

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS DE SÉTIF
INSTITUT D'OPTIQUE ET DE MÉCANIQUE DE PRÉCISION

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

École Doctorale des Technologies et des Applications Spatiales

Spécialité : Optique Spatiale et Mécanique de Précision

Par

LAKHAL Malika

THEME

Détection et mesure des défauts de surface par analyse automatique des franges projetés

Soutenu le / / devant le jury composé de :

A. BENIAICHE	Président	M.C.A	UFA Sétif
Ai. MANALLAH	Rapporteur	M.C.A	UFA Sétif
H. GUESSAS	Examineur	M.C.A	UFA Sétif
S. MEGUELLATI	Examineur	M.C.A	UFA Sétif

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les surfaces et les interfaces jouent le plus souvent un rôle primordial lors de la fabrication ou de l'utilisation des matériaux dans différents domaines. La morphologie et la forme précise des structures résultent en fait des propriétés physico-chimiques des surfaces et/ou des interfaces et de la manière dont elles sont fabriquées. Il est donc d'un intérêt capital de les analyser pour bien connaître leurs caractéristiques. L'opération de contrôle de la qualité d'une surface doit être précise, rapide et économique afin de garantir une fonctionnalité optimale à la surface.

Dans de nombreux domaines, plusieurs techniques d'analyse de surface sont utilisées pour contrôler et pour améliorer la qualité des performances des matériaux aussi bien dans la recherche que dans l'industrie.

Les techniques optiques sont actuellement largement utilisées dans la production de systèmes automatisés pour inspecter les surfaces et mesurer les déplacements, car elles présentent des avantages significatifs de qualité et de fiabilité. Parce qu'elles présentent une précision excellente, une grande fiabilité et qu'elles permettent des mesures non destructives et sans contact, des méthodes interférométrique comme l'holographie, la métrologie Speckel et les techniques de projection de franges ont trouvé un intérêt croissant, non seulement dans la recherche en laboratoire mais aussi dans des applications industrielles. Ces méthodes peuvent être exploitées dans l'industrie pour le contrôle et l'optimisation de composants optiques (lentilles, miroirs, etc.), ou pour l'inspection in situ en vue de détecter des défauts de production ou de fonctionnement d'équipements industriels. Elles sont aussi largement utilisées comme une discipline de développement de solutions optiques dans divers problèmes d'ingénierie (mécanique, biologie, médecine, etc.) mais surtout, elles sont devenues une discipline majeure de la recherche fondamentale.

Cette introduction forcément simpliste ne rend pas compte du champ d'application particulièrement étendu de l'interférométrie. Voici quelques exemples d'application de l'interférométrie : Mesure de profils d'objets (Profilométrie), mesure de vibrations, mesure des distances et des vitesses (LIDAR "radar laser"), analyse des mouvements de l'atmosphère (LIDAR), microscopie des milieux discontinus (Wafer), analyse non destructive de tissus vivants (rétine par exemple), centrales inertielles (gyrolaser), granulométrie, analyse d'aérosols.

Le présent travail est réparti selon le plan ci-dessous :

Dans le chapitre I on donne la notion de surface et d'état de surface, puis on évoque les différents paramètres caractéristiques d'une surface (rugosité quadratique, rugosité moyenne, fonction d'autocorrélation...). Ces paramètres et fonctions décrivent de manière statistique la morphologie de la surface, et on expose les différentes techniques de caractérisation des surfaces (optiques et non-optiques) et leur principe de fonctionnement.

Le chapitre II est destiné à l'interférométrie où on exposera des généralités sur les interférences des ondes lumineuses. Ensuite on présentera les principes généraux de ce phénomène, les méthodes d'obtention des figures de franges, puis les différents types d'interféromètres.

Dans le chapitre III on étudiera les techniques d'exploitation des figures d'interférences telles que le décalage de phase et les méthodes d'analyse des franges.

Au chapitre IV on réalisera un montage expérimental « triangulation par projection des franges », puis on interprète les résultats expérimentaux obtenus.

On termine cette mémoire par une conclusion générale.

I.1. Introduction

Les propriétés des solides et leur comportement dépendent, souvent des caractéristiques de leurs surfaces que de leurs propriétés massiques ou volumiques. La surface d'un corps solide est la partie de ce solide qui le limite dans l'espace et le sépare du milieu environnant, elle est prépondérante pour assurer des fonctions telles que l'aptitude aux frottements, la résistance à l'usure ou la corrosion, conduction thermique et électrique, résistance aux contraintes mécaniques, étanchéité statique ou dynamique, aspect, etc.

I.2. Etat de surface

On appelle état de surface, les irrégularités de surfaces dues aux procédés d'élaboration des pièces (usinage, moulage, etc.). Ces irrégularités sont classées par ordre de grandeur de leur fréquence spatiale. Les surfaces industrielles produites par des moyens techniques présentent toujours des irrégularités par rapport à la mesure idéale. Ces défauts peuvent être de forme (défauts macro - géométriques, ondulations) ou de petits défauts (défauts micro - géométriques) désignés plus communément sous le nom de rugosité. Pour les décrire en toute rigueur, il faudrait utiliser une fonction continue $z(x, y)$ donnant de l'altitude de chaque point par rapport à la surface idéale.

Connaître l'influence de l'état d'une surface sur le fonctionnement d'une pièce et son comportement dans le temps nécessite de pouvoir caractériser sa géométrie macro et micro voire même nano géométrie dans certains cas, seule la caractérisation des états de surface effectuée sur un profil est normalisée. Le développement des technologies et des équipements permet de disposer d'une représentation tridimensionnelle de la surface (topographie). Si cette approche est actuellement le moyen le plus fidèle pour caractériser une surface, elle n'est pas encore reconnue et son application n'est pas envisageable en production [1].

Ces deux types de défauts peuvent être distingués, en considérant le schéma de la figure II.1 relatif à l'état de surface. La frontière entre la rugosité et l'ondulation est arbitraire, aucune définition absolue n'existe.

Les états de surfaces se divisent en deux groupes :

- ♦ État physico-chimique
- ♦ État géométrique.

Les écarts de surface caractérisant l'état géométrique, sont classés par ordre comme montré dans la figure I.1:

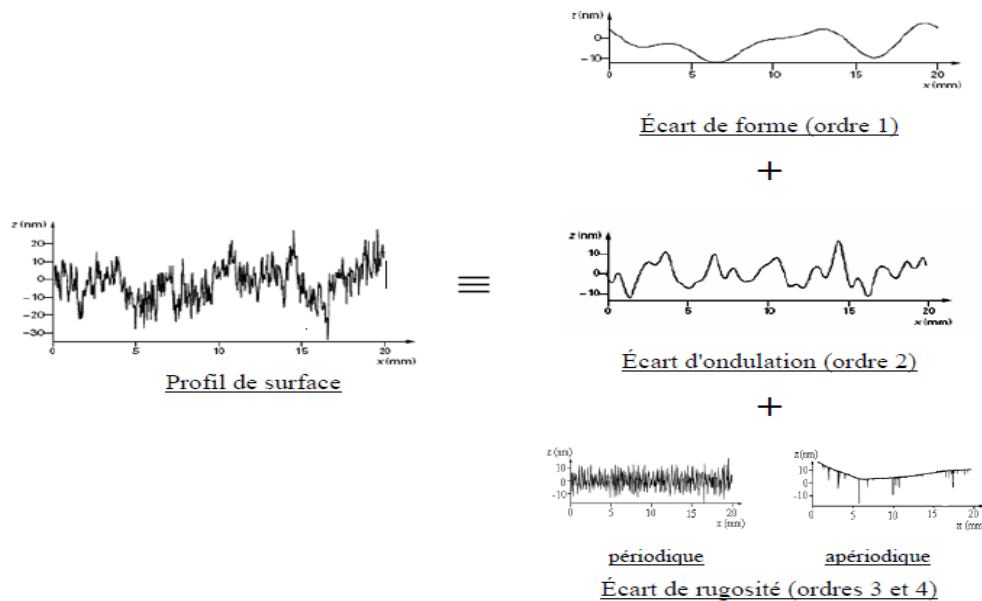


Fig. I.1. Écarts géométriques d'un profil d'une surface [2]

I.2.1. État physico-chimique

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

I.2.2. État géométrique

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

I.3. Géométrie des surfaces

I.3.1. Géométrie nominale

Il s'agit du volume virtuel parfait délimité par des surfaces élémentaires parfaites définies par des cotes nominales (figure I.2.a).

I.3.2. Géométrie réelle

C'est l'ensemble des surfaces obtenues après la mise en œuvre des divers procédés de fabrication (figure I.2.b).

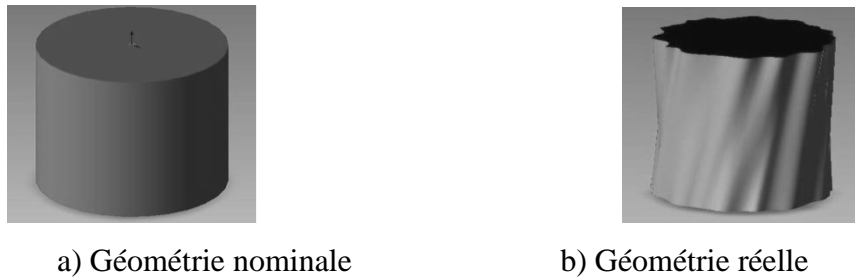


Fig. I.2. Géométrie d'une surface [3]

I.3.3. Géométrie spécifiée

C'est le volume précédent auquel on affecte des tolérances délimitant les frontières théoriques à ne pas dépasser par la pièce réelle. Ce sont les dimensions et spécifications géométriques de position, d'orientation, de battement qui délimitent cette géométrie (figure I.4).

I.3.4. Géométrie mesurée

C'est l'image de la géométrie réelle résultant de la mesure. Ce résultat est différent selon le type d'appareil utilisé (micromètre, calibre, colonne de mesure, machine à mesurer...) et le protocole de mesure utilisé (position des touches du micromètre, nombre et position des points de palpation, modèle mathématique utilisé par le calculateur...), figure I.3.

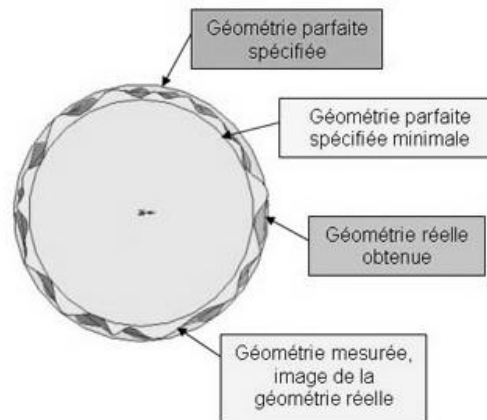


Fig. I.3. La géométrie spécifiée et mesurée [3]

I.4. Différents écarts géométriques de l'état de surface

Un profil de surface est la courbe résultant de l'intersection de la surface réelle et d'un plan spécifié. Ce plan est perpendiculairement au sens de stries d'usinage. Un profil de surface, outre la

forme nominale de la pièce, est composé de différents écarts géométriques, auxquels correspondent différents profils.

I.4.1. Ecart de forme

Défauts du premier ordre ou macro géométriques. Ce sont des défauts dus à des écarts de forme (planéité rectitude, cylindricité, etc.) et de position (perpendicularité, parallélisme, etc.) provenant de la déformation de la pièce pendant et après l'usinage, des défauts de bridage, de la flexion des éléments de la machine, d'un mauvais guidage des éléments mobiles...

I.4.2. Ecart d'ondulation

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

I.4.3. Ecart de rugosité

Elle intègre les défauts du troisième ordre (stries) et du quatrième ordre (arrachements, fentes...etc.), dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil, ou à l'avance par tour de la pièce, ou à des vibrations haute fréquence et se définit à l'aide de plusieurs paramètres.

I.5. Définition de la rugosité des surfaces

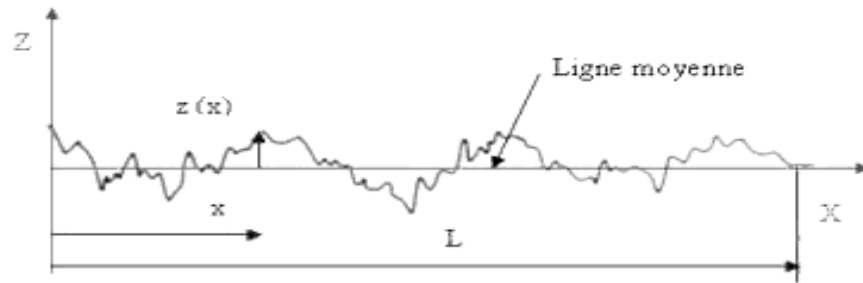
La rugosité est l'état d'une surface présentant des aspérités (point dur et rêche au toucher sur une surface). Elle est représentée en coordonnées cartésienne rectangulaires par un profil $Z=Z(x, y)$, le niveau moyen de la surface étant le plan (x, y) pour lequel $Z=0$. Dans le cas unidimensionnel, la surface est représentée par un profil linéaire. $Z=Z(x)$.

I.5.1. Critères de rugosité des surfaces

Entre deux points d'une surface, seuls trois critères sont pris en compte dans la normalisation pour caractériser une rugosité.

a) La rugosité moyenne R_a

C'est la valeur moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les pics et les creux point par point.

Fig. I.4. Rugosité arithmétique R_a

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i - \bar{z}| \quad (\text{I.1})$$

b) La rugosité (pic - creux) R_t

Dans ce cas, il est nécessaire de calculer la différence de hauteur moyenne « pics-creux » notée R_t comme suit :

$$R_t = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (z_{\max} - z_{\min})_k \quad (\text{I.2})$$

Où N représente le nombre de pics et de cavités en termes de pixels.

c) La rugosité quadratique rms (root-means-square roughness)

La rugosité R_q « δ » décrit donc les fluctuations de hauteur de la surface autour d'une hauteur moyenne et représente la déviation standard, ou la racine carrée du moment d'ordre 2 (variance) en termes de statistique.

Mathématiquement le niveau moyen est défini tel que $\sum_{i=1}^N z_i = 0$ et est localisé par la valeur moyenne \bar{z} de tous les points z_i du profil mesuré, et est définie comme suit:[5; 6]

$$\bar{z} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N z_i \quad (\text{I.3})$$

Considérons maintenant N points discrets et équidistants, mesurés le long de la ligne L . La rugosité rms δ est définie comme suit:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2} \quad (\text{I.4})$$

Nous avons opté pour la rugosité *rms* (quadratique) car elle correspond à une description statistique de la dimension verticale de la surface (écart-type de la distribution des hauteurs) et sert de base pour les autres quantités (rugosités).

I.6. Méthodes de contrôle de l'état de surface

Parmi les paramètres caractéristiques des états de surface, la rugosité est l'une des plus importantes car elle intervient dans la brillance, dans la diffusion de la lumière et dans les caractéristiques mécaniques.

Pour ce qui est de la rugosité, de la texture et des défauts de surface ponctuels, les méthodes les plus couramment utilisées sont les systèmes de mesures à contacts et optiques qui fournissent des résultats quantitatifs avec une résolution comparable.

Le Tableau I.1 rassemble les différents procédés utilisés pour déterminer les paramètres des états de surface. Nous allons ensuite les décrire [10].

Types de procédés	Méthodes de contrôle	Principes physiques	Types de défauts détectés	Domaines d'application
Mécanique	palpeur		Mesure de profondeur de défauts	Profils de surface sur pièces de formes simples
Optique	Vision industrielle (caméras) Examen visuel direct ou assisté	Formation d'images	Détection et localisation de défauts d'aspect	Contrôles rapides en ligne. Pièces fragiles ou déformables surfaces difficiles d'accès.
	Triangulation laser	Triangulation optique	Mesure de profondeur de défauts	Convient aux tailles importantes
	Microscopie confocale	Différence de chemin optique		Cartographie 3D de surface, profilométrie, analyse de la texture (échantillons de petites tailles)
	Microscopie interférométrique		Cartographie 3D de surface, profilométrie, analyse de la texture (échantillons de petites tailles)	
	Projection de franges	Projection d'une lumière blanche structurée	Défauts de formes	Inspection rapide de surfaces de tailles importantes

Tableau I.1

I.6.1. Les systèmes à contacts

Les systèmes à contact permettent de mesurer les états de surface suivant des procédures normalisées. Qu'il s'agisse de rugosimètres ou de profilomètres à stylet, ils sont munis d'une unité d'avance, au bout de laquelle se situe un palpeur qui balaye la surface de la pièce suivant plusieurs segments prédéfinis.

Deux instruments de mesure sont nécessaires :

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

La mesure peut être faite en prenant pour référence le système de translation de la machine (figure I.5.a). Le parallélisme entre la surface étudiée et la translation du palpeur doit alors être très soigneusement ajusté.

Pour une meilleure sensibilité et pour ne pas être gêné par les défauts de forme de la pièce, on peut faire la mesure avec un palpeur différentiel qui donne la différence d'altitude entre le point palpé et une surface moyenne située à proximité (figure I.5.b).

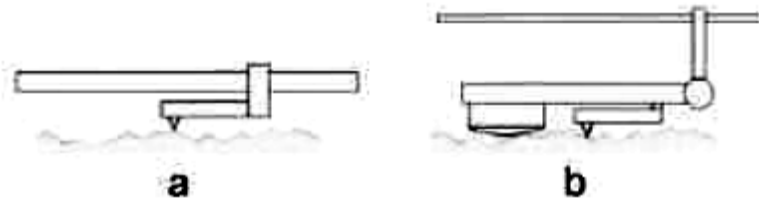


Fig. I.5. Palpeurs pour mesurer la rugosité

Ces palpeurs sont en général des diamants taillés avec un rayon de courbure de l'extrémité de l'ordre de quelques micromètres. L'amplitude de leur mouvement est limitée à quelques dizaines ou centaines de micromètres, parfois quelques fractions de micromètre.

Dans les méthodes à contact mécanique, la forme du palpeur effectue un filtrage passe-bas qui élimine les défauts dont la période est petite devant le rayon de courbure du palpeur. Ce filtrage est extrêmement complexe et peut difficilement être modélisé. Ce filtrage mécanique est souvent

complété par un filtrage électrique ou par un filtrage numérique effectué par le système d'acquisition et de traitement des données. On peut donner de ces derniers une représentation plus simple et plus conforme à la réalité (les filtres électriques travaillant dans le domaine temporel, et qui exigent la maîtrise de la vitesse du palpeur, et les filtres numériques qui sont le plus souvent associés au traitement des données par ordinateur).

1.6.2 Les systèmes optiques

Les systèmes optiques reposent sur l'envoi d'un faisceau lumineux sur la surface de l'échantillon à analyser et sur l'enregistrement du faisceau réfléchi.

L'optique offre comme toutes les méthodes sans contact, l'intérêt de pouvoir contrôler des pièces fragiles ou déformables. Le contrôle s'effectue aussi à une vitesse élevée. En revanche aucune méthode n'est encore normalisée.

a- Principe de l'interférométrie

L'interférométrie est une méthode couramment utilisée. La différence de chemin optique entre le faisceau réfléchi par la surface de l'échantillon et le faisceau réfléchi par un miroir de référence génère des figures d'interférences.

En effet, l'amplitude du rayonnement réfléchi par l'échantillon peut s'écrire :

$$S_1 = a_1 \cos(2\pi f t) \quad (\text{I.5})$$

Et celle réfléchi par le miroir mobile s'écrit :

$$S_2 = a_2 \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (\text{I.6})$$

Où φ est le déphasage introduit par la différence des trajets des deux rayonnements, et f est la fréquence du rayonnement utilisé.

Pour un déplacement L du miroir mobile, on obtient la relation :

$$\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda_{air}} \quad (\text{I.7})$$

$\delta = 2L$ différence de chemin optique et λ_{air} est la longueur d'onde du rayonnement utilisé dans l'air.

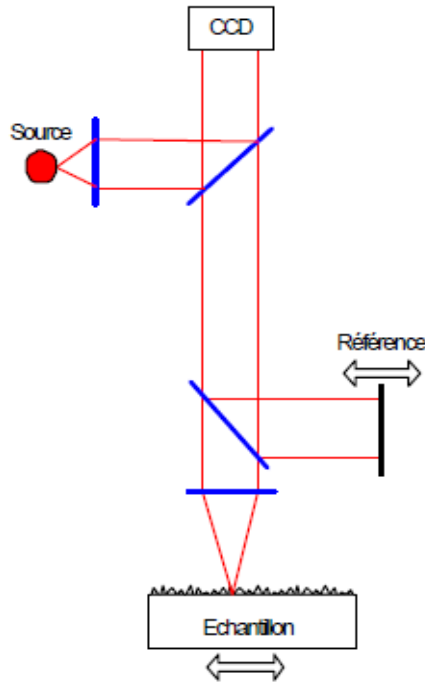


Fig. I.6. Principe de l'interférométrie

En déplaçant le miroir par exemple et en mesurant l'intensité du faisceau réfléchi. Après ce déplacement on accède à la hauteur relative de chaque point de la surface [11].

Si l'on déplace lentement le miroir référence (figure I.6), l'intensité du rayonnement mesuré grâce à une caméra augmente et diminue, elle s'annule avec un pas de déplacement correspondant à une demi-longueur d'onde, soit une variation totale de la trajectoire d'une longueur d'onde. Si la longueur d'onde est connue, le déplacement peut être ainsi mesuré avec précision. De cette observation vient l'analogie entre un interféromètre et une règle à traits gravés tous les $\lambda/2$, appelé interfrange. En comptant ces alternances d'intensité lumineuse, appelées franges, il est donc possible de mesurer la longueur L du déplacement du miroir mobile : $L = K \lambda/2$ (K réel) et déterminer ainsi le profil de la surface de la pièce.

Le domaine de rugosité accessible par cette technique est de l'ordre de 0,1 à 15 nm en 2D et 0,3 à 15 nm en 3D [12]. Une limitation est due à la rugosité de la pièce de référence ; il existe donc des appareils utilisant la surface à mesurer comme référence (avec deux faisceaux).

b. Principe de la microscopie confocale

Comme dans la figure I.7, le rayonnement provenant d'un point situé au-dessus ou au-dessous de M est filtré par le diaphragme. Il est ainsi possible de réaliser une « coupe optique » à une profondeur quelconque d'un objet sans être gêné par les autres parties de l'objet. Cette propriété de « coupe optique », ainsi qu'une résolution latérale meilleure que celle offerte en microscopie conventionnelle (tache de diffraction plus petite), sont les deux avantages majeurs de la microscopie confocale.

En déplaçant l'échantillon suivant l'axe vertical on obtiendra un maximum d'intensité lorsque celui ci sera au point focal ; on obtiendra ainsi une série de coupes optiques de la surface de l'échantillon.

La résolution verticale est comprise entre 5 et 20 nm avec une étendue de mesure ne dépassant pas le millimètre.

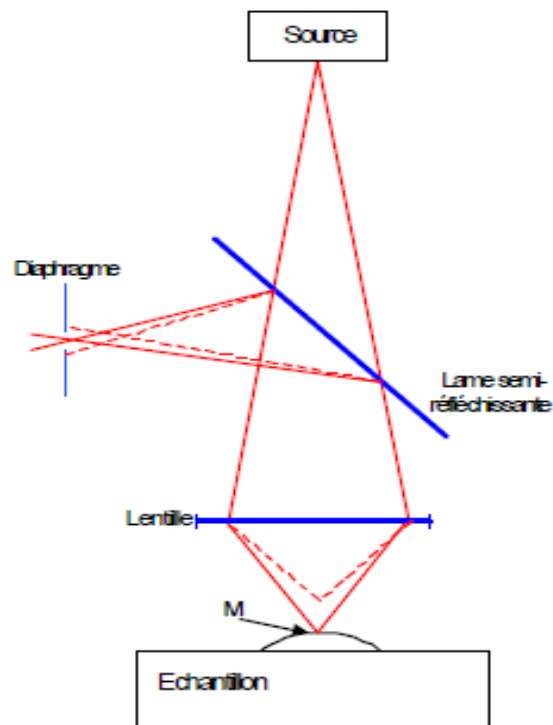


Fig. I.7. Principe de la microscopie confocale

c- La profilométrie laser

La profilométrie laser est une méthode séquentielle. Le déplacement de l'échantillon ou de la source permet d'obtenir un profil ou une série de profils si l'on souhaite une cartographie 3D. La méthode peut être coaxiale ou basée sur le principe de triangulation selon que le faisceau émis et le faisceau réfléchi suivent le même trajet optique ou pas.

La source constitue un pinceau d'éclairage unidirectionnel, et code de façon univoque un segment AB de l'espace de mesure. Un détecteur linéaire A'B' forme l'image M' du point M correspondant à l'intersection du segment AB avec l'objet (figure I.8).

Le profil photométrique du point M' est quasi gaussien. Le calcul de son barycentre permet de déterminer la position z du point M dans le segment AB. La résolution de la mesure dépend de la qualité du profil photométrique du point M' sur le détecteur linéaire [13]. Les techniques actuelles basées sur ce principe permettent d'atteindre des résolutions de l'ordre du mm avec une étendue de mesure de quelques millimètres.

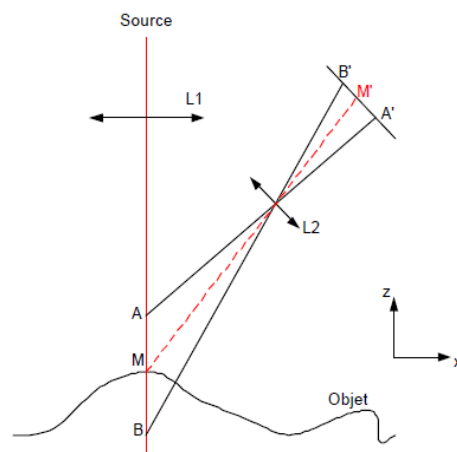


Fig. I.8. Principe de la profilométrie dans le cas d'un capteur à triangulation

d- Projection des franges

La méthode n'a que très peu de points communs avec les autres techniques optiques. Elle permet d'inspecter des champs très larges et c'est aussi l'une des méthodes les plus robustes par rapport à l'environnement. Le principe est basé sur la projection d'une lumière blanche structurée

sous forme de franges à la surface de l'échantillon. Un décalage successif des franges et l'analyse de leur déformation à l'aide d'une caméra CCD permettent de déterminer le relief de la surface.

Sur l'échantillon, l'information de hauteur Z par rapport à une surface de référence est transformée en une information de déplacement U_x de la frange, et on a dans le cas le plus simple de la projection collimatée (figure I.9) :

$$Z = \frac{U_x}{\tan(A)} \quad (I.8)$$

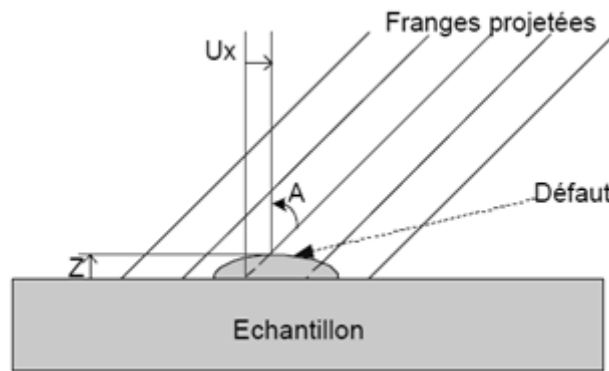


Fig. I.9. Principe de la projection de franges

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

e- De la projection des franges à la déflectométrie

A la différence de la projection de franges classiques où le motif est projeté directement sur la surface, ici la projection est effectuée sur un écran et la technique consiste à analyser la réflexion de ce motif par l'échantillon.

Sur la figure I.10 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'interférence, 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.

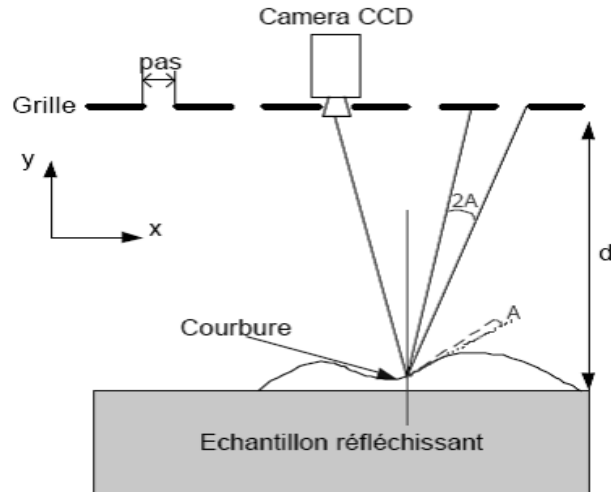


Fig. I.10. Principe de la déflectométrie [9]

Par rapport à la technique de l'interférométrie, l'intérêt de la déflectométrie est :

- ♦ l'insensibilité aux vibrations
- ♦ la possibilité de régler la sensibilité. En effet, celle-ci dépend du pas p de la grille d'analyse.

On peut donc augmenter cette valeur si la surface présente des variations de hauteurs et donc des pentes importantes, pour diminuer le nombre de franges observées. Ceci n'est pas possible en interférométrie où la distance entre deux franges dépend de la longueur d'onde et n'est donc pas modifiable dans de grandes proportions.

Avec les caméras et les traitements informatiques il est possible d'atteindre une résolution d'un 1/100 de pas sur une étendue de mesure de l'ordre du mètre carré.

f- La vision industrielle

Les systèmes optiques et mécaniques doivent composer avec une troisième méthode de contrôle : la vision industrielle. Mais cette fois ci, l'objectif n'est pas de réaliser une analyse topographique ni de mesurer les paramètres d'états de surface. La méthode est plutôt utilisée pour détecter et localiser très rapidement toutes sortes de défauts d'aspects (taches, trous, rayures, etc.).

La vision industrielle est une technologie utile et souvent nécessaire dont les performances répondent aux exigences et aux contraintes industrielles. Son développement a bénéficié des progrès rapides et continus des détecteurs solides ponctuels, linéaires ou matriciels, ainsi que de la micro-

informatique et de l'électronique de traitement d'images. La vision industrielle peut être définie comme suit : un ensemble autonome implanté dans un environnement industriel et regroupant une caméra ou tout autre capteur optoélectronique sensible aux longueurs d'onde lumineuses ainsi qu'une unité de traitement d'images, ces deux systèmes permettant de prendre éventuellement une décision automatique. Un secteur particulièrement concerné par la vision industrielle est la métrologie 2D ou 3D sans contact. De nombreux systèmes de mesure de positions, de formes et de distances sans contact sont utilisés dans l'industrie automobile, l'aéronautique, et surtout en milieu hostile (sous-marin, centrale nucléaire, chaudronnerie, etc.). Exemple de la figure I.11.

Lorsque l'on veut réaliser un contrôle dimensionnel sans contact on peut utiliser une méthode de triangulation qui consiste à projeter un plan de lumière sur la surface à mesurer.

L'observation à partir d'une caméra CCD permet de saisir la ligne contour résultant de l'intersection de ce plan et de l'objet.

L'avantage de ce type d'acquisition n'est pas uniquement la rapidité de mesure mais aussi le fait que tous les points de la ligne sont mesurés dans la même configuration optomécanique. En conséquence, les coordonnées relatives mesurées sont absolument indépendantes des défauts résiduels de déplacement des éléments comme c'est le cas du balayage point par point.

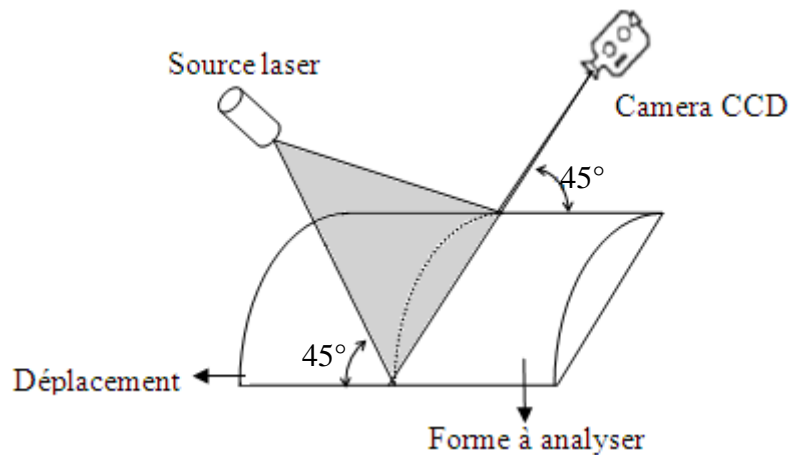


Fig. I.11. Exemple d'utilisation de la vision industrielle

g- Triangulation passive

La triangulation passive ne nécessite aucune source de lumière additionnelle pour effectuer les mesures. Elle utilise uniquement un ou plusieurs systèmes d'acquisition d'images (caméra, appareil photographique). La méthode la plus utilisée est la stéréovision passive.

h- Triangulation active

La technique de triangulation active se distingue de la technique passive dans la mesure où un éclairage structuré participe à la reconstruction tridimensionnelle de l'objet. C'est la méthode la plus utilisée par les sociétés de prestation de services en numérisation 3D. Des motifs connus sont projetés sur l'objet et permettent de remonter à la profondeur par trigonométrie. Dans l'exemple donné à la figure I.12, le centre optique du capteur est noté C , le centre de l'image O , et la focale f . Les orientations du projecteur θ et du capteur φ sont connues, ainsi que la distance D entre le projecteur et le capteur. Pour déterminer la profondeur Z en fonction de la déviation x lue sur l'image, la "loi des sinus" est appliquée

$$\frac{D+x}{\sin \alpha} = \frac{D+x}{\sin(\theta+\varphi)} = \frac{Z}{\sin \theta'} \quad (\text{I.9})$$

Il vient, avec $\varphi = \arctan \frac{f}{x}$:

$$Z = (D+x) \frac{\sin \theta}{\sin\left(\theta + \arctan \frac{f}{x}\right)} \quad (\text{I-10})$$

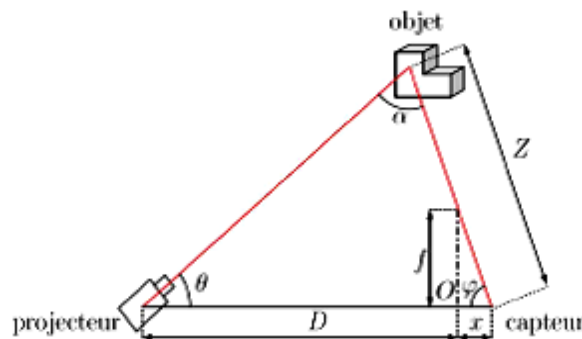


Fig. I.12. Principe de la triangulation active

Les diverses méthodes de triangulation active peuvent être classées suivant le type du motif lumineux projeté : point, ligne ou motif [17].

1.7 Conclusion

Le rôle des surfaces dans les technologies modernes justifie le nombre très important d'instruments nouveaux apparus pour les étudier. Caractériser les surfaces d'un point de vue géométrique est chose complexe. Les outils de traitement des signaux à une dimension (filtres, analyseurs de spectres) ont trouvé leurs équivalents pour les grandeurs bidimensionnelles, l'analyse unidimensionnelle d'un profil est suffisante pour apporter une bonne connaissance de la surface.

Nous avons vu des dispositifs très variés, dont certains mesurent une cote verticale, certains une différence de cotes entre points voisins ou éloignés, d'autres mesurent une pente locale, et d'autres enfin mesurent une variation de pente entre deux points voisins. Ces différents procédés sont évidemment caractérisés par leur sensibilité, mais aussi et surtout par leur fonction de transfert des fréquences spatiales qui traitent différemment écarts de forme, ondulation et rugosité.

C'est l'exploitation complète mais prudente de ces instruments qui conduira, dans chaque discipline, à établir les procédures pour atteindre tel ou tel paramètre caractéristique d'une surface. Les méthodes optiques et les palpeurs mécaniques, les méthodes microscopiques sont des techniques très différentes. Aucune n'est absolument meilleure que les autres ; elles sont toujours plus ou moins complémentaires

II.1 Introduction

Le principe de base de techniques interférométriques est la superposition cohérente (interférence) de faisceaux de lumière représentant différents états de l'objet testé. Une propriété intéressante et commune de ce phénomène réside dans le signal exploitable en sortie : le résultat est toujours matérialisé par des réseaux périodiques de franges d'interférence. Cette notion importante de périodicité est déterminée par la longueur d'onde des faisceaux qui interfèrent. Les fluctuations d'intensité, ainsi obtenues, contiennent l'information sur les paramètres caractéristiques du phénomène observé : déplacement, augmentation de température, absorption d'énergie, vibration, etc. En conséquence, l'analyse de l'image observée peut être définie comme la conversion d'une figure de franges en un réseau continu de phase qui décrit le caractère quasi-sinusoïdal de la distribution d'intensité.

Dans ce deuxième chapitre, nous rappelons la définition générale du terme "interférence". Nous présentons ensuite les principes généraux nécessaires à la compréhension de ce phénomène.

II.2 Interférences lumineuses

Les termes "interférométrie" et "interféromètre" dérivent du mot "interférence" qui traduit le mélange d'ondes cohérentes, mais qui peuvent être de natures différentes (sonores, électromagnétiques, sismiques, etc..). La résonance, le battement de fréquence et la dissonance sont tous des phénomènes d'interférence. L'interférométrie peut être considérée comme l'addition de deux ondes qui vont s'additionner ou se soustraire en fonction de leurs amplitudes et de leur différence de phase. Les interférences sont le comportement qu'ont les ondes lorsqu'elles se chevauchent. Dans le cas simple de deux ondes planes qui se recouvrent et qui sont en phase - ici nous simplifions la représentation pour ne prendre que le cas d'une onde sinusoïdale, on peut voir que les ondes vont s'additionner en intensité. On parle dans ce cas là d'interférences constructives (Figure. II.1.a).



Fig. II.1. Interférences[18]

Dans le cas d'ondes en opposition de phase, les deux ondes vont s'annuler. Ce sont des interférences destructives (Fig. II.1.b). C'est par exemple ce phénomène qui est utilisé dans les casques audio qui suppriment le bruit ambiant en générant un bruit équivalent en opposition de phase.

Les interférences de lumière ont été observées pour la première fois par Young. L'étude de ce phénomène, conduite par Young et Fresnel au début du XIX^e siècle, a permis d'établir définitivement la nature ondulatoire de la lumière [19]. Cette théorie repose sur l'hypothèse fondamentale suivant laquelle chaque rayonnement monochromatique est associé à une vibration de période T , parfaitement déterminée, et que l'intensité en un point est proportionnelle au carré de l'amplitude a de la vibration.

$$y = a \cos\left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi\right) \quad (\text{II-1})$$

La superposition d'ondes provenant de deux sources lumineuses de même fréquence se traduit par le phénomène d'interférence : en certains endroits, l'intensité lumineuse est maximale, alors qu'en d'autres endroits, elle est minimale ou même nulle. La figure d'interférence obtenue dépend de la forme des fronts d'onde (plans, sphériques, etc.) qui interfèrent ainsi que de leurs directions de propagation relatives. Il convient de souligner, dès à présent, que les méthodes métrologiques basées sur l'interférométrie peuvent mesurer des déplacements de l'ordre de la fraction de la longueur d'onde utilisée et sont donc très sensibles. Ceci peut, cependant, constituer un désavantage puisque la mesure de grands déplacements n'est, en général, pas à leur portée. Remarquons finalement que le phénomène d'interférence n'a lieu que sous certaines conditions que nous évoquerons ultérieurement. Dans le cas d'ondes sphériques, les interférences entre ces deux ondes vont créer des figures d'interférences que l'on appelle des franges, figure II.2 :

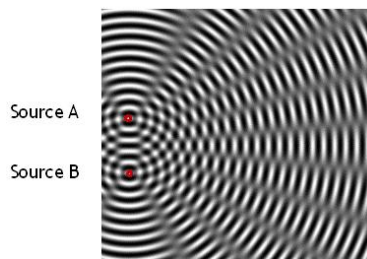


Fig. II.2. Interférences de deux sources sphériques.

Ces propriétés de combinaison de fronts d'onde sont très utilisées en métrologie pour la caractérisation des optiques par interférométrie. Les interféromètres reposent sur la génération de

franges d'interférences. Pour certains interféromètres, le principe est de superposer un front d'onde parfaitement sphérique avec un front d'onde supposé sphérique issu de l'élément à mesurer. En retranchant l'un à l'autre, il est possible de ne retenir que la différence entre le front d'onde de l'élément mesuré et le front d'onde parfait, et donc de pouvoir mettre en évidence les défauts apportés par l'optique au front d'onde incident.

II.2.1 Conditions d'interférence

Pour que deux ondes lumineuses interfèrent et que le résultat soit observable, elles doivent remplir certaines conditions :

- ♦ Leurs champs électriques doivent avoir un même plan de vibration car si les plans de vibration sont orthogonaux, on aura à faire au phénomène de polarisation.
- ♦ Elles doivent avoir une même fréquence et par suite une même période.
- ♦ Elles doivent avoir également une même longueur d'onde.
- ♦ Elles doivent avoir également une différence de phase constante dans le temps et dans l'espace.

Ces conditions sont généralement connues sous le terme « **cohérence** ».

a. Notion de cohérence

Pour pouvoir expliquer la notion de cohérence des sources lumineuses, il est nécessaire d'introduire la notion d'émission de trains d'ondes par les sources lumineuses. La lumière est émise sous la forme de paquets d'ondes ou trains d'ondes c.à.d. que dans un train, plusieurs ondes coexistent et oscillent avec pulsations voisines à une pulsation moyenne ω_0 et ayant des vecteurs d'ondes voisines à un vecteur d'onde moyenne k_0 .

D'après ce qui a été dit précédemment, la cohérence veut donc dire qu'il doit y avoir une relation dans le temps et dans l'espace des différents trains d'ondes par une source afin qu'ils puissent se superposer et donner le phénomène d'interférence. Ainsi pour deux points sources émettant deux ondes d'intensités respectives I_1, I_2 on définit : [20 ;21]

a. 1. Cohérence temporelle

On dit que les ondes composent un train sont cohérences temporellement si elles possèdent un temps d'existence identiques dit temps d'existence du train ou temps de cohérence de la source défini par :

$$\tau_c = \frac{l_c}{c} \quad (\text{II-2})$$

Ou l_c et la longueur du train et c la vitesse de la lumière.

Pour que deux séries de traînes d'ondes donnent un phénomène d'interférence. Il faut donc qu'un train de la deuxième série arrive au point de superposition avant la disparition de celui de l'autre.

a. 2. Cohérence spatiale

On dit que les ondes d'un train d'onde sont cohérentes spatialement si leurs vecteurs d'onde restent dirigés dans un espace transversal limité. Ceci veut donc dire que la largeur de la source émettrice doit être limitée afin que cette condition soit vérifiée. Si d est la distance séparant les deux points émetteurs dans une source et λ_0 la longueur d'onde moyenne de la lumière, les franges sont observables tant que d est limitée par la relation : $d^2 \Delta\Omega \approx \lambda_0^2$, où d^2 est appelée la surface de cohérence de la source, et est l'angle solide délimitant le champ d'éclairage.

II.2.2 Théorie électromagnétique

Le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{B} créés, dans le vide, par une source lumineuse satisfont aux équations de Maxwell [22] :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} &= -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} & \text{et} & & \overrightarrow{\text{rot}}\vec{B} &= \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \\ \text{div}\vec{E} &= 0 & & & \text{div}\vec{B} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II-3})$$

A partir de ce système, on obtient les équations de propagation des vecteurs \vec{E} et \vec{B} suivantes :

$$\Delta\vec{E} = \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \quad \text{et} \quad \Delta\vec{B} = \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2} \quad (\text{II-4})$$

qui admettent comme solutions, valables en champ lointain, les ondes planes monochromatiques, de longueur d'onde λ_0 , définies par les relations :

$$\vec{B} = \vec{B} \exp[-i(\omega t - \vec{k}_0 \cdot \vec{r} + \theta)] \quad \text{et} \quad \vec{E} = \vec{E}_0 \exp[-i(\omega t - \vec{k}_0 \cdot \vec{r} + \theta)] \quad (\text{II-5})$$

Où $\vec{k}_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{u}$ est le vecteur d'onde et \vec{u} est un vecteur unitaire décrivant la direction de propagation de l'onde.

II.2.3 Phénomènes d'interférences

Soient deux vibrations monochromatiques isochrones rectilignes \vec{E}_1 et \vec{E}_2 caractérisées par les vecteurs d'ondes \vec{k}_1 et \vec{k}_2 . Elles peuvent s'exprimer sous la forme :

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 &= A_1 \exp\left[-i\left(\omega t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \theta_1\right)\right] \vec{e}_1 \\ \vec{E}_2 &= A_2 \exp\left[-i\left(\omega t - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \theta_2\right)\right] \vec{e}_2\end{aligned}\quad (\text{II.6})$$

Soit :

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 &= \psi_1 \exp[-i\omega t] \vec{e}_1 & \psi_1 &= A_1 \exp\left[i\left(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \theta_1\right)\right] \\ \vec{E}_2 &= \psi_2 \exp[-i\omega t] \vec{e}_2 & \psi_2 &= A_2 \exp\left[i\left(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \theta_2\right)\right]\end{aligned}\quad (\text{II.7})$$

En tout point de l'espace, le champ électrique résultant \vec{E} s'écrit :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \psi_1 \exp[-i\omega t] \vec{e}_1 + \psi_2 \exp[-i\omega t] \vec{e}_2 = (\psi_1 \vec{e}_1 + \psi_2 \vec{e}_2) \exp[-i\omega t] \quad (\text{II.8})$$

L'intensité totale I reçue en ce point est égale au carré de la norme du vecteur \vec{E} , donc :

$$I = \|\vec{E}\|^2 = (\psi_1 \vec{e}_1 + \psi_2 \vec{e}_2) \cdot (\overline{\psi_1 \vec{e}_1 + \psi_2 \vec{e}_2}) = \psi_1 \cdot \overline{\psi_1} + \psi_2 \cdot \overline{\psi_2} + \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 (\psi_1 \overline{\psi_2} + \overline{\psi_1} \psi_2) \quad (\text{II.9})$$

En posant :

$$I_1 = \psi_1 \cdot \overline{\psi_1} \quad \text{et} \quad I_2 = \psi_2 \cdot \overline{\psi_2} \quad (\text{II.10})$$

I devient :

$$I = I_1 + I_2 + 2 \cdot \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 \cdot \text{Re}(\psi_1 \overline{\psi_2}) = I_1 + I_2 + 2 \cdot \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 \cdot \sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (\text{II.11})$$

Le terme $2 \cdot \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 \cdot \sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi$ est à l'origine des interférences et $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ est la différence de phase entre les deux ondes :

$$\varphi = (\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \theta_1) - (\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \theta_2) = (\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r} + (\theta_2 - \theta_1) \quad (\text{II.12})$$

Soit en posant :

$$\begin{aligned}\vec{K} &= \vec{k}_2 - \vec{k}_1 \quad \text{et} \quad \Theta = \theta_2 - \theta_1 : \\ \varphi &= \vec{K} \cdot \vec{r} + \Theta\end{aligned}\quad (\text{II.13})$$

\vec{K} est le vecteur d'interférence et Θ représente la différence de phase à l'origine des coordonnées.

On en conclut qu'il y a effectivement interférence si :

- les vibrations ne sont pas perpendiculaires, sinon le terme d'interférence serait identiquement nul ($\vec{e}_1 \perp \vec{e}_2 \Rightarrow \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 = 0$)
- les deux sources lumineuses sont cohérentes, ce qui signifie que le déphasage φ entre les deux sources ne doit pas être aléatoire.

La solution la plus simple pour satisfaire la première contrainte, consiste à utiliser deux ondes lumineuses qui se déplacent parallèlement. Dans ce cas, le produit scalaire $\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2$ est unitaire et le terme d'interférence s'écrit $2(I_1 I_2)^{1/2} \cos \varphi$.

En optique, la condition de cohérence est assurée en utilisant une source lumineuse primaire qui, par différents moyens (miroirs de Fresnel, fentes ou trous d'Young, lame séparatrice), donne naissance à deux sources secondaires en phase. Les ondes émises présentent, en tout point P de l'espace d'interférence, une différence de phase φ indépendante du temps qui varie proportionnellement à la différence δ des chemins optiques parcourus :

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta \quad (\text{II.14})$$

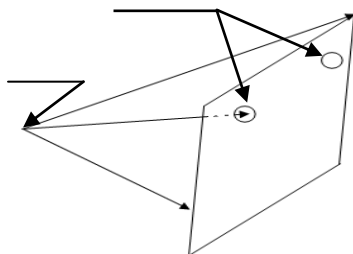
Où λ est la longueur d'onde des deux vibrations lumineuses.

II.3 Interférence de deux ondes monochromatiques issues d'une source ponctuelle

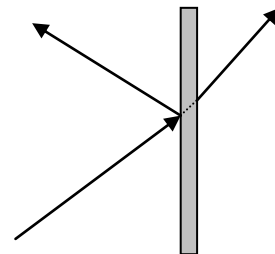
Les dispositifs interférométriques provoquent des interférences entre deux ou plusieurs ondes. On distingue classiquement deux familles d'interféromètres. La première famille concerne les dispositifs à division du front d'onde, là où un front d'onde primaire est divisé en deux faisceaux spatialement différents, qui suivent des chemins différents avant d'être recombinaés pour produire des interférences. Par exemple, le dispositif des trous de Young (figure II.3.a).

La seconde famille concerne les dispositifs à division d'amplitude, là où un front d'onde primaire est divisé en deux faisceaux spatialement identiques qui suivent des chemins différents avant d'être recombinaés et ainsi produire des interférences (figure II.3.b). L'interféromètre de Michelson entre dans cette catégorie.

Si dans le premier cas, on isole deux parties de l'onde issue d'une source mère pour constituer deux sources secondaires identiques, dans le second cas, on divise l'amplitude de l'onde venant d'une source en deux parties à l'aide d'un miroir semi réfléchissant.[23 ;24]



a. Division du front d'onde



b. Division d'amplitude

Fig. II.3. Types d'interféromètres

II.3.1 Interféromètres à division de front d'onde

a. Trous ou fentes d'Young

Le système utilise une source primaire et deux sources secondaires qui sont soit des trous de tailles microscopiques soit des fentes fines (voir figure II.4)

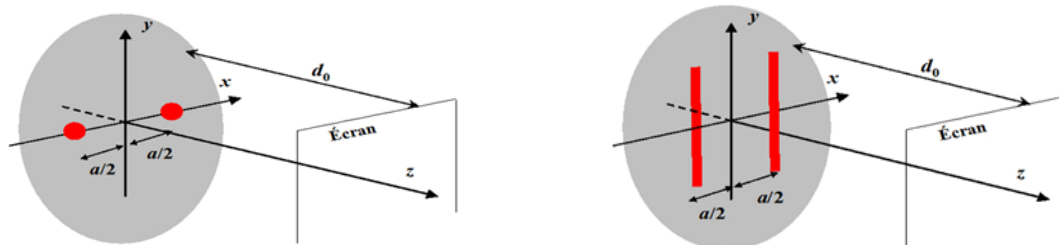


Fig. II.4. Dispositif des trous (droite) et des fentes (gauche) d'Young

Le front d'onde émis par la source primaire est découpé en deux fronts d'ondes secondaires distincts par les trous ou fentes qui se comportent comme des sources secondaires. En toute rigueur, les trous ou fentes étant très étroits, la lumière diffracte vers l'écran et on observe alors les interférences entre les deux figures de diffraction des sources secondaires. Plusieurs systèmes interférentiels à division de front d'ondes existent, nous citerons:

Miroirs de Fresnel, Biprisme de Fresnel, Bilentilles de Billet et Miroirs de Lloyd [25]

I.3.2. Interféromètres à division d'amplitude

a. lame à faces parallèles

On considère une lame à faces parallèles d'indice n , d'épaisseur e située dans l'air, éclairée par une source monochromatique (figure II.5). Une telle lame fournit deux faisceaux émergents, auxquels nous pouvons associer deux sources ponctuelles cohérentes. La lumière ainsi réfléchie peut être à l'origine d'un phénomène d'interférences [26].

Le rayon incident SA issu de la source monochromatique S se réfléchit partiellement en A suivant la direction AR₁ tandis qu'une partie du rayon réfracté AB est réfléchié suivant BC puis réfracté à nouveau dans la direction CR₁. Les rayons suivants sont négligés car l'énergie lumineuse de ces rayons décroît très rapidement. Les deux rayons AR₁ et CR₁ émergent parallèlement entre eux, ils interfèrent à l'infini, les interférences sont dites localisées à l'infini.

Plusieurs configurations d'interféromètre qui portent le nom de leur inventeur ont été développées depuis le XIX^{ème} siècle à partir des anneaux de Newton et de l'interféromètre de Fizeau, Michelson, Twyman-Green, Mach-Zender, Sagnac, Bath...

A titre explicatif nous donnerons ci-dessous le principe de l'interféromètre de Michelson.

II.4.1 Interféromètre de Michelson

Dans sa version la plus simple, l'interféromètre de Michelson est composé d'une source de lumière, de deux miroirs plans réfléchissants, d'une lame semi-réfléchissante et d'un écran. La figure II.7 décrit le dispositif expérimental. Le miroir 1 est situé à la distance d_1 de la lame et le miroir 2 à la distance d_2 . Suivant les deux trajets, on a deux systèmes optiques qui jouent le rôle de miroir. Pour le trajet (1) : séparatrice puis le miroir M_1 . Donc la source 1, image de la source primaire S , est donnée par le symétrique de S par rapport à la séparatrice puis par le symétrique par rapport à M_1 . La démarche est identique sur le trajet (2) avec le miroir M_2 , puis la lame séparatrice. L'onde sphérique émise par la source est séparée en deux ondes sphériques secondaires issues des deux sources secondaires et se propageant vers l'écran.

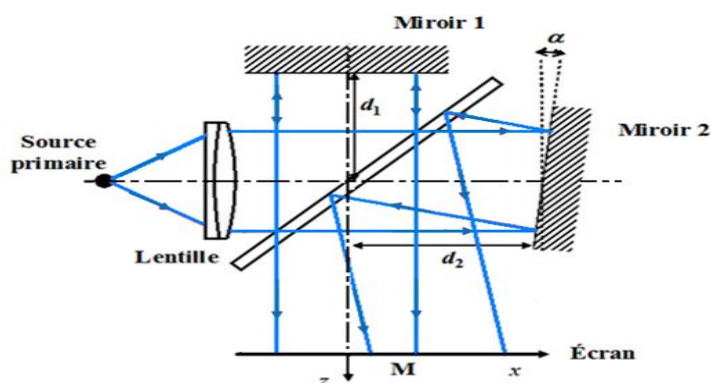


Fig. II.7. Interféromètre de Michelson

II.5. Applications de l'interférométrie

Les interférences sont utilisées pour mettre en évidence de faibles variations d'indice par exemple celles de l'air comprimé dans un écoulement d'air autour d'une maquette d'avion (Mach Zehnder en soufflerie) ou celles produites par le passage d'onde gravitationnelles ;

Ces interféromètres rendent des services précieux :

- ♦ en contrôle de surface. On peut contrôler une surface avec une précision de l'ordre du $1/10\mu\text{m}$.
- ♦ en spectroscopie pour la mesure précise des longueurs d'onde et des largeurs de raie spectrale par interférométrie par transformée de Fourier. L'interféromètre de Fabry-Pérot est par exemple utilisé comme spectromètre à haute résolution.

- ♦ pour la stabilisation des satellites ; c'est le cas de l'interféromètre de Sagnac qui est utilisé comme gyroscope et gyrolaser.
- ♦ En mécanique des fluides pour la visualisation des écoulements avec l'interféromètre de Mach - Zehnder par exemple.

III.1 Introduction

Un grand nombre de techniques de mesures optiques reposent sur le phénomène d'interférences qui code le mesurande dans la phase d'un signal d'intensité périodique. Le signal interférométrique bidimensionnel qui est alors enregistré par l'intermédiaire d'un capteur d'images « camera CCD » est alors appelé figure de franges. Ces franges apparaissent usuellement comme des bandes alternativement brillantes ou sombres qui représentent en fait des lignes de contour du mesurande, au niveau du plan image de démodulation. Les techniques d'interférométrie ont fourni des mesures seulement qualitatives sous forme des franges de corrélation nécessitant des opérateurs qualifiés pour les interpréter. L'application du processus de traitement d'image digital et des techniques de mesure de phase a permis d'obtenir des mesures quantitatives. Dans ce cadre, de nombreux groupes de recherches ont investi différentes approches pour l'automatisation de l'analyse des franges. Ces techniques par mesure de phase sont largement utilisées dans ce domaine pour la détermination de la phase d'une figure d'interférence. Ces techniques sont divisées en deux catégories : celles qui prennent l'information de phase séquentiellement, et celles qui les prennent simultanément. Les méthodes du premier type sont les techniques de mesures de phase temporelle ; celles du deuxième type, c'est les techniques de mesure de phase spatiale.

Dans notre travail, nous nous intéressons seulement aux méthodes temporelles. L'idée de base de ces techniques est d'introduire une modulation de phase temporelle (introduire un décalage de phase entre les différentes images résultantes par la projection des franges sur les surfaces à contrôler) pour accomplir les mesures. En mesurant l'intensité de l'interférogramme pour différents décalages de phase, on peut déterminer la phase à l'aide d'un micro-ordinateur. Parmi les techniques de calcul de phase utilisées, on cite la technique de décalage de phase (phase shifting) qui sera expliquée en détail.

L'analyse automatique des franges est une technique utilisée pour le contrôle et la mesure des défauts de surfaces tels que les fissures et creux, bosses. L'emplacement, la profondeur et la taille de tels défauts peuvent être déterminés automatiquement. Les mesures de ces défauts nécessitent des données tridimensionnelles exploitables par ordinateur. Ceci est réalisé par la technique de projection des franges sur l'objet à étudier, c.à.d. accéder à l'information en profondeur. L'objet est alors observé par un camera CCD, dont l'image est numérisée et stockée pour être traitée numériquement et analysée par un système informatique.

III.2 La projection des franges

La projection de franges, au sens où nous l'entendons, fait partie des méthodes d'analyse de contour par voie optique. La première utilisation de projection de franges pour déterminer la topographie de surface a été présentée par (Rowe et Welford. 1967). C'est une technique pratique pour le contournage des objets qui sont trop grossiers pour être mesurés avec l'interférométrie standard. Projection de franges est liée à la triangulation optique en utilisant un seul point de sectionnement lumière, où une seule ligne est projetée sur un objet et visionné dans une direction différente pour déterminer le contour de surface (Case et al. 1987). Projection de franges est aussi une technique utile pour aider à la compréhension de l'interférométrie [28 ; 29].

La projection de franges est une technique de mesure de la forme d'une surface. Cette mesure donne la cote de chaque point de la surface. Quand on projette obliquement un réseau de traits lumineux parallèles sur la surface à étudier, celle-ci joue le rôle d'un écran déformé et le réseau est distordu. Cette distorsion est en relation directe avec le profil de la surface. L'analyse de l'image du réseau déformé est réalisée par une méthode appelée (décalage de phase). Cette méthode optique non invasive réalise des mesures sans contact. Elle a l'avantage de déterminer le profil de la surface étudiée à partir de l'acquisition d'une seule image [30]. Ces méthodes peuvent être divisées en deux classes qui utilisent:

1. soit un éclairage incohérent :

- ◆ projection de réseaux binaires ;
- ◆ projection de réseaux sinusoïdaux ;
- ◆ moiré de projection ;
- ◆ moiré d'ombre...

2. soit un éclairage cohérent :

- ◆ interférence par prisme de Wollaston ;
- ◆ interférence par interféromètre de Michelson ;
- ◆ holographie à deux angles d'illumination...

III.3 Principe de projection des franges

Les franges sont projetées sur la scène de mesure (ou l'objet à observer) et détectées à l'aide d'une camera CCD sous un angle θ (comme le montre la figure ci-dessous). La déflexion latérale des franges détectées par la camera est proportionnelle à la topographie de l'objet c à d des hauteurs et profondeurs dans cet objet. La valeur de cette mesure est soutirée de la phase de la figure des franges déformées. Les lignes projetées peuvent provenir d'un projecteur diapo, d'une vidéo projection, d'un SLM ou d'un interféromètre.....

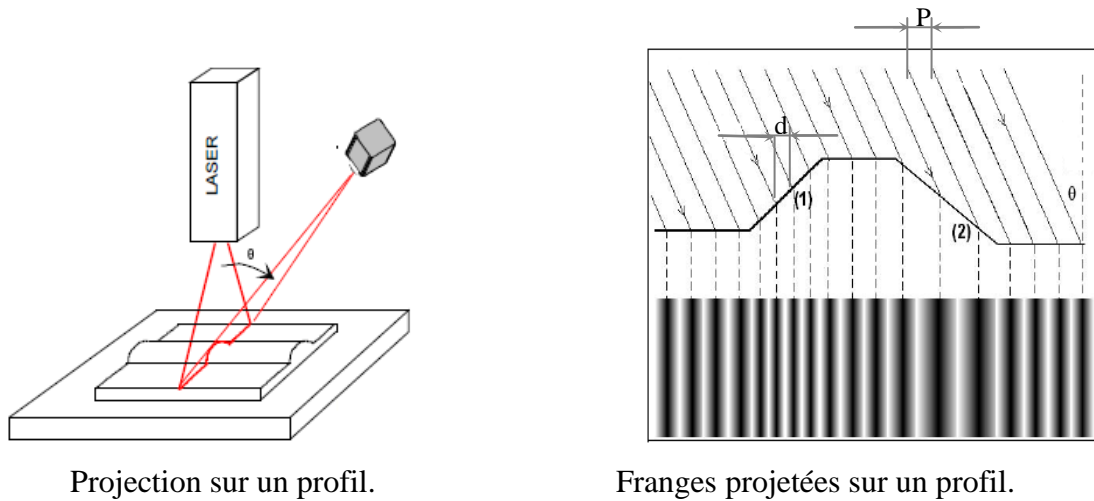


Fig. III. 1. Angle de projection et interfrange .sur une surface courbe.

Les hauteurs et profondeur z sont données par la relation simple suivante :

$$z = \frac{\varphi}{2\pi} \lambda_T \tag{III.1}$$

Avec

$$\lambda_T = \frac{p}{\tan \theta} \tag{III.2}$$

Où p est la période des franges projetées (ou interfrange) et φ la phase déduite de la figure de frange. Le schéma de la figure III.1 montre des franges rectilignes projetées avec une inclinaison θ .

Le principe du *contouring* consiste à analyser des franges, en général initialement rectilignes parallèles et périodiques, qui sont déformées par la surface de l'objet à étudier. Un observateur, situé dans une direction quelconques, observe des franges courbées. Si la surface est plane, il observe des franges rectilignes.

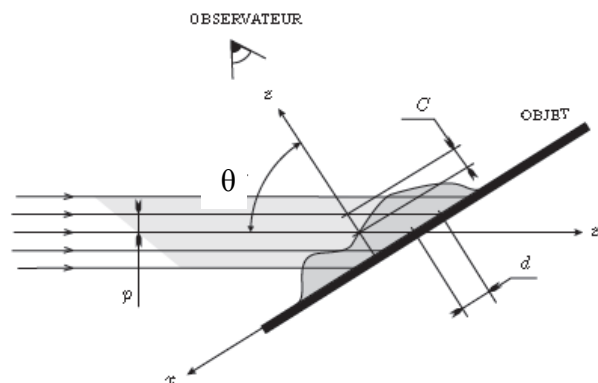


Fig. III. 2 Angle de projection et interfrange. [29]

La figure III. 2 montre des franges rectilignes projetées avec une inclinaison θ , sur une surface courbe.

Soit $R(Oxyz)$ le repère lié à l'objet. Soit p l'interfrange dans un plan normal à z_p , la direction de la lumière projetée. L'interfrange projeté, d , est :

$$d = \frac{p}{\cos \theta} \quad (\text{III.3})$$

avec d (m) : interfrange projetée,

p (m) : interfrange dans un plan normal à z_p ,

θ (rad) : angle de projection des franges par rapport à l'observateur.

Pour analyser la forme de l'objet suivant z , on définit un coefficient de contour, C , tel que :

$$c = \frac{p}{\cos \theta \tan \theta} = \frac{d}{\tan \theta} \quad (\text{III.4})$$

D'un point de vue pratique, C correspond à la projection de l'interfrange projetée, d , sur z .

La sensibilité de la mesure de contour dépend de θ . Lorsque $\theta = 0^\circ$, la sensibilité est nulle, l'observateur voit des franges rectilignes. Lorsque θ tend vers 90° , la sensibilité augmente, mais selon la forme de l'objet il y a apparition d'ombres du côté opposé à la source, empêchant la mesure de la forme sur tout le champ d'observation. De plus, pour obtenir une bonne résolution suivant z , l'interfrange doit être la plus faible possible

Les méthodes choisies pour analyser le contour doivent permettre de mesurer des écarts de position suivant z allant de quelques micromètres à une centaine de micromètres. La technique doit donc permettre un réglage simple de α . Elle doit aussi permettre l'obtention d'une résolution optimale dans le plan. La caméra que nous utilisons possède 768×576 pixels.

Un tel interfrange n'est pas possible à réaliser en éclairage incohérent. En effet l'obtention des franges en éclairage incohérent nécessite de projeter un réseau de plusieurs dizaines de traits par millimètre. Il y a alors dispersion de la lumière et apparition d'un phénomène d'irisation. Si l'on projette un réseau sinusoïdal à l'aide d'une matrice de cristaux liquides, l'interfrange du réseau limite à elle seule la résolution spatiale. Il faut de plus disposer d'une bonne optique de projection, dont la profondeur de champ constitue de toute façon une limite. Le choix de l'interférométrie s'impose donc logiquement pour générer les franges. À ce stade, il faut néanmoins faire une remarque. [30 ; 31]

Pour observer des franges d'interférence projetées avec une incidence quelconque sur un objet, la surface de celui-ci doit être optiquement rugueuse, sans quoi la lumière n'est réfléchie que dans la direction spéculaire. Or, l'éclairage d'un objet optiquement rugueux par une lumière cohérente génère inévitablement du *speckle*. Ce *speckle* constitue un bruit de hautes fréquences

qu'il faut filtrer pour observer correctement les franges. Il limite donc la résolution spatiale de la méthode de projection de franges d'interférence. On peut donner une estimation rapide à cette limite. La taille moyenne du grain de *speckle* dans le plan image est définie comme :

En éclairage cohérent, la construction des franges est réalisée par l'interférence de deux faisceaux non colinéaires (Fig. 3.2). [32 ; 33 ; 34].

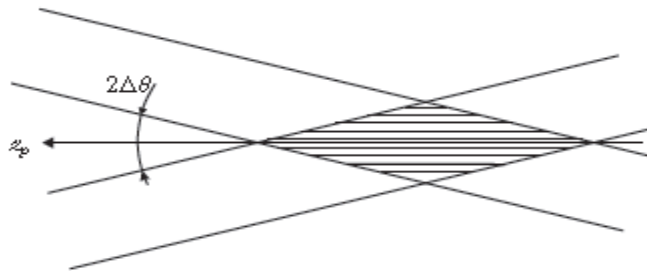


Fig. III. 3 Construction des franges en éclairage cohérent

L'interfrange, p , dans un plan normal à la direction, z_p , du faisceau est définie par :

$$p = \frac{\lambda}{2 \sin \Delta\theta} \quad (\text{III.5})$$

Avec p (m) : interfrange dans un plan normal à z_p ,

λ (m) : longueur d'onde de la lumière,

θ (rad) : demi-angle entre les faisceaux interférents.

Le montage optique choisi pour réaliser les interférences est l'interféromètre de Michelson.

Il permet :

- ◆ une bonne adaptation aux dimensions latérales;
- ◆ une relative simplicité de mise en place et de réglage ;
- ◆ une étendue de mesure réglable en jouant sur les angles de projections ;
- ◆ une relativement bonne stabilité dans le temps...

III.4 Décalage de phase (phase shifting)

Le but de la plupart des techniques optiques de métrologie est de produire un modèle bidimensionnel d'intensité (ou l'interférogramme) modulé en phase par la quantité physique mesurée. Bien que l'analyse visuelle du modèle de franges permette de réaliser un diagnostic qualitatif il y a un besoin croissant pour des résultats quantitatifs. Dans ce qui suit nous présenterons une technique habituelle utilisée pour récupérer automatiquement l'information quantitative décrivant le paramètre physique de tels interférogrammes, en l'occurrence la technique de décalage de phase ou PSI (*Phase Shifting Interferometry*).[35 ;36]

III.4.1 Concepts fondamentaux

Le principe de base de cette méthode de mesure consiste à introduire un déphasage entre les faisceaux objet et référence d'un interféromètre. En mesurant la figure d'intensité qui en résulte, la phase de l'onde peut être déterminée à l'aide d'un système de traitement de données. Dans un interféromètre, cette modulation peut être induite à l'aide d'un miroir en déplacement, d'une lame de verre inclinée, d'un polariseur tournant ou d'un réseau de diffraction mobile... Tous ces instruments de décalage permettent de produire des déphasages continus ou discrets entre les faisceaux objet et référence. Donc, le calcul de la phase à pour objectif l'extraction d'une mesurande. Cependant, la phase mesurée par la méthode de décalage de phase est déterminée modulo 2π .

III.5 L'importance de la phase

La méthode de décalage de phase fournit des figures de franges (holographie, interférométrie, moiré, speckle) ou de lignes (méthode de la grille). Fondamentalement, l'image que va pouvoir acquérir une caméra et qui va être numérisée se présente sous la forme d'un champ d'intensité :

$$I_j(I_m, v, \phi) = I_m [1 + v(x_0, y_0) \cdot \tan(\phi(x_0, y_0))] \quad (\text{III.6})$$

Où I_m , $v(x_0, y_0)$ et $\phi(x_0, y_0)$ sont respectivement l'intensité moyenne, la visibilité, et la phase locale de l'interférogrammes "j" déphasé par rapport au premier d'un incrément de phase α_j . Le système d'équations ainsi formé, permet de déterminer la phase initiale $\phi(x_0, y_0)$ à condition que I_m , v et ϕ restent constants lors du décalage.[39] L'interférogramme est en général enregistré par une caméra CCD se composant d'une matrice de détecteurs photoélectriques qui échantillonne le signal bidimensionnel, puis digitalisé par un convertisseur analogique-numérique et stocké sur le disque d'un ordinateur pour analyse ultérieure. I_m et $v(x_0, y_0)$ ne sont jamais strictement constantes, mais lentement variables sur l'ensemble du champ. La fonction $\tan\phi$ est 2π -périodique et représente le profil des franges. Dans les cas les plus simples, comme l'interférométrie à deux ondes, cette fonction se réduit à un cosinus, et l'on retrouve la formule classique III. 6.

$$I_j(x, y) = I_m [1 + v(x_0, y_0) \cos(\phi(x_0, y_0) + \alpha_j)] \quad (\text{III.7})$$

Ou

$$I(x, y) = I_m [1 + v(x, y) \cos \phi(x, y)] \quad (\text{III.8})$$

Dans d'autres cas, comme le moiré, les variations d'intensité n'ont pas un profil sinusoïdal, et la fonction tangente admet un développement en série de Fourier qui n'est pas

limité à son premier terme. Un exemple de comparaison entre l'image acquise (image d'intensité) et l'image de phase est représenté sur la Figure. III. 5. Pour toutes les méthodes que nous allons considérer, le mesurande (déplacement, déformation, forme, etc.) est directement relié à la phase ϕ . Cette dépendance peut prendre la forme d'une simple relation de proportionnalité, le premier paramètre à extraire de l'image est la phase.

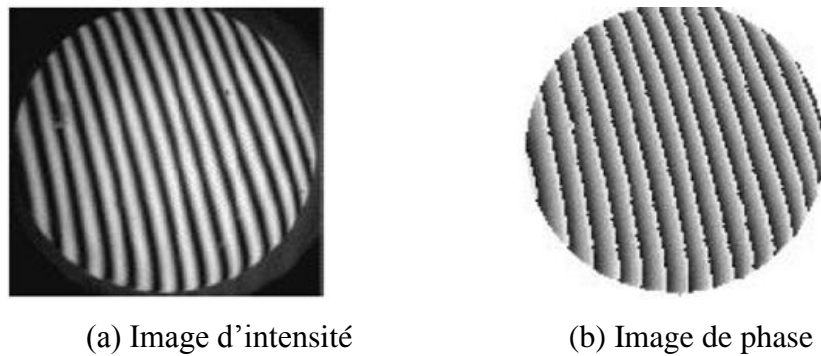


Fig. III. 5. Passage d'une image d'intensité à une carte de phase

Le traitement des franges est le processus permettant de passer du champ d'intensité décrit par l'équation III.6 au champ de phase correspondant. Cette première étape ne donne que la phase modulo 2π , il faut souvent continuer le traitement par un « dépliement de phase » visant à rétablir la continuité du champ de phase en supprimant les sauts de 2π .

Différentes méthodes existent pour calculer la phase [40] :

- ◆ calcul par transformée de Fourier ;
- ◆ calcul par transformée en ondelettes ;
- ◆ calcul par décalage de phase...

Quelque soit la méthode utilisée, elle permet de déterminer les trois inconnues de la relation (III.8) : $I_0(x, y)$, $v(x, y)$ et $\phi(x, y)$.

III.6 Algorithmes de mesure de la phase

Plusieurs algorithmes de reconstruction de la phase ont été développés ces dernières années, et de nouvelles techniques sont publiées régulièrement. Chaque algorithme a ses avantages et ses inconvénients. Le choix d'un algorithme dépend du degré de son adaptation au problème posé. Les algorithmes de mesure de phase sont basés sur l'acquisition d'une série de N interférogrammes (allant généralement de 3 à 5) obtenus avec des déphasages connus. Dans certaines méthodes, la phase est décalée d'une quantité discrète entre deux enregistrements consécutifs (mode discret), tandis que dans d'autres, elle varie continuellement. Trois inconnues sont dénombrées dans l'équation (III.7) (I_0 , v et ϕ), d'où un minimum de trois mesures de

l'intensité est nécessaire pour déterminer la phase. Deux types d'algorithmes existent : conventionnels et temporels.

III.6.1 Algorithme conventionnel de calcul de la phase

Dans le cas des milieux transparents dans les quelles les rayons lumineux sont supposés être des lignes droites. Dans ce cas, la différence de marche optique ΔL des rayons se propageant suivant la direction Z est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta L = [n(x, y) - n_0] dz = N\lambda \quad (\text{III.9})$$

Où : $n(x, y)$: fonction de l'indice de réfraction ;

n_0 : indice de réfraction dans le vide ;

N nombre de franges et λ la longueur d'onde.

L'évaluation d'un interférogramme consiste à déterminer $\Delta L(x, y)$ à partir des franges d'interférence et ensuite le calcul de $[n(x, y, z) - n_0]$.

La troisième consiste à relier $n(x, y, z)$ aux autres propriétés physiques. Pour simplifier nous considérons que l'objet est homogène dans la direction d'observation, alors l'équation (III.9) devient :

$$\Delta L = [n(x, y) - n_0] e = N\lambda \quad (\text{III.10})$$

Où : $e = z_1 - z_2$ est l'épaisseur de l'objet.

La différence de phase est reliée à la différence de marche optique par la relation :

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} e [n(x, y) - n_0] \quad (\text{III.11})$$

La conversion de la différence de phase en nombre de franges N donne :

$$N = \frac{\Delta\varphi(x, y)}{2\pi} = \frac{e}{\lambda} [n(x, y) - n_0] \quad (\text{III.12})$$

Donc :

$$n(x, y) - n_0 = \frac{N}{e} \lambda \quad (\text{III.13})$$

Le profil consiste à mesurer la quantité $n(x, y)$ sur l'interférogrammes et ensuite, relier la variation d'indice aux propriétés physiques recherchées.

III.6.2 Algorithmes temporels

En interférométrie à deux ondes, l'intensité est donnée par :

$$I(x, y) = I_0(x, y) \{1 + v \cos[\phi(x, y)]\}$$

$$I_0(x, y) = \langle I_1(x, y) + I_2(x, y) \rangle v \quad (\text{III.14})$$

Le contraste des franges v est donné par :

$$v = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \quad (\text{III.15})$$

La méthode à décalage de phase consiste donc à déterminer les inconnues I_0 , v et $\phi(x, y)$ à partir de l'intensité I des images entre lesquelles on a ajouté un incrément α_i à la phase $\phi(x, y)$.

Donc il faut appliquer un algorithme de calcul pour extraire les variables recherchées. On trouve en pratique différents algorithmes. Les paramètres essentiels dans ces techniques de mesure sont le mode de variation de la phase (discret ou continu), la fréquence d'acquisition des franges d'interférence et le nombre N d'interférogrammes utilisés pour calculer la phase.

a. Algorithme à trois pas (three-step algorithm)

C'est l'algorithme de base; la phase est calculée $\phi(x, y)$ à partir de l'intensité de trois interférogrammes enregistrés pour trois décalages de valeurs angulaires

1) pour $\alpha_i = \pi/4, 3\pi/4$ et $5\pi/4$:

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= I_0(x, y) \left\{ 1 + v(x, y) \cos\left(\phi(x, y) + \frac{\pi}{4}\right) \right\} \\ I_2(x, y) &= I_0(x, y) \left\{ 1 + v(x, y) \cos\left(\phi(x, y) + \frac{3\pi}{4}\right) \right\} \\ I_3(x, y) &= I_0(x, y) \left\{ 1 + v(x, y) \cos\left(\phi(x, y) + \frac{5\pi}{4}\right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{III.16})$$

La résolution du système (III.22), nous donne les expressions de la phase et de la visibilité en un point de coordonnées (x, y) :

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{I_3(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_2(x, y)} \right] \quad (\text{III.17})$$

$$v(x, y) = \frac{\sqrt{(I_1(x, y) - I_2(x, y))^2 + (I_2(x, y) - I_3(x, y))^2}}{2I_0(x, y)} \quad (\text{III.18})$$

Un autre algorithme qui calcule la phase $\phi(x, y)$ à partir de l'intensité de trois interférogrammes enregistrés pour trois décalages de valeurs angulaires ($\alpha_i = -2\pi/3, 0$ et $2\pi/3$)

b. Algorithme à quatre pas (Four-step algorithm)

C'est l'algorithme le plus habituel, la phase est calculée à partir de l'intensité de quatre interférogrammes enregistrés pour quatre décalages angulaires $0, \pi/2, \pi$ et $3\pi/2$.

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= I_0(x, y)\{1 + v(x, y) \cos \phi(x, y)\} \\
 I_2(x, y) &= I_0(x, y)\left\{1 + v(x, y) \cos\left(\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}\right)\right\} = I_0(x, y)\{1 - v(x, y) \sin \phi(x, y)\} \\
 I_3(x, y) &= I_0(x, y)\{1 + v(x, y) \cos(\phi(x, y) + \pi)\} = I_0(x, y)\{1 - v(x, y) \cos \phi(x, y)\} \\
 I_4(x, y) &= I_0(x, y)\left\{1 + v(x, y) \cos\left(\phi(x, y) + \frac{3\pi}{2}\right)\right\} = I_0(x, y)\{1 + v(x, y) \sin \phi(x, y)\}
 \end{aligned} \tag{III.19}$$

Après résolution du système d'équations(III.19), on obtient la phase et visibilité tels que :

$$\phi(x, y) = \arctan\left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right] \tag{III.20.a}$$

$$v(x, y) = \frac{2 \times \sqrt{(I_4(x, y) - I_2(x, y))^2 + (I_1(x, y) - I_3(x, y))^2}}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \tag{III.20.b}$$

c. Algorithme à cinq pas (Five-step algorithm)

Une approche utilisée pour réduire les erreurs de phase dues à la mis-calibration et appelée technique de la moyenne proposée par Schwider [43]

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= I_0(x, y)[1 + v \cos(\phi(x, y) - \pi)] \\
 I_2(x, y) &= I_0(x, y)\left[1 + v \cos\left(\phi(x, y) - \frac{\pi}{2}\right)\right] \\
 I_3(x, y) &= I_0(x, y)[1 + v \cos(\phi(x, y))] \\
 I_4(x, y) &= I_0(x, y)\left[1 + v \cos\left(\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}\right)\right] \\
 I_5(x, y) &= I_0(x, y)[1 + v \cos(\phi(x, y) + \pi)]
 \end{aligned} \tag{III.21}$$

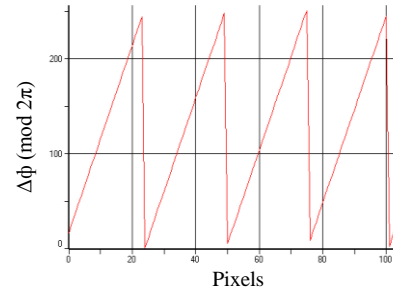
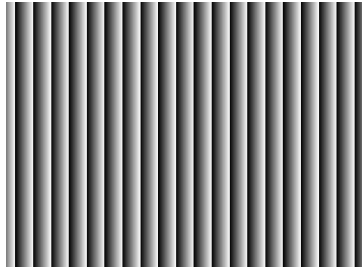
La résolution du système d'équations(III.21) ci-dessus conduit à la solution suivante :

$$\phi(x, y) = \arctan\left[\frac{2(I_4(x, y) - I_2(x, y))}{I_5(x, y) + I_1(x, y) - 2I_3(x, y)}\right] \tag{III.22.a}$$

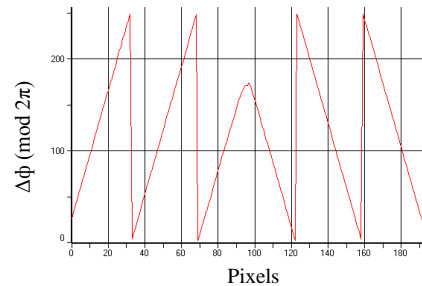
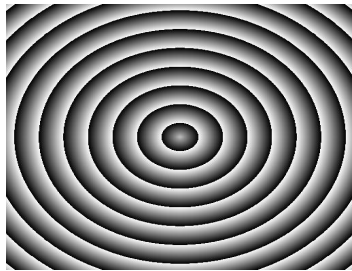
$$v(x, y) = \frac{2 \times \sqrt{4(I_2(x, y) - I_4(x, y))^2 + (2I_3(x, y) - I_5(x, y) - I_1(x, y))^2}}{I_1 + 2(I_2 + I_3 + I_4) + I_5} \tag{III.22.b}$$

III.7 Déroulage de la phase (Phase unwrapping)

La distribution de la phase déterminée par les techniques de décalage de phase a la forme d'une fonction en dents de scie (figure III.6) dont une discontinuité qui se répète chaque 2π ; elle est dite "enroulée". [33]



a) Phase avant déroulage « franges rectilignes »

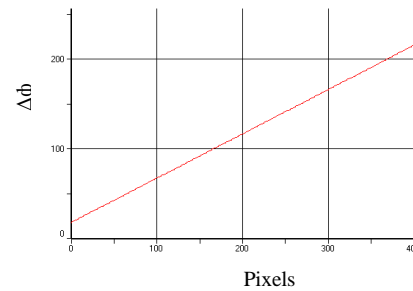
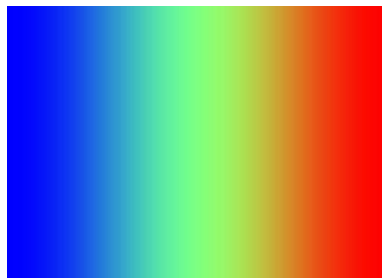


a) Phase avant déroulage « franges circulaire »

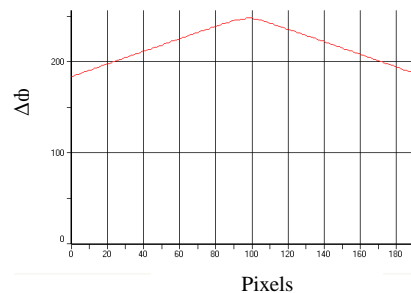
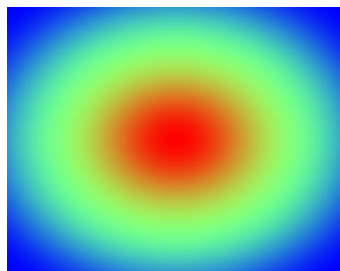
Fig. III. 6. Phase avant déroulage « Variation discontinue de la phase optique »

Une fois que la phase est détectée, il faut procéder au dépliement de phase pour représenter le « mesurande » physique (longueur, déplacement, pente, etc. . .). Déplier la phase signifie supprimer les sauts de 2π présents, en ajoutant ou supprimant localement le multiple de 2π adéquat (figure III.7).

La procédure est triviale dans le cas unidimensionnel : il suffit de contrôler la différence de phase entre deux pixels voisins. Si cette différence est en valeur arithmétique plus grande que π , par exemple, on rajoute (ou soustrait, selon le signe de cette différence) 2π à la valeur de la phase du deuxième pixel et à tous les pixels suivants.



a) Phase après déroulage « franges rectilignes »



a) Phase après déroulage « franges circulaire »

Fig. III. 7. Déroulage de phase « Variation continue de la phase optique ».

III.8 Sources d'erreurs

L'algorithme de calcul de la phase est choisi en compromis entre la sensibilité aux diverses sources d'erreur et l'effort de calcul informatique fourni. Ces erreurs affectent la précision des mesures. Cette précision peut être déterminée par la soustraction de deux images identiques prises en temps différents et calculer la racine carrée de la différence. Cependant pour un système bien calibré cette valeur ne doit pas dépasser $\lambda/100$ [48].

La plus part des erreurs qui influent sur la précision de mesure de la phase sont causées par:

- ◆ Les vibrations.
- ◆ Les composants du système de mesure (miroir, lame séparatrice, détecteur...)
- ◆ Une faible visibilité conduit à une importante erreur de phase, pour minimiser cet effet l'intensité doit couvrir autant que possible les éléments détecteurs de la caméra CCD et l'échantillonnage de la figure d'interférence doit être suffisant pour que la visibilité ne soit pas réduite.

IV.1. Introduction

Nous avons décrit, dans les chapitres précédents, les modes d'obtention des franges d'interférence et les méthodes utilisées pour les analyser. Nous allons maintenant nous intéresser à l'application dans différentes situations d'expérimentation.

Dans ce chapitre nous présentons une description de notre montage de triangulation, du système de projection des franges, de la technique de décalage de phase utilisée et les méthodes d'analyse des franges projetés sur la scène à contrôler, afin de déterminer le profil et l'état de surface des objets étudiés.

En suite, nous exploitons les images des interférogrammes obtenus par la technique de décalage de phase en utilisant les logiciels *IDEA (Interferometrical Data Evaluation Algorithms)* et *Image-Pro Plus* pour déterminer la phase des franges, et par conséquent déterminer le profil et la rugosité des surfaces selon les relations décrites dans les chapitres précédents.

Le montage expérimental adopté est illustré par la figure IV.1. Lorsqu'une surface est éclairée sous incidence inclinée à un angle θ , par une source lumineuse cohérente et parallèle (laser He-Ne), on observe des franges parallèles formées par le passage du faisceau laser à travers les transparents sur les quelles imprimées des franges rectilignes. Toute déformation ou déplacement de ces franges sont proportionnels au relief de la surface et se traduisent par une modification spatiale du réseau de franges. Celui-ci est enregistré périodiquement par une caméra CCD associée à un système d'acquisition et de traitement d'images.

Le principe se base sur l'évaluation de la différence de phase initiale en tout point de la surface, à laquelle on ajoute une phase supplémentaire de $\pi/2$. Un algorithme à quatre pas permet de déduire la variation de la phase $\varphi(x, y)$ après traitement d'images.

Par ailleurs, la technique utilisée pour introduire le décalage de phase est l'impression de quatre réseaux de franges sur papier transparent décalés l'un par rapport l'autre de $\pi/2$.

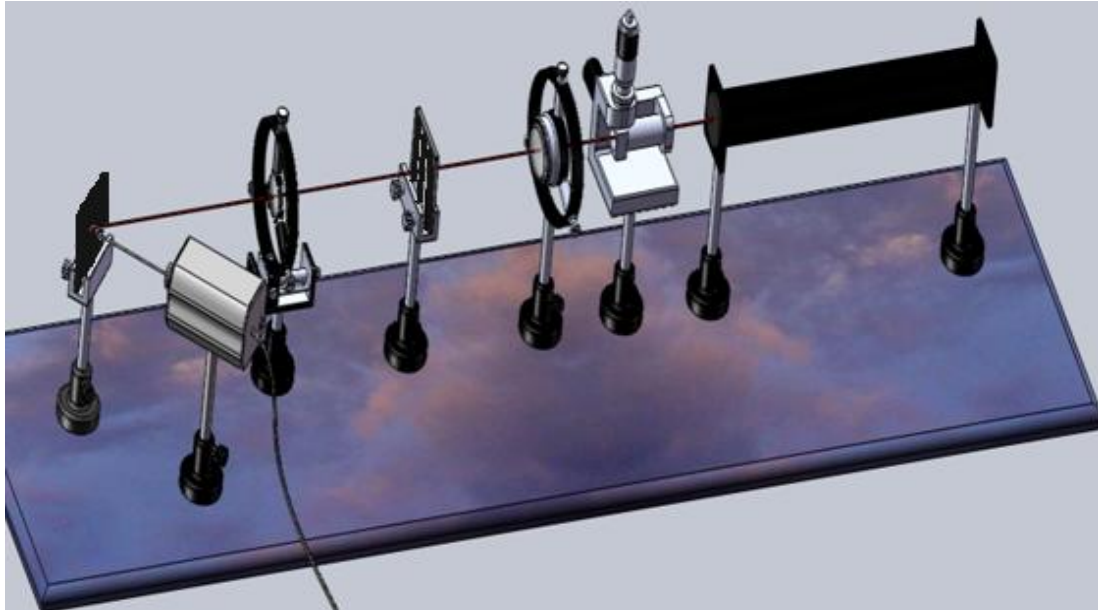


Fig. IV.1. Montage pour la projection des franges

IV.2. Description du système et exploitation :

La figure. IV.2. est un diagramme montrant le système de projection des franges adopté. Il se compose de deux sous-systèmes: l'un optique et l'autre numérique.

Le sous système optique comporte un laser, un filtre spatial, un élargisseur de faisceau, un réseau des franges et d'une lentille. Son rôle est de projeter des franges sur la surface de l'objet. Une caméra CCD fournit l'interface entre le sous système optique et numérique composé d'un convertisseur analogique numérique et un système informatique.

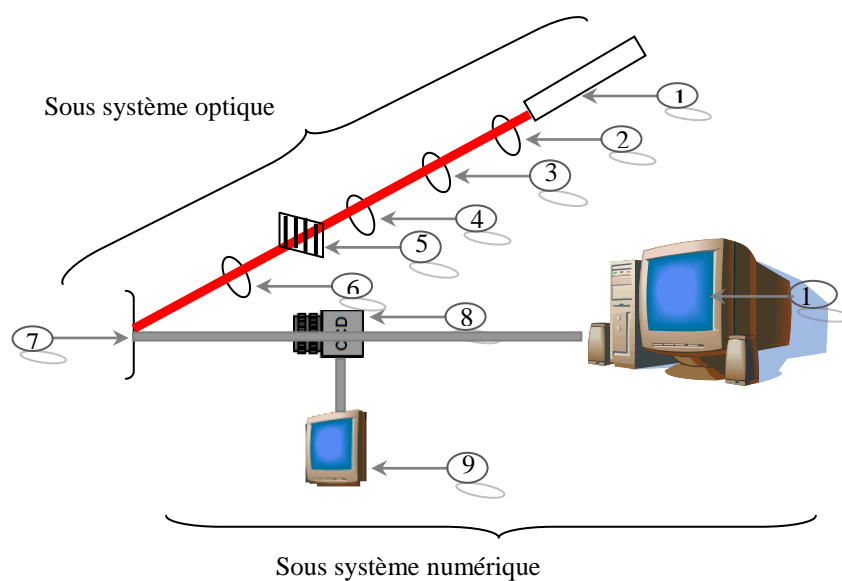


Fig. IV.2. Le système complet

Les éléments qui constituent le dispositif sont les suivants:

- 1: Laser He-Ne (632,8 nm);
- 2: Filtre spatial 10 μ m;
- 3: Objectif de microscope 50x / 0.8 ;
- 4: Objectif photographique $f= 210$ mm ;
- 5: Réseau de franges ;
- 6: Lentille de projection $f=80$ mm;
- 7:Objet ou surface à contrôler ;
- 8: Camera CCD (768 \times 576 pixels ; résolution 96)
- 9: Moniteur ;
- 10 : micro – ordinateur.
 - ◆ Une carte d'acquisition de type « *MATROX* » permettant la numérisation et le stockage des images.
 - ◆ Un logiciel de traitement et d'évaluation des données interférométriques « *IDEA* »
 - ◆ Un logiciel de traitement numérique des images « *Image-Pro Plus* ».

La source laser (1) émet un faisceau avec une puissance de 20 mw qui est filtré et focalisé par le filtre spatial (2), élargie par l'objectif (3,4). Un modèle de frange est formée par le passage du faisceau élargi à travers un réseau d'amplitude de modulation sinusoïdale (5). La lentille (6) projette les franges sur la surface de l'objet à contrôler (7). La camera CCD (8) capte l'image de la figure de franges projetée sur la surface après un réglage fin de l'image qui est visualisée par un moniteur TV (9). Ensuite l'image numérisée est stockée dans une zone mémoire de 768 x 576 pixels qui sera disponible pour le système informatique pour l'analyse.

IV.3. Figures de franges de projection

Les figures de franges sont des papiers transparents sur lesquels on a imprimé des réseaux de franges décalées en phase. En choisissant le nombre et la forme des franges (rectiligne) ; chaque figure est décalée par rapport à la précédente d'un déphasage de $\pi/2$.

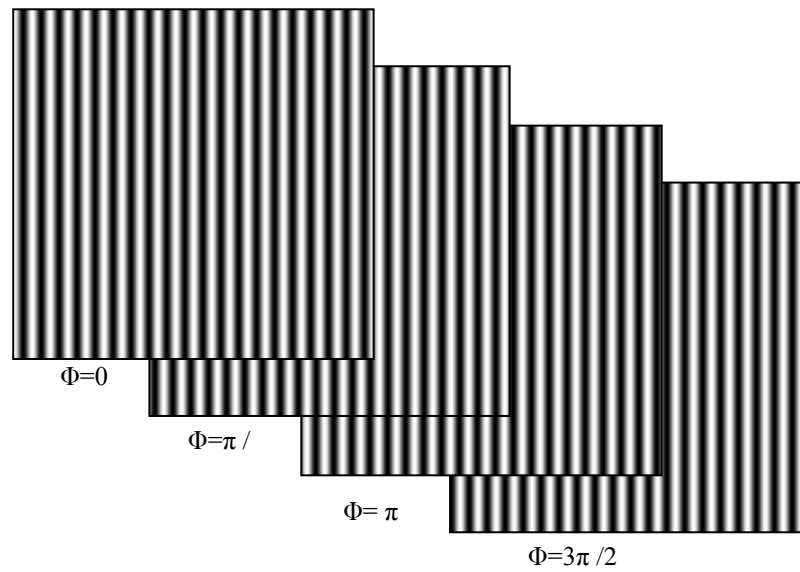


Fig. VI.3. Figures des franges avec décalage de phase de $\pi/2$

IV.4. Echantillons

Des pièces de différentes formes sont étudiées pour déterminer leurs profils de surfaces.

- ◆ la première pièce présente une surface de forme ondulée (Fig. VI.4.a) ;
- ◆ la deuxième contient un creux (Fig. VI.4.b) ;
- ◆ la troisième a un bombement demi-sphérique (Fig. VI.4.c) ;
- ◆ la quatrième a une forme pyramidale (Fig. VI.4.d) ;
- ◆ Une série de rugotests de différentes rugosités et écarts de forme (Fig. VI.4.e).

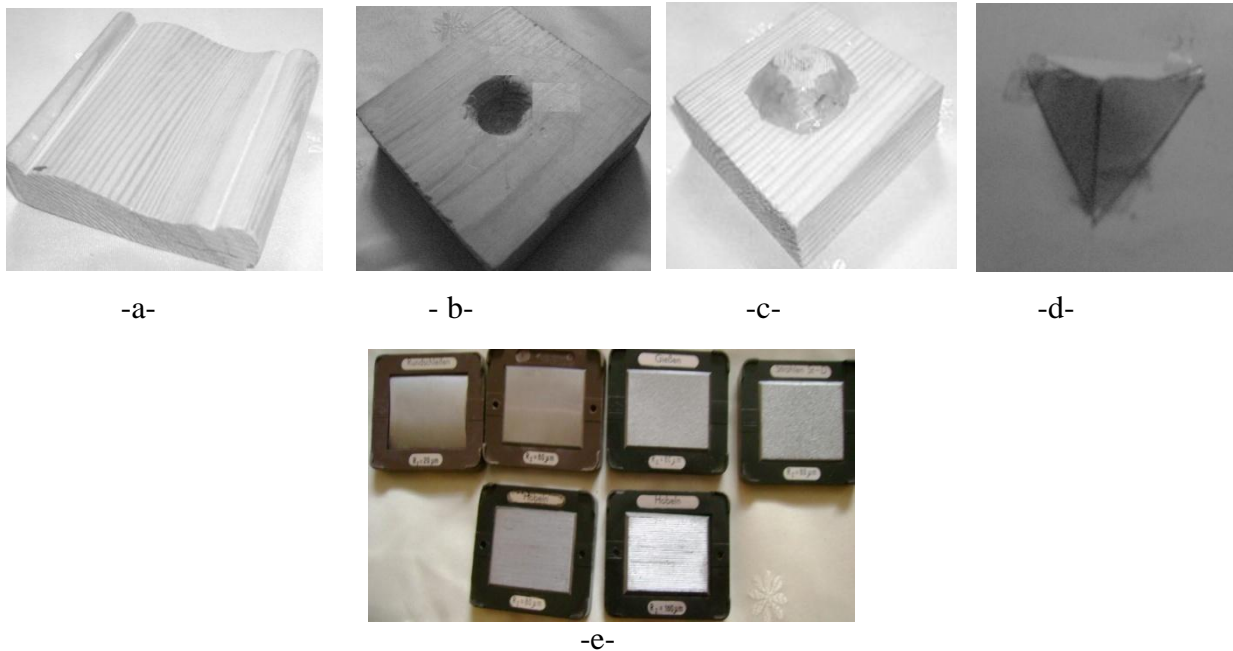


Fig. VI.4. Les échantillons

IV.5. Étalonnage

IV.5. 1. Etalonnage en x, y

Pour s'assurer qu'une mesure de profil est possible, il est intéressant de prévoir une procédure possible d'étalonnage. Il est nécessaire de faire deux étalonnages : un étalonnage longitudinal, et un étalonnage transversal. Un pixel P a des coordonnées (i, j) dans l'image.

Pour l'étalonnage en x, y de la camera CCD et l'interfrange projetées sur l'objet, on met une feuille de papier millimétrique sur le support porte-échantillon, puis on prend quelques images, dans les mêmes conditions, afin de trouver l'équivalent en millimètre pour chaque pixel dans le plan objet.

a. Objet en face de la caméra CCD

Pour étalonner en x et y en place le porte-échantillon, sur lequel est fixé le papier millimétrique, en face de la camera. Puis on calcule l'équivalent en pixels pour chaque millimètre suivant x et y (pour $x=1$ mm et $y=1$ mm.). Pour de faire une moyenne on prend plusieurs images.

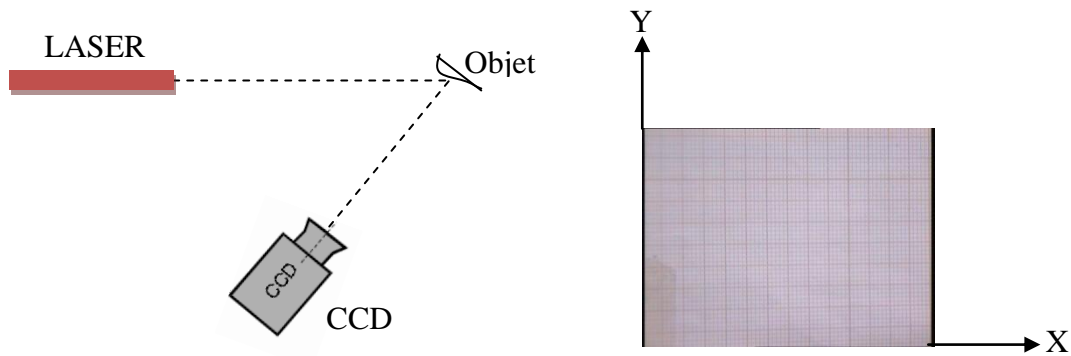


Fig. VI.5. Etalonnage en (x, y), objet en face de la caméra CCD

On trouve pour 1 mm (x) =12 pixels, et 1mm (y)=12 pixels

a. Objet en face à la source LASER

On refait le même travail mais cette fois on expose la feuille de papier millimétrique en face à la source laser et on fait aussi plusieurs acquisitions pour établir une moyenne.

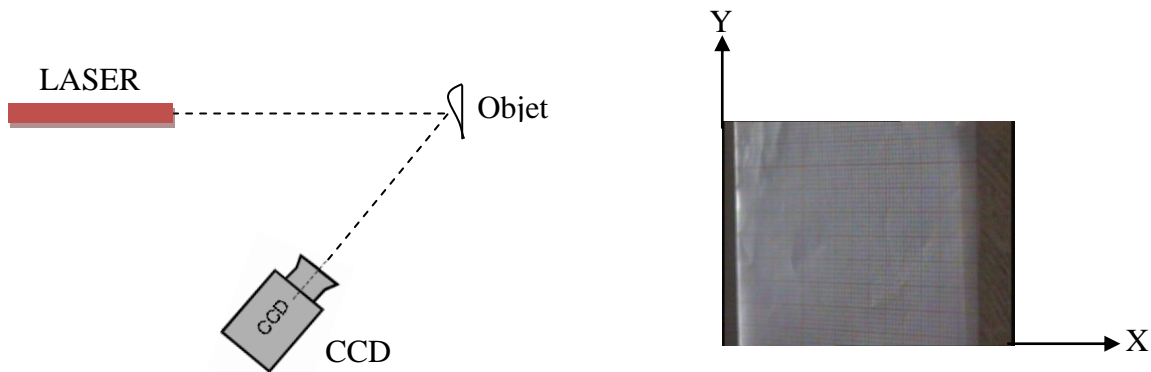


Fig. VI.6. Etalonnage en (x, y), objet en face du faisceau LASER

Les résultats de cet étalonnage donnent pour 1 mm (x) =11 pixels, et 1 mm (y)=13 pixels

IV.6. Résultats expérimentaux

On utilise des échantillons (rugotests) ayant des états de surface différents ainsi que des échantillons présentant des « défauts » de forme, et on enregistre les quatre interférogrammes projetés sur la surface étudiée de chaque échantillon, et qui correspondent à quatre décalage de phase relatifs à des variations de 0 , $\pi/2$, π et $3\pi/2$. La figure VI.3 montre ces interférogrammes.

Chaque interférogramme a la distribution d'intensité définie par les équations ci-dessous, selon l'algorithme de décalage de phase à quatre pas. Les images de ces interférogrammes sont stockées dans la mémoire de l'ordinateur :

$$\text{-a- } I_1(x, y) = I_0(x, y) \{1 + v(x, y) \cos \phi(x, y)\}$$

$$\text{-b- } I_2(x, y) = I_0(x, y) \left\{1 + v(x, y) \cos \left(\phi(x, y) + \frac{\pi}{2} \right)\right\}$$

$$\text{-c- } I_3(x, y) = I_0(x, y) \{1 + v(x, y) \cos(\phi(x, y) + \pi)\}$$

$$\text{-d- } I_4(x, y) = I_0(x, y) \left\{1 + v(x, y) \cos \left(\phi(x, y) + \frac{3\pi}{2} \right)\right\}$$

Après application de l'algorithme de décalage de phase (à quatre pas), on détermine la phase selon l'équation suivante :

$$\text{-e- } \phi(x, y) = \arctg \left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right].$$

On obtient ainsi la distribution de la phase modulo 2π (ou phase enroulée) **-e-**, ce qui nécessite un déroulage pour obtenir la phase déroulée **-f-**, et à partir de la phase déroulée on trace le profil pour chaque figure à l'aide de la commande "line profil" du logiciel *Image Pros-Plus* **-g-**.

IV.6. 1. Les rugotests

Pour les rugotests, et pour voir l'influence de l'interfrange sur les résultats, on projette trois groupes de réseaux de franges sur la surface à étudier.

- Le premier groupe de réseaux de franges contient 20 franges, avec un interfrange $P=5$ mm, décalés l'un par rapport à l'autre de $+\pi/2$ (groupe : A).

-La deuxième groupe contient 60 franges, avec un interfrange $P=2$ mm, décalés l'un par rapport à l'autre de $\pi/2$ (groupe : B)

-La troisième groupe contient 90 franges, avec un interfrange $P=1,5$ mm, décalés l'un par rapport à l'autre de $\pi/2$ (groupe : C)

Les résultats obtenus sont montrée ci-dessous.

a.1. Rugotest Rz=25 μm : Projection des franges à P=5 mm (groupe A)

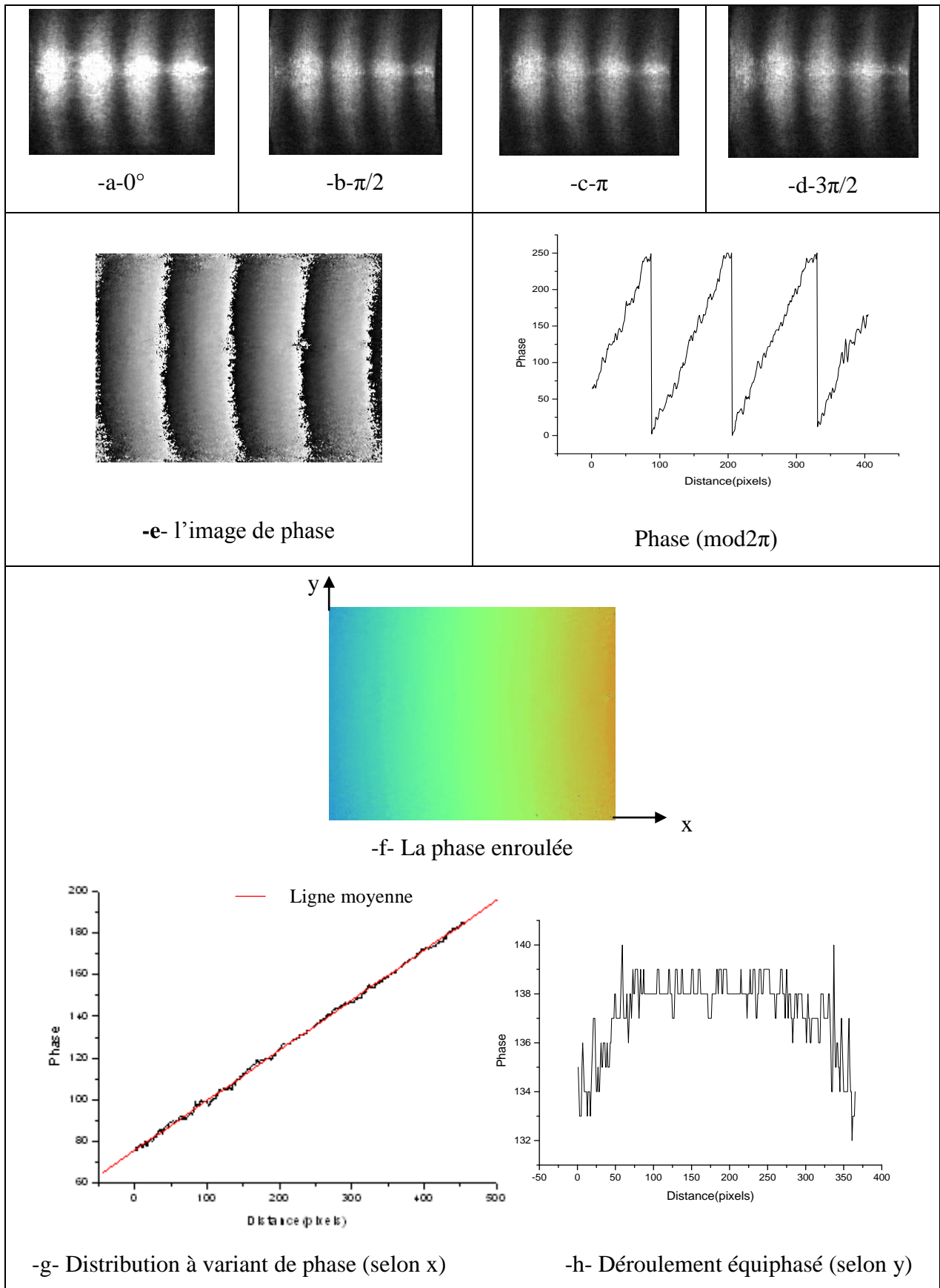
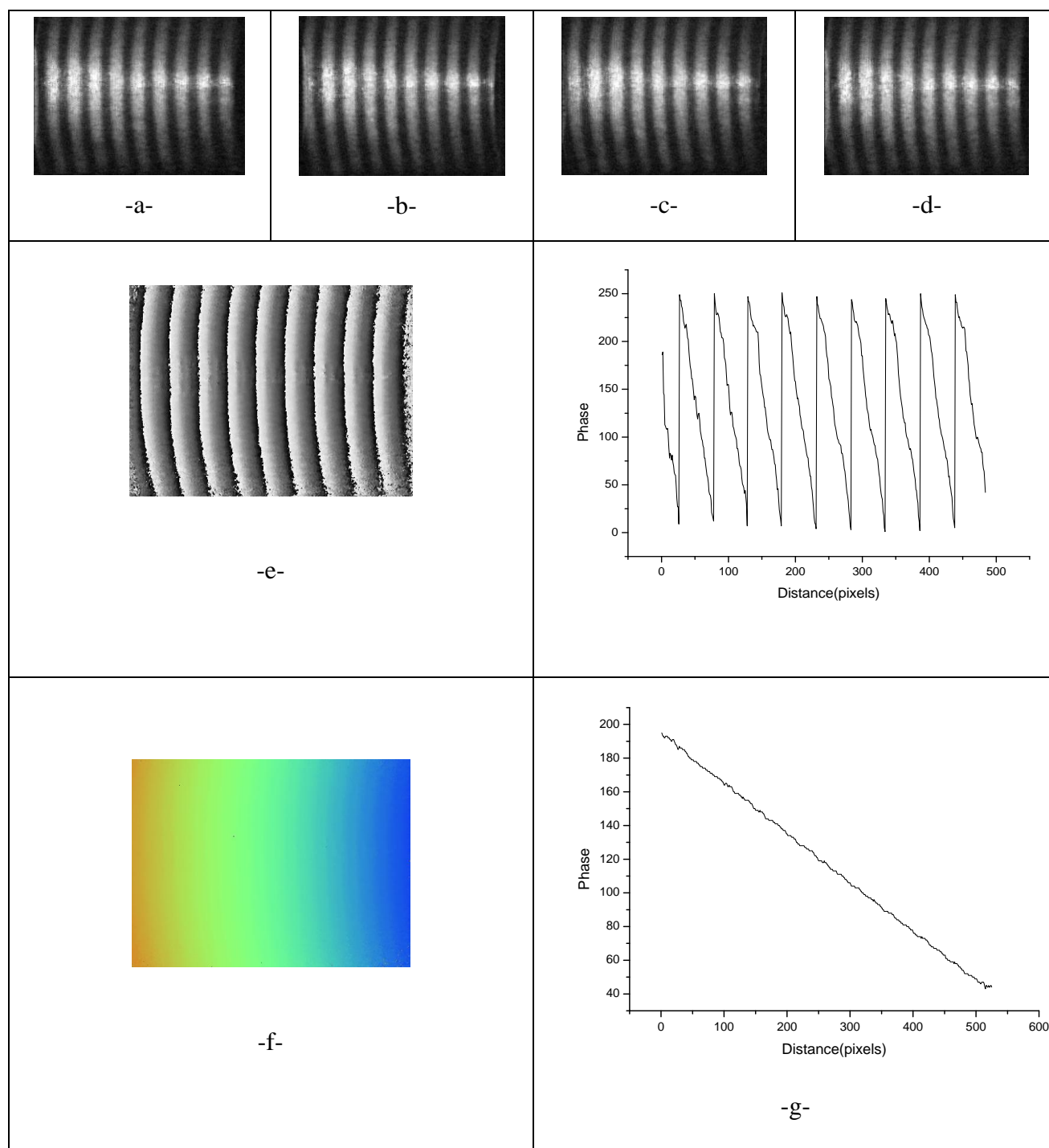
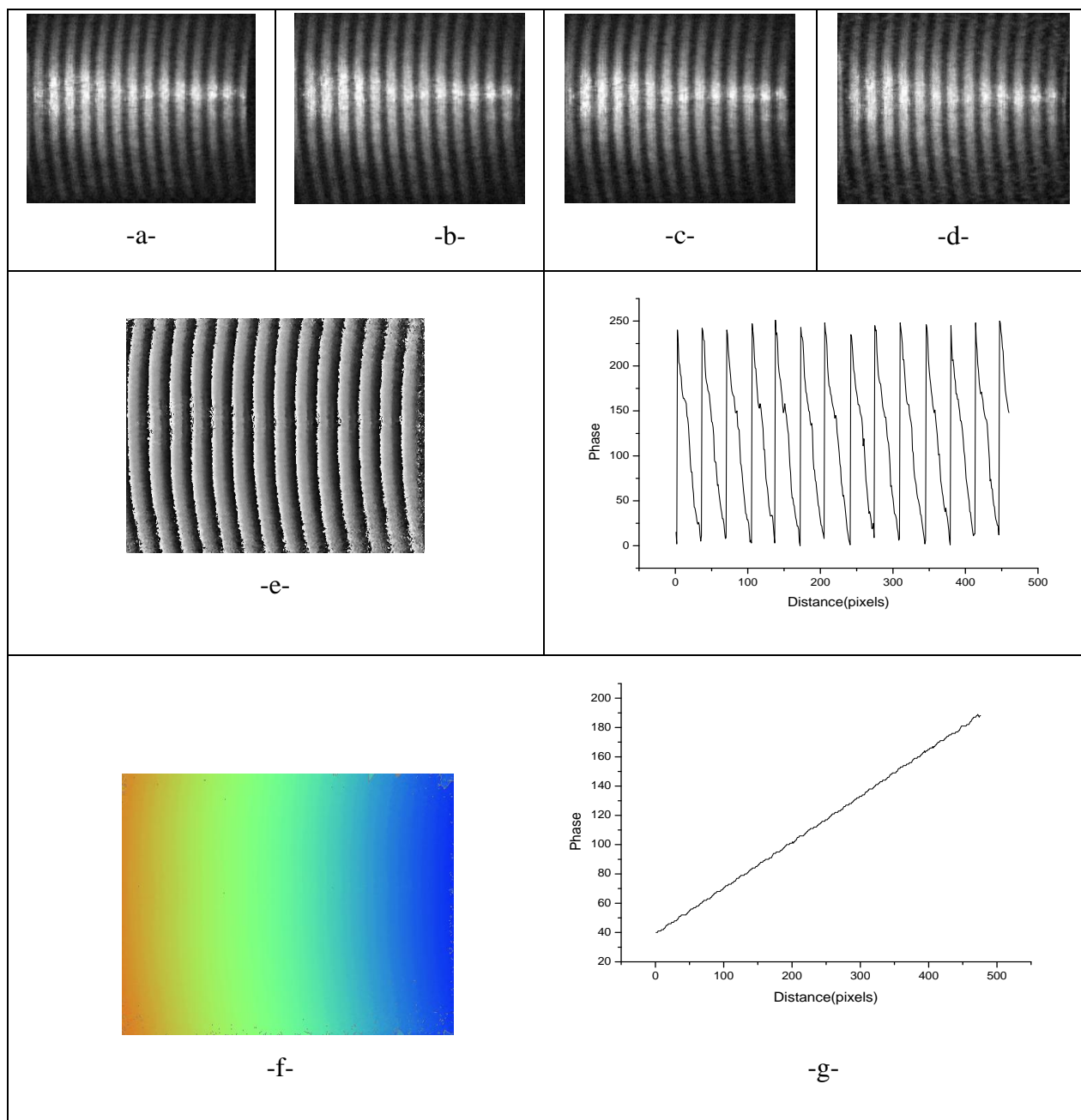


Fig. IV.7. Projection des réseaux à 20 franges sur le rugotest à Rz=25μm.

a.2. Rugotest Rz=25 μm : Projection des franges à P=2 mm (groupe B)Fig. IV.8. Projection des réseaux à 60 franges sur le rugotest à $R_z = 25 \mu\text{m}$.

a.3. Rugotest Rz=25 μm : Projection des franges à P=1,5 mm (groupe C)Fig. IV.9. Projection des réseaux à 90 franges sur le rugotest à Rz=25 μm .

a.4. Résultats

Les valeurs obtenues à partir du graphe de déroulage de phase dans les figures ci-dessus, sont montrées dans le tableau suivant:

	Groupe A	Groupe B	Groupe C
Rms	0,99212	0,84645	0,5483

Tableau 1.

Ces valeurs représentent la « rms » ou l'écart type autour de la ligne moyenne qui n'est autre que la rugosité quadratique.

Les résultats trouvés ci-dessus (pour les groupes : A, B, C) peuvent être interprétés comme suit :

- ♦ elles représentent les distributions de la phase. Pour transformer cette distribution de phase en différences de marche, qui ne sont d'ailleurs que les hauteurs $Z(x,y)$ des aspérités de la surface. Donc on peut écrire :

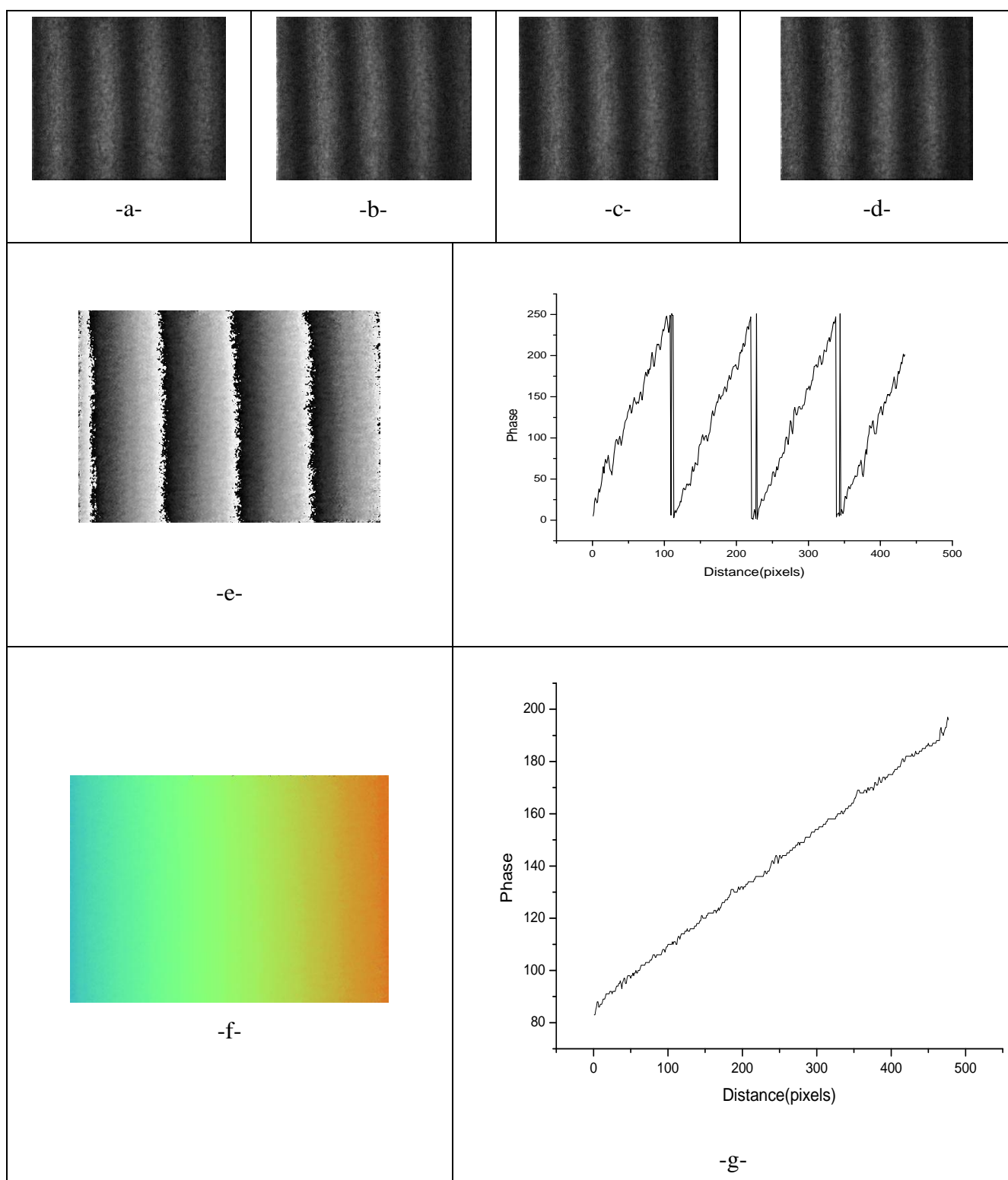
$$Rq = z(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} * rms(x, y)$$

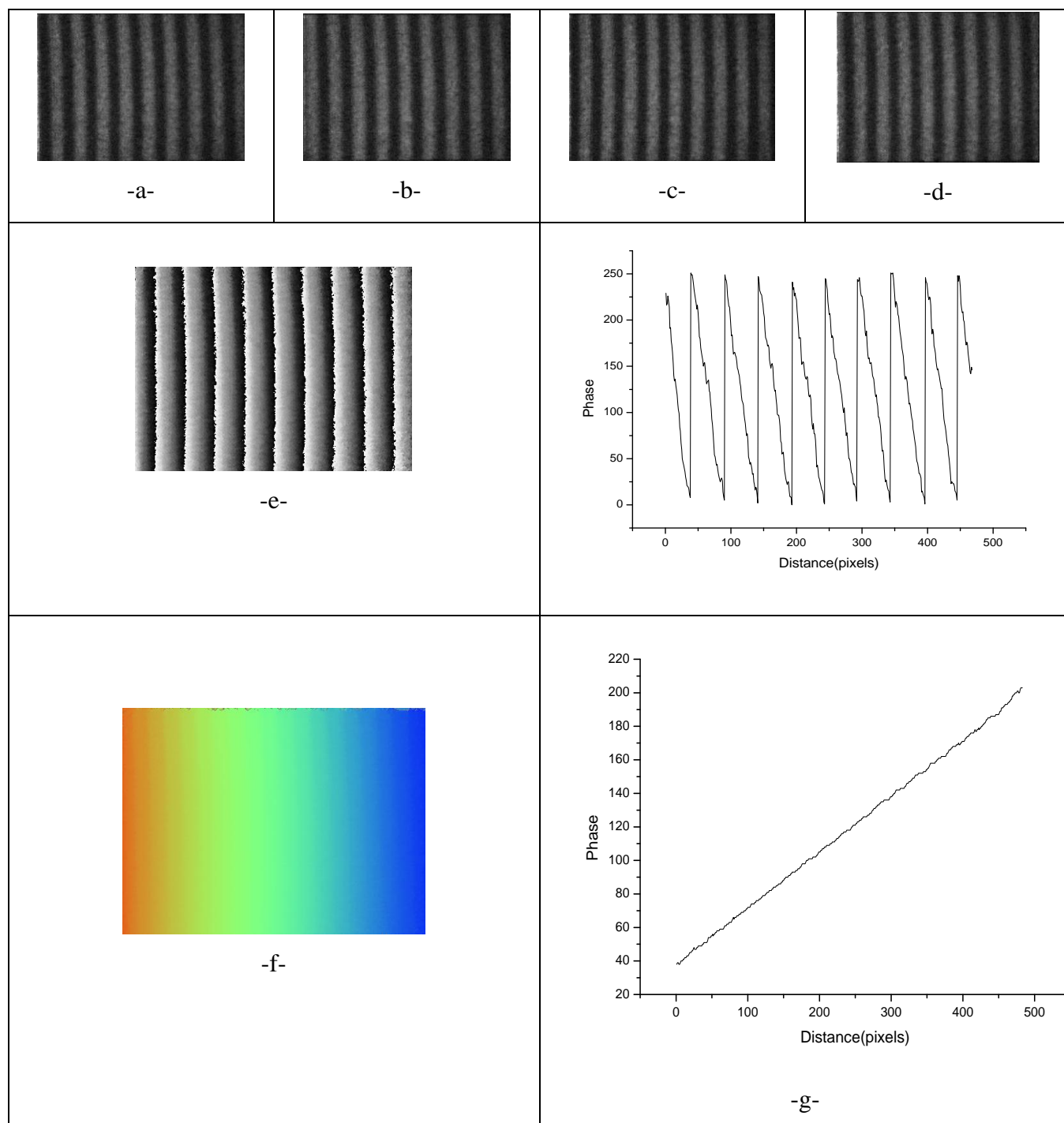
	Groupe A	Groupe B	Groupe C
Rq (μm)	99,9703	85,2919	55,2490

Tableau 2.

a.5. Discussion

- En diminuant l'interfrange pour chaque figure projetée on se rapproche de la valeur réelle de la rugosité affichée par le rugotest, par ailleurs si une frange sombre est large, elle recouvre une zone grande de la surface à contrôler qui ca se peut cacher quelques défauts de surface ;
- Avec cette technique on peut obtenir une « cartographie » de la surface
- L'image de la phase déroulée peut nous donner deux informations très important :
 - ♦ Quand on fait une coupe longitudinale sur la figure de la phase déroulée, perpendiculairement au sens des franges (déroulement a variant de phase) on obtient le profil rugueux de la surface, et à partir duquel on détermine la rugosité quadratique R_q ;
 - ♦ Quand on fait une coupe transversale, la ligne de phase fait ressortir un écart de planéité du rugotest (écart bombée);

b.1. Rugotest Rz=80 μm : Projection des franges à P=5 mm (groupe A)Fig. IV.10. Projection des réseaux à 20 franges sur le rugotest à Rz=80 μm .

b.2. Rugotest Rz=80 μm : Projection des franges à P=2 mm (groupe B)Fig. IV.11. Projection des réseaux à 60 franges sur le rugotest à Rz=80 μm .

b.3. Résultats

Les valeurs obtenues à partir des graphes relatifs aux phases déroulées sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	Groupe A	Groupe B	Groupe C
rms Φ (rad)	0,97625	0,82484	-----
R_q (μm)	98,3711	83,1144	-----

Tableau 3.

b.4. Discussion

La distribution de la phase déroulée pour le cas de projection des réseaux de 90 franges (groupe C) est « mauvaise », comme on le constate dans l'image de la figure ci-dessous et qui se manifeste par une discontinuité de la répartition de la gamme de couleur dans la figure IV.12.b, et par conséquent il est impossible de tirer l'information concernant la phase.

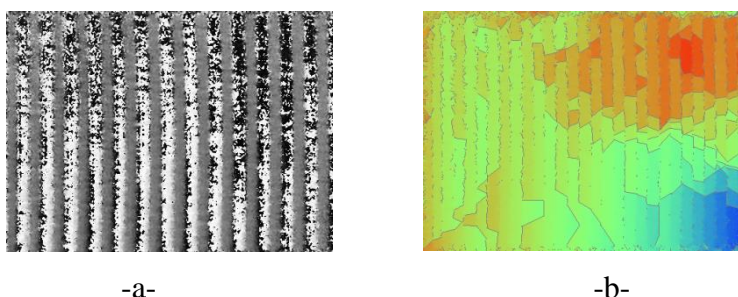
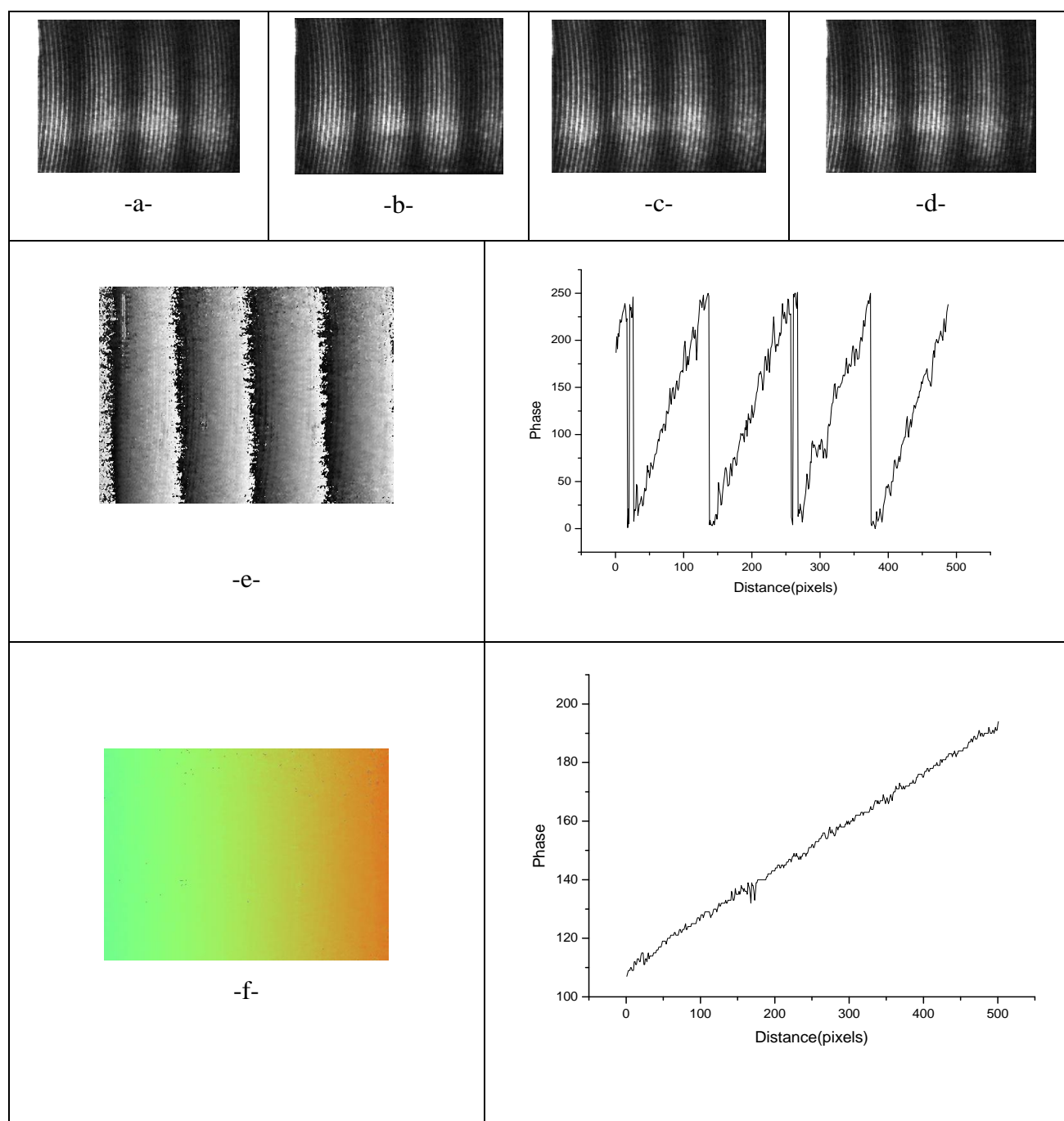


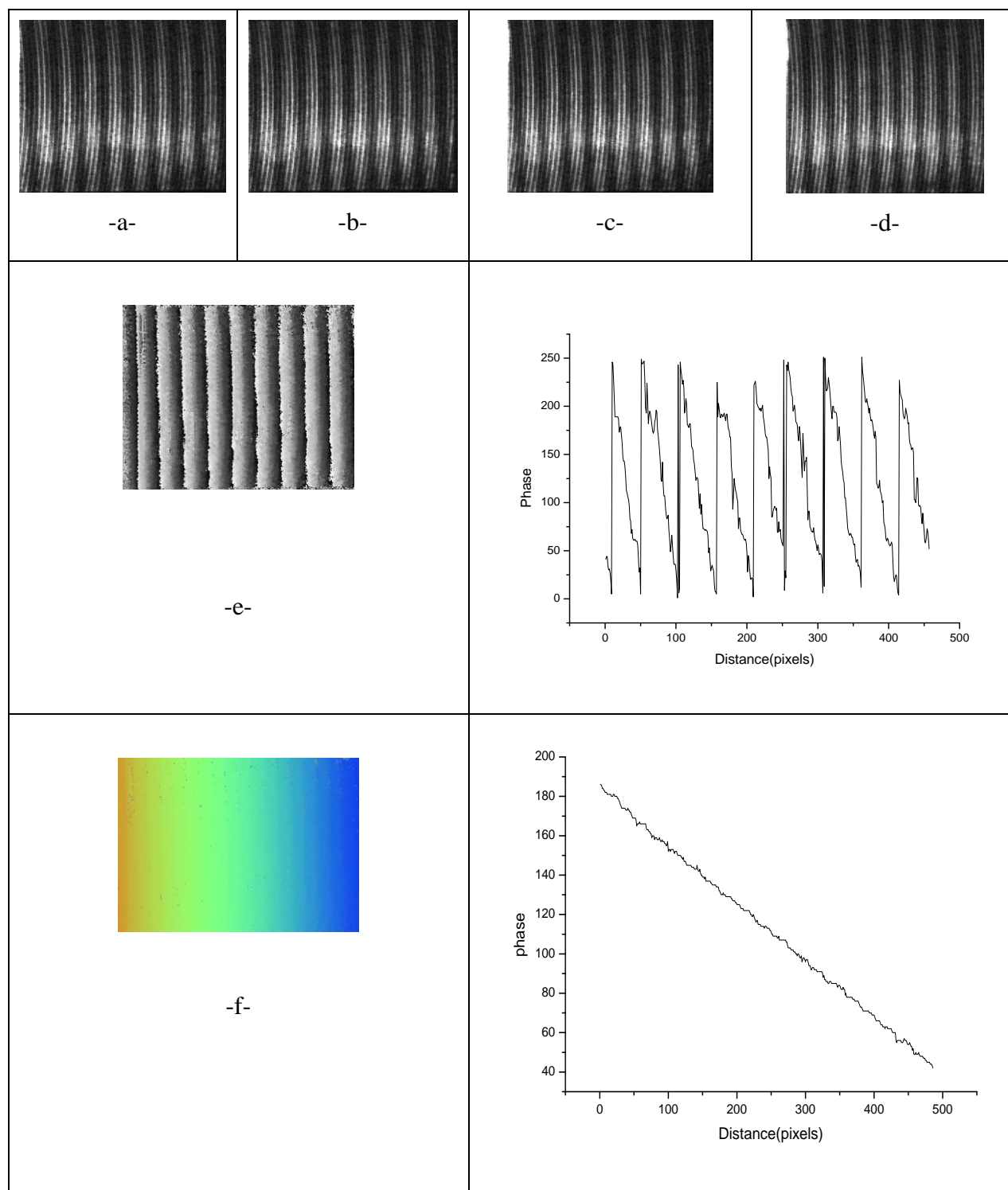
Fig. IV.12. Les résultats de rugotest à $R_z=80 \mu\text{m}$ avec une projection de 90 franges.

Cette perturbation dans la carte de phase est due principalement à :

La sensibilité élevée des algorithmes de décalage de phase fait qu'un mauvais positionnement des réseaux de franges introduit des erreurs dans le pas de l'incrément de phase, ce qui falsifie partiellement ou totalement le résultat sur la phase finale lors de l'application de l'algorithme de décalage de phase.

D'autre part, les aberrations du système optique de projection font que la projection n'est pas télécentrique (divergence des rayons de projection), ce qui a pour effet que l'interfrange n'est pas totalement constant sur la totalité de la figure de projection.

c.1. Rugotest Rz=80 μm Rt=86 μm : Projection des franges à P=5 mm (groupe A)Fig. IV.13. Projection des réseaux à 20 franges sur le rugotest à Rz=80 μm Rt=86 μm .

c.2. Rugotest Rz=80 μm Rt=86 μm : Projection des franges à P=2 mm (groupe B)Fig. IV.14. Projection des réseaux à 60 franges sur le rugotest à Rz=80 μm Rt=86 μm .

c.3. Rugotest Rz=80 μm Rt=86 μm : Projection des franges à P=1,5 mm (groupe C)

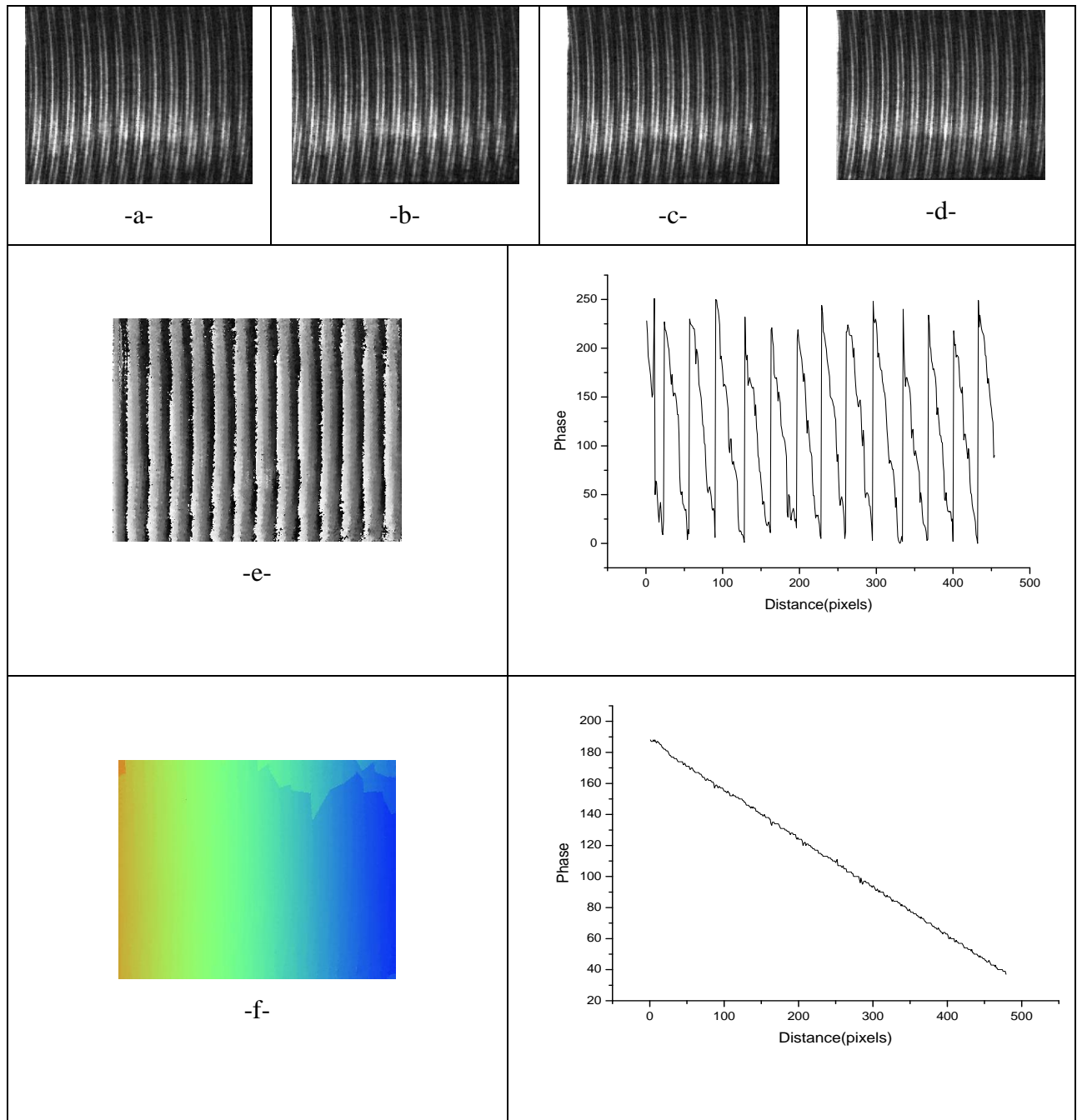


Fig. IV.15. Projection des réseaux à 90 franges sur le rugotest à Rz=80 μm Rt=86 μm .

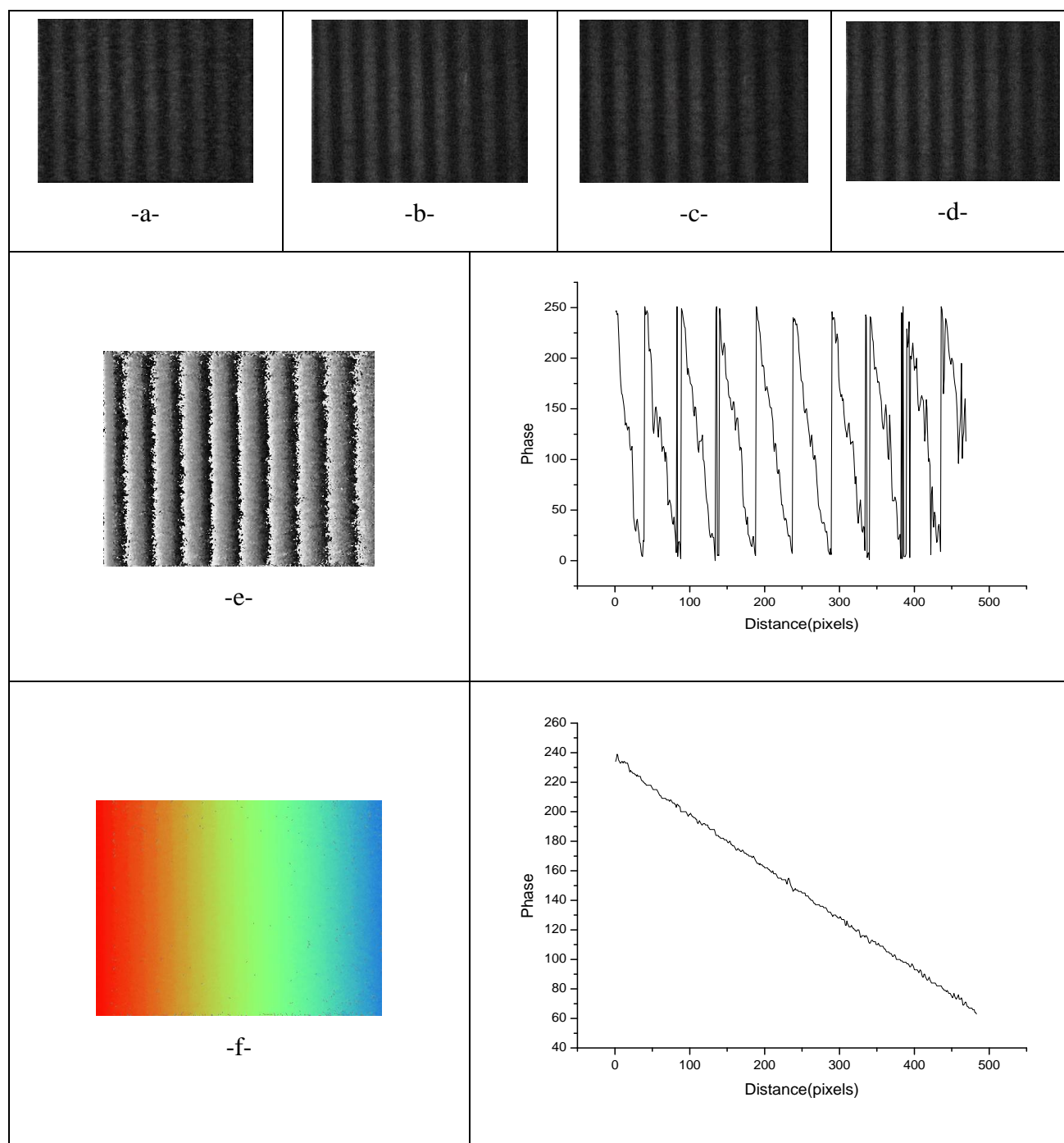
c.4. Résultats

Les valeurs obtenues selon le graphe de la phase déroulée sont présentées dans le tableau ci-contre :

	20 franges	60 franges	90 franges
rms Φ (rad)	1,0593	0,9971	0,80933
R_q (μm)	106,73	100,47	81,54

Tableau 4.

d.1. Rugotest $R_z=70 \mu\text{m}$: Projection des franges à $P=2 \text{ mm}$ (groupe B)

Fig. IV.16. Projection des réseaux à 60 franges sur le rugotest à $R_z=70\mu\text{m}$

d.2. Rugotest $Rz=70 \mu\text{m}$: Projection des franges à $P=1,5 \text{ mm}$ (groupe C)

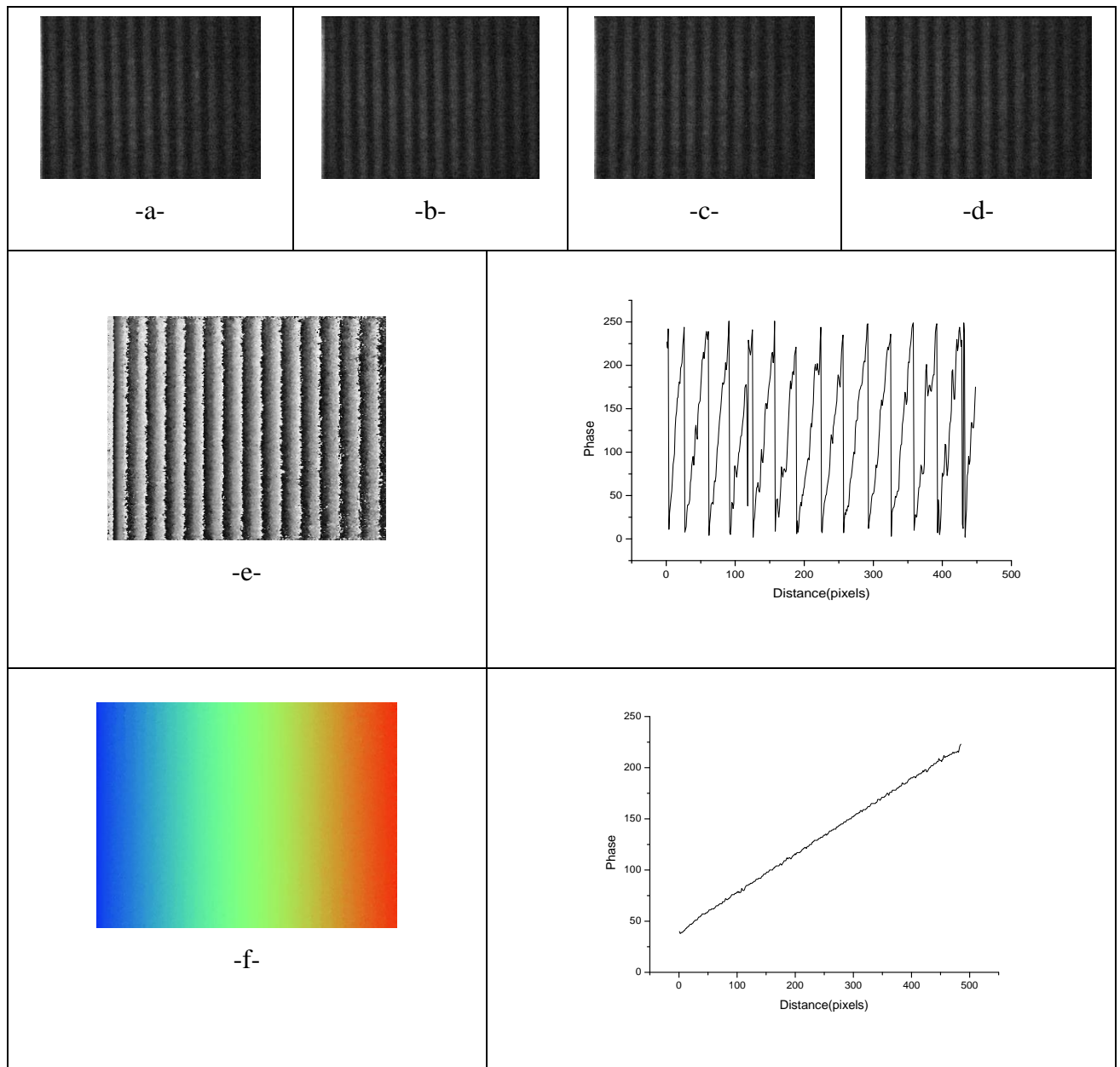


Fig. IV.17. Projection des réseaux à 90 franges sur le rugotest à $Rz=70\mu\text{m}$

d.3. Résultats

Les valeurs obtenues d'après les graphes de la phase déroulée sont :

	Groupe A	Groupe B	Groupe C
rms Φ (rad)	-----	1,36741	1,02455
Rq (μm)	-----	137,78	103,23

Tableau 5

e.1. Rugotest Rz=160 μm : Projection des franges à P=5 mm (groupe A)

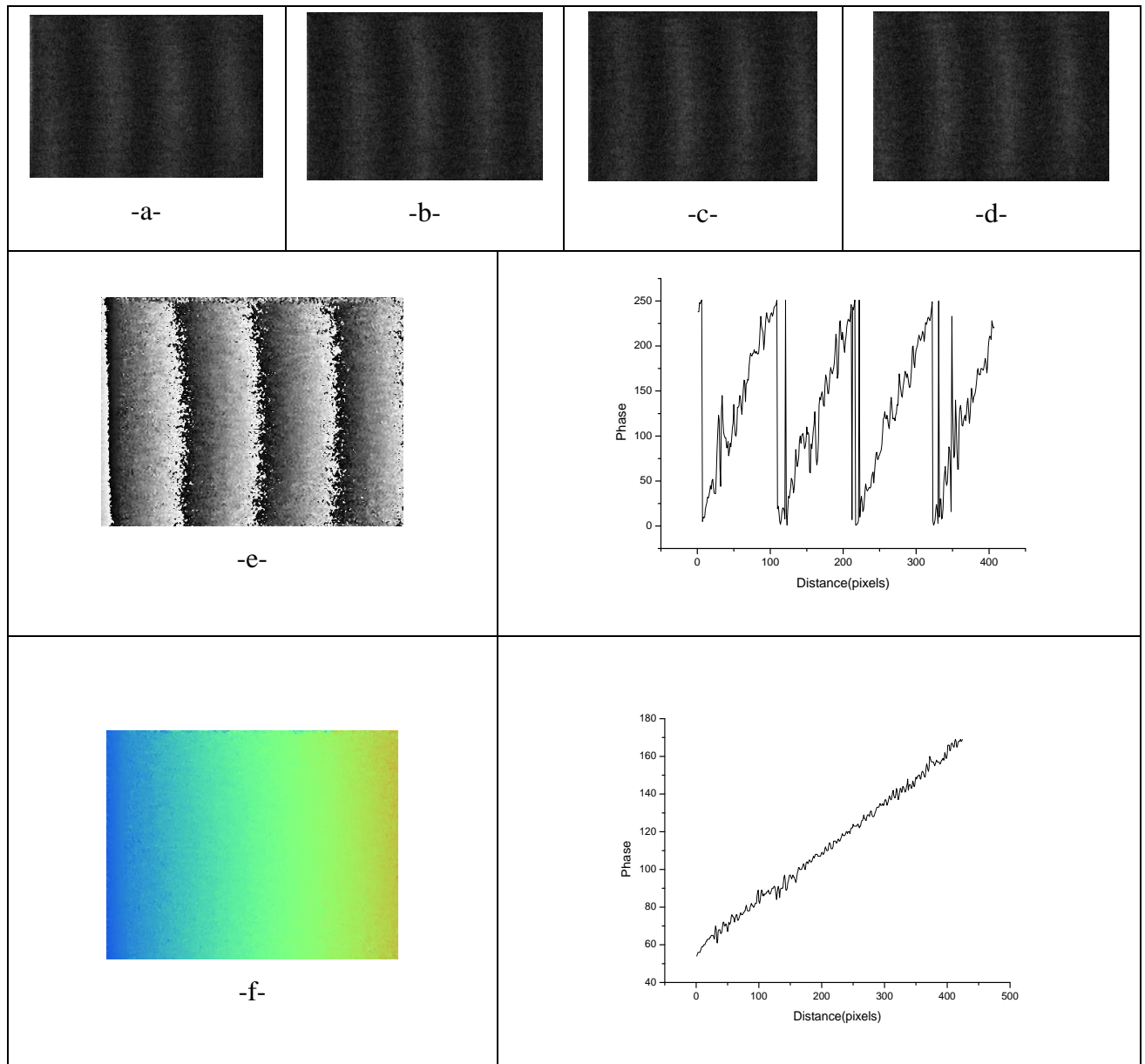


Fig. IV.18. Projection des réseaux à 20 franges sur le rugotest à Rz=160 μm

e.2. Résultats

Les valeurs obtenues d'après le graphe de la phase déroulée sont :

	Groupe A	Groupe B	Groupe C
rms Φ (rad)	1,88339	-----	-----
Rq(μm)	189,77	-----	-----

Tableau 6

IV.6.2. Défauts macro géométriques

Pour ce genre de défauts en a fait une sélection variable, une pièce a forme bombée, autre à forme creuse, une pièce a une forme pyramidale est une autre a forme ondulée a fin de voir la déflexion des franges suivant la forme de la pièce.

a.1. Pièce à surface ondulée : Projection des franges à $P=5$ mm (groupe A)

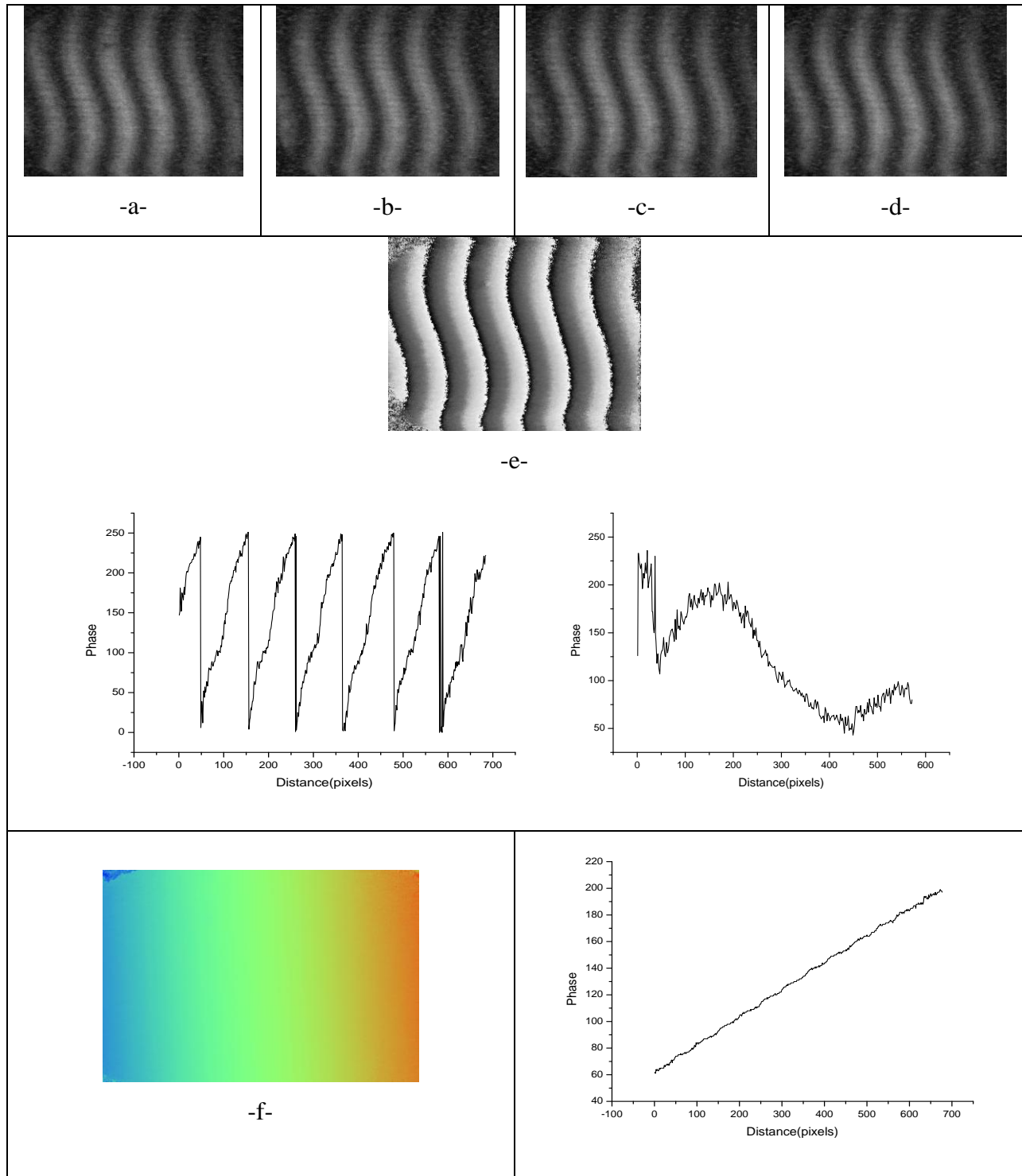


Fig. IV.19. Projection des réseaux à 20 franges sur la pièce à surface ondulée

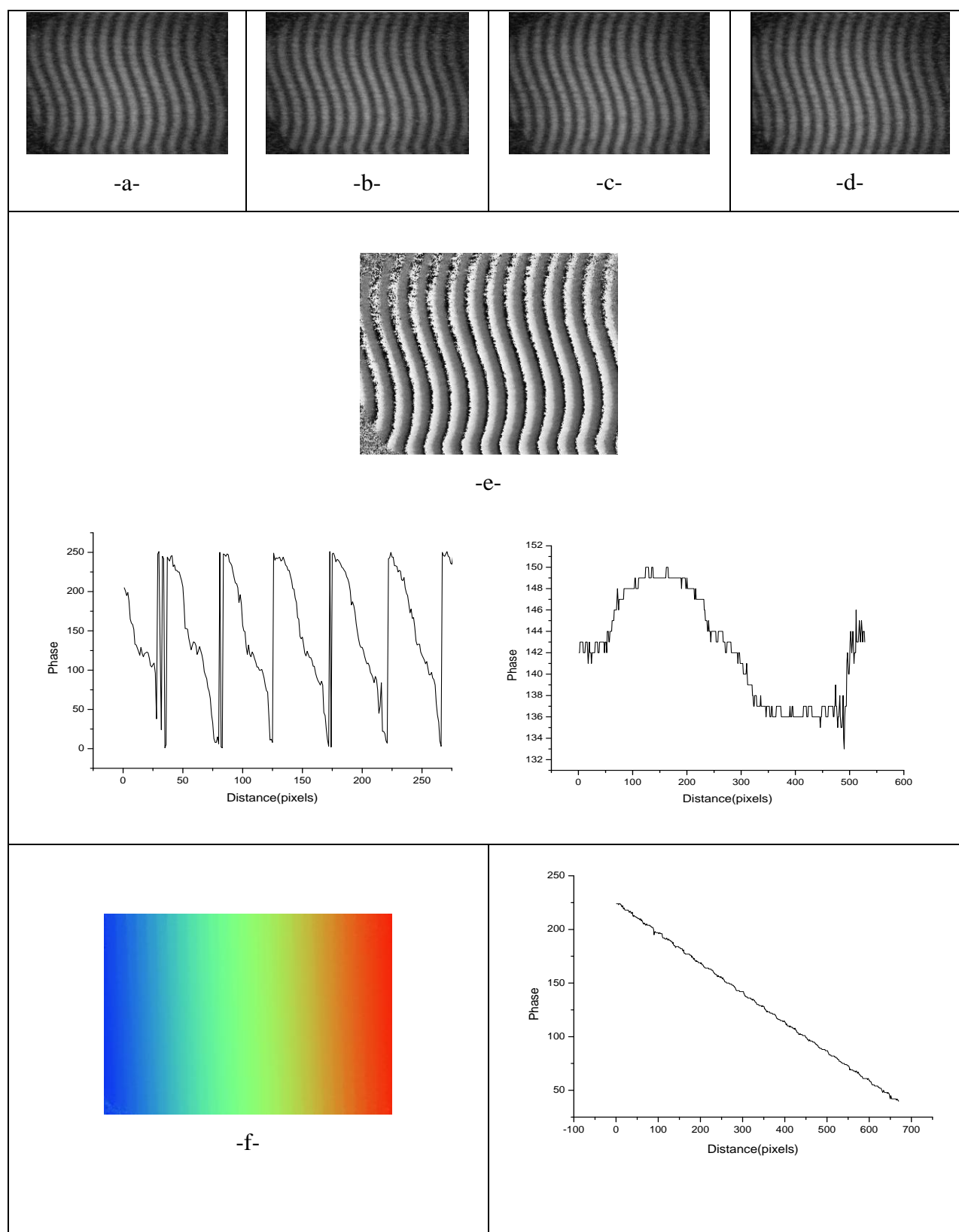
a.2. Pièce à surface ondulée : Projection des franges à $P=1,5$ mm (groupe C)

Fig. IV.20. Projection des réseaux à 90 franges sur la pièce à surface ondulée

b.1. Pièce « bombée » en face à la CCD : Projection des franges à P=5 mm (groupe A)

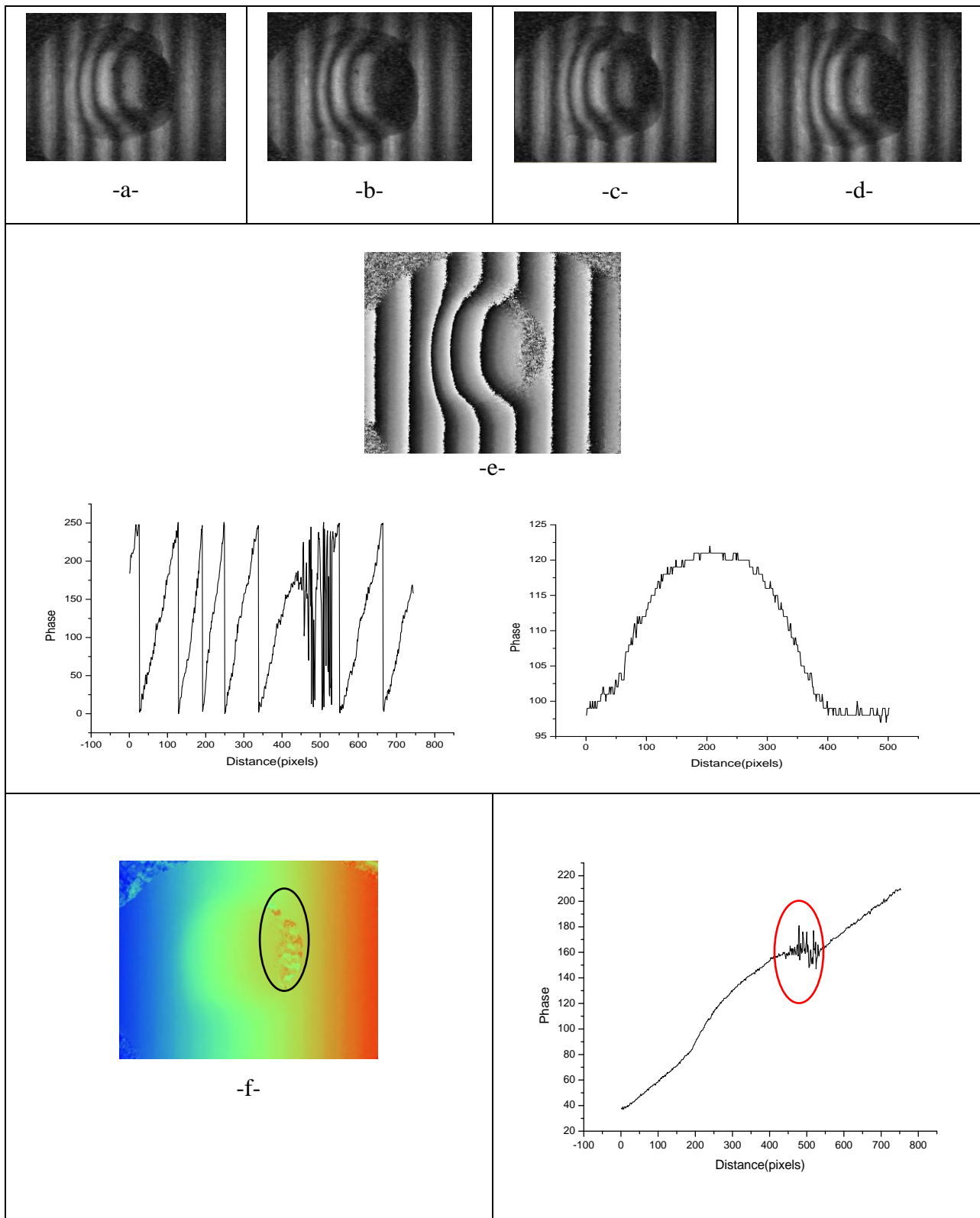


Fig. IV.21. Projection des réseaux à 20 franges sur la pièce « bombée » placée en face à la caméra CCD

b.3. Pièce « bombée » en face au laser : Projection des franges à P=5 mm (groupe A)

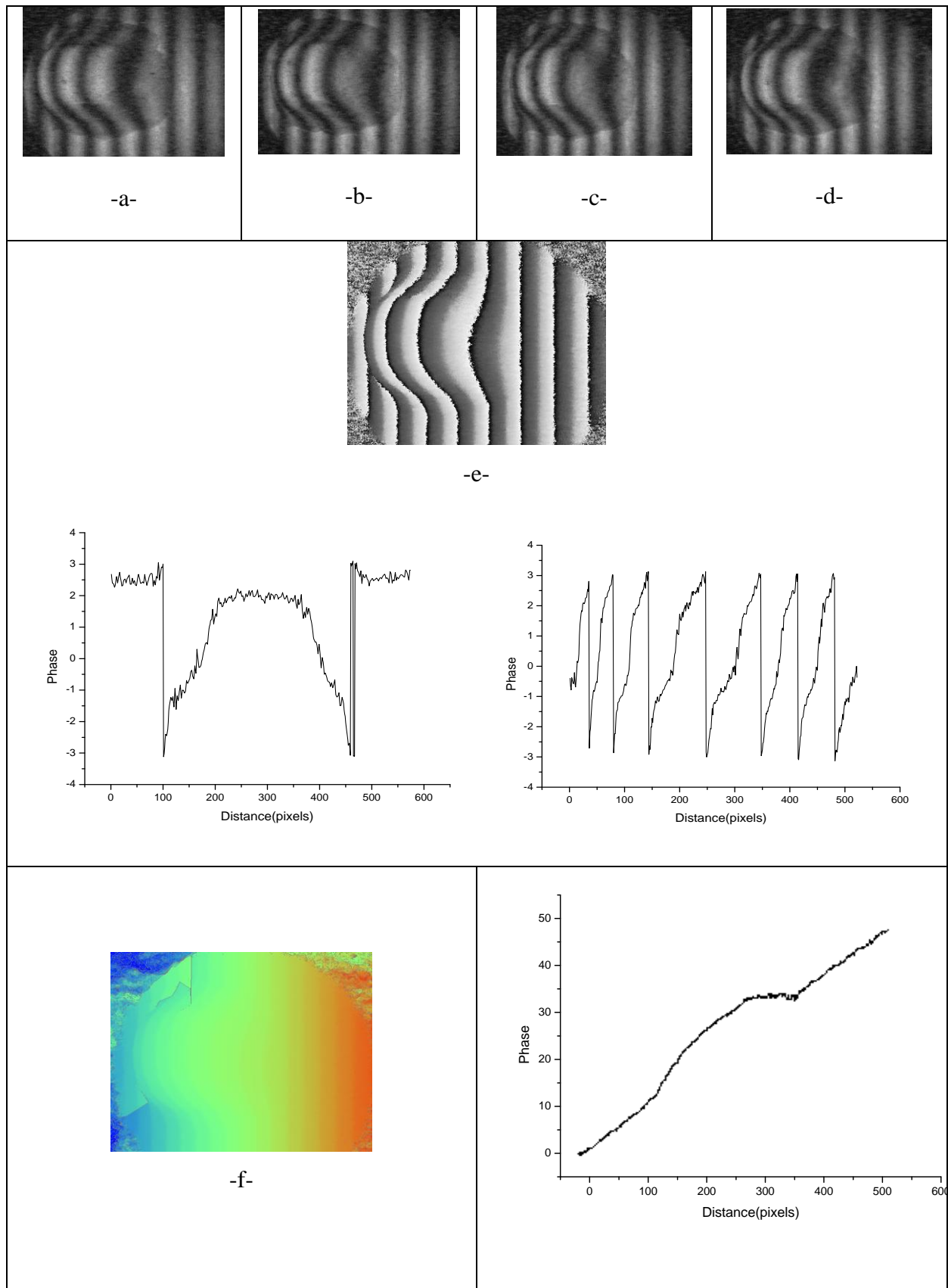


Fig. IV.22. Projection des réseaux à 20 franges sur la pièce « bombée » placée en face à la source laser

b.2 Pièce « bombée » en face au laser : Projection des franges à P=2 mm (groupe B)

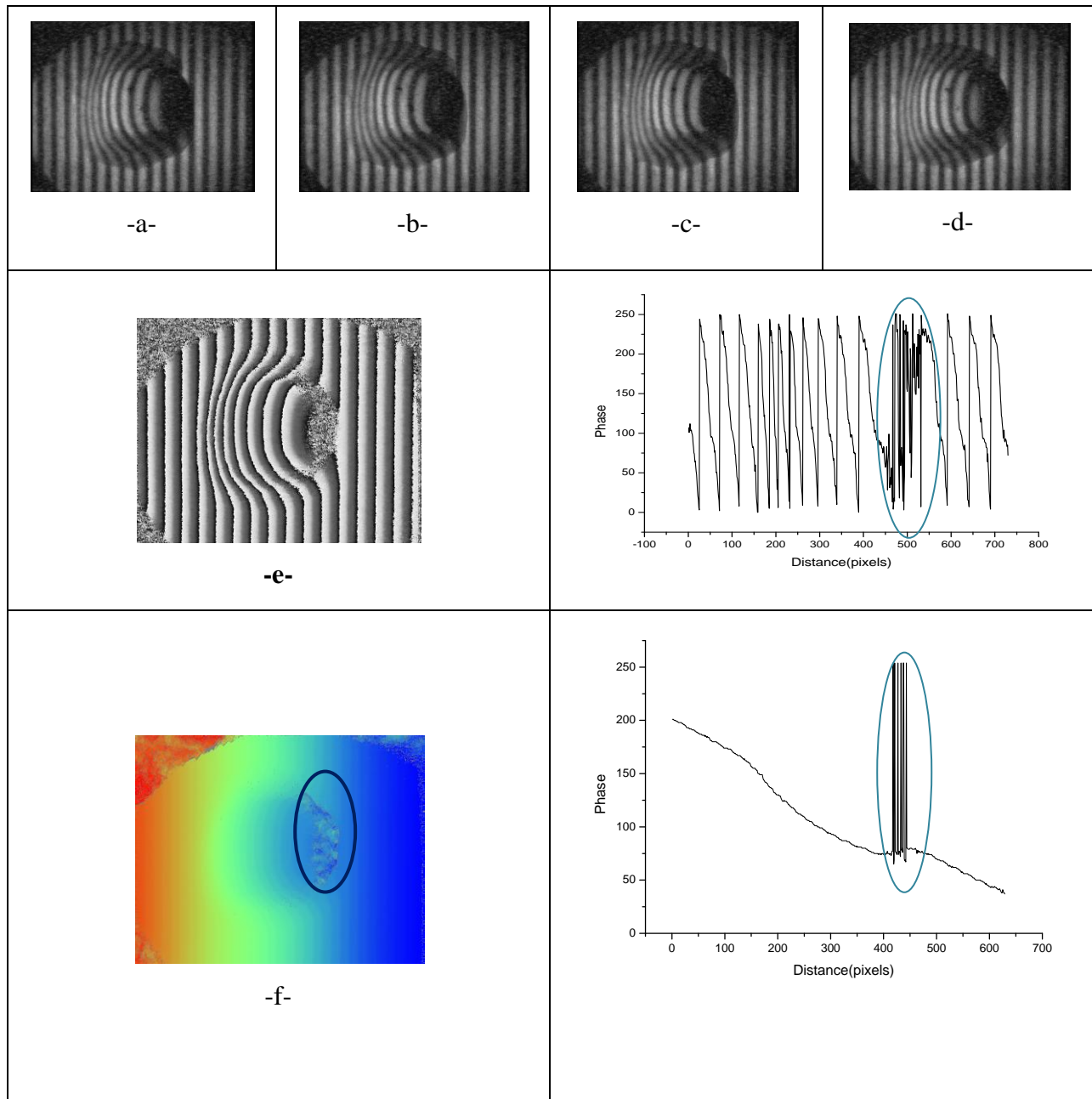


Fig. IV.23. Projection des réseaux à 60 franges sur la pièce « bombée » placée en face à la source laser

b.4. Résultats et interprétation

On peut interpréter les résultats ci-dessus comme suit :

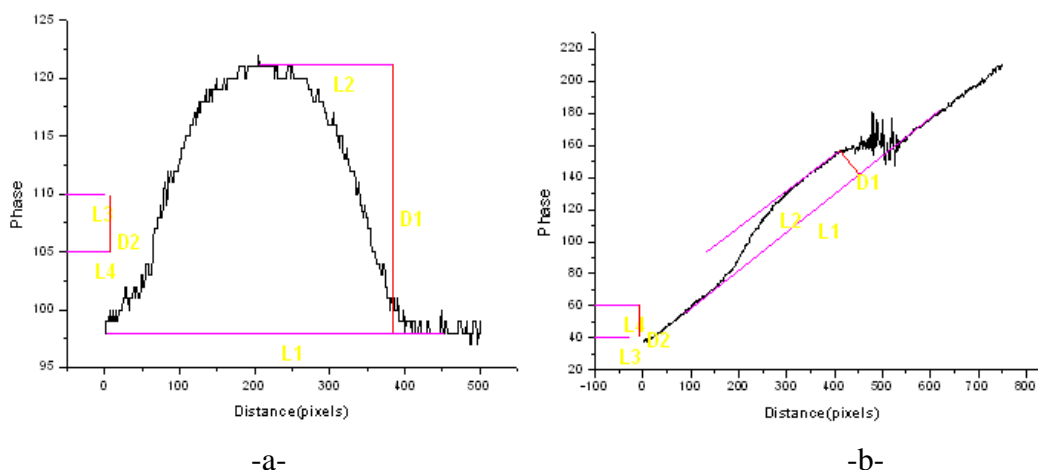
-pour la pièce ondulée :

- ♦ Les valeurs de Z , pour le défaut d'ondulation, sont presque les mêmes, cela permet de dire que les résultats obtenus sont représentatifs de la réalité de la surface ;

- ◆ Les figures IV.19 et IV.20, correspondantes au défaut d'ondulation, permettent de donner une vision générale sur la déformation des franges selon le relief de la surface.
- ◆ Comme la figure -e- représente la phase modulo 2π , pour l'interpréter il faut passer donc au déroulage de la phase -f-;
- ◆ On peut déterminer l'écart du défaut de la surface en dessinant tout simplement une ligne moyenne (*line profil*) à travers l'image de la phase déroulée -f- ;
- ◆ On peut délimiter le profil de la surface en traçant une ligne moyenne transversalement à l'image de phase;

-pour la pièce bombée :

- ◆ A partir de l'image de la phase déroulée, et par le passage d'une ligne moyenne à travers la carte de phase on peut déterminer la hauteur de tels défauts ;



	-a-	-b-
D1 (rad)	87,99	69,40
D1(μm)	8867,11	6993,28

Tableau 7

Et pour trouver la valeur réel (hauteur) de ce défaut, appliquons la relation citez dans le chapitre III,

$$d = \frac{p}{\cos \theta}$$

Après l'application on trouve :

	-a-	-b-
D1 (μm)	12540	9890
D1 (mm)	12,54	9,89

Tableau 8

- ◆ Pour la pièce « bombée » placée en face de la caméra CCD, un effet d'ombre généré par la « bosse » apparaît du côté opposé à la direction de la projection. Il est d'autant plus important que la hauteur de la bosse est grande (Fig. IV.22.). Cet ombre entrave la mesure, c'est pour cette raison qu'en a pensé à faire orienter la pièce en face de la source laser pour éliminer la zone d'ombre, ce qui a amélioré considérablement le résultat. Par ailleurs, ce problème ne se pose pas pour la pièce ondulée.

c.1 Pièce « creuse » en face à la CCD : Projection des franges à P=5 mm (groupe A)

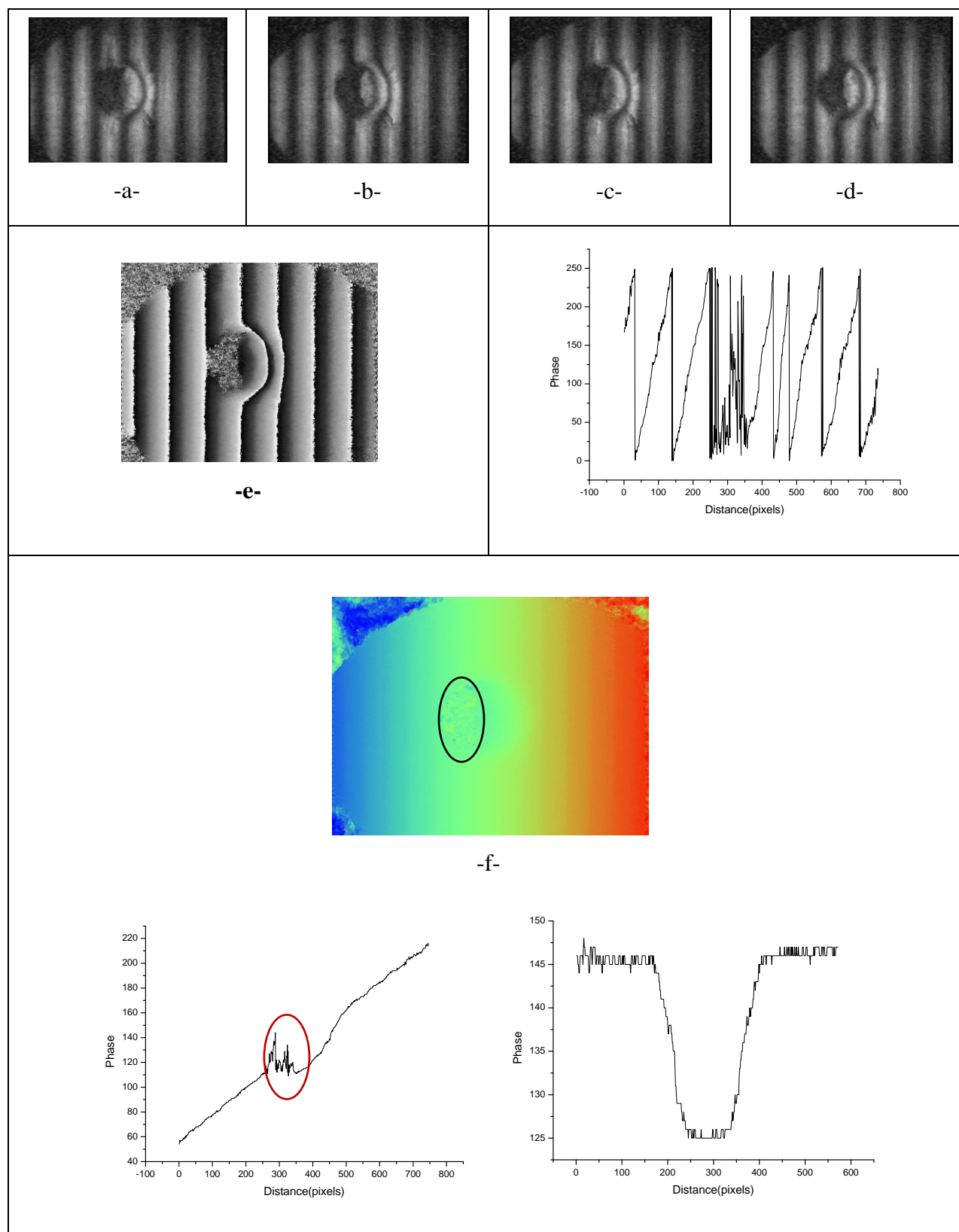


Fig. IV.24. Projection des réseaux à 20 franges sur la pièce « creuse » placée en face à la CCD

c.2 Pièce « creuse » en face au laser : Projection des franges à P=5 mm (groupe A)

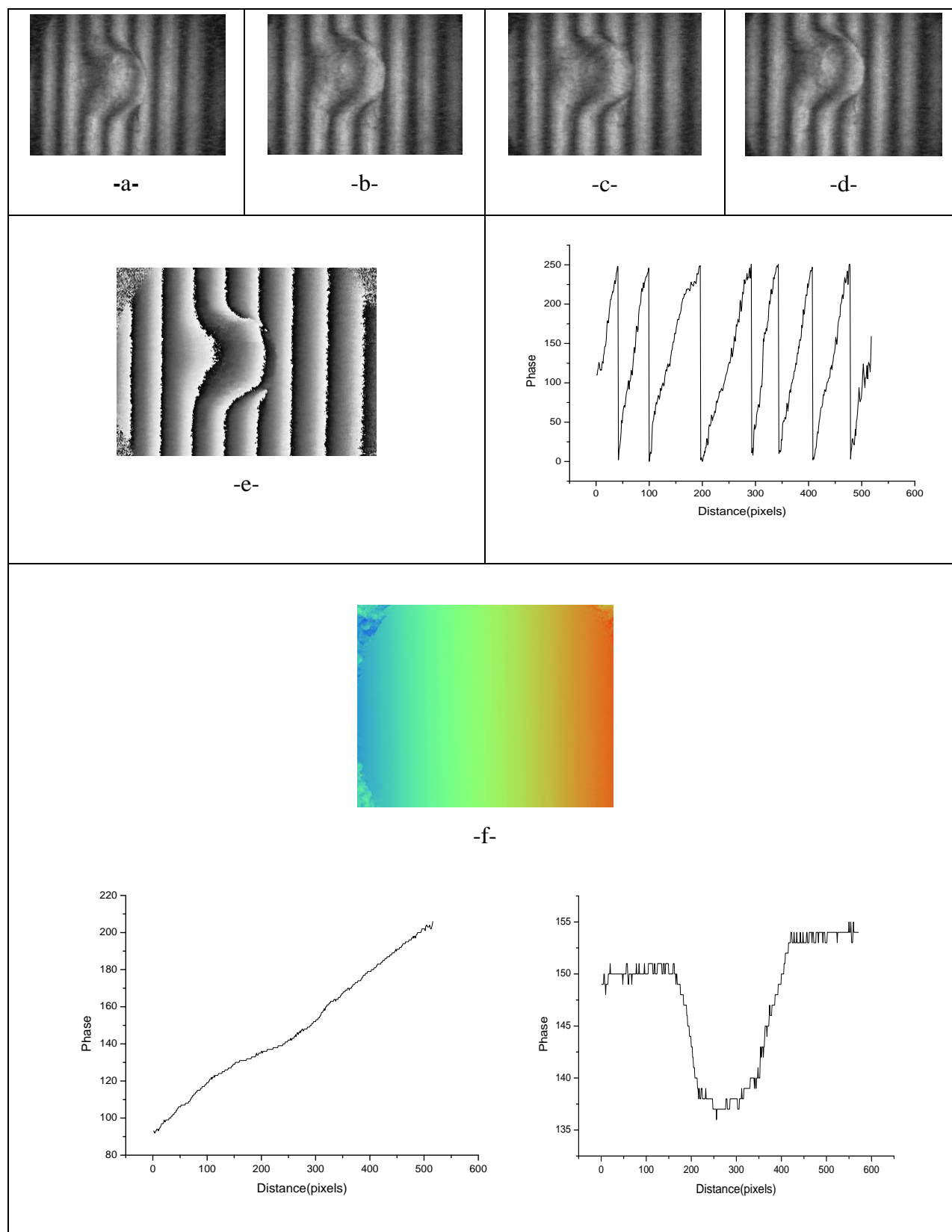


Fig. IV.25. Projection des réseaux à 20 franges sur la pièce « creuse » placée en face à la source laser

Résultats et interprétations

A partir de l'image de la phase déroulée, et par le passage d'une ligne moyenne à travers la carte de phase on peut déterminer la hauteur de tels défauts :

	IV.25	IV.26
ϕ (rad)	70,988	82,801
D1(μm)	7153,05	8343,387

Tableau. 9

Après l'application de la formule III.3. On trouve :

	IV.25	IV.26
D1 (μm)	10115,95	11799,33
D1 (mm)	10,11	11,8

Tableau.10

Une remarque importante apparaît par comparaison entre la pièce « bombée » et la pièce « creuse » est que la déflexion des franges dans le cas de la première est toujours vers la gauche et ceci quelque soit l'angle de projection, par contre pour la dernière sa déflexion est toujours vers la droite.

d.1. Pièce « pyramidale » en face à la CCD: Projection des franges à P=5 mm (groupe A)

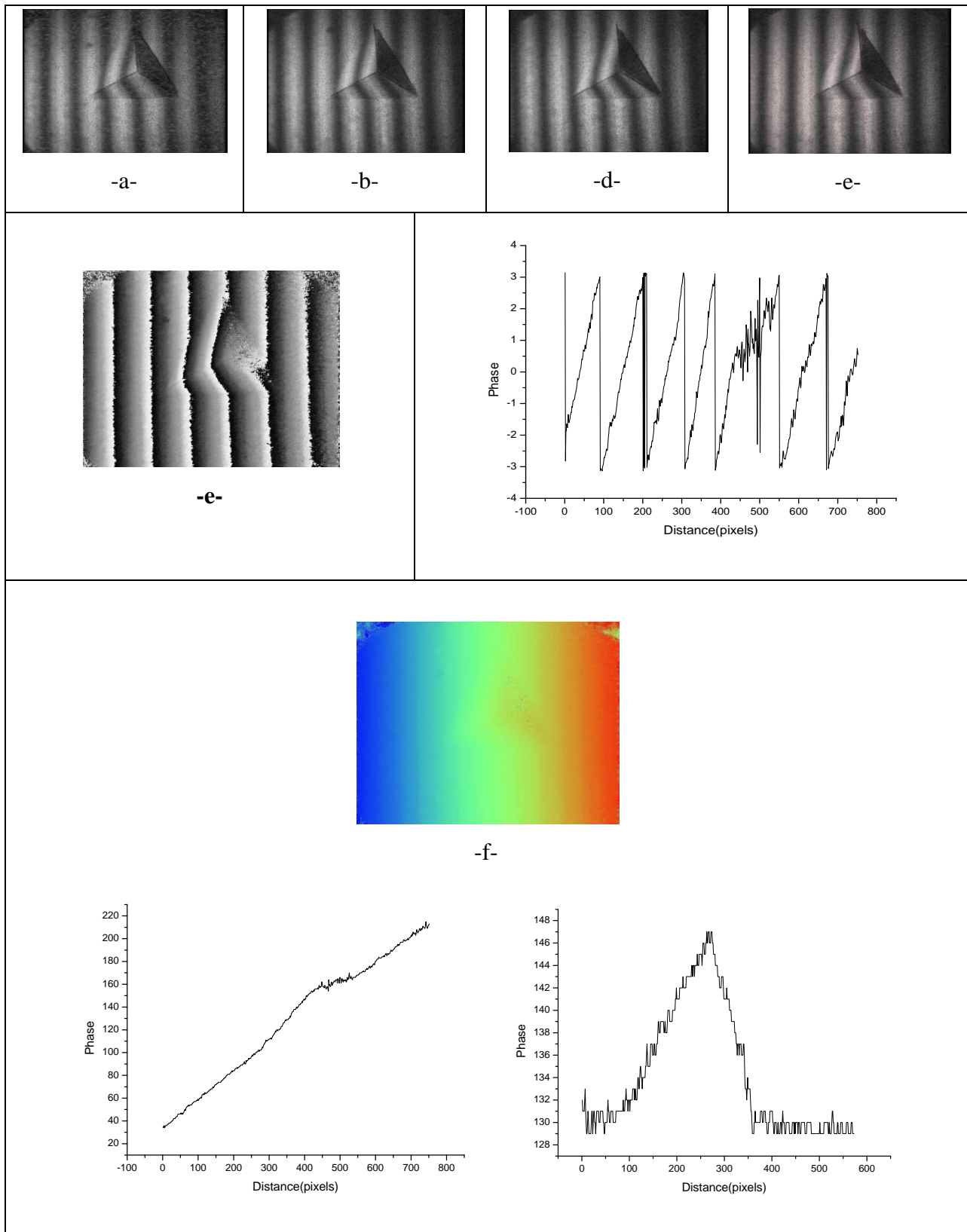


Fig. IV.26. Projection des réseaux à 20 franges sur la pièce « pyramidale » placée en face à la CCD

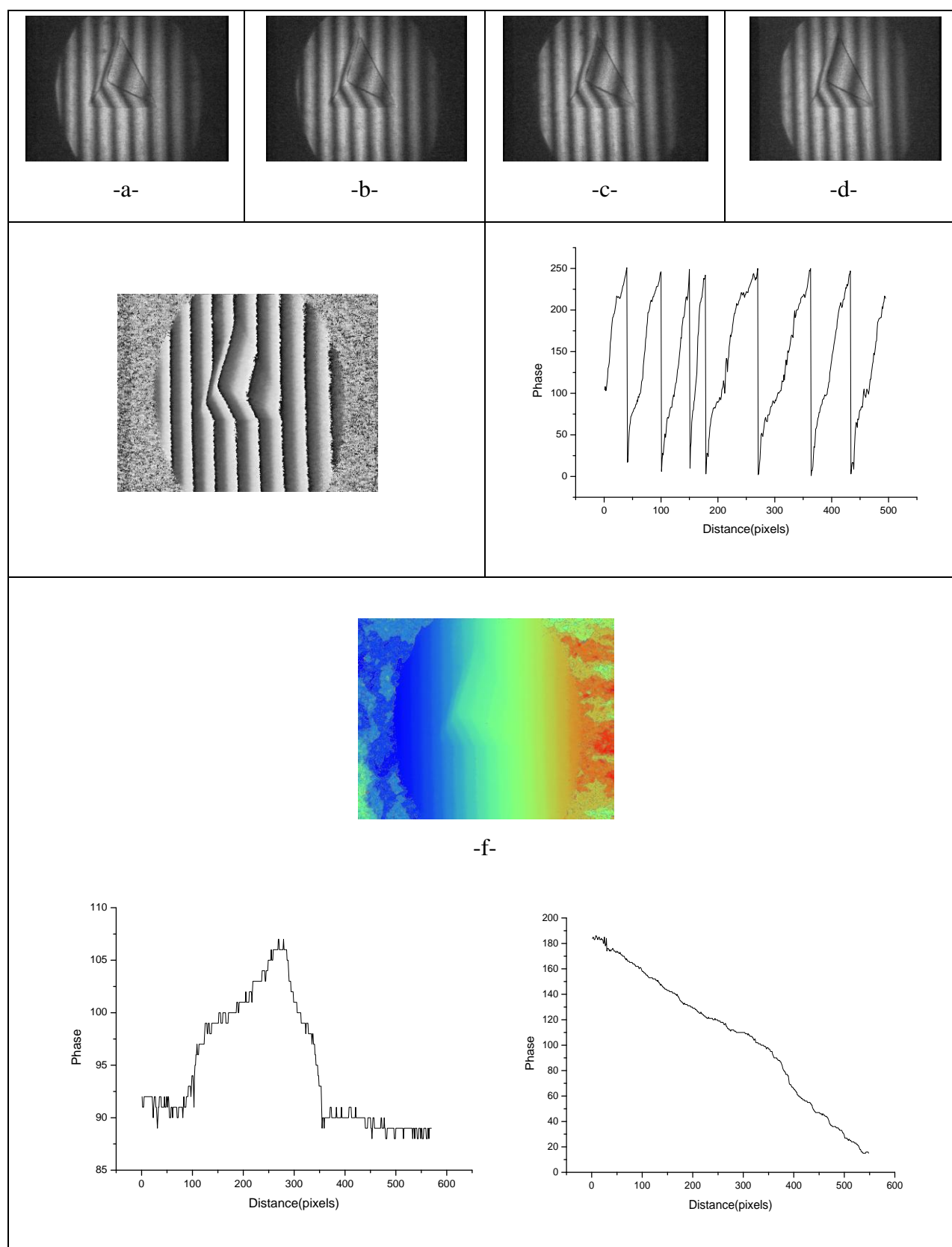
d.2. Pièce « pyramidale » en face au Laser : Projection des franges à $P=5$ mm (groupe A)

Fig. IV.27. Projection des réseaux à 20 franges sur la pièce « pyramidale » placée en face au laser

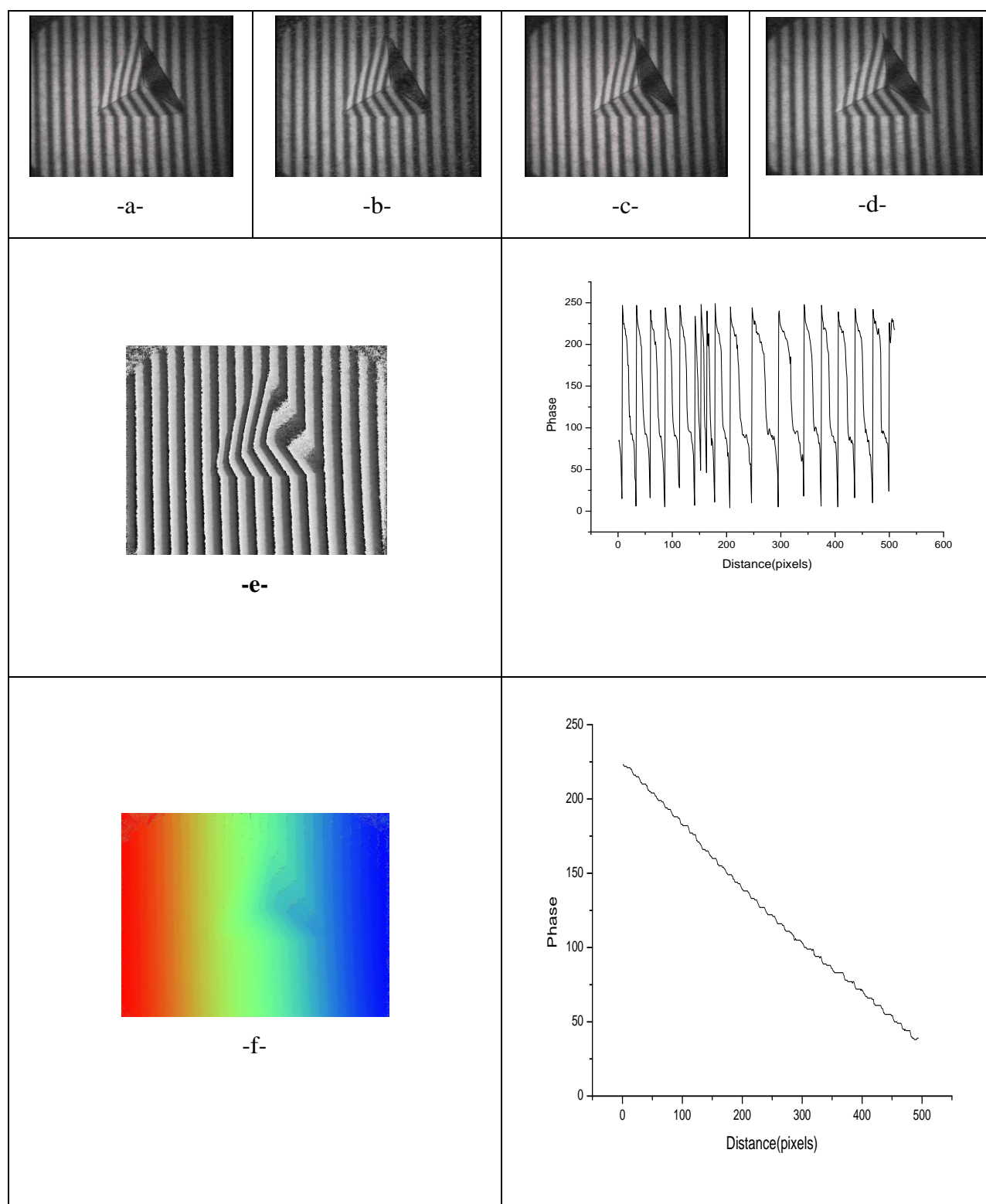
d.3. pièce pyramidale en face au CCD : Projection des franges à $P=2$ mm (groupe B)

Fig. IV.28. Projection des réseaux à 60 franges sur la pièce « pyramidale » placée en face à la CCD

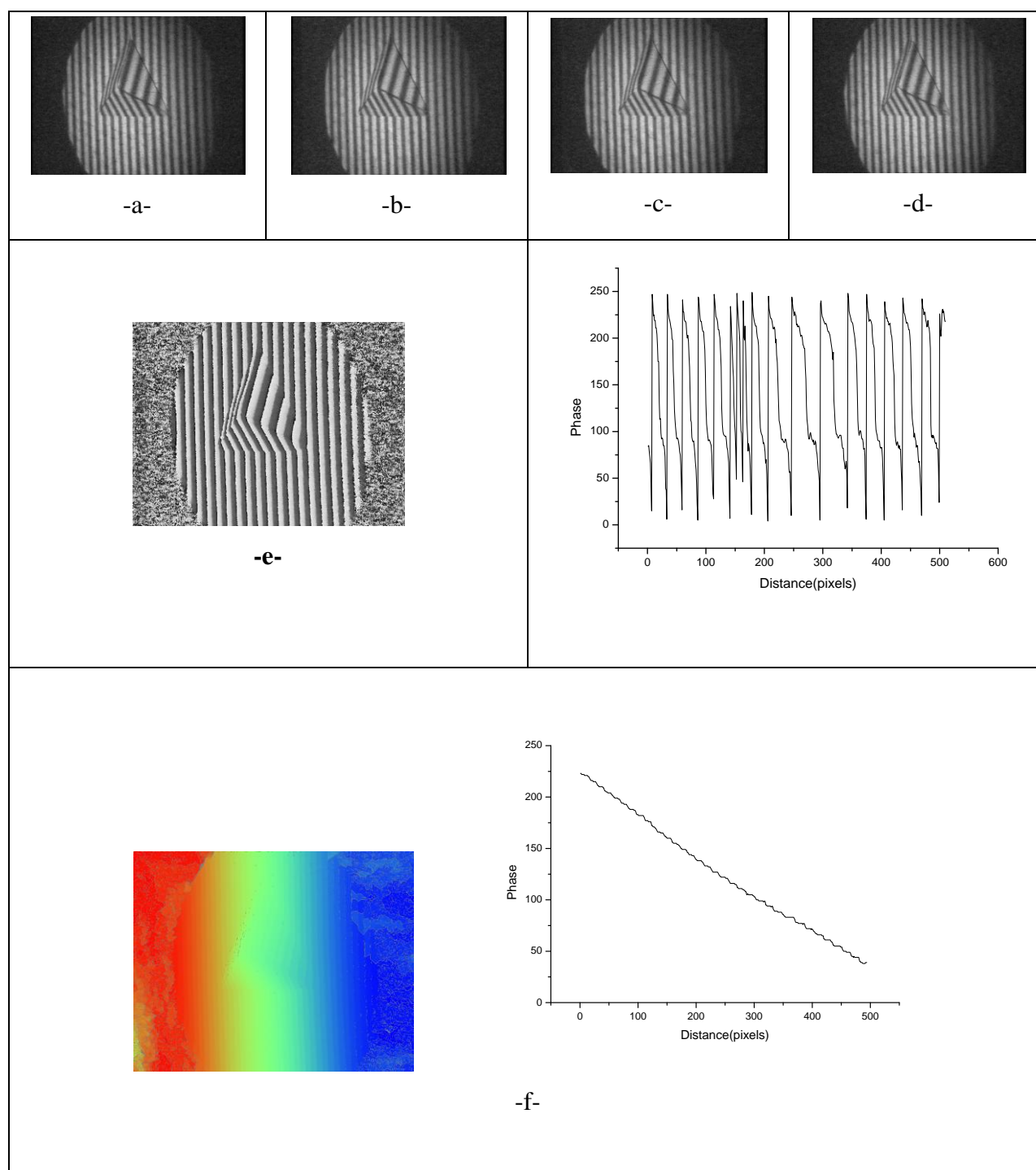
d.4. Pièce « pyramidale » en face au laser : Projection des franges à $P=2$ mm (groupe B)

Fig. IV.29. Projection des réseaux à 60 franges sur la pièce « pyramidale » placée en face au laser

Résultats

Pour la forme pyramidale en fait le même travail ;

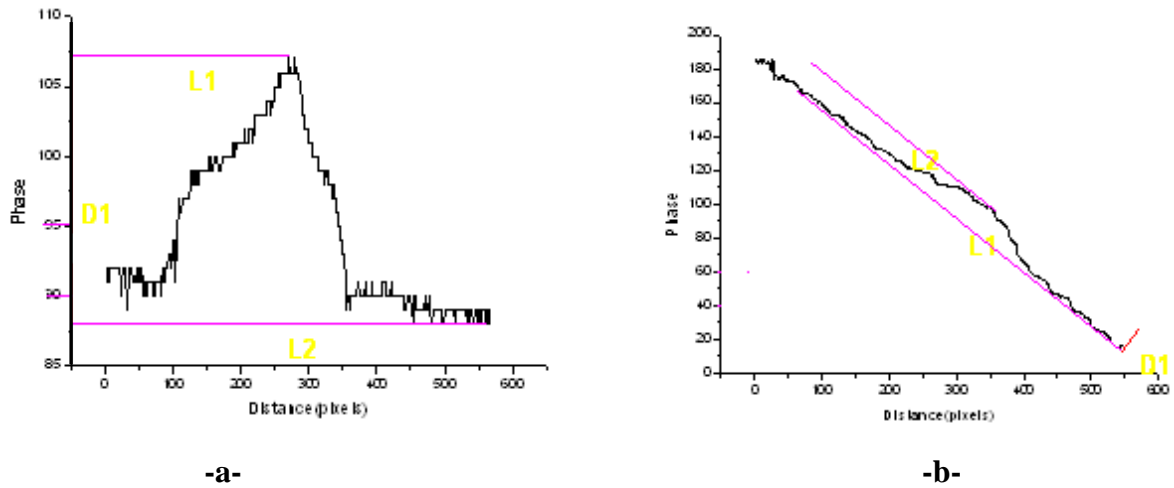


Fig. IV.30.

On mesure la phase pour chaque ligne de phase, d'après le profil vertical et le profil horizontal. On trouve :

	-a-	-b-
$\Phi(x,y)$ (rad)	45,613	51,92
D1 (μm)	4596,19	5232,59
D1 (mm)	6,500	7,400

Tableau .11

IV.8. Méthode géométrique

Les franges projetées sur une surface plane sont des lignes droites. Si un défaut est introduit dans la surface, les franges conservent leur forme dans la région inchangée, toutefois, la position latérale des franges dans la région du défaut se déplacera en proportion de la profondeur (ou hauteur) du défaut, comme représenté sur la figure 3. [46] Deux techniques pour mesurer le volume du défaut, une comparaison et l'autre absolu, sont données ci-dessous.

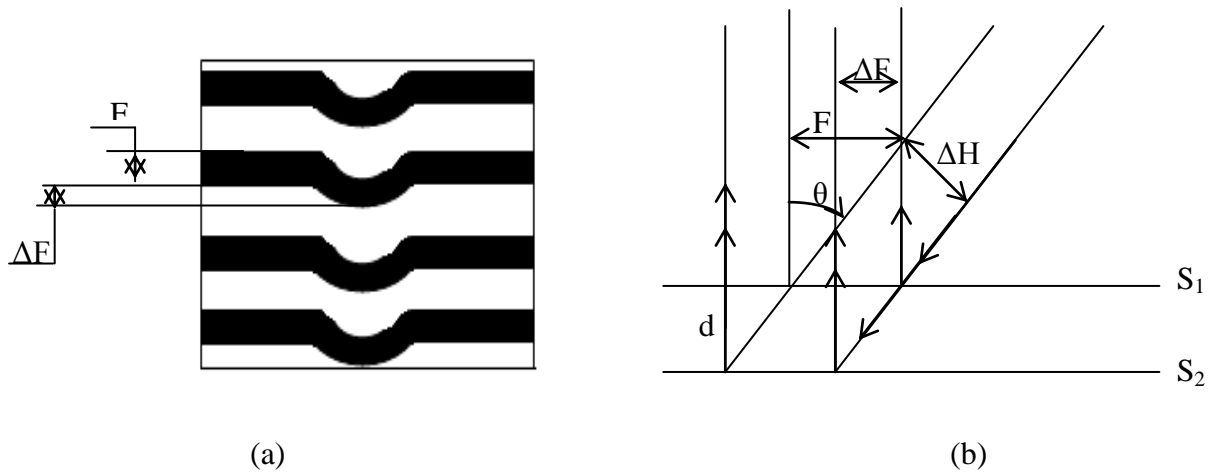


Fig IV.31 (a) Franges projetées sur la surface d'un objet plat avec un défaut de surface
(b) Détermination de la profondeur

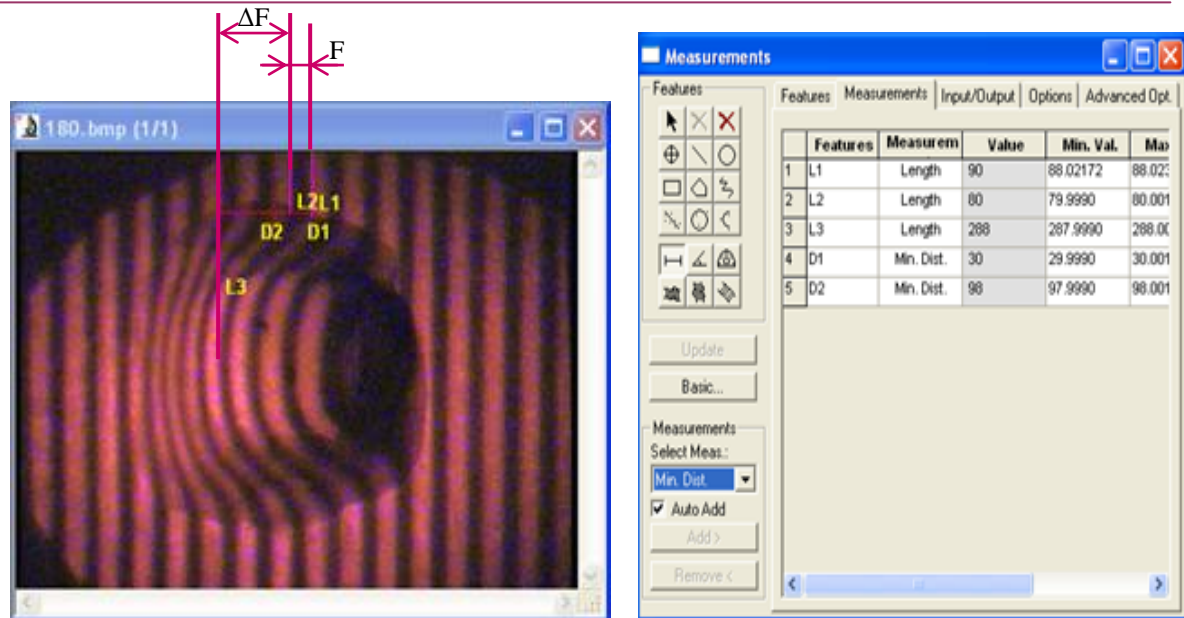
La figure IV montre comment la profondeur (hauteur) peut être déterminée. La surface S_1 est éclairée sous un angle θ d'incidence par rapport à la direction d'observation. Comme la position de la surface S_1 se déplace de (d) dans la direction d'observation vers S_2 la déflexion de franges projetées sur la surface ΔF . Il peut être démontré que:

$$d = \frac{\Delta F \Delta H}{\sin \theta F} \quad (\text{IV.1})$$

Où F est la largeur de la frange et ΔF sa déflexion, θ est l'angle de projection, et ΔH c'est la période de réseau

IV.8. 1 Application

Pour la mise en œuvre de la technique on utilise le même montage, en projette un réseau de frange sur l'objet à contrôler, et on capte une seule image de la surface, puis en passe à un procédé de calcul simple par un logiciel de calcul, on détermine F et ΔF pour les remplacer dans l'équation IV.1



Avec $\theta = 45^\circ$, le ΔH est différent pour chaque groupe de réseau utilisées c. à d :

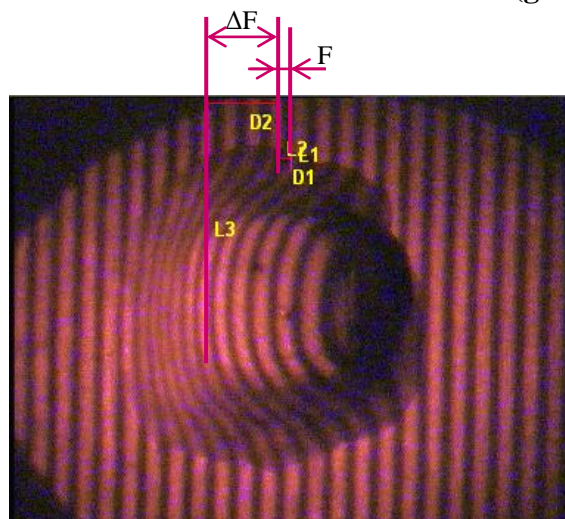
Pour 20 franges $\Delta H = 5$ mm

Pour 60 franges $\Delta H = 2$ mm

Pour 90 franges $\Delta H = 1,5$ mm

Donc pour l'application de cette technique il suffit de prendre une seule image, qui est traité par la suite.

IV.8.2 Pièce bombée en face au CCD (groupe C)

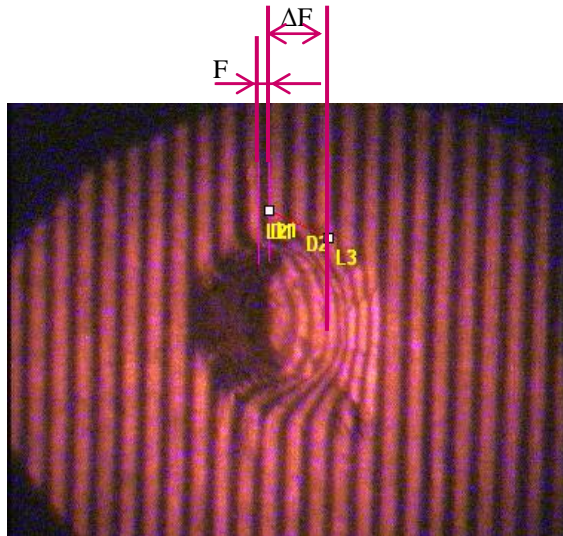


En mesure les distance F et ΔF (en pixels) d'après l'image acquise par la CCD, remplaçons la valeur de l'interfrange approprié au nombre des franges ;

Après l'application de la formule on trouve :

$$d = 12,99 \text{ mm}$$

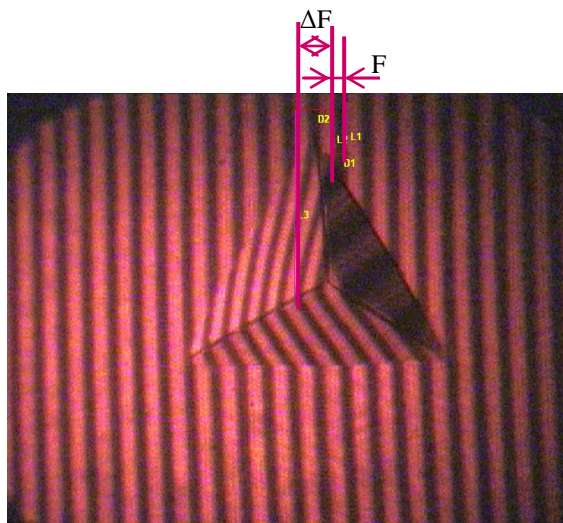
IV.8.3 Pièce creuse en face au CCD (groupe C)



Après l'application de la formule on trouve :

$$d = 13,18 \text{ mm}$$

IV.8. 4 Pièce d'une forme pyramidale en face au CCD (groupe C)



Après l'application de la formule on trouve :

$$d = 7,071 \text{ mm}$$

IV.8. 5 Discussions

D'après les différents résultats obtenus, pour mesurer les défauts macro géométriques, on peut conclure que :

- ◆ La méthode de travail adoptée est simple et précise surtout pour le contrôle et mesure des défauts macro géométrique ;
- ◆ Les résultats des mesures effectuées sont presque identiques, quelque soit la valeur de l'interfrange du réseau de franges projetées;

- ◆ Placer l'objet en face à la source laser nous permet d'éviter la zone d'ombre qui peut fausser les résultats.
- ◆ La sensibilité de la mesure de contour dépend de θ . Lorsque $\theta = 0^\circ$, la sensibilité est nulle, l'observateur voit des franges rectilignes. Lorsque θ tend vers 90° , la sensibilité augmente, mais selon la forme de l'objet il y a apparition d'ombres du coté opposé à la source (cerclé en bleu sur les figures ci-dessus), empêchant la mesure de la forme sur tout le champ d'observation. De plus, pour obtenir une bonne résolution suivant z , l'interfrange doit être la plus faible possible ; Donc pour atteindre a des très bon résultats il faut de jouer sur l'angle entre la source laser et la camera CCD en fonction de la forme de l'Object à contrôler.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le rôle des surfaces dans les technologies modernes justifie le nombre très important d'instruments nouveaux apparus pour les étudier. Caractériser les surfaces d'un point de vue purement géométrique est chose complexe.

Les mesures par les méthodes optiques ne se font pas par contact, donc les profils des surfaces ne sont pas endommagés, et donnent de bons résultats. D'autre part, l'association d'outils informatiques et de traitement d'images ont apporté des meilleures performances à ces techniques. Le traitement mathématique des données a été une étape intermédiaire entre la phase expérimentale et l'évaluation finale de l'état de surface.

La mesure de forme de n'importe quel objet, en utilisant la méthode de projection de franges, est réalisée en trois étapes : d'abord, la création des réseaux de franges et leur projection sur la surface de l'objet en question, l'enregistrement de l'empreinte optique de l'objet dite carte de la phase ou image de la phase déroulée, et enfin, la récupération de l'information concernant les hauteurs de la surface à partir de cette carte de phase.

Dans ce travail nous avons apporté une contribution à la mise en œuvre pratique de la technique de projection des franges pour contrôler les défauts macro et micro-géométriques des surfaces que nous avons anticipé par une partie théorique riche en informations utiles afin de se familiariser avec ces applications.

La technique de projection de franges agencée pour les mesures de rugosité des surfaces est assez précise (de l'ordre du micromètre et plus) et offre de bons résultats.

Au cours de ce travail, nous avons pu acquérir une large expérience de compréhension et d'emploi des différents composants optiques et d'utilisation d'outils de capture et de traitement d'images (caméra CCD, logiciel).

Par ailleurs, lors de la réalisation de ce travail nous avons rencontré quelques difficultés techniques :

- ◆ Le bruit de mesure, les aberrations des systèmes optiques, le calibrage, etc.
- ◆ Le faisceau laser qui doit être filtré spatialement pour éliminer les hautes fréquences spatiales et avoir une tache lumineuse de taille bien déterminée pour éliminer l'effet gênant de diffraction.

- ◆ Le capteur (CCD). qui doit être sensible aux faibles intensités lumineuses; afin d'intercepter toute information aussi faible qu'elle soit.
- ◆ Les diapositifs représentant les interférogrammes décalés en phase, doivent être positionnés rigoureusement dans le support destiné à les recevoir. Un déplacement aussi minime qu'il soit peu brouiller de façon directe l'incrément de phase introduit, et par conséquent perturber toute la procédure de mesure. Pour éviter ce problème il est préférable d'utiliser un projecteur à écran LCD (*Liquid Crystal Display*) ou un projecteur SLM (*Spatial Light Modulator*) qui projette directement des interférogrammes simulés et contrôlés par ordinateur.
- ◆ Le déroulage de la phase est une tâche triviale si la distribution de la phase enroulée est idéale. Alors que dans les mesures réelles : la présence d'ombres, de faibles modulations de franges, des réflectivités non-uniformes de la surface de l'objet, discontinuités des franges, bruit etc. rendent le déroulage de la phase très difficile.
- ◆ Les difficultés de réglage et d'alignement des éléments optiques, et aussi le réglage de l'angle de projection qui doit être bien ajusté pour compléter les calculs.
- ◆ L'angle de projection doit être précise, car un mauvaise ajustage introduit des erreurs dans les résultats final du calcule.

Enfin, nous souhaitons que ce travail apporte une aide précieuse à tous les chercheurs travaillant dans ce domaine.

ملخص:

إن الغرض من هذه الأطروحة هو معاينة و دراسة خصائص خشونة السطوح , إذن يتعلق الأمر باستعمال أساليب دراسة الخشونة, لا زالت حالة السطح دائما تعتبر كمجال هام للبحث التطبيقي . ومع ميلاد الأساليب المخصصة لمعاينة حالات السطوح عن بعد, قمنا بتطبيق تقنية إسقاط الحواشي.

التحليل الأوتوماتيكي هو تقنية تستعمل في مراقبة وقياس العيوب الموجودة في أي سطح مثل الشقوق, الحفر, الارتفاعات.

.....

باستطاعتنا تعيين الموضع, العمق, وحجم أي عيب أوتوماتيكيا, قياس هذه العيوب يستوجب منا معطيات ثلاثية الأبعاد يمكن استغلالها بواسطة الحاسوب.

وهذا جميعه يتحقق بواسطة تقنية إسقاط الحواشي فوق السطح المراد دراسته, نقصد بهذا الوصول إلى المعلومات بعمق . تتم معاينة السطح بواسطة كاميرا رقمية, أين تحول الصور الملتقطة للسطح إلى صور عددية و تخزن لأجل أن تعالج عدديا و تحلل عن طريق نظام آلي.

الكلمات المفتاحية :

علم القياس البصري, المراقبة عن بعد, التداخل الضوئي, الإزاحة في الطور, إسقاط الحواشي

Résumé :

La présente thèse a pour objectif l'analyse et la caractérisation de la rugosité et les écarts de formes des surfaces. Il s'agit donc d'utiliser des méthodes de caractérisation de la rugosité, les états de surfaces continuent toujours d'être considérés comme un domaine de recherche appliquée très important. Comme la connaissance des méthodes de caractérisation de l'état de surface non destructives on a appliqué la technique de projection des franges.

L'analyse automatique des franges est une technique utilisée pour le contrôle et la mesure des défauts de surfaces tels que les fissures et creux, bosses...

L'emplacement, la profondeur et la taille de tels défauts peuvent être déterminés automatiquement. Les mesures de ces défauts nécessitent des données tridimensionnelles exploitables par ordinateur.

Ceci est réalisé par la technique de projection des franges sur l'objet à étudier, c.-à-d. accéder à l'information en profondeur. L'objet est alors observé par une caméra CCD, dont l'image est numérisée et stockée pour être traitée numériquement et analysée par un système informatique.

Mots- clés:

Métrie optique, contrôle non destructif, interférométrie, décalage de phase, projection de franges.