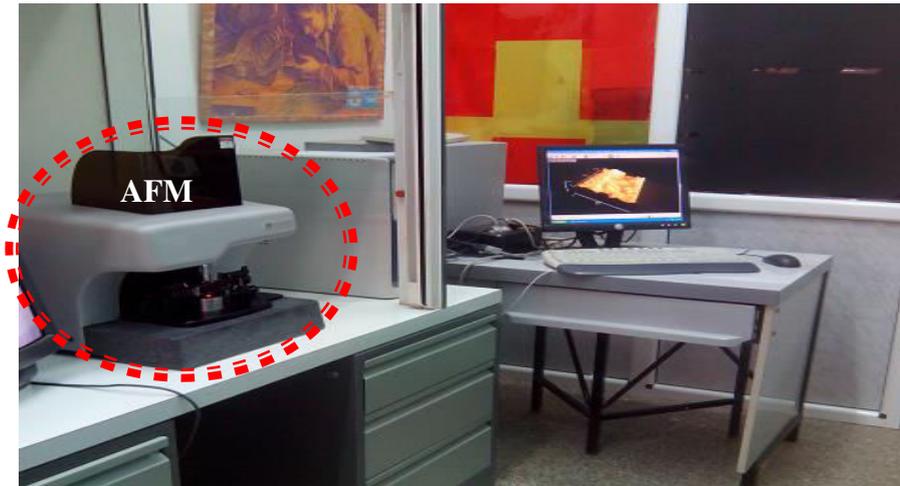
### 2.2.2. Microscopie à Force Atomique (AFM)

Le premier microscope dérivé du microscope à effet tunnel est le microscope à force atomique ou AFM ( Atomic Force Microscope), inventé en 1986 par G. Binnig, C.F. Quate et C. Gerber (figure 2.1). 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 [70].



**Figure 2.1.** Microscope à force atomique [70]

La figure 2.2 présente le microscope à force atomique se trouvant au niveau de l'institut d'optique et mécanique de précision (Université Ferhat Abbas Sétif 1).



**Figure 2.2.** Microscope à force atomique (institut d'optique et mécanique de précision)

### 2.2.2.1. Principe d'AFM [71]

Son principe (figure 2.3), a pour élément de base une pointe souple dont l'extrémité a un rayon de courbure de quelques nanomètres. Cette pointe est en contact avec l'échantillon qui est lui-même fixé sur un scanner à céramiques piezo-électrique, en quelques secondes (habituellement moins de 5 sec.) apparaît alors une image 3D de la surface, qui peut tout à fait être comparée à celle obtenue à l'aide d'un microscope électronique à balayage mais qui requiert uniquement une fraction de temps.

Lorsque l'on applique une tension à ces céramiques, elles se dilatent ou se contractent, ce qui permet de déplacer l'échantillon dans les trois directions de l'espace  $x$ ,  $y$ ,  $z$  avec une précision de l'ordre de 0,1 nm. Un laser est réfléchi sur la pointe (sonde) AFM puis collecté dans une photodiode à quatre cadrans (figure 2.4). Ce dernier permet de mesurer la déflexion (cadrans a et b) et la torsion de la pointe AFM (c et d). Lorsque la pointe souple rencontre un obstacle, elle peut se plier et le laser change de position dans la photodiode. Une boucle de rétroaction permet également de contrôler la force d'appui de la pointe sur l'échantillon. La position du laser dans les cadrans donne ainsi directement accès à la topographie de l'échantillon. En AFM il existe 3 modes d'opération:

- Le mode contact
- Le mode non-contact qui consiste en une oscillation de la pointe à la surface de l'échantillon sans jamais rentrer en contact avec celui-ci.
- Le mode tapping (ou contact intermittent) qui correspond à une oscillation de la pointe qui rentre en contact intermittent avec l'échantillon.

Dans le mode contact, la pointe et l'échantillon sont en contact permanent. Grâce à la boucle de rétroaction, la force normale à la surface peut être maintenue constante à une valeur min.

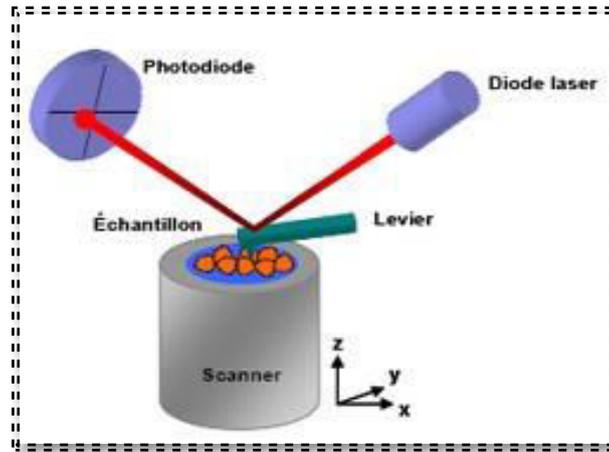


Figure 2.3. Principe de l'AFM [71]

### 2.2.2.2. Fonctionnement d'un AFM

La figure 2.4 décrit le fonctionnement d'un AFM commercial. L'échantillon est porté par un ensemble de translateurs piézo-électriques, le micro levier est placé au voisinage de l'objet de telle sorte que la pointe soit en contact avec la surface (mode de contact) ou à quelques Angströms de cette dernière (mode attractif). Le balayage, à la différence de la plupart des microscopes optiques en champs proches, consiste à déplacer l'objet et non la sonde puisque la position du micro levier doit être fixe par rapport au détecteur. La technique d'AFM est la seule méthode qui donne accès directement à la hauteur des structures (direction z).

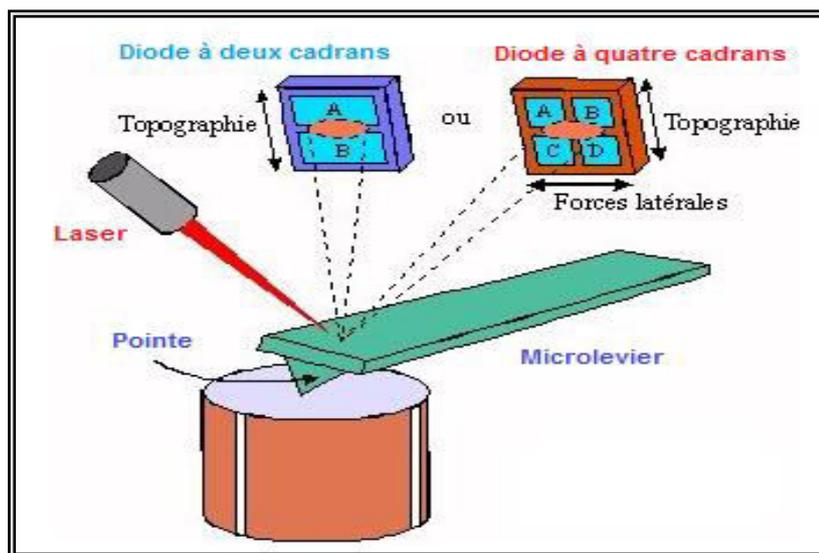
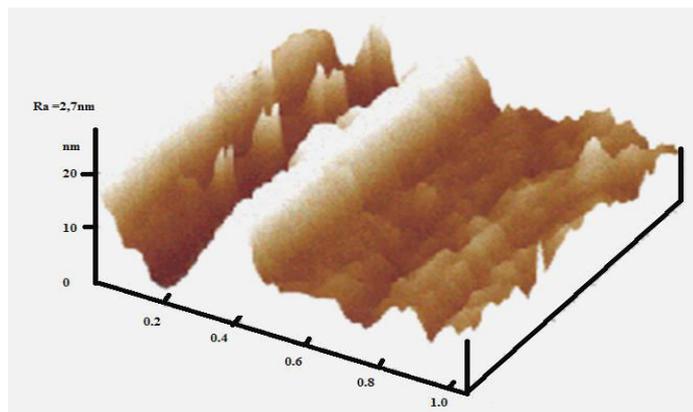


Figure 2.4. Fonctionnement de l'AFM [70]

### 2.2.2.3. Utilisation de l'AFM

Son utilisation ne nécessite pas de préparation invasive de l'échantillon contrairement à d'autres méthodes à haute résolution (par exemple microscopie électronique à transmission). Un aspect fondamental de l'utilisation de l'AFM consiste en la possibilité de travailler en milieu liquide, souvent aqueux. Cet avantage fait de l'AFM une méthode de choix pour la caractérisation des objets biologiques en conditions natives, physiologiques, en temps réel et avec une résolution inégalée. Cette technique a en effet, de fournir des images en 3-D de structures biologiques y compris les biomolécules, les films lipidiques, les protéines, les acides nucléiques, les cellules entières, etc. Elle permet également, grâce à la spectroscopie de force, d'accéder aux propriétés physiques de la surface telles que l'élasticité, l'hydrophobicité et les interactions intra- et intermoléculaires [71]. La figure 2.5 présente l'image d'une feuille d'aluminium obtenue au microscope à force atomique (AFM).



**Figure 2.5.** Topographie d'une feuille d'aluminium obtenue par AFM [70]

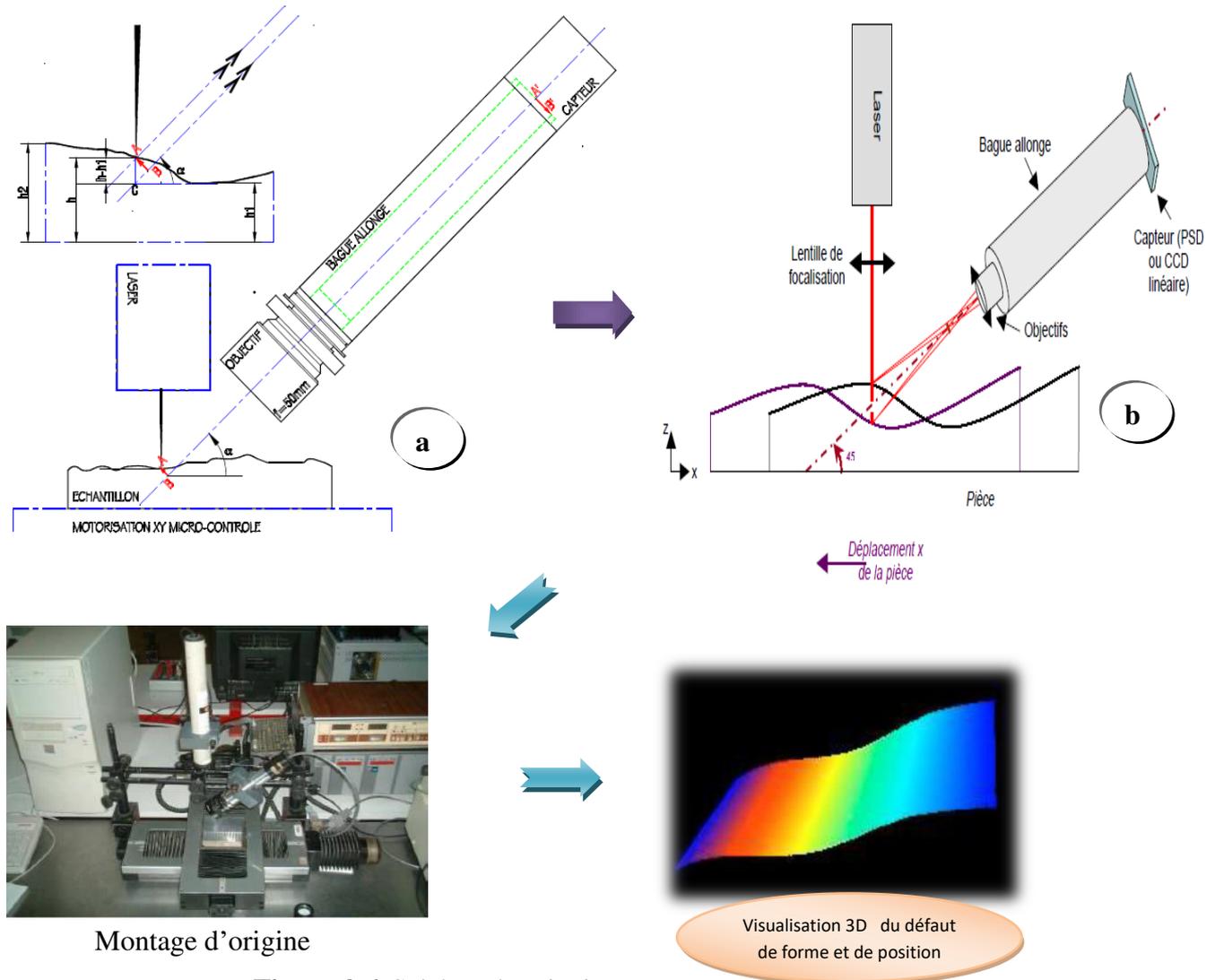
### 2.2.3. Système de mesure topographique par triangulation

On se propose de faire la métrologie topographique d'un échantillon en utilisant une technologie optique sans contact par triangulation. La profilométrie par triangulation est très utilisée dans l'industrie [72,73].

#### 2.2.3.1. Le principe

L'échantillon est éclairé à l'aide d'un faisceau laser et on réalise l'image du point d'incidence à travers un objectif sur un capteur PSD (Position Sensitive Detector) ou CCD (Charged Coupled Device). Lorsqu'on déplace l'échantillon, le module du vecteur AB sera proportionnel au défaut de planéité et de parallélisme de la surface. Le capteur délivrera un signal électrique proportionnel à la taille du vecteur image A'B' (figure 2.6a). Par méthode de triangulations successives le profil de la face d'une pièce à analyser peut être reconstitué en

pratique par déplacement de la pièce sur deux axes à l'aide d'une table XY (figure 2.6b), et la coordonnée Z mesurée à l'aide d'un bras optique. La recombinaison de tous les points dans une image, donne le profil en 3D. L'utilisation du capteur PSD à des fins métrologiques nécessite un étalonnage. Il faut mémoriser les altitudes  $h_1$  et  $h_2$  de deux points de l'échantillon (figure 2.6a) ainsi que leurs tensions correspondantes, à partir de ces altitudes l'altitude  $h$  d'un point palpé peut être calculée.



#### 2.2.4. Le Premier microscope double cœur associant la technologie confocale et interférométrie [74]

Ces dernières années, le marché de la métrologie de surface sans contact a été dominé par une concurrence féroce entre les interféromètres et les profilomètres optiques basés sur la

technologie confocale. Ils permettent en effet tous deux de mesurer de manière précise et fiable des topographies de surface dans des gammes de mesure allant du nanomètre à plusieurs millimètres.

### 2.2.4.1. Le DCM 3D

C'est le premier microscope de mesure 3D double cœur (DMC 3D) qui combine la technique confocale avec l'interférométrie. Le DCM 3D évalue la micro- et la nano-géométrie des surfaces sans contact. Ses applications sont multiples, des laboratoires de recherche et développement (R&D) et de contrôle qualité aux systèmes automatisés de commande de processus en ligne nécessitant des vitesses rapides et une résolution allant jusqu'à 0,1 nanomètre.

Le microscope de mesure 3D double cœur, DCM 3D (figure 2.7), présente une combinaison unique alliant, en un seul instrument, la microscopie confocale et l'interférométrie. La technologie de base repose sur un système de micro-affichage remplaçant le diaphragme de champ. Le micro-affichage permet d'obtenir des images confocales, interférométriques ou fond clair.



**Figure 2.7.** Le profilomètre 3D, LEICA DCM 3D [74]

### 2.2.4.2. Caractéristiques de la profilométrie confocale

Le mode Confocal est utilisé pour mesurer la topographie de surfaces très rugueuses à lisses. Même les structures fines de la surface deviennent visibles sans toucher la surface de

l'échantillon. En quelques secondes, l'échantillon est balayé verticalement par pas prédéfinis pendant lesquels chaque point de la surface traverse le plan focal. Toutes les informations hors plan focal sont éliminées et les images confocales acquises donnent des informations détaillées de l'échantillon à haute résolution et à haut contraste dans les trois dimensions.

La profilométrie confocale donne la résolution latérale maximale en quelques secondes. Cependant, la principale raison d'appliquer l'imagerie confocale à la profilométrie de surfaces est de pouvoir mesurer dans la dimension Z. Les objectifs à grande ouverture numérique (NA) égale à 0.95 et à fort grossissement facilitent la mesure des surfaces lisses pouvant contenir des pentes locales même raides de plus de 70° d'inclinaison. Contrairement aux systèmes à balayage laser ou à disque rotatif, la technologie confocale MD ne renferme aucun composant mécanique mobile, ce qui accroît le rendement lumineux et la stabilité d'image en cas de fort grossissement, tout en améliorant la fiabilité et la flexibilité. Associée à une source lumineuse LED (Diode Electroluminescente), la technologie MD allonge la durée de vie de l'appareil, réduit les coûts de maintenance et permet de faire l'économie de coûteuses pièces de rechange.

### *2.2.4.3. Principe de mesure*

Le mode interférométrie est appliqué pour obtenir les résolutions verticales les plus élevées. À l'intérieur d'un objectif d'interféromètre, le faisceau lumineux traverse un séparateur de faisceaux, qui dirige simultanément la lumière à la fois vers la surface de l'échantillon et vers un miroir de référence intégré. La partie de lumière réfléchie à la fois de la surface de l'échantillon et du miroir de référence recompose une figure d'interférence de franges. Cette figure fournit une mesure de la position verticale relative des zones de l'échantillon observées et, ainsi, une information extrêmement précise sur la surface. En fonction du degré de résolution verticale nécessaire, l'utilisateur appuie simplement sur un bouton pour effectuer une mesure VSI (Vertical Scanning Interferometry) ou PSI (Phase Shift Interferometry)

#### ► La profilométrie VSI pour une grande variété de surfaces

Le mode interféromètre à balayage vertical en lumière blanche (VSI) est utilisé pour mesurer la hauteur des surfaces lisses à modérément rugueuses. Comme pour le mode confocal, l'échantillon est balayé verticalement par pas, de sorte que chaque point de la surface traverse le plan focal et que le contraste de franges maximum survienne à la position focale optimale pour chaque point sur sa surface. La hauteur de la surface à chaque emplacement de pixel est trouvée en détectant le pic des enveloppes des franges étroites.



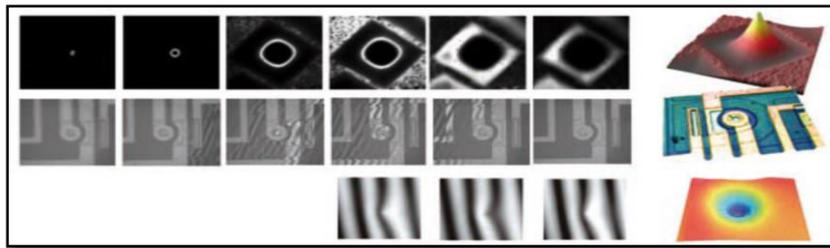
**Figure 2.8.** Principe du profilomètre 3D, LEICA DCM 3D [74]

► **Mesure PSI de profils de hauteur inférieure au nanomètre**

Le mode interféromètre en phase décalée (PSI) est utilisé pour obtenir des mesures à résolution maximale des surfaces continues très homogènes. En moins de 3 secondes, les paramètres de la texture d'une surface très homogène, telle qu'un wafer à effet miroir sont mesurés avec une résolution inférieure au nanomètre. Pour obtenir ce niveau extrême de résolution, l'échantillon focalisé est balayé verticalement par pas qui correspondent à des fractions très précises de la longueur d'onde. Les algorithmes de calcul du profil produisent une carte de phase de la surface, qui est convertie en carte de hauteur correspondante via un procédé de dépliement.

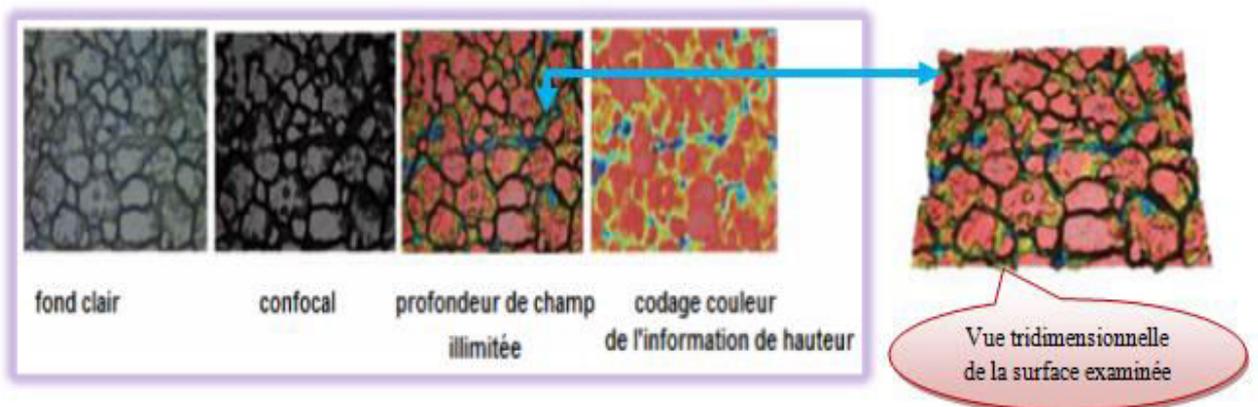
***B) Mesure***

Les mesures de surface sont effectuées en quelques secondes. Le système est en outre très simple d'utilisation: il suffit de placer l'échantillon sous le microscope, de faire la mise au point et d'appuyer sur une touche. En quelques secondes (habituellement moins de 5 sec), apparaît alors une image 3D de la surface (figure 2.9), qui peut tout à fait être comparée à celle obtenue à l'aide d'un microscope électronique à balayage mais qui requiert uniquement une fraction de temps.



**Figure 2.9.** Profilométrie confocale par le cas de l'interférométrie à décalage de phase (PSI) et de l'interférométrie à balayage vertical (VSI)

Il est possible de déterminer les paramètres de qualité appropriés pour la surface, afin de décider si le traitement de surface est suffisant ou non. En plaçant l'échantillon sous le microscope, on obtient un bon aperçu de la profondeur des microcavités. L'image confocale en temps réel permet de faire une mise au point sur la surface, ainsi que dans les cavités dont on peut déterminer directement la profondeur pour avoir une vue en 3D, le balayage confocal s'effectue si rapidement; une représentation en fausses couleurs des hauteurs mesurées apparaît à l'écran, fournissant une image claire des microcavités de l'échantillon. La figure ci-dessous montre le résultat d'une telle mesure (figure 2.10).

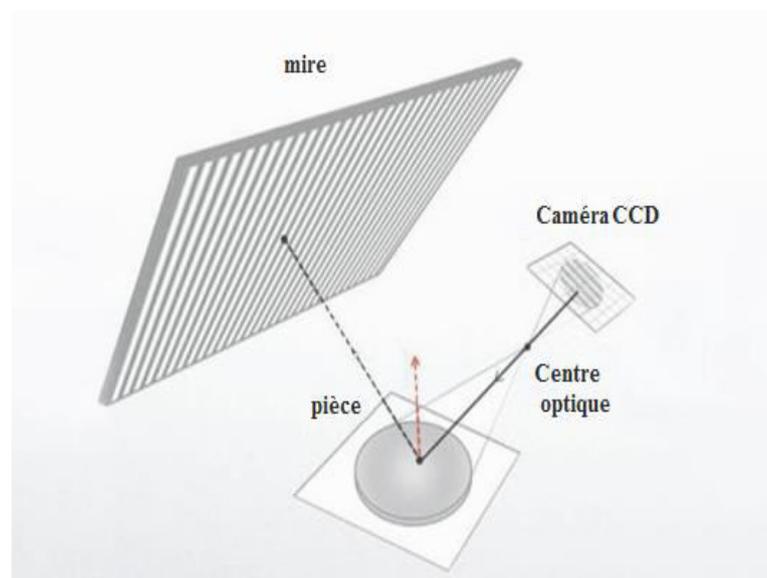


**Figure 2.10.** Modes de fonctionnement du microscope

### 2.2.5. Principe de base de la technique optique d'Optimap™ [75]

Optimap™ est un instrument Rhopoint qui mesure la topographie d'une surface et affiche les défauts et l'image de la texture, avec un niveau de détails inégalé. Le principe de la technique optique utilisée (figure 2.11) est robuste : elle est insensible aux variations de lumière ambiante, de température et aux vibrations. Elle est basée sur la déflectométrie optique à décalage de phase. C'est une technique optique en lumière blanche qui permet d'obtenir le champ des pentes locales. La surface dont on cherche à mesurer les pentes renvoie

vers une caméra la lumière issue d'une mire sur laquelle est affiché un motif périodique, constitué de franges sinusoïdales (sorte de règle graduée). Ce motif permet de déterminer, pour chaque pixel de la caméra, les coordonnées du point de la mire qui émet la lumière, qui sont proportionnelles à la phase spatiale du motif sinusoïdal affiché. Si la position des éléments géométriques (caméra, pièce, mire) dans l'espace est connue, la trajectoire du rayon lumineux incident sur chaque pixel peut être reconstruite. La direction de la normale à la surface en chaque point et donc les pentes, peuvent alors être déduites. La dérivation des pentes mesurées permet d'accéder aux courbures de la surface, paramètres pertinents pour l'évaluation de ses défauts localisés. Les cartes de courbures peuvent alors être traitées afin de permettre une détection automatique des défauts de surface (creux, bosses, etc.). Contrairement aux systèmes de vision « classiques », cet équipement fournit un contrôle objectif et répétable, basé sur une mesure.



**Figure 2.11.** Schéma de principe de base de la technique optique [75]

### 2.2.6. Microscope d'interférences [62]

Le microscope d'interférences présenté dans la figure 2.12 est une autre méthode de non-contact pour les mesures topographiques. Il s'agit d'une technique optique utilisant l'interférométrie pour déterminer la distance de l'objectif à la surface de l'échantillon. En variant la hauteur des lentilles optiques au-dessus de l'échantillon et en enregistrant les franges d'interférences, une carte en hauteur est construite par l'ordinateur.



Figure 2.12. Microscope d'interférence ZYGO [62]

### 2.2.7. 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  $\mu\text{m}$ . Enfin, Il est également possible de réaliser des mesures de contraintes localisées pour en réaliser une cartographie [76].

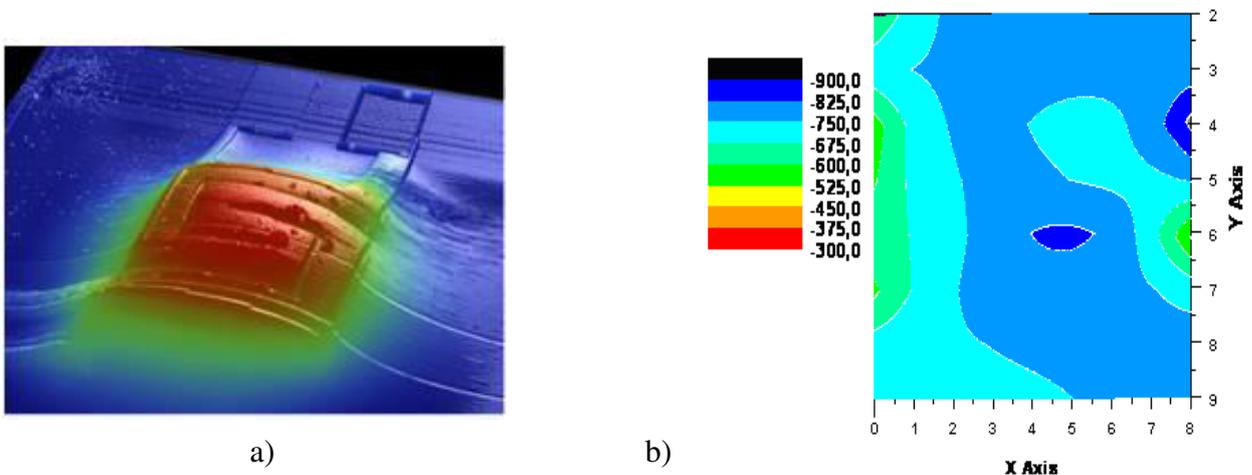


Figure 2.13. a) Topographie de la déformation d'un capteur souple, b) cartographie des contraintes supportées par un film mince [76]

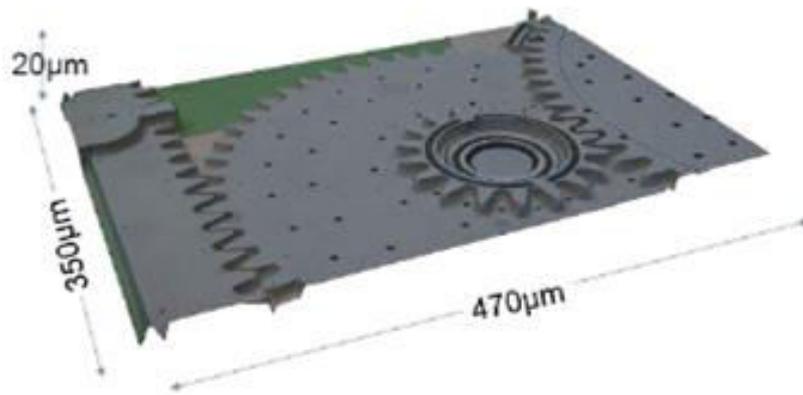
### 2.2.8. Profilomètres Optiques

#### 2.2.8.1. La profilométrie optique

La profilométrie optique regroupe un ensemble de technologies de métrologie de surface sans contact. Chaque technologie optique est unique et complémentaire adaptée au besoin

métrologique. La profilométrie optique est une méthode d'imagerie sans contact permettant de caractériser la topographie des surfaces.

Une analyse classique donne des images en 2D et en 3D de la surface (figure 2.14) [77].



**Figure 2.14.** Application horlogerie, image 3d - 470  $\mu\text{m}$  x 350  $\mu\text{m}$ , z : 20  $\mu\text{m}$  [77]

### 2.2.8 .2. Profilomètres Optiques pour l'industrie

Scientec propose d'instruments variés qui permettent d'obtenir des topographies 3D de surface en haute résolution, de manière simple et rapide; puis exploitez les résultats et affichez une analyse approfondie en quelques clics [78]. La figure 2.15 présente un des instruments type :



**Figure 2.15.** Profilomètre optique MICRO XAM-800

Le profilomètre optique est un système de mesure de topographie de surface 3D sans contact. L'interféromètre à lumière blanche génère des mesures à haute résolution de la surface, la résolution est au niveau de l'angström. Le système prend en charge les interféromètres à balayage de phase et vertical, qui sont tous deux des techniques traditionnelles d'interférométrie à balayage de cohérence (CSI). L'avantage de la technique de mesure réside dans le fait que la résolution verticale de la mesure est indépendante de l'ouverture numérique

de l'objectif, ce qui permet des mesures haute résolution avec un grand champ de vision. La surface mesurée peut être encore augmentée en assemblant plusieurs champs de vision en une seule mesure.

Ses avantages sont :

- Pour l'industrie
- Mesure automatisée sur plusieurs sites
- Lumière blanche VSI & PSI
- Interférométriques : lumière blanche VSI - PSI
- Simple et flexible

### *2.2.8.3. Profilométrie (LPSI)*

Le LPSI possède un profilomètre optique WykoNT1100 [79,80]. Ce type d'appareil qui fonctionne sur les bases d'un microscope à interférences permet de mesurer la topographie de surfaces de manière non-destructive (sans contact avec la surface) (figure 2.16).

#### *2.2.8.3.1. Le principe du microscope interférométrique*

La figure 2.17 présente le principe du microscope interférométrique. La lumière est envoyée sur une séparatrice (beamsplitter) qui l'envoie d'une part sur la surface à analyser et d'autre part sur un miroir. Les lumières venant du miroir et revenant de la surface sont recombinaées (il est donc nécessaire que la surface soit un peu réfléchissante, 4%).

La figure d'interférences est ensuite analysée à l'aide d'une caméra CCD et d'un logiciel très puissant. L'appareillage permet des déplacements très précis de l'objectif. En faisant un balayage verticale de cet objectif, on récupère pour chaque hauteur de l'objectif une figure d'interférences aux endroits où la surface est à la « bonne » hauteur. L'analyse précise de ces figures d'interférences permet une reconstitution de la topographie de la surface. Ainsi une précision de l'ordre de quelques Angströms est possible en vertical mais la précision en horizontal est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière donc environ du demi-micron. Les figures (2.18, 2.19) [79] montrent quelques exemples des possibilités de mesure par cet appareillage.

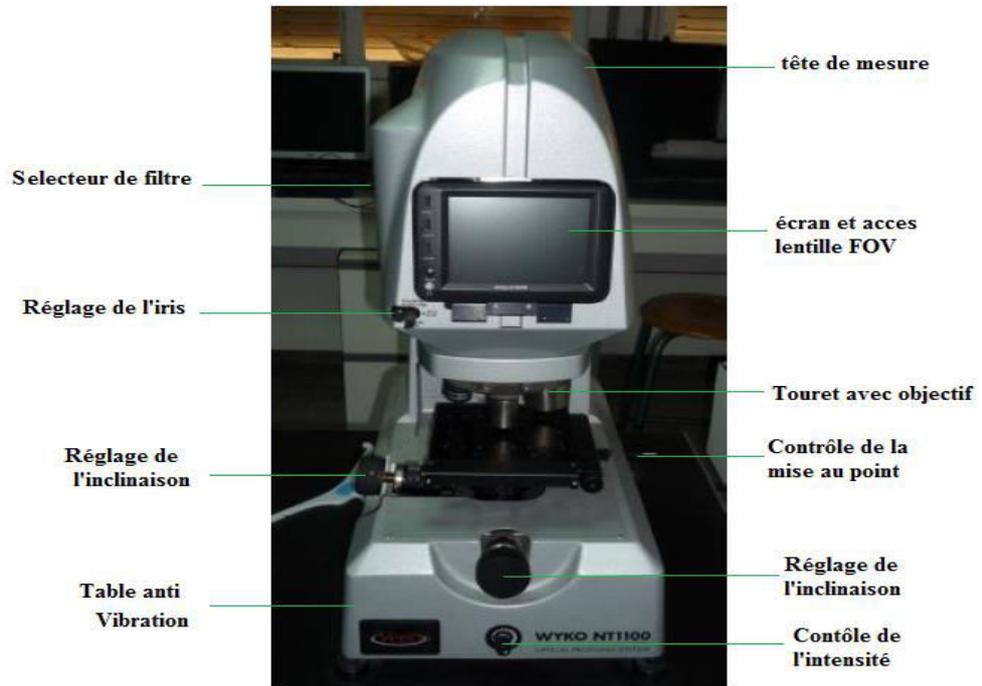


Figure 2.16. Profilomètre optique WYKO NT 1100 [79,80]

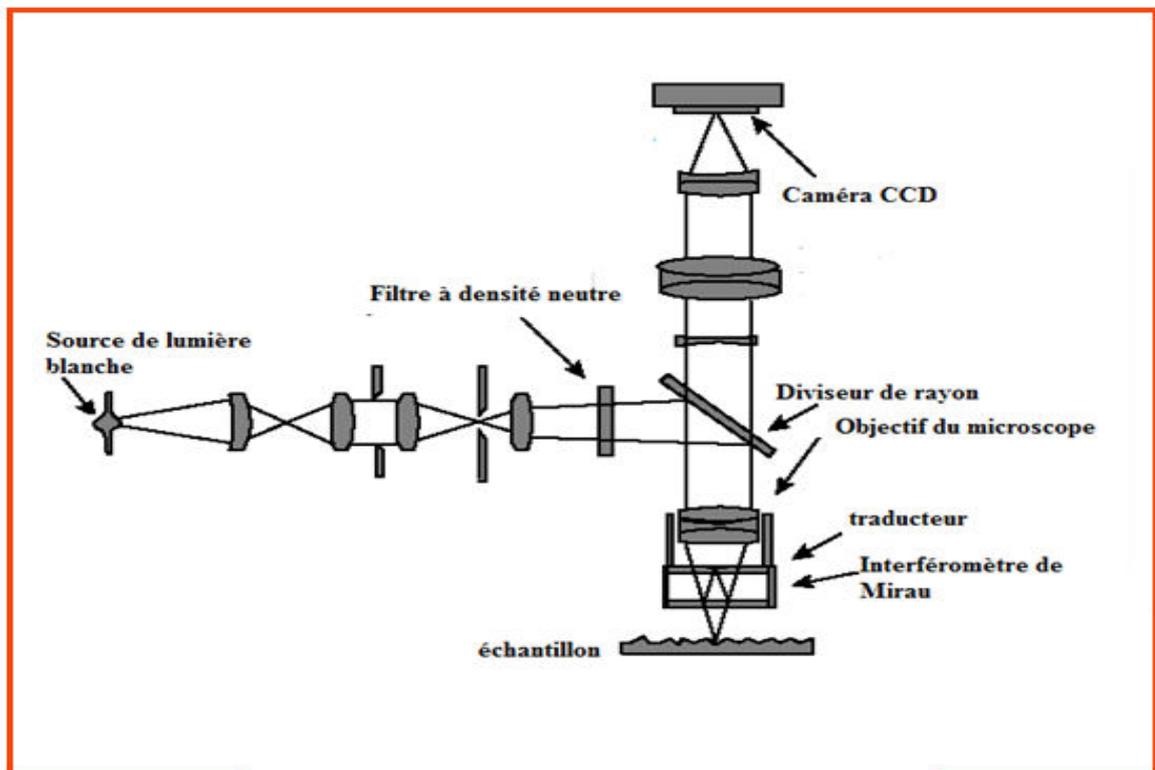
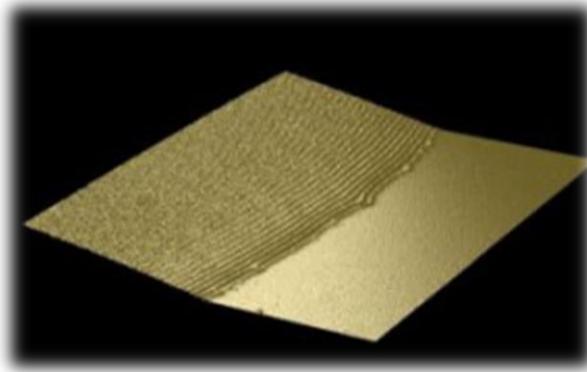
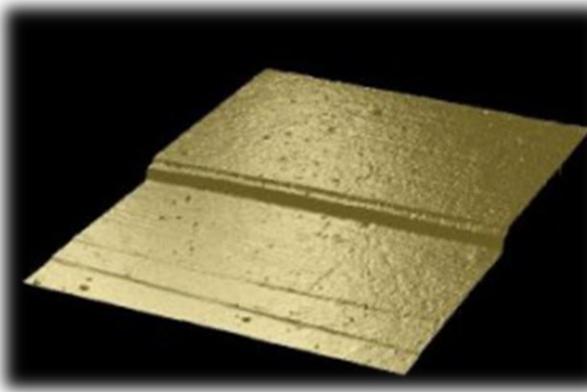


Figure 2.17. Principe du microscope interférométrique [81]

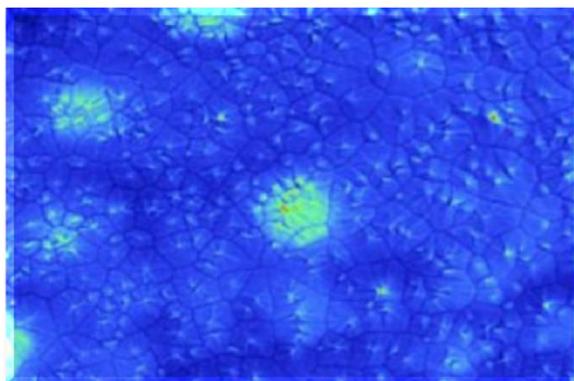


**Figure 2.18.** Étalement d'une huile silicone sur du verre. On mesure l'angle de contact dynamique de 1.10 deg (L'échantillon fait environ 450 x 600  $\mu\text{m}$ )



**Figure 2.19.** Mesure d'une marche de couche de langmuir-blodgett. 20 couches d'acide arachidique ont été déposées (l'échantillon fait environ 240 x 180  $\mu\text{m}$ )

Le logiciel d'analyse fournit avec le profilomètre et permet toutes les mesures et analyses classiques de rugosité. Selon l'exemple de la figure 2.20, l'amplitude de rugosité moyenne  $R_a$  est de 55 nm et l'amplitude maximum  $R_t$  est de 1.3  $\mu\text{m}$



**Figure 2.20.** Mesure de rugosité d'une surface de polymère cristallisé (pp) [79]

### 2.2.9. Topographie plein champ et sans contact de films minces nanométriques par interférométrie numérique couleur [82]

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 2.21), le dispositif dispose 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 <math>< 1\mu\text{m}</math>, 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.

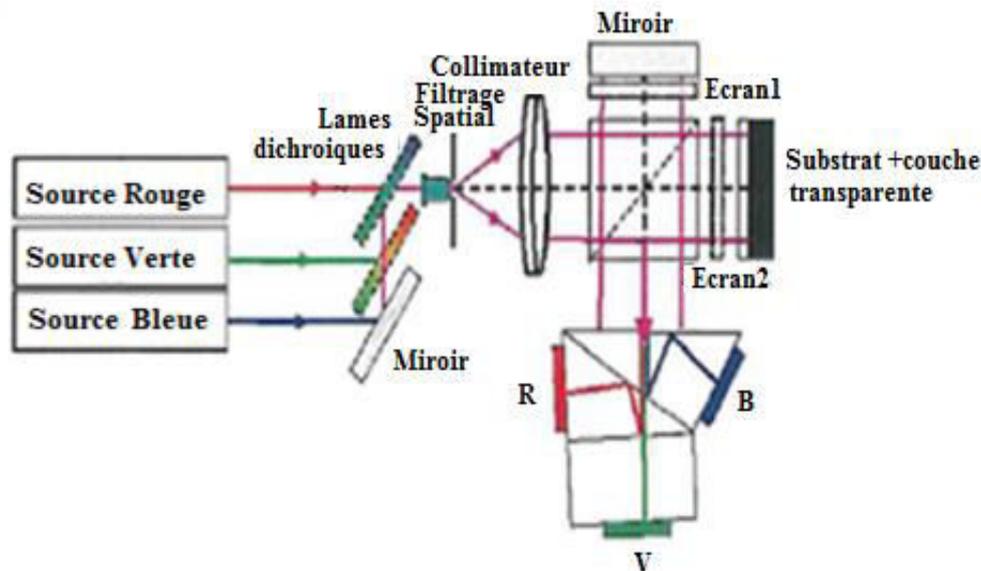


Figure 2.21. Principe de l'interférométrie numérique couleur

### 2.3. Notion de défauts

La connotation d'un défaut évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci [83]. Chaque sorte de défaut a le plus souvent, une origine différente dans la technique de travail employée [83,84]; les défauts peuvent être classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement [83] :

- ◆ Les défauts de surface,
- ◆ Les défauts internes.

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

- Les défauts ponctuels correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures etc...
- La seconde catégorie correspond aux défauts d'aspect, c'est-à-dire à des plages dans lesquelles une variation de paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques.



**Figure 2.22.** Différents types de défauts de surface [85]

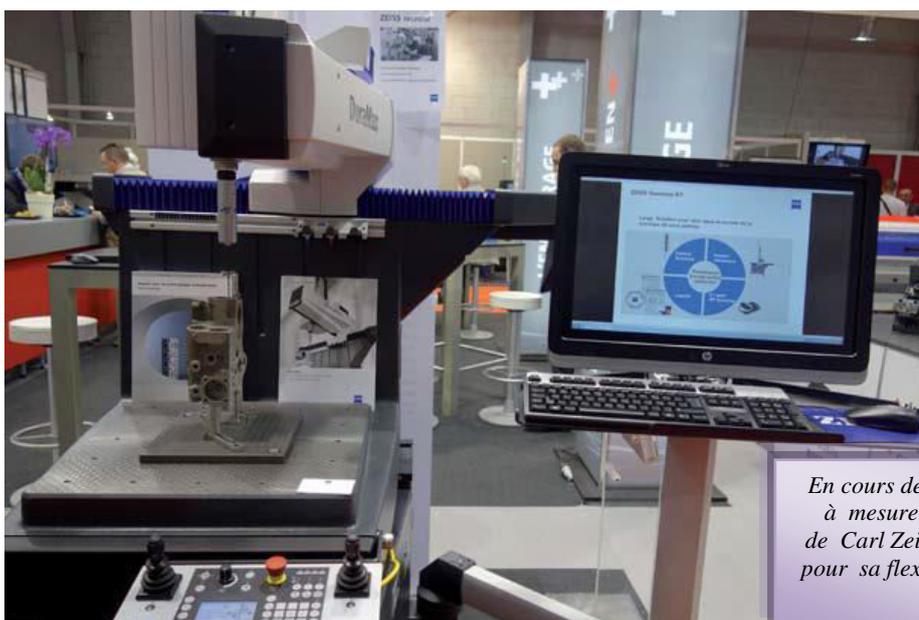
■ **Les défauts internes** : sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de

porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu d'office et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore, ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge, la neutronographie [83].

### ■ La tomographie 3D en métrologie [86]

Carl Zeiss a développé le Métrotom (figure 2.23), un système de tomographie permettant d'obtenir le volume 3D d'une pièce plastique, métal ou composite, afin d'en contrôler la qualité interne quelque soit sa complexité. Les défauts cachés, bulles d'air, micro fissures, sont ainsi visualisés même pour les pièces de petite taille. Ce procédé de contrôle non-destructif sans contact apporte une meilleure fiabilité de mesure par rapport aux moyens de métrologie traditionnels.

Le Metrotom 1500 est équipé d'un tube à rayons X d'une puissance de 225 kV / 225 W qui rayonne à travers la pièce à contrôler. Celle-ci est placée dans une cabine de radioprotection complètement isolée. Un détecteur numérique assure l'acquisition en quelques minutes. Afin d'accélérer le temps de mesure, Zeiss a mis au point un nouveau procédé qui en réduisant la résolution, réduit le temps d'acquisition jusqu'à un facteur de 10.



*En cours de mesure, la nouvelle machine à mesure tridimensionnelles Contura de Carl Zeiss est qualifiée de tout terrain pour sa flexibilité et la convivialité de son logiciel*

**Figure 2.23.** Metrotom de Carl Zeiss

### 2.3.1. Caractérisation de défaut de surface

Les surfaces sont caractérisées depuis les défauts de forme (basses fréquences), d'ondulation (moyennes fréquences), jusqu'à la rugosité (hautes fréquences) et les défauts localisés (poussières) [87].

Caractériser les défauts d'une surface est un problème qui concerne une très grande variété de secteurs industriels, depuis l'optique, l'automobile ou l'aéronautique (aspect de la carrosserie ou du fuselage) jusqu'à la papeterie ou l'industrie du cuir, en passant par la cosmétologie. Il est évident qu'un défaut de planéité entraîne une déformation de l'image vue. Pour cela, le plus simple est de considérer le trajet inverse de la lumière, c'est-à-dire d'imaginer un "lancer de rayon" partant de l'œil. Lorsque ce rayon rencontre une surface réfléchissante, sa direction de propagation est modifiée selon la loi de la réflexion de Descartes (figure 2.24) qui stipule que l'angle de réflexion '**ré**' est égal à l'angle d'incidence '**in**'. Donc la direction du rayon réfléchi dépend de la direction de la normale  $N_o$  au point d'incidence  $M$ . Si la direction de la normale change entre deux points voisins, le point "vu" dans l'environnement va se déplacer, d'autant plus que le changement de direction de la normale est important et que ce point est loin. Une variation de la direction de la normale est équivalente à une variation de la pente locale [88].

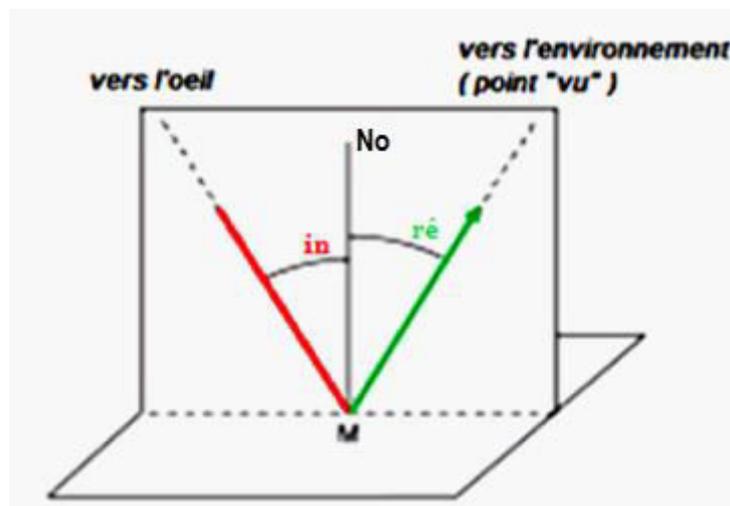


Figure 2.24. Loi de la réflexion de Descartes

### 2.3.2. Classification des défauts topographiques

La géométrie d'une surface usinée est examinée par : des écarts par rapport au profil théorique (celui figurant sur les plans); ces écarts, ou défauts géométriques (figure 2.25a), font l'objet d'une classification, en fonction de leur nature et de leur ampleur [89]:

- ➡ **défauts du premier ordre** : il s'agit de déformations d'ensemble (écarts de parallélisme, de circularité, de rectitude, de planéité, de sphéricité ... ) dues à un mauvais état et/ou à une mauvaise utilisation des machines (manque de rigidité de la machine et/ou de la pièce, mauvaise fixation, usure des outils, usure des machines, mauvais montages ... ); procédés de fabrication
- ➡ **défauts du second ordre** ou « ondulation de surface » : ce sont des défauts générés par le procédé d'usinage (avance cyclique des fraises, facettes sur pièces rectifiées) ou par la machine et/ou l'outil de coupe (vibrations basse fréquence). Ces défauts se manifestent sous forme d'ondulations dont le pas se situe entre 0,5 et 2.5 mm ;
- ➡ **défauts du troisième ordre** : ce sont des stries et des sillons plus ou moins périodiques (de pas inférieur à 0,5 mm); ces défauts correspondent à l'avance des outils de coupe et/ou aux vibrations haute fréquence de la machine et de l'outil ; les défauts du second ordre sont visibles à l'œil nu, ceux du troisième ordre sont sensibles à l'ongle.
- ➡ **Défauts du quatrième ordre** : ce sont des défauts dus à l'hétérogénéité de la matière, à des accidents divers, à des défauts de coupe ; ils se manifestent par des arrachements, des fentes, des marques diverses non périodiques.

En descendant de plus en plus dans l'échelle de mesure, on peut définir des défauts du cinquième ordre, au niveau des grains du métal, et des défauts du sixième ordre correspondant à l'arrangement de la structure cristalline.

Si on utilise tous les appareils sur une surface comme celle de la figure 2.25a pour mesurer la topographie, on obtient des résultats qui semblent dépendre de leur sensibilité et des limites choisies entre les ordres. Cette description, conduisant à des profils de surfaces liés à l'échelle de mesure est vraisemblablement adaptée à certains procédés d'usinage. En revanche, on peut trouver des surfaces dont la morphologie est indépendante de l'échelle.

En haut de la figure 2.25b montre le profil d'une surface, et en bas la reconstruction de ce profil qui constitue la décomposition multi-échelle de ce profil qui permet de séparer les différentes composantes du signal (forme, ondulation et rugosité) [90].

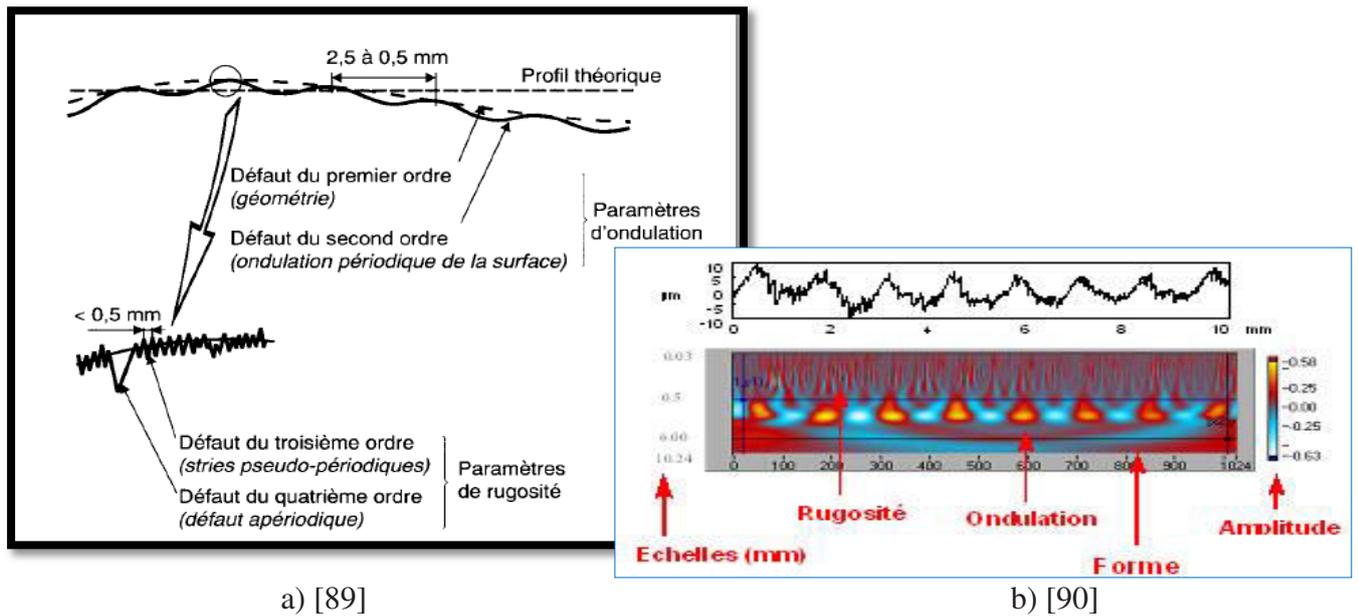


Figure 2.25. Les quatre premiers ordres de défauts superficiels.

### 2.3.3. Interaction lumière-surface [91]

La réflexion est le phénomène qui permet à la lumière de subir un changement de direction à la rencontre d'une interface principalement dans la direction perpendiculaire à la surface afin de demeurer dans le milieu d'origine. On distingue :

- Une réflexion spéculaire, lorsqu'elle répond à la loi de la réflexion et se comporte alors comme un miroir (figure 2.26a).
- Une réflexion diffuse, lorsque la lumière est réfléchi dans différentes directions. Un objet qui n'est pas une source de lumière se comporte comme un objet réel lorsqu'il réfléchi de façon diffuse la lumière provenant de son environnement figure 2.26b.

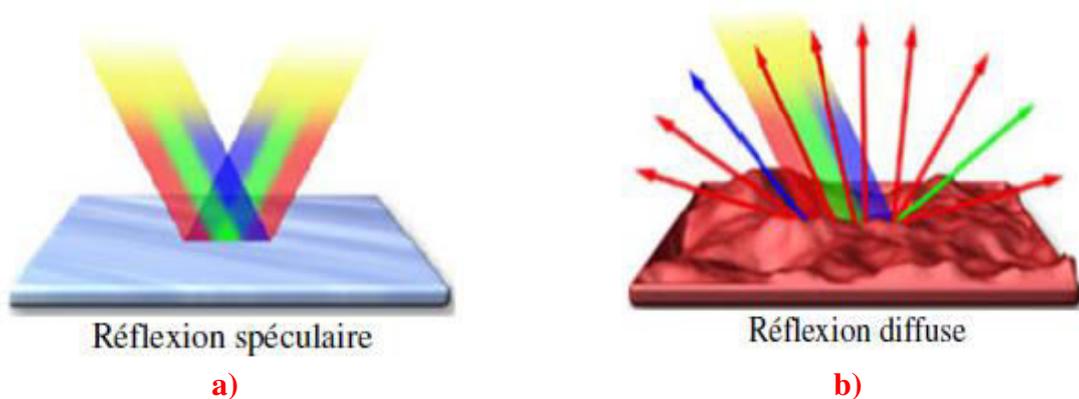
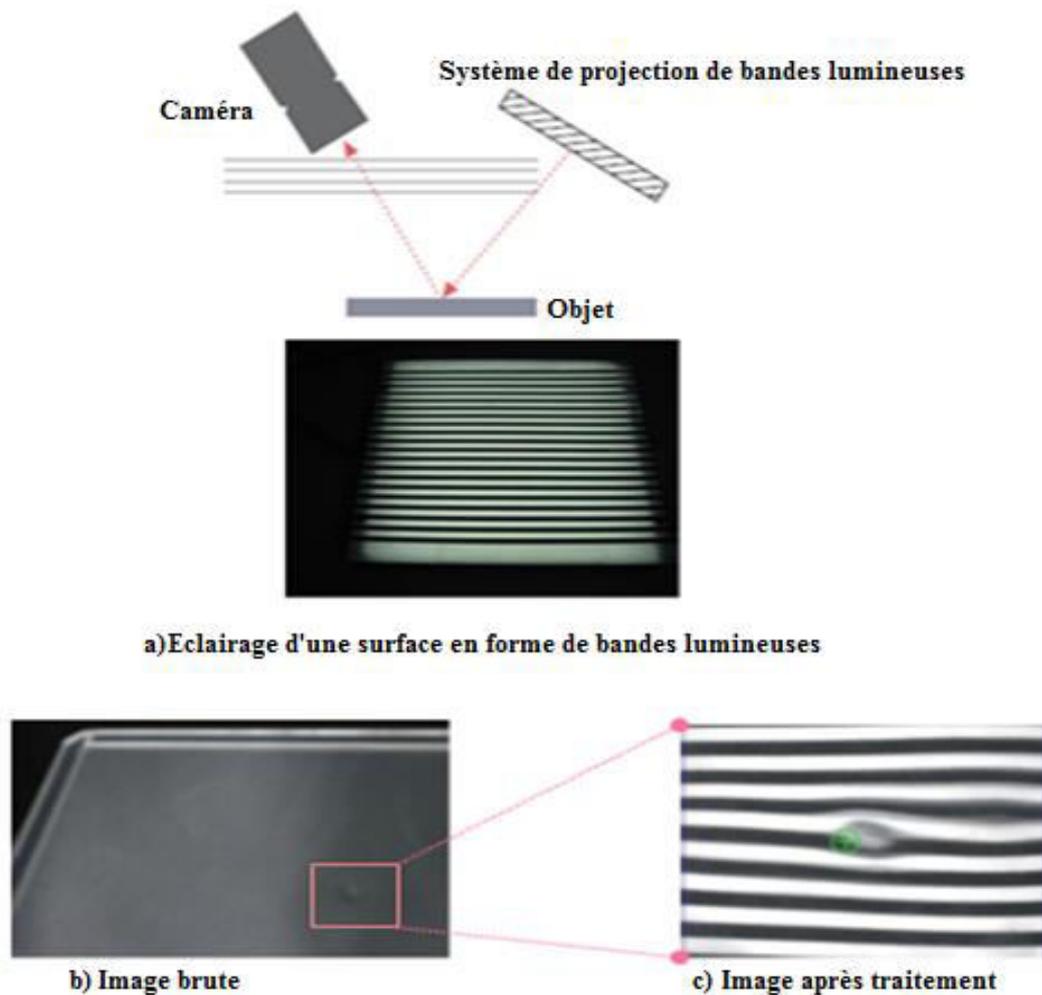


Figure 2.26. Phénomène de la réflexion [91]

### 2.3.4. Technique de détection de tous petits défauts et micro défauts [92]

Le principe consiste à placer le système d'éclairage et la caméra de sorte qu'une réflexion spéculaire se produise comme il est illustré dans la figure 2.27a.

La projection de bandes lumineuses sur l'objet se déforment par les éventuels défauts présents à la surface de cet objet, alors ces défauts déforment les rayures et sont ainsi détectés (figure 2.27b et figure 2.27c). La déformation est facilement détectée grâce à l'outil de détection des taches (« Stain ») du CV-3000.



**Figure 2.27.** Détection d'un tout petit défaut au moyen d'un éclairage par bandes lumineuses [92]

### 2.3.5. Corrélation d'images

La corrélation d'images [93] est une technique expérimentale utilisée en mécanique, en science des matériaux et en mécanique des fluides afin de mesurer des déplacements et des déformations. Le principe de cette technique consiste à appairer deux images numériques

représentant la surface d'un échantillon étudié à deux états distincts de déformation. C'est une méthode basée sur la comparaison entre deux images d'une pièce (avant et après la déformation). Le déplacement de patrons distinctifs (figure 2.28 de speckle) dans la seconde image permet d'obtenir un champ de déformation plutôt qu'une déformation moyenne en un point donné (jauge résistive). Requiert l'application d'un patron aléatoire de taches sombres sur un fond blanc.

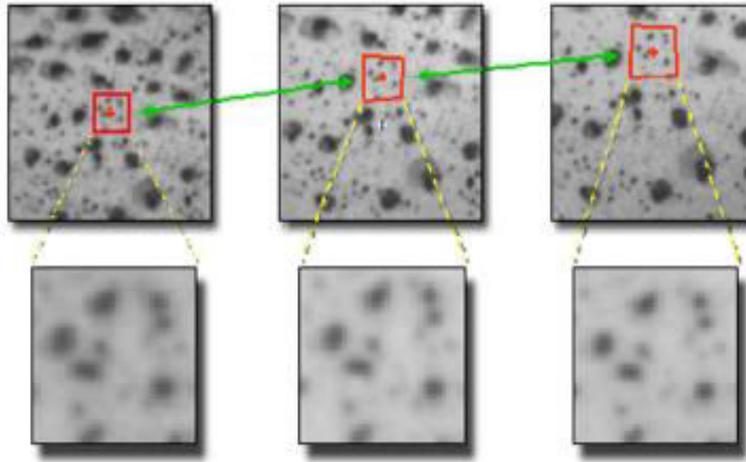


Figure 2.28. Corrélation d'images

### 2.3.6. Interférométrie holographique

Le principe de l'interférométrie holographique est illustré par la figure 2.29.

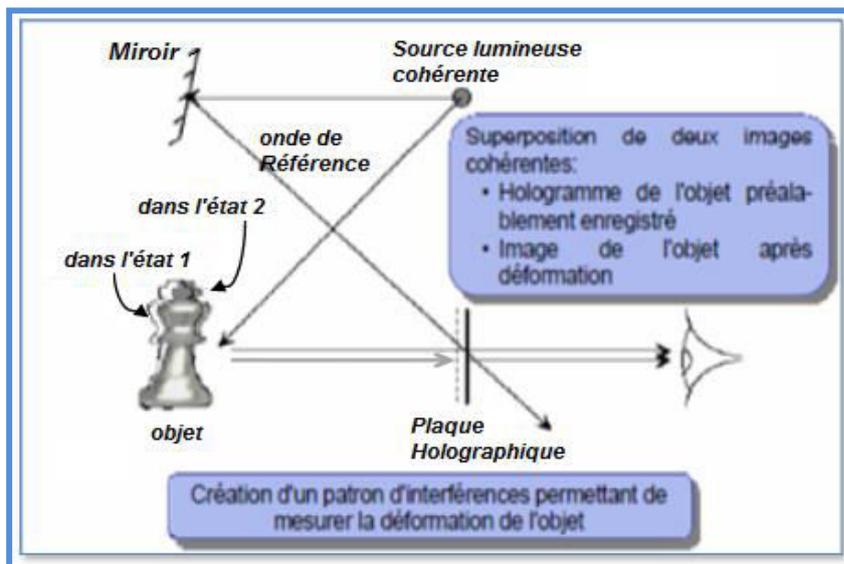
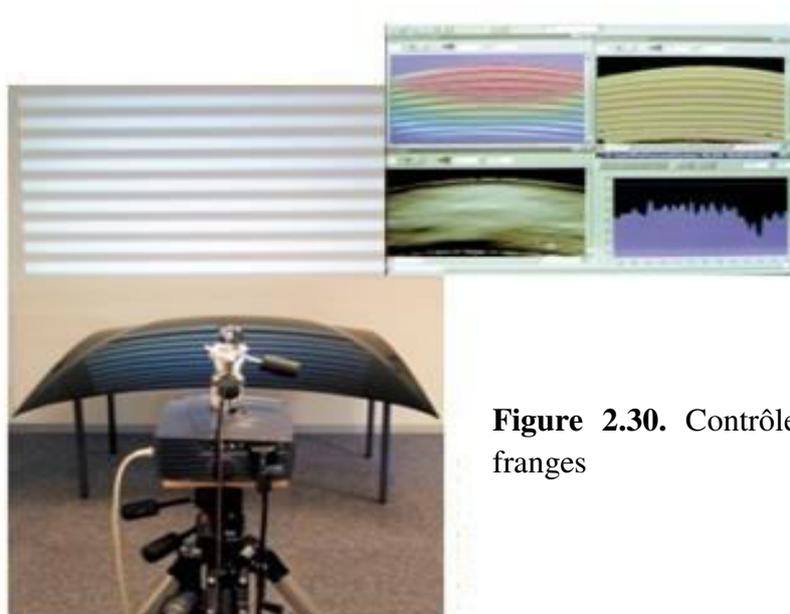


Figure 2.29. Interférométrie holographique [93]

### 2.3.7. Contrôle par réflexions des franges

Le contrôle par réflexions des franges consiste à observer, à l'aide d'une caméra CCD, la réflexion par l'échantillon d'un motif géométrique régulier (une grille constituée de traits alternativement noirs et blancs) projeté sur un écran placé devant l'échantillon ; il est alors réfléchi par l'échantillon et l'on analyse l'image réfléchie. L'échantillon se comporte comme un miroir, ou plus exactement comme un miroir déformant puisque les défauts de courbures de la surface de l'échantillon déforment l'image du motif. Alors la déformation du motif révèle l'existence de défauts de surface [94]. Le système Ondulo permet de caractériser les défauts d'aspect sur tous types de surfaces réfléchissantes. Sur l'écran d'un PC (en médaillon), on visualise la déformation des reflets due aux défauts de surface (figure 2.30).



**Figure 2.30.** Contrôle par réflexion des franges

#### 2.3.7.1. Principe

Un motif géométrique lumineux est projeté sur un écran. On analyse alors sa réflexion sur l'échantillon.

Dans la figure 2.31, les traits de la grille sont supposés être orientés parallèlement à l'axe des  $x$ , de manière à ce que les pentes suivant  $y$  soient mesurées. Ce qui est observé sur l'écran ressemble à des franges d'interférences, à la différence que ces franges sont incomparablement plus stables vis-à-vis des vibrations parasites. En effet, ces vibrations n'induisent que des translations de corps solide au niveau de l'objet, qui ne modifient pas les pentes.

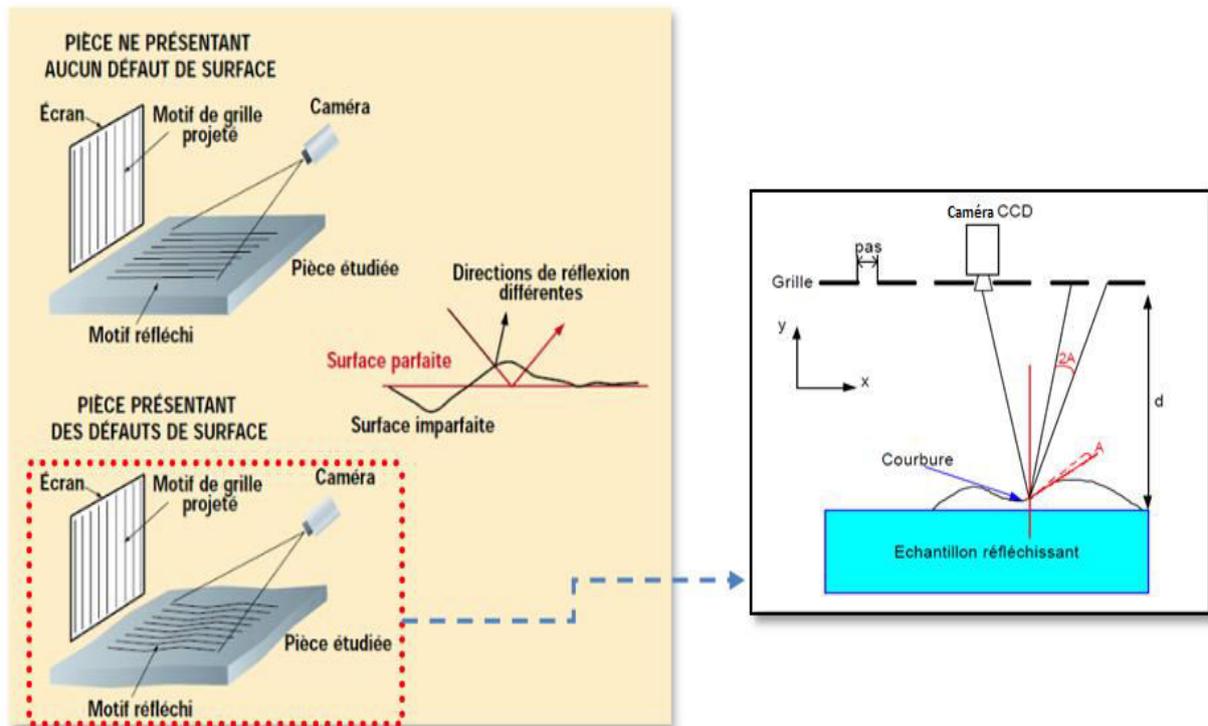


Figure 2.31. Principe de contrôle par réflexion des franges [94]

## 2.4. Topographie de surface par moiré

### 2.4.1. Généralités

Mesurer la forme d'un objet sans contact par voie optique présente un grand intérêt, aussi bien en ingénierie que dans d'autres secteurs d'activité (médecine, arts, biens de consommation, contrôle de qualité, topographie, fabrication, etc..

La topographie de surface par la technique de moiré est reconnue par moiré topographique ou la topographie de moiré (en anglais moiré topography indiqué par MT), se rapporte à la technique de moiré utilisée pour mesurer la topographie des objets, aussi bien que les changements de leurs surfaces une fois soumises à la déformation, à l'effort, etc. [95].

### 2.4.2. Détermination de la topographie de moiré

Le moiré est couramment utilisé pour déterminer les déformations d'un objet. Il suffit pour cela de créer un moiré entre un réseau de référence et l'image de ce réseau projeté sur l'objet.

- Principe:

Sur une surface parfaitement plane, ces deux réseaux ont la même périodicité spatiale et il n'y a pas formation de moiré. Si l'objet est déformé dans une direction quelconque de l'espace, la

grille projetée voit son pas varier localement et un moiré apparaît dont la période permet de remonter à la déformation [96].

Considérons une surface plane et horizontale sur laquelle on projette un réseau de pas  $p_1$ . Si nous inclinons cette surface d'un angle  $\alpha$ , le pas du réseau sur la surface augmente et devient :

$$p_2 = p_1(1 + \varepsilon) \quad (2.1)$$

Soit un écart de  $\delta p = p_1 \varepsilon$ , un moiré apparaît dont le pas est :

$$2d = \frac{p_1}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

Où  $\varepsilon$ , est relié à l'angle  $\alpha$  par :

$$\cos \alpha = \frac{1}{1 + \varepsilon} \quad (2.3)$$

Ou encore  $\cos \alpha \approx (1 - \varepsilon)$  pour de faibles déformations.

■ Schéma de principe

Soit la figure 2.32 montrant la déformation d'un réseau liée à l'inclinaison d'une surface. La grille est éclairée en incidence normale; grille et ombre projetées sont observées en oblique (flèche rouge). Si la surface est parallèle à la grille, les pas des deux réseaux sont égaux : il n'y a pas formation de moiré (figure 2.32a). Si elle fait un angle, un moiré apparaît dont le pas dépend de cet angle (figure 2.32b).

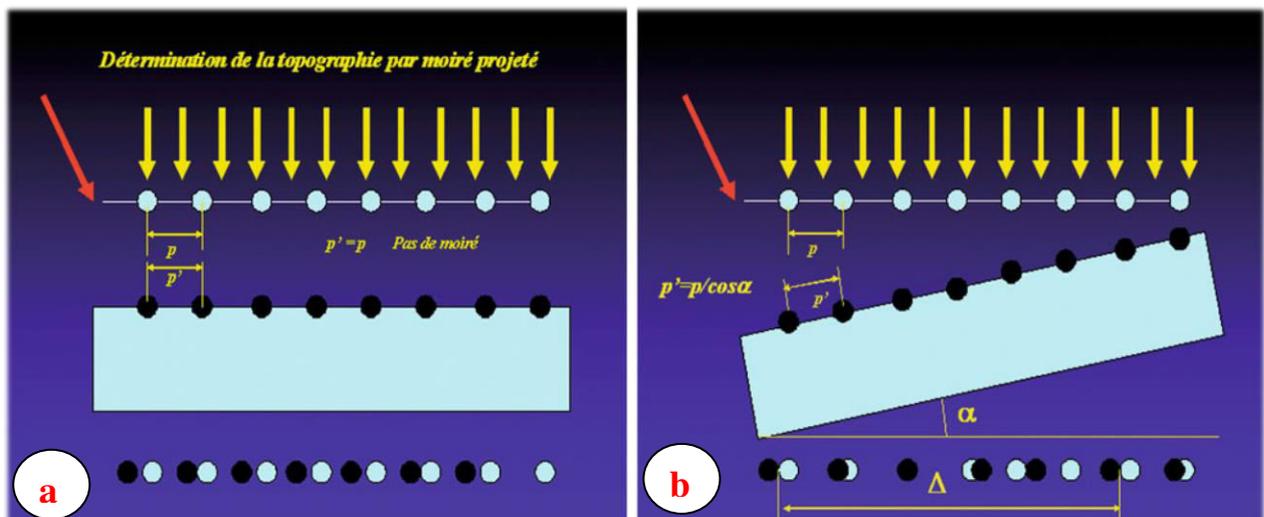
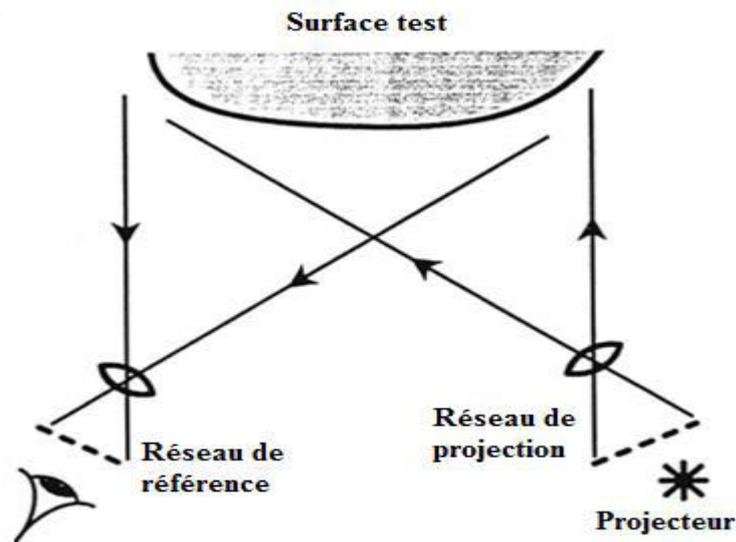


Figure 2.32. Déformation d'un réseau liée à l'inclinaison surface

### 2.4.3. Moiré projeté (moiré de projection)

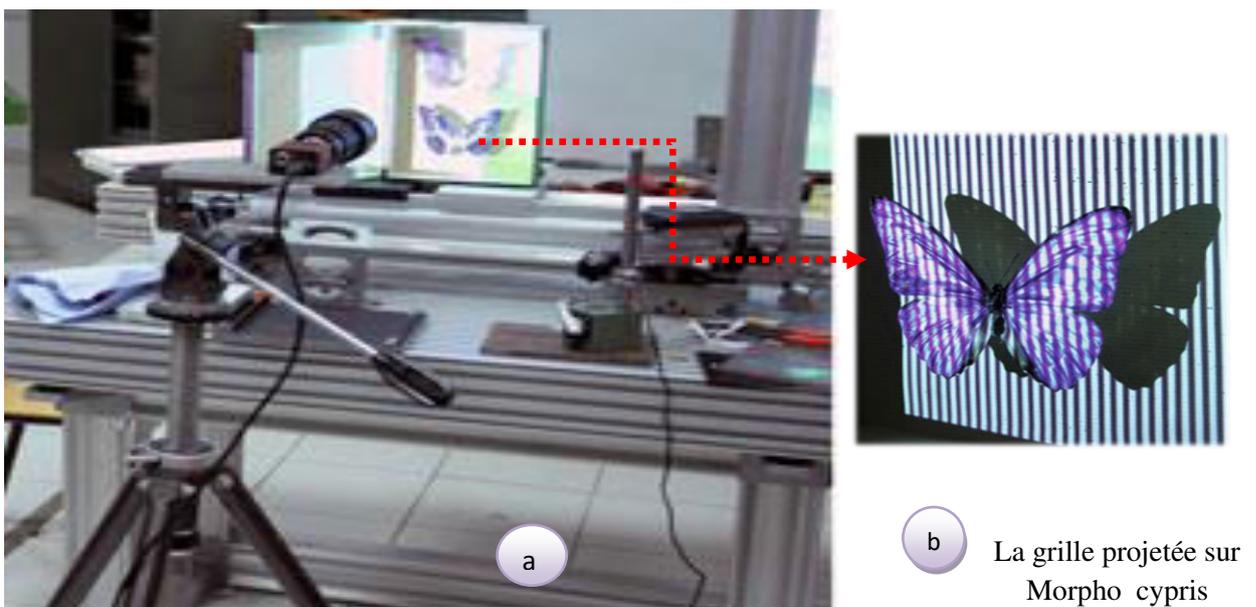
#### 2.4.3.1. Le principe

La technique de moiré de projection, est une technique la plus simple à mettre en œuvre, soit l'exemple de la figure 2.33 [97].



**Figure 2.33.** Principe de la technique de topographie de moiré de projection

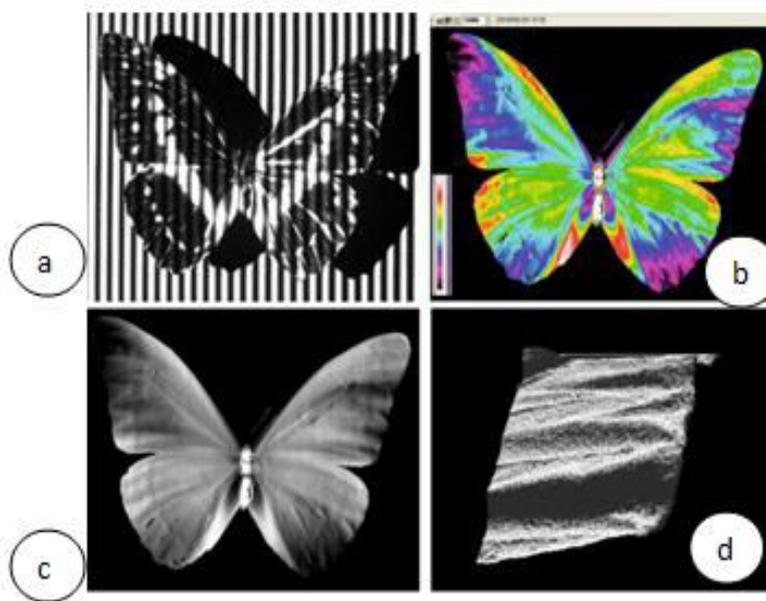
On donne dans ce cas un exemple, il s'agit des images de grilles de pas différents sont successivement projetées sur Morpho cypris (papillon) à l'aide d'un vidéoprojecteur (figure 2.34a), et leurs déformations, dues à la topographie de la surface analysées (figure 2.34b).



**Figure 2.34.** Une grille projetée sur morpho cypris [96]

Selon la figure 2.34a la caméra digitale est installée dans l'axe du papillon, le vidéo-projecteur est situé derrière, légèrement désaxé sur la droite. L'ensemble est piloté par ordinateur.

Les photos de la figure 2.35 présentent des vues de *Morpho cypris* et de sa topographie en fausses couleurs. On constate que les ailes sont fortement déformées à leur périphérie. On retrouve en particulier les plis triangulaires formant des motifs colorés en bordures des ailes antérieures et postérieures présentés précédemment, alors que le reste des ailes est moins déformé.



**Figure 2.35.** Moiré de projection l'ensemble est piloté par ordinateur [96]

Dans la figure 2.35, a) présente une grille projetée sur *Morpho cypris*, c) la topographie en niveaux de gris et b) en échelle de couleurs. L'ensemble de la barre colorée représente une hauteur de 3 mm. En d) une reconstitution 3D des plis triangulaires des cellules cubitales supérieures droites Cu1 et Cu2.

#### 2.4.4. Moiré d'ombre

On donne un exemple sur le moiré d'ombre, soit une surface plane soumise à une indentation de  $350\mu\text{m}$  de profondeur (figure 2.36) [98] dans:

a) L'observation directe d'un essai de surface plate avec une indentation pratiquement invisible à l'œil nu détaillé de  $350\mu\text{m}$ ,

b) La même surface avec un réseau de Ronchi 10 traits/mm interposé faisant clairement évident une indentation et qui illustre le perfectionnement de l'inspection visuelle facilité par le moiré d'ombre,

c) Quand le réseau est un peu incliné de quelques millimètres au-dessus de l'essai, plusieurs franges sont visibles avec un contraste décroissant dû à la diffraction. Les surfaces incurvées produisent les modèles semblables moins contrastés qui influent sur la détection des défauts et réduisent rigoureusement le champ visuel.

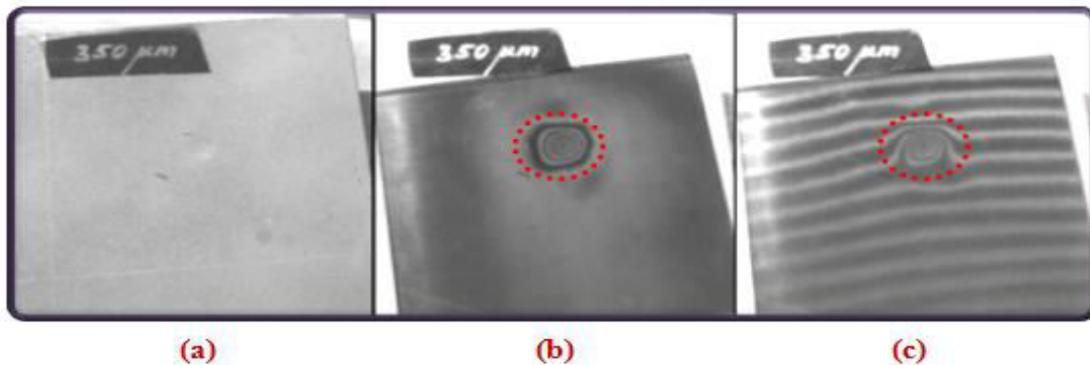


Figure 2.36. Observation directe d'un essai de surface plate avec indentation de 350 $\mu$ m

#### 2.4.5. Topographie de surface par la méthode de moiré de réflexion [24]

Quand le réseau de référence est placé très étroitement sur la surface de l'objet, le modèle de moiré est formé entre le réseau de référence et son image. Dans certaines conditions, les franges de moiré sont des lieux de profondeur constante. Pour expliquer la formation du modèle de moiré, nous considérons la figure 2.37 telle que le réseau  $G_1$  (qui est essentiellement l'image du réseau  $G_2$ ) est vu à travers  $G_2$ .

Les réseaux  $G_1$  et  $G_2$  sont exprimés respectivement par les équations suivantes:

$$x = mb \quad (2.4)$$

$$x = na \quad (2.5)$$

Où  $m$ ,  $n$  sont des entiers, les réseaux ont des périodes différentes respectivement  $b$  et  $a$ , la caméra est localisée à la position  $(x_c, z_c)$ . La coordonnée  $x$  des points projetés du réseau  $G_1$  au réseau  $G_2$  est obtenue par :

$$\frac{x_c - x}{z_c} = \frac{x_c - mb}{z_c + d} \quad (2.6)$$

$$x = \frac{bz_c}{z_c + d} m + \frac{d}{z_c + d} x_c \quad (2.7)$$

En utilisant  $m-n = p$ , on obtient l'équation des franges de moiré tel que :

$$x = \frac{abz_c}{(a-b)z_c + ad} p + \frac{ad}{(a-b)z_c + ad} x_c \quad (2.8)$$

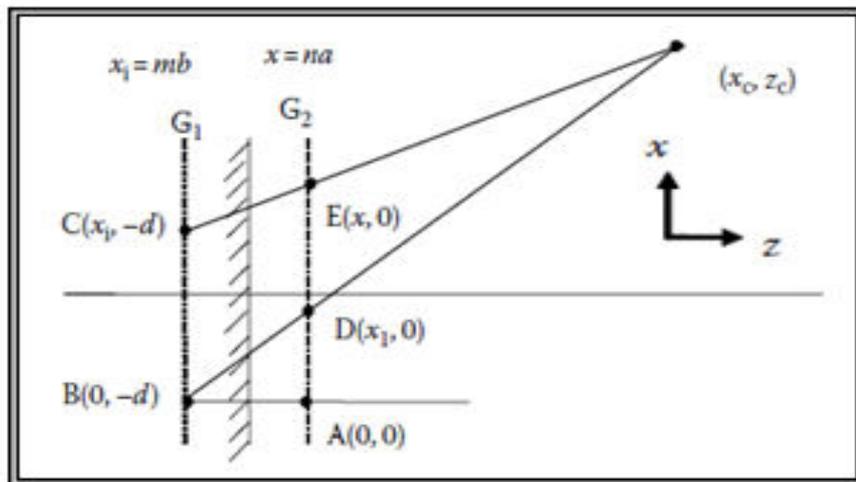


Figure 2.37. Topographie de surface via moiré de réflexion [24]

## 2.5. Les applications de la topographie de moiré

Récemment la topographie de moiré a été employée dans divers champs industriels. 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 [99] et autres telle que la médecine où beaucoup de brevets sont déposés aux états unis (USA).

## 2.6. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre nous avons présenté différentes techniques qui ont contribué à la topographie de surface avec leurs propres caractéristiques, qui sont adaptées à chaque problème afin de mettre à profit la détection des défauts de surface, puis nous avons mis en évidence la topographie de surface par moiré. Des méthodes de mesure de topographie de moiré sont basées sur les images. La topographie de moiré est utilisée dans les domaines

appliqués de la mesure de forme, la mesure de planéité et la détection d'anomalie etc..., cette méthode de mesure comporte la mesure sans contact et elle n'affecte pas le matériau de l'objet ni la précision de mesure. Une fois que les conditions de mesure sont satisfaisantes, des états instantanés et le processus des variations peuvent être mesurés. Cette méthode de mesure a un avantage important dont elle peut mesurer la totalité d'un objet immédiatement, c'est à dire un contrôle de champ.

# chapitre 3

## *Topographie des surfaces réduites par la technique de moiré*



*Chapitre 3 : Topographie des surfaces réduites par la technique de moiré*

### **3.1. Introduction**

Dans tout processus de fabrication, un contrôle des pièces en fin de production ou mieux en cours de production est indispensable. Par ailleurs l'augmentation des cadences de production, imposée par l'amélioration constante de la productivité, oblige les bureaux des méthodes à se poser la question « contrôle en laboratoire ou directement sur la ligne de production ? » [86].

Comment faire pour obtenir des pièces sans défaut avec un contrôle non invasif et sans ralentir la production ? il est préférable que le contrôle soit directement plus près de la chaîne de production afin de gagner du temps sur le processus de contrôle sans avoir sortir les pièces de l'atelier et, bien sur, anticiper l'apparition d'un défaut au plutôt dans la fabrication afin de réaliser l'économie de pièces rebutées.

Le contrôle visuel est une technique essentielle lors du contrôle non destructif (CND). La forme extérieure d'une pièce peut donner des informations essentielles sur son état : défauts évidents (plisures, cassures, usure, corrosion, fissures ouvertes...) des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peuvent être une indication de défaut plus grave à l'intérieur [100]. La détermination des défauts de forme revêt une très grande importance dans le domaine industriel, car elle conditionne dans bien des cas la fonctionnalité des assemblages ou des mécanismes [101]. Alors diverses méthodes sont proposées, dont chacune possède ses propres caractéristiques. Dans de nombreux cas, la totalité de la topographie d'une pièce ou d'un objet doit être contrôlée afin de vérifier ses spécifications. Choisir la technique la plus adaptée en CND est le but de ce chapitre qui est la partie la plus importante de ce travail.

Notre choix s'est porté sur l'étude des surfaces de petites dimensions c'est-à-dire des surfaces réduites, afin d'étudier la topographie en appliquant la technique de moiré qui est une technique non destructive et sans contact. En effet plus la taille de l'objet est réduite, plus l'opération de contrôle s'avère délicate, d'autant plus si la précision exigée est élevée. Donc le but de cette recherche est de mettre au point une technique capable de contrôler des pièces à tailles réduites avec une précision élevée.

## **3.2. L'objectif de la partie expérimentale**

### *3.2.1. Introduction*

L'objectif principal de ce travail est de développer une méthode optique capable de mettre en évidence des défauts de formes pour évaluer la qualité du processus de fabrication. La première tâche est de mettre au point un montage optique capable d'assurer cette fonction. A cet effet nous avons fait un développement théorique de montages optiques susceptibles d'assurer cette fonction. Plusieurs variantes sont analysées et soumises à une évaluation, afin de choisir la solution optimale capable de donner les meilleurs résultats. La solution choisie est réalisée sur un banc expérimental, afin de rechercher les paramètres qui ont une influence positive ou négative sur la fonction recherchée. Le but de cette étude est d'exploiter cette méthode dans le contrôle des processus de fabrication. Nous présentons dans ce chapitre les résultats expérimentaux obtenus, sur différents types de surfaces.

### *3.2.2. Etat du problème*

Le problème posé est de mettre en évidence d'éventuels défauts sur des surfaces. Jusqu'à présent le problème était de déduire les figures de moiré à partir de la superposition des structures microscopiques (réseaux). Or dans cette étude, c'est le problème inverse qui se présente; en effet, connaissant les structures des réseaux superposés; ce sont les figures de moiré qui sont observables. Donc, il faut en tirer les informations nécessaires concernant toutes variations microscopiques du réseau test, qui se manifestent par des variations macroscopiques dans la forme des franges de moiré observables. La déformation microscopique de la structure du réseau, est matérialisée par une déformation macroscopique des franges de moiré. Cette méthode permet l'amplification du déplacement microscopique dans la forme de la surface en un déplacement macroscopique dans la forme des franges de moiré.

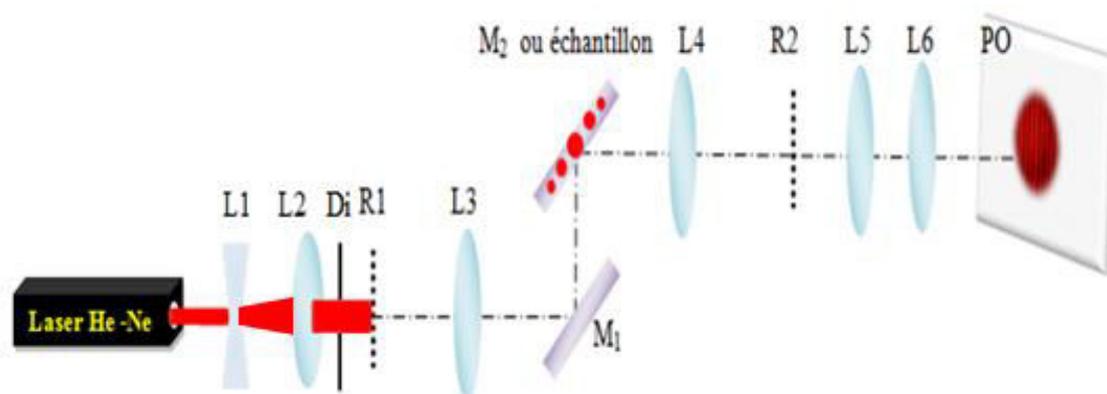
Le facteur d'amplification généré par l'effet de moiré, dépend du rapport entre le pas des franges de moiré, et le pas du réseau test qui palpe la surface. Par contre le facteur d'amplification total, dépend du facteur d'amplification généré par le moiré et le grandissement généré par le montage utilisé. L'amplification de la taille des franges de moiré, facilite la détection et la mesure des défauts submicroscopiques.

### 3.3. Développement du système de contrôle et techniques de mesures

La topographie des surfaces par la technique de moiré peut se faire à l'aide des trois méthodes connues : le moiré d'ombre, le moiré de projection et le moiré de réflexion. Ces méthodes topographiques par le moiré sont très utilisées, mais, certaines d'entre elles, présentent certaines limites, que ce soit du point de vue précision ou adaptation à notre étude qui consiste à caractériser des surfaces réduites, dont la superficie est de quelques mm<sup>2</sup>. Donc, afin de satisfaire les exigences, nous allons rechercher une solution à travers un montage optique de résoudre le problème posé. A cet effet, nous avons développé plusieurs montages optiques basés sur la technique de moiré, qui sont susceptibles de résoudre le problème posé, et qui sont décrits dans ce qui suit.

#### ◆ Première variante

Le faisceau laser He-Ne est élargi par les deux lentilles L1 (divergente) et L2 (convergente), passe par le diaphragme Di qui a pour rôle d'éliminer les granularités laser afin qui peuvent jouer le rôle de sources multiples, illumine le réseau R1; la lentille L3 réalise par la transformée de Fourier le spectre du réseau R1 en son plan focal où se trouve le miroir optique plan M<sub>1</sub> qui le réfléchit vers la surface du miroir plan M<sub>2</sub> (ou échantillon) ce spectre palpe cette surface puis sera réfléchi vers la lentille L4. La lentille L4 transforme ce spectre réfléchi par une transformée inverse de Fourier pour former l'image du réseau R1 et qui la projette sur le plan du deuxième réseau R2. L'image du réseau R1 et le réseau R2 étant superposés, avec un décalage angulaire du réseau R2 par rapport à l'image du réseau R1 d'un angle  $\theta$ , pour la génération des franges de moiré sur le plan du réseau R2. Les franges de moiré, qui matérialisent l'état de surface sont projetées sur le plan d'observation PO à l'aide des lentilles L5 et L6 après une double transformation de Fourier.



**Figure 3.1.** Première variante

### ◆ Deuxième variante

Le faisceau laser He-Ne est élargi par les lentilles convergentes L1 et L2 et passe par le diaphragme Di qui a pour rôle d'éliminer les granularités laser afin qui peuvent jouer le rôle de sources multiples, il illumine le réseau R1, ce réseau subi la transformée de Fourier par la lentille L3 qui réalise son spectre et le projette sur le miroir M<sub>1</sub> qui le réfléchit à son tour vers un filtre spatial se trouvant dans son plan focal qui permet à l'ordre sélectionné de passer vers la lentille L4 pour donner l'image du réseau R1 à fréquence spatiale plus élevée et projetée sur le miroir M<sub>2</sub> (ou échantillon) pour palper la surface puis sera réfléchi sur le plan du réseau R2 où se forment les franges de moiré (rotation du réseau R2). Ces franges sont projetées sur le plan d'observation PO par les deux lentilles L5 et L6.

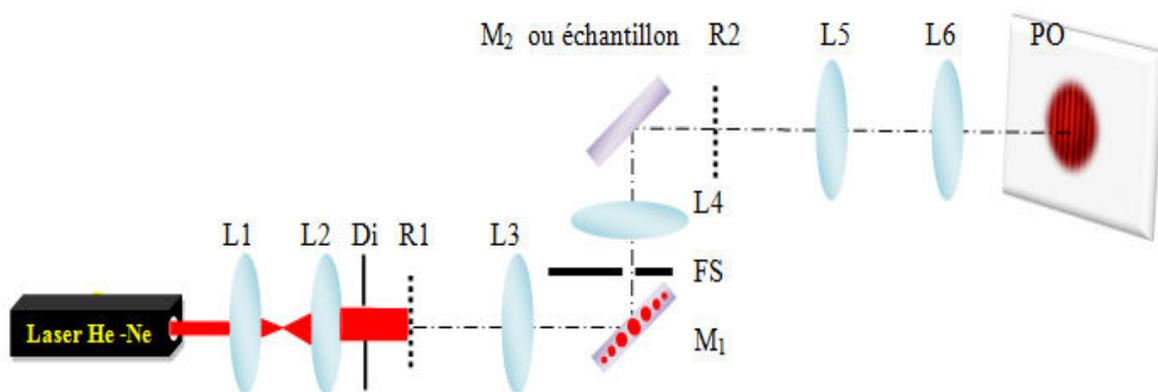


Figure 3.2. Deuxième variante

### ◆ Troisième variante

Le faisceau laser He-Ne 35 mW est élargi par les lentilles L1 et L2, pour atteindre un diamètre de 6mm, passe à travers le diaphragme Di dont le diamètre de l'ouverture est de 6mm pour éliminer les granularités du laser, et illumine le réseau linéaire en transmission R1. La lentille L3 réalise la transformation de Fourier pour projeter le spectre de diffraction dans son plan focal où se trouve un filtre spatial pour augmenter la fréquence spatiale du réseau R1. La lentille L4 réalise la transformation inverse de Fourier, pour projeter l'image du réseau test R1 sur la surface de l'échantillon, qui est un miroir optique plan de qualité de surface  $\lambda/4$ . L'image du réseau linéaire en transmission R1 est réfléchi par le miroir optique plan (ou échantillon) pour se superposer sur le plan du réseau de référence R2 qui est aussi un réseau linéaire en transmission, et de même fréquence spatiale que le réseau R1. L'image du réseau

R1 est superposée optiquement sur le plan du réseau R2, pour éliminer les influences sur la qualité des franges de moiré. Le réseau R2 est tourné dans son plan d'un angle  $\theta$ . Le croisement entre les lignes des deux réseaux génère l'apparition de l'effet de moiré qui est constitué de lignes droites parallèles équidistantes alternativement claires et sombres. La lentille L5 réalise la première transformée de Fourier pour projeter le spectre de diffraction des deux réseaux croisés R1 et R2 dans son plan focal. La lentille L6 réalise la transformation inverse de Fourier pour projeter les franges de moiré sur le plan d'observation PO avec un grandissement M. Une caméra CCD est positionnée dans le plan d'observation PO pour l'acquisition et la transmission des franges de moiré vers l'ordinateur pour un traitement automatique de l'information.

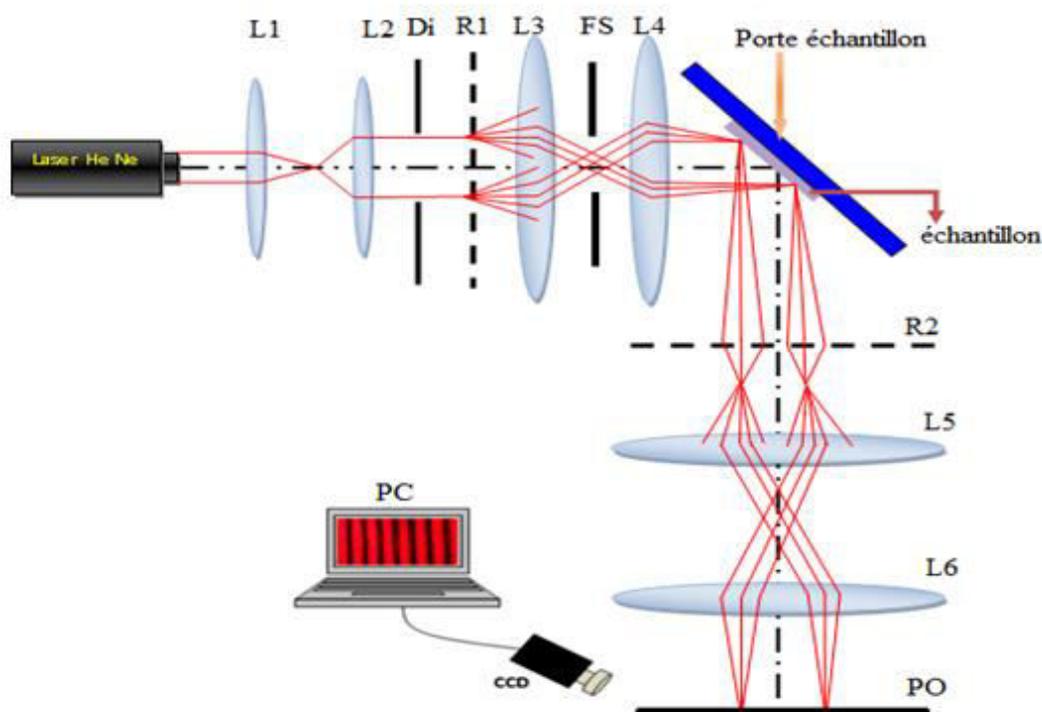


Figure 3.3. Troisième variante

#### ◆ Quatrième variante

Le faisceau laser He-Ne 35 mW est élargi par les lentilles L1 et L2, et passe par le diaphragme Di qui élimine les granularités laser qui peuvent jouer le rôle de sources multiples, illumine le miroir optique plan M1 et le réseau R1 linéaire en transmission. Le faisceau lumineux est diffracté en un ensemble de rayons divergents qui traversent le système de lentilles L3 et L4 ont porté la double transformée de Fourier et projettent l'image du réseau

R1 sur l'échantillon. L'image projetée du réseau R1 palpe la surface de l'échantillon et sera réfléchi sur le plan du réseau R2 où elle est optiquement superposée au réseau R2 linéaire en transmission de même fréquence spatiale que R1. Dans ce cas-ci, la superposition de l'image du réseau R1 sur le plan du réseau R2 est réalisée par voie optique afin d'éliminer de diverses influences sur la qualité d'images des franges de moiré. Le réseau R2 est légèrement tourné d'un petit angle ( $\theta \approx 0^\circ$ ) les franges de moiré sont formées sur le plan du réseau R2, se sont des bandes parallèles alternativement lumineuses et sombres, qui sont réfléchies par le miroir optique plan M<sub>2</sub> sur le système de lentilles L5 et L6 qui font la double transformée de Fourier où se trouve un filtre spatial pour augmenter la sensibilité du système, et les franges de moiré sont projetées sur le plan d'observation PO. L'acquisition des franges de moiré est assurée par la caméra CCD, pour les transmettre au PC pour le traitement automatique de l'information.

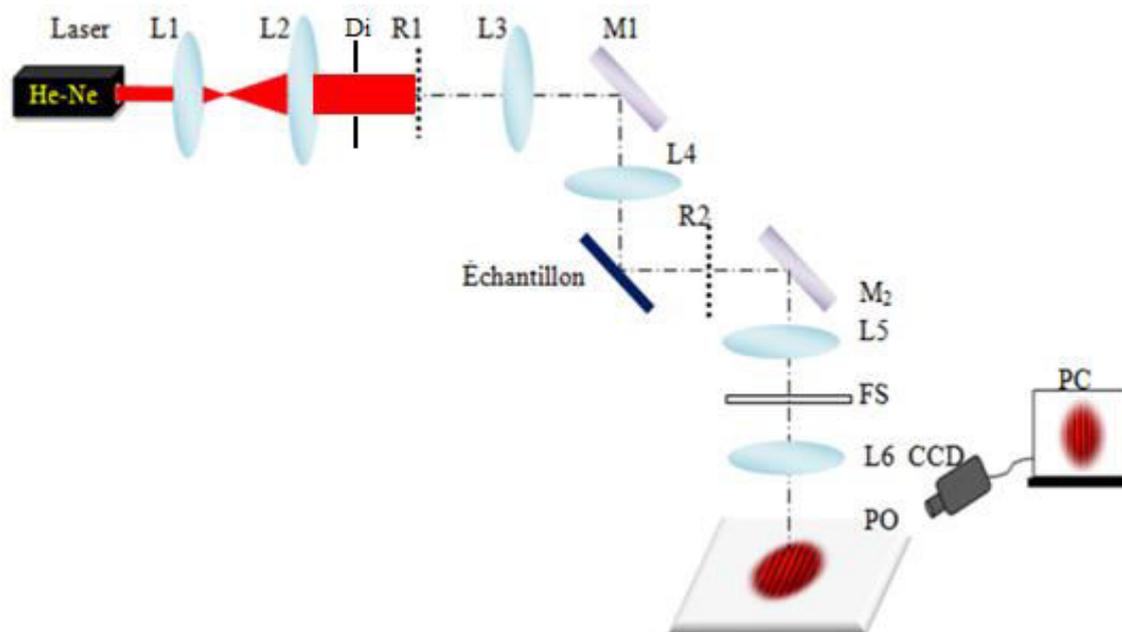


Figure 3.4. Quatrième variante

#### ◆ Cinquième Variante

Le faisceau laser He-Ne 35 mW est élargi par les lentilles L1 et L2, pour atteindre un diamètre de 6mm, passe à travers le diaphragme Di dont le diamètre de l'ouverture est de 6mm, illumine le réseau linéaire en transmission R1. La lentille L3 réalise la transformation de Fourier pour projeter le spectre de diffraction dans son plan focal. La lentille L4 réalise la

transformation inverse de Fourier, pour projeter l'image du réseau test R1 sur la surface de l'échantillon, qui est un miroir optique plan de qualité de surface  $\lambda/4$ . L'image du réseau linéaire en transmission R1 est réfléchiée par le miroir optique plan pour se superposer sur le plan du réseau de référence R2 qui est aussi un réseau linéaire en transmission, et de même fréquence spatiale que le réseau R1. L'image du réseau R1 est superposée optiquement sur le plan du réseau R2, pour éliminer les influences sur la qualité des franges de moiré. Le réseau R2 est tourné dans son plan d'un angle  $\theta = 6$  minutes arc. Le croisement entre les lignes des deux réseaux génère l'apparition de l'effet de moiré qui est constitué de lignes droites parallèles équidistantes alternativement claires et sombres. La lentille L5 réalise la première transformée de Fourier pour projeter le spectre de diffraction des deux réseaux croisés R1 et R2 dans son plan focal où se trouve un filtre spatial. La lentille L6 réalise la transformation inverse de Fourier pour projeter les franges de moiré sur le plan d'observation PO avec un grandissement M. Une caméra CCD est positionnée dans le plan d'observation PO pour l'acquisition et la transmission des franges de moiré vers l'ordinateur PC pour un traitement automatique de l'information.

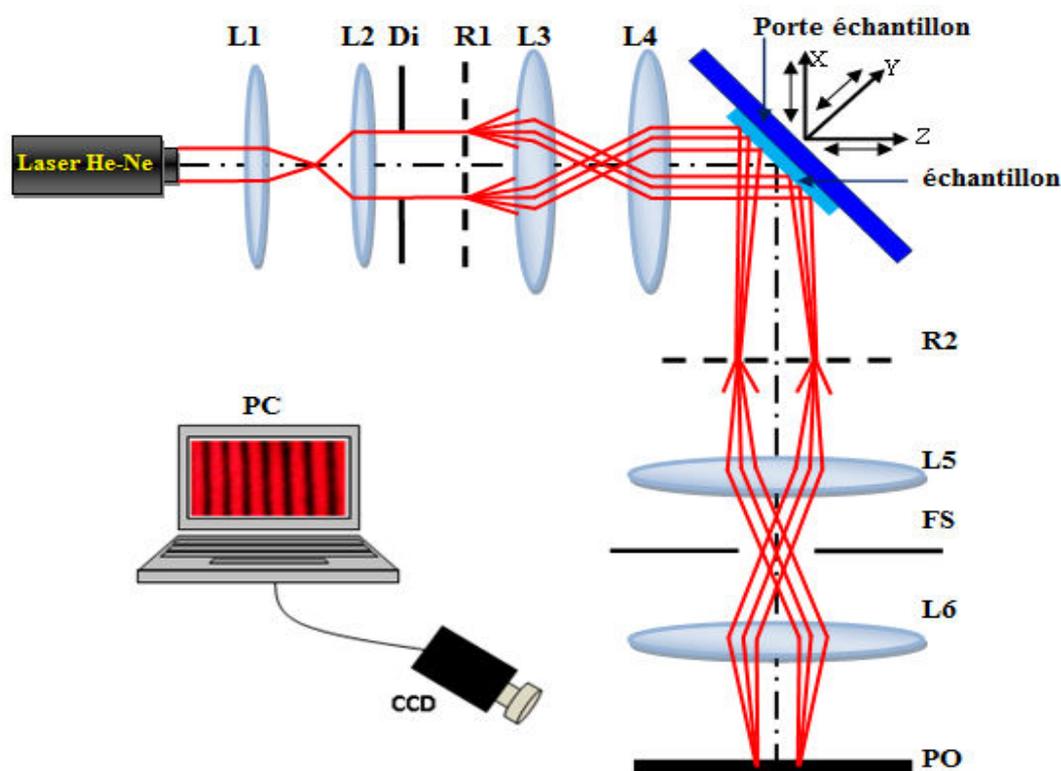


Figure 3.5. Cinquième variante

### **3.4. Choix de la solution optimale**

#### *3.4.1. Choix de la solution*

Les cinq solutions développées ont été soumises chacune d'entre elles à une analyse fonctionnelle pour juger son aptitude à résoudre la revendication exigée. La solution requise doit satisfaire plusieurs paramètres ; faisabilité de la méthode ; simplicité de contrôle, précision exigée; adaptation en vue d'une application industrielle.

Parmi les solutions proposées et selon les exigences posées, la cinquième solution est la plus apte à satisfaire ces exigences. Cette variante est réalisée sur un banc optique, pour vérifier la faisabilité de la méthode, et rechercher les influences des différents paramètres sur la fonction.

#### *3.4.2. Principe de fonctionnement*

Le montage selon la figure 3.5; le faisceau laser He-Ne est élargie par le système de lentilles  $L_1$  et  $L_2$ . La structure du réseau test R1 à subir une double transformation de Fourier, l'image du réseau R1 est réfléchié par le miroir plan M, pour la superposer sur le plan du réseau de référence R2 qui est décalé dans son plan d'un angle  $\theta$  ( $\theta = 6'$ ). La superposition des traits des deux réseaux génère l'effet de moiré qui est constitué de franges droites parallèles et équidistantes alternativement (brillantes) et sombres. Les structures superposées des réseaux R1 et R2, sont projetées sur le plan d'observation, après une double transformation de Fourier réalisée par les lentilles  $L_5$  et  $L_6$ . Les franges de moiré générées par la superposition des traits des deux réseaux projetées sur le plan d'observation, sont des lignes droites parallèles et équidistantes.

##### *3.4.2.1. Principe de contrôle et de détection*

Le faisceau Laser He-Ne véhicule la structure microscopique du réseau R1, en frappant la surface du miroir plan M, et s'imprègne de la topographie de sa surface. Si la surface inspectée ne comporte pas de défauts, ou bien, si la sensibilité utilisée n'est pas suffisante pour la détection de défauts; alors la structure du réseau test R1 n'est pas modifiée, donc, les franges de moiré ne changent pas de géométrie et sont constituées de lignes droites parallèles équidistantes alternativement claires et sombres. Par contre si la surface palpée par l'image du réseau test R1 comporte des variations de formes causées par des défauts, donc la structure microscopique du réseau test R1 est modifiée en s'imprégnant de la topographie de la surface inspectée. A cet effet, les variations causées dans la structure du réseau test R1 sont matérialisées par les variations dans la forme des franges de moiré qui ne sont plus des lignes droites parallèles et équidistantes, mais comportent des variations de formes.

#### *3.4.3. Sensibilité de la méthode et résolution de détection*

La mise en évidence des défauts dépend de l'amplitude des défauts, plus le défaut est grand plus la détection est facile, par contre plus l'amplitude des défauts est faible plus la détection est difficile. Lorsque la surface analysée présente un aspect difficilement détectable, alors le recours à amplifier la sensibilité du montage utilisé s'avère nécessaire. Pour la mise en évidence des défauts de formes dans la gamme d'une grandeur microscopique ou submicroscopique, il est nécessaire d'utiliser des réseaux à hautes fréquences spatiales dont la sensibilité est adaptée à la grandeur des défauts. La deuxième possibilité utilisée pour mettre en évidence des défauts de plus en plus faibles, nous utilisons la technique de multiplication des franges, qui a pour but d'amplifier la sensibilité de détection du phénomène de moiré et permet ainsi l'augmentation de la résolution de détection.

Selon le montage de la figure 3.5, la technique consiste à placer un filtre spatial FS dans le plan focal de la lentille L5. Ce filtre spatial FS a pour fonction de ne laisser passer que les ordres de diffraction sélectionnés  $(r, 0)$  et  $(0, r)$ ; qui sont les termes du spectre de diffraction comme conséquence du croisement entre les lignes de l'image du réseau test (source) R1 et celles du réseau de référence R2.

#### *3.4.4. Topographie et détection des défauts de formes des surfaces réduites*

Afin de vérifier la fonctionnalité du montage expérimental décrit par la figure 3.5; la procédure suivante a été suivie. En premier, nous avons utilisé une surface de très bonne qualité qui consiste en l'utilisation d'un miroir optique plan avec un état de surface dont le défaut de planéité est inférieur à  $\lambda/2$ . Les dimensions du miroir optique plan sont de  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  surface; le diamètre de la tache du faisceau laser est d'environ 6 mm couvrant ainsi une superficie de  $30 \text{ mm}^2$ . et des réseaux linéaires en transmission dont la fréquence spatiale est de 100 traits/mm. Les franges de moiré caractérisant la surface inspectée de ce miroir sont des lignes droites équidistantes alternativement brillantes et sombres de très bonne qualité et ne présentent aucune variation géométrique dans leurs structures. Le miroir plan est remplacé par un échantillon. La structure des franges de moiré caractérisant cette surface présente des franges de moiré qui ne sont plus des lignes droites et équidistantes, mais des franges de moiré déformées en fonction de l'importance des défauts que comporte la surface inspectée.

### *3.4.5. Echantillons traités*

Cette section illustre le choix des échantillons utilisés et leurs caractéristiques. Selon la diversité des échantillons à inspecter, nous testons chaque surface des différents échantillons de manière à les faire adapter au montage expérimental, qui sont :

- Miroir plan optique
- Plaques inoxydables réfléchissantes
- Différentes plaques réfléchissantes à différent état de surface
- Miroirs ordinaires
- Film transparent pour habillement
- Film transparent recouvrant nourriture
- Différentes lames de verre
- Echantillon céramique à divers usages
- Lames circulaires à faces parallèles en polymère

## **3.5. Résultats expérimentaux**

Nous présentons les résultats des expériences réalisées avec un montage simple, utilisant dans la première étape, la surface à tester est celle d'un miroir optique plan (surface étalon), puis on procède à d'autres surfaces des différents échantillons. L'œil de l'observateur verra des franges de moiré qui sont les courbes de niveau de la surface à analyser. Si celles-ci sont rectilignes, la surface est parfaitement plane; mais le moindre défaut ou déformation à la surface du matériau détériora la trajectoire des franges et courbera la structure de leur forme.

### *3.5.1. Franges de moiré de la surface du miroir optique plan*

Nous avons testé la surface du premier échantillon qui est un miroir optique plan, nous avons obtenu les franges de moiré pour un angle entre l'image du réseau test et le réseau de référence est approximativement égal à  $0^\circ$ , les franges obtenues sont présentées dans la figure 3.6, ces franges sont rectilignes et parallèles et alternativement brillantes et sombres affirmant la planéité parfaite de la surface du miroir.

#### *3.5.1.1. Influence de l'angle entre les réseaux sur l'orientation des franges de moiré*

La figure 3.6 présente les franges de moiré obtenues en augmentant l'angle entre les deux réseaux, a fin de confirmer pratiquement l'influence de la variation de l'angle d'orientation  $\theta$  du réseau de référence par rapport au réseau test (angle entre les deux réseaux), sur l'interfrange  $d$  des franges de moiré [7] qui est décrite par :

$$d = \frac{p}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (3.1)$$

$$d_G = G \cdot p / (2 \sin(\theta/2)) \quad (3.2)$$

Avec  $p$  : pas des deux réseaux.

$d$  : pas des franges de moiré sur le plan du réseau de référence, et  $d_G$  : pas des franges de moiré sur le plan d'observation.

$G$  : grandissement.

Dans cette figure nous observons sur le plan d'observation que plus on augmente l'angle  $\theta$  plus l'interfrange  $d$  des franges de moiré diminue, ceci confirme la relation de l'équation 3.2 et ainsi que celle de l'équation 3.1.

Les franges se serrent d'une manière sans que la plage de détection ne varie, elle reste constante pour chaque variation d'angle.

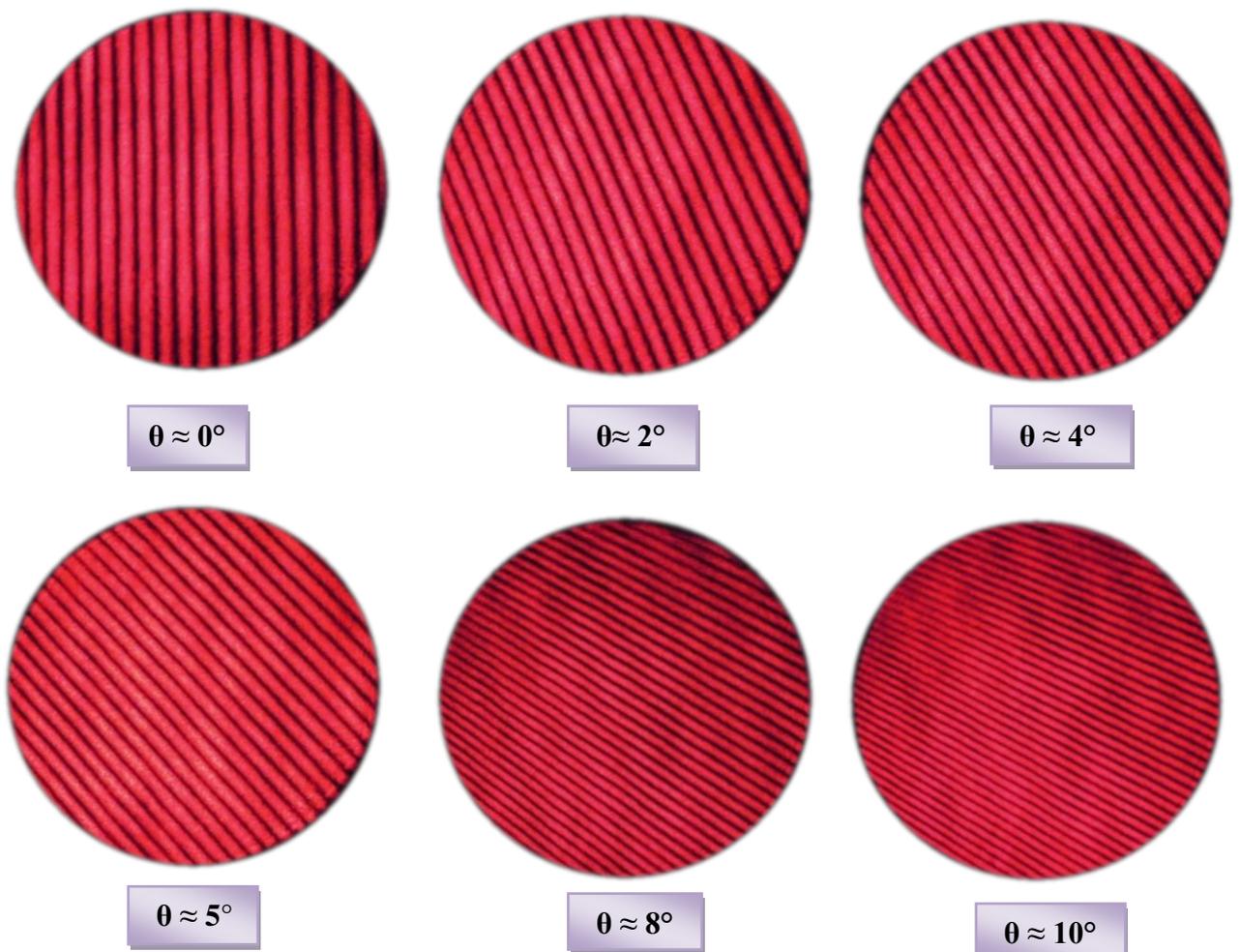


Figure 3.6. Franges de moiré obtenues à différents angles de rotation entre les deux réseaux

#### 3.5.1.2. Franges de moiré du miroir optique plan obtenues pour le cas du déplacement du plan d'observation

A chaque déplacement du plan d'observation, on obtient des franges de moiré du miroir optique plan avec le même angle entre les deux réseaux  $\theta \approx 0^\circ$ ; on observe que la taille de l'image augmente et s'agrandie une fois qu'on déplace le plan d'observation puisque l'optique géométrique s'impose, l'interfrange augmente aussi et les franges sont discernables. Selon l'optique géométrique, le grandissement subi par un objet de la part d'une lentille est défini comme le rapport de la taille de l'image à la taille de l'objet qui est égal au rapport de la distance du système optique (système de lentilles minces) au plan image, à la distance de ce système optique au plan objet tel que [33]:

$$y_2 = \frac{a_2}{a_1} y_1 \quad (3.3)$$

Avec  $y_2$  : la taille (diamètre) de l'image au plan d'observation,

$y_1$ : la taille (diamètre) de l'objet (franges de moiré sur le plan du réseau de référence),

$a_2$  et  $a_1$  : sont les distances de l'image au système de lentilles et du système de lentilles à l'objet respectivement.

Puisqu'on est dans la région de Fourier l'image est collectée par un système de lentilles, alors si  $a_2$  augmente automatiquement  $y_2$  augmente et l'interfrange augmente aussi, ce qui est observé dans la figure ci-dessous.

La figure 3.7 présente le premier état de l'image des franges de moiré à partir duquel on déplace l'écran d'observation, le diamètre de l'image est de 65mm de superficie égale à  $1056,25\text{mm}^2$ . Après un déplacement du plan d'observation d'une distance (figure 3.8a), la superficie de l'image sur l'écran devient le double de la précédente (figure 3.7).

La figure 3.8b montre l'état des franges de moiré après un autre déplacement du plan d'observation, qui conduit à une image de superficie qui est le double de la précédente et cinq fois que la superficie de la première image.



Diamètre 65mm

**Figure 3.7.** Franges de moiré du miroir optique plan (état avant le déplacement du plan d'observation)



a) diamètre de l'image 100mm



b) diamètre de l'image 150mm

**Figure 3.8.** Franges de moiré du miroir optique plan après deux différents déplacements du plan d'observation

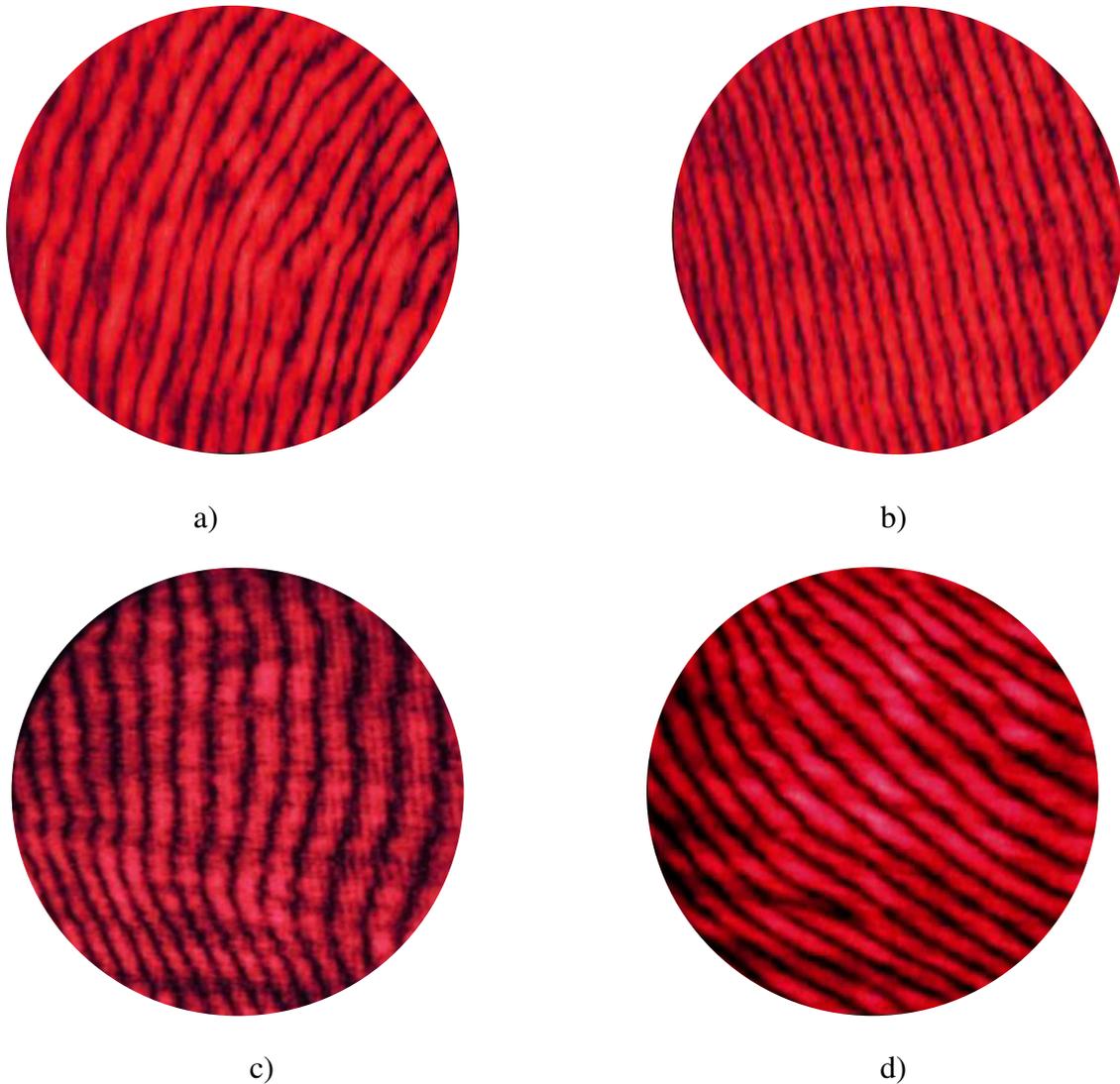
### *3.5.2. Franges de moiré de la surface des différentes plaques réfléchissantes*

Différents échantillons dont le taux de réflexion de leur surfaces est différent et présentant d'états de surfaces aussi différents. Leurs surfaces seront contrôlées comme suit.

#### *3.5.2.1. Franges de moiré de la surface des plaques inoxydables*

Nous avons testé la surface de deux différentes plaques inoxydables, qui sont à l'état brut, et la surface d'un produit qui a subi un traitement de surface bien soigné se trouvant au marché (état de vente). Les figures (3.9a et 3.9b), illustrent les franges de moiré des surfaces de deux différentes plaques inoxydables, mais les figures (3.9c et 3.9d) présentent les franges de moiré à deux endroits différents par balayage de la surface du produit (état de vente). On observe

que les franges de moiré de ces surfaces ne sont plus rectilignes et parallèles, elles sont détériorées dans la forme de leur structure d'une manière différente ce qui explique que la qualité de chaque surface est différente l'une de l'autre, présentant des déformations détectées différemment ce qui donne l'information sur la qualité de la surface contrôlée.

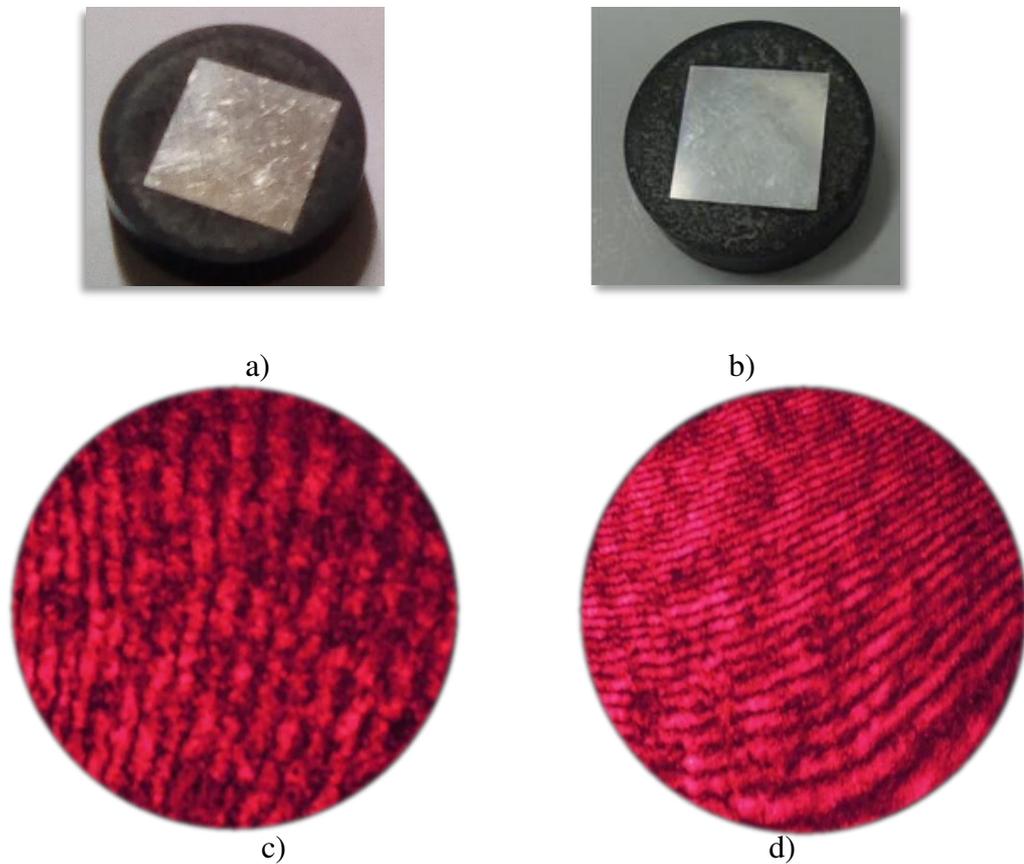


**Figure 3.9.** Franges de moiré de surface des différentes plaques inoxydables

*3.5.2.2. Franges de moiré de la surface des plaques métalliques de différents états de surface*

Nous avons testé la surface de deux plaques à composition d'un mélange d'aluminium de forme géométrique carré, d'épaisseur égale à 0,8mm (figure.3.10a et figure3.10b), dont le taux de réflexion est suffisant pour permettre de visualiser sa composition métallographique, elles présentent d'état de surface différent. Nous avons obtenu les franges de moiré de chaque surface (figure 3.10c et figure3.10d respectivement), on remarque que les franges ont de

structure différente entre les deux échantillons suivant chaque état de surface ce qui reflète la qualité de la surface à tester. Selon les franges obtenues, la qualité de l'état de surface de la plaque (figure 3.10b) est meilleure que celle de la figure 3.10a.

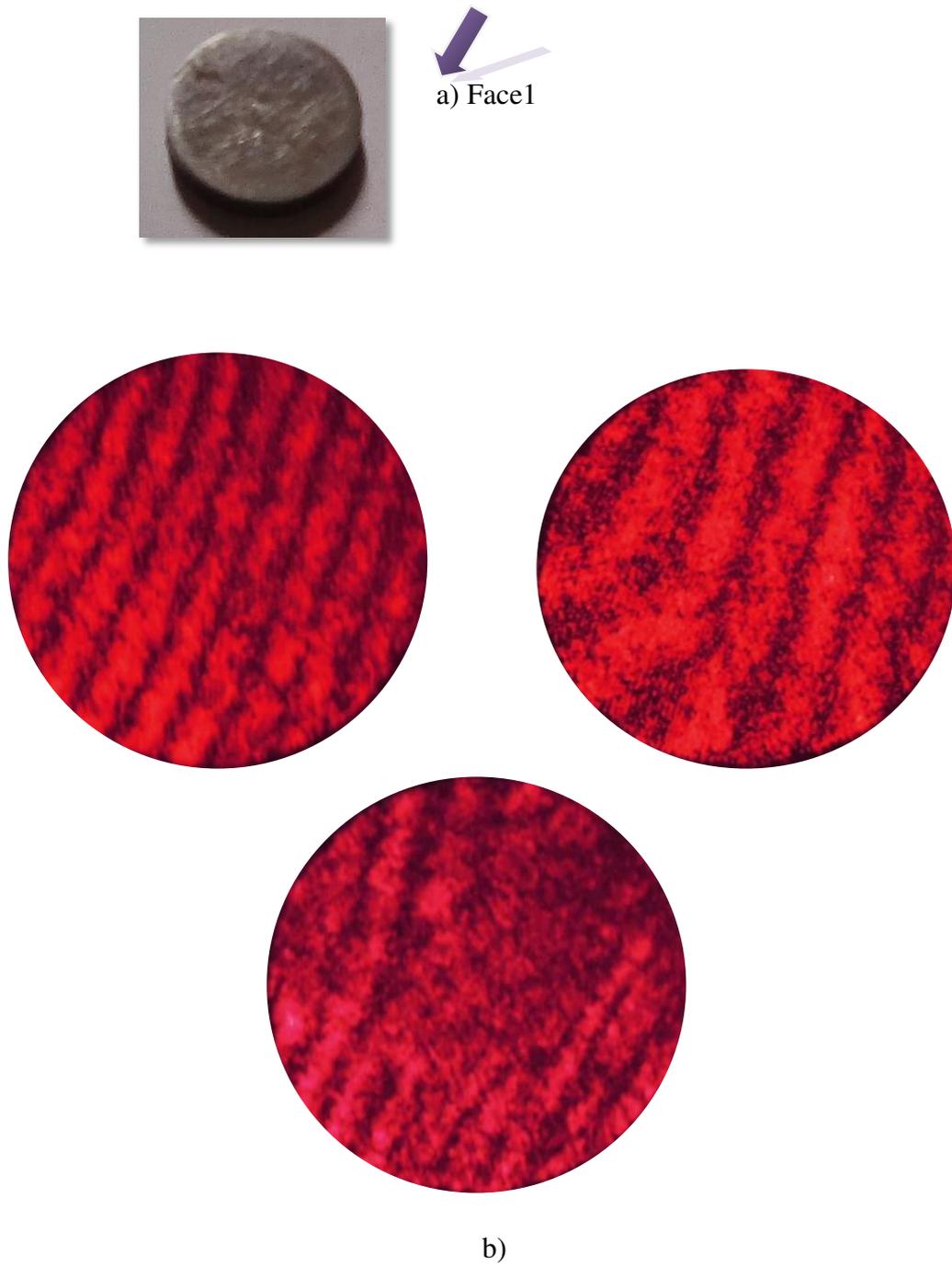


**Figure 3.10.** Franges de moiré de deux plaques en mélange d'aluminium

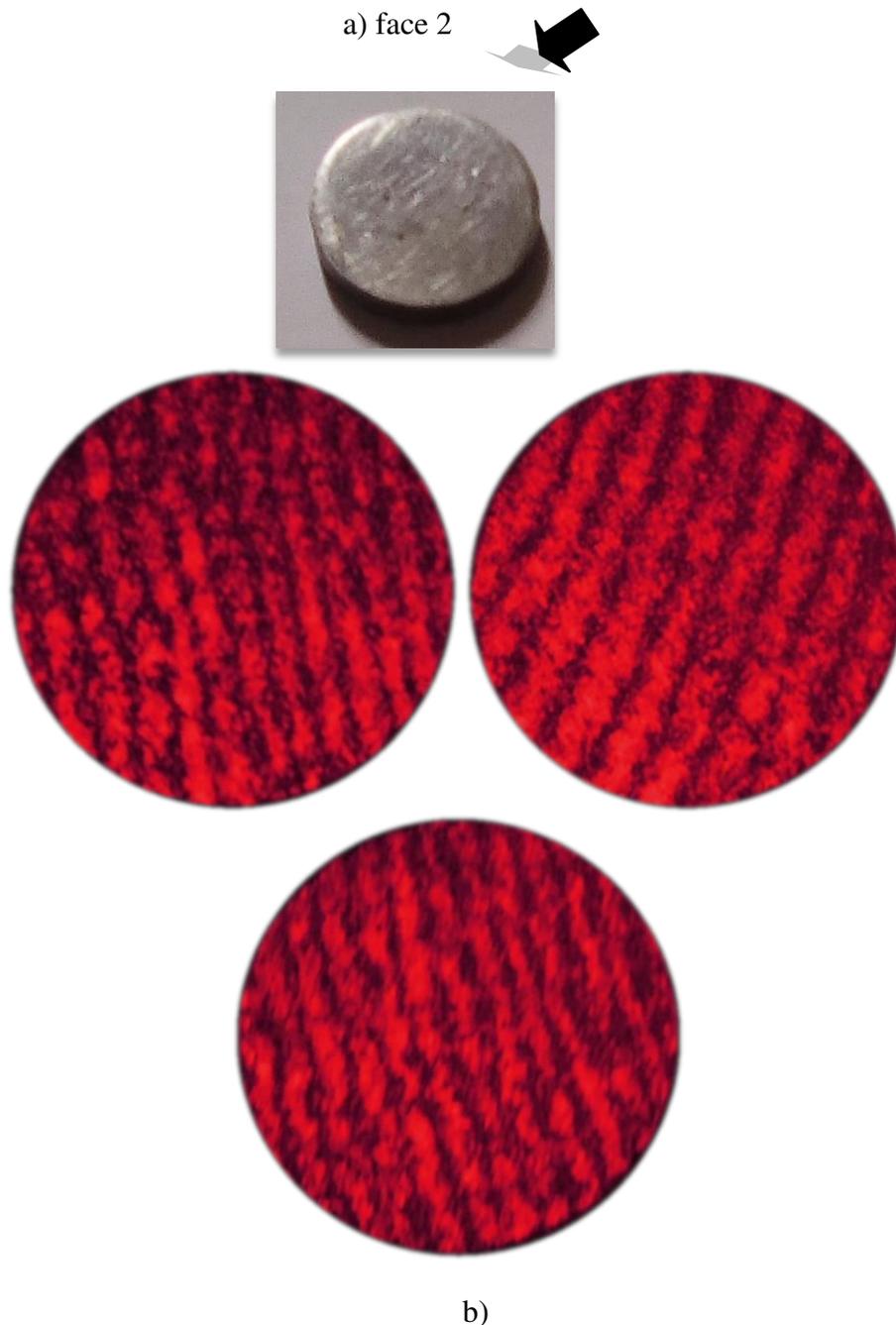
Un autre échantillon à tester est une plaque métallique circulaire de petite épaisseur, présente deux faces dont on les teste.

La figure 3.11a, montre la face 1 à tester en balayant toute la surface. Les franges de moiré obtenues sont présentées dans la figure 3.11b; les franges se présentent non rectilignes et parallèles mais sont de mauvaises structures et sont déformées, ce qui montre que la qualité de cette surface est mauvaise elle renferme des défauts surfaciques.

Nous avons balayé la surface de la face 2 présentée par la figure 3.12a dont ses franges de moiré sont illustrées dans la figure 3.12b. Les franges obtenues sont aussi de mauvaises structures; et montrent clairement que la qualité de l'état de surface de cette face est mauvaise par rapport à la face 1.



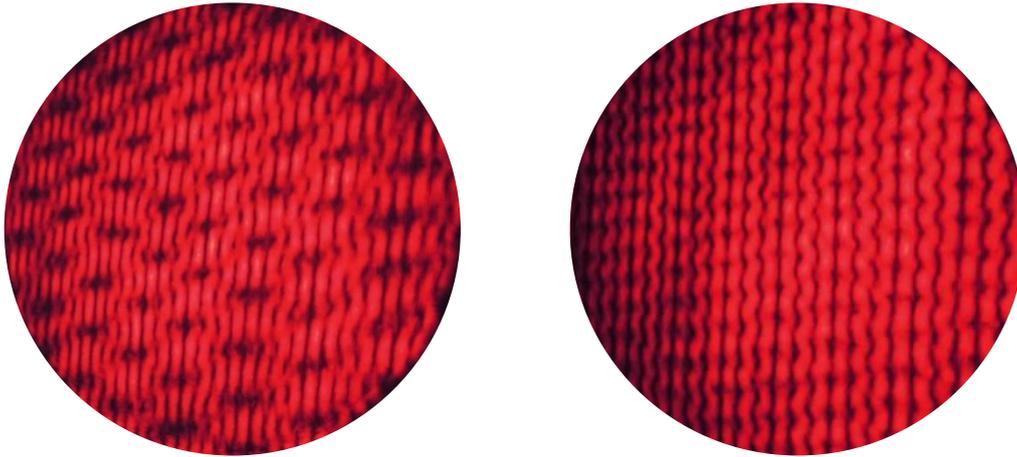
**Figure 3.11.** Franges de moiré de la première face de la plaque métallique



**Figure 3.12.** Franges de moiré de la deuxième face de la plaque métallique

### *3.5.2.3. Franges de moiré de la surface de CD (Compact Disc)*

Nous avons testé la surface de deux CD différents. Les franges de moiré obtenues sont présentées dans la figure 3.13; la topographie de leurs surfaces est différente selon la structure des franges de moiré obtenues, ce qui dévoile que la surface de chaque CD est différente par rapport à l'autre.



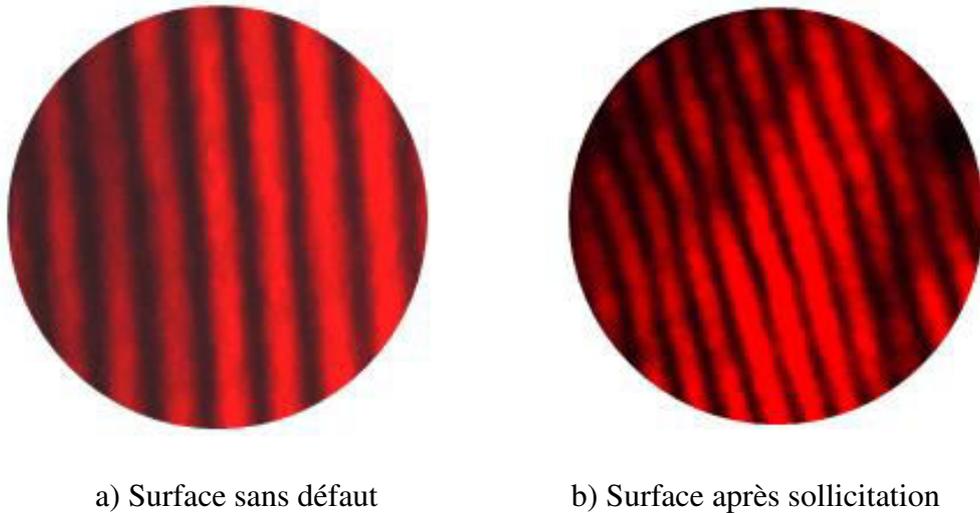
**Figure 3.13.** Franges de moiré de la surface de deux CD différents

#### *3.5.2.4. Franges de moiré de la surface d'une plaque inoxydable sous sollicitation*

L'échantillon sous test est une plaque inoxydable réfléchissante ayant un taux de réflexion suffisant. Cette plaque est placée dans le montage après avoir enlevé le miroir optique plan; en première étape on relève les franges de moiré de sa surface sans défaut, ces franges sont prises en tant qu'image de référence.

Après en appliquant une sollicitation (un effort) sur sa surface, sur l'écran on visualise en temps réel la séquence de la déformation de la plaque, on obtient de nouvelles franges de moiré de la surface de la pièce déformée, il en résulte que les franges obtenues à l'endroit de déformation ont emporté l'empreinte qu'a transportée l'image du réseau projetée sur la surface à tester, et on obtient donc :

- ✦ La figure 3.14a montre, les franges de moiré qui sont parallèles et rectilignes alors la surface ne présente pas de défaut discernable, ces franges renseignent sur la surface si elle est saine et sans défaut.
- ✦ Après application de sollicitation sur la surface à un endroit (figure 3.14b), cependant les franges de moiré obtenues présentent des déformations dans leur structure ce qui visualisent la présente déformation à la surface contrôlée. Les déformations de la surface de l'objet se traduisent par des variations du pas des franges observées.



**Figure 3.14.** Franges de moiré de la surface d'une plaque réfléchissante avant et après sollicitation

### *3.5.3. Franges de moiré d'un film transparent mince pour habillement*

L'échantillon à tester est un objet industriel à contrôler, il s'agit d'une housse plastique en rouleau pour vêtements (figure 3.15).

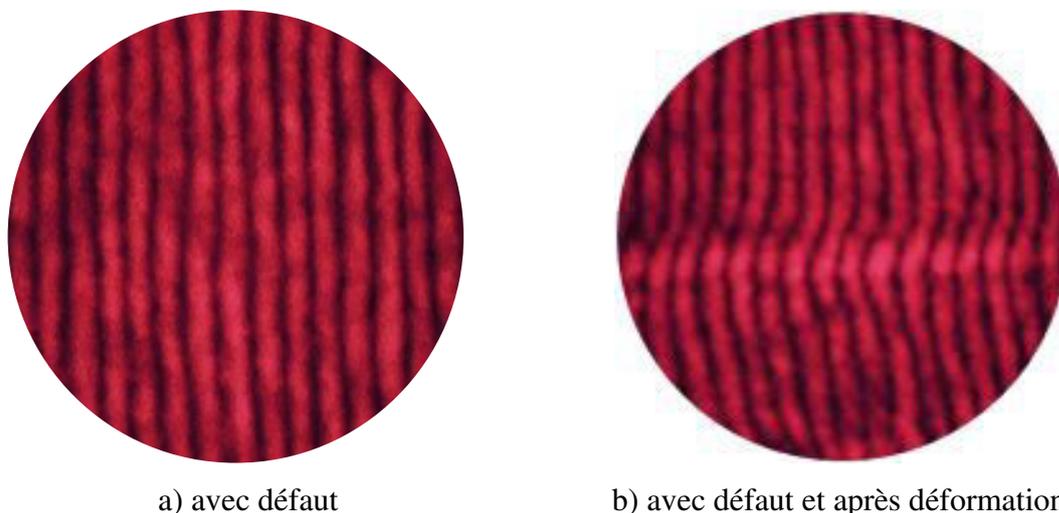


**Figure 3.15.** Housse plastique en rouleau pour vêtements [102]

On utilise le même montage que précédemment pour contrôler la surface de l'échantillon (film transparent mince en plastique) qui est placé avant le miroir.

D'après la figure 3.16a, les franges de moiré obtenues pour cet échantillon présentent des déformations dans leur structure, ces franges ne sont pas parfaitement rectilignes et parallèles, la surface de l'objet présente alors des défauts, la présence de ces défauts de fabrication modifie l'allure de ces franges ce qui témoigne que la surface de cet objet n'est pas de bonne qualité. En appliquant une légère déformation à la main sur l'objet (film mince de la

housse plastique en rouleau pour vêtements), les franges de moiré observées (figure 3.16b) sont visiblement déformées; cette faible déformation a influé sur la structure des franges de moiré, ceci indique distinctement la sensibilité de la technique au changement qu'a subi surface de l'objet.



**Figure 3.16.** Franges de moiré de la surface de la housse plastique en rouleau pour vêtements

#### *3.5.4. Franges de moiré d'un film transparent mince pour recouvrement de nourriture*

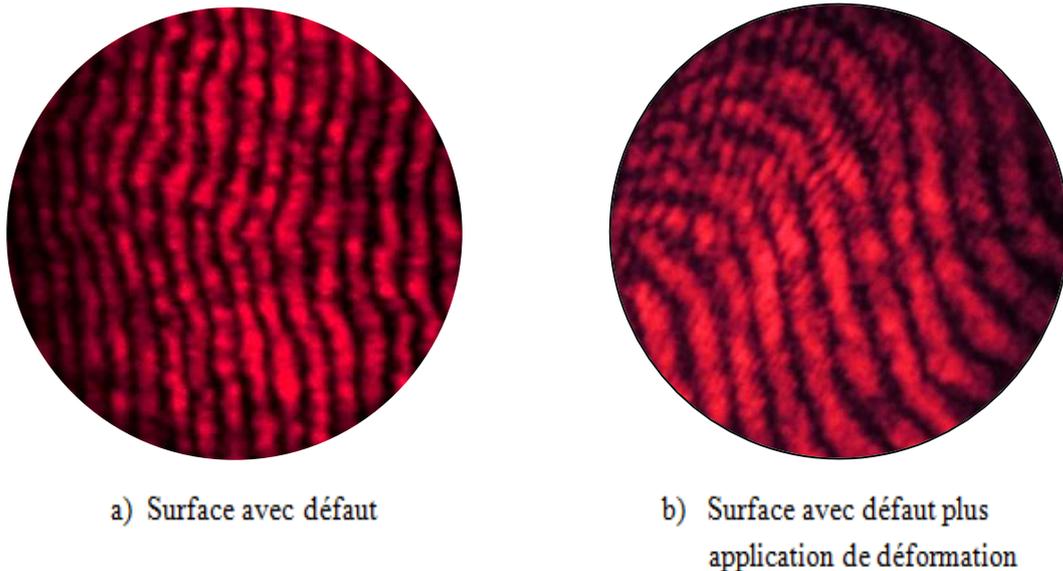
L'objet à contrôler est un film transparent mince en plastique (qui s'achète en rouleau) utilisé pour recouvrement de nourriture il s'agit de plastique d'emballage alimentaire (figure 3.17), ce film est placé avant le miroir.



**Figure 3.17.** Film transparent mince pour recouvrement de nourriture [103]

Pour ce film transparent mince en plastique, la figure 3.18 montre la déformation dans la structure des franges, ceci reflète la présence de défauts de la surface de l'objet; ces défauts de fabrication modifient le pas de ces franges c.-à-d. que n'importe quel défaut dans la forme de l'objet est visualisé par une déformation ou une courbure des franges.

En appliquant une légère déformation au film transparent, les franges de moiré sont évidemment déformées. Nous observons que les franges sont distinctement déformées et présentent la topographie de la surface, où des défauts sont détectés aisément sur la surface de l'objet; cependant le réseau projeté est déformé en imprégnant la déformation de la surface de l'objet.



**Figure 3.18.** Franges de moiré du film transparent mince pour recouvrement de nourriture

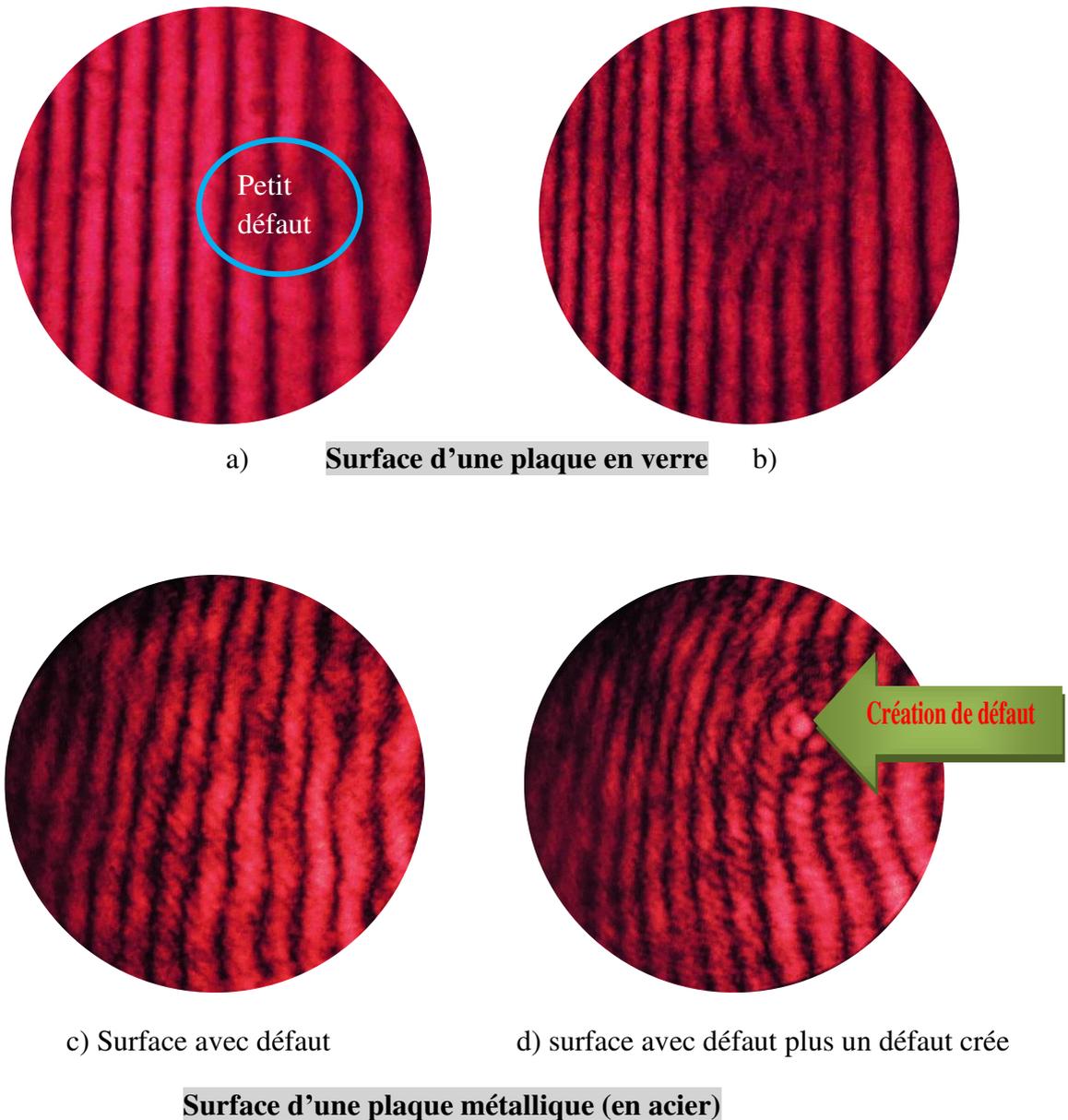
#### 3.5. 5. Comportement des franges de moiré via le défaut crée à la surface de l'objet

##### 3.5.5.1. Cas dans la surface du verre et dans une plaque métallique

Les franges de moiré se déforment d'une manière différente selon le type du matériau de l'objet à tester.

Prenons le cas d'une plaque en verre et le cas d'une autre métallique (acier inoxydable), l'application d'une sollicitation sur chaque surface contribue à des franges de moiré qui se présentent différemment, ce qui permet de distinguer entre une surface de verre et celle d'un métal en se basant sur les franges de moiré. Dans la figure 3.19a, en appliquant une petite charge (par un petit coup de marteau) sur une plaque de verre, on observe les franges de moiré qui se déforment légèrement dans la région où l'effort a été appliqué; et lorsque l'effort est augmenté (augmenter le coup de marteau), les franges se déforment seulement dans la région du défaut d'une manière compressée, et les franges à cet endroit subissent une collision entre elles (figure 3.19b). Pour la surface du métal (acier inoxydable) avec défaut, les franges de

moiré sont représentées par la figure 3.19c. En créant un défaut sur cette surface, ses franges de moiré sont illustrées par la figure 3.19d, d'après cette figure on constate que le défaut crée influe sur la trajectoire des franges; la déformation et la courbure des franges s'observent près de l'endroit de création du défaut.

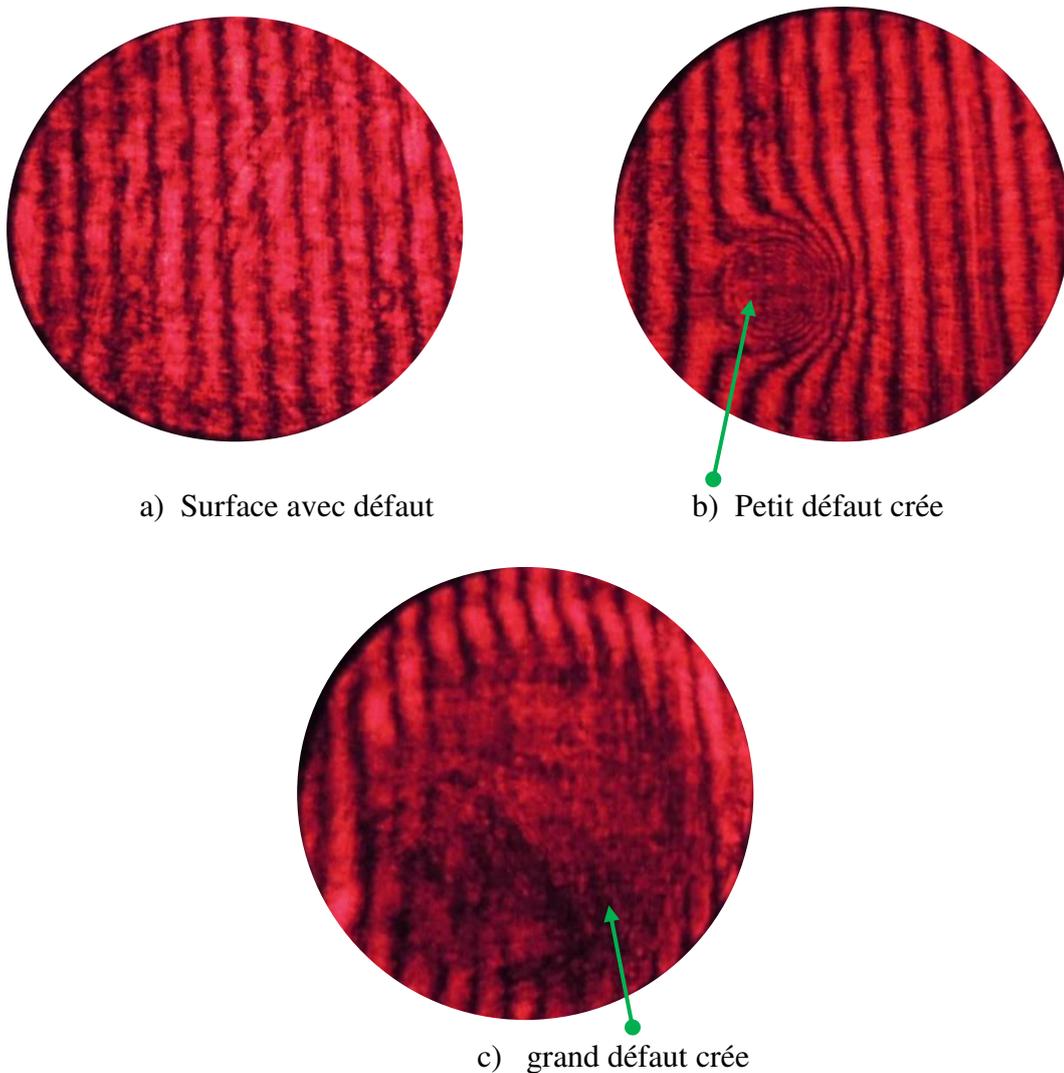


**Figure 3.19.** Franges de moiré pour la surface d'une plaque en verre et une en acier

#### 3.5.5.2. Cas de la surface du plexiglass

Pour une plaque d'un plexiglass, la figure ci-dessous présente les franges de moiré de la surface inspectée, les franges sont déformées dues à la présence des défauts (figure 3.20a), et

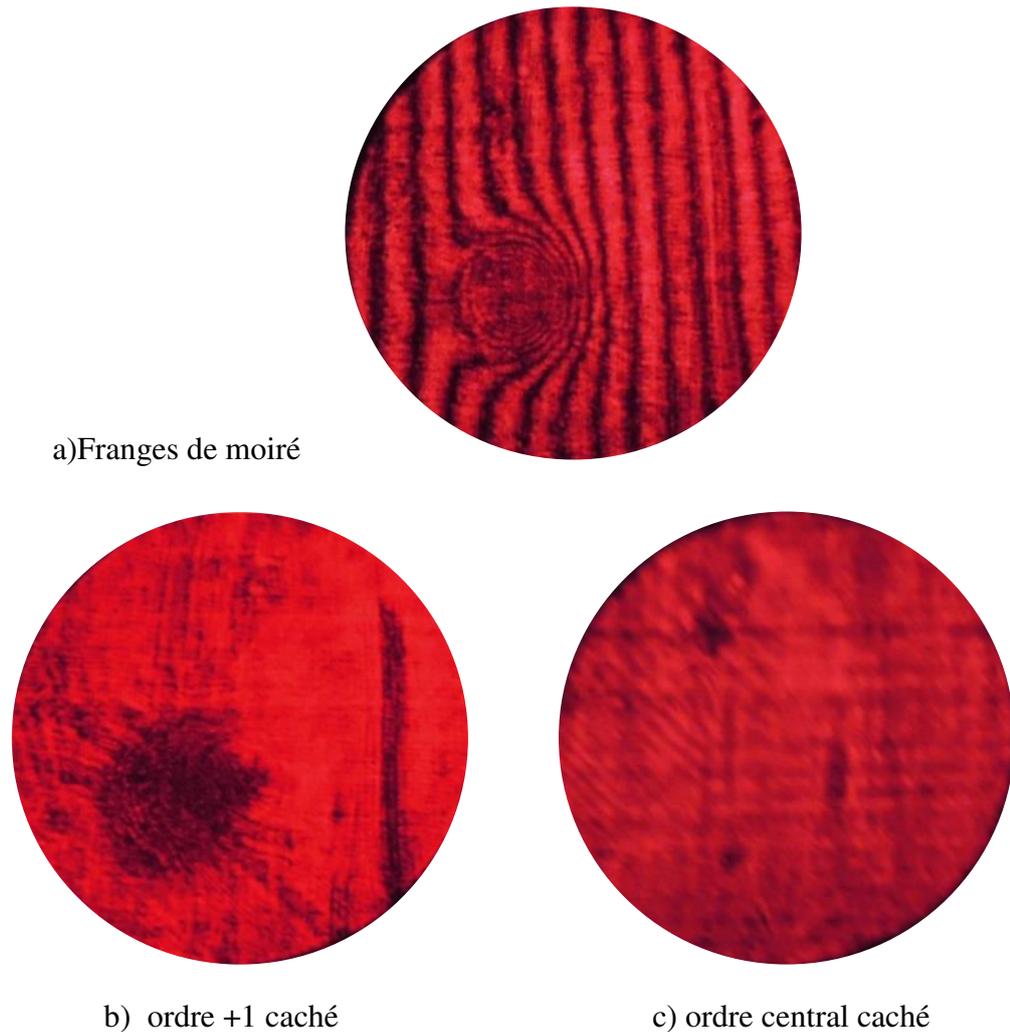
lorsqu'on lui applique une sollicitation en créant un petit défaut (respectivement grand) à la surface (figure3.20b et figure3.20c), les franges de moiré se déforiment tout autour de l'endroit du défaut crée et il les oblige à suivre sa forme on dirait que le défaut c'est un virage qui oriente la direction des franges selon son emplacement, ce défaut se présente comme obstacle qui diffracte les franges.



**Figure 3.20.** Franges de moiré de la surface de plexiglass

### *3.5.5.3. Détection et localisation de la forme des défauts d'une surface de plexiglass*

Afin de détecter et de localiser la forme des défauts se trouvant à la surface de la plaque de plexiglass (figure3.21a), on cache l'ordre +1 qui nous a permis d'extraire la forme du défaut se trouvant à la surface inspectée (figure 3.21b), et la figure 3.21c présente la forme des défauts se trouvant sur la surface contrôlée en cachant l'ordre central.



**Figure 3.21.** Détection et localisation de la forme des défauts sur la surface inspectée du plexiglass

### *3.5.6. Etude de la planéité des différentes surfaces réfléchissantes*

#### *3.5.6.1. Généralités*

La planéité (flatness) de surface est une caractéristique de surface, et un paramètre critique pour les surfaces fonctionnelles, telles que les surfaces de contact et de pression utilisées dans la technique du vide, le film transparent pour les affichages, les brides métalliques et les surfaces en céramique [104], et les composants semi-conducteurs [104 -106].

#### *3.5.6.2. Miroir optique plan*

La surface du miroir optique plan présente des franges de moiré rectilignes et parallèles possédant un état de planéité inférieure à  $\lambda/2$ .



**Figure 3.22.** Franges de moiré de la surface du miroir optique plan

#### *3.5.6.3. Miroirs ordinaires*

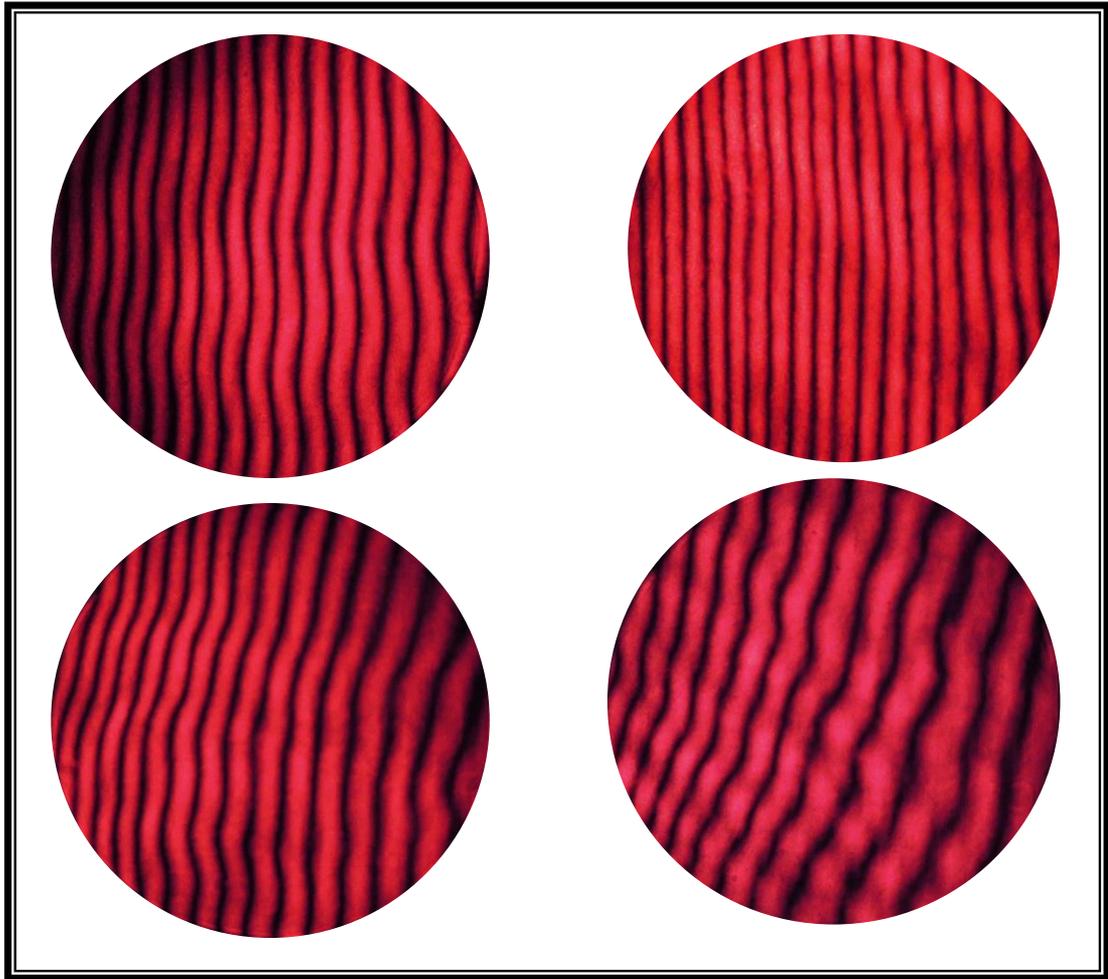
Nous avons testé différents miroirs ordinaires présentant différents états de planéité de surface, les résultats obtenus sont illustrés par les figures ci-dessous.

.

##### ◆ miroir ordinaire 1

Le balayage de la surface du miroir ordinaire 1 a donné les franges de moiré (figure 3.23) dont leurs structures se diffèrent selon la présence des défauts de planéité qui s'accroissent progressivement.

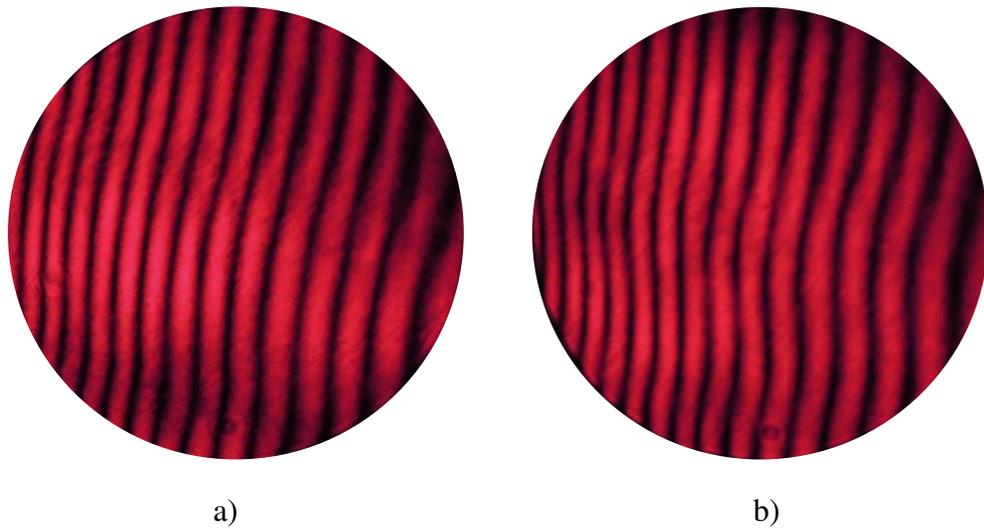
Ce miroir possède donc un état de planéité de sa surface différent d'un endroit à un autre.



**Figure 3.23.** Franges de moiré pour balayage de surface du miroir ordinaire 1

◆ miroir ordinaire 2

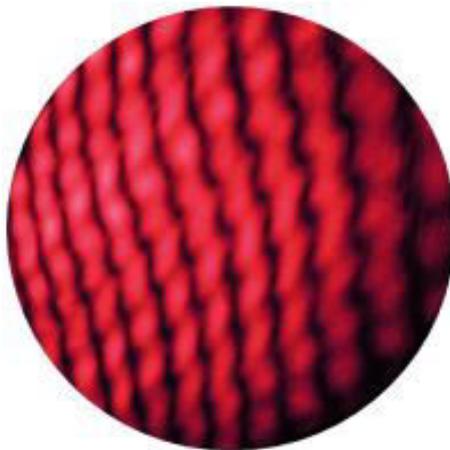
La figure 3.24 présente le défaut de planéité suivant la surface balayée du miroir ordinaire 2, alors selon la figure 3.24a, les franges de moiré obtenues se présentent parallèles en haut puis se courbent au milieu et redeviennent légèrement parallèles ceci est dû au défaut de planéité présenté à la surface étudiée. Pour le même miroir en changeant l'endroit de la surface testée, on obtient des franges de moiré présentées dans la figure 3.24b, elles se montrent incurver de manière qu'elles sont un peu rectilignes et parallèles de gauche et se courbent graduellement à droite selon l'état de planéité de la surface étudiée.



**Figure 3.24.** Franges de moiré de la surface du miroir ordinaire 2

◆ miroir ordinaire 3

Les franges de moiré de la surface du miroir ordinaire 3 sont présentées dans la figure 3.25. Ces franges ne sont plus rectilignes mais elles présentent des ondulations qui témoignent que les défauts de planéité de la surface contrôlée se trouvent à des endroits plus près d'une manière consécutive.

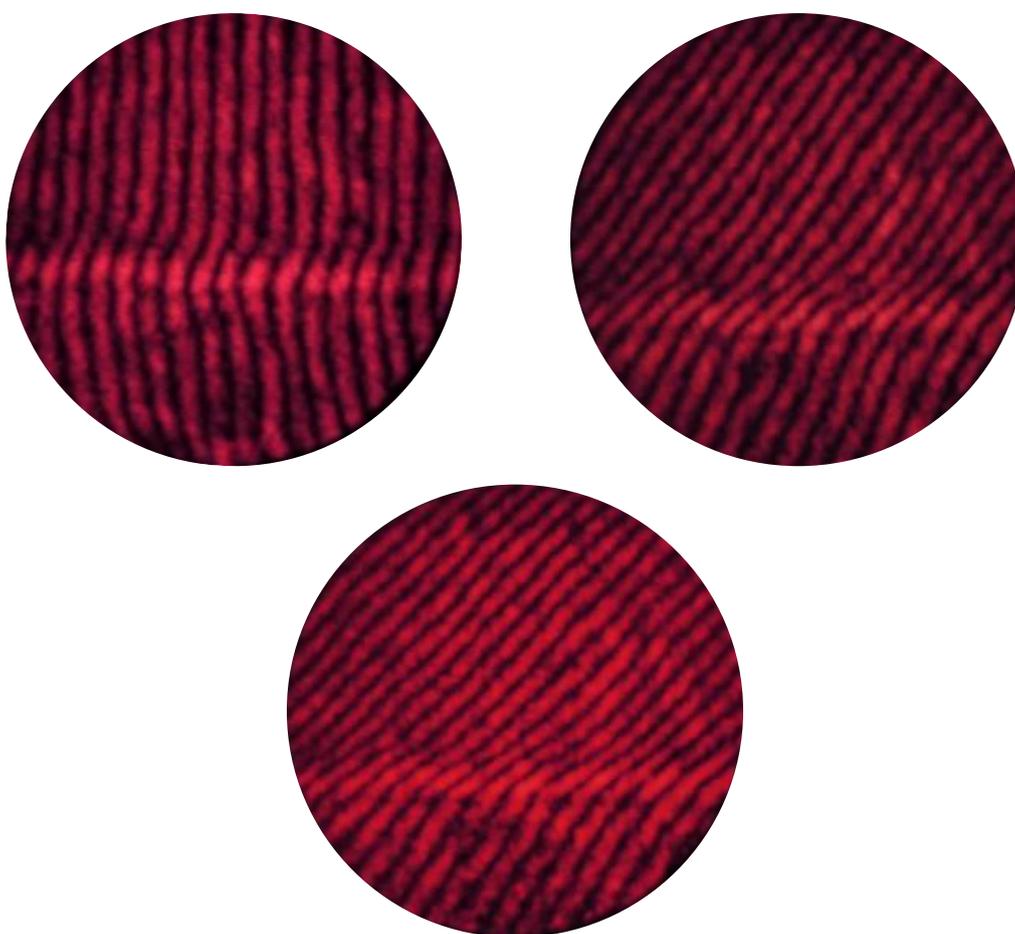


**Figure 3.25.** Franges de moiré de la surface du miroir ordinaire 3

### 3.5.7. Influence de l'angle entre les deux réseaux sur le défaut

#### 3.5.7.1. Cas du film transparent mince en plastique pour couverture d'habillement

La variation de l'angle formé entre les deux réseaux influe sur la détection du défaut de manière que, plus l'angle augmente entre eux plus la détection de défaut est faible, prenons le cas de la housse plastique en rouleau pour vêtements dont l'angle entre les deux réseaux est approximativement égal à zéro. Après une déformation, en augmentant de plus en plus l'angle entre le réseau test et le réseau de référence on observe que la détection de la déformation s'affaiblit progressivement (figure 3.26).



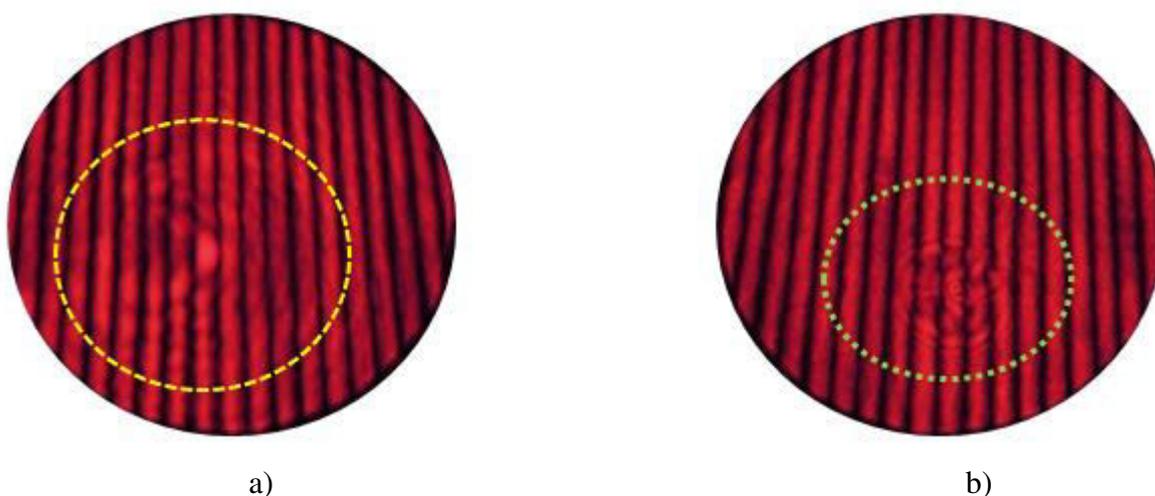
**Figure 3.26.** Influence de l'angle de rotation sur le défaut (film transparent mince en plastique)

#### 3.5.8. Contrôle de surface des différentes lames de verre

Dans le cadre de concrétiser l'information sur la surface des lames de verre à travers le comportement des franges de moiré obtenues. Nous avons contrôlé une petite région (de quelques  $\text{mm}^2$ ). À l'aide du système optique utilisé et son principe, l'image du réseau test traverse la surface à contrôler, suit son chemin vers le miroir qui va la réfléchir, elle transporte

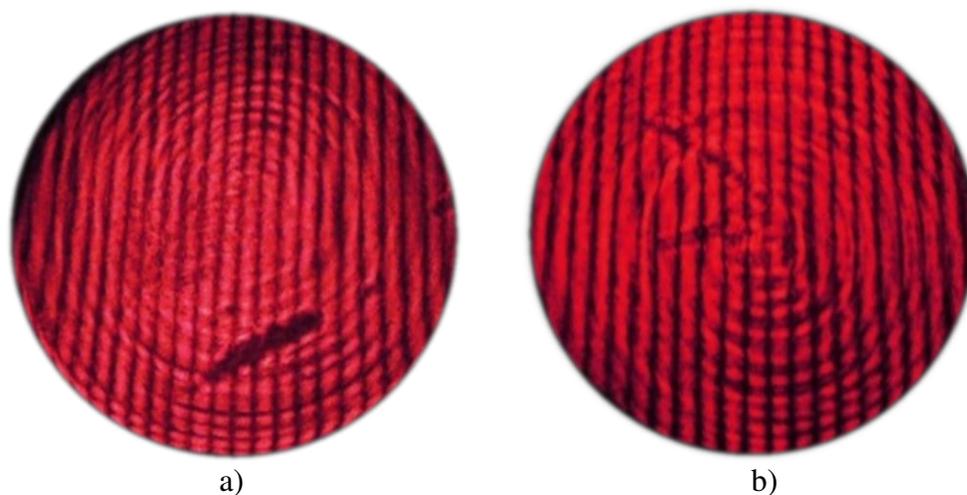
donc l'information présente sur cette surface et la transmettre aux franges, par conséquent toutes irrégularités de la surface sont dévoilées et concrétisées rapidement par des déformations dans la continuité des franges de moiré.

La figure 3.27 (a, b) illustre les franges de moiré de la surface de la première lame de verre. Dans ce cas les franges présentent une structure détériorée à cause de la présence des défauts microscopiques à la surface de la lame de verre qui sont repérés et désignés clairement et précisément dans deux endroits différents.



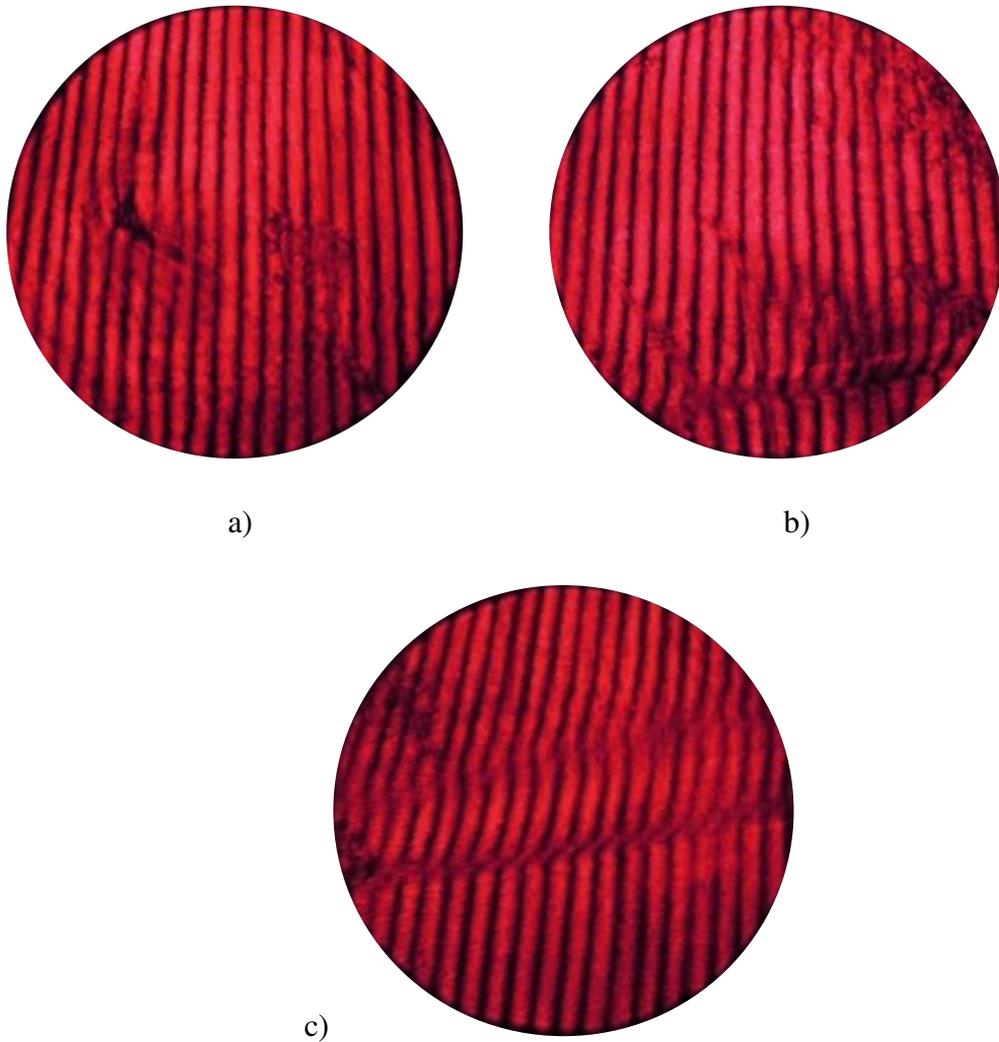
**Figure 3.27.** Franges de moiré de la surface de la première lame de verre à faces parallèles

Dans la figure 3.28(a, b), les franges de moiré obtenues sont celles de la surface de deux lames de verre optique dont se montre la discontinuité des franges de moiré produite par les traces (marques) de l'outil de rodage ce qui a caractérisé directement l'état de surface qui est dédié au procédé de rodage.



**Figure 3.28.** Franges de moiré de la surface de deux lames de verre (effet de l'outil de rodage)

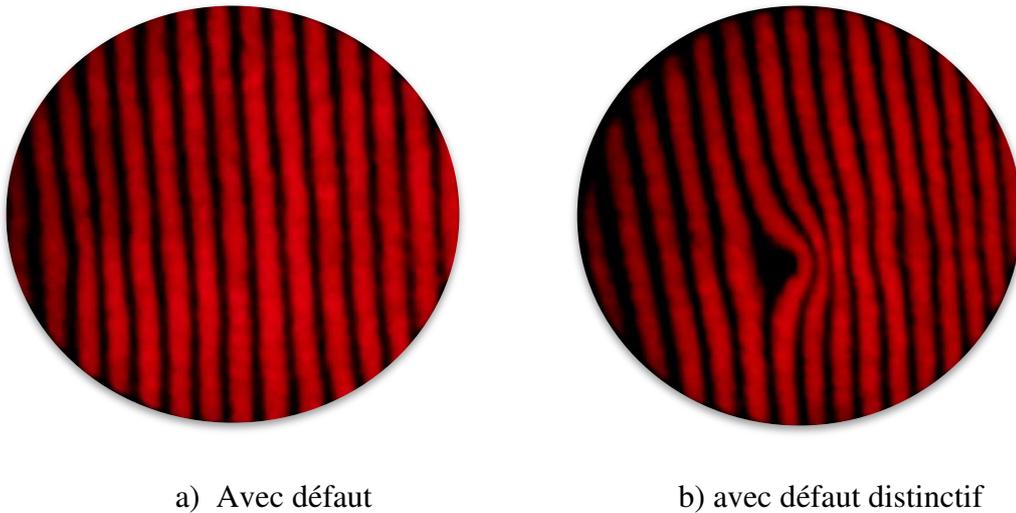
La figure 3.29 (a, b, c), présente les franges de moiré obtenues dans différents endroits respectivement de la surface d'une lame de verre (fissurée), les franges de moiré se sont déformées nettement différemment suivant le degré d'endommagement produit à la surface testée.



**Figure 3.29.** Franges de moiré de la surface d'une lame de verre (fissurée) à faces parallèles

### *3.5.9. Influence de l'angle entre les deux réseaux sur la détection du défaut d'une lame de verre*

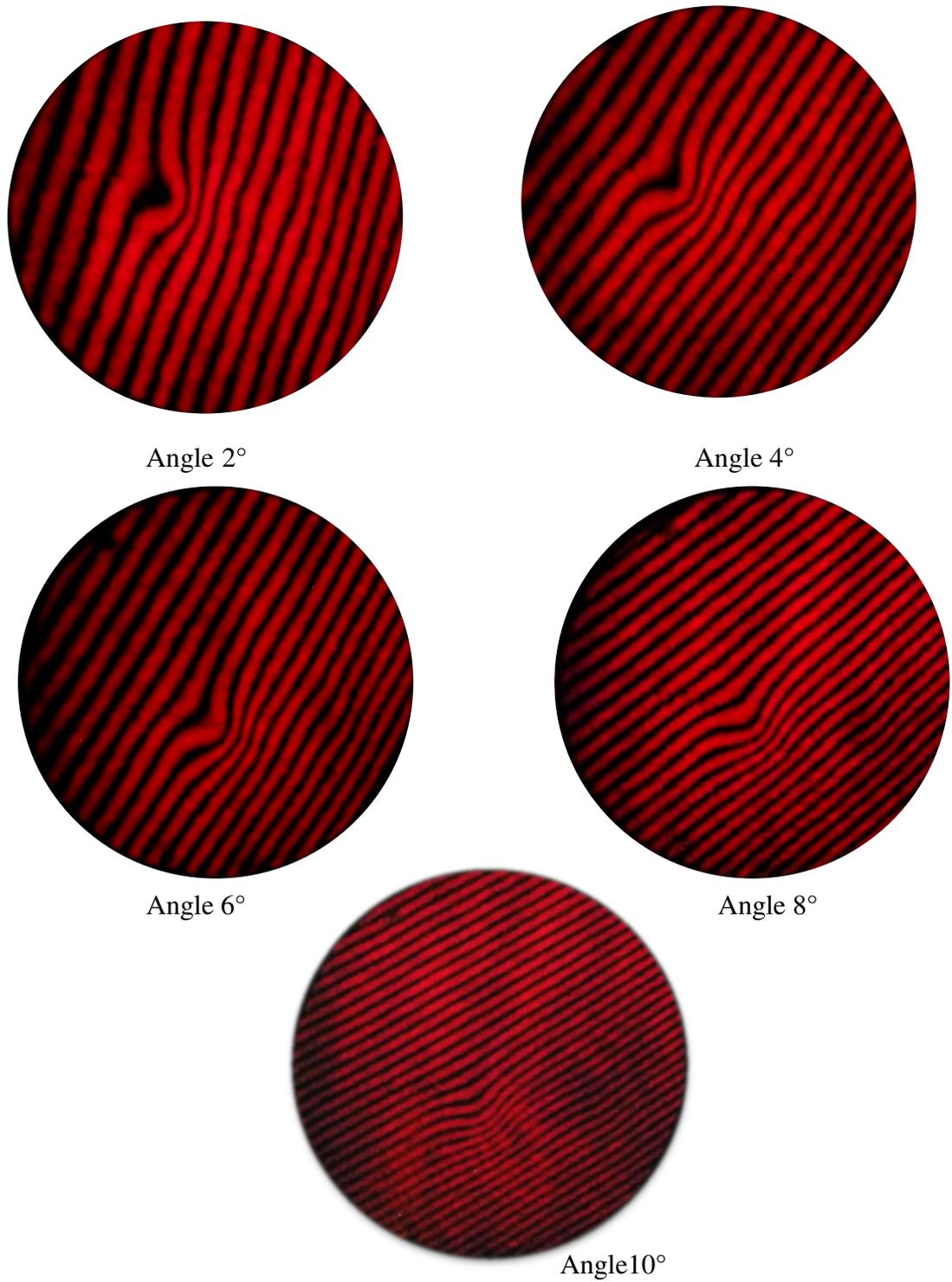
La figure 3.30a présente les franges de moiré de la surface d'une lame de verre mince présentant de défauts. Par contre la figure 3.30b sur la même lame nous avons détecté un défaut distinctif.



**Figure 3.30.** Franges de moiré de la surface d'une lame de verre mince

Dans le but de donner une description de l'influence de la variation de l'angle entre les deux réseaux sur la détection du défaut, prenons le cas du défaut distinctif (figure3.30b) ; nous avons procédé de manière à augmenter cet angle et à observer la détection du défaut.

On montre dans la figure3.31 à travers les franges de moiré la détection de ce défaut en augmentant l'angle entre les deux réseaux, on observe que plus on augmente l'angle plus la détection du défaut est faible. Ceci conclue que la détection du défaut s'affaiblie progressivement en augmentant l'angle entre les deux réseaux. Ce qui permet donc de contrôler la détection du défaut instantanément et en temps réel afin d'envisager à améliorer de plus en plus les paramètres du système optique par exemple la sensibilité et la résolution.



**Figure 3.31.** Effet de variation d'angle entre les réseaux sur la détection du défaut

3.5.10. Détection et localisation de la forme du défaut sur la surface à inspecter

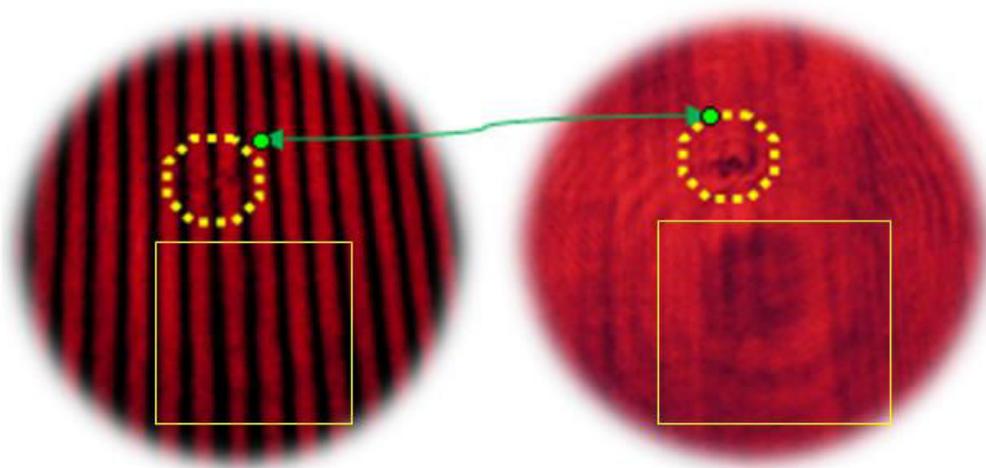
- Cas sur un seul endroit de la surface inspectée

Nous distinguons différents cas dont les franges de moiré obtenues sont déformées à cause de la présence du défaut qui est localisé par son emplacement avec précision sur la surface inspectée. La déformation de la structure des franges suivent respectivement la forme du défaut repéré, alors pour chaque cas si on ne laisse pas passer un des ordres (figure 3.32); sur le plan d'observation nous pouvons révéler la forme du défaut détecté sur la surface à inspecter.



**Figure 3.32.** Obturer un des ordres

- Cas d'un petit défaut et un grand défaut



**Figure 3.33.** Localisation de deux défauts de tailles différentes sur la surface inspectée

- Cas d'un défaut composé

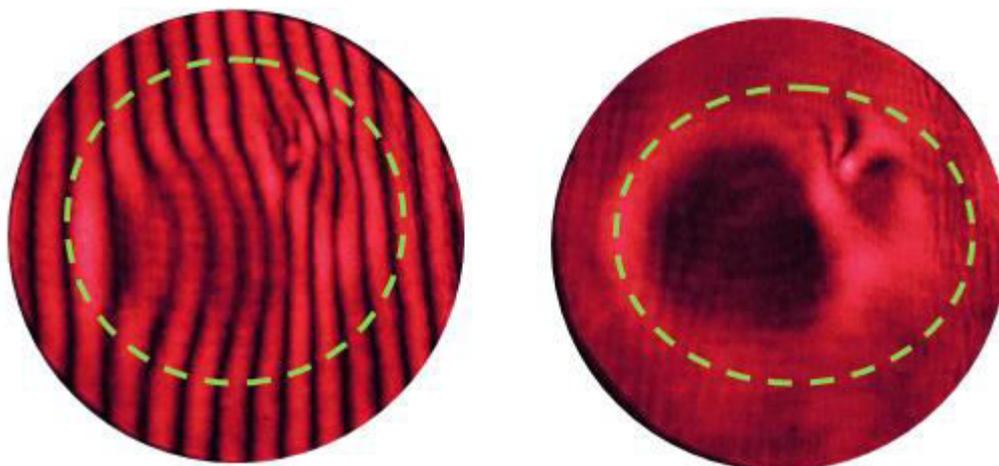


Figure 3.34. Localisation de défaut composé

- Cas de localisation de plusieurs défauts voisins sur la même surface

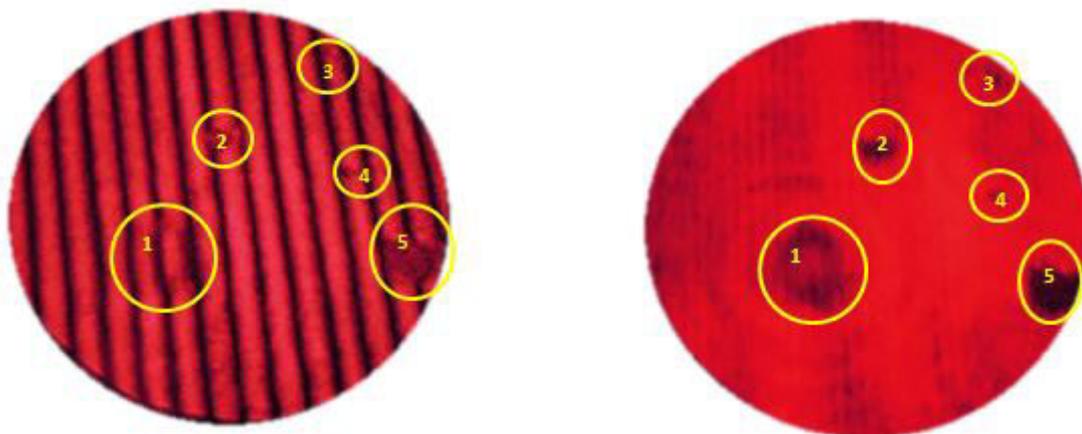


Figure 3.35. Détection différents défauts voisin sur la même surface inspectée

- Cas de faibles défauts

On montre la localisation de faibles défauts à travers les franges de moiré dans deux surfaces, le premier cas de la figure 3.36, les défauts sont détectés dans différents endroits de la surface à tester, et dans le deuxième cas de la figure 3.37, la détection est faite dans deux endroits voisins de la même surface testée. Les franges de moiré sont déformées à cause de la présence de ces défauts qui sont détectés par transmission.

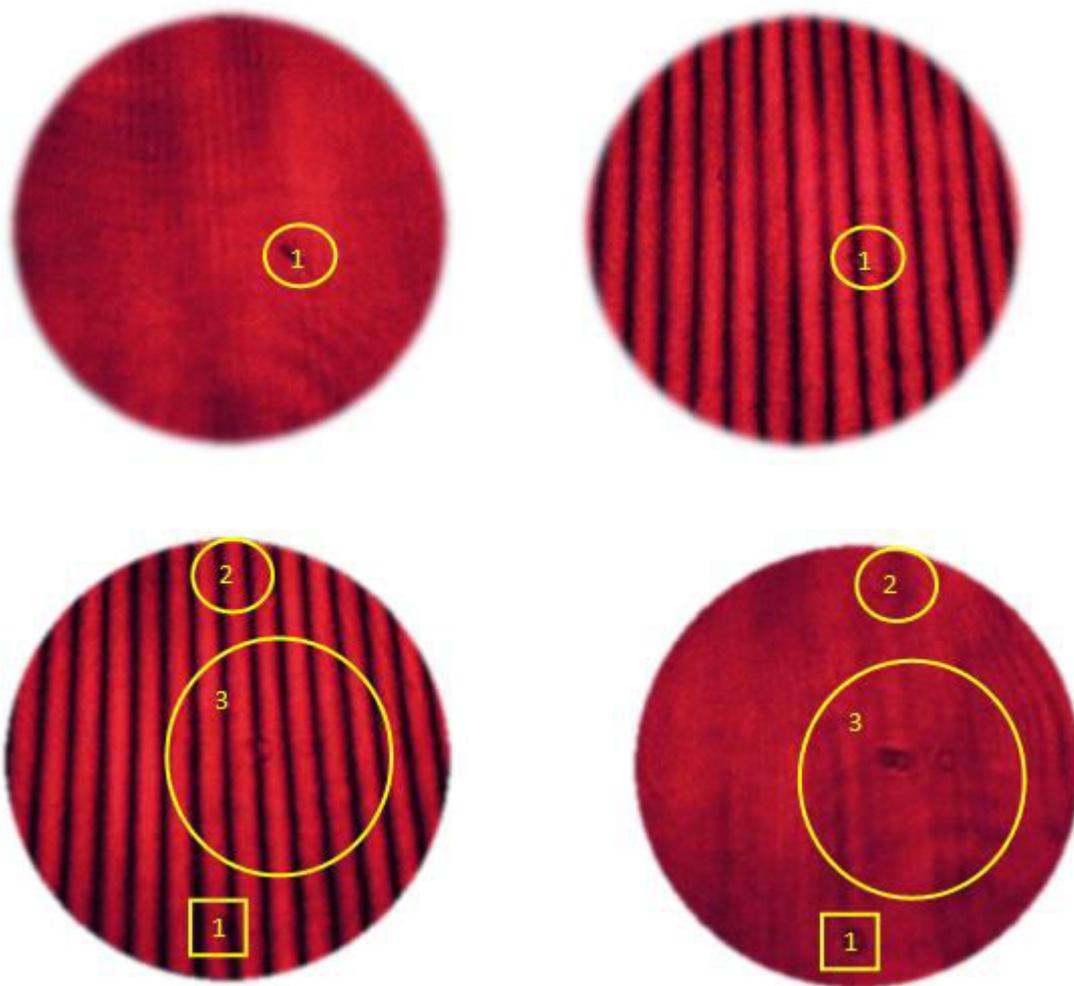


Figure 3.36. Localisation de faibles défauts sur chaque surface inspectée

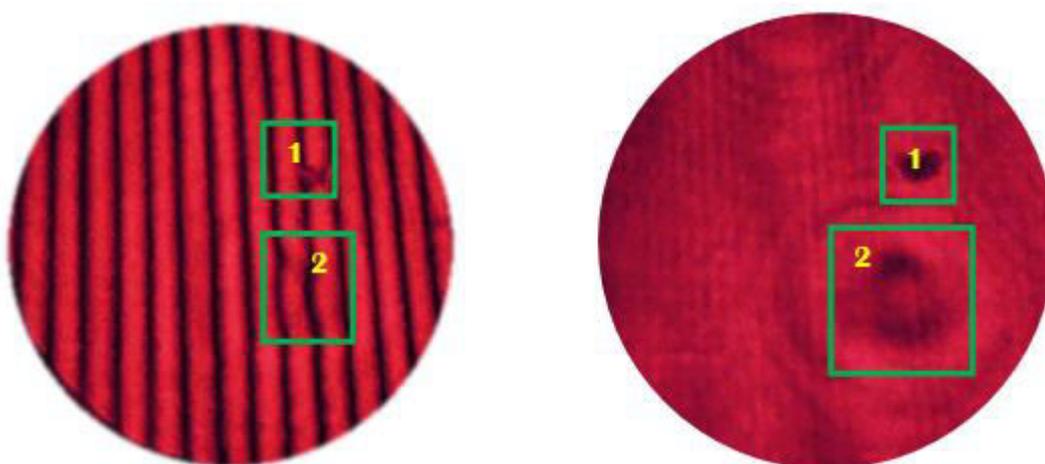
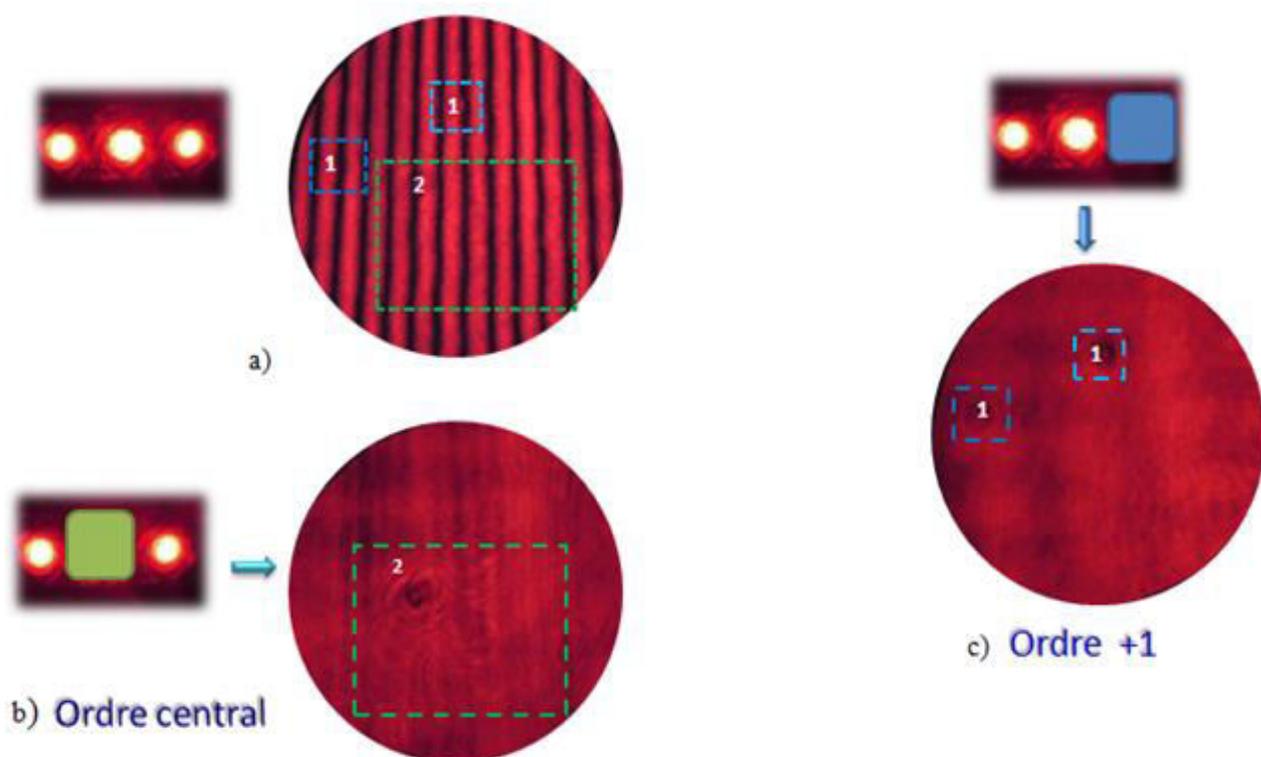


Figure 3.37. Localisation de faibles défauts voisins sur la même surface

- Cas de deux différents endroits de la surface inspectée

La figure 3.38a présente les franges de moiré de la surface à tester. Ces franges transportent la déformation causée par la présence des défauts qui sont localisés instantanément et en temps réel dans des endroits différents de la surface. Si on ne laisse pas passer soit l'ordre central (figure 3.38b), soit l'ordre +1 (figure 3.38c), on peut localiser et détecter l'endroit et la forme des défauts donnés respectivement par les ordres sélectionnés, alors les franges de moiré résultantes de la surface inspectée, transmettent l'informations acquises par les ordres du spectre du réseau test.

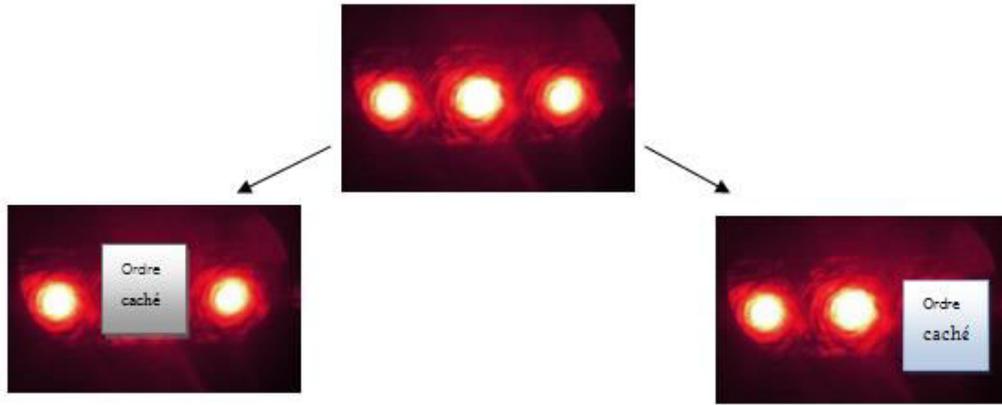


**Figure 3.38.** Localisation de défauts sur la surface inspectée par ne pas laissé passer un des ordres (central ou +1)

#### ■ Principe de détection

Comme il est indiqué dans la figure 3.39, si on laisse passer que deux ordres du spectre du réseau test pour inspecter la surface à contrôler, de manière à bloquer l'ordre central ou l'ordre +1, on obtient l'information acquise par les ordres sélectionnés. Ce sont en fait le résultat d'une combinaison de l'information transportée par les deux ordres du spectre du

réseau test en temps réel et instantanément sur deux endroits différents de la surface inspectée avec précision.

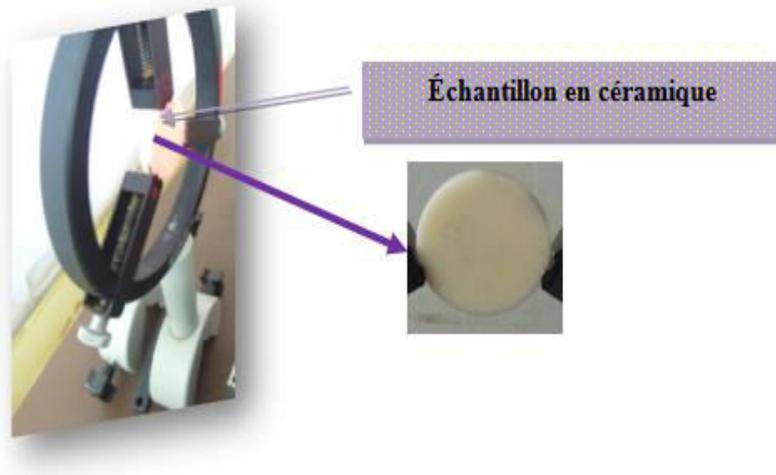


**Figure 3.39.** Principe de sélection des ordres

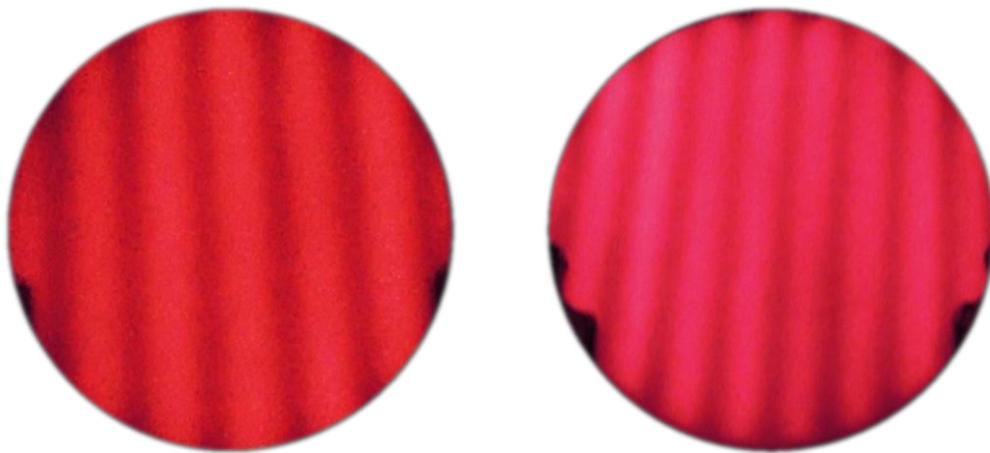
- Cas d'un échantillon en céramique à divers usages

L'échantillon dont la surface à tester est un matériau céramique (figure 3.40), connu sous le nom d'oxyde d'aluminium, sa formulation de base est  $Al_2O_3$ , a une dureté élevée et une stabilité chimique élevée ayant une pureté de 99% d'alumine. Il a divers usages; grâce à sa stabilité chimique. Il est largement utilisé dans les laboratoires, sous forme de flacons et creusets pour déposer et traiter différents échantillons, et même comme agitateurs.

En raison de ses propriétés thermiques, il est largement utilisé dans les procédés à haute température. Dans les hauts fourneaux, il peut être utilisé comme plaques de transport de pièces, poussoirs, rouleaux et même guides. Egalement dans ces fours, ils peuvent être utilisés comme panneaux isolants afin de ne pas laisser la chaleur s'en échapper. Aussi, il est utilisé dans différents domaines tel que: les capteurs, technique médicale, appareillage et construction mécanique, technologie des microsystemes et génie chimique et des procédés. Pour tester la surface de cet échantillon, on a projeté les franges de moiré sur sa surface. Les franges obtenues se sont présentées rectilignes et parallèles aucune anomalie détectée (figure 3.41), car la surface testée est uniformément plate et de bonne qualité. Ses franges ont de même structure que les franges de moiré du miroir optique plan qui a un état de surface de bonne qualité dont le défaut de planéité est inférieur à  $\lambda/2$  (figure3.42).



**Figure 3.40.** Échantillon en céramique



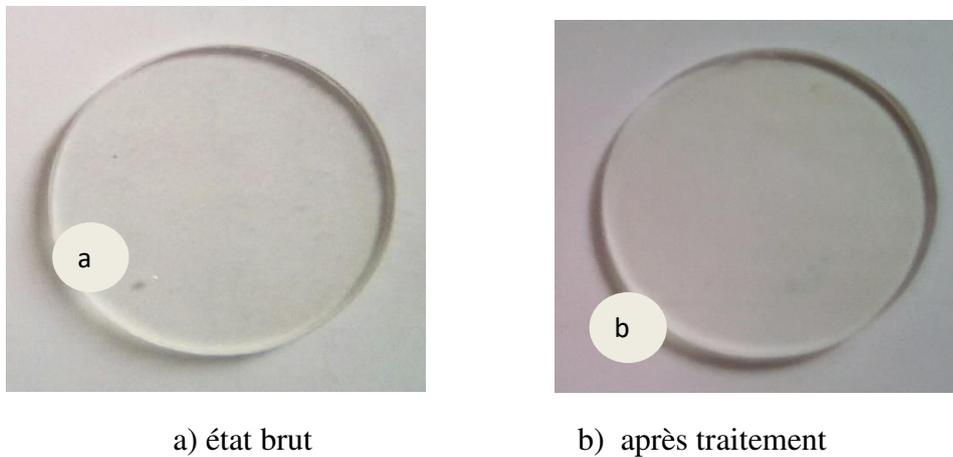
**Figure 3.41.** Franges de moiré projetées sur la surface d'un échantillon en céramique



**Figure 3.42.** Franges de moiré du miroir optique plan

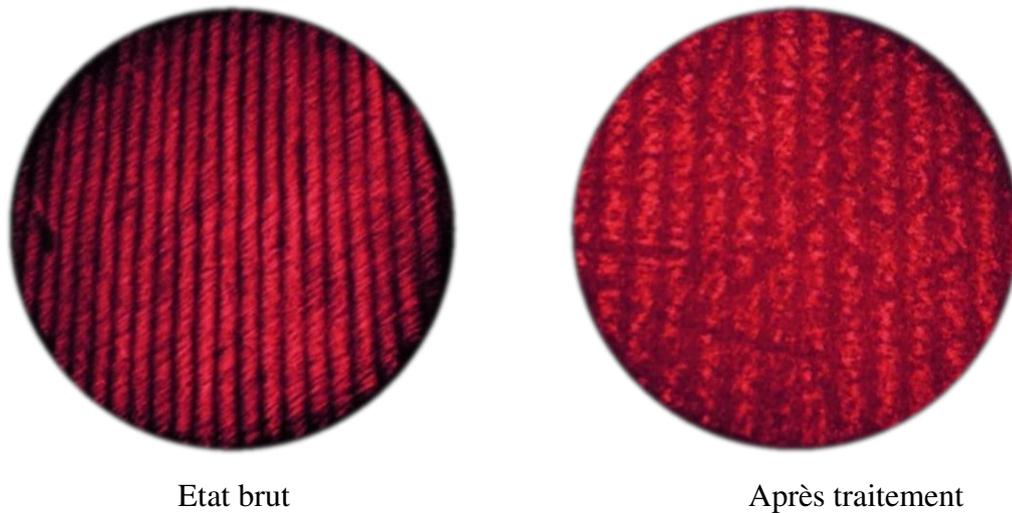
- Cas de deux lames circulaires à faces parallèles en polymère à différents état de surface.

Dans ce cas on a testé deux échantillons qui sont deux lames circulaires à faces parallèles en polymère. Ils ont été élaborés à partir de moulage par injection. Le premier échantillon est à l'état brut (figure 3.43a), le deuxième échantillon a subi un traitement de surface qui sont des opérations de doucissage (figure 3.43b). Des grains abrasifs d'alumine ( $Al_2O_3$ ) de grosseur décroissante (F80, F10 et F1) ont été employés en trois phases (doucissage grossier, moyen et fin) en employant la succession des fractions F80, F10 et F1 respectivement. L'opération a été effectuée pendant douze (12) minutes pour chaque fraction ayant différents états de surface.



**Figure 3.43.** Deux lames circulaires à faces parallèles en polymère

La figure 3.44 présente les franges de moiré des deux lames illustrées respectivement par la figure 3.43, on visualise que ces franges sont détériorées dans leur structure. On constate que les franges de la surface de la lame à l'état brut ont une bonne structure mieux que celle des franges de la surface de la lame après traitement, ce qui confirme que l'état de surface de la lame à l'état brut est mieux que celui de lame après traitement; alors on peut conclure que le traitement de la surface du deuxième échantillon n'est pas approprié, il faut donc prévoir et envisager un autre traitement plus adéquat.

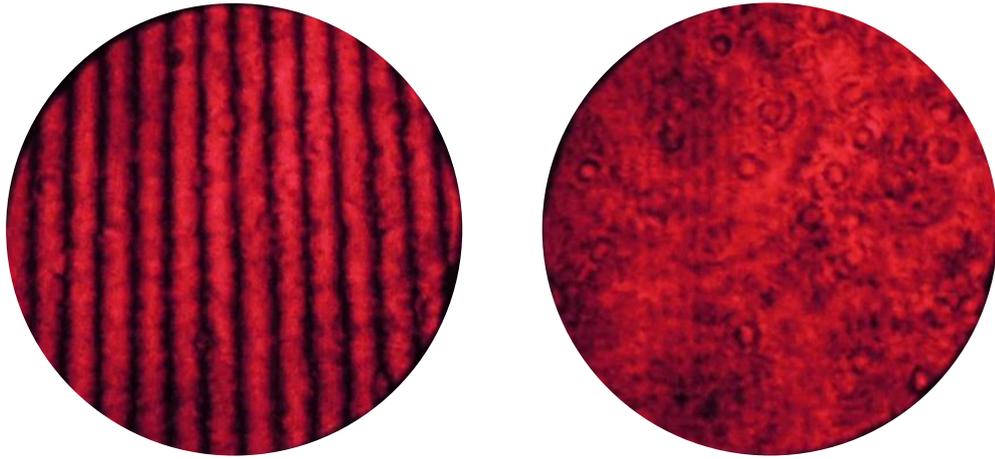


**Figure 3.44.** Franges de moiré de la surface de deux lames circulaires à faces parallèles en polymère

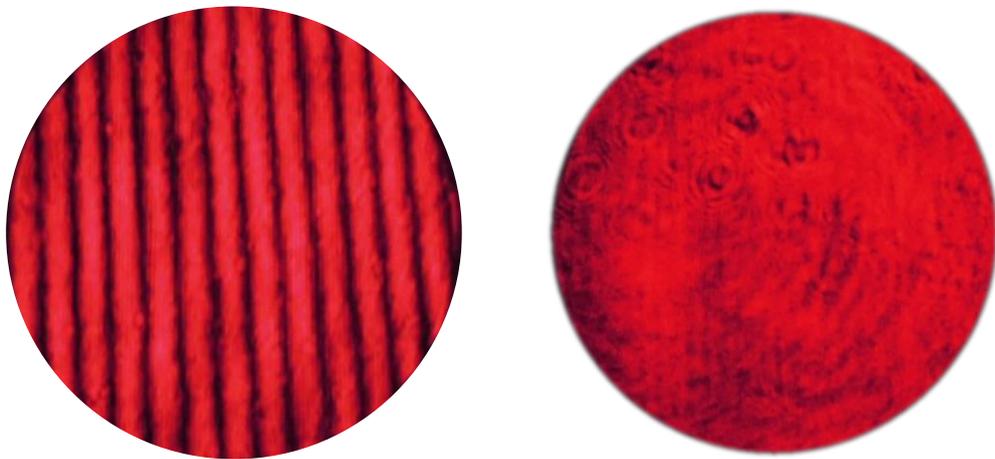
- Détection de retouche locale avec le doigt sur la surface à inspecter

Nous avons appliqué une retouche avec le doigt sur la surface d'une lame de verre, nous avons obtenu ses franges de moiré selon l'ordre central (figure 3.45a), et selon l'ordre +1 (figure 3.45b)

On remarque que suivant l'information détectée par chaque ordre, les franges de moiré ont emprunté l'information acquise sur la surface inspectée, alors chaque ordre a donné l'information sur la retouche locale du doigt; ce qui permet donc d'approfondir la détection de l'information sur la surface à contrôler.



**a) Franges de moiré données par l'ordre central**

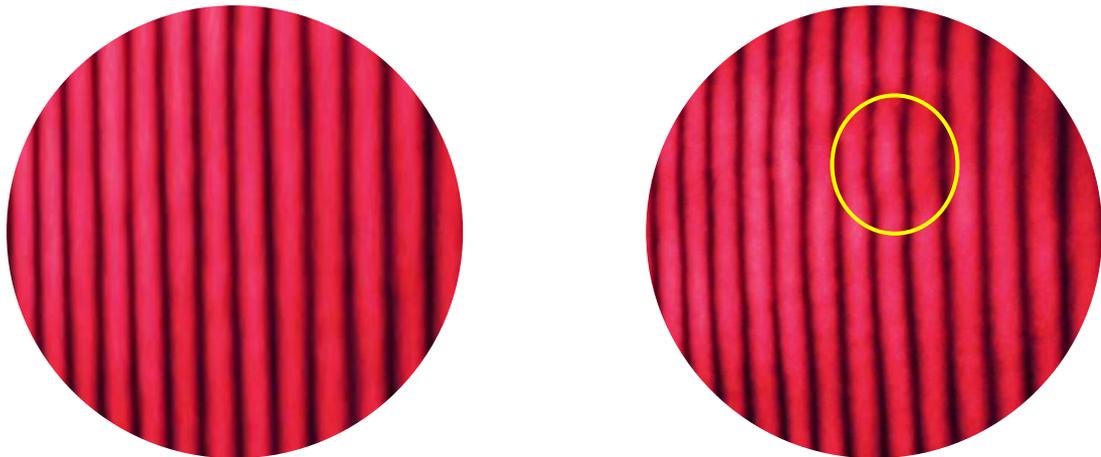


**b) Franges obtenues par l'ordre +1**

**Figure 3.45.** Détection par deux ordres (central et +1) du retouche locale du doigt sur la surface inspectée d'une lame de verre

### *3.5.11. Mesure des défauts de formes*

La figure 3.46 présente les franges de moiré d'une surface réfléchissante. La figure 3.46a montre les franges de moiré de la surface sans défauts détectés, et la figure 3.46b présente les franges de moiré de la surface avec défaut détecté dont on déterminera l'amplitude. Alors une procédure de calcul est établie pour quantifier cette déformation.



a) Surface sans défauts détectés

b) Surface avec défaut détecté

**Figure 3.46.** Franges de moiré par amplification de sensibilité

En se référant à l'équation 3.2 alors elle s'écrit comme suit :

$$d_p = \frac{M \cdot p}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (3.4)$$

Avec **M** : grossissement des franges de moiré;

**p** : pas du réseau ;

**θ** : angle entre les deux réseaux ;

**d<sub>p</sub>** : est l'interfrange (pas) des franges de moiré projetées sur le plan d'observation.

On considère le déplacement **Δh** [7] des franges de moiré mesuré sur la figure de moiré est :

$$\Delta h = \frac{D_d - d_p}{M} \quad (3.5)$$

Où, **D<sub>d</sub>** est l'interfrange (pas) des franges de moiré déformées projetées sur le plan d'observation.

Sachant que le déplacement d'une distance sur l'objet qui est équivalent au pas du réseau, provoque un déplacement des franges de moiré de **d<sub>p</sub>**, donc le déplacement réel **ΔY** [7] des lignes sur l'objet est défini par l'équation suivante :

$$\Delta Y = \frac{p \cdot \Delta h}{d_p} \quad (3.6)$$

On peut aussi écrire  $\Delta Y$  sous la forme :

$$\Delta Y = \frac{\Delta h}{M} 2 \sin \frac{\theta}{2} \quad (3.7)$$

On peut calculer l'incertitude de mesure sur  $\Delta Y$  pour déterminer la plage probable dans laquelle peut se trouver la vraie valeur.

Donc l'incertitude de mesure sur  $\Delta Y$  peut être déterminée par [107] :

$$d\Delta Y = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial \Delta Y}{\partial \Delta h}\right|\right)^2 (d\Delta h)^2 + \left(\left|\frac{\partial \Delta Y}{\partial \theta}\right|\right)^2 (d\theta)^2 + \left(\left|\frac{\partial \Delta Y}{\partial M}\right|\right)^2 (dM)^2} \quad (3.8)$$

Si :  $d\Delta h = \pm 0.001 \text{ mm}$ ,  $d\theta = \pm 0.01^\circ$  et  $dM = \pm 1\%$ ,

Dans ce cas de la figure 3.46, la détection de défaut est de  $200.10^{-9} \text{ m}$ , à une incertitude de mesure de  $15.10^{-9} \text{ m}$ .

### 3.6. Effet du bruit sur les franges de moiré

#### 3.6.1. Détection et localisation du défaut

L'une des difficultés majeures rencontrée au cours de cette étude on a constaté que les images prises des franges de moiré obtenues sont affectées par la présence de bruit qui réduit effectivement la précision de mesure, c'est un problème gênant qui se manifeste. D'autre part le bruit est le signal aléatoire provenant du système de l'environnement, et lorsque le niveau du bruit est élevé il en résulte de difficulté qui influe sur l'information cumulée par les franges sur la surface à contrôler. Il est intéressant donc de trouver un compromis permettant de surpasser ce problème et de réduire le bruit et explorer la position des défauts prépondérants à la surface, alors nous avons utilisé des méthodes de débruitage qui nous permettent d'accueillir de l'information obtenue sans aucune perte de la forme des franges.

#### 3.6.2. Solution optimisée

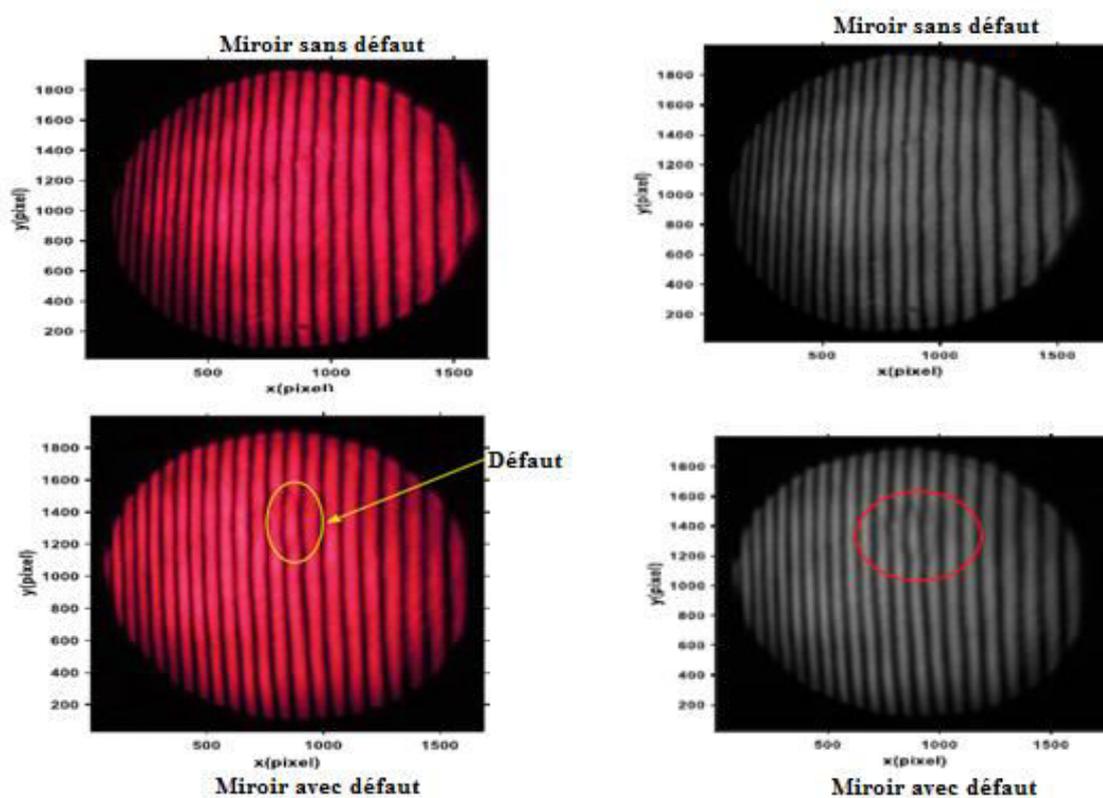
Pour résoudre le problème constaté et pour avoir l'information utile sans perte, lors de la détection et la localisation du défaut de surface à contrôler, la méthode proposée dans cette partie est appliquée dans l'étude de la planéité de la surface de deux échantillons, l'un est un miroir optique plan, et l'autre est un film transparent mince en plastique.

Les franges de moiré prises par l'appareil-photo contiennent un bruit excessif. La présence du bruit dominant les franges obtenues nous a orienté à le réduire en appliquant des méthodes de

débruitage pour que nous puissions explorer la position des défauts présents à la surface ( travail de l'article publié) [108]. C'est pourquoi nous avons proposé d'employer la méthode de la décomposition en mode variationnelle bidimensionnelle (2D-VMD) pour réduire le bruit aléatoire des modèles de franges et pour améliorer les profils et les images résiduelles dont nous pouvons contrôler la présence de défauts de planéité des surfaces réduites. Nous avons obtenu les résultats présentés par les figures ci-dessous.

#### ▀ miroir optique plan

La figure 3.47a présente les franges de moiré de la surface du miroir sans défaut et avec défaut respectivement. Les images de ces franges sont décomposées en utilisant la méthode 2D-VMD on obtient les franges débruitées figure 3.47b.



a) Franges de moiré bruitées

b) Franges de moiré débruitées

**Figure 3.47.** Franges de moiré de la surface du miroir optique plan

La figure 3.48 présente le signal de profil du miroir sans défaut dont la figure 3.48a présente le profil de l'image d'origine, la figure 3.48b montre le profil de l'image débruitée, la figure 3.48c présente le profil de la troisième image secondaire IMF (Intrinsic Mode Function); de même que la figure 3.49 présente le signal de profil du miroir avec défaut, la

figure 3.49a présente le profil de l'image d'origine, la figure 3.49b montre le profil de l'image débruitée, la figure 3.49c présente le profil de la troisième IMF.

Les figures (3.48 et 3.49) donnent le profil (à 1024 lignes) de l'image originale, l'image débruitée et le profil du troisième IMF, ce profil a la même forme que les deux autres profils, mais il n'a pas la même valeur moyenne puisqu'on a obtenu IMF's à toujours une valeur moyenne nulle. De ces figures, nous pouvons voir que l'amplitude de crête à crête du profil débruité est inférieure à celle du profil bruité puisque nous avons enlevé la partie de l'image correspondant au bruit. Nous avons également remarqué que nous ne pouvons pas examiner directement l'existence d'un défaut de ces profils. Pour observer le défaut, beaucoup de méthodes existent. Dans ce cas-ci, nous devons déterminer plusieurs profils pour différentes sections. Cette solution n'est pas précise car elle fournit des informations sur la présence de défaut et ne peut pas donner la position et la taille du défaut. La deuxième méthode, qui est plus pratique et elle indique la position, la forme et la taille du défaut dans deux dimensions, c'est la méthode qui est basée sur le calcul de l'image résiduelle obtenue en soustrayant l'image correspondante à la surface du miroir sans défaut de l'image correspondante avec défaut.

La figure 3.50 montre les images résiduelles obtenues par l'utilisation de trois manières différentes, la première en employant les images bruitées, la seconde des images débruitées, et en fin en employant juste la troisième IMF. Nous pouvons voir que l'image résiduelle obtenue en employant le troisième IMF contient plus de détail que les deux images précédentes.

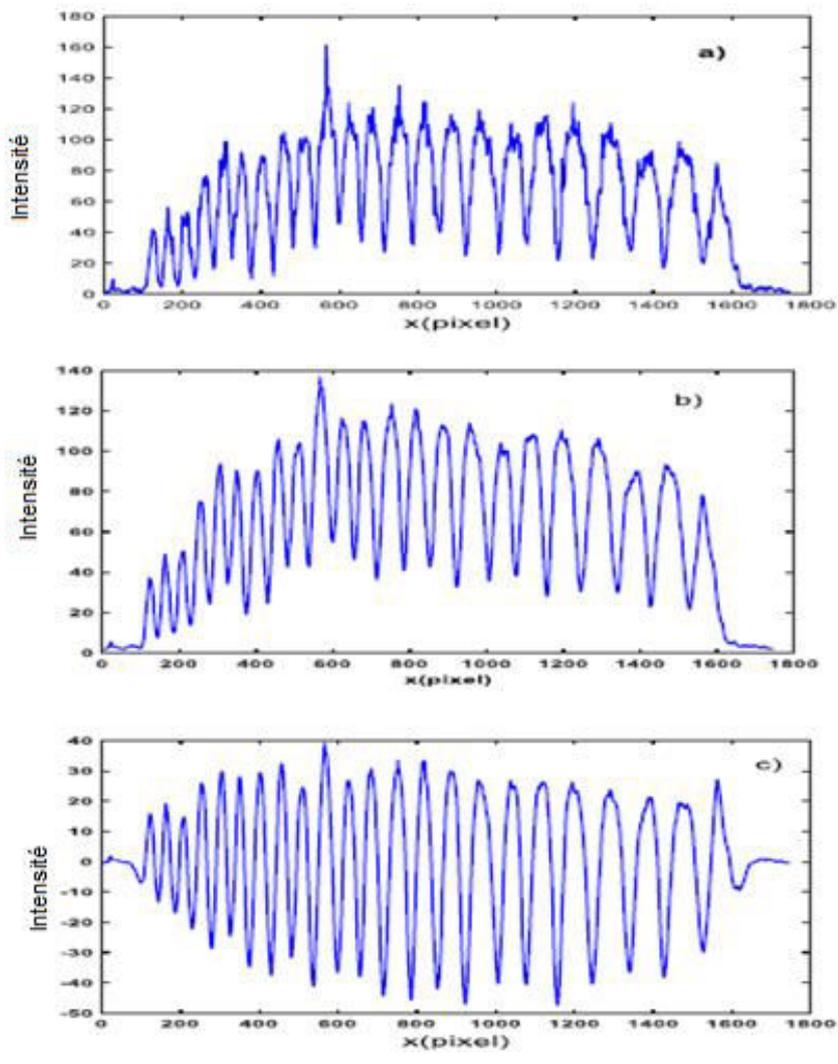


Figure 3.48. Signal du profil pour le miroir sans défaut

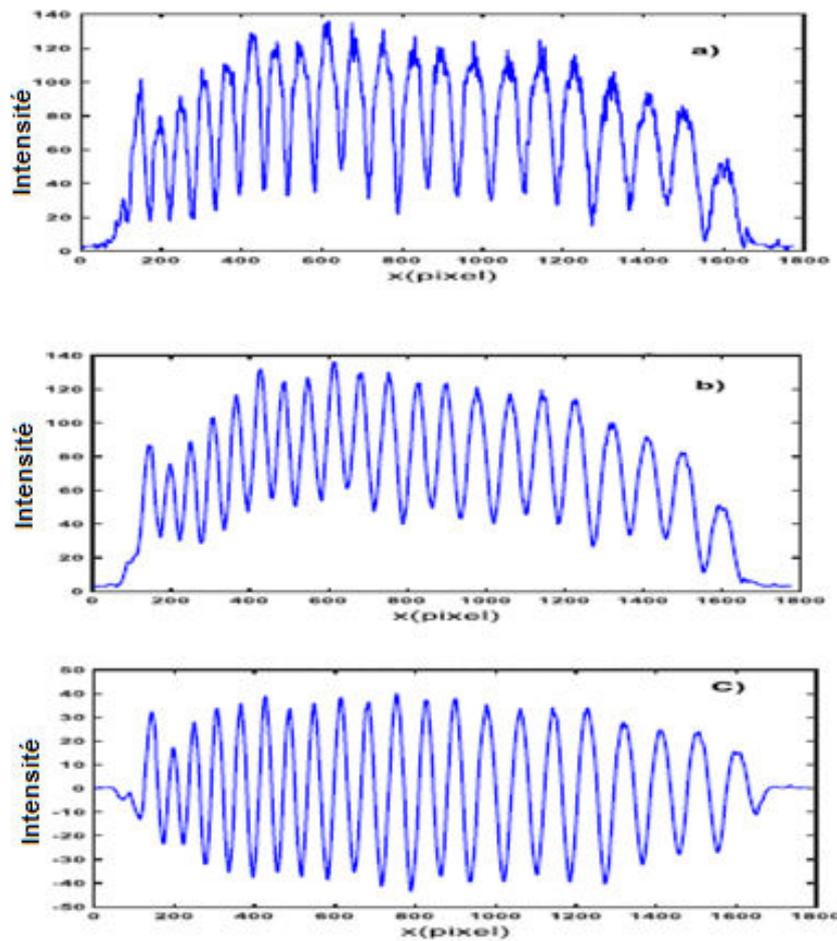
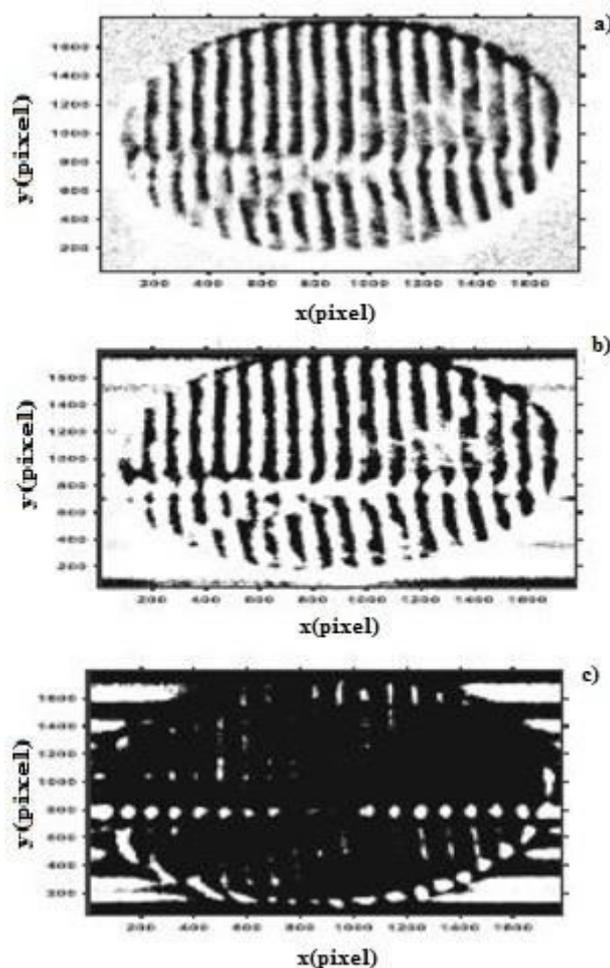


Figure 3.49. Signal du profil pour le miroir avec défaut



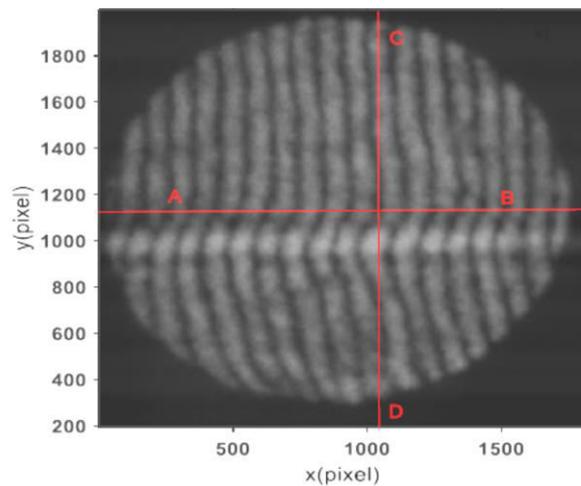
**Figure 3.50.** Images résiduelles obtenues par trois manières différentes :  
a) image bruitée, b) image débruitée, c) image IMF3

▀ Film transparent mince en plastique

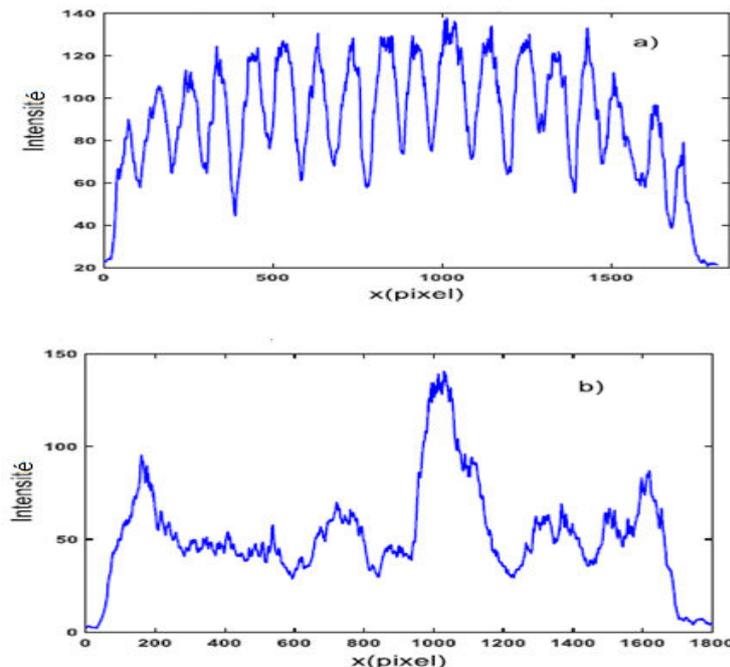
La figure 3.51 présente les franges de moiré débruitées, de la surface du film transparent mince en plastique avec défaut.

Pour détecter la position du défaut et déterminer sa taille nous devons dessiner plusieurs profils pour différentes sections, dans ce cas-ci, nous avons dessiné les lignes horizontale et verticale (figure 3.51). D'après la figure 3.52a le profil horizontal montre que le bruit est très bas mais on ne peut pas voir le défaut de ce profil. Cependant, le profil vertical (figure 3.52b) fournit l'information sur la position du défaut ; qui est entre 1000 et 1200 Pixel. Cette méthode n'est pas précise et ne prend pas beaucoup de temps. C'est la raison pour laquelle, nous avons choisi d'utiliser l'image résiduelle (figure 3.53). Cette figure montre les images résiduelles calculées en utilisant : les images bruitées (figure 3.53a), les images débruitées (figure 3.53b) et juste la troisième IMF qui a le coefficient de corrélation plus élevé (figure 3.53c). Nous pouvons voir que nous ne pouvons pas employer l'image résiduelle bruitée dans

la détection du défaut parce que l'image est très bruitée. La deuxième image résiduelle obtenue donne quelques informations sur le défaut, mais la troisième image résiduelle obtenue en employant seulement l'IMFs qui ont le coefficient de corrélation plus élevé, elle contient plus de détail et fournit de meilleures informations sur le défaut puisque le défaut est isolé, sa position et sa taille peuvent être facilement calculées. De ces résultats on peut voir que la méthode débruitage (denoising) suggérée est très utile pour enlever le bruit dans les franges de moiré. Il peut également être vu que la structure des franges a été préservée et la forme de défaut est clairement observée.



**Figure 3.51.** Franges de moiré débruitées pour le plastique avec défaut



**Figure 3.52.** Profil pour le plastique avec défaut

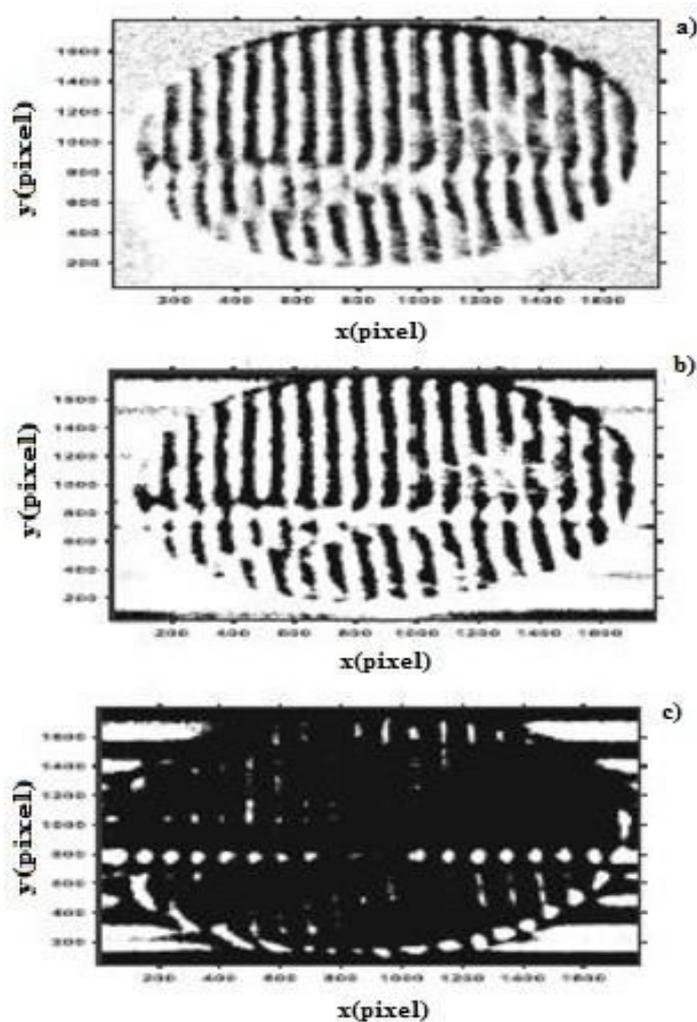


Figure 3.53. Images Résiduelles du film en plastique transparent mince avec défaut

### 3.7. Interprétations des résultats

D'après les résultats trouvés nous avons pu localiser et détecter les défauts de surface des échantillons contrôlés, en effet les franges de moiré produisent de l'information sur la déformation détectée, et donnent pour chaque surface sa propre topographie qui se diffère d'un échantillon à un autre. L'information acquise permet d'envisager d'améliorer le procédé de fabrication et les paramètres afin d'éviter d'éventuels influences sur la qualité du produit.

Les franges acquises ont donné des résultats satisfaisants malgré que ces franges sont affectées par la présence de bruit qui réduit effectivement la précision de mesure. D'autre part le bruit est un signal aléatoire dû au bruit provenant du système de l'environnement, et lorsque le niveau du bruit est élevé il en résulte de difficulté qui influe sur l'information

cumulée par les franges sur la surface à contrôler. Afin de surpasser ce problème et de réduire le bruit et explorer la position des défauts prépondérants à la surface c'est le sujet traité par l'article publié [108], nous avons utilisé trois méthodes de débruitage qui nous permettent d'accueillir de l'information obtenue sans aucune perte. La méthode basée sur 2D-VMD bi-dimensionnel, décompose l'image de référence en images secondaires ou IMFs et peut réduire le bruit sans perdre l'information que comporte les franges de moiré. Les résultats obtenus en employant la méthode 2D-VMD tout en préservant des arrangements des franges sans perdre l'information sur les défauts de planéité de la surface examinée ont permis d'observer que le bruit peut changer sa grandeur d'une surface en plastique (surface transparente) en une autre surface optique (le miroir optique plan).

### **3.8. Conclusion**

Dans ce chapitre le problème posait était de déduire les figures de moiré à partir de la superposition des structures microscopiques (réseaux), nous avons donc contrôlé des surfaces à tailles réduites afin de mettre en évidence d'éventuels défauts présents à travers les figures de moiré c'est à dire franges de moiré; nous avons seulement voulu illustrer, avec un montage simple la possibilité d'effectuer des contrôles de qualité de surface.

La différenciation entre différentes surfaces à travers la déformation de la forme de franges de moiré, est matérialisée par la déformation de l'image du réseau test R1. Cette déformation reproduit la présence des défauts de surface et qui sont détectés d'une manière non destructive et sans contact, sans atteindre l'intégrité de la surface de l'objet examiné. L'intérêt des tests nous a permis de conclure que toujours avec le montage expérimental décrit ci-dessus, on a été effectué des contrôles d'états surfaces variés, les surfaces planes, réfléchissantes, transparentes etc...

D'autres montages sont possibles puisque c'est un montage de précision qui permet l'utilisation simultanée des réseaux à hautes fréquences spatiales et la technique de multiplication de franges de moiré, ce qui permet d'augmenter la sensibilité de détection et d'accroître la résolution de détection du système de contrôle. Le dispositif expérimental utilisé présente deux caractéristiques qui constituent à la fois la nouveauté et la difficulté dans la procédure de détection des défauts des surfaces.

# *Conclusion*



# Conclusion générale

---

Notre étude s'inscrit dans le cadre de la mouvance actuelle pour le développement des méthodes non destructives et sans contact, ainsi que dans le cadre de la recherche des propriétés de l'état de surface fonctionnelle des composants optiques et mécaniques.

Le développement de méthodes appropriées pour le contrôle de distorsions, défauts de formes et de planéité des surfaces de précision, nécessite des techniques de plus en plus performantes, car les procédés actuels d'usinage sont d'une précision très élevée.

La technique de contrôle que nous proposons dans cette thèse est basée sur la technique de moiré, en effet, cette méthode 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 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.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, les structures des franges de moiré obtenues reflètent dans chaque cas la topographie de la surface inspectée. L'application de la technique de moiré mise au point dans cette thèse montre clairement sa performance de détection des anomalies de la surface contrôlée, de localiser en même temps des défauts de surface selon leurs dispositions et leurs importances.

Quoi que nous sommes confrontés à la présence de bruit influençant les franges de moiré obtenues ce qui nous a orientés à le réduire en appliquant la méthode de débruitage, qui nous a permis l'exploration de la position des défauts prépondérants de la surface. Ce problème est un avantage pour la technique, il est considéré comme un facteur de plus influençant les franges de moiré lors de la détection des défauts.

L'utilisation de ce montage expérimental permet d'inspecter des surfaces qui peuvent être de quelques mm<sup>2</sup>. 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 non destructif et sans contact peut être utilisée avantageusement pour mesurer les déformations générées par des contraintes sur des

microcomposants, et déterminer l'influence fonctionnelle, de ces variations sur la fonction. Elle peut être également utilisée pour le contrôle dimensionnel, lorsqu'il s'agit, par exemple, de quantifier l'erreur de forme pour savoir si un objet est accepté ou refusé. En effet, il suffit alors de comparer une figure de franges de moiré adaptée à une norme donnée, de sorte que le système de franges de moiré soit formé de lignes droites parallèles équidistantes. Cette figure de moiré est préalablement enregistrée, ce qui est très facile à utiliser pour tester la conformité de l'objet à la norme, puisqu'il suffit de vérifier si le contour des franges est conforme ou non au contour des franges de la norme, ce qui représente un gain de précision, de temps et d'argent.

Pour une éventuelle suite de ce travail, il reste néanmoins de nombreux défis technologiques à relever, nous préconisons dans un premier temps d'approfondir la recherche dans ce domaine pour les industriels afin de leur permettre de résoudre certains problèmes rencontrés en ligne de production.

L'application de la technique de moiré s'améliore de plus en plus en lui accordant des appoints technologiques qui lui permettent d'affranchir et de résoudre les problèmes selon le domaine approprié et suivant le but à atteindre.

# Bibliographie



# Bibliographie

- [1] Laboratoire Scientifique au Service des Industriels, 2015.  
<https://www.labratoire.com> ».Pdf AKCEM PDF Français-laboratoire.com.
- [2] **Kuhn, E.**, Contrôle non destructif d'un matériau excité par une onde acoustique ou thermique. observation par thermographie, thèse de doctorat, université Paris ouest nanterre la defense, le 6 décembre 2013.
- [3] **Bouchareine, P.**, Métrologie des surfaces, technique de l'ingénieur, pp.1-15, R1390, 10 septembre 1999.
- [4] **Bourbia, M., Laouar L., et khelf, I.**, Procédés d'Elaboration de Surfaces - Effets sur un Contact Mécanique, Congrès Algérien de Mécanique Guelma, 14-17 Novembre 2011.
- [5] **Sales. Ch.**, Application de la méthode du moiré à la mesure des déformations sur le matériau bois, revue bois et forêt des tropiques , n°173, mai juin 1977.
- [6] **Surrel, Y.**, Moiré et déflectométrie, CNRS Atelier Photomécanique, Saint -Etienne, 6-12 juillet 2004.
- [7] **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.
- [8] **Brémand, F., Cottron, M., Doumalin, P., Dupré, J-Ch., Germaneau, A., Valle,V.**, Moiré mesures en mécanique par méthodes optiques, technique de l'ingénieur, R1850v2, 10 juin2011.
- [9] <http://the-print-guide.blogspot.com/2009/12/moire.html>
- [10] **Moulart, R.**, développement et mise en œuvre d'une méthode de mesure de champs de déformation à l'échelle micrométrique, thèse de doctorat, École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur, 06 décembre 2007.
- [11] **Harthong, J.**, Moiré, Advances In Applied Mathematics 2, pp24-75, 1981.
- [12] **Post, D, Han, B., Ifju, P.**, High Sensitivity Moiré © 1994 Springer-Verlag New York, Inc. 1st edition 1994.
- [13] **Oster, G.**, The Science Of Moiré Patterns, Edmund Scientific CO, Barrington, New Jersey, Copyright 1964.
- [14] <http://www.mathkang'cite> pdf les moiré 9 pages, Mirifiques et mirobolants moirés, © 2002, ACL -Les éditions du kangourou.

- [15] **Janin, G.**, Le moiré: figures et applications scientifiques, conférence PPT , A.L.S. NANCY, 14 -06-2018. <http://als.univ-lorraine.fr>filesPPT> LE MOIRE:FIGURES ET APPLICATIONS SCIENTIFIQUES
- [16] **Viens, M., prof.MEC-743** Instrumentation et contrôle de procédés industriels 03 – Mesure de déformation, distance et position15.pdf, Département de génie mécanique.
- [17] **Collet, J-P., Marasco Jo., Pflug, Lé.**, Le moiré d'ombre: une méthode expérimentale et ses possibilités, Bulletin technique de la Suisse romande, pp.179 -187,1974.
- [18] **Gabrielyan, E.**, Moiré pointer for measurement instruments, 6696-105 V.1, pp1-24, spie, 8/7/2007. <https://docs.switzernet.com/people/emin-gabrielyan/070808-spie-moire-pointer/070807-spie-paper-6696-105.pdf>
- [19] **Weil, F.**, Optique physique, ellipses editions Marketing S.A, pp.116-117, 2005.
- [20] **Benson, H., Lachance, M., Séguin, M., Villeneuve, B., Marcheterre B.**, Chapitre 7 : optique ondulatoire, Ondes, Optique Et Physique Moderne, 5<sup>ième</sup> édition (ERPI), canada, 2016.
- [21] **Degrieck, J., and Verleysen, P.**, Determination of Impact Parameters by Optical Measurement of the Impactor Displacement, Experimental Mechanics, Vol. 42, No. 3, pp.298-302, September 2002.
- [22] **Sylvain, H.**, Optique : une approche expérimentale et pratique, Groupe Doeck SA , juin 2011.
- [23] <http://olivier.granier.free.fr>.pdf> <https://ressources.unisciel.f>...pdf> [etude des réseaux de diffraction \(pc\\*\)-olivier...](http://olivier.granier.free.fr>.pdf)
- [24] **Sirohi, Radjpal S.**, Chapter 9: The moiré Phenomenon, Optical methods of measurement wholefield techniques, 2 nd ed.CRC Press Taylor & Francis Group Boca London New York, 2009.
- [25] **Durelli, A. J., and Parks, V. J.**, Moiré Fringes as Parametric Curves, Experimental Mechanics, pp.97- 104, March 1967.
- [26] **Gasvik, Kjell J.**, Chapter 7: Moiré Methods. Triangulation, Optical Metrology, John Wiley & Sons Ltd, third edition copyright ©2002.
- [27] **Masters, Barry R.**, Ernst Abbe and the Foundation of Scientific Microscopes, OPN February 2007.
- [28] cours de physique : diffraction/optique de Fourier (1/3)-youtube youtube.com, 26mars 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=c5z5mktth-w>.
- [29] **Giacobino, E.**, Optique cohérente traitement optique de l'information, page16, A1085, Technique de l'ingénieur.

- [30] Réseau plan,  
<http://ressources.univ-lemans.fr/accesLibre/UM/Pedago/physique/02/optiondu/reseau.html>  
 mise à jour 13 août 2019.
- [31] **Perrochet, J.-F.**, Etude de Franges de Moiré en vue d'une application en ophtalmologie, Now. Rev. Optique, t. 4, n° 3, pp.137-145, 1973,
- [32] **Sciammarella, Cesar A.**, The Moiré Method—A Review, Experimental Mechanics, pp.418- 433, November 1982.
- [33] **Hecht, E.**, Chapitre 13: Optique modern: lasers et autres sujets, Optique, Pearson Education France , Copyright ©2005.
- [34] <http://fjehin.free.fr> DOCPDF DIFFRACTION-filtrage –traitement d'images, 13/10/05.
- [35] <https://docplayer.fr> LP GPI métrologie et contrôle qualité TD3– 14/11/08 PLAN DE TRAVAIL TD3.
- [36] **Zhaoyang, W., Fulong, D., Xiaolin, J.**, High Resolution, High Sensitivity Moiré Method, ACTA MECHANICA SINICA (English Series), The Vol.15, No.2, May 1999, Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics Chinese Journal of Mechanics Press, Beijing, China Alierton Press, INC., New York, U.S.A.
- [37] **Taillet, R.**, Optique Physique, Edition De Boeck et Larcier s.a, 2006.
- [38] **Möller, K.D., et Belorgeot, C.**, Cours d'optique Simulations et exercices résolus avec Maple®, Matlab®, Mathematica®, Mathcad® © Springer-Verlag France, Paris, 2007.
- [39] **Guillaud, P.**, Microscopie Photonique Principes et Applications, M2 Informatique – Imagerie –IBIO- Université Pierre et Marie Curie –Paris6, 2010.
- [40] **Gabet, Re.**, Cours COM101 Optique et Photonique 1ère année Filière par apprentissage / TSI, Telecom ParisTech, 2016\_2017.
- [41] **Cloud, Gary L.**, Simple Optical Processing of Moiré-grating Photographs, Experimental Mechanics, 1980.
- [42] **Ebbeni, J.**, Nouveaux Aspects Du Phénomène De Moiré, Nouv. Rev. d'Optique Appliquée, 1, n° 5; pp.333-342, 1970.
- [43] **Deckers, Ch.**, Etude De L'influence De La Cohérence Partielle Sur Le Phénomène De Moiré, Nou. Rev. Optique., t. 6, n° 4, pp.197-202, 1975.
- [44] **Asundi, A.K.**, Chapter4.Moiré methods, Matlab® for Photomechanics a primer, Elsevier, 2002.
- [45] **Graham, S.M., and Sanford, R.J.**, The Influence of Grating Characteristics on Moiré Fringe Multiplication, Experimental Mechanics, pp.329-335, 1987.

- [46] **Baumlin, J. M.**, Topographie Moiré Par Modulation De Phase, J. Optics (Paris), vol. 17, n° 2, pp.77-80, 1986.
- [47] **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.  
<http://www.intechopen.com/books/recent-advances-in-scoliosis/moir-topography-from-takasaki-till-present-day>
- [48] **Yu,W.M., Harlock, S.C., Leaf, G.A.V., Yeung, K.W.**, Instrumental Design For Capturing Three-Dimensional Moiré Images, International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 9, Iss: 4, pp.301-310, 1997.
- [49] **Reid, G.T., Rixon, R.C., Messer, H.I.**, Absolute And Comparative Measurements Of Three Dimensional Shape By Phase Measuring Moiré Topography, Optics and Laser Technology, pp.315-319, December 1984.
- [50] **Quan, C., Fu, Y., Tay, C.J.**, Determination of surface contour by temporal analysis of shadow moiré fringes, Optics Communications 230, pp.23-33, 2004.
- [51] Les étudiants : **Zhang, K., LIU, Lihao., Obada, D., El Haddioui, Adil.**, Enseignant-responsable du projet : **Ioana NISTEA**, Mesure Optique Par Moiré De Projection, projet de physique p6-3 STPI/P6- 3/2010 – 017.
- [52] <https://tpelajoconde.skyrock.com/711859610-technique-du-moire-d-ombre.html>.  
 26 janvier 2007.
- [53] **Paveleva, D., and Antal, Á.**, Projection colour moiré technique for 3d surface reconstruction, Periodica Polytechnica ser. mech. eng. vol. 50, no. 2, pp. 115-123, 2006.
- [54] **Asundi, A.**, Novel Techniques in Reflection Moiré, Experimental Mechanics, pp.230-242, September 1994.
- [55] **Post, D .,** Moiré Interferometry at VPI & SU, Experimental Mechanics, Vol.23, pp.203-210, june 1983.
- [56] **Gungor, S.**, Moiré Interferometry for strain measurement, Materials Engineering, Web Moiré Interferometry for strain measurement-open University.  
[http://materials.open.ac.uk/staff/staff\\_sg.htm](http://materials.open.ac.uk/staff/staff_sg.htm).
- [57] Département de Génie Mécanique, Chapitre 1 : Introduction à l'analyse expérimentale des contraintes mec 6405, Analyse Expérimentale des contraintes, Automne 2012.
- [58] **Rivers, N.**, An Investigation of BGA Electronic Packaging Moiré Interferometry, Graduate Theses and Dissertations. University of South Florida 3-21-2003.
- [59] **Cadoret, G.**, Nouvelle méthode permettant d'un moiré holographique expérimentale du premier ordre (Application de l'interférométrie par holographie à l'étude des plaques), matériaux et constructions, Vol.9, pp.33-42, 1976.

- [60] **Patil, A., Langoju, R., and Rastogi, P.,** Constraints in dual phase shifting Interferometry, / Vol. 14, No. 1 / optics express 88, 9 January 2006.
- [61] **Takasaki, H.,** Moiré Topography, Japan. J.appl.Phys. 14 Suppl. 1-14, pp.441-446, 1975.
- [62] **Jensen, Martin F., Christensen, Leif H., Prichystal, J., Kjeldsteen, P., Benzon M. E.,** Evaluation de la topographie 3D des surfaces mécaniques.  
<http://docplayer.org/9275384-cha...charakterisierung-der3D-Topographie-technischer...>
- [63] **Dupont, F.,** Aspects microstructural et mécanique des surfaces usinées en alliages d'aluminium 2024 et 7075, thèse de doctorat en sciences techniques N° 723, Lausanne, EPFL, 1988.
- [64] **Raphet, B.,** États de surface – Mesure topographie chap2, technique de l'ingénieur Référence R1231, 10 juin 2006.
- [65] <http://www.polytec.com/fr/solutions/topographie-de-surface-3d/> © 2014 Polytec GmbH Waldbronn.
- [66] **Choquet, O.,** Techniques De Contrôle D'aspect De Surfaces, Conservatoire National Des Arts Et Metiers ; Centre De Paris Rapport De Probatoire, Soutenu le 30 mai 2002.
- [67] **Zani-Demange, Marie-Line.,** Métrologie optique La mesure d'états de surface sans contact, MESURES 834 ,pp.60-68, avril 2011.
- [68] **Sherrington, I.,** Modern measurement techniques in surface metrology: part II; optical instruments Wear, 125 pp.289-308, 1988.
- [69] **Grandjean, J., Ledoux, Y., Samper, S.,** Analyse des assemblages avec défauts de forme des surfaces Approche théorique et expérimentale, 21ème Congrès Français de Mécanique Bordeaux, 26 au 30 août 2013.
- [70] [file:///MICROSCOPE A FORCE ATOMIQUE.htm](file:///MICROSCOPE%20A%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).
- [71] **Humblot, V., Landoulsi J.,** Microscopie AFM-laboratoire de Réactivité de surface, 04juin 2014. mise à jour 10/04/2018.  
<http://www.Irs.upmc.fr/fr/l-unite-de-recherche/Plateforme-technique/microscopie-afm.html>.
- [72] <http://sti.mermoz.free.fr/...PDF> TRIANGULATION 1 partie : PSD-Mise en œuvre des systèmes.
- [73]Système de mesure topographique : Triangulation Par Capteur CCD 2009.  
<http://françois.jehin.pagespersorange.fr/...PDF> TRIANGULATION PAR CAPTEUR CCD- Métrologie...2009

- [74] **Artigas, Roger., Sensofar-Tech S.L**, Le Premier Microscope Double Coeur Associant Technologie Confocale Et Interférométrie, résolution, Num. 02, Nov 2008.  
[www.leica-microsystems.com](http://www.leica-microsystems.com).
- [75] Rhopoint instruments,Optimap™ PSD, <http://www.rhopointinstruments.com>, 01/2014 .
- [76] Caractérisation\_fare.pdf, Unité de caractérisation des matériaux et surfaces. **Materia Nova** : Centre de recherche spécialisé dans le développement et l'étude des nouveaux matériaux. Université de Mons et de la Faculté Polytechnique de Mons, Belgique.
- [77]<https://www.laboratoire.com/fournisseur/tescan.php>. profilométrie optique 3D(PO3D), 2020.
- [78] <https://www.scientec.fr> ›Produits Profilomètre optique pour l'industrie-Scientec, 2019.
- [79] LPSI›Profilométrie. <http://hosting.umons.ac.be/php/lpsi/Laboratoire> | LPSI, Copyright ©: LPSI 2014.
- [80]<https://www.researchgate.net/figure/veeco-wyko-NT1100-optical-interferometer-researchgate>.
- [81] <http://fjehin.free.fr>. PDF microscopie interférentielle-Free.
- [82] Topographie plein champ et sans contact de films minces, 11/12/2014. [www.ouest-valorisation.fr](http://www.ouest-valorisation.fr).
- [83] **Dumont-Fillon, J.**, Contrôle Non Destructif (CND), technique de l'ingénieur, R1400 2-42, 10 janvier 1996.
- [84] **Texereau, J.**, Les Principaux Défauts Réels Des Surfaces Optiques Engendrées Par Différentes Techniques De Polissage. *Ciel et Terre*, de la Société belge d'Astronomie, de Météorologie et de Physique du Globe, Bruxelles, LXVIe année, n° 3- 4, mars -avril 1950.
- [85] **Morel,O.**, Environnement Actif Pour La Reconstruction Tridimensionnelle De Surfaces Métalliques Spéculaires Par Imagerie Polarimétrique, Thèse de doctorat, discipline instrumentation et informatique de l'image, Université de Bourgogne France, 17 Novembre 2005.
- [86] Métrologie : la tendance sur-Zeiss 2014. <https://www.zeiss.fr/downloadpdf> .
- [87]**Magazine les 50 scientifiques**, 12-Février/Mars/avril 2007-Timestriel.
- [88] **Surrel ,Y.**, Contrôle De Défauts D'aspect Et De Qualité De Surface➤la solution par la déflectométrie, contrôles-essais-mesures, pp.11-14 ➤ AVRIL 2006 ➤ .
- [89] **Cornet, A., Deville J-P.**, Chapitre2: Topographie et mécanique des surfaces, Physique et ingénierie des surfaces, EDP Sciences 1998.

- [90] **Mezghani, S.**, Approches multi-échelles de caractérisation tridimensionnelle des surfaces – Applications aux procédés d’usinage –, thèse de doctorat de l’École Centrale de Lyon, Ecole Doctorale Mécanique, Energétique, Génie civil et Acoustique (MEGA) Spécialité : Mécanique, soutenue le 27 Mai 2005.
- [91] Note de cours rédigée par : Simon Vézina Chapitre 2.2 – La réflexion et les miroirs plans, référence **Séguin, M.**, Physique XXI Volume C : ondes et physique moderne, 1<sup>ière</sup> édition.  
<https://physique.cmaisonneuve.qc.ca/...pdf> Chapitre2.2-La réflexion et les miroirs plans-Physique.
- [92] Techniques d’inspection visuelle, Copyright (c) 2008 keyence corporation.
- [93] **Viens, M.**, prof.MEC-743 Instrumentation et contrôle de procédés industriels 03 – Mesure de déformation, distance et position.pdf, Département de génie mécanique.
- [94] **Zani Demange, Marie-Line.**, Contrôle optique une autre manière de voir les défauts de surface, mesures 733, pp.73-77, mars 2001.
- [95] **Yeras, A. Moreno.**, Moiré topography in odontology, Optics and Lasers in Engineering Vol.40, pp.143–152, (2003)
- [96] **Berthier, S.**, chapitre7 : Topographie et nervation des ailes Méthodes de moiré et radiographie, Photonique des Morphos, © Springer-Verlag France, Paris, 2010.
- [97] **Shellabear, M.C., & Ronner, A.**, Integration of Projection Moiré with Coordinate Measuring Machines, W. Waidelich (ed.), *Laser in der Technik* © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1994.
- [98] **Martínez-Antón J. C., Canabal, H., Quiroga, J. A., Bernabeu, E.**, Enhancement Of Surface Inspection By Moiré Interferometry Using Flexible Reference Gratings, / Vol. 8, No. 12 / Optics Express, 4 June 2001.
- [99] **Suzuki, M., & Kanaya, M.**, Applications of Moiré Topography Measurement Methods in Industry, Optics and Lasers in Engineering, 8 pp.171-188, 1988.
- [100] **Arnaud, M.**, La Production industrielle à travers ses métiers, process et procédés spéciaux, clip industrie, 2012.
- [101] **Debondie, J-F., et Masset, L.**, Sur l’évaluation des défauts de forme à partir de mesures tridimensionnelles, Physics European Journal of Mechanical an Environmental Engineering, 1march1998
- [102] Housse plastique pour vêtements en rouleau-Sacherie, conditionnement-Raja.htm, ©2001-2013 RAJA.  
[http://www.raja.fr/is-bin/INTERSHX...Sku=M\\_HVR9\\_O\\_A4\\_117\\_F&Position='overlay\\_body','overlay'](http://www.raja.fr/is-bin/INTERSHX...Sku=M_HVR9_O_A4_117_F&Position='overlay_body','overlay'))

- [103] <http://www.aliexpress.com/item-img/Junestar-2012-new-plastic-wrap-cutter-best-solution-for-food-wrap-high-quality-Cling-Film-cutter/577628686.html>.
- [104] <http://www.polytec.com/fr/solutions/topographie-de-surface-3d/> Planeité - et – parallélisme/© 2016 Polytec GmbH Waldbronn
- [105] **Cherala, A., Im, Se-Hyuk., Meiss, M., Hussein, A., Simpson, L., Minter, Ryan., Thompson, E., Choi, J., Hiura, M., Iino, S.,** Topography and Flatness Induced Overlay Distortion Correction using Resist Drop Pattern Compensation in Nanoimprint Lithography Systems, Proc. of SPIE Vol. 10958, 28 may 2020.
- [106] **Sharma, A. K., Nigamb, D., Rana, Anand Singh.,** Photo-Masks Inspection for Defects in Integrated Circuits Using Optical Interferometer, International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM), Vol.06, Issue-09, pp.192-194, DEC 2020, DOI : 10.35291/2454-9150.2020.0729.
- [107] **Bally, F.-X., et Berroir, J.-M.,** Incertitudes expérimentales. Centre de Préparation Interuniversitaire à l'Agrégation de Physique de Montrouge Ecole Normale Supérieure, Universités Paris 6, Paris 7, Paris 11, 5 novembre 2008.
- [108] **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 journal, published online 2 April 2021. <https://doi.org/10.1007/s40799-021-00459-z>.

## Listes des Conférences

1. M.Messagier, S.Meguellati, R. Meziane, A. Gharzouli, Topographie non destructive et sans contact des surfaces par voie optique, International Conference of optics (**ICO 2013**) SETIF 21-23 Avril 2013, Algeria.
2. M.Messagier, S.Meguellati, R. Meziane, A. Gharzouli, Exploration des surfaces des matériaux par voie optique, The 4th International Conference on welding (IC-WNDT-MI'14), non Destructive Testing Materials and Alloys Industry), November 09-11, 2014, Annaba, Algeria.
3. M.Messagier, R. Meziane, A. Gharzouli, Topography of surface by optical technique, Sétif 16-17 Novembre 2014, Conférence Internationale de Mécanique et Matériaux (ICMM14), Institut d'Optique et Mécanique de Précision Université Ferhat Abbas, sétif.
4. M.Messagier, S. Meguellati, R. Meziane, A. Gharzouli, Localisation de Défaut de Surface de matériau par voie optique, 3<sup>ème</sup> conférence internationale sur la maintenance et la sécurité industrielle (**CISMI' 2015**), université du 20 AOUT 1955 de Skikda, 09 et 10 Novembre 2015, Algérie.
5. M. Messagier, S. Meguellati, R. Meziane, A. Gharzouli, Contrôle optique pour inspecter la déformation de surface, The first International Conference on Mechanical, Energy and Material Engineering (**CMEME 2015**), December 8-9 2015, Biskra, Algeria.

6. M.Messagier, S. Meguellati, R. Meziane, A.Gharzouli, Topography of Surfaces Reduced by Optical Technique, **Algeria OPAL 2015**, International Conference Optics and Photonics, Algiers (**USTHB**), December 14-15, 2015.
7. M.Messagier, S. Meguellati, L'utilisation du laser dans le contrôle de qualité de surface, International Conference of Optics (**ICO 2016**), Institut d'Optique et Mécanique de Précision, Université Ferhat Abbas Sétif1, 04-05 Décembre 2016, Algeria.
8. M.Messagier, S.Meguellati, Performances de la technique de moiré dans le contrôle de la planéité des surfaces réduites, Conférence Internationale sur la métrologie et la maintenance industrielle (**ICIMM 2018**), Institut d'Optique et Mécanique de Précision, Université Ferhat Abbas Sétif1, 28-29 octobre 2018, Algérie.
9. M.Messagier, S.Meguellati, H.Mounir, contrôle des surfaces de verre par la technique de moiré, The Third international Conference of Mechanics and Materials (**ICMM 2019**), November 11-12, 2019, Institut d'Optique et Mécanique de Précision Université Ferhat Abbas Sétif1, Algeria.
10. S.Meguellati, R. Meziane, M.Messagier, A.Gharzouli, Precision measurement of surface defects by moiré interferometry, International Conference of optics **ICO 2013 SETIF** 21-23 Avril 2013, Algeria.
11. A. Gharzouli, S.Meguellati, R. Meziane, M.Messagier, Hautes sensibilité de détection des défauts de formes sur des surfaces réduites par le moiré topographique, International Conference of Optics **ICO 2013 SETIF** 21-23 Avril 2013, Algeria.
12. R. Meziane, S.Meguellati, M.Messagier, A.Gharzouli, Détection de micro défauts sur des surfaces transparentes par le moiré interférométrique, International Conference of optics **ICO 2013 SETIF** 21-23 Avril 2013, Algeria.
13. R. Meziane, S.Meguellati, M.Messagier, A.Gharzouli, Detection of the micro defects on micro surface by the moiré effect, The second international workshop on fracture mechanics (**FRACT'2**), November 23-25, 2013 Chlef, Hassiba Ben Bouali University of Chlef, Algeria.
14. A.Gharzouli, S.Meguellati, R. Meziane, M.Messagier, Non destructive control of shape defects by moiré technique, The second international workshop on fracture mechanics (**FRACT'2**), November 23-25, 2013 Chlef, Hassiba Ben Bouali University of Chlef, Algeria.
15. A.Gharzouli, S.Meguellati, R. Meziane, M.Messagier, High Sensitivity Detection Forms By Moiré Technique, 3<sup>rd</sup> International Conference on Optics Photonics and their Applications (**ICOPA'2013**), Université des Sciences et de la Recherche Houari Boumediène, Alger 09-11 Décembre 2013.
16. R.Meziane, S.Meguellati, M.Messagier, A.Gharzouli, Control non-destructive of the transparent surface using the moiré effect, 3<sup>rd</sup> International Conference on Optics Photonics and their Applications (**ICOPA'2013**), Université des Sciences et de la Recherche Houari Boumediène, Alger 09-11 Décembre 2013.
17. R.Meziane, S.Meguellati, M.Messagier, A.Gharzouli, Using the moiré technique for measuring thickness distribution of transparent plates, 3<sup>rd</sup> International Conference on Optics Photonics and their Applications (**ICOPA'2013**), Université des Sciences et de la Recherche Houari Boumediène, Alger 09-11 Décembre 2013.

18. R.Meziane, S.Meguellati, M.Messagier, A. Gharzouli, le contrôle non destructive du verre par le moiré topographique, The 4th International Conference on welding (IC-WNDT-MI'14), non Destructive Testing Materials and Alloys Industry), November 09-11, 2014, Annaba, Algeria.
19. R.Meziane, M.Messagier, A. Gharzouli, Utilisation d'une méthode optique pour détecter et mesurer les défauts surfaciques, Sétif 16-17 Novembre 2014, Conférence Internationale de Mécanique et Matériaux (ICMM14), Institut d'Optique et Mécanique de Précision Université Ferhat Abbas, Sétif 1.
20. S.Meguellati, Ai. Manallah, M. Messagier, Mesure bidimensionnelle de déviations angulaires par interférométrie, Conférence Internationale sur la métrologie et la maintenance industrielle (ICIMM 2018), Institut d'Optique et Mécanique de Précision, Université Ferhat Abbas Sétif1, 28-29 octobre 2018, Algérie.
21. S.Meguellati, M. Messagier, The contribution of optics to metrology, 2nd Algeria – German International Conference on New Technologies GICNT 2019" held at the university Ferhat Abbas- Sétif 1, Algeria, on September 22-23, 2019.

### **Congrès nationaux**

1. A. Gharzouli, S.Meguellati, R.Meziane, M.Messagier, Non destructive control of shape defects by moiré phenomenon, Ecole thématique Matériaux pour l'optique et la photonique (MOP) à Guelma le 6-11/09/2014, Algérie.
2. M. Messagier, S.Meguellati, R.Meziane, A. Gharzouli, Inspection de surface des matériaux par une technique optique, 21,22 et 23 Décembre 2014, 11<sup>ème</sup> Congrès National de la physique et de ses applications (CNPA'2014). Université SAAD DAHLEB-BLIDA1 (Algérie).
3. A.Gharzouli, S.Meguellati, R.Meziane, M.Messagier, Detection des défauts de formes sur des surfaces réduites par voie optique, 22 et 23 Décembre 2014, 11<sup>ème</sup> Congrès National de la physique et de ses applications (CNPA'2014). Université SAAD DAHLEB-BLIDA1 (Algérie).
4. A.Gharzouli S.Meguellati, R.Meziane, M.Messagier, Detection des défauts de formes sur des surfaces réduites par voie optique , 1<sup>er</sup> Congrès Algérien de caractérisation, Propriétés et Modélisation de Matériaux et des Matériaux Composites (CACPM3C-1'2015), 19 au 21 Mai 2015, Faculté Des sciences et de la Technologie-Université de Khenchela, Algérie,

### Publication internationale dans un journal scientifique

- 1 **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 journal, published online 2 April 2021. <https://doi.org/10.1007/s40799-021-00459-z>.



الحمد لله حمداً كثيراً

طيباً مباركاً فيه

## Résumé

La technique développée dans le cadre de cette thèse consiste en la mise au point, d'une méthode d'inspection, de la qualité de surface des composants de tailles réduites de l'ordre de quelques mm<sup>2</sup>. Le moiré interférométrique est exploité dans un montage, où la surface est scannée par un faisceau laser qui véhicule une structure microscopique qui palpe la surface et enregistre les modifications de formes présentes sur la surface topographiée. La résolution de détection des défauts dépend de la fréquence spatiale des réseaux utilisés. Les défauts microscopiques présents sur la surface sont amplifiés par l'effet de moiré et le montage optique, ce qui facilite la détection et le traitement automatique des données; lors d'un contrôle, il suffit de comparer la figure de moiré avec celle d'une pièce qui est considérée comme référence.

**Mots clés :** Topographie, contrôle non destructif, métrologie optique, technique de moiré.

## ملخص الأطروحة

التقنية المطورة في إطار هذه الأطروحة تتمثل في طريقة، فحص جودة سطح المكونات ذات الأحجام الصغيرة التي تصل إلى بضعة مم<sup>2</sup>. يتم استعمال المخير المتداخل في مجسم ، حيث يتم مسح السطح بواسطة شعاع الليزر الذي يقوم بنقل البنية المجهرية التي تلامس السطح وتسجل التغيرات في الأشكال الموجودة على السطح الطبوغرافي. يعتمد تفريق اكتشاف العيوب على التردد المكاني للشبكات المستخدمة. يتم تضخيم العيوب المجهرية الموجودة على السطح من خلال تأثير المخير والمجسم البصري، مما يسهل الكشف والمعالجة الآلية للمعلومات؛ أثناء المراقبة، لذا يكفي مقارنة شكل المخير مع القطعة التي تعتبر المرجع.

**الكلمات المفتاحية:** الطبوغرافيا، المراقبة الغير المدمرة، القياس البصري، تقنية المخير.

## Abstract

The technique developed under this thesis consists of the development of a method of inspection, of the surface quality of the components of sizes reduced about a few mm<sup>2</sup>. The interferometric moiré is exploited in a setup. Where surface is scanned by a laser beam. That transmits a microscopic structure. This palpates surface, records the changes in the shapes on the topographed surface. The resolution of detection of the defect depends on the spatial frequency of the gratings used. The microscopic defects present on surface are amplified by the moiré effect and the optical setup, which facilitates the detection and the automatic processing data; during a control, it is enough to compare the figure of moiré with that of a piece which is regarded as reference.

**Keywords:** Topography, non destructive control, optical metrology, moiré technique.