



Université Mohamed Khider de Biskra

Faculté des sciences exactes et des sciences naturelles

Département sciences de la matière

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences de la matière

Physique

Physique des matériaux

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Khadraoui Habiba

Braiki Amel

Le : 20-9-2020

Contributions aux études interférométriques pour des applications en métrologie 3D

Jury:

Ben salah najoua	M.C.B	Université Biskra	Président
Haddar mebarik	M.C.B	Université Biskra	Examinateur
Ferhat mohammedi	Professeur	Université Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2019-2020

Remerciement

*Tout d'abord nous louons et remercions Dieu Tout-Puissant, qui nous a
bénis avec la bénédiction de la connaissance et a éclairé notre chemin
Vers des voies de lumière et de connaissance.*

*En guise de gratitude, nous ne pouvons nous empêcher d'offrir nos plus
sincères remerciements et appréciation À mon professeur "Ferhat
Mohammedi", pour avoir accepté mon cadre, et pour les grands efforts,
et Ses précieux conseils scientifiques.*

*Je remercie également le professeur - " Ben salah Najoua " d'avoir
accepté de présider le comité de discussion, comme je remercie
Professeur " Haddar Mebark " pour son acceptation de discuter de ce
mémoire, et j'espère qu'ils m'aideront avec leurs opinions précieuses
et constructives.*

*Et tous ceux qui ont contribué et nous ont tendu la main dans
l'accomplissement de cet humble travail.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de plusieurs Années d'étude à :

Mes chers et respectueux parents en récompense de leurs sacrifices et leur clairvoyance qui m'a servi et me servirait tout au long de ma vie

Mes chères soeurs :

Mon cher frère

Je dédie également les fruits de mes efforts à mon mari et à mon soutien pour la vie

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

A moi-même.

.....

Table des matières

Introduction générale.....	01
Chapitre I : Analyses mathématiques	
.1.1 Introduction.....	04
.1.2 Les réseaux	05
.1.3 Les Franges.....	08
.1.4 Les moiré locaux.....	09
Chapitre II :Analyse géométrique et Interférométrie de moiré	
.2.1 Cas du montage parallèle.....	16
.2.2 Cas du montage non parallèle.....	17
.3 Condition pour une méthode autoréférentielle.....	20
.4 Résultats expérimentaux.....	23
Chapitre III : Applications des méthodes interférométriques	
.3.1 Application médicales	27
.3.2 Interférométrie Radar	28
.3.3 Approche informatique	29
.Explication de l'interférométrie laser	30
3.5.1. Les fondements.....	30
Interférométrie appliqué.....	31
Acquisition des image sur pc avec carte vidéo	33
Caractéristique.....	34
Tout type de matériaux peut être analyse.....	35
.Topographie des franges de moiré pour détecter la scoliose chez les enfants	37
Conclusions	39
Références bibliographiques.....	41
Résumé	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les techniques interférométrique sont depuis longtemps fait preuve de leurs remarquables aptitudes dans le domaine du contrôle industriel et sont susceptibles d'assurer, avec une très haute précision, des mesures sans contact dans les domaines de l'instrumentation optique, de la mécanique, des études vibrationnelles, du secteur è

Ces méthodes interférométrique associe les performances des nouveaux capteurs optiques ont la possibilité d'effectuer en temps réel des mesures de déformations ou de vibrations en comparant le front d'onde d'un faisceau lumineux après réflexion sur un échantillon à tester avec le front d'onde de ce même faisceau enregistré préalablement sur un capteur, dans une configuration de référence.

La technique de lumière structurée est une technique de mesure de la forme d'une surface.

Cette mesure donne la cote de chaque point de la surface par rapport à une surface déréférence. 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 spatial'. 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, ce qui permet l'étude d'objets vivants. A titre d'exemple la technique est appliquée à différentes observations.

L'objectif de notre travail a été de tester une méthode d'analyse automatique d'image, basée sur l'interférométrie de Moiré, cette technique utilise les propriétés de cohérence des faisceaux laser et permet d'accéder à la mesure globale et sans contact, de micro-déplacements à la surface d'une pièce de manière très précise (résolution 0,1 μm). L'enregistrement étant fait directement sur caméra CCD), les visualisations en temps réel, pendant l'application de la contrainte, sont possibles sur le moniteur vidéo. Les déformations mécaniques sont obtenues par le traitement d'image (dérivation spatiale) à partir de la carte des déplacements. Le tenseur des contraintes en tout point de la surface est alors déterminé à partir de la loi de comportement.

Hormis, l'introduction et la conclusion générale, la travail est réparti en trois chapitres distincts **Chapitre: I** Les notions de base de l'interférométrie optique, partagé en deux volets : § Partie A : introduction sur l'optique de l'information. § Partie B : Traitement théorique de l'information. · **Chapitre: II**: Analyses géométriques et interférométriques générés par ordinateur et interférométrie Moiré (méthode opto-informatique). Et certains résultats obtenus par reconstruction par ordinateur· **Chapitre: III**: Est consacré sur les recherches bibliographiques et les spécificités de l'imagerie Moiré et ses applications spécialement en

INTRODUCTION GENERALE

interférométrie. Le chapitre suivant se veut être simplement un exposé synthétique mais non exhaustifs aux divers applications de l'interférométrie optique

Chapitre I

Analyses mathématiques

1-1 Introduction :

L'interférométrie repose sur le même principe: au lieu de superposer deux tissus, ou deux réseaux, elle consiste à superposer deux ondes; une modification infime de la phase de l'une des deux ondes produit une modification macroscopique des figures d'interférence. La fameuse expérience de Michelson et Morley à l'origine de la Relativité Restreinte, a exploité cette propriété d'énorme grossissement que produit l'effet de la lumière structurée!

En 1874, Rayleigh [1] proposait une méthode reposant sur l'effet de moiré pour tester la qualité des réseaux de diffraction utilisés en optique: si on en superpose deux, en principe identiques, le moindre défaut dans la périodicité sera mis en évidence par les franges de moiré.

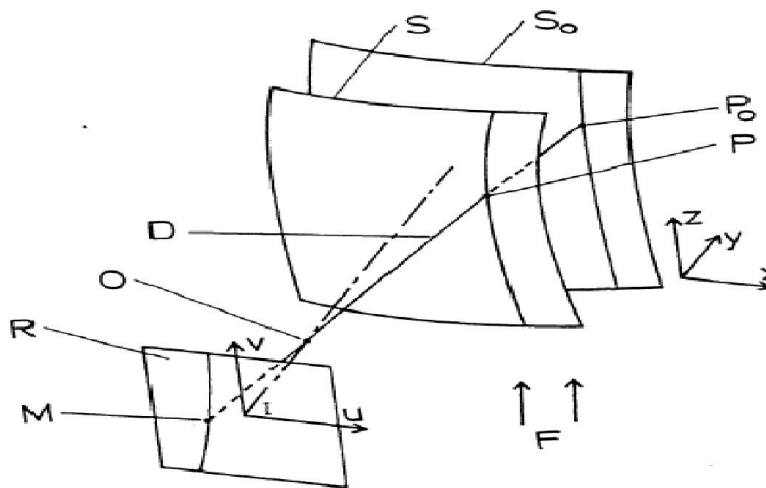
La lumière structurée il est donné un phénomène bien connu des expérimentateurs; en cristallographie, on réalise des moirés en superposant deux lames très minces de cristaux: les franges renseignent sur l'alignement des cristaux, et surtout sur les dislocations de cet alignement. Des ingénieurs l'utilisent pour mettre en évidence des déformations infinitésimales dues à une contrainte mécanique ou thermique.

La leçon générale que nous pouvons tirer de ces exemples est donnée l'effet de grossissement, de microscope, du moiré: les franges (et le déplacement d'icelle) sont un effet macroscopique d'une cause microscopique; de ce fait, elles sont utilisées depuis longtemps par les expérimentateurs pour mettre en évidence une déformation ou un mouvement microscopiques.

Il peut paraître curieux, à première vue, que les mathématiciens ne se soient pas intéressés au moiré. Pourtant, si on y réfléchit, on croit en deviner la raison. En effet, le physicien, ou plus généralement l'homme pratique, ressent très nettement l'opposition entre le microscopique et le macroscopique, car il se réfère à l'intuition sensible: est microscopique ce qui est trop petit ou trop fin pour être visible à l'œil nu. Le physicien, pour l'essentiel, consiste à postuler théoriquement une structure microscopique, impossible à observer directement, mais qui explique, par l'intermédiaire des mathématiques, les structures macroscopiques appartenant à notre univers sensible. Les notions de microscopique et de macroscopique ne sont données que trop bidentées pour le physicien. Pour le mathématicien, par contre, ces notions ne s'imposent pas; si vous préférez, la nature n'est pas là pour les lui placer en toute occasion sous les yeux. Et de fait, le mathématicien classique, traditionnel, compte tenu de sa formation, est plutôt enclin à les trouver dépourvues de sens mathématique, justement parce qu'elles se réfèrent à l'intuition

sensible! Quelle différence, en effet, ya-t-il, entre 10^{-1000} , 10^{-10} , 1 , 10^{10} , 10^{1000} ? A aucune considération purement mathématique ne permet de trouver une différence de nature entre ces nombres. Pour donner un sens mathématique aux notions de micro et macroscopique, il faudrait d'abord une définition absolue, universelle, du "petit", ou de l' "infiniment petit".

Figure 1.1 :Schéma théorique des surfaces moiré dans l'espace.



1.2. Les réseaux :

Ce qui caractérise les réseaux utilisés en optique, c'est l'alternance de zones noires et de zones transparentes; il n'est toute fois pas nécessaire que la densité ou transmittance soit discontinue: on peut passer du noir au clair graduellement. Un réseau sera donc caractérisé par les données suivantes:

- (a) Une famille de courbes très serrées, par exemple les-courbes de niveau d'une fonction ϕ .
- (b) Un paramètre a mesurant l'espacement des courbes; par exemple les courbes précédentes seront les lieux des points tels que ϕ soit multiple de a .
- (c) Une fonction f qui caractérise la variation de densité entre les zones du réseau; f sera une fonction périodique standard, de période égale à 2 et la densité sur le réseau sera :

$$\rho = f\left(\frac{\phi}{a}\right). \tag{1.1}$$

Le réseau idéal ou réseau mathématique sera donc caractérisé par ces trois données; une fonction ϕ définie dans le plan, a valeurs numériques; un paramètre a infiniment petit; une fonction périodique standard f . Nous appellerons q le profit du réseau, a le pas et f

le module. Voyons quelques exemples: pour un réseau de droites parallèles (a l'axe des y pour fixer les idées) dont les intervalles sont alternativement noirs et transparents, nous avons:

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= x & (1.2) \\ f(t) &= 0 \quad \text{si } 0 \leq t < 1, \\ &= 1 \quad \text{si } 1 \leq t < 2. \end{aligned}$$

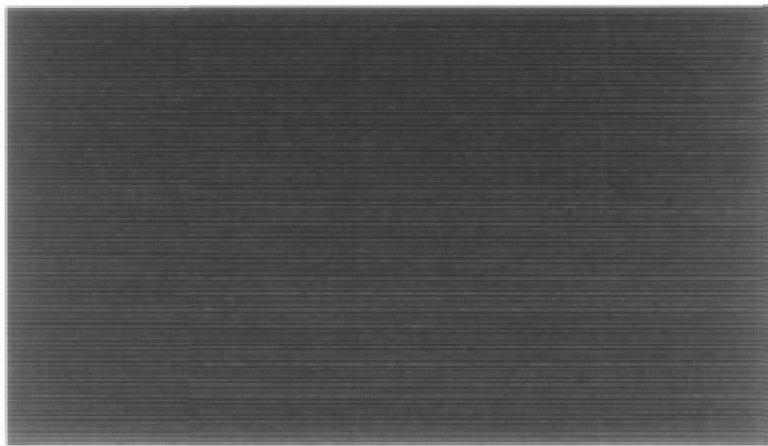
Un tel réseau s'appelle un réseau de Ronchi, Pour un réseau de cercles concentriques équidistant :

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ (1.3) \end{aligned}$$

Rien n'empêche de considérer des réseaux ou les bandes ne sont complètement noires (ou complètement transparentes) qu'en leur milieu, et ou l'on ne passe du noir au transparent que progressivement. Dans ce cas, le module est une fonction continue, par exemple :

$$f(t) = \sin \frac{\pi}{2} t$$

Nous voudrions alors examiner comment se repartit la densité lorsque nous superposons deux réseaux. En un point donne (x, y) la densité



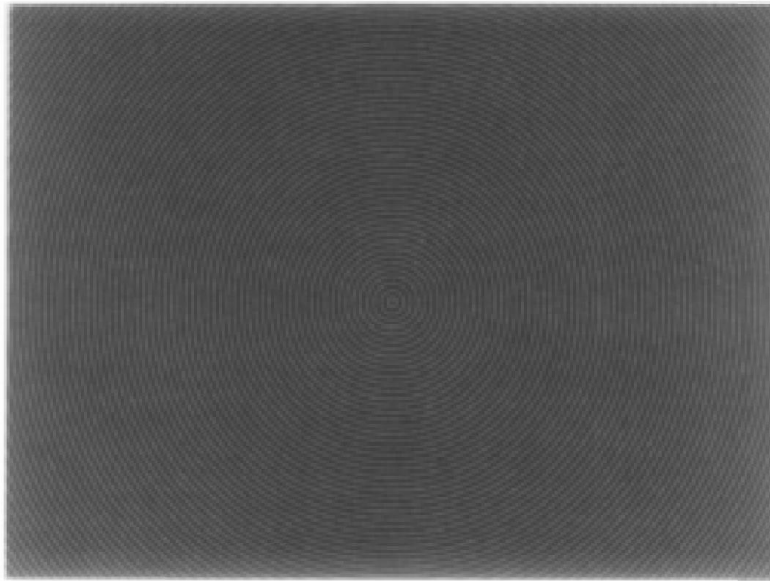


Figure 1.2 : En haut, un réseau de droites parallèles équidistantes (réseau de Rouchi) de profil $\phi(x, y) = y$. En bas, un réseau de cercles concentriques équidistants, de profil $= \sqrt{x^2 + y^2}$

Résultante est le produit des densités de chaque réseau; en effet, la densité ou transmit tancé peut être considérée comme le coefficient de transmission de la lumière à travers le voisinage immédiat de ce point. Si le réseau est parfaitement transparent en ce point, toute la lumière est transmise: la densité est 1; si le réseau est

noir, rien n'est transmis: la densité est 0; si la moitié exactement est transmise, la densité est $\frac{1}{2}$. Donc lorsqu'on superpose plusieurs réseaux, les densités se multiplient; notre loi de superposition est:

$$\rho(x, y) = \rho_1(x, y) \rho_2(x, y). \quad (1.4)$$

Mais attention! Seul l'effet macroscopique doit être pris en compte. Notre œil ne peut voir que la partie standard des chasés et ne distingue pas des points infiniment voisins²; or, la densité produit ρ présentera dans le halo même de chaque point d'innombrables fluctuations, passant de 0 à 1 sur des distances de l'ordre de a , comme le tissu moiré vu à la loupe. Notre œil ne verra donné en un point que la densité moyenne du halo. La densité macroscopique résultante sera donc :

$$P(x_0, y_0) = \text{St} \left[\frac{\iint_D \rho_1(x, y) \rho_2(x, y) dx dy}{\iint_D dx dy} \right] \quad (1.5)$$

ou $\text{St} [\]$ désigne la partie standard d'un nombre et D un domaine quelconque contenu dans le halo de (x_0, y_0) . Il faut bien sûr que cette partie standard ne dépende pas de D .

1.3. Les Franges :

L'effet macroscopique de la superposition de deux réseaux, c'est-à-dire l'effet de moiré, est entièrement décrit par la densité macroscopique. Or, le théorème 1 nous montre que celle-ci reste constante le long des courbes $\lambda = C^{te}$, donc en particulier ses valeurs maxima, comme ses valeurs minima, se répartissent le long des courbes $\lambda = \lambda_{max}$, et $\lambda = \lambda_{min}$. Au voisinage des courbes $\lambda = \lambda_{max}$ le moiré sera relativement transparent, tandis qu'au voisinage des courbes $\lambda = \lambda_{min}$ il sera plutôt opaque. Autrement dit, le moiré présentera des franges alternativement sombres et claires, parallèles aux courbes $\lambda = C^{te}$. La variation de la densité entre ces franges est évidemment donnée par la fonction $f^*g(\lambda)$; cette fonction est périodique, donc les franges de même nature correspondent à des valeurs de A différant entre elles d'un entier pair si $\lambda = \lambda_{max}$ est le centre d'une frange Claire, les autres franges claires se répartissent au voisinage des courbes $\lambda = \lambda_{max} + 2n, n \in \mathbb{Z}$. La densité du moiré est donc donnée par un module, qui n'est autre que f^*g . Quelques exemples intéressants méritent qu'on les étudie de plus près à l'aide du théorème 1: ainsi, les réseaux de module carré :

$$\begin{aligned} f(t) &= 0 \text{ si } 0 \leq t < 1 \\ &= 1 \text{ si } 1 \leq t < 2 \end{aligned}$$

Ou de module sinusoïdal

$$f(t) = \sin^2 \frac{\pi t}{2} \quad (1.6)$$

Nous voudrions maintenant examiner dans quelles conditions on peut effectivement observer des franges de moiré. Le théorème 1 nous donne des conditions suffisantes pour avoir une densité macroscopique; mais si celle-ci est constante, on n'observera pas de franges, mais seulement du gris uniforme. Par exemple, la densité macroscopique d'un réseau (non superposé à un autre) est partout égale à $\frac{1}{2} \int_0^2 f(t) dt$. D'autre part, qu'observera-t-on dans les cas où les hypothèses du théorème ne sont pas

vérifiées? Cela peut se produire dans les cas suivants:

$$(a) \frac{\varphi - \psi}{a} \text{ est infiniment petit} \tag{1.7}$$

$$(b) \frac{\varphi - \psi}{a} \text{ est infiniment grand,} \tag{1.8}$$

$$(c) \frac{1}{a} \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial x} & \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi}{\partial x} & \frac{\partial \psi}{\partial y} \end{vmatrix} \text{ est infiniment petit,} \tag{1.9}$$

$$(d) \frac{1}{a} \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial x} & \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi}{\partial x} & \frac{\partial \psi}{\partial y} \end{vmatrix} \text{ est infiniment grand,} \tag{1.10}$$

Notons bien qu'en général, les cas a et c peuvent toujours se produire le long d'une courbe, plus ou moins complexe selon la situation, mais qui est alors un ensemble invisible macroscopiquement. Par exemple, les points où $(\varphi - \psi)/a$ est infiniment petit forment simplement le halo de la courbe $\lambda = 0$, ce qui n'a aucune incidence macroscopique, et il en va de même pour le cas (c). Le cas (b) signifie que le paramètre A est infiniment grand: dans ce cas, une variation macroscopique (même petite) de x, y produira une infinité d'oscillation de $f^*g(\lambda)$ dont seulement la moyenne, constante puisque f^*g est périodique, sera perceptible: pas de franges, seulement du gris uniforme. Par conséquent, comme situations où le théorème 1 ne s'applique pas, nous allons examiner celles où les conditions a, c, d sont vérifiées sur tout un ouvert macroscopique. En fait, dans certains cas, nous pouvons négliger les conditions c et d, par exemple, si dans un ouvert U du plan, le jacobien

$$\frac{1}{a} \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial x} & \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi}{\partial x} & \frac{\partial \psi}{\partial y} \end{vmatrix} \tag{1.11}$$

est infiniment petit ou infiniment grand, tout en restant du même ordre. Il nous suffit alors de remplacer conjointement ϕ, ψ et a par $m\phi, m\psi$ et ma où m est une constante telle que :

$$\frac{1}{m} \frac{1}{a} \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial x} & \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi}{\partial x} & \frac{\partial \psi}{\partial y} \end{vmatrix} \tag{1.12}$$

Reste fini dans tout U . En remplaçant ainsi ϕ, ψ et a , nous ne changeons rien au réseau ni au paramètre λ , sauf sur la frontière de U qui est en général un ensemble macroscopiquement invisible. Mais cela peut produire des discontinuités des franges le long

de cette frontière. Ainsi il sera parfois possible de décomposer le plan en ouverts disjoints, de frontière négligeable, dans chacun desquels

$$\frac{1}{a} \begin{vmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial x} & \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi}{\partial x} & \frac{\partial \psi}{\partial y} \end{vmatrix}$$

Ne soit ni infiniment petit, ni infiniment grand. Mais il pourra y avoir des discontinuités de la densité macroscopique le long des frontières.

Une discussion parfaitement exhaustive est impossible. Raisonnablement, il reste donné simplement à examiner le cas a: sur un ouvert Macroscopique U, $(\phi - \psi)/a$ est infiniment petit. Alors $\phi/a \simeq \psi/a$ et donc la moyenne sur un domaine D contenu dans le halo d'un pointes donné par

$$\text{St} \left[\frac{\iint_D f\left(\frac{\phi}{a}\right)g\left(\frac{\psi}{a}\right)dx dy}{\iint_D dx dy} \right] \tag{1.12}$$

Nous ne pouvons plus prendre λ comme coordonnée, mais nous pouvons prendre par exemple l'abscisse curviligne ν le long des courbes $\phi = C^{te}$, et comme deuxième coordonnée $\mu = \psi$; alors l'expression précédente devient⁵:

$$\text{St} \left[\frac{\iint_D f\left(\frac{\mu}{a}\right)g\left(\frac{\nu}{a}\right)\frac{d\mu d\nu}{|grad\phi|}}{\iint_D \frac{d\mu d\nu}{|grad\phi|}} \right] \tag{1.13}$$

⁵ il n'est pas nécessaire pour faire ce changement de variable que $|grad\phi|$ soit fini dans U; s'il ne l'est pas, on choisit (comme pour

$$\frac{1}{a} \begin{vmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial x} & \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi}{\partial x} & \frac{\partial \psi}{\partial y} \end{vmatrix},$$

voir plus haut) une constante infiniment petite m du même ordre que $|grad\phi|$ et un changement de variable μ, ν dont le jacobien est $m/|grad\phi|$ au lieu de $1/|grad\phi|$. Mais il faut que sur tout U, $|grad\phi|$ reste de même ordre.

Si $|grad\phi|$ est macroscopiquement continue, tout se passe comme au théorème 1 dans U la densité moyenne est constante, égale à

$$f^*g(0) = \frac{1}{2} \int_0^2 f(t)g(t)dt \tag{1.14}$$

Et par conséquent, il n'y a pas de franges dans U, mais seulement du gris uniforme. On peut dire que c'est la situation limite où les franges ont un écartement infini: toutes les franges ont été rejetées à l'infini. Dans le cas b, c'était l'inverse: les franges, infiniment rapprochées, sont confondues et on ne voit plus que du gris uniforme.

Il pourrait arriver, toutefois, exceptionnellement, que $|grand \varphi|$ ne soit pas macroscopiquement continue et présente des oscillations en résonance avec celles de $f(\phi/a)$ et $g(\phi/a)$, de sorte que des franges pourraient être observées quand même. Nous ne ferons pas ici la théorie de ce phénomène.

1-4 Les moiré locaux :

Soit ϕ une fonction standard différentiable à l'ordre deux et supposons que nous observons au microscope⁶ avec un grossissement Y infiniment grand, le halo d'un point (x_0, y_0) sur un réseau de profil ϕ et de pas a/Y où a est infiniment petit. Nous ne verrons que du gris, mais cette image grossie est alors un réseau de pas a et de profil $\varphi(X, Y) = \phi(x_0 + X/Y, y_0 + Y/Y) - \phi(x_0, y_0)$. (Notons bien que le fait de retrancher la constante $\phi(x_0, y_0)$ ne change rien: deux profils qui ne diffèrent que d'une constante donnent le même réseau). Les courbes de niveau de φ sont, a/Y près, des droites. Supposons alors que nous superposons à ce réseau "vu" au microscope un autre réseau forme de droites parallèles (c'est-à-dire de profil $\psi(X, Y) = (1/Y)(X(\frac{\partial \varphi}{\partial x}) + Y(\frac{\partial \varphi}{\partial y}))$ aux courbes de niveau de φ et de même pas. Nous pouvons alors observer une moiré. De façon précise

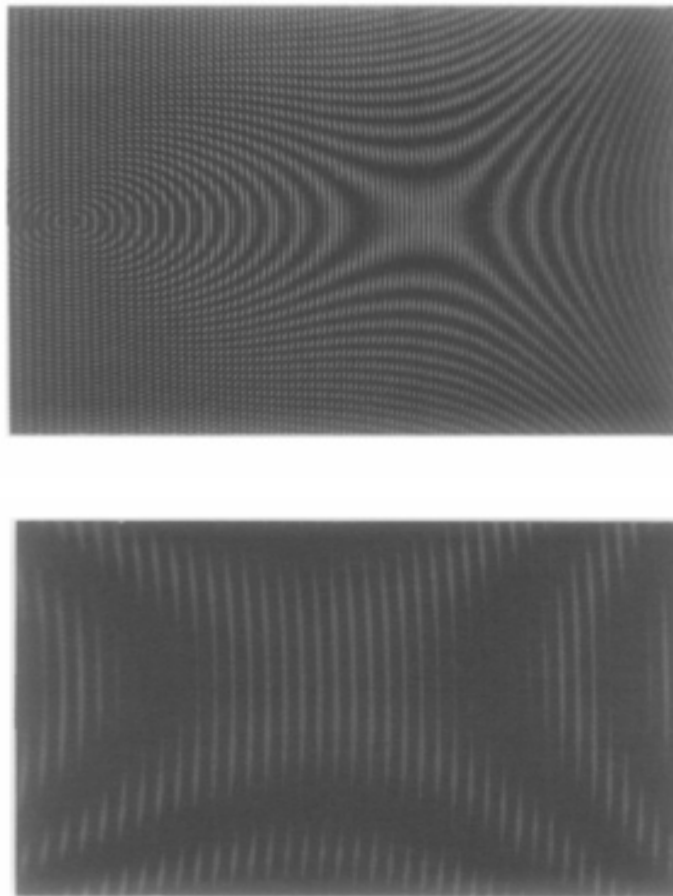


Figure.1.3 : Quelques exemples de moirés locaux; ci-dessus des hyperboles; à page suivante, des ellipses.

Ce sont des moirés concrets, c'est à dire que leur pas n'est pas infiniment petit, mais petit seulement. Cela implique quelques différences avec ce que prévoit la théorie purement mathématique: (a) Le moire local est observable non pas dans une région infiniment petite du plan, mais dans une région petite. (b) Les franges ne sont pas exactement les indicatrices de Dupin prévues par la théorie; sur les photographies ci-dessus, on a superposé de différentes manières un réseau de profil $\text{Log } x$ à un réseau de profil $\sqrt{x^2 + y^2}$; les indicatrices de Dupin seraient des coniques représentant la dérivée seconde (le hessien) de $\text{Log } x - \sqrt{x^2 + y^2}$. Mais ici les fonctions macroscopiques $\text{Log } x$ et $\sqrt{x^2 + y^2}$ et dm présentent une variation non négligeable à l'intérieur même de la région où le moire local est observable, de sorte que le reste dans la formule de Taylor $R(x, y)/Y^3$, n'est pas infiniment petit, mais seulement petit: la conique est déformée.

Chapitre II

*Analyse géométrique et
Interférométrie de moiré*

Les deux structures "interfèrent" pour produire le moiré, Nous constatons que les franges de moiré dépendent dans les deux cas de la géométrie du montage.

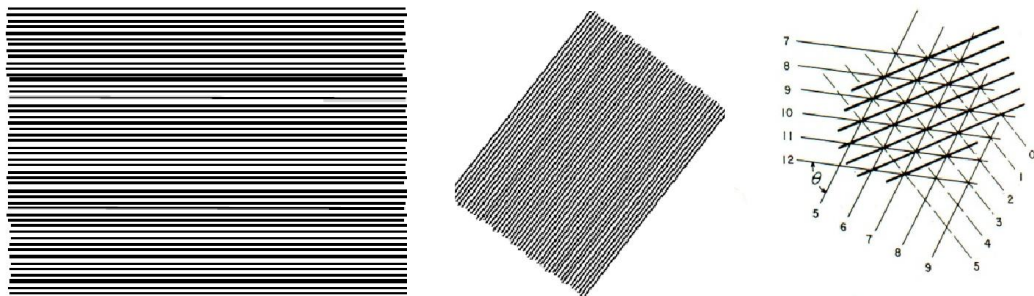


Figure 2.1. le moiré c'est après la superposition des deux réseaux

L'analyse mathématique du profil de moiré est d'une extrême difficulté puisque un effet microscopique imperceptible a un effet macroscopique. Dans le cas où les réseaux sont constitués de lignes droites, de lignes radiales, de cercles concentriques, la théorie ne quitte guère le terrain familier de la géométrie élémentaire. Soient deux réseaux (F) et (G) formés de traits rectilignes et équidistants, que nous superposons dans un plan O x y uniformément éclairé le premier réseau de pas (P1) et le second de pas (P2)

Les lignes sont numérotés par :

$h = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$ pour le premier

$s = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$ Pour le second réseau

La première équation figure 1 le réseau à gauche est donnée par :

$$F(x, y) = y(h) \text{ avec } h = x/P1.$$

La seconde équation de la figure à droite incliné est :

$$G(x, y) = y(s) = s, \text{ avec } s = (x \cos \theta - y \sin \theta) / P2.$$

Si l'on superpose deux tels réseaux comme sur la figure 1 on voit apparaître des "bandes" foncées séparées par des bandes plus claires. On voit également que ces bandes sont d'autant plus larges que l'angle entre les deux réseaux est plus faible le moiré de la figure 1 sera obtenu par : $h \pm s = p$ (1)

Équation fondamentale de moiré (1), de cette relation découle le moiré soustractif et additif. L'expression.

Générale de l'intensité de l'image du moiré deux réseaux de périodes légèrement différents projeter dans l'espace dans le plan (O, x, y, z) sachant que o, y c'est l'axe optique, avec f, g sont les fonctions de transmissions des réseaux, on obtient après superposition l'intensité de l'image moiré dans le plan u.v fig.-2

$$f(\alpha) = \sum_h a_h \exp\left\{2\pi i h \frac{\alpha}{p_1}\right\} \quad (2.1)$$

$$g(\beta) = \sum_s c_s \exp\left\{2\pi s i \frac{\beta}{p_2}\right\} \quad (2.2)$$

Avec les pas des réseaux

$$p_1(1 + \delta) = p_2 \quad (2.3)$$

Donc l'intensité s'écrit

$$I(x, y) = \Gamma(x, y) = \sum_{hs} \sum_{mn} a_m a_n c_h c_s \exp\{U\} \exp\{V\} \quad (2.4)$$

On voit donc apparaître dans le plan observation des franges rectilignes et parallèles, le moiré correspond aux diagonales des quadrilatères comme le montre la figure 2.1 .

Cette relation (2.4) d'après [3] contient à la fois la structure à haute fréquences spatiales des réseaux générateurs et la structure à basse fréquence spatiale relative au moiré. Ce système d'équation provient de la théorie de la superposition de deux structures périodiques de pas h avec $P_1=P_2$ c' à dire des réseaux identiques donnera la forme mathématique suivante : Remplaçons h par leur valeur dans les équations précédentes on obtient la formule générale du moiré qui peut s'écrire sous la forme de la théorie générale [11-13-15], la fonction de transmittance suivante :

$$(x, y) \rightarrow \psi\left(\frac{-y}{h}\right) \psi\left(\frac{\lambda x - y}{h}\right) \quad (2.5).$$

Nous l'abordons du point de vue optique géométrique. Si on fait une coupe transversale on remarque comme le montre la figure 2 ci dessous, les franges sont réparties dans l'espace sous formes des plans S, S₀, S₁, S₂,....., et chaque point M dans le plan image (U, V) a son homologue dans le plan des franges P₀, P, ..., correspondant aux franges 0, 1, 2, Dans un montage à axes parallèles

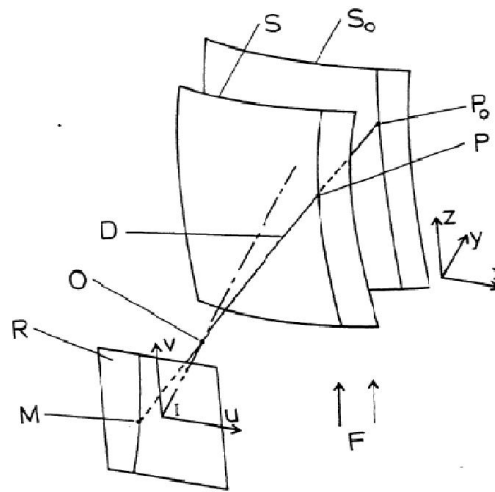


Figure 2.2. Schéma théorique des surfaces moiré dans l'espace

2.1. Cas du montage parallèle :

Nous observons d'après le montage à axes parallèles que les franges associées à une série de plans, la figure précédente présente la représentation théorique des franges moiré pour ce cas. Les surfaces associées sont donc des plans parallèles, voir le schéma théorique dans les figures 2, 3. Les franges correspondent comme pour le moiré d'ombre à des lignes de niveau de l'objet [8,9]. De façon similaire au moiré d'ombre lors de la double illumination. Il est possible d'utiliser un second système de projection à condition de le placer absolument symétriquement par rapport à l'optique d'observation.

De même, le principe du déplacement de la grille lors de l'exposition pour le moiré d'ombre, est applicable au moiré de projection en déplaçant ensemble les réseaux d'observation et de projection la condition simultanée de ces deux techniques supplémentaires permet d'obtenir des images de moiré d'excellente qualité [10].

Les axes de projection et d'observation parallèles limite l'angle entre le rayon de projection en un point de l'objet et le rayon d'observation de ce point, de cet angle dépend la sensibilité du système. C'est pour cette raison que l'on utilise généralement un autre montage.

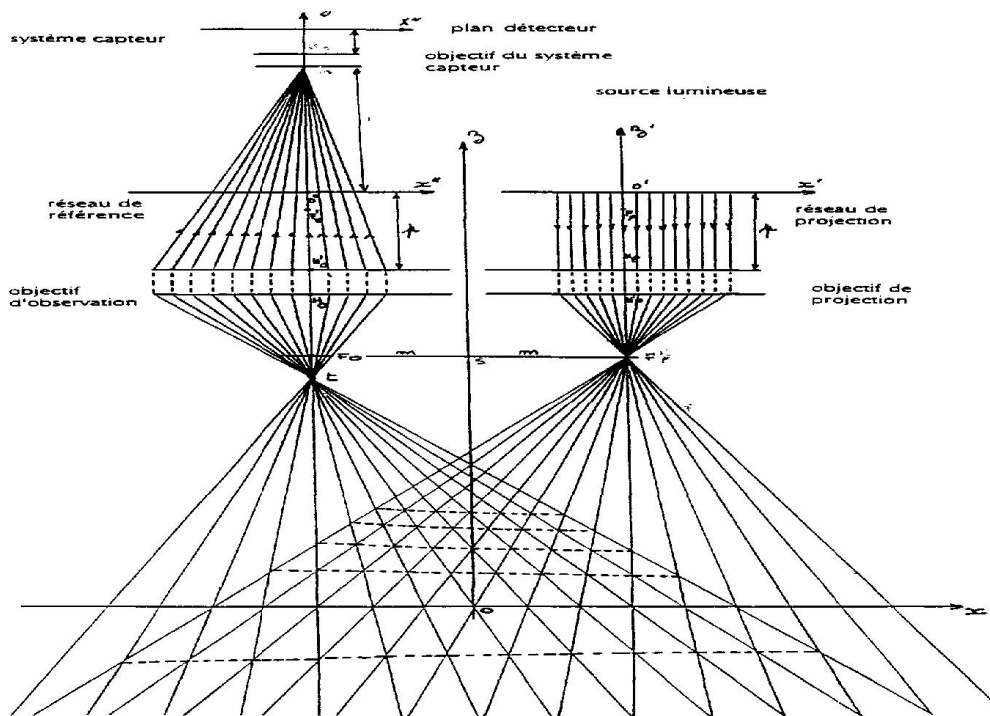


Figure 2.3 : cas du montage à axes parallèles.

2.2. Cas du montage non parallèle :

Nous avons vu qu'en utilisant le montage à axes de projection et d'observation parallèles avec des réseaux de traits parallèles et équidistants les surfaces associées sont des plans perpendiculaires aux axes de projection et d'observation. Nous allons maintenant étudier ce que deviennent ces surfaces lorsque les deux axes sont inclinés, en gardant les mêmes réseaux suivant la figure 2.4.

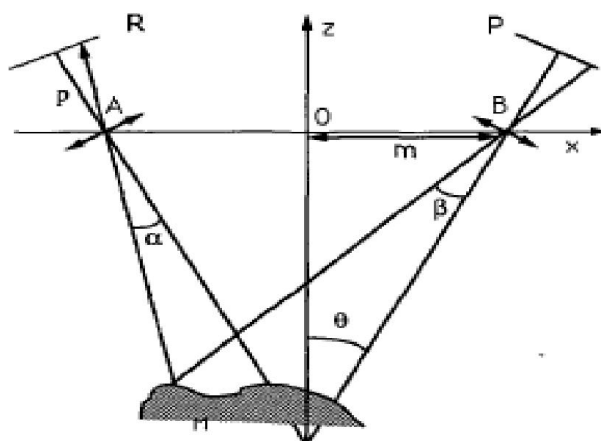


Figure.2.4. Éléments du système de montage non parallèle [13].

Après changement de variable et développement des équations selon le montage précédent et selon la théorie de J. Harthong [13] on obtient le système d'équation(3) :

$$x - m = p \sin \theta + t \cos \theta \tag{2.6}$$

$$Z = p \cos \theta - t \sin \theta \tag{2.7}$$

$$y = s \quad (2.8)$$

$$x + m = -p \sin \theta + u \cos \theta \quad (2.9)$$

$$Z = p \cos \theta + u \sin \theta \quad (2.10)$$

$$y=v \quad (2.11)$$

Nous remarquons d'après la relation ci-dessus que les surfaces associées sont des surfaces elliptiques indépendantes de l'axes (C, y) passant toutes par les points C, A, B voir figure (5)

Nous notons par **A** et **B** les centres optiques des objectifs, et C l'intersection des deux axes optiques. L'origine 0 du système de coordonnées cartésiennes dans l'espace (x, y, z), est placé au milieu du segment AB, liant les centres optiques des objectifs. De même nous définissons des systèmes de coordonnées dans les plans des réseaux : (t, s) pour P, (u, v) pour R, s et v étant orientés parallèlement aux lignes des réseaux et perpendiculairement au plan (x, z) de la figure ci-dessous : Les formules de transformations géométriques nous permettent de passer du système de coordonnées dans l'espace (x, y, z) aux systèmes de coordonnées des réseaux P et R par le système d'équation : d'après [13] on aura :

$$P(x, y, z) = \frac{Y_s^2 + Z_s^2}{(X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2)^{3/2}} \pm \frac{Y_h^2 + Z_h^2}{(X_h^2 + Y_h^2 + Z_h^2)^{3/2}} = 0 \quad (2.12)$$

Représente l'équation de la répartition des franges selon un montage non parallèle. Le moiré est appliqué ici pour déterminer la topographie de la surface étudiée

À partir de la répartition des franges de moiré, et par conséquent de restituer la forme de l'objet analysé. Dans ce cas la fonction de contour du moiré f(u, v) telle que les franges de moiré soient des courbes d'équations f(u, v) = h.n ou h est le pas des réseaux et n un entier est connue et nous recherchons la fonction h(x, y). Pour le passage du plan objet au plan image, découlera de l'équation suivante :

$$P(x, y, z) = f(u, v) \quad (2.13)$$

Les équations de localisation des franges dues à un élément de surface ΔS sont donc

$$\frac{\partial \Delta L}{\partial x} = \frac{\partial \Delta L}{\partial z} = 0 \quad (2.14)$$

On suppose que le déplacement de ΔV de chaque point P (x, y, z) de l'objet est petit par rapport à LP et LR

$$\Delta L = \nabla L \cdot \Delta V = \frac{(V - V_P) \Delta V}{\|V - V_P\|} \pm \frac{(V - V_R) \Delta V}{\|V - V_R\|} \quad (2.15)$$

Sachant que VR c'est la distance de l'objet à la caméra CCD.

$$\text{Et } \|V - V_i\| = \{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2\}^{1/2} \quad (2.16)$$

Tenir compte de la relation générale de moiré : $f(u, v) = h.n$

Avec h pas des réseaux identique c'est à dire même pas, n un entier, si $n=0$, pour la frange zéro un disque en 2D et sphère en 3D ; faisons intervenir les paramètres du montage, et la notion du chemin optique. Ou L est la différence du chemin optique de LP et LR de la projection (source) à la référence (image) en passant par le point C position de l'objet. Comme le montre les illustrations de figures 4, 5, 6. La combinaison de ce système d'équations en les inconnus x, y, z sera en général une courbe de l'espace que nous appellerons espace de répartition des franges et leurs formes en trois dimensions. De ces relations découlent les équations des franges du moiré sous formes elliptiques.

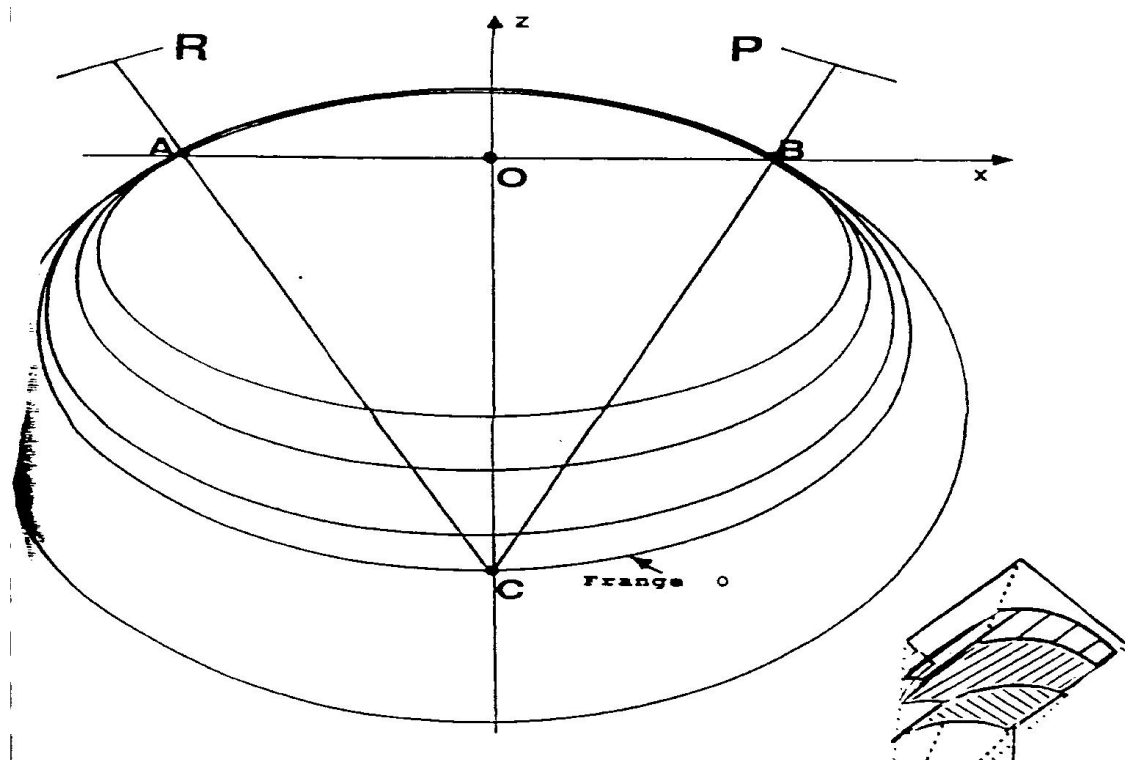


Figure 2.5. Evolution des franges dans le cas du montage non parallèles à axes symétriques

A partir de ces études, nous étudierons notre approche, il s'agit d'une méthode autoréférentielle basée sur les considérations géométriques et physiques liées aux différents paramètres du montage, notre cas c'est le montage d'un système de moiré de projection à montage non parallèle avec des axes symétriques, ainsi la répartition des franges suivant une surface donnée. Le cas des objets simple paraît immédiat.

3- Condition pour une méthode autoréférentielle :

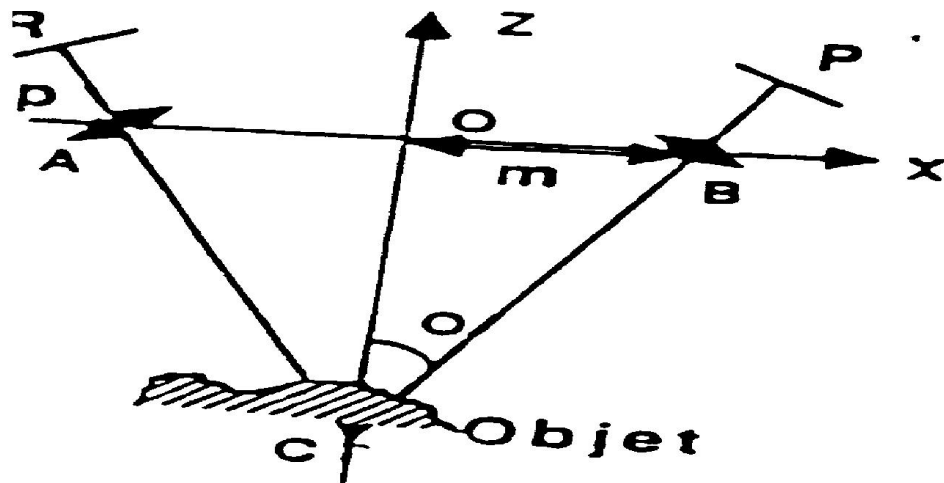


Figure 2.6 : Position de l'objet par rapport au système non parallèle.

Rares sont les études faites sur le problème de l'indexage de franges et l'incapacité de déterminer facilement l'ordre des franges ainsi que leur identification explique probablement cet état de fait. Afin de déterminer l'ordre des franges plusieurs approches ont été proposées [Umazaki, Becher et Zandmann, et autres....]. Choisissons un système d'axes O, x, y, z tel que le plan xz soit parallèle à la surface RS des franges provenant de la surfaces de l'objet.

Les deux postulats à la base de la théorie de la localisation des franges sont :

a) la caméra à travers le réseau de référence restitue une réplique fidèle du champ diffracté par l'objet. les points A, B, C du montage (figure.5). L'équation de la frange zéro (centrale) provienne du (4) et (5) En considérant une coupe méridienne au niveau des axes optiques l'objet (ici une sphère), devient un cercle d'équation:

$(z-c)^2 + x^2 = R^2$. Sachant que les centres respectifs de la sphère et de la frange de référence se trouvent dans l'axe z , donc les coordonnées respectives de leur centres dans le repère (o, x, y, z) sont : $S_o(0, 0, c)$ pour l'objet et $F_o(0, 0, z_o)$ pour la frange zéro.

b) Les franges d'interférences sont uniquement dues aux rayons diffractés par des les réseaux et les surfaces des objets projetés. les surfaces de moiré représentent des ellipses (figure 2.5) qui passent par les points A, B , exprimé dans le repère de référence

$(0, x, y, z)$ (fig2. 7). En particulier pour $N = 0$ ($n = 0$), la surface moiré correspondant à la frange zéro est un cylindre qui passe par les pont A, B, C .

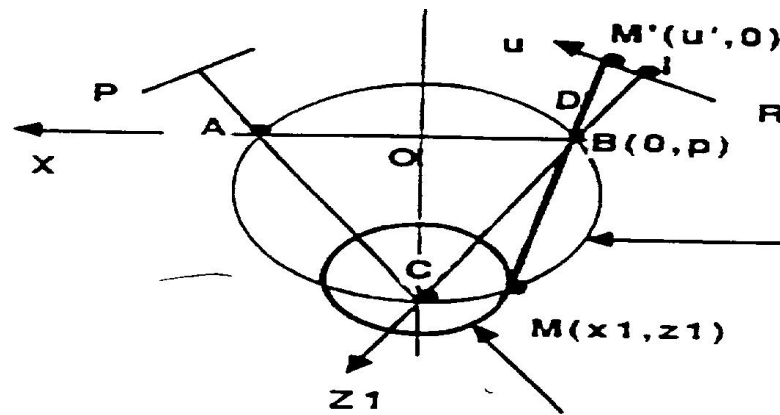


Figure 2.7. Position d'une sphère avec la frange centrale.

Une première condition, est nécessaire pour l'intersection de ces deux surfaces, il faut que la distance qui sépare les deux centres soit inférieure à la somme de deux rayons:

$$d(S_o, F_o) < R_F + R_S$$

Avec R_F : rayon de la frange zéro – R_S : rayon de la sphère

Une deuxième condition : il faut qu'un des points de l'image ait son homologue sur le champ d'intersection de deux surfaces. Le point image et son homologue appartiennent donc à une droite qui passe par le centre optique (principe du lancer de rayon).

A partir de ces deux conditions nous pouvons positionner notre objet de telle façon sa surface coïncide avec la frange zéro.

$$(z - z_o)^2 + x^2 = R_o^2 \quad \text{équation de la frange (2)}$$

$$(Z - c)^2 + x^2 = R'_o{}^2 \quad \text{équation de la sphère}$$

$$z = ax + b \quad \text{équation de la droite}$$

Il faut chercher z_o' (o, o, c), c'est à dire à partir du montage nous pouvons positionner notre objet de telle façon la frange zéro (référence) apparaisse sur l'objet.

Cette méthode autoréférentielle de montage permet de prévoir et d'expliquer les cas particuliers qu'on peut rencontrer dans les expériences pour certaines formes de surfaces gauches ; elle permet aussi de choisir la position de l'objet par rapport au montage ; afin d'amener les franges dans une direction choisie, compatible évidemment avec les équations de localisation. Les équations 3, 4, 5, 6, 7 permet le calcul de la courbe de la localisation à partir de la direction d'observation varie pour chaque point de l'objet. La figure 6 montre une courbe de localisation de la frange zéro (centrale) correspondant à une position particulière du montage. La source S a été placée dans le plan xz et symétrique par rapport à la caméra CCD. Cette disposition permet d'observer la formation des franges et en particulier la frange centrale comme tache, dans le cas des translations suivant le plan xz; et de même les translations latérales à

l'ordre microscopique nous observons l'effet macroscopique sur l'évolution des franges de l'ordre 0,1 ; 2 ; 3 ; 4 ; etc. pour donner enfin l'objet et sa forme sphérique. Les figures 8b et 10a montrent que dans ce type de mouvements les franges sont toujours localisés. Les résultats précédents s'appliquent immédiatement à des objets cylindriques, et autres comme la figure 12 montre une tôle soumise à des contraintes de déformation.

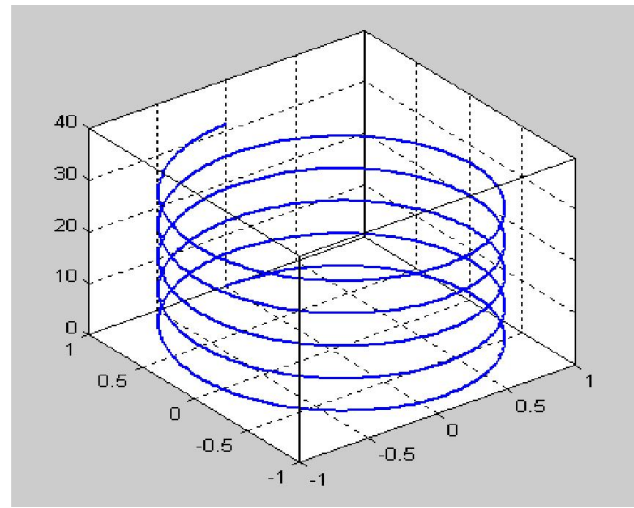


Fig2.8(a), reconstruction théorique de la frange zéro (centrale) en 3D.

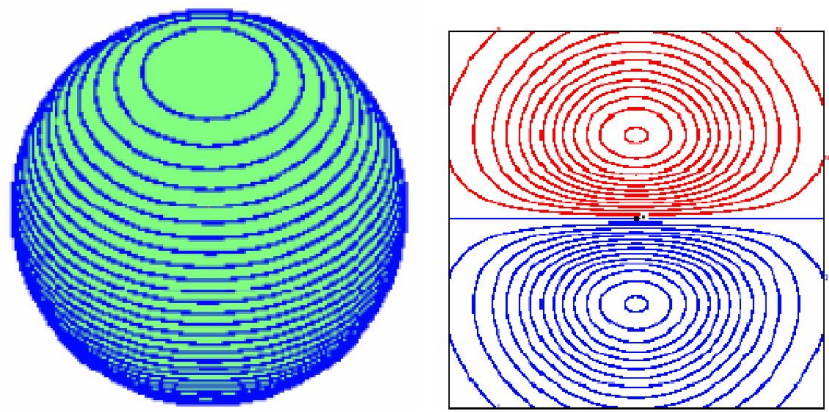


Figure 2.8 (b) des franges colorées de moiré d'une sphère (a) la sphère soumise à des contraintes (b)

4-Résultats expérimentaux

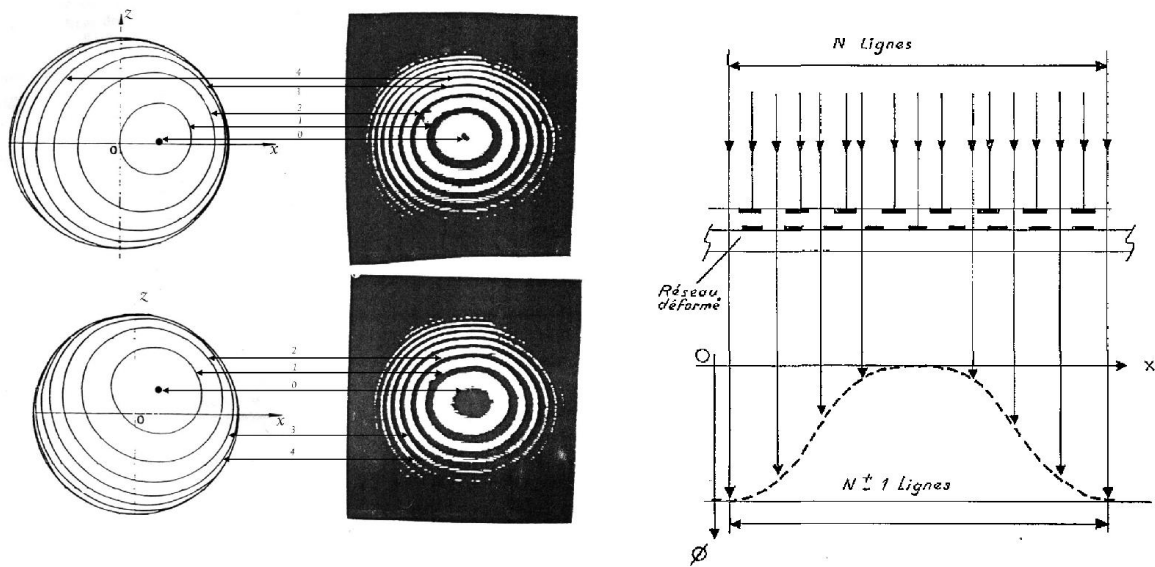
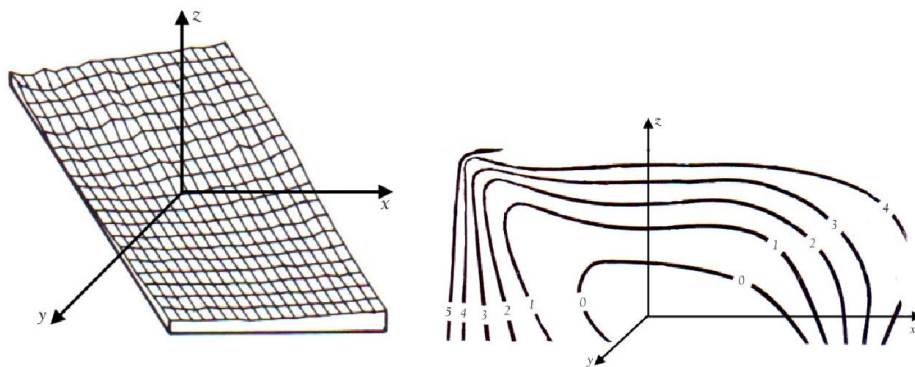


Figure 2.10. Une sphère- Image théorique (gauche) – Image optique réelle (droite).



Approche informatique :

Les procédures informatiques du traitement d'image-moiré :

Les différentes étapes nécessaires à partir de l'acquisition de l'image en passant par les procédures informatiques jusqu'au résultat final, c'est-à-dire la reconnaissance des formes, cela nécessite :

- système de configuration (matériel figure 9.)
- algorithmes de squelettisation (logiciel) en suivant les procédures ci-dessous :

- Binarisation l'algorithme :

Pour tout pixel à i dans image

$$Image_binaire[i] := 1$$

$$S_d[i] < valeur_seuil_ombre$$

$$Si (r_d[i] + g_b[i] + b_d[i]) < valeur\ seuil$$

Image_binaire[*i*] := 0

- Dilatation – voilà l'algorithme

Pixel := 1

Pour tout *i* dans *image*

Pour tout *j* dans élément

Pixel := *pixel* & (! élément [*j*] I *image* [*i* + *j*])

image2 [*i*] [*i*] := *pixel*

Image := *image2*

Erosion

Pixel := 0

Pour tout *i* dans *image*

Pour tout *j* dans élément

Pixel := *pixel* I (élément [*j*] & *image* [*i* + *j*])

image2[*i*] := *pixel*

Image := *image2*

- Squelettisation – amincissement – pour la comparaison par la suite de l'image théorique à image optique réelle voir figure 10..

- **Difficultés** : La densité des franges ne doit pas dépasser la résolution de la caméra, parfois le nombre de pixel ceci limite la pente de la surface à analyser.

- Les effets opto-mécaniques liés aux sensibilités de l'image moiré aux positions de la caméra par rapport aux réseaux et aux objectifs du montage cela demande un support stable et un bon alignement de la source.

- la mauvaise qualité de l'image, elle résulte de la qualité des réseaux ou des caractéristiques de la rugosité et du non uniformité en réflectivité du relief de la surface.



Figure 2.9.a : montage et dispositif expérimental envisagé pour réalisation pratique

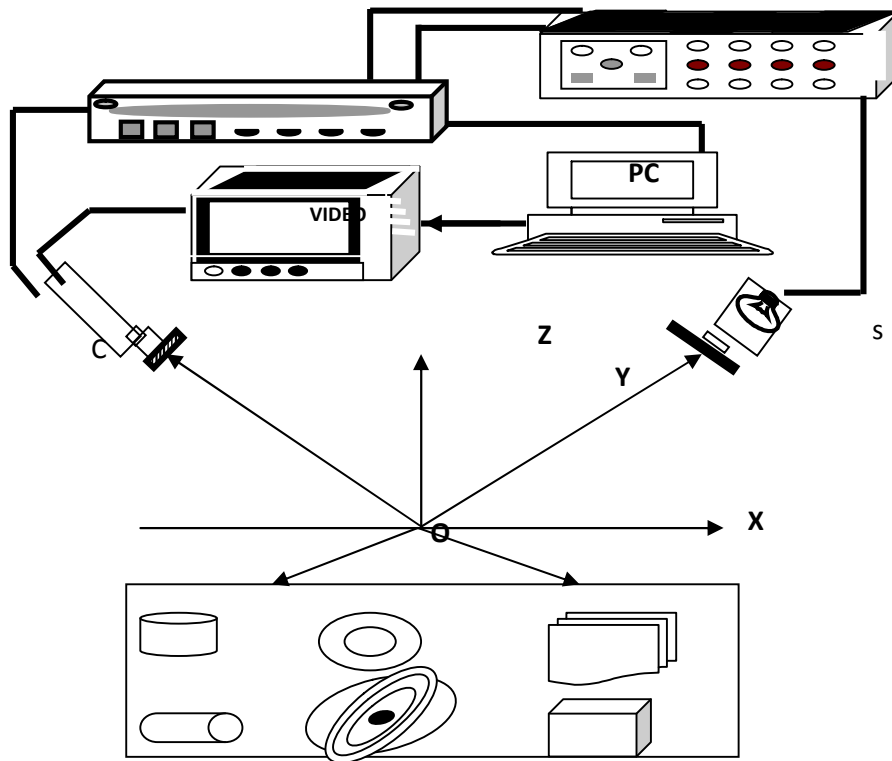


Figure.2.9.b. Montage optique : Dispositif expérimental. Eléments : Lampe (laser), caméra CCD, générateur de courant, Pc, Moniteur Tv

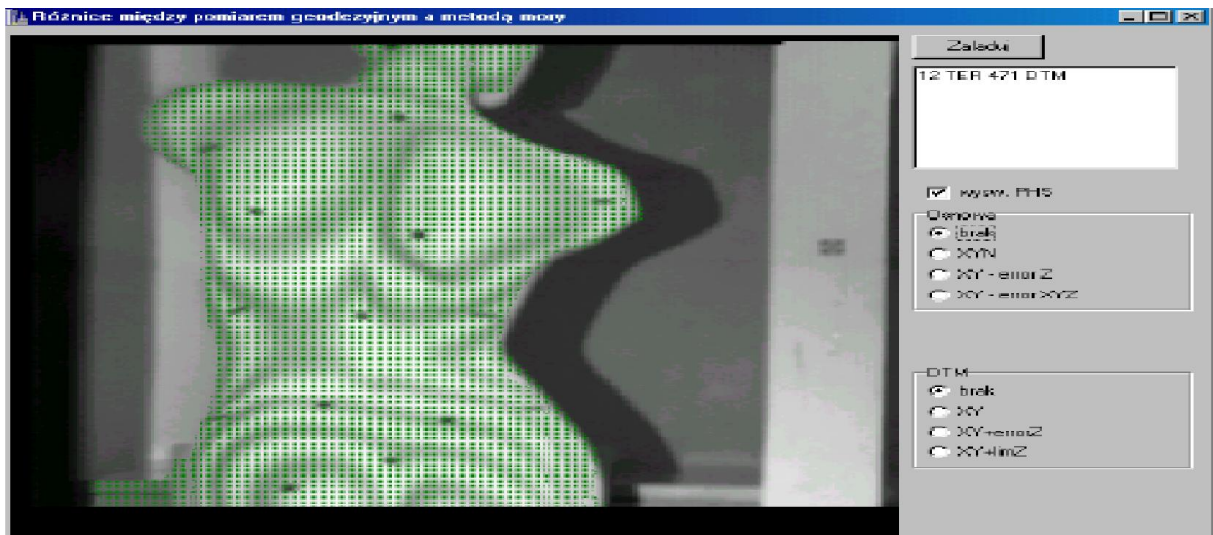
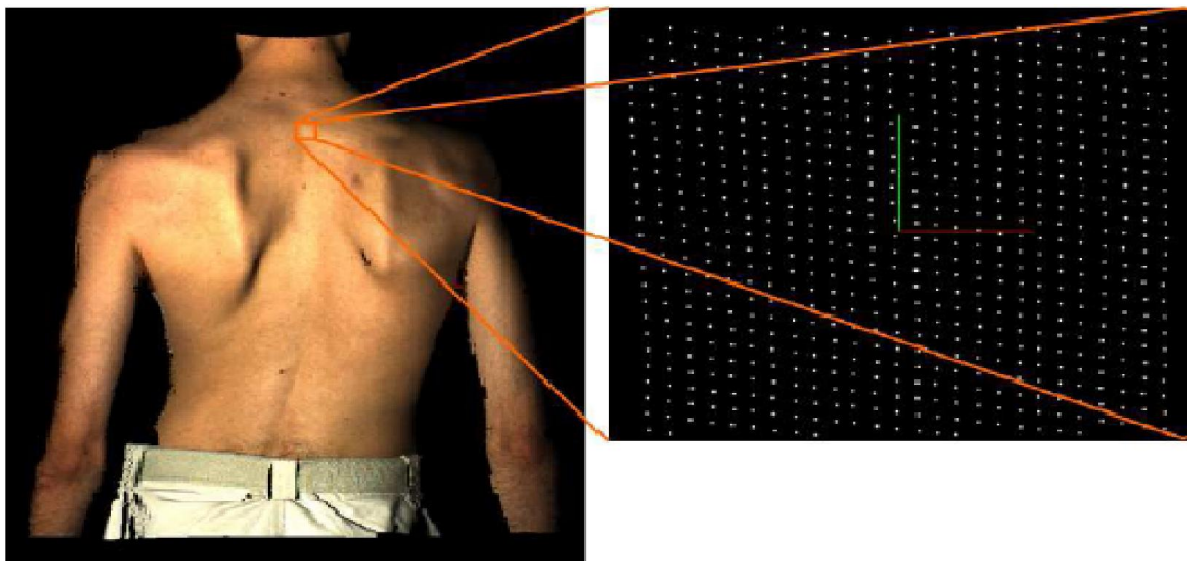
Chapitre III

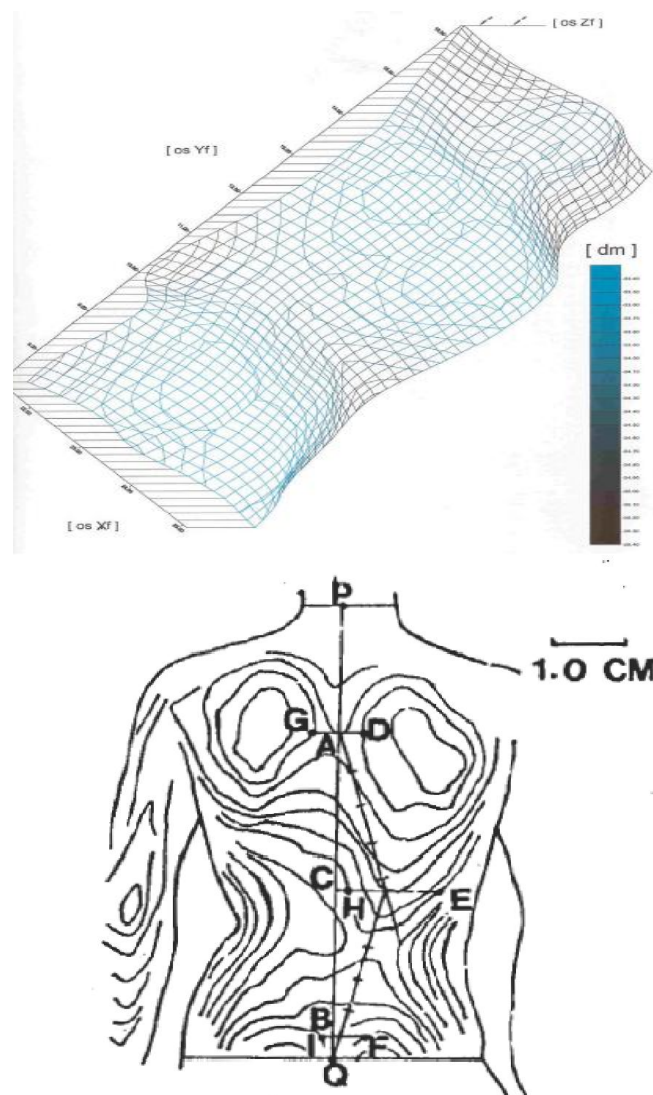
*Applications des méthodes
interférométrique*

Il existe de nombreuses applications des méthodes interférométriques dans divers domaines, parmi lesquels nous mentionnons :

3.1. Application médicales :

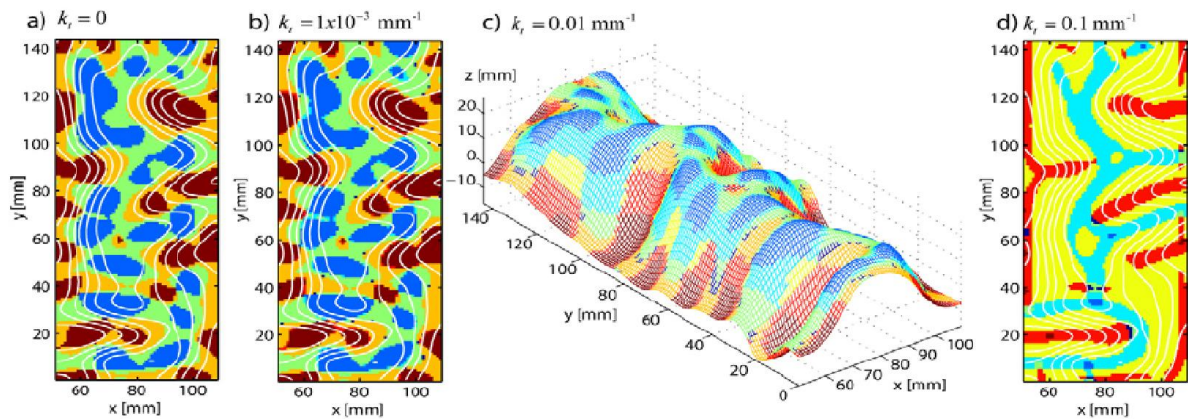
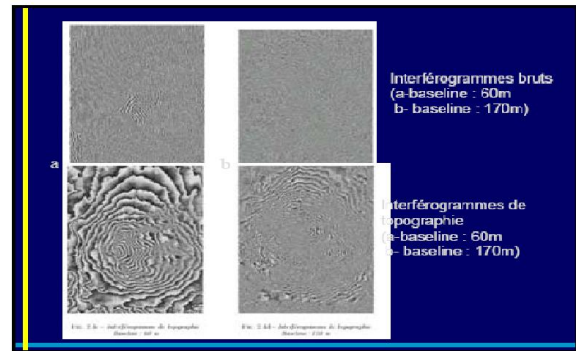
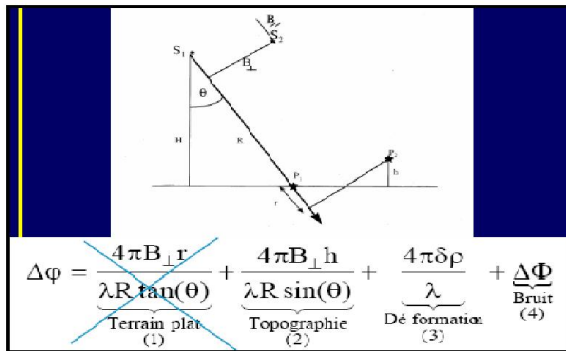
On a projeté un réseau sur le dos d'un patient et l'observation de l'image obtenue à travers un réseau de référence. Il est clair que tous les points à même altitude correspondront à même luminosité qui permet de reconstruire la topographie du dos du patient à partir des franges projetées. Pour déterminer Application médicales: Pour distinguer les scolioses (colonne vertébrale tordue) et les cyphoses (dos rond) de la colonne vertébrale voir exemple ci-dessous :





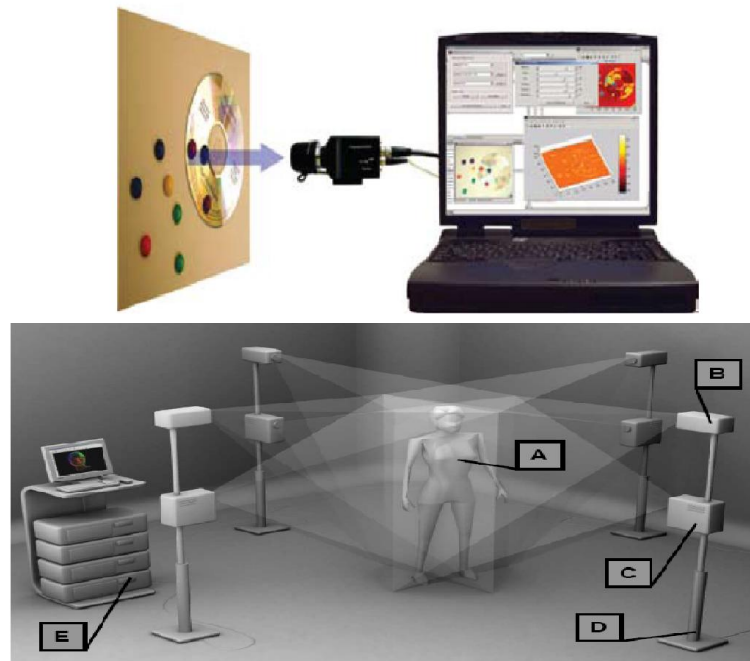
3.2.interférométrie Radar :

C'est pour un apport de la modélisation des franges pour la reconstruction des modèles numériques de terrain (MNT). Dans l'optique d'une bonne maîtrise de l'influence des différents paramètres de prise de vue sur la génération d'un interférogramme. Il est nécessaire de pouvoir simuler une image de franges à partir d'un modèle MNT globale de la zone géographique ou géologique étudiée. Ceci permettra aussi une meilleure caractérisation du modèle de franges réel. Grace aux images des laboratoires de télédétection, nous pouvons utiliser des images et cartes et le logiciel **SIFI** pour estimer les informations relatives aux zones d'ombres et de repliements. En effet, ce logiciel nécessite la connaissance exacte des déréférencement du MNT, pour cette raison nous formerons un personnel compétent.



3.3. Approche informatique :

les formules mathématiques seront converties en algorithmes. La première étape de cette conversion consiste à transformer toutes les informations concernant les figures de moiré, la surface de l'objet ou la structure des réseaux en fonctions de contour qui peuvent être vectorisées (segmentées). Dans une seconde étape l'algorithme n'opère que sur ces fonctions vectorisées. Il faut préciser que les fonctions de contour contiennent plus d'information que la simple donnée de leurs courbes de niveau (qui sont soit les lignes du réseau, soit les franges du moiré) ; en effet la figure de courbes de niveau ne permet pas de distinguer les « creux » des « bosses », alors que les fonctions de contour incluent cette distinction. Dans nos recherches nous nous plaçons au-delà de ce problème puisque nous ignorons les courbes pour ne considérer que les fonctions de contour et le calcul numérique de ces fonctions. Il est alors bien clair que les techniques connues pour lever l'indétermination des creux et des bosses devront simplement être mises en œuvre pour l'enregistrement de la fonction de contour du moiré.



3. Explication de l'interférométrie Laser :

L'interférométrie laser est une méthode bien établie pour mesurer les distances avec grande précision.

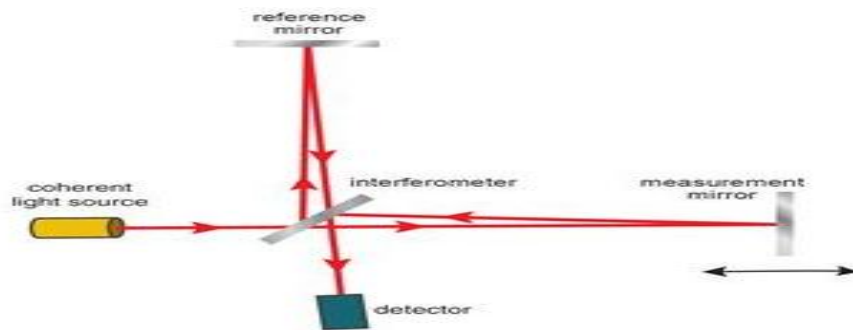
Les fondements:

Interférométrie est un procédé de mesure qui utilise le phénomène d'interférence des ondes (généralement les ondes lumineuses, radio ou acoustiques). Les mesures peuvent concerner certaines caractéristiques des ondes elles-mêmes, et des matériaux avec lesquelles elles interagissent. De plus, l'interférométrie permet de décrire des techniques qui utilisent les ondes lumineuses pour l'étude des variations de déplacement. Cette interférométrie de mesure du déplacement est largement utilisée pour la calibration et l'asservissement

En utilisant deux faisceaux lumineux (en divisant généralement un faisceau en deux), un diagramme d'interférence peut être formé quand ces deux faisceaux se superposent. Comme la longueur d'onde de la lumière visible est très courte, il est possible de détecter de faibles variations des différences entre les chemins optiques (distance parcourue) des deux faisceaux, puisque ces différences produiront des variations notables dans le diagramme d'interférence. L'interférométrie optique est donc une technique de mesure appréciable utilisée depuis plus de cent ans. Sa précision a ensuite été améliorée grâce à l'invention des lasers.

L'utilisation des principes d'interférence lumineuse en guise d'outil de mesure a été mise en évidence pour la première fois par Albert A. Michelson dans les années 1880, à l'origine du développement du premier interféromètre. Bien que la technologie (et la

précision des mesures) ait depuis évolué au fil du temps, les principes de base sous-jacents de l'interféromètre de Michelson restent au cœur de l'interférométrie.



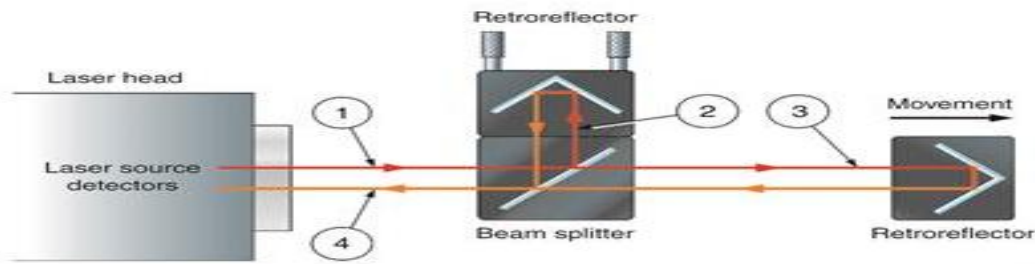
Un interféromètre de Michelson comprend un séparateur de faisceau (miroir semi-argenté) et deux miroirs. Quand la lumière traverse le miroir semi-argenté/séparateur de faisceau (partiellement réfléchissant), elle est divisée en deux faisceaux avec différents chemins optiques (l'un allant vers le miroir 1, et l'autre vers le miroir 2). Après avoir été réfléchis par les miroirs, ces faisceaux se recombinent au niveau du séparateur de faisceau avant d'arriver au détecteur. Les différences entre les chemins optiques de ces deux faisceaux provoquent une différence de phase à l'origine de franges d'interférence. Ce diagramme est ensuite analysé par le détecteur afin d'évaluer les caractéristiques des ondes, les propriétés des matériaux ou le déplacement d'un des miroirs (selon la mesure que doit effectuer l'interféromètre).

Interférométrie appliquée :

Afin de générer un diagramme d'interférence de haute précision (franges distinctes), il est très important d'avoir une unique source de longueur d'onde extrêmement stable, obtenue à l'aide du laser [XL-80](#). Dans le système laser XL-80, les deux miroirs (utilisés dans l'interféromètre de Michelson) sont des rétro réflecteurs (prismes qui renvoient la lumière incidente dans une direction parallèle à sa direction d'origine). L'un d'eux est fixé au séparateur de faisceau pour former le bras de référence. L'autre rétro réflecteur forme le bras de mesure de longueur variable, car sa distance varie par rapport au séparateur de faisceau.

Le faisceau laser (1) sort de la tête du laser XL-80 et est séparé en deux faisceaux (réfléchi (2) et transmis (3)) au niveau du séparateur de faisceau de polarisation. Ces faisceaux sont renvoyés par les deux rétro réflecteurs, se recombinent au niveau du séparateur de faisceau avant d'atteindre le détecteur. Les rétro réflecteurs permettent de faire en sorte que les faisceaux provenant des bras de référence et de mesure soient parallèles, au moment où ils se recombinent au niveau du séparateur de faisceau. Les faisceaux recombinaisonnés arrivent au détecteur où ils interfèrent entre eux, de manière constructive ou destructive. Pendant l'interférence constructive, les deux faisceaux sont en phase ; les crêtes des deux faisceaux se renforcent réciproquement en produisant une frange lumineuse. Pendant l'interférence destructive en revanche, les faisceaux

sont déphasés. Les crêtes d'un faisceau sont annulées par les creux de l'autre faisceau ce qui produit une frange sombre.



Le traitement du signal optique par le détecteur permet de constater l'interférence de ces deux faisceaux. Le déplacement du bras de mesure modifie la phase relative des deux faisceaux. Ce cycle d'interférences destructive et constructive soumet l'intensité de la lumière recombinée à une variation cyclique. Un cycle de variation d'intensité de l'état lumineux à l'état sombre puis de l'état sombre à l'état lumineux se produit chaque fois que le bras de mesure/réto réflecteur se déplace de 316,5 nm, à savoir la moitié de la longueur d'onde (car ce déplacement provoque une variation de 633 nm du chemin optique, qui correspond à la longueur d'onde du laser). Par conséquent, le mouvement est mesuré en calculant le nombre de cycles au moyen de la formule suivante :

$$d = \frac{\lambda N}{2}$$

où d est le déplacement (en microns), λ est la longueur d'onde du laser (0,633 microns) et N est le nombre de franges traversées. La résolution maximale de 1 nm est obtenue par interpolation de phase dans ces cycles.

Peu importe la qualité de votre unité laser (autrement dit sa précision et sa stabilité), car la précision des mesures de positions linéaires dépend de celle avec laquelle la longueur d'onde du faisceau laser est connue. La longueur d'onde opérationnelle du faisceau laser dépend de l'indice de réfraction de l'air traversé par le faisceau, sachant que la température de l'air, la pression atmosphérique et l'humidité relative jouent sur cet indice. Par conséquent, la longueur d'onde du faisceau doit être modifiée (par compensation) pour incorporer les changements de ces paramètres, le cas échéant.

Acquisition des images sur PC avec carte vidéo, logiciel sous Windows avec fonctions suivantes :

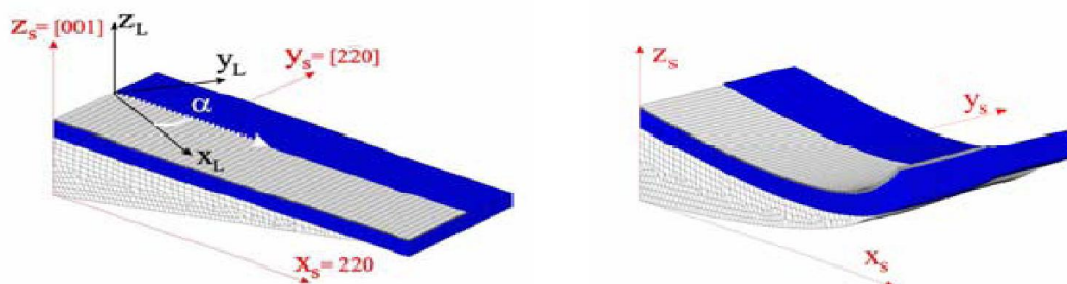
- L'acquisition, stockage et manipulation d'images, filtrage, masquage et opérations géométrique
- Interprétation des images interférométriques, Fonctions spécifiques pour la mécanique (déformation, contrainte)
- Logiciel ouvert : possibilité d'implémenter de nouvelles fonctions par l'utilisateur .

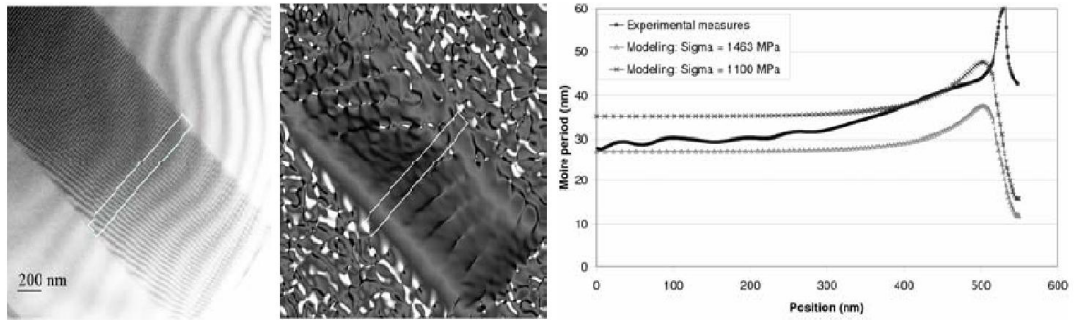
Caractéristiques :

- Champ des déplacements (2D) dans un plan normal à l'axe optique caméra.
- Possibilité de mesure du champ de déplacement 3D sur demande.
- Tenseur des déformations en tout point de la surface analysée.
- Tenseur des contraintes avec l'hypothèse d'un comportement élastique isotrope. D'autres lois de comportement peuvent être implémentées contraintes principales, Résultats présentés sous forme de champs de vecteurs ou d'images fausses-couleurs.
- Iso-déplacements pouvant être visualisés en temps réel pendant l'application de la sollicitation sur l'objet. Surface maximale analysée : différentes formes et surfaces

Tout type de matériaux peut être analysé, Exemple :

On peut envisager le moiré pour Mesure de contraintes et déformations sur lignes de silicium contraintes, de part leurs propriétés intéressantes en termes de mobilités de porteurs, les lignes de silicium contraintes peuvent servir de canal dans les transistors. Des méthodes de caractérisations sont nécessaires dans ce type d'applications pour mesurer les contraintes et déformations résiduelles dans les dispositifs. La méthode des Moirés en microscopie électronique en transmission (TEM). Les franges de moirés apparaissent par double diffraction entre les ondes provenant du substrat et des lignes contraintes sur les échantillons TEM de façon à pouvoir les simuler par éléments finis. Les franges de moirés peuvent être mesurées à l'aide de la méthode des phases géométriques ce qui permet d'afficher des images dont chaque pixel représente une valeur de la période des franges de moiré. La comparaison entre simulations et expériences permet de remonter à une contrainte dans les lignes.

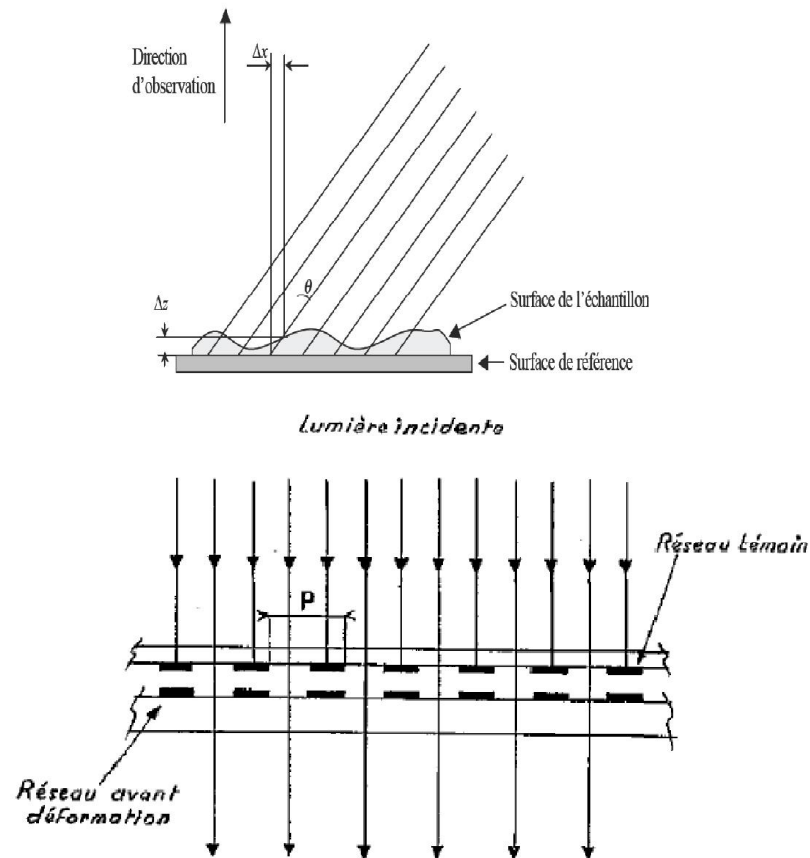




Pentes et courbures: La mesure optique ne pourra avoir accès qu'à des informations de surface. Si l'on appelle x et y les coordonnées dans le plan tangent de la surface qui se déforme, les coordonnées u_x et u_y du déplacement vont permettre d'avoir accès à la partie plane du tenseur de déformation.

Certaines mesures optiques permettent de mesurer le déplacement hors-plan, donc la composante u_z . Dans l'hypothèse où l'état initial de la surface est plan ($z = 0$ partout), la forme de la surface dans l'état déformé est donnée par la fonction :

$Z(x, y) = u_z(x, y)$. Les dérivées de $z(x, y)$ selon x et y donnent accès à la pente locale suivant x et y , θ_x et θ_y respectivement. Si l'état initial n'est pas plan, on raisonne sur la modification de forme $Z_{\text{final}} - Z_{\text{initail}} = U_z$. Lors d'un essai de flexion (essai sur plaque mince ou sur membrane), on s'intéresse en fait au gradient de la pente, car la pente locale ne renseigne pas sur le phénomène de déformation. Le gradient de la pente est le tenseur d'ordre deux symétrique $\epsilon_{ij} = d^2z/d_i d_j$. Les termes diagonaux donnent les courbures suivant x et y , le terme non-diagonal qui est la torsion.



Topographie des franges de moiré pour détecter la scoliose chez les enfants :

Comme nous l'avons appris de l'article "Comment se prémunir contre les urvatures de la colonne vertébrale appris de l'articl"Comment se prémunir contre les urvatures de la colonne vertébrale enfants?"(The" News ", 8 mars 1997), scoliose, courbure latérale de la colonne vertébrale colonne, affecte les enfants dans leur période de croissance avec les filles touchées 5 fois plus que les garçons. La déformation peut défigurer le corps; endommager les organes vitaux et peut nécessiter chirurgie rachidienne majeure impliquant des nerfs délicats. Si elle est reconnue tôt, la déformation peut être arrêtée par une combinaison d'exercices et d'appareils orthopédiques. Il n'est pas possible de radiographier tous les enfants à des fins de détection des déformations de la colonne vertébrale, car les fortes doses de rayons X requises pour l'imagerie vertébrale des enfants sont nocives pour leurs corps en développement. Nous avons donc besoin de méthodes qui peu coûteux, facile à mettre en œuvre, simple à réaliser par des personnes moyennement formées personnel et suffisamment élégant pour permettre une manipulation par divers algorithmes sans exposer les enfants aux rayons X. La nécessité de trouver un système de mesure tridimensionnel pratique a conduit à développement de la photogrammétrie au milieu du XIXe siècle. Médical

la photogrammétrie est le terme utilisé pour couvrir toutes les applications de la photogrammétrie dans le vaste domaine de la médecine. Ceux-ci incluent la stéréophotogrammétrie, l'holographie, l'intégration système d'imagerie de surface (ISIS), système de balayage laser vidéo 3D, astrographie et topographie des franges moirées. La topographie à franges en moiré est une optique peu coûteuse, simple, non invasive et sans contact. technique d'imagerie, qui fournit une carte tridimensionnelle de l'objet ou du sujet en cours d'étude. Il est utilisé dans plus d'une douzaine de pays pour le diagnostic, documentation, le suivi et la quantification de la scoliose. Lorsqu'une famille de courbes est superposée à une autre famille de courbes une nouvelle famille apparaît $\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$ le motif moiré. Pour produire l'effet, les lignes qui se chevauchent doivent se croiser à un angle inférieur à quarante-cinq degrés. Les systèmes Moiré sont de trois types:

Forme de base de la topographie moirée ou du type d'ombre, type de projection, hologramme de réseau type. En termes simples, la forme de base de la topographie des franges de moiré consiste en photographier une partie du corps, à étudier, à travers un écran spécialement construit.

Des franges sombres sont produites sur le corps en raison de la présence d'écran. Si la lumière la source et la caméra se trouvent toutes deux le long d'une ligne parallèle au plan de l'écran de moiré. les franges du corps humain sont des contours à distance constante de l'écran.



Fig. 1. Rayon APX (debout, méat auditif externe à l'articulation de la hanche) de la colonne vertébrale d'un enfant de 10 ans avec un test de flexion vers l'avant positif



Fig. 2 a-d. Topographes moirés du même enfant pendant un examen de suivi (dos, avant, côté, flexion avant)

Conclusion Generale

CONCLUSION GENERALE

Conclusions :

Notre travail a été consacré aux deux aspects de phénomène Moiré l'un théorique et l'autre expérimental, ainsi la méthode et sa mise en application en métrologie tridimensionnelle. La méthode est très simple à mettre en oeuvre et permet la mesure sur de très grandes structures.

La précision est cependant moins bonne que celle donnée par le speckle ou les méthodes de moiré, mais peut atteindre jusqu'à 10^{-4} en déformation.

Ces diverses techniques interférométriques permettent de mesurer les déformations des objets avec diverses performances. Les mesures ponctuelles sont complétées aujourd'hui par des possibilités de mesures de champs, mais les informations apportées sont toujours relatives aux déformations à la surface de l'objet. L'avenir permettra peut-être d'accéder à des informations de volume

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] SALVI, J.– PAGÈS, J.– BATLLE, J., "Pattern Codification Stratégies in Structure Light Systems," *Pattern Recognition*, 37(4), (2004) pp. 827–849.
- [2] PATORSKI, K. – KUJAWINSKA, M., "Herd-book of the Moire Fringe Technique," Elsevier Science Publisher, New York, (1993).
- [3] BRYNGDAHL, O., Characteristics of Superposed Patterns in Optics, *Journal of the Optical Society of American*, 66(2), (1976) pp. 87–94.
- [4] WINDISCHBAUER, G., Survey on Applications of Moiré Techniques in Médecine and Biology, in *Optique in Biomédicale Sciences*, Ed: G. Von Bally, New York, Springer–Verlag: pp. 244–249. (1982)
- [5] D'ACQUISTO, L.– FRATINI, L.– SIDDILOLO, A. M., A Modified Moiré Technique for Three–dimensional Surface Topography, *Measurement Science and Technology*, 13(4), (2002) pp. 613–622
- [6] DE NICOLA, S.– FERRARO, P., Fourier Transform Méthode of Fringe Analysis for Moiré Interferometry, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2(3), (2000) pp. 228-233
- [7]- D. Courjon et C. Bainier, "*Le champ proche optique : théorie et applications*" - collection technique et scientifique des télécommunications - Springer 2001.
- [8]- F. De Formel, "*Les ondes évanescentes en optique et en optoélectronique*" - collection technique et scientifiques des télécommunications - Eyrolles 1999.
- [9] J. J. Greffet et R. Carminati, "*Image formation in near field optics*" *Progress in Surface Science*, 1997, vol. 56, n°3, 133-237.
- [10] A consulter les actes de la dernière conférence internationale sur le champ proche optique : NFO 7 - The 7th international Conférences on Near-field Optics and Related Techniques - University of Rochester - USA - August 11-15, 2002.
- [11] H.TAKASAKI , Moiré topography, *applied optics* 12, 1970
- [12] RAMESCH .K, V.R GANESAN « Digital image processing of photo elasticity fringes next approach .Tech, exp. 41-46 Sept 1991.
- [13] HICHAM SAHLI, these de DOCTORAT, ULP-Strasbourg 1991.
- [14] F.MOHAMMEDI, memoire DEA -ENSPS, ULP-Strasbourg oct.1990.

Résumé : *L'aspect qui prédomine et dicte la vision de ce travail est formé par les basses fréquences spatiales susceptibles d'apparaître dans la combinaison des répartitions lumineuses à caractère périodiques. On décrit une méthode qui permet la prédétermination précise de la localisation des franges en interférométrie moiré. Nous présentons, dans cet article, l'analyse de la formation des franges moiré résultant de la superposition de deux réseaux de périodes identiques non en contact. La méthode utilise la notion du chemin optique ; elle est valable lorsque l'objet est éclairé par une source incohérente (projecteur), ou cohérente (un laser).*

Divers cas d'application sont traités de façon complète, objets plans, cylindriques et sphériques et aussi des surfaces convexes et concaves.

Les prédéterminations théoriques ont été confrontées par l'expérience.

Mots clefs : *Moiré, Réseaux, Cohérence, Interférométrie.*

Summary: *The aspect which prevails and dictates the vision of this work is formed by the space low frequencies to appear in the combination of the luminous distributions with character periodicals. The paper describes a method that allows the accurate prediction of the fringe localization in moiré interferometry. We present the analysis of the moiré fringes self of two gratings of identicals periods. The method uses the optical path concept; it is valid in the case of coherent and incoherent illumination. Several applications are emphasized: plane, cylindrical and spherical objects. Theoretical predictions are compared with experimental results.*

Key words: *moiré, gratings, partial coherence, interferometry.*