Université de Montréal

Méthode optique de numérisation tridimensionnelle d'objets

PAR

Pierre Desjardins

Département de Génie Mécanique

École Polytechnique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maîtrise es Sciences Appliquées.

Juillet 1989

© Pierre Desjardins 1989

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Canadian Theses Service
Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-58171-9

Canada

Sommaire

Le mémoire présente une méthode qui utilise un système de vision numérique pour obtenir la forme tridimensionnelle de la surface d'un objet. La méthode nécessite un projecteur et une caméra. Le principe de la méthode est le suivant: on projette, sur la surface de l'objet, l'image d'une grille; la surface de l'objet, à la manière d'un écran, réfléchit une image déformée de la grille; la caméra capte cette image déformée qu'une carte électronique numérise; un ordinateur analyse l'information de l'image contenue dans la carte électronique et en déduit la forme tridimensionnelle de l'objet.

La méthode est favorablement comparée aux méthodes conventionnelles de Moiré. Elle n'utilise aucune composante mobile, ni d'opération mathématique complexe. Elle n'exige pas que la surface soit peinte blanche, ou d'une autre teinte uniforme. Elle distingue les surfaces concaves des surfaces convexes. Finalement, elle s'utilise sur des surfaces dont la réflectivité peut avoir une composante spéculaire.

Abstract

A computer topography is discussed in which a camera observes a grating projected on an object under test. The grating image is transformed by the object shape and reflected back to the camera. A digitalised image of the grating is obtained with a PC board, and computer processing gives the shape of the object under test.

The method has advantage over conventional Moiré topography and fringe-contour interferometry. It uses no moving components or complex mathematics. It does not require the surface to have a uniform color or to be white painted. Discrimination is achieved between elevation and depression on the object. The method can be used on a surface with a specular reflectance component.

Remerciements

Je tiens principalement à remercier mon directeur de recherche, M. Roman Baldur, professeur titulaire au département de génie mécanique, pour ses précieux conseils durant la réalisation de ce projet et pour la révision de ce mémoire.

Je tiens à remercier le Fonds pour la Formation de Chercheurs et l'Aide à la Recherche (FCAR), ainsi que l'Ecole Polytechnique, pour m'avoir financé durant la réalisation des travaux.

Je veux également remercier les techniciens de la Section de mécanique appliquée, ainsi que ceux de Génie physique. Spécialement, M. Phat Bao Chau et M. Carol Painchaud, pour l'aide apportée lors de la partie expérimentale du projet.

Finalement, je désire remercier toute la communauté de la Section de mécanique appliquée pour l'aide et la formation que j'ai reçues, sous de nombreuses formes. Ainsi que la Section de physique optique, pour le prêt d'équipement.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

MÉTHODE OPTIQUE DE NUMÉRISATION TRIDIMENSIONNELLE D'OBJETS

présenté par: DESJARDINS, Pierre

en vue de l'obtention du grade de: Maîtrise es Sciences Appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BAZERGUI, André ..... , Ph. D., Président

M. BALDUR, Roman ..... , M. SC. A.

M. GUARDO, Robert ..... , Ph. D.

Table des matières

Sommaire iv

Abstract v

Remerciements vi

Liste des annexes xiii

Liste des figures xvi

liste des tableaux xxi

liste des symboles xxii

CHAPITRE 1

1.1 Introduction 1

1.2 But du projet 2

1.3 Démarche d'élaboration de la méthode 3

1.4 Organisation du mémoire 3

CHAPITRE 2

2.1 Introduction 6

2.2 Critères de classement 6

2.3 Exemple de méthode passive, indirecte, utilisant plusieurs images selon un plan d'observation fixe 7

2.4 Exemple de méthode passive, indirecte, utilisant plusieurs images selon plusieurs plans d'observation différents 10

2.5 Méthode active, indirecte, utilisant une image selon un plan d'observation fixe 12

2.5.1 Les méthodes par Moiré 12

2.5.1.1 Les méthodes de Moiré par projection 15

2.5.1.2 Les méthodes de Moiré par ombrage 17

2.5.2 Les méthodes d'écart par rapport à la mise au point adéquate 19

2.5.3 La méthode par transformée de Fourier 22

2.6 Méthode active, directe, utilisant plusieurs images selon un plan d'observation fixe 27

2.7 Méthodes actives, indirectes, utilisant plusieurs images selon un plan d'observation fixe 29

2.7.1 par projection d'un plan de lumière 30

2.7.2 Méthode utilisant plusieurs images de Moiré 32

2.8 Méthode active, indirecte, utilisant plusieurs images selon plusieurs plans d'observation différents 34

2.9 Conclusion 35

CHAPITRE 3

3.1 Description de la méthode utilisée 37

3.2 Démonstration géométrique de la méthode 39

3.3 Description de l'image captée par la caméra ... 41

3.4 Définition de fonctions mathématiques. 43

3.5 Transformation de l'image captée par la caméra en un hologramme de l'objet. 46

3.6 Transformation de l'hologramme en franges de Moiré 52

3.7 Formulation de l'équation du degré d'élévation 57

3.8 Le degré d'élévation associé aux franges de Moiré 70

3.9 Comparaison avec les méthodes du chapitre 2. .. 72

3.10 Conclusion. 73

CHAPITRE 4

4.1 La fonction de transfert de la caméra 74

4.2 Effet de la numérisation en pixels de l'hologramme. 76

4.2.1 Numérisation d'un hologramme binaire 77

4.2.2 Numérisation des images servant à créer l'hologramme 81

4.3 Effet du modèle optique choisi 85

4.3.1 Effet du modèle optique, pour la caméra ... 86

4.3.2 Effet du modèle optique, pour le projecteur 89

4.4 Les conditions expérimentales et l'équipement utilisé. 92

4.5 Procédure expérimentale 98

4.5.1 Procédure expérimentale de cueillette des images 99

4.5.2 Procédure de transformation des images en un hologramme expérimental. 102

4.5.3 Procédure de transformation de l'hologramme expérimental en une représentation numérique de la forme de l'objet 102

4.5.4 Procédure de transformation de l'hologramme expérimental en franges de Moiré 103

4.6 Conclusion 103

CHAPITRE 5

5.1 Cibles expérimentales 105

5.2 Données et résultats expérimentaux sur la position de l'objet..... 107

5.2.1 La cible convexe 108

5.2.2 La cible concave 110

5.2.3 La cible plane 111

5.3 Données et résultats expérimentaux sur la forme de l'objet..... 114

5.3.1 La surface convexe 115

5.3.2 La surface concave 118

5.3.3 La surface plane 121

5.3.4 La modulation spatiale 123

5.4 Amélioration suggérée 125

5.5 Conclusion 126

Conclusion générale 127

Références 231

Liste des annexes

A : L'intensité lumineuse captée par la caméra 132

A.1 Proportion de l'intensité lumineuse qui émise par le projecteur atteint un élément de surface sur l'objet 133

A.2 Proportion de l'intensité lumineuse incidente qui est réfléchie par l'élément de surface 136

A.3 Proportion de l'intensité lumineuse qui émise par un élément de surface sur l'objet atteint la caméra 137

B Explications algébriques 140

B.1 Equation du degré d'élévation 140

B.2 Largeur de la bande centrale de la grille dans le plan image de la caméra 150

B.3 Largeur des bandes de la grille de Ronchi requise 151

C : Calcul de la position du point nodal de la caméra. 153

C.1 Formulation des équations 153

C.2 Transposition des équations dans le plan image de la caméra 157

C.3 Position de l'axe optique de la caméra dans le plan image de la caméra 159

C.4 Données expérimentales 163

C.5 Statistiques et résultats 168

D : Calcul de la position du point nodal du projecteur. 173

D.1 Formulation des équations 173

D.2 Les corrections à apporter sur les données expérimentales 177

D.3 Position de l'axe optique du projecteur dans le plan objet du projecteur 180

D.4 Données expérimentales 181

D.4.1 Mesure des diamètres de la diapositive 182

D.4.2 Mesure sur l'image projetée de la diapositive 183

D.5 Statistiques et résultats 185

E : Mesure des conditions expérimentales 188

E.1 La technique utilisé pour mesurer la largeur des bandes de la grille de Ronchi, T_g 188

E.2 La technique utilisée pour mesurer le décalage latéral δ_g 189

E.3 Mesure de l'angle β 190

E.4 Mesure de x_{op} et z_{op} et ϕ 190

E.5 Mesure de y_{op} 190

F : Les outils informatiques créés et utilisés. 191

F.1 Les outils auxiliaires. 192

F.2 Les outils de transformations. 201

Liste des figures

2.1: Schéma explicatif de l'équation de l'opticien. 8

2.2:Schéma explicatif d'un système de vision stéréoscopique. 11

2.3: Schéma d'un système par Moiré de projection. ... 16

2.4: Schéma d'un système par Moiré d'ombrage. 18

2.5: Schéma explicatif de la formation d'une image. 20

2.6: Schéma d'un système par transformé de Fourier. 22

2.7: Graphe du spectre spatial de Fourier. 24

2.8: Schéma d'un système de numérisation directe. ... 27

2.9: Schéma d'un système de vision avec plan de lumière. 30

2.10: Schéme d'un système stéréoscopique actif. 34

3.1: Schéma globale du montage 37

3.2: Schéma d'une grille de Ronchi 38

3.3: Schéma géométrique simplifié 39

3.4: Graphique de la fonction peigne 44

3.5: Graphique de la fonction rectangle 45

3.6: Graphique de la transmissibilité d'une grille de Ronchi 46

3.7: Schéma de la propagation de rayons 47

3.8: Dessin théorique d'un hologramme 50

3.9: Dessin théorique des zones de même degré d'élévation 55

3.10: Schéma, rayons passant par les points nodaux (caméra) 57

3.11: Schéma, la formation d'une image dans la caméra 59

3.12: Schéma, formation d'une image par le projecteur 60

3.13: Relation entre le référentel (x',y',z') et le projecteur 62

3.14: Rélation entre les référentiels (x',y',z') et (x",y",z") 63

3.15: Relation entre les référentiels (x",y",z") et (x''',y''',z''') 64

3.16: Relation entre la grille et ceux du projecteur 66

3.17: Schéma de la géométrie globale du montage 68

4.1: Dessin d'une partie d'un hologramme avant numérisation 77

4.2: Dessin d'une partie d'un hologramme après numérisation 77

4.3: Schéma, rayons de l'image d'un point hors du plan objet 86

4.4: Schéma, rayons de l'image d'un point hors du plan image 89

4.5: Photo du montage expérimental 93

4.6: Schéma à l'échelle du montage expérimental 96

4.7: Photo du montage expérimental 99

4.8: Photo, la primière étape expérimentale 100

4.9: Photo la seconde étape expérimentale 101

5.1: Relation entre référentiels théoriques et expérimentals 105

5.2: Schéma de la cible convexe 106

5.3: Schéma de la cible concave 107

5.4: Photo de la cible convexe 108

5.5: Schéma de position de la cible convexe 109

5.6: Schéma de position de la cible concave 110

5.7: Schéma de position de la cible plane 111

5.8: Données expérimentales pour la surface convexe 116

5.9: Données expérimentales pour la surface convexe 117

5.10: Données expérimentales pour la surface concave 119

5.11: Schéma comparatif du rayon de courbure de la cible convexe 120

5.12: Schéma comparatif du rayon de courbure de la cible concave 120

5.11: Histogramme des écarts avec le plan de régression 122

5.12: Gros plan sur la modulation spatiale 124

A.1: Schéma intensité lumineuse émise et captée 133

B.1: Schéma, la formation d'une image dans la caméra 141
B.2: Relations entre les référentiels 142
B.3: Schéma, formation d'une image par le projecteur. 144
B.4: Relation entre les axes de la grille et ceux du projecteur 145
B.5: Schéma de la géométrie globale du montage 149
C.1: Schéma du champ angulaire de la caméra 154
C.2: Schéma du champ angulaire de la caméra 157
C.3: Dessin des données dans le plan image de la caméra 160
C.4: Schéma de mesure; position de l'axe optique (caméra) 161
C.5: Dessin des données dans le plan image de la caméra 162
C.6: Schéma de mesure; positon de l'axe optique du projecteur 163
C.7: Graphique de la valeur numérique d'une ligne de pixels 164
C.8: Dessin du banc d'optique de la caméra dans le montage. 165
C.9: Graphique de la régression du diamètre du champ visuel 169
C.10: Graphique: champ visuel de la caméra 171

D.1: Schéma de rayons passant par les points nodaux 174

D.2: Schéma du montage expérimental avec dimensions 178

D.3: Données expérimentales pour le calcul des diamètres 181

D.4: Schéma des diamètres mesurés expérimentalement 182

D.5: Graphe du prolongement des rayons lumineux 185

Liste des tableaux

3.1: Table de transformation de l'hologramme en franges 53

4.1: Liste de l'équipement utilisé 94

4.2: Tableau des conditions expérimentales 95

5.1: Résultats de la mesure de rayons pour la cible convexe 118

5.2: Résultats de la mesure de rayons pour la cible concave 121

C.1: Tableau des données pour l'axe optique de la caméra 166

C.2: Suite du tableau C.1 167

C.3: Tableau des données pour la caméra 168

C.4: Tableau des résultats pour le point nodal de la caméra 170

C.5: Tableau des résultats pour le point nodal de la caméra 172

D.1: Tableau des données pour l'axe optique du projecteur 183

D.2: Tableau des données pour l'axe optique du projecteur. 184

D.3: Tableau des données pour l'axe optique du projecteur 184

D.4: Tableau des résultats pour l'axe optique du projecteur 186

D.5: Tableau des résultats pour l'axe optique du projecteur. 186

CHAPITRE 1

1.1 Introduction

L'utilisation de capteurs externes permet aux robots d'interagir avec leur environnement d'une façon flexible. Ceci fait contraste avec une opération préprogrammée, dans laquelle un robot est appelé à effectuer une tache répétitive, par l'entremise de fonctions programmées.

Les capteurs d'un robot sont classés en deux catégories: interne et externe[1]. Les capteurs internes se rapportent à la position des articulations et sont utilisés pour le contrôle du robot. Les capteurs externes, eux, se rapportent à la détection de variables comme la forme externe d'un objet, la distance entre le robot et l'objet, la présence d'un objet dans des pinces et la pression exercée par les pinces sur l'objet.

Les capteurs externes sont divisés en deux classes: les capteurs qui nécessitent un contact physique avec les objets et les capteurs qui ne nécessitent pas de contact physique avec les objets.

Le présent document se concentre exclusivement sur un type précis de capteur sans contact: les systèmes de vision numérique. Plus précisément, le document se concentre sur les méthodes qui utilisent un système de vision pour l'acquisition numérique de la forme tridimensionnelle de la surface d'un objet.

1.2 But du projet

Nous présentons une méthode de numérisation permettant l'acquisition de la forme tridimensionnelle d'objets comparables à une automobile. Une caractéristique importante de la surface d'une automobile est la présence de courbures sans arrêtes vives. C'est à ce genre de surface que se consacre le présent document. Une autre caractéristique de la surface externe d'une automobile est sa tendance à réfléchir la lumière dans une direction privilégiée. La méthode proposée doit donc être applicable sur des surfaces ayant une réflexion spéculaire. La méthode doit aussi permettre un traitement numérique complètement automatique, afin d'être utilisée éventuellement par un robot. L'appareillage doit aussi être de faible encombrement, afin de libérer l'espace de travail pour un robot.

1.3 Démarche d'élaboration de la méthode

La démarche utilisée pour l'élaboration de ce projet est la suivante:

1- analyse des méthodes existantes permettant la numérisation tridimensionnelle d'objets;

2- analyse de la formation de l'image d'une grille;

3- formulation mathématique de la transformation de l'image d'une grille par les différents éléments optiques du système choisi;

4- déduction de la forme de l'objet et comparaison avec les autres méthodes;

5- discussion sur les caractéristiques du capteur d'image, ainsi que sur l'effet de la numérisation en pixels des images;

6- réalisation d'un montage expérimental;

7- analyse des résultats expérimentaux.

1.4 Organisation du mémoire

Le chapitre 2 décrit différentes méthodes existantes permettant la numérisation tridimensionnelle d'objets. Les critères de classement en catégories des différentes méthodes sont d'abord données. Plusieurs catégories avec

exemples sont par la suite exposées.

A partir d'une formulation mathématique des images captées par la caméra, le chapitre 3 explique une opération permettant d'en tirer un hologramme de l'objet. Une technique permettant de transformer cet hologramme en franges de Moiré est présentée. Une expression mathématique qui permet de retrouver la forme tridimensionnelle de l'objet à partir de l'hologramme est ensuite formulée. Une modification des équations, afin de permettre le calcul du degré d'élévation des pixels correspondants à une frange de Moiré, est alors présentée. Ce chapitre se termine avec une brève discussion, sur les franges de Moiré ainsi qu'une comparaison avec les méthodes du chapitre 2.

Le chapitre 4 discute de la partie expérimentale: une description de l'effet de la numérisation des images en pixels; formulation mathématique des équations permettant de calculer l'intervalle de validité du modèle optique; une description des conditions expérimentales, et de l'équipement; une description de la procédure expérimentale.

Le chapitre 5 donne les résultats expérimentaux: une description des objets analysés avec la méthode, une comparaison entre la forme théorique et expérimentale, une discussion sur une amélioration possible.

CHAPITRE 2

2.1 Introduction

Depuis quelques temps, les utilisateurs de systèmes de vision par ordinateur tentent d'obtenir une description tridimensionnelle d'objets à partir d'images.

Ces images provenant d'une caméra de télévision sont habituellement numérisées dans une matrice rectangulaire, dont les éléments ont une valeur numérique apparentée à l'intensité lumineuse captée par la caméra.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour reconstruire la forme tridimensionnelle à partir d'images. Toutefois, aucune de ces méthodes n'est complètement satisfaisante, et chaque méthode est adaptée à des conditions d'opération spécifiques[2][3][4][5][6][7].

Ce chapitre présente essentiellement un survol de méthodes utilisant un système de vision et pouvant être utilisées pour capter la forme tridimensionnelle d'un objet.

2.2 Critères de classement

Toutes les techniques utilisées pour numériser la forme d'un objet peuvent être classées selon trois critères[8] :

1- Une méthode est soit directe, soit indirecte. Les méthodes directes ne sont pas basées sur l'analyse d'images, alors que les méthodes indirectes le sont.

2- Une méthode est soit active, soit passive. Les méthodes actives requièrent l'utilisation d'une source d'énergie contrôlée, soit un projecteur, soit un laser, alors que les méthodes passives utilisent l'éclairage ambiant.

3- Une méthode utilise soit une seule image de l'objet dans un plan d'observation fixe, soit plusieurs images de l'objet dans un même plan d'observation fixe, soit encore plusieurs images de l'objet selon plusieurs plans d'observations différents.

2.3 Exemple de méthode passive, indirecte, utilisant plusieurs images selon un plan d'observation fixe

La méthode consiste à identifier sur une image les régions pour lesquelles la mise au point* est adéquate[9][10].

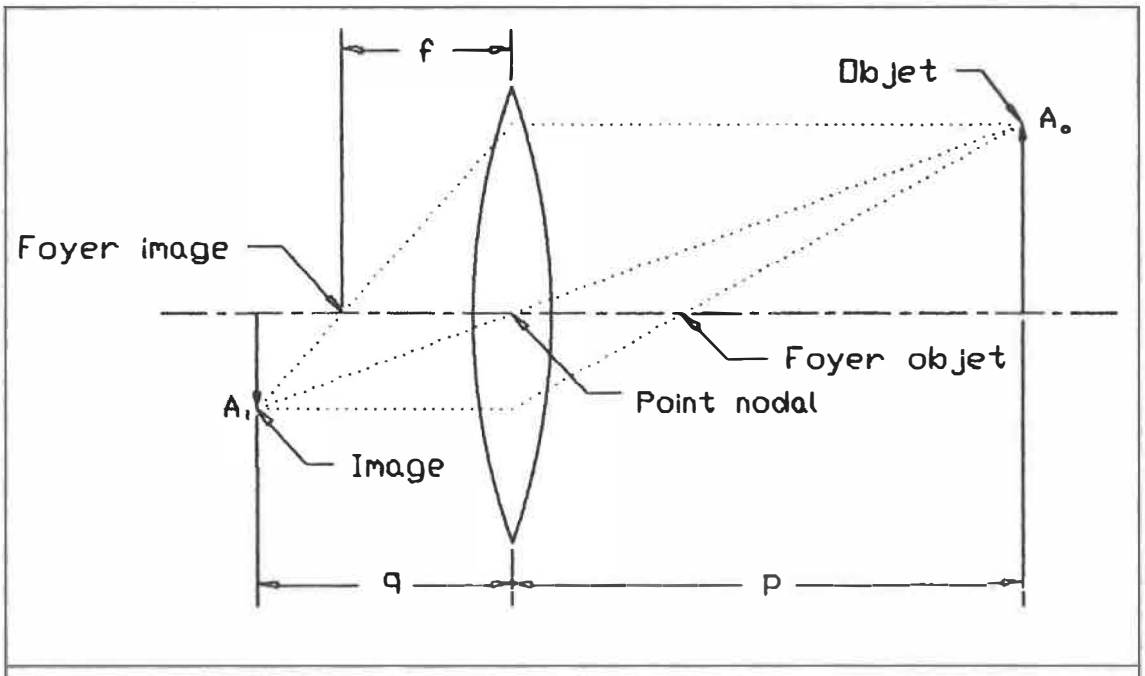

Figure 2.1: Schéma de rayons lumineux (pointillé) formant l'image d'un point à travers une lentille mince**

La figure 2.1 montre le schéma de rayons lumineux formant l'image d'un point objet à travers une lentille.

---

*On dit que la mise au point est adéquate lorsque l'image d'un objet ponctuel est ponctuelle.

**Une lentille est dite mince lorsque les rayons de courbure de ses faces sont très grands par rapport à l'épaisseur de la lentille.

L'équation de l'opticien décrit la relation entre la distance d'un objet et la lentille pour laquelle une image nette est formée, soit:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \tag{2.1}$$

d'où:

$$q = \frac{fp}{p - f} \tag{2.2}$$

Ainsi, pour une lentille mince ayant une distance focale connue, savoir la distance entre le plan image et la lentille donne la distance entre l'objet et la lentille de toutes les régions pour lesquelles la mise au point est adéquate.

En modifiant graduellement la distance entre le plan image et la lentille on peut donc identifier la distance à la lentille pour toutes les régions de la surface de l'objet.

Les éléments essentiels de cette méthode sont:

1- la surface de l'objet doit être couverte d'éléments discernables;

2- les éléments discernables de la surface doivent pouvoir être traités, de telle sorte à déterminer s'ils correspondent à des régions pour lesquelles la mise au point est adéquate;

3- le traitement de l'image est influencé par l'intensité lumineuse ambiante.

2.4 Exemple de méthode passive, indirecte, utilisant plusieurs images selon plusieurs plans d'observations différents

Cette méthode consiste à prendre deux ou plusieurs images de caméras séparées d'une distance connue. Il faut alors identifier chaque élément discernable, dans plus d'un plan d'observation différent[11][12][13][14][15][16].

La figure 2.2 montre un exemple avec deux caméras. De cette figure, nous avons:

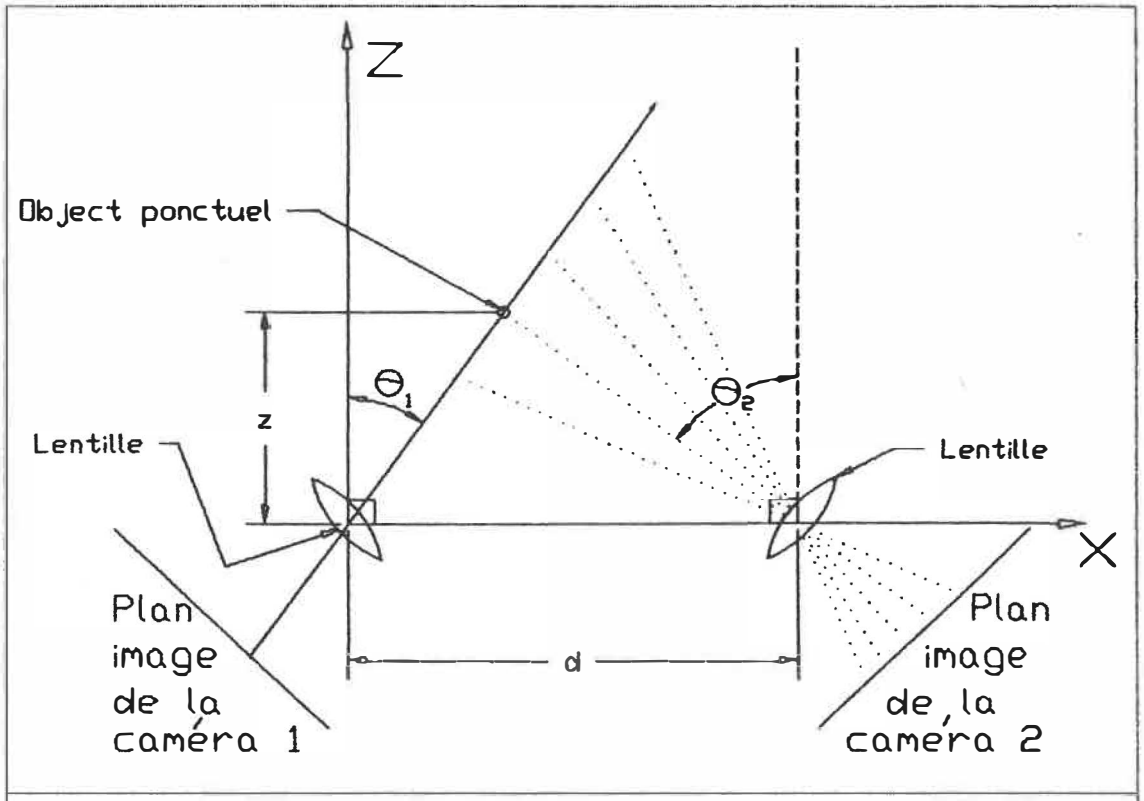

Figure 2.2: Schéma de rayons lumineux d'un système stéréoscopique.

$$z = \frac{d}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2} \tag{2.3}$$

Les éléments essentiels de cette méthode sont:

1- la surface de l'objet doit être couverte d'éléments discernables;

2- la méthode exige que l'on établisse la correspondance des éléments discernables, selon plusieurs plans de projection;

3- le traitement de l'image est influencé par l'intensité lumineuse ambiante.

2.5 Méthode active, indirecte, utilisant une image selon un plan d'observation fixe

Cette catégorie est celle dans laquelle le nombre de méthodes existantes est le plus imposant. Toutes les méthodes ont pour élément commun la projection sur l'objet d'une grille. Parmi ces méthodes on a:

- le calcul de la forme de l'objet par franges de Moiré;
- le calcul de la forme de l'objet par l'écart avec la position de mise au point adéquate;
- le calcul de la forme de l'objet par transformée de Fourier.

2.5.1 Les méthodes par Moiré

Un patron de Moiré est formé par une interférence spatiale de basse fréquence, créée lorsque deux réseaux de lignes régulièrement espacées, de fréquence spatiale plus grande, sont superposés l'un sur l'autre[17][18][19][20].

Mathématiquement, le patron d'interférence $A(x_c, y_c)$ de deux patrons A_1 et A_2 est:

$$A(x_c, y_c) = A_1\{1 + m_1\cos(\omega_1 x_c + \phi_1(x_c, y_c))\} - A_2\{1 + m_2\cos(\omega_2 x_c + \phi_2(x_c, y_c))\} \tag{2.4}$$

où x_c et y_c sont les coordonnées de position dans le plan image de la caméra,

A_1 et A_2 sont les amplitudes,

m_1 et m_2 sont les indices de modulation,

ω_1 et ω_2 sont les pulsations spatiales,

ϕ_1 et ϕ_2 sont des phases.

Lorsque ce signal est filtré, par un filtre passe-bas, seule la fréquence de battement et les termes constants sont laissés, soit:

$$A'(x_c, y_c) = A_1 A_2\left\{1 + m_1 m_2 \cos\left([\omega_1 - \omega_2]x + \phi_1(x_c, y_c) - \phi_2(x_c, y_c)\right)\right\} \tag{2.5}$$

Pour des pulsations spatiales identiques, seule la différence de phase reste. Dans les méthodes utilisant le Moiré, la profondeur est encodée et retrouvée du terme de différence de phase.

Les amplitudes A_1 et A_2 sont en général variables mais non nulles sur la surface de l'objet. Ainsi, la seule

valeur détectable, en pratique, est $\Lambda'(x_c, y_c) = 0$. Ceci nous donne des franges de même phase sur la surface de l'objet. Ces franges, nommées franges de Moiré, sont telles que la différence de phase entre chaque frange est un multiple de 2π.

Les méthodes utilisant le Moiré sont utiles pour mesurer le degré d'élévation sur une surface relativement lisse qui ne montre pas de discontinuité de profondeur. C'est-à-dire que les pentes des surfaces vues par le détecteur doivent être bornées supérieurement.

L'analyse numérique automatique des franges obtenues est possible[21][22][23], mais difficile[24].

Toutes les méthodes utilisant le Moiré ont le désavantage de ne pas permettre une distinction facile entre une surface concave et une surface convexe. Ceci se voit à partir de l'équation 2.5, où dans le cas $\omega_1 = \omega_2$, le signe de la différence de phase $\phi_1(x_c, y_c) - \phi_2(x_c, y_c)$ n'affecte pas la valeur numérique de $\Lambda'(x_c, y_c)$. Puisque l'image captée ne contient que le terme $\Lambda'(x_c, y_c)$, on ne peut retrouver le signe de la différence de phase. Il existe toutefois des méthodes qui, par encodage des bandes de la grille utilisée, permettent de déterminer le signe de cette différence de phase[25].

Dans les méthodes par Moiré, l'information sur le degré d'élévation n'est connue que sur chaque frange et le déphasage entre deux franges successives est de 2π. Ceci donne une image fortement discontinue de l'objet et implique généralement l'utilisation de techniques d'interpolation entre les franges.

Les méthodes utilisant le Moiré sont nombreuses mais seuls les deux groupes suivants sont d'intérêt pour la numérisation tridimensionnelle d'objets.

2.5.1.1 Les méthodes de Moiré par projection

Pour ces méthodes, deux grilles sont utilisées et celles-ci doivent parfaitement coïncider[26][27]. Une grille est placée dans le plan objet du projecteur, alors que l'autre est placée devant la caméra, tel que montré à la figure 2.3. Le projecteur est placé à un angle θ_1 et la caméra est placée à un angle θ_2, par rapport à l'axe z. La lumière projetée est donc modulée par la grille du projecteur. Lorsque l'image de la grille projetée est réfléchie par une surface, la surface déforme l'image de la grille. En observant l'image réfléchie à travers la grille devant la caméra, des franges d'interférence sont créées. Si p_o est la période de la grille projetée, alors le changement de la coordonnée z entre le centre des franges

d'interférence observé par la caméra est:

$$\Delta z = \frac{p_o}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2} \tag{2.6}$$

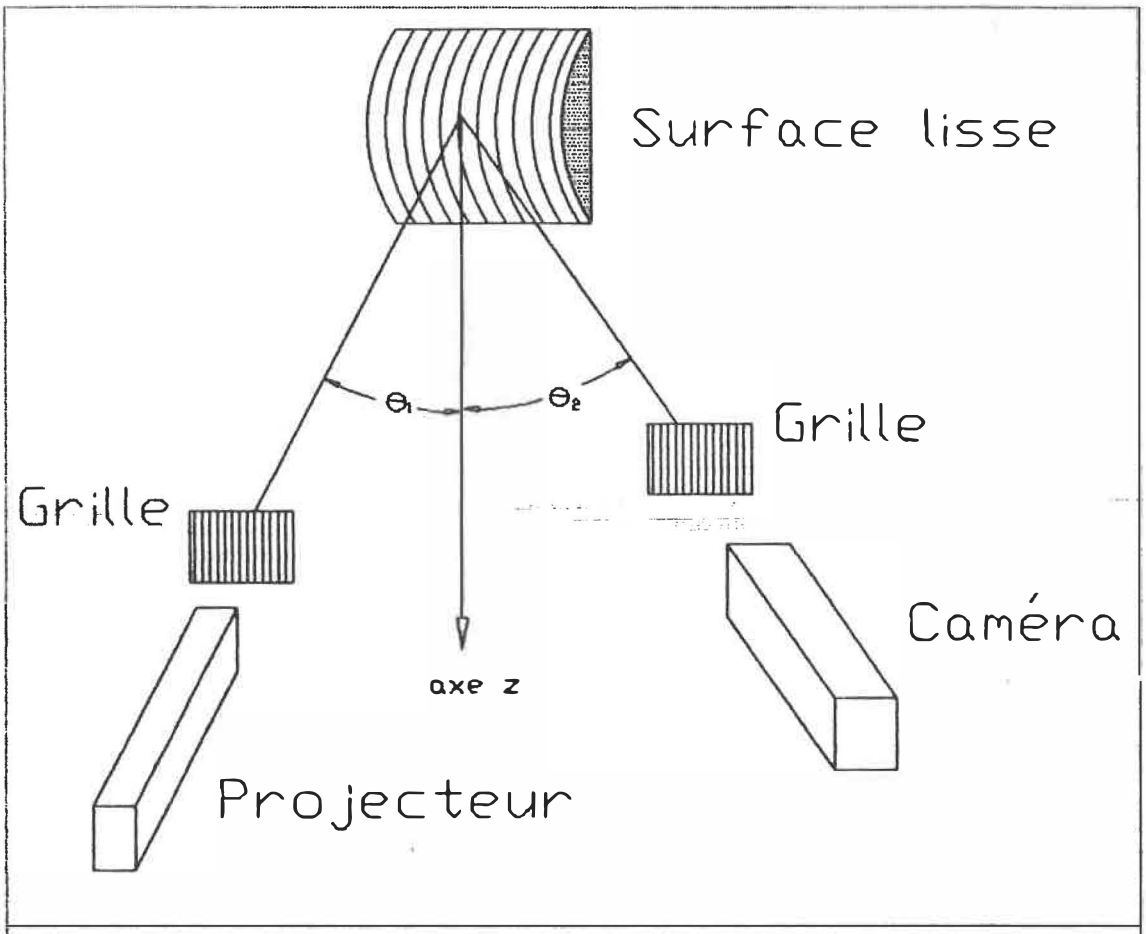

Figure 2.3: Schéma d'un système de Moiré par projection

On peut exprimer le terme "$\tan\theta_1 + \tan\theta_2$" de l'équation 2.6 sous la forme d'une fonction de l'ordre des franges de Moiré, n, et de constantes géométriques du montage.

Quelques systèmes de Moiré par projection sont disponibles commercialement[28].

La grille placée devant la caméra peut être remplacée par un programme générant une grille (version commerciale[29]), ou encore par un dispositif de balayage[30].

Les inconvénients de cette méthode sont:

1- le problème de la compatibilité des grilles utilisées;

2- l'impossibilité de discerner une surface concave d'une surface convexe;

3- le traitement de l'image est influencé par l'intensité lumineuse ambiante et l'intensité lumineuse du projecteur qui est réfléchie par la surface de l'objet;

4- cette méthode est habituellement utilisée sur des surfaces de couleur blanc satiné.

2.5.1.2 Les méthodes de Moiré par ombrage

Une seule grille, de grandeur comparable à l'objet analysé, est placée devant celui-ci[31][32][33]. La surface de l'objet est éclairée à travers la grille et observée d'une autre direction. La figure 2.4 montre un schéma du

montage[34]. Si p_o est la période de la grille, alors le changement de la coordonnée z entre le centre des franges d'interférence observé par la caméra est:

$$\Delta z_g = \frac{p_o}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2} \tag{2.7}$$

On peut exprimer le terme "$\tan\theta_1 + \tan\theta_2$" de l'équation 2.7 sous la forme d'une fonction de l'ordre des franges de Moiré n et de constantes géométriques du montage.

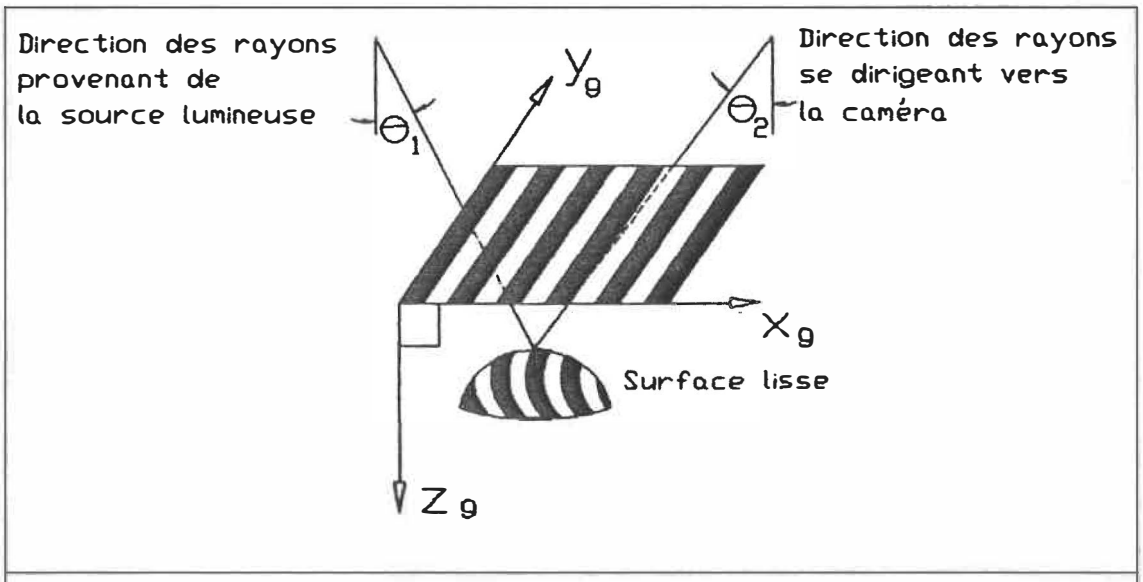

Figure 2.4: Schéma d'un système de Moiré par ombrage

Les inconvénients de cette méthode sont:

1- la dimension de la grille utilisée, qui est comparable à celle de l'objet;

2- l'impossibilité de discerner une surface concave d'une surface convexe;

3- le traitement de l'image est influencé par l'intensité lumineuse ambiante et l'intensité lumineuse du projecteur qui est réfléchie par la surface de l'objet;

4- cette méthode est habituellement utilisée sur des surfaces de couleur blanc satiné.

2.5.2 Les méthodes d'écart par rapport à la mise au point adéquate

La méthode consiste à projeter sur la surface de l'objet une grille de points. La profondeur de chaque point est déterminée par le rayon de la tache sur l'image captée par la caméra[35][36][37].

Une autre méthode consiste à utiliser un réseau. Si la mise au point n'est pas adéquate pour une bande du réseau, la caméra voit une bande plus large; la largeur des bandes est reliée à la distance de la surface illuminée.

La figure 2.5 montre le schéma de rayons lumineux formant l'image d'un point objet à travers une lentille. On constate que l'ensemble des rayons formant l'image est compris dans un cône, dont la base est fonction du diamètre

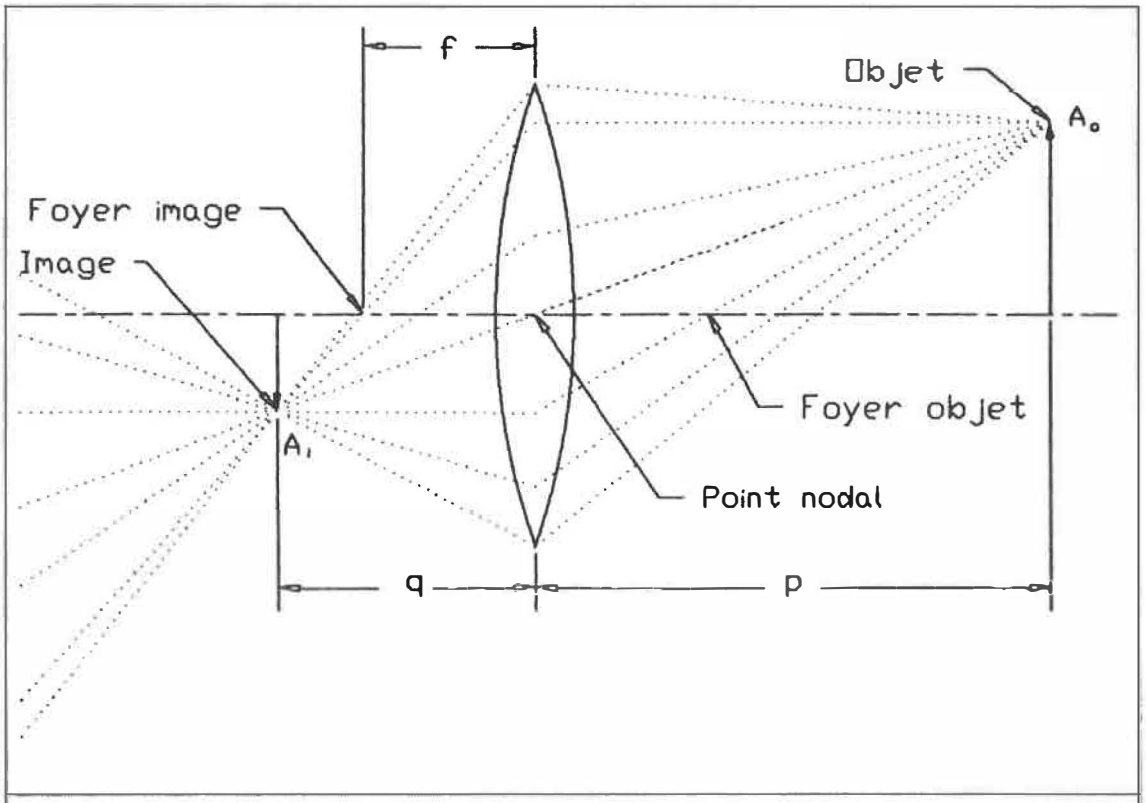

Figure 2.5: Schéma de rayons lumineux formant l'image d'un point à travers une lentille mince

de la lentille. L'équation de l'opticien décrit la relation entre la distance d'un objet et son image, par rapport à la lentille, soit:

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{q}+\frac{1}{p} \tag{2.8}$$

Les distances obtenues de cette équation correspondent aux conditions de mise au point adéquate. Pour des positions de l'écran différentes de q, l'image obtenue

n'est pas ponctuelle. Le diamètre de la tache peut être utilisé pour calculer l'écart entre la position de l'écran et la position *p*. En effectuant les calculs pour tous les points sur la surface de l'objet, on obtient une représentation tridimensionnelle de l'objet. La méthode permet de distinguer une surface concave d'une surface convexe.

Les éléments essentiels de cette méthode sont:

1- permet de distinguer une surface concave d'une surface convexe;

2- les éléments discernables de la surface doivent pouvoir être traités, de telle sorte à déterminer s'ils correspondent à des régions pour lesquelles la mise au point est adéquate;

3- les taches formées ne doivent pas se joindre entre elles, ce qui limite la plage d'utilisation;

4- les taches ne sont plus discernables lorsque l'écart avec la position de mise au point adéquate est trop grand;

5- la couleur de la surface doit être uniforme et exempte de réflexion spéculaire;

6- le traitement de l'image est influencé par l'intensité lumineuse ambiante et l'intensité lumineuse du projecteur réfléchie par la surface.

2.5.3 La méthode par transformée de Fourier

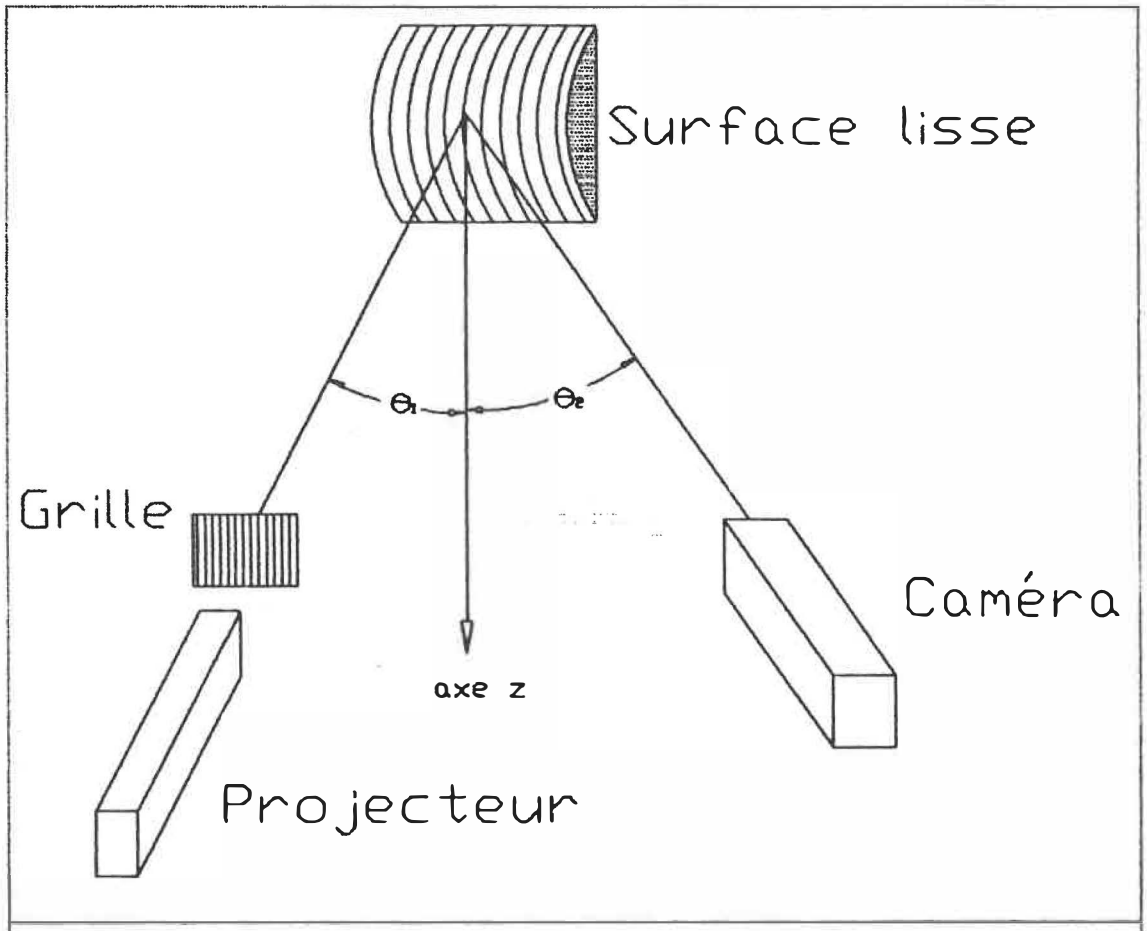

Figure 2.6: Schéma d'un système par transformée de Fourier

La figure 2.6 montre un schéma du montage. La géométrie du montage est la même que celle utilisé pour les Moiré par

projection, car une grille est projetée sur l'objet. Toutefois, l'image de la grille projetée est directement captée par la caméra, sans l'utilisation d'une seconde grille.

L'intensité de l'image captée par la caméra peut-être exprimée dans le référentiel (x_c, y_c) du plan image de la caméra par la relation suivante[38] :

$$I(x_c, y_c) = a(x_c, y_c) + b(x_c, y_c)\cos[2\pi f_o x_c + \theta(x_c, y_c)]$$
$$= a(x_c, y_c) + c(x_c, y_c)\exp(2\pi i f_o x_c) + c^*(x_c, y_c)\exp(-2\pi i f_o x_c) \tag{2.9}$$

avec,

$$c(x_c, y_c) = \frac{1}{2} b(x_c, y_c)\exp[i\theta(x_c, y_c)] \tag{2.10}$$

où * indique l'opération de conjugaison complexe;

$b(x_c, y_c)$ est l'intensité lumineuse provenant du projecteur et captée par la caméra;

$a(x_c, y_c)$ est l'intensité lumineuse provenant de toute autre source que le projecteur;

f_o est la fréquence des bandes de la grille, dans le plan image de la caméra.

On fait la transformée de Fourier, dans la direction des x_c, ce qui donne $\bar{I}(f, y_c)$:

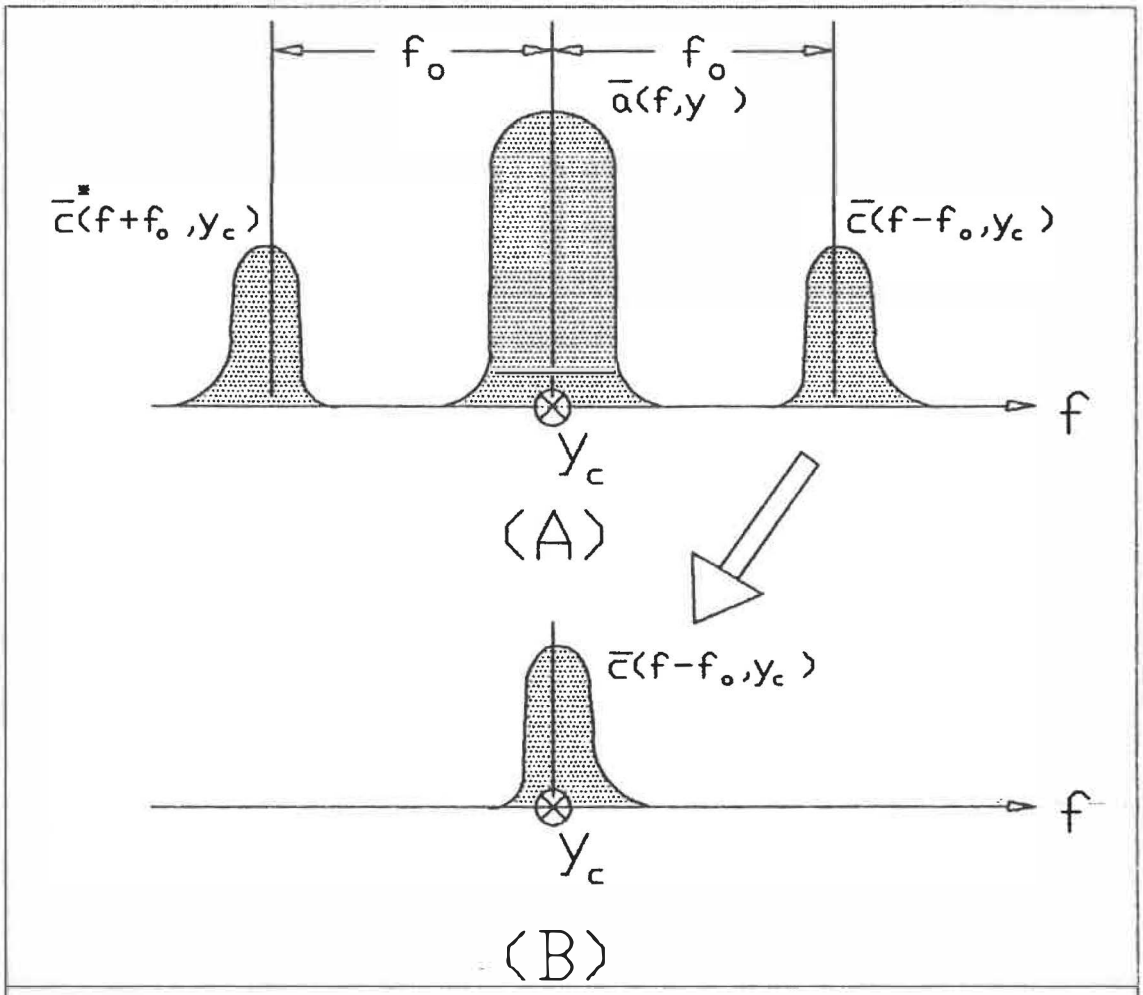

Figure 2.7: (A) Spectre de Fourier montrant une modulation à la fréquence f_o; (B) Spectre de Fourier après démodulation par décalage latéral.

$$\bar{I}(f,y_c)=\bar{a}(f,y_c)+\bar{c}(f-f_o,y_c)+\bar{c}^*(f+f_o,y_c) \tag{2.11}$$

où le trait sur les variables indique les spectres de Fourier;

f est la fréquence spatiale dans la direction des x_c.

Si les variations des termes $a(x_c, y_c)$, $b(x_c, y_c)$ et $\theta(x_c, y_c)$ se font à des fréquences spatiales moins élevée que f_o, le spectre de Fourier de l'équation précédente est séparé par la fréquence porteuse f_o, tel que montré schématiquement à la figure 2.7(A). Par la suite, nous effectuons une translation du spectre sur l'axe des fréquences, d'une quantité f_o, de telle sorte à obtenir $c(f, y_c)$ montré à la figure 2.7(B).

Nous calculons alors la transformée de Fourier inverse de $c(f, y_c)$, ce qui donne l'équation 2.10. En prenant le logarithme complexe de l'équation 2.10, nous obtenons:

$$\log[c(x_c, y_c)] = \log\left[\frac{1}{2}b(x_c, y_c)\right] + i\theta(x_c, y_c) \tag{2.12}$$

Nous avons alors la phase $\theta(x_c, y_c)$ dans la partie imaginaire. La valeur numérique de cette phase est alors connue modulo 2π, mais en imposant la continuité de la phase, il est possible de reconstruire la surface de l'objet. Nous obtenons le degré d'élévation par:

$$z = \frac{\theta(x_c, y_c) p_o}{2\pi(\tan\theta_1 + \tan\theta_2)}$$

(2.13)

On peut exprimer le terme "$\tan\theta_1 + \tan\theta_2$" sous forme d'une fonction de $\theta(x_c, y_c)$ et de constantes géométriques du montage.

Les éléments essentiels de cette méthode sont:

1- le résultat est indépendant de l'éclairage ambiant;

2- le résultat est indépendant de la couleur ou de l'uniformité de la couleur sur la surface, à la condition que la fréquence spatiale des motifs soit nettement inférieure à la fréquence spatiale de l'image de la grille sur l'objet;

3- donne la forme de l'objet de façon plus continue que dans le cas des franges de Moiré;

4- permet de différencier les surfaces concaves des surfaces convexes.

5- requiert l'utilisation de nombres complexes.

2.6 Méthode active, directe, utilisant plusieurs images selon un plan d'observation fixe

Cette méthode exploite la relation d'inverse du carré de la distance pour l'intensité lumineuse d'une source ponctuelle.

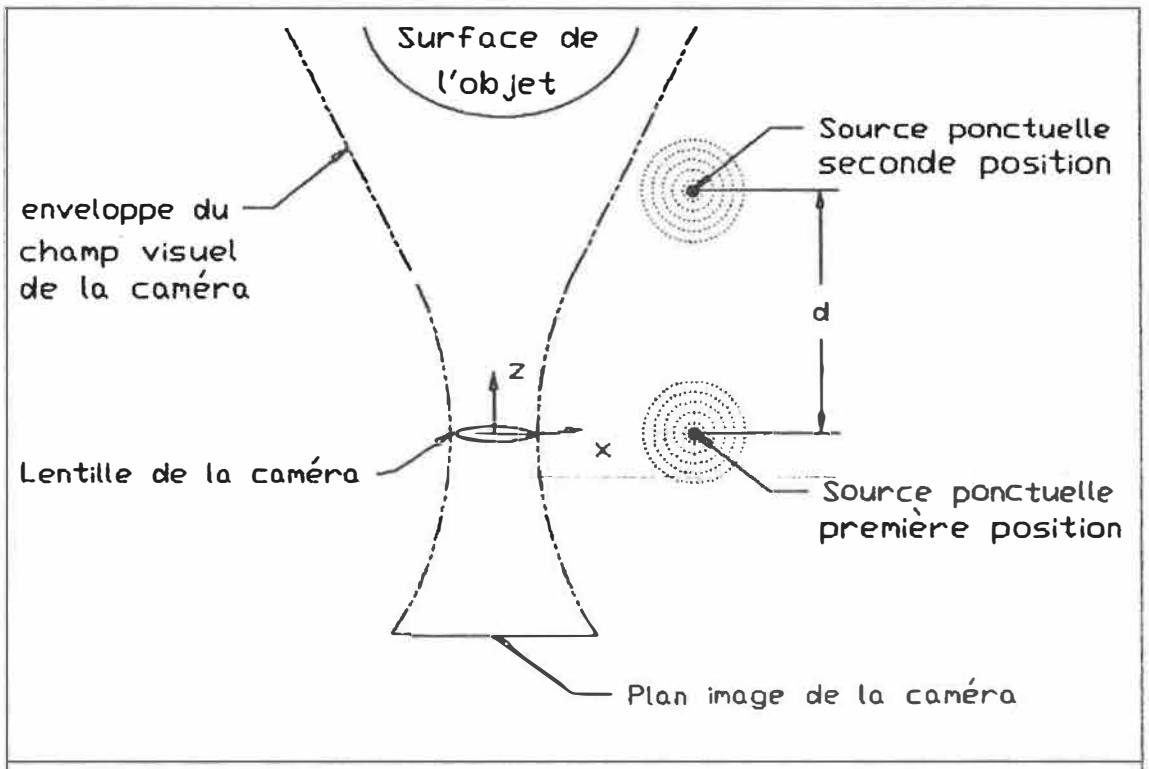

Figure 2.8: Schéma d'un système de numérisation tridimensionnelle d'objets utilisant une source ponctuelle

L'intensité lumineuse en un point à la surface d'un objet éclairé par une source ponctuelle est:

$$I_s = \frac{\bar{I}}{r^2}$$

(2.14)

où $\bar{I}$ est l'intensité lumineuse de la source;

r est la distance entre la source et le point sur la surface de l'objet.

La figure 2.8 montre un schéma du montage; une caméra et une source ponctuelle sont requises. Trois images sont numérisées: la première avec la source ponctuelle éteinte, pour enregistrer l'éclairage ambiant; la seconde avec la source près de la caméra, mais pas dans son champ de vision; une troisième avec la source près de l'objet, mais hors du champ de vision de la caméra.

Si, pour un pixel particulier, les trois intensités sont I_0, I_1 et I_2, nous avons de la figure 2.8 et l'équation 2.14:

$$z = \frac{d(1+\sqrt{R})}{R-1}$$

(2.15)

où d est la distance entre les deux positions de la source de lumière;

$R = \frac{I_2 - I_0}{I_1 - I_0}$, et où on doit toujours avoir $R > 1.0$.

Les éléments essentiels de cette méthode sont:

1- les valeurs obtenues par numérisation des images doivent être linéaires avec l'intensité lumineuse et relativement sans bruit;

2- la surface de l'objet doit rigoureusement obéir à la loi de Lambert pour la diffusion, c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de réflexion spéculaire et que toute la lumière incidente sur la surface doit être rediffusée uniformément;

3- le traitement de l'image est indépendant de l'éclairage ambiant;

4- permet de différencier les surfaces concaves des surfaces convexes.

2.7 Méthodes actives, indirectes, utilisant plusieurs images selon un plan d'observation fixe

Cette catégorie comprend deux exemples, qui sont par ailleurs très différents. Parmi ces méthodes sont:

- le calcul de la forme de l'objet par projection d'un plan de lumière;
- le calcul de la forme de l'objet par utilisation de plusieurs Moiré;

2.7.1 Par projection d'un plan de lumière

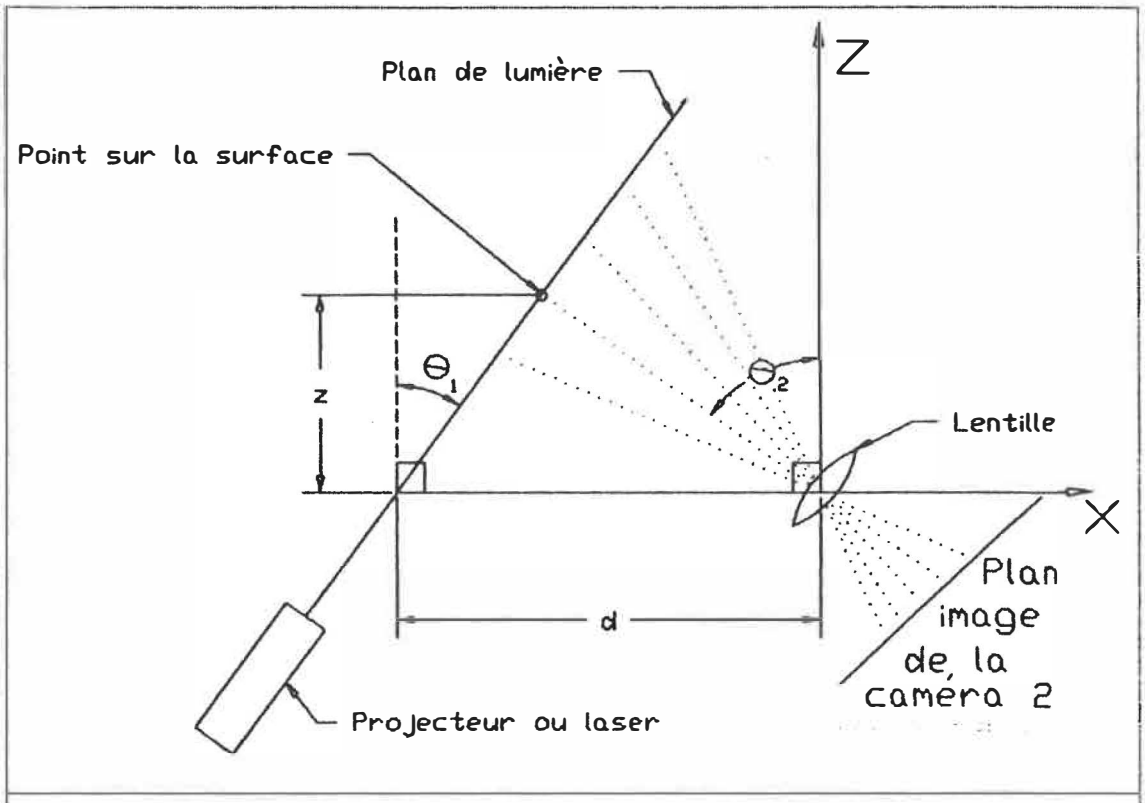

Figure 2.9: Schéma d'un système de numérisation tridimensionnelle d'objets utilisant un plan de lumière

Soit un plan de lumière vertical, produit en utilisant un laser avec une optique cylindrique ou un projecteur avec une fente. Le plan de lumière est projeté sur la surface d'un objet et réfléchi vers une caméra[39][40][41][42][43][44][45]. La forme de la ligne brillante laissée sur l'objet lorsque vue par une caméra placée à angle, contient l'information sur la forme locale de l'objet. En effet, la distance absolue peut être trouvée

par simple triangulation. La figure 2.9 montre un schéma d'un tel système. Pour couvrir l'objet, le plan de lumière peut être soit déplacé (faire varier d), soit tourné (faire varier θ_1). On obtient:

$$z = \frac{d}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2} \tag{2.16}$$

Certaines versions existent commercialement[46][47][48][49][50][51][52].

Les éléments essentiels de cette méthode sont:

1- la présence d'un dispositif pour mesurer soit θ_1 si l'on fait varier θ_1, soit d si l'on fait varier d;

2- pour connaître la forme de l'objet, la méthode exige qu'on analyse plusieurs images;

3- permet de différencier les surfaces concaves des surfaces convexes;

4- le traitement de l'image est influencé par l'intensité lumineuse ambiante et l'intensité lumineuse du projecteur réfléchie par la surface de l'objet.

2.7.2 Méthode utilisant plusieurs images de Moiré

La méthode consiste à utiliser plusieurs images de Moiré par projection, mais en réalisant un décalage de la grille de la caméra pour chaque image[53].

Comme à la section 2.5, mathématiquement, le patron d'interférence $A(x_c, y_c)$ de deux patrons d'amplitude A_1 et A_2 est;

$$A(x_c, y_c) = A_1\{1 + m_1\cos(\omega_1 x_c + \phi_1(x_c, y_c))\} - A_2\{1 + m_2\cos(\omega_2 x_c + \phi_2(x_c, y_c) + \phi_3)\} \tag{2.17}$$

où x_c et y_c sont les coordonnées de position dans le plan image de la caméra,

A_1 et A_2 sont les amplitude,

m_1 et m_2 sont les indices de modulation,

ω_1 et ω_2 sont les pulsations spatiales,

ϕ_1 et ϕ_2 sont des phases,

ϕ_3 est le déphasage supplémentaire causé par le décalage de la grille de la caméra.

Lorsque ce signal est filtré par un filtre passe-bas, seuls la fréquence de battement et les termes constants sont laissés, soit:

$$A'(x_c, y_c) = A_1 A_2\{1 + m_1 m_2\cos([\omega_1 - \omega_2]x + \phi_1(x_c, y_c) - \phi_2(x_c, y_c) + \phi_3)\} \tag{2.18}$$

Pour des pulsations spatiales identiques, seule la différence de phase reste. Comme déjà mentionné à la section 2.5 dans les méthodes utilisant le Moiré, la profondeur est encodée et retrouvée du terme de différence de phase.

Pour des valeurs de ϕ_3 judicieusement choisies la méthode permet de faire la distinction entre une surface concave et une surface convexe.

Les éléments essentiels, de cette méthode sont:

1- permet de différencier les surfaces concaves des surfaces convexes;

2- le problème de la compatibilité des grilles utilisées, dans le cas du Moiré par projection, ou de la dimension très grande de la grille, dans le cas du Moiré par ombrage;

3- le traitement de l'image est influencé par l'intensité lumineuse ambiante et l'intensité lumineuse du projecteur réfléchie par la surface de l'objet;

4- cette méthode est habituellement utilisée sur des surfaces de couleur blanc satiné.

2.8 Méthode active, indirecte, utilisant plusieurs images selon plusieurs plans d'observations différents

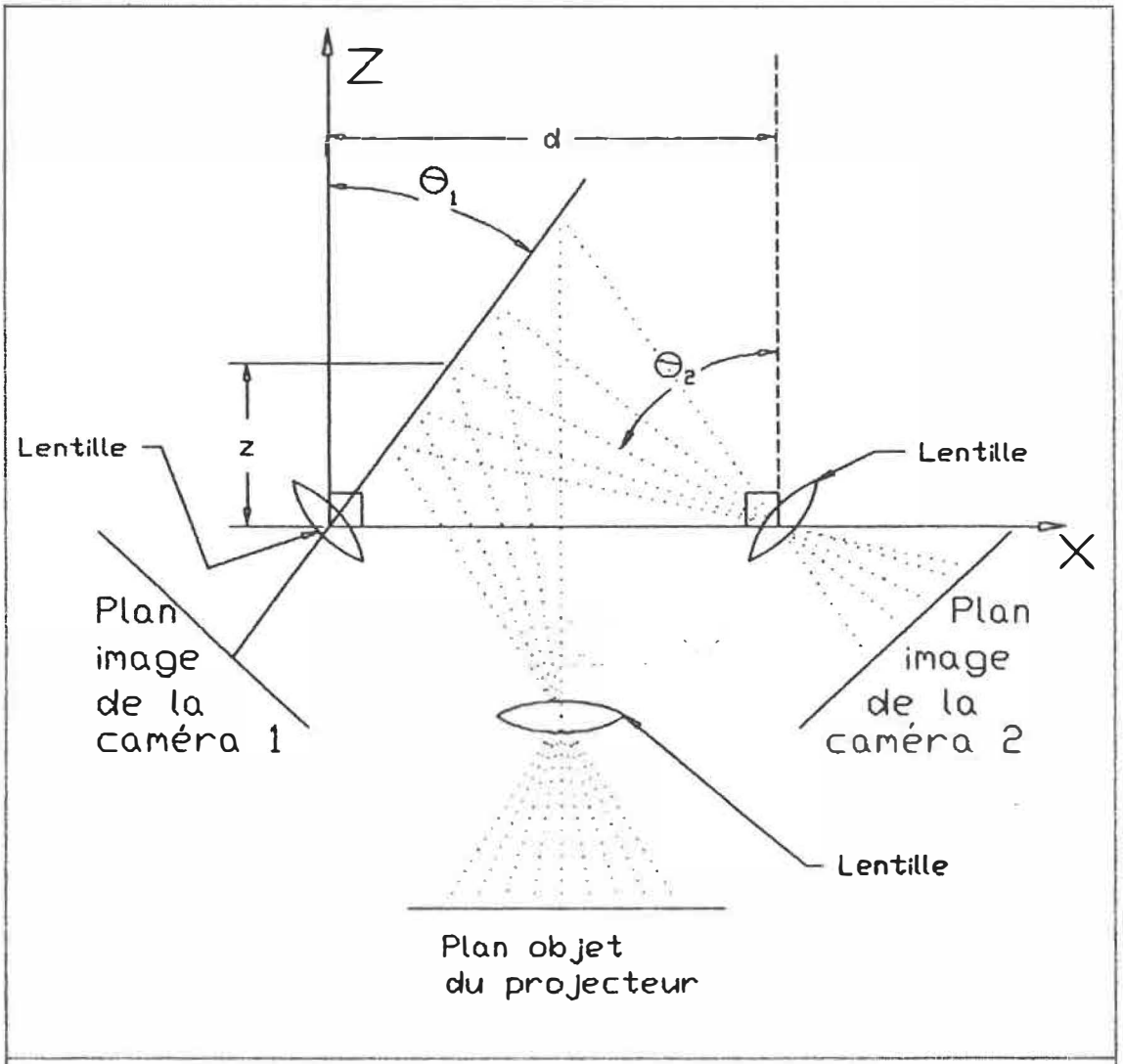

Figure 2.10: Schéma de rayons lumineux (pointillé) d'un système stéréoscopique actif

Cette méthode consiste à prendre deux ou plusieurs images de caméras séparées d'une distance connue. Un

projecteur est utilisé pour projeter sur la surface de l'objet des motifs. Il faut alors identifier chaque motif, dans plus d'un plan de projection[54].

La figure 2.10 montre un exemple avec deux caméras. De cette figure, nous avons:

$$z = \frac{d}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2} \tag{2.19}$$

Les éléments essentiels de cette méthode sont:

1- la méthode exige qu'on établisse la correspondance des motifs projetés sur la surface de l'objet et ce, selon plusieurs plans de projection;

2- la surface de l'objet doit avoir une teinte uniforme.

2.9 Conclusion

Le présent chapitre a présenté plusieurs méthodes permettant la numérisation tridimensionnelle d'objets et il a donné des éléments essentiels de chaque méthode.

Le lecteur aura remarqué la constante réutilisation de la même formule donnant z, soit:

$$z = \frac{d}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2} \tag{2.20}$$

En effet, toutes les formules basées sur la géométrie et donnant le degré d'élévation se ramènent à celle-ci.

Le chapitre suivant présente la méthode utilisée, qui constitue un autre exemple de la catégorie discutée à la section 2.5 et, bien entendu, encore une fois nous pouvons utiliser l'équation 2.20.

CHAPITRE 3

3.1 Description de la méthode utilisée

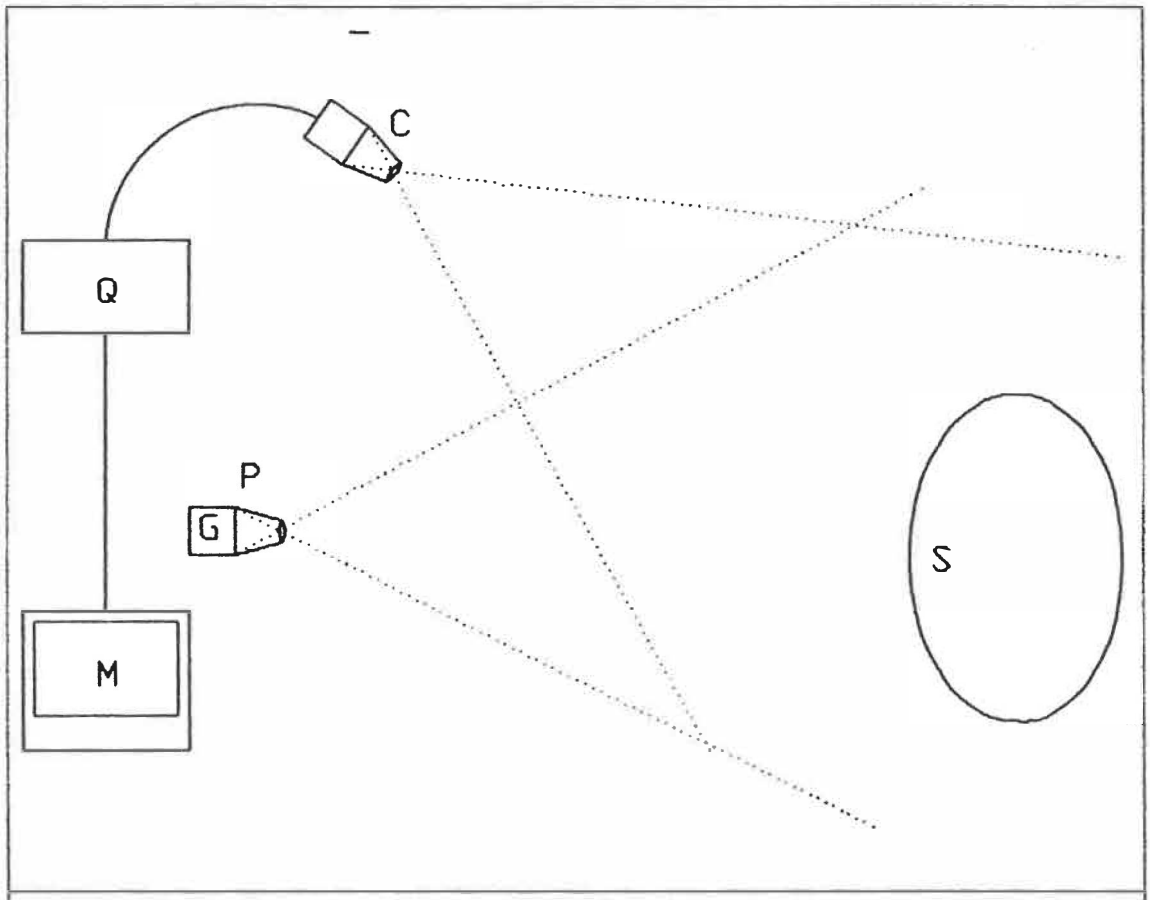

figure 3.1: Schéma du montage: "S", la surface de l'objet; "G", la grille; "P", le projecteur; "C", la caméra; "Q", l'ordinateur; "M", l'écran de visualisation.

La figure 3.1 illustre le montage de base dont le coeur du système est une grille de Ronchi[55]. Cette

grille, dont un schéma est à la figure 3.2, est formée, de bandes opaques telles que la largeur de chaque bande est égale à l'espace entre elles. La grille est placée à l'intérieur du projecteur étiqueté "P" sur la figure 3.1.

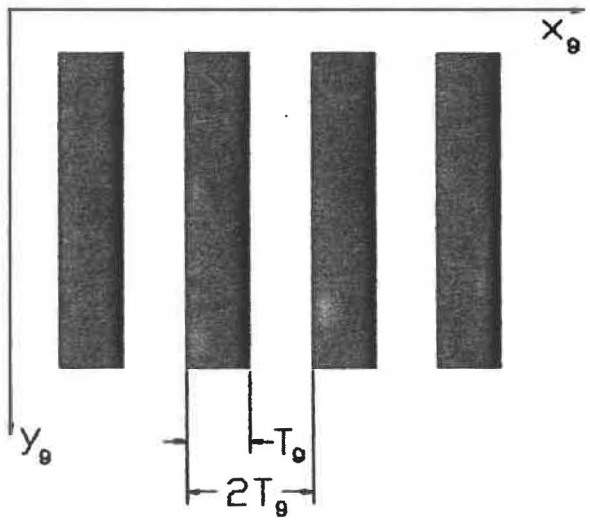

figure 3.2: Schéma d'une grille de Ronchi

En se référent aux étiquettes de la figure 3.1, voici une description du procédé: l'image de la grille "G" est projetée, par le projecteur "P", sur la surface de l'objet "S". Une caméra "C" observe l'image de la grille "G" déformée par la surface de l'objet "S". L'image captée par la caméra "C" est numérisée par un système de vision dont

l'information est accessible à l'ordinateur "Q". Un programme calcule ensuite la forme tridimensionnelle de la surface de l'objet analysé.

3.2 Démonstration géométrique de la méthode

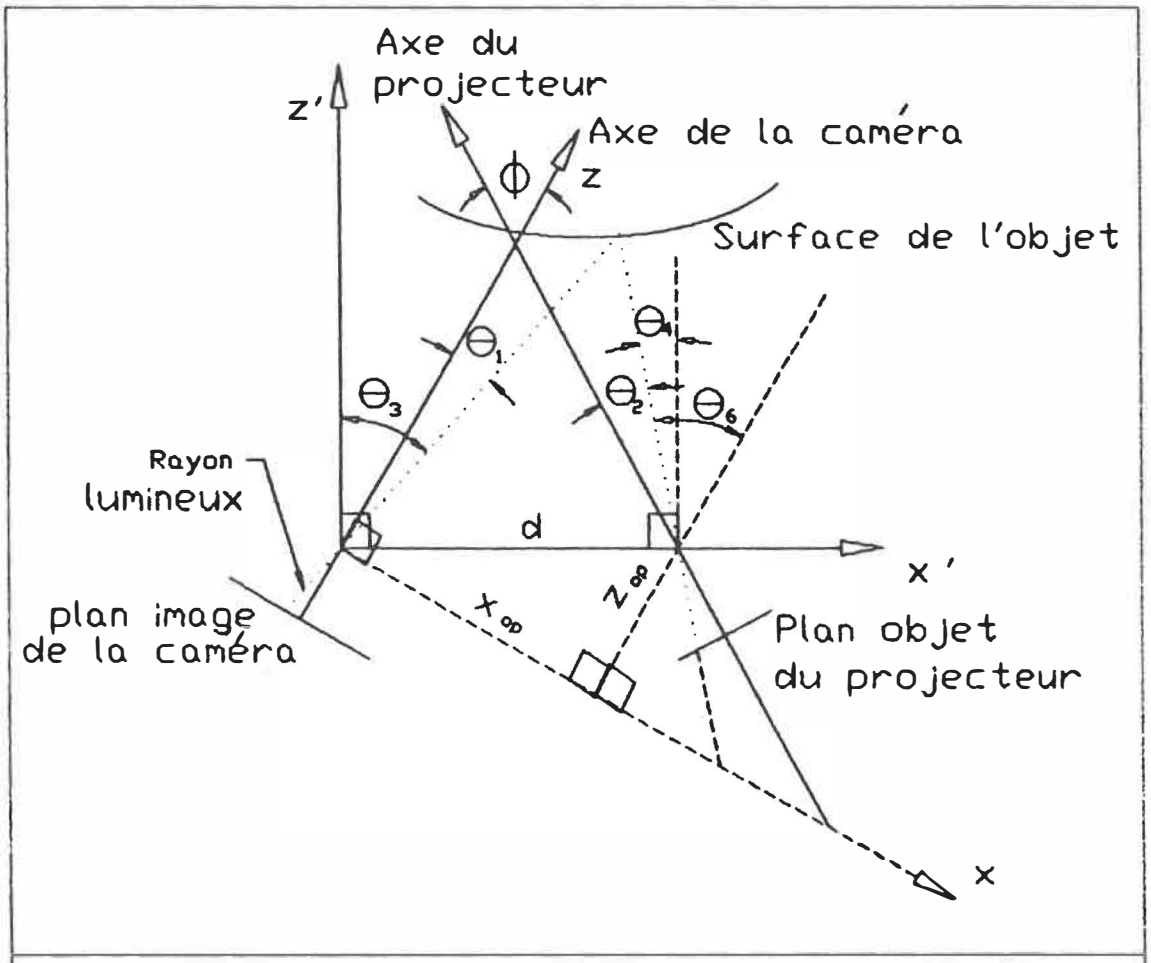

figure 3.3: Schéma géométrique simplifié montrant le trajet, d'un rayon lumineux projeté après réflexion sur la surface de l'objet, dans le plan image de la caméra.

La figure 3.3 montre un schéma du montage décrivant cette méthode. Le degré d'élévation peut encore être donné par l'équation 2.20, soit:

$$z' = \frac{d}{\tan\theta_3 + \tan\theta_4} \tag{3.1}$$

Toutefois, nous considérons que le choix de l'axe z' n'est pas pratique, car il ne correspond à aucun élément optique du montage. Nous préférons utiliser la direction de l'axe optique de la caméra, z sur la figure 3.3, car l'orientation de cet axe est sans ambiguïté dans un montage expérimental.

En effet, l'axe optique d'un système est une droite de l'espace confondue avec l'axe de symétrie de révolution de l'ensemble des rayons lumineux. Cet axe est tel qu'un rayon suivant sa trajectoire n'est pas affecté par le système optique. La droite, qui passe par le centre des lentilles du système (caméra ou projecteur) et qui est perpendiculaire à leurs faces, définit donc l'axe optique de ce système (caméra ou projecteur)[58].

Ce choix de référentiel nous permet d'obtenir un axe de référence fixe, indépendant des caractéristiques géométriques du montage, et permet de généraliser le montage à une géométrie tridimensionnelle.

De la figure 3.3, il est relativement facile d'obtenir:

$$z = \frac{x_{op} + z_{op} \tan\theta_6}{\tan\theta_1 + \tan\theta_6} \tag{3.2}$$

où $\theta_6 = \phi - \theta_2$

x_{op} et z_{op} sont les coordonnées de position de la lentille du projecteur dans le référentiel fixé à la lentille de la caméra.

3.3 Description de l'image captée par la caméra

L'image captée par la caméra est formée par les rayons lumineux réfléchis par la surface de l'objet qui agit alors comme un écran.

La surface de l'objet déforme l'image projetée de la grille. Cette déformation de l'image de la grille est en relation directe avec la forme de la surface de l'objet. En effet, une modification de la profondeur de la surface de l'objet déplace l'image des bandes de la grille vers la gauche ou la droite, dans le plan image de la caméra (voir

figures 3.3 et 3.7). Ce déplacement des bandes de la grille est tel que l'image captée par la caméra contient des informations sur la forme tridimensionnelle de l'objet.

L'image captée a toutefois une intensité qui n'est pas constante sur la surface de l'objet, et ceci même en l'absence de la grille (voir annexe A). En effet, les dimensions réduites de la source et de la caméra, ainsi que la forme tridimensionnelle de l'objet, ont pour conséquence une variation spatiale de l'intensité lumineuse captée par la caméra.

L'image est formée par la distribution de l'intensité lumineuse <u>réfléchie</u> par la surface de l'objet et captée par la caméra. Cette distribution d'intensité lumineuse est donc aussi fonction de la réflexivité de la surface de l'objet.

Les variations de l'intensité lumineuse causées par les effets géométriques et de réflexivité précédents, peuvent être éliminées par une opération numérique sur l'image. L'opération consiste à diviser l'intensité lumineuse captée lorsque la grille est projetée par l'intensité captée en absence de grille. Le résultat de l'opération est l'isolement d'une empreinte tridimensionnelle de la surface de l'objet (voir figure 3.8).

En effet, la distribution de l'intensité captée en absence de la grille est soumise aux mêmes variations de flux lumineux précédemment mentionnées. Cette division des intensités lumineuses rend la présente méthode moins sensible aux variations de fini et de couleur de l'objet analysé.

3.4 Définition de fonctions mathématiques.

Afin de condenser l'exposé, on attribue une notation particulière[57] à des fonctions mathématiques employées dans ce mémoire.

Soit:

- la fonction peigne (figure 3.4)

$$pgn\left(\frac{x}{2T}\right) = 2T \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x-2nT)$$

où $2T$ est la période, x, l'argument, n, un nombre entier et δ, la fonction de Dirac définie par:

$$\delta(x-2nT) = \begin{Bmatrix} 0 & si & (x-2nT) \neq 0 \\ \infty & si & (x-2nT) = 0 \end{Bmatrix} \quad et \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-2nT)dx = 1$$

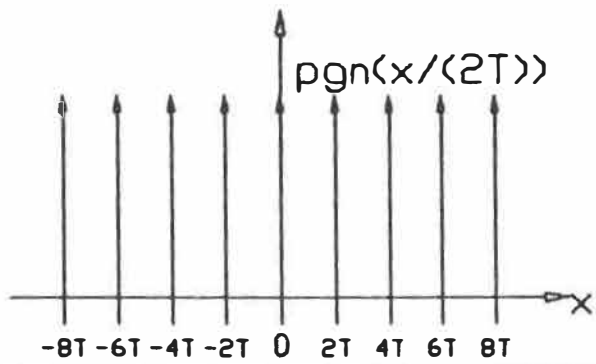

Figure 3.4: Graphe de la fonction "peigne"

- la fonction rectangle (figure 3.5)

$$rect\left(\frac{x}{T}\right)=\left\{\begin{array}{ll} 1 & |x|\leq\frac{T}{2} \\ 0 & ailleurs \end{array}\right\}$$

où T est la largeur et x est la variable.

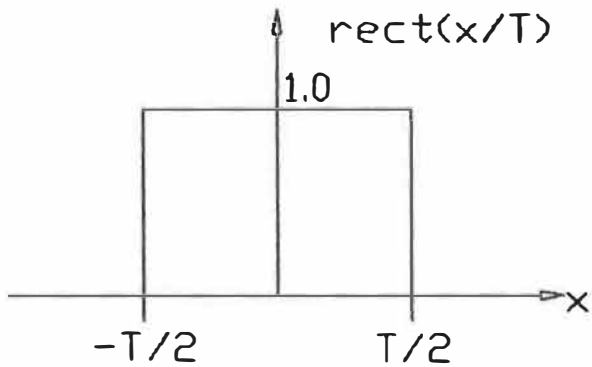

Figure 3.5 : Graphe de la fonction "rectangle"

La transmissibilité lumineuse de la grille de Ronchi s'écrit en terme des fonctions précédentes:

$$Tr(x_g, y_g)=rect\left(\frac{x_g}{T_g}\right)\otimes pgn\left(\frac{x_g}{2T_g}\right) \tag{3.3}$$

où le symbole $\otimes$ indique une convolution, T_g, la largeur d'une bande de la grille (voir figure 3.2), x_g et y_g, les coordonnées de position sur la grille de Ronchi (voir figure 3.2).

Un graphique de cette fonction est montré à la figure 3.6.

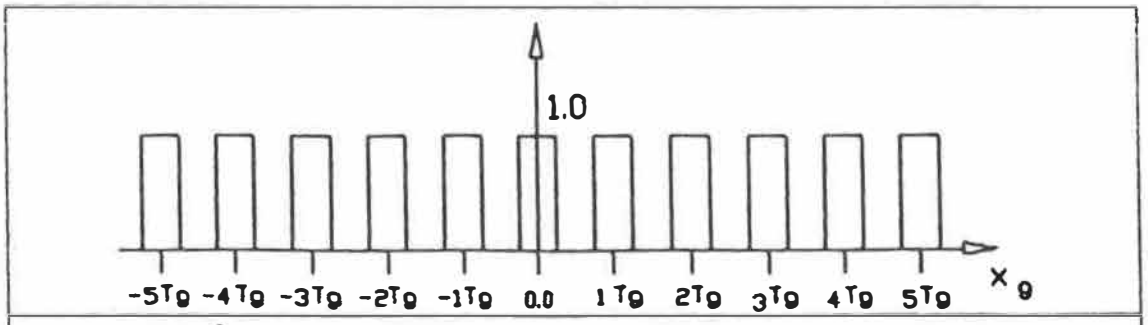

Figure 3.6: Graphe de la fonction

$$rect\left(\frac{x_g}{T_g}\right) \otimes pgn\left(\frac{x_g}{2T_g}\right)$$

3.5 Transformation de l'image captée par la caméra en un hologramme de l'objet.

La figure 3.7 est un schéma de la propagation de rayons lumineux pour la projection de la grille. L'intensité lumineuse captée par la caméra est égale à l'intensité du projecteur, modulée par la transmissibilité de la grille, plus l'intensité lumineuse provenant de toute autre source. Lorsque la grille est projetée, la largeur des bandes telle que vue par la caméra, est localement modifiée, par la forme de l'objet. L'image captée par la caméra est donc décrite par l'équation suivante:

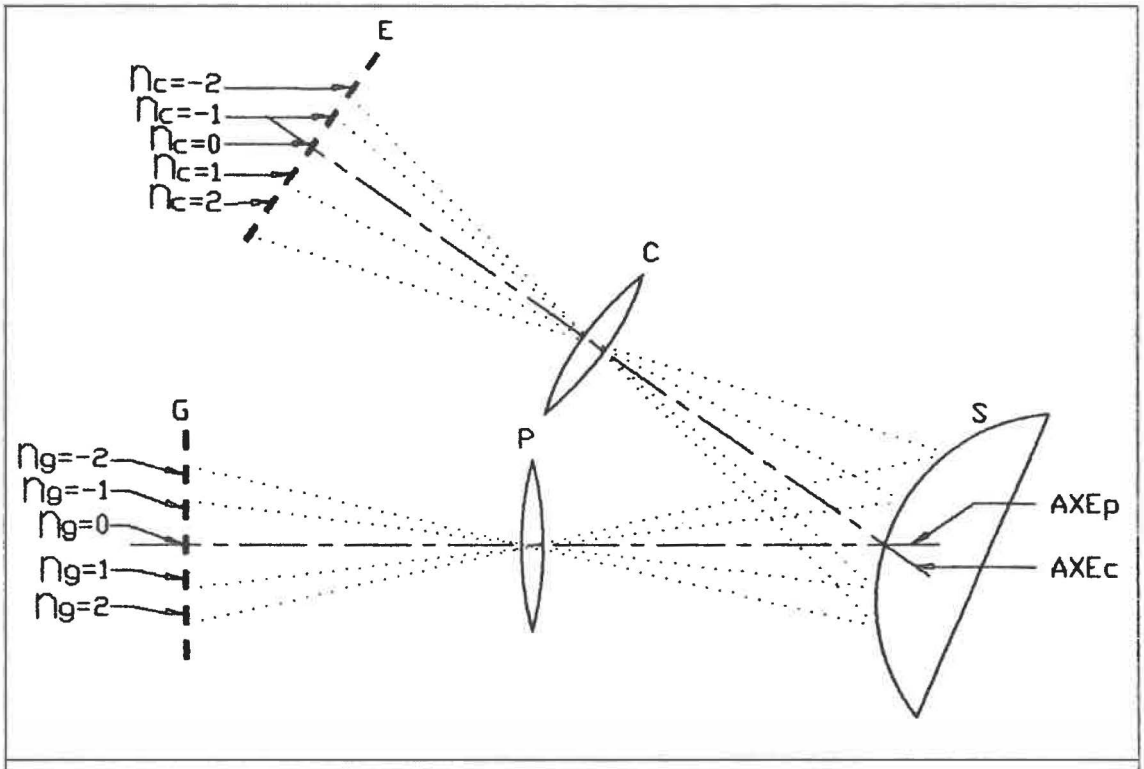

Figure 3.7: Schéma de la propagation de rayons lumineux (pointillé) pour la projection de la grille: "E", le plan image de la caméra; "C", la caméra (i.e. son système optique équivalent); "G", la grille; "P", le projecteur (i.e. son système optique équivalent); "S", la surface de l'objet; "AXEc", l'axe optique du système de la caméra; "AXEp", l'axe optique du système de projection; "n_c", la numérotation de régions sur le plan image de la caméra; "n_g". la numérotation des bandes de la grilles.

$$I(x_c,y_c)=a(x_c,y_c)+b(x_c,y_c)\times\left(rect\left(\frac{x_c}{T(x_c,y_c)}\right)\otimes pgn\left(\frac{x_c}{2T(x_c,y_c)}\right)\right) \tag{3.4}$$

où x_c et y_c sont les coordonnées de position dans le plan image de la caméra;

$T(x_c, y_c)$ est la largeur des bandes déformées de la grille telle que vu par la caméra.

Le terme $a(x_c, y_c)$ tient compte, de la lumière provenant de sources autres que celle du projecteur ("P" sur la figure 3.1). Le terme $b(x_c, y_c)$ tient compte de la lumière du projecteur réfléchie par la surface de l'objet ("S" sur les figures 3.1 et 3.7) et captée par la caméra.

Si l'expérience est réalisée dans des conditions telles que $a(x_c, y_c) \approx 0$, c'est à dire lorsque le projecteur est la seule source de lumière et qu'il n'y a pas de réflexion secondaire, l'équation de l'intensité lumineuse captée par la caméra devient:

$$I(x_c, y_c) \approx b(x_c, y_c) \times \left(rect\left(\frac{x_c}{T(x_c, y_c)} \right) \otimes pgn\left(\frac{x_c}{2T(x_c, y_c)} \right) \right) \tag{3.5}$$

En l'absence de grille ("G" sur les figure 3.1 et 3.7), l'intensité lumineuse captée est décrite par;

$$I'(x_c, y_c) = a(x_c, y_c) + b(x_c, y_c) \tag{3.6}$$

Dans le cas présent, les conditions expérimentales sont telles que $a(x_c,y_c) \ll b(x_c,y_c)$. Nous avons:

$$I'(x_c,y_c) \approx b(x_c,y_c) \tag{3.7}$$

Ainsi, en divisant l'intensité des deux images, il en résulte l'équation*:

$$H(x_c,y_c) \approx \frac{I(x_c,y_c)}{I'(x_c,y_c)}$$
$$= rect\left(\frac{x_c}{T(x_c,y_c)}\right) \otimes pgn\left(\frac{x_c}{2T(x_c,y_c)}\right) \tag{3.8}$$

Cette équation est nommée hologramme[58], car elle ne contient que l'information nécessaire à la restitution en relief de l'objet et que cette information module un signal périodique. Dans le cas présent, il s'agit de la modulation d'impulsions et la fonction périodique est de la forme:

---

*En divisant, on prend en compte que les points tels que $b(x_c,y_c)=0$ sont éliminés. Ces points sont, par ailleurs, sans intérêt, puisqu'ils correspondent à des régions non éclairées par le projecteur.

$$\left\{ rect\left(\frac{x_c}{T_c}\right) \otimes pgn\left(\frac{x_c}{2T_c}\right) \right\}$$

(3.9)

où T_c est la largeur de la bande de la grille telle que vue par la caméra à l'origine du référentiel $(x_c = 0, y_c = 0)$.

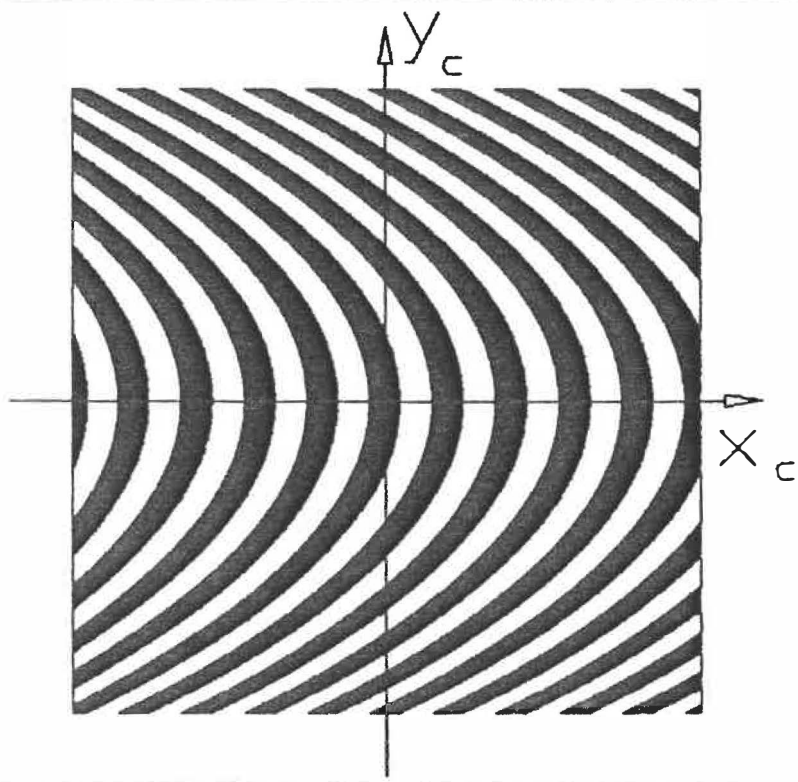

figure 3.8: Dessin théorique d'un hologramme. Dessin de l'équation 3.8, en utilisant l'équation 3.11, avec:

$\theta(x_c, y_c) = \frac{y_c^2 \pi}{250 T_c}$ pour $T_c = 25$, $-250 \leq x_c \leq 250$ et $-250 \leq y_c \leq 250$.

On peut réécrire le terme $T(x_c, y_c)$ de telle sorte à mettre en évidence un angle de phase. Il suffit d'exprimer la modulation de l'équation 3.9, sous la forme:

$$\left\{ rect\left(\frac{x_c}{T_c} + \frac{\theta(x_c, y_c)}{\pi} \right) \otimes pgn\left(\frac{x_c}{2T_c} + \frac{\theta(x_c, y_c)}{2\pi} \right) \right\} \tag{.10}$$

où le terme de phase $\theta(x_c, y_c)$ tient compte du décalage latéral des bandes et contient donc l'information sur le relief de l'objet.

En posant l'égalité entre les équations 3.9 et 3.10, on trouve:

$$T(x_c, y_c) = \frac{T_c x_c}{x_c + T_c \frac{\theta(x_c, y_c)}{\pi}} \tag{3.11}$$

La figure 3.8 nous montre une représentation graphique d'un hologramme pour un cas particulier. Sur cette figure, les régions telles que $\{H(x_c, y_c) = 0\}$ sont blanches, alors que les régions telles que $\{H(x_c, y_c) = 1\}$ sont de couleur noire. L'hologramme $H(x_c, y_c)$ n'a que deux valeurs numériques possibles; il forme donc une image binaire, dans laquelle l'information sur la forme de l'objet est enregistrée. L'hologramme de la figure 3.8 est celui d'un cylindre dont la génératrice est parallèle à l'axe des x_c.

3.6 Transformation de l'hologramme en franges de Moiré

L'hologramme $H(x_c, y_c)$ de l'objet peut être transformé pour révéler des franges de Moiré sur l'objet. Nous rappelons ici que les franges de Moiré ne correspondent pas toujours à des régions de même degré d'élévation. Les franges obtenues sont nommées franges de Moiré car elles coïncident avec les régions obtenues par les techniques standard de Moiré, vues au chapitre 2. La transformation est réalisée en prenant le complément à la valeur 1 de l'hologramme $H(x_c, y_c)$ aux points correspondants aux bandes d'une grille que l'on utiliserait, dans le cas de Moiré, par projection (voir section 2.5). Les coordonnées (x_c, y_c), sur lesquelles on doit faire la transformation, sont calculées; c'est donc dire que cette grille virtuelle, peut avoir l'orientation et la forme que l'on désire.

$H(x_c,y_c)$	$Tr(x_c,y_c)$	$A(x_c,y_c)$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Tableau 3.1: Table de transformation de l'hologramme en franges de Moiré.

Soit $Tr(x_c,y_c)$, la transmissibilité de la grille virtuelle que l'on veut utiliser. Le tableau 3.1 donne la table de transformation pour obtenir $A(x_c,y_c)$, le patron des franges de Moiré.

La transformation de l'hologramme est alors exprimée par:

$$A(x_c,y_c)=\left\{\begin{matrix} H(x_c,y_c) & si \quad Tr(x_c,y_c)=0 \\ 1-H(x_c,y_c) & si \quad Tr(x_c,y_c)=1 \end{matrix}\right\} \tag{3.12}$$

où $A(x_c,y_c)$ est la valeur numérique, après transformation, au point de coordonnées (x_c,y_c).

Puisque la valeur numérique de $H(x_c, y_c)$, ainsi que celle de $Tr(x_c, y_c)$, est soit 0, soit 1, l'équation de transformation de l'hologramme peut être écrite:

$$A(x_c, y_c) = [Tr(x_c, y_c) - H(x_c, y_c)]^2 \tag{3.13}$$

Soit le cas particulier d'une grille virtuelle parallèle au plan image de la caméra. Les bandes de cette grille sont alors définies par les points (x_c, y_c) tels que la relation $\left\{rect\left(\frac{x_c}{T_{mc}}\right) \otimes pgn\left(\frac{x_c}{2T_{mc}}\right) = 1\right\}$ est satisfaite. Nous avons donc:

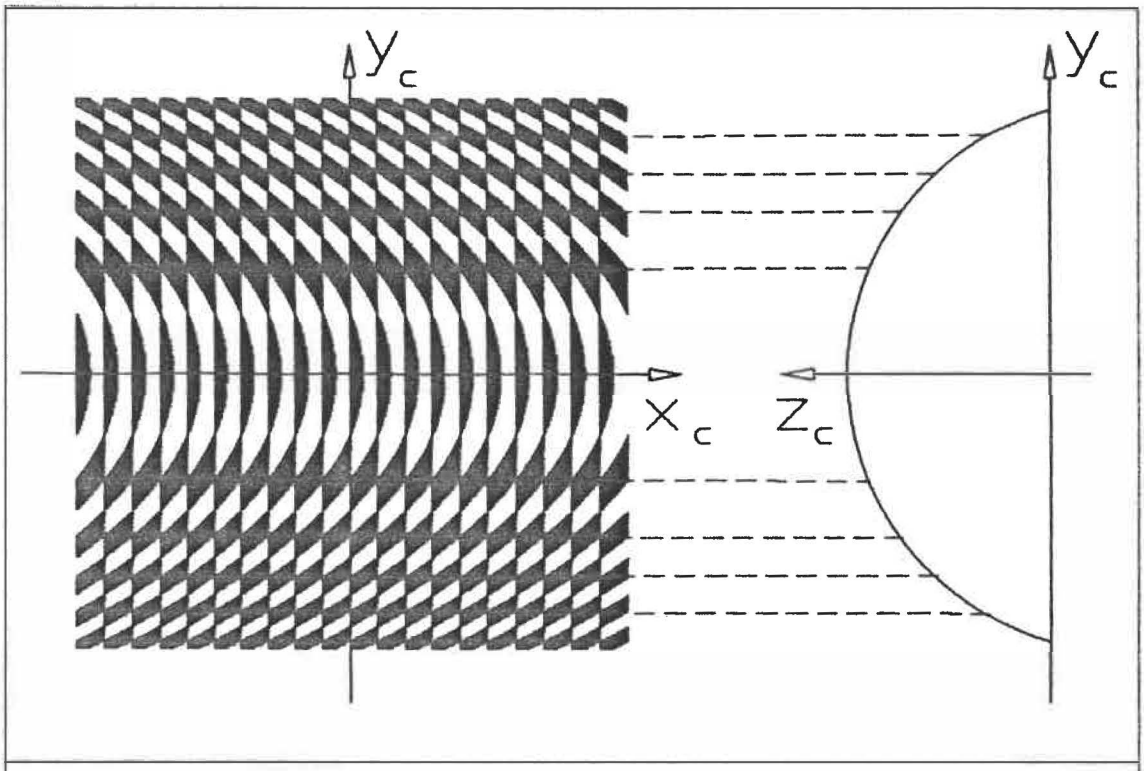

figure 3.9: Dessin théorique des franges de Moiré, obtenu de l'hologramme de la figure 3.8. Dessin de l'équation:

$$A(x_c, y_c) = \left[rect\left(\frac{x_c}{T_{mc}}\right) \otimes pgn\left(\frac{x_c}{2T_{mc}}\right) - rect\left(\frac{x_c}{T(x_c, y_c)}\right) \otimes pgn\left(\frac{x_c}{2T(x_c, y_c)}\right)\right]^2$$

où $T(x_c, y_c)$ est donné par l'équation 3.11,

avec: $\theta(x_c, y_c) = \frac{y_c^2 \pi}{250 T_c}$ pour $T_{mc} = T_c = 25$, $-250 \le x_c \le 250$ et $-250 \le y_c \le 250$.

$$Tr(x_c, y_c) = rect\left(\frac{x_c}{T_{mc}}\right) \otimes pgn\left(\frac{x_c}{2T_{mc}}\right) \tag{3.14}$$

où T_{mc} est la largeur des bandes de la grille virtuelle.

Le paramètre T_{mc} donne de bons résultats lorsqu'il est égal à la largeur maximale des bandes de l'hologramme telle que vue par la caméra. Le choix de T_{mc} correspond au problème soulevé dans le chapitre 2 (section 2.5) de la compatibilité des grilles pour la méthode de Moiré par projection.

La figure 3.9 montre un exemple graphique de $A(x_c, y_c)$, pour le cas particulier de l'hologramme de la figure 3.8, transformé avec une grille virtuelle perpendiculaire au plan image de la caméra. Nous constatons que les franges obtenues dans ce cas coïncident avec des zones de même degré d'élévation pour un cylindre. Cette technique donne donc la possibilité de transformer rapidement un hologramme en des zones de même degré d'élévation.

3.7 Formulation de l'équation du degré d'élévation

Bien que la figure précédente nous montre des franges de Moiré qui correspondent à des zones de même degré d'élévation, ce résultat est plus qualitatif que quantitatif, car il n'informe pas sur le degré d'élévation associé à chaque frange.

Afin de déterminer le degré d'élévation pour tout point de la surface de l'objet, une analyse détaillée du montage est effectuée.

Comme déjà mentionné, la méthode nécessite l'utilisation d'un projecteur et d'une caméra. Nous définissons un système de référence (x_c, y_c), dans le plan image de la caméra, et un système de référence (x_p, y_p), dans le plan objet du projecteur (voir figure 3.13). Ces référentiels sont choisis de sorte à correspondre aux axes principaux des systèmes concernés.

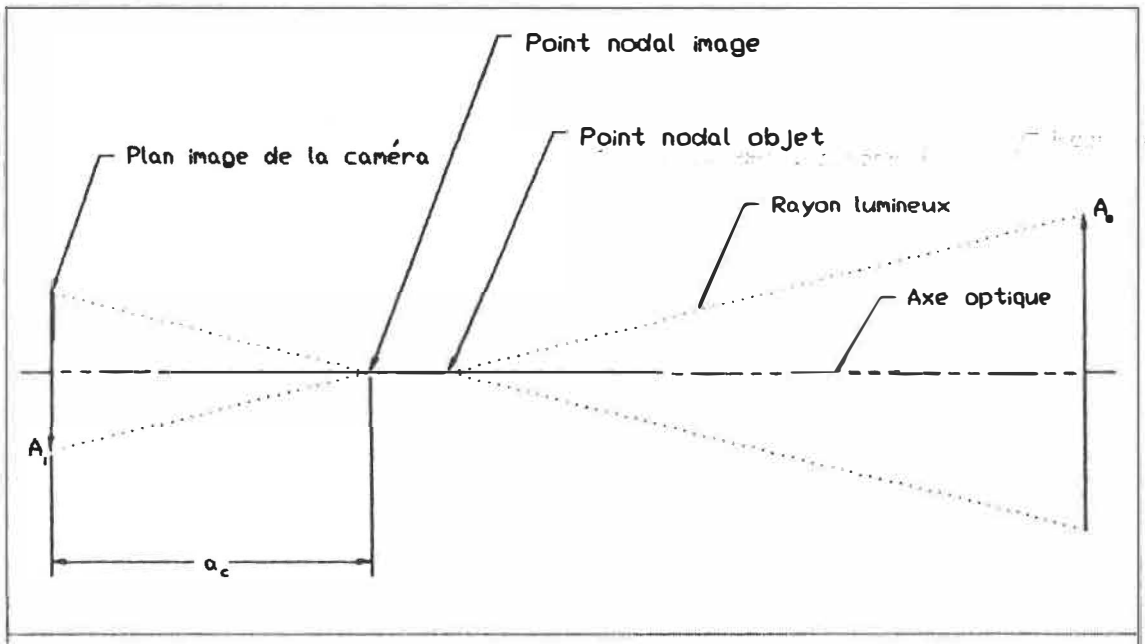

Figure 3.10: Définition des points nodaux d'une caméra

Il s'agit maintenant de décrire, mathématiquement, la transformation que subit la grille du projecteur lorsque observée dans le référentiel de la caméra.

Nous utilisons ici l'approximation de l'optique géométrique, étant donné que les dimensions de l'objet et du système optique sont nettement supérieures à la longueur d'onde. Cette approximation néglige les phénomènes de diffraction et d'interférence[59].

Le rôle de la caméra est de donner des répliques, appelées images, les plus fidèles possible des objets. Aussi celle-ci fait-elle converger les rayons issus d'un point objet A_o, vers un point image A_i.

Les points nodaux* de la caméra sont des points sur l'axe optique AXEc tels que tout rayon incident passant par le point nodal objet L_0 émerge par le point nodal image N_i, parallèlement à sa direction incidente (voir figures 3.10 et 3.11)[58].

Tous les rayons formant une image ne passent pas par le point nodal objet, mais pour tout point d'une image nette, on peut dessiner un rayon provenant du point nodal objet.

---

*Les points nodaux, sont quelquefois appelés points principaux, lorsqu'ils sont situés, dans les plans principaux. Rappelons que les plans principaux, sont les plans, où la réfraction semble prendre effet.

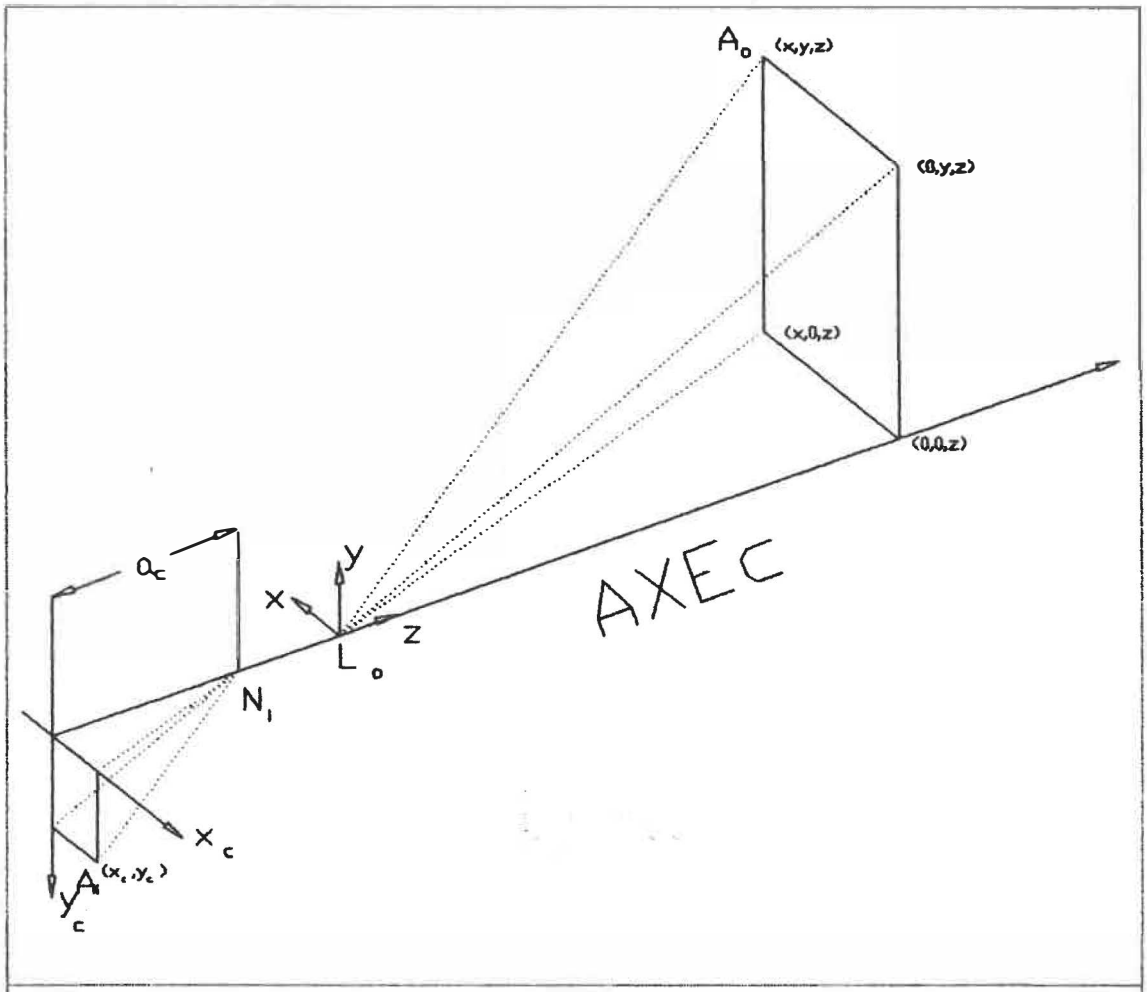

Figure 3.11: Formation d'une image à partir de rayons passant par les points nodaux de la caméra

C'est pourquoi il est possible de décrire complètement l'objet en ne considérant que les rayons passant par le point nodal objet de la caméra.

Tel que montré à la figure 3.11, si les distances dans l'espace objet sont mesurées à partir du point nodal L_0, nous obtenons des relations linéaires pour les couples de

points $A_0 A_i$. Afin de simplifier les manipulations algébriques, l'origine du système de coordonnées (x,y,z) est donc située au point nodal L_0 du système optique de la caméra, alors que l'axe des z coïncide avec l'axe optique de la caméra AXEc (voir figure 3.11).

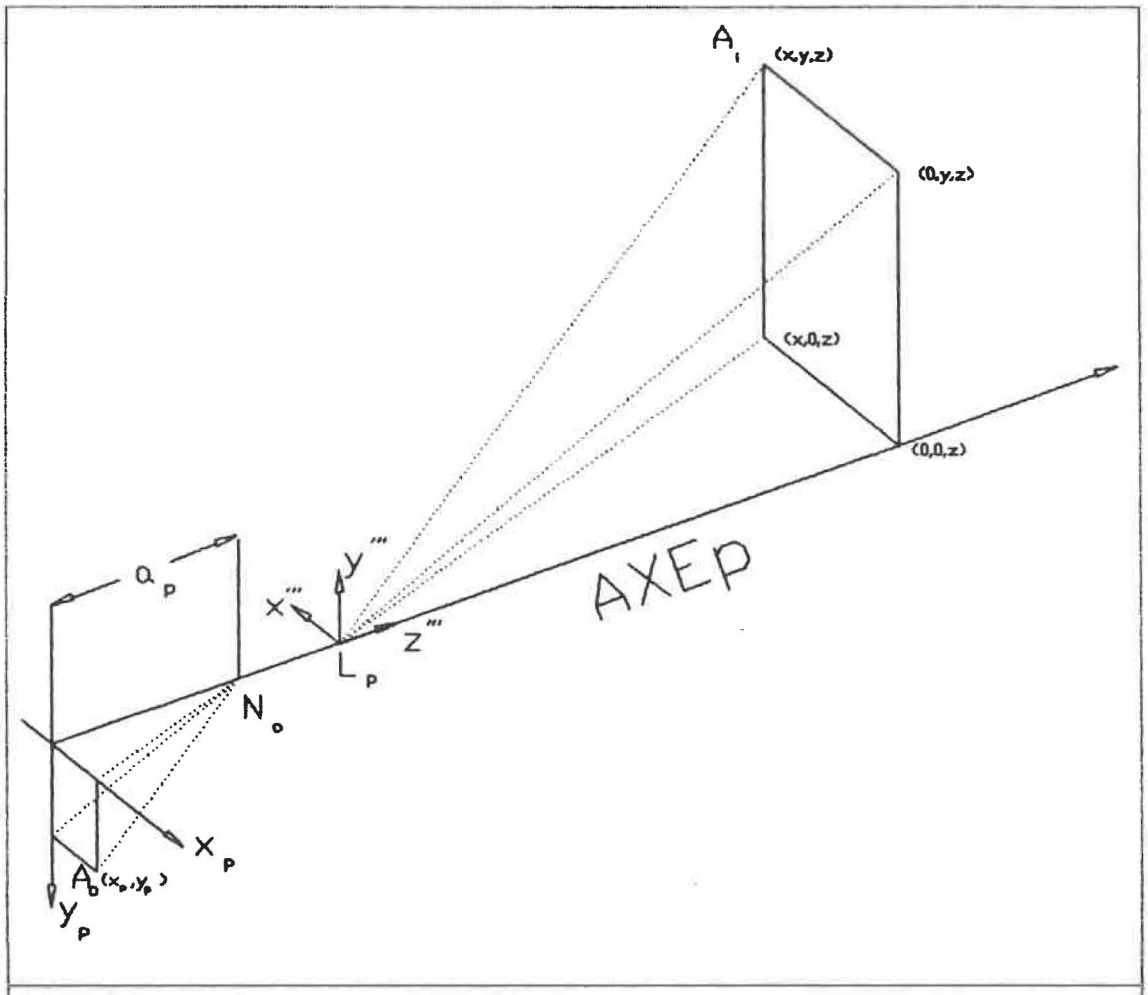

Figure 3.12: Formation d'une image à partir de rayons passant par les points nodaux du projecteur

Les relations entre les coordonnées (x_c, y_c) d'un point image Ai et les coordonnées (x, y, z) du point objet Ao s'obtiennent de la figure 3.11:

$$x = \frac{z}{a_c} x_c \tag{3.15}$$

$$y = \frac{z}{a_c} y_c \tag{3.16}$$

où a_c est la distance entre le point nodal image N_i et le plan image;

x_c et y_c, sont les coordonnées du point Ai, dans le référentiel du plan image;

z est la distance, sur l'axe AXEc, entre le point nodal objet L_o et le point Ao.

Le projecteur a le rôle de reproduire, le plus fidèlement possible, l'image de sa pellicule. Aussi celui-ci fait-il converger des rayons issus d'un point objet Ao de sa pellicule, vers un point image Ai sur un écran.

Les points nodaux du projecteur sont des points sur l'axe optique AXEp tels que tout rayon incident passant par le point nodal objet N_o émerge par le point nodal image L_p,

parallèlement à sa direction incidente. La figure 3.12 montre qu'en mesurant la position des bandes de la grille dans le plan objet du projecteur, nous obtenons des relations pour les couples de points $A_o A_i$. Pour simplifier les manipulations algébriques, l'origine du système de coordonnées (x''',y''',z''') est située au point nodal L_p du système optique du projecteur et l'axe optique du système du projecteur AXEp coïncide avec l'axe des z'''(voir figure 3.12).

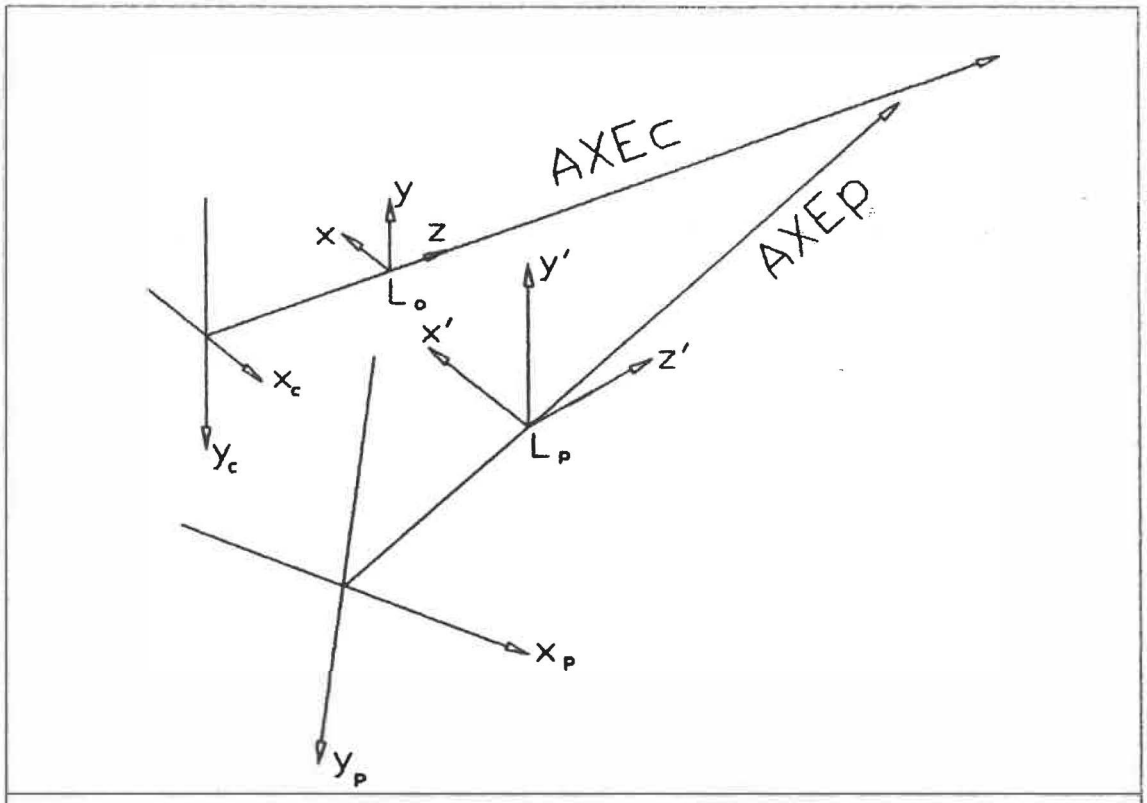

Figure 3.13:Relation entre le référentiel (x',y',z') et les repères optiques du système de projection.

Nous considérons un autre système de coordonnées (x',y',z'), avec des axes parallèles au système (x,y,z), mais dont l'origine est au point nodal L_p(voir figure 3.13).

On fait pivoter d'un angle ϕ autour de l'axe y', ce système, de sorte à donner un système d'axe (x'',y'',z''), tel que l'axe optique du système de projection AXEp soit dans le plan y''-z''(voir figure 3.14).

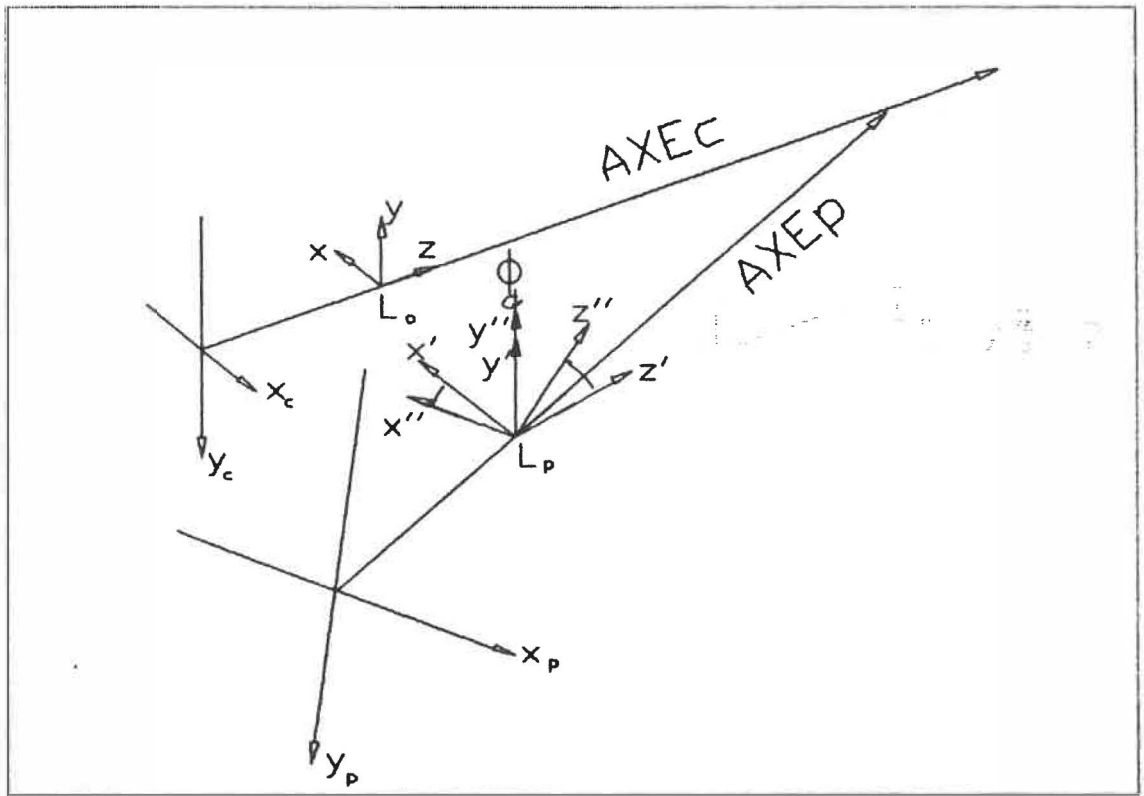

Figure 3.14:Relation entre le référentiel (x'',y'',z'') et le référentiel (x',y',z')

Puis on fait pivoter ce dernier système (x'',y'',z'') autour de l'axe x'', d'un angle θ, de telle sorte que l'axe z''' de ce nouveau système (x''',y''',z''') coïncide avec l'axe optique du système de projection (voir figure 3.15).

La position du point nodal image du système de projection L_p est située aux coordonnées (x_{op}, y_{op}, z_{op}), par rapport au système (x,y,z).

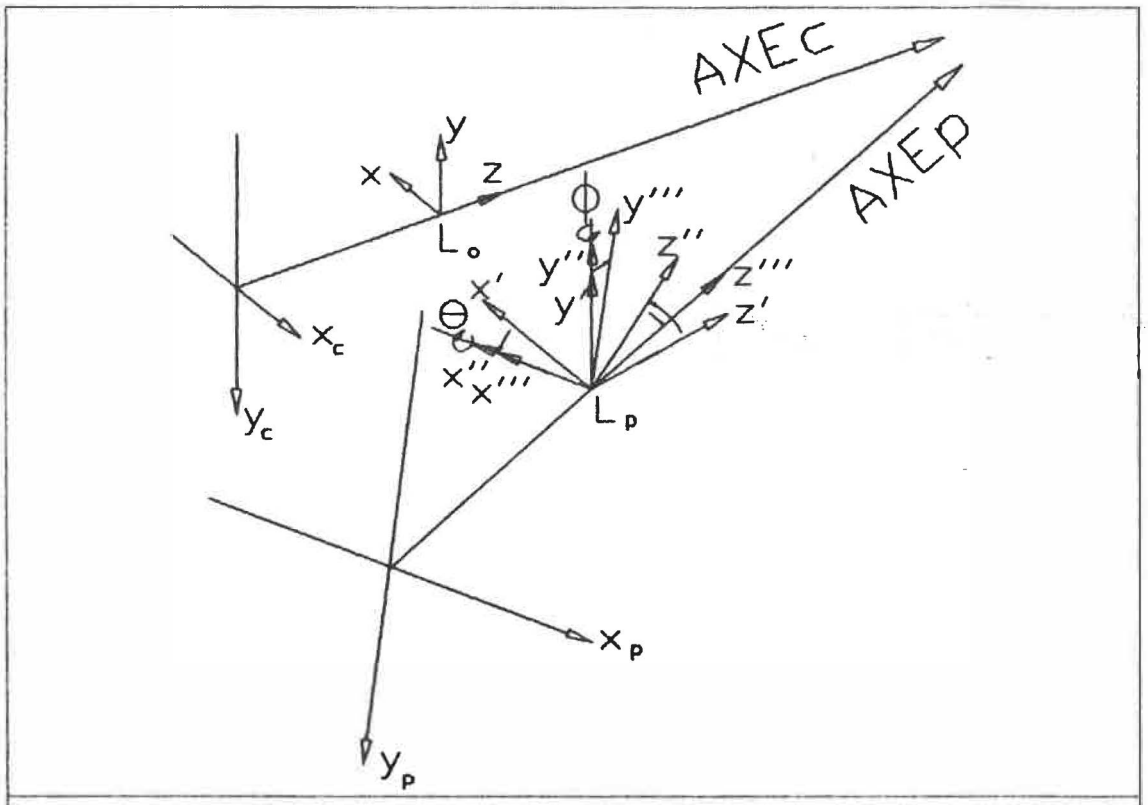

Figure 3.15:Relation entre le référentiel (x''',y''',z''') et le référentiel (x'',y'',z'')

Le point (x,y,z) dans l'espace de l'objet est alors relié au point (x'',y'',z'') dans le système de coordonnées de projection, par la relation suivante:

$$\begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ \sin\theta\sin\phi & \cos\theta & \sin\theta\cos\phi \\ \cos\theta\sin\phi & -\sin\theta & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_{op} \\ y - y_{op} \\ z - z_{op} \end{bmatrix}$$

(3.17)

La grille de Ronchi n'est pas nécessairement allignée avec le repère (x_p,y_p)(voir figure 3.16). La relation entre le point (x_g,y_g) sur la grille et le point (x_p,y_p) dans le plan objet du projecteur est:

$$x_p = x_g\cos(\beta) - y_g\sin(\beta)$$

(3.18)

$$y_p = x_g\sin(\beta) + y_g\cos(\beta)$$

(3.19)

La relation entre le point (x_g,y_g), dans le plan de la grille, et le point (x''',y''',z'''), dans le plan de projection, est (voir la figure 3.12 et les équations 3.18, 3.19):

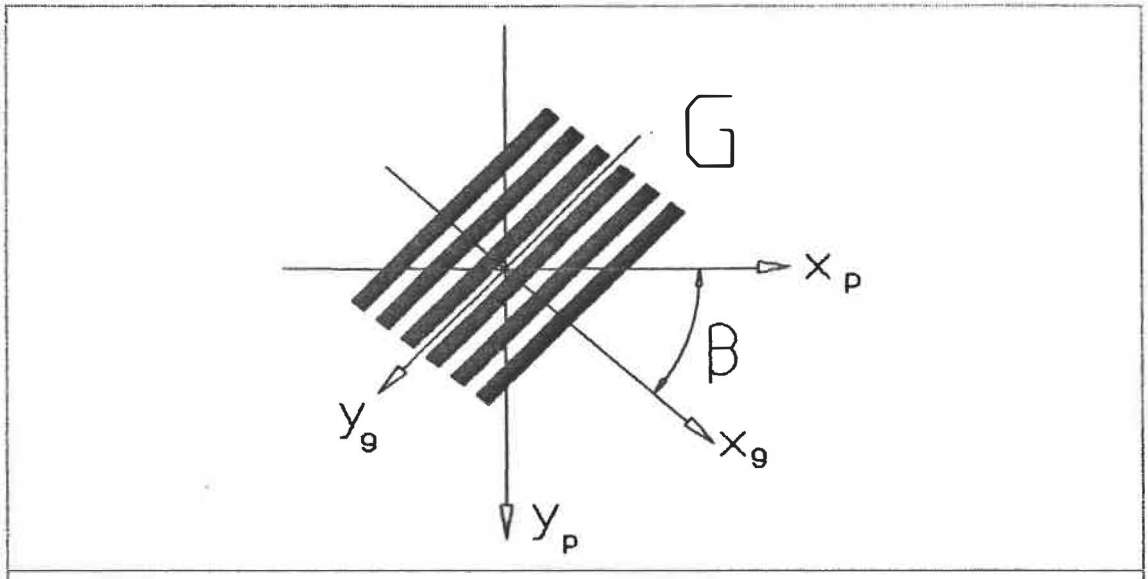

Figure 3.16: Schéma de la relation entre les axes du projecteur (x_p,y_p) et les axes principaux de la grille.

$$x''' = \frac{z'''}{a_p} x_p = \frac{z'''}{a_p}(x_g \cos(\beta) - y_g \sin(\beta)) \tag{3.20}$$

$$y''' = \frac{z'''}{a_p} y_p = \frac{z'''}{a_p}(x_g \sin(\beta) + y_g \cos(\beta)) \tag{3.21}$$

La largeur des bandes de la grilles de projection est T_g et ces bandes opaques sont numérotées par la variable n_g. L'abscisse dans le plan de la grille est alors:

$$x_g = 2T_g(n_g + \delta_g) \tag{3.22}$$

où δ_g tient compte du décalage du centre des bandes, par rapport au centre du référentiel (x_p, y_p), qui, lui, correspond à l'axe optique du projecteur.

Pour exprimer la relation entre les points (x_c, y_c) et (x, y, z) dans l'espace de l'objet, nous avons des équations 3.15, 3.16, 3.17, 3.20, et 3.21 (voir annexe B pour les détails):

$$z = \frac{a_c\{2T_g(n_g+\delta_g)(x_{op}k_1 - y_{op}k_2 + z_{op}k_3) - a_p(x_{op}k_4 + y_{op}k_5 + z_{op}k_6)\}}{2T_g(n_g+\delta_g)(x_c k_1 - y_c k_2 + a_c k_3) - a_p(x_c k_4 + y_c k_5 + a_c k_6)}$$

où

$$\left\{\begin{array}{l} k_1 = \cos\theta\sin\phi \\ k_2 = \sin\theta \\ k_3 = \cos\theta\cos\phi \\ k_4 = \cos\phi\cos\beta + \sin\theta\sin\phi\sin\beta \\ k_5 = \cos\theta\sin\beta \\ k_6 = \sin\theta\cos\phi\sin\beta - \sin\phi\cos\beta \end{array}\right\} \qquad (3.23)$$

L'équation 3.23 permet de calculer la distance a_g entre le point nodal de la caméra L_o et la surface de l'objet (voir figure 3.17). Cette distance est obtenue en substituant les valeurs correspondantes à l'origine du référentiel (x_c, y_c). Nous avons alors: $x_c = 0$ $y_c = 0$ et $n_g = n_{go}$. Le terme n_{go} est le numéro de bande de la grille dont l'image sur l'objet(S sur les figures 3.1 et 3.7)

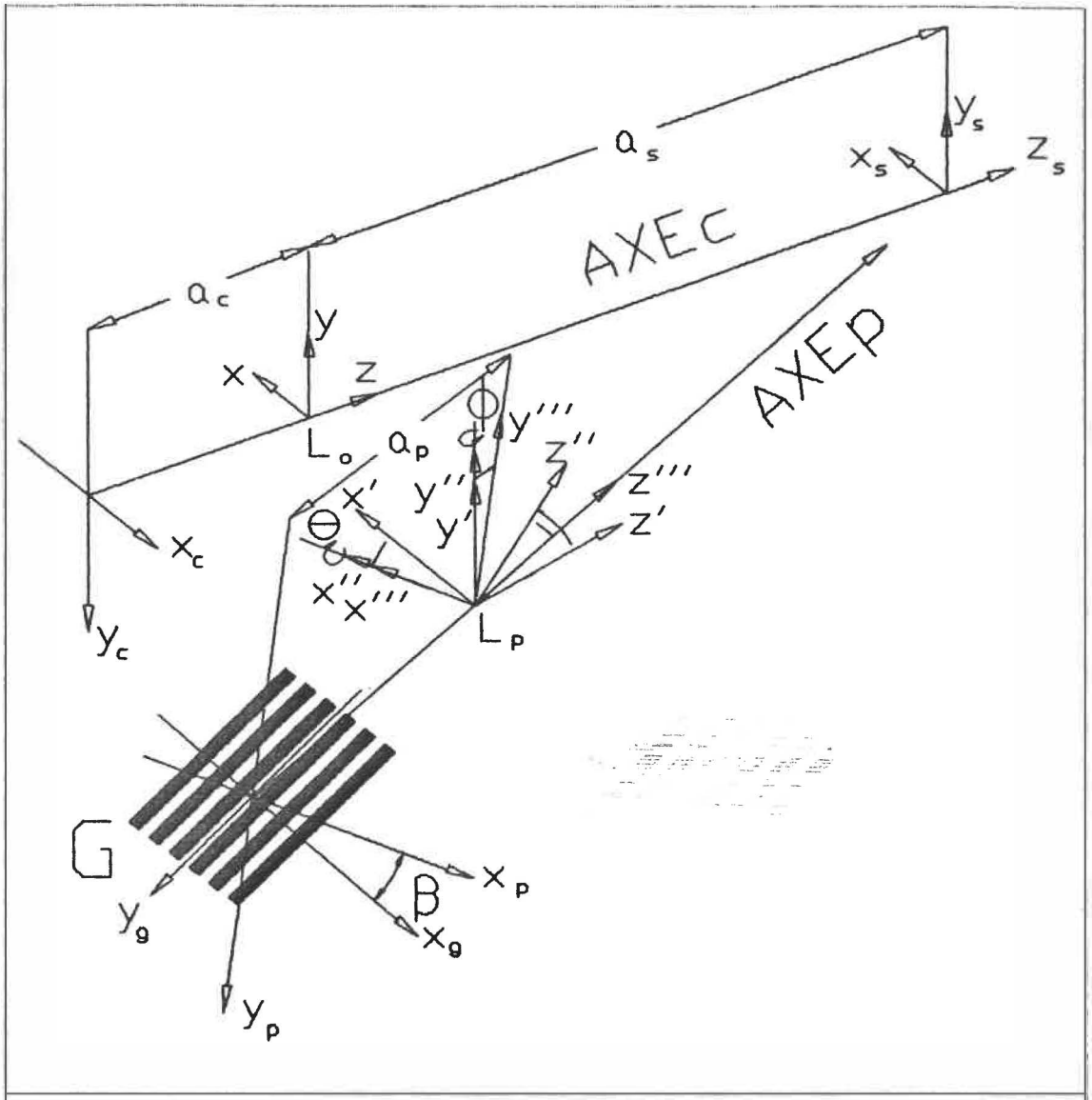

Figure 3.17: Schéma de la géométrie du montage: "G", la grille; "L_o", point nodal du système de la caméra; "L_p", point nodal du système de projection; "AXEc", l'axe optique de la caméra; "AXEp", l'axe optique du projecteur.

intercepte l'axe optique de la caméra. Ce terme a donc une valeur obtenue expérimentalement. Nous obtenons avec l'équation 3.23:

$$a_s = \frac{2T_g(n_{go}+\delta_g)(x_{op}k_1 - y_{op}k_2 + z_{op}k_3) - a_p(x_{op}k_4 + y_{op}k_5 + z_{op}k_6)}{2T_g(n_{go}+\delta_g)k_3 - a_p k_6}$$

(3.24)

Nous avons les coordonnées (x_s, y_s, z_s) qui décrivent la surface de l'objet dans l'espace à partir du référentiel(x_s, y_s, z_s), sur la surface de l'objet:

$$x_s = (z_s + a_s)x_c / a_c$$

(3.25)

$$y_s = (z_s + a_s)y_c / a_c$$

(3.26)

$$z_s = \frac{a_c\{2T_g(n_g+\delta_g)(x_{op}k_1 - y_{op}k_2 + z_{op}k_3) - a_p(x_{op}k_4 + y_{op}k_5 + z_{op}k_6)\}}{2T_g(n_g+\delta_g)(x_c k_1 - y_c k_2 + a_c k_3) - a_p(x_c k_4 + y_c k_5 + a_c k_6)} - a_s$$

(3.27)

Tel que montré sur la figure 3.7, les bandes noires de la grille sont identifiées par des nombres entiers de n_g. L'utilisation d'une grille de Ronchi nous permet de numéroter les bandes blanches de cette grille avec des

valeurs de n_g demie-entières. Ceci nous permet de calculer, avec les équations précédentes, les coordonnées sur la surface de l'objet, pour tous les points du plan (x_c, y_c).

La transformation de l'hologramme en une représentation tridimensionnelle consiste simplement à numéroter chaque bande de l'hologramme, puis à calculer pour les pixels de chaque bande la coordonnée z avec l'équation 3.27.

3.8 Le degré d'élévation associé aux franges de Moiré

Tel que montré sur la figure 3.7, les bandes opaques de la grille de projection sont numérotées par la variable n_g, alors que les régions telles que $\{Tr(x_c, y_c) = 1\}$ sont numérotées par n_c. La valeur de n_c et n_g est, tel que montré sur la figure 3.7, zéro près de l'axe optique du système considéré. La variable δ_g tient compte du décalage du centre de la grille, par rapport à l'axe optique du projecteur.

Supposons que la $n_g^{ième}$ bande de la grille "G" est projetée sur un point (x, y, z) de l'objet et que ce point forme une image dans le plan (x_c, y_c), sur la $n_c^{ième}$ région de transformation, nous obtenons alors: $n = n_c - n_g$, la $n^{ième}$ frange de Moiré[60][61].

Afin de formuler le degré d'élévation en fonction de l'ordre des franges de Moiré, on exprime n_g en terme de n_c et n, soit:

$$n_g = n_c - n \tag{3.28}$$

En substituant l'expression pour n_g dans l'équation 3.27 donnant la coordonnée z_s de l'objet, nous obtenons les coordonnées (x_n, y_n, z_n), qui décrivent la frange d'ordre n dans l'espace à partir du référentiel (x_s, y_s, z_s) (voir figure 3.17).

La valeur de z_n donnée par l'équation 3.27 n'est pas toujours constante pour une valeur de n fixe. Ceci provient du fait que l'équation 3.27 donne le degré d'élévation sur un axe confondu avec l'axe optique de la caméra. Il faut choisir ingénieusement l'orientation de la grille virtuelle pour obtenir des zones de même degré d'élévation correspondant à $z_s = constant$.

L'annexe B donne une formule donnant la largeur de la bande d'hologramme à l'origine du référentiel (x_c, y_c). Cette équation est très utile lorsqu'on calcule la forme de la grille virtuelle. Nous avons de l'annexe B:

$$T_c = \frac{a_c}{a_s}\left(\frac{T_g k_9[-x_{op}k_1 + y_{op}k_2 + (a_s - z_{op})k_3] + a_p[x_{op}k_7 + (a_s - z_{op})k_8]}{a_p k_7 - T_g k_1 k_9}\right)$$

(3.29)

3.9 Comparaison avec les méthodes du chapitre 2.

La méthode développée ici est une généralisation de la méthode décrite à la section 2.7, dans laquelle un plan laser est utilisé pour balayer la surface de l'objet. Dans le cas présent, on obtient l'équivalent de plusieurs plans de lumière sur une seule image.

Selon la classification du chapitre 2, la méthode décrite dans ce chapitre est une méthode active, indirecte, utilisant une image selon un plan de projection fixe. Elle est donc comparable aux méthodes décrites à la section 2.5. La possibilité de retrouver les franges de Moiré à partir de l'hologramme démontre bien cette similitude.

Cette méthode, comme celles utilisant le Moiré, est utile pour mesurer le degré d'élévation sur une surface qui ne montre pas de discontinuité de profondeur. C'est-à-dire que les pentes des surfaces vues par la caméra doivent être bornées supérieurement.

L'utilisation d'une seconde image de l'objet sans grille projetée permet d'obtenir un hologramme numérique de

la forme de l'objet. Cette image binaire, de la forme de l'objet, est un outil très puissant dans la numérisation tridimensionnelle d'objets.

La présente méthode a comme avantage majeur de faire directement la distinction entre une surface concave et une surface convexe.

3.10 Conclusion.

Ce chapitre a présenté une méthode de numérisation tridimensionnelle d'objets, et il a établi les relations mathématiques nécessaires à son utilisation. Il a aussi exprimé les équations mathématiques, permettant de retrouver les résultats obtenus par les méthodes standards de Moiré.

Il a favorablement comparé cette méthode avec celles exposées à la section 2.5. Ce chapitre a aussi démontré que la connaissance de la relation entre une grille de Ronchi et son image captée par une caméra permet de calculer la forme de l'objet sur lequel est projetée la grille.

Le prochain chapitre discute de l'utilisation expérimentale de cette méthode.

CHAPITRE 4

Ce chapitre discute l'aspect réalisation expérimentale pour la méthode décrite au chapitre 3. Il examine l'effet de la numérisation sur les équations obtenues au chapitre 3. Puis, après avoir fait la description du montage d'essai et de l'instrumentation, il donne une étude de la sensibilité. Il se termine par une description de la procédure expérimentale.

4.1 La fonction de transfert de la caméra

La teinte de gris attribuée à un pixel dépend de la fonction de transfert de la caméra et des paramètres de numérisation. Nous considérons les caméras dont le tube est du type vidicon, car c'est le type de caméra que nous utilisons dans notre montage expérimental.

Les caméras du type vidicon sont caractérisées par une tension électrique de sortie, V, qui varie en fonction de l'intensité captée $I(x_c, y_c)$[62][63] :

$$V \approx K(I_g)I(x_c, y_c)^{\gamma} \tag{4.1}$$

où γ varie entre 0.4 et 0.7:

$K(I_g)$ est fonction de l'intensité globale I_g

La fonction de transfert exacte varie avec le voltage appliqué aux bornes du vidicon. Celui-ci est asservi de façon à favoriser un signal de sortie de grande amplitude. Si l'intensité lumineuse globale diminue, le signal vidéo faiblit, ce qui fait remonter la tension appliquée sur le vidicon et en augmente la sensibilité. Si l'intensité lumineuse globale augmente, c'est l'inverse. Le facteur K de l'équation 4.1 est donc dépendant de l'intensité lumineuse totale I_g.

4.2 Effet de la numérisation en pixels de l'hologramme.

Lorsqu'on numérise l'image captée par une caméra, différentes parties de l'image sont vues par différents pixels. Ainsi, la surface sensible peut être considérée comme formée d'une trame de numérisation. Les éléments de cette trame sont les pixels, et chaque pixel reçoit la lumière d'une section du volume situé devant le système optique.

La numérisation de l'image d'un l'objet a donc pour effet de remplacer la surface continue de l'objet par une mosaïque de petites surfaces. Les dimensions de ces petites surfaces sont critiques, car la seule information connue par l'ordinateur y est constante. Plus particulièrement, il est essentiel que la largeur des bandes de la grille projetée, telles que vues par la caméra $T(x_c, y_c)$, soit plus grande (deux à trois fois) que les dimensions d'un pixel, car il faut que l'on puisse séparer chaque bande de l'hologramme. Cette contrainte impose une limite sur le choix de la largeur des bandes de la grille (de Ronchi) utilisée. La largeur de ces bandes s'obtient facilement de l'annexe B.

$$T_g = \frac{a_p}{k_9}\left(\frac{(a_s T_c - x_{op} a_c)k_7 - a_c(a_s - z_{op})k_8}{(a_s T_c - a_c x_{op})k_1 + y_{op} a_c k_2 + a_c(a_s - z_{op})k_3}\right)$$

(4.1)

Cette contrainte sur la largeur des bandes de la grille n'est toutefois pas la seule qu'on associe à la numérisation des images en pixels. Afin de mettre en évidence les autres effets, nous commençons par considérer ce qui se produit lorsqu'on numérise un hologramme binaire, puis nous examinons le cas plus réaliste de la numérisation des images avant l'obtention de l'hologramme.

4.2.1 Numérisation d'un hologramme binaire

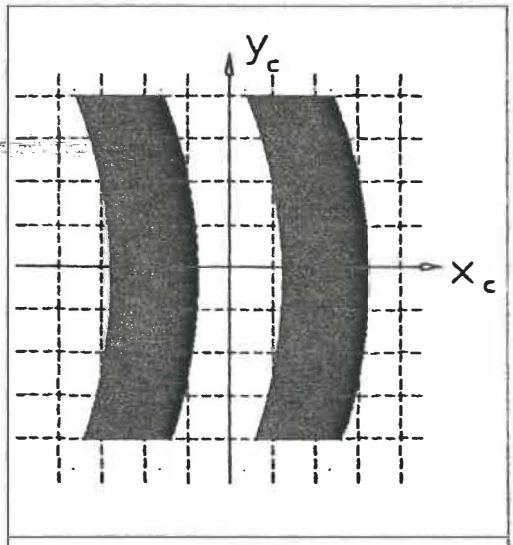

Figure 4.1: Dessin d'un hologramme avant numérisation. Sur ce dessin, des pixels sont représentés en lignes discontinues.

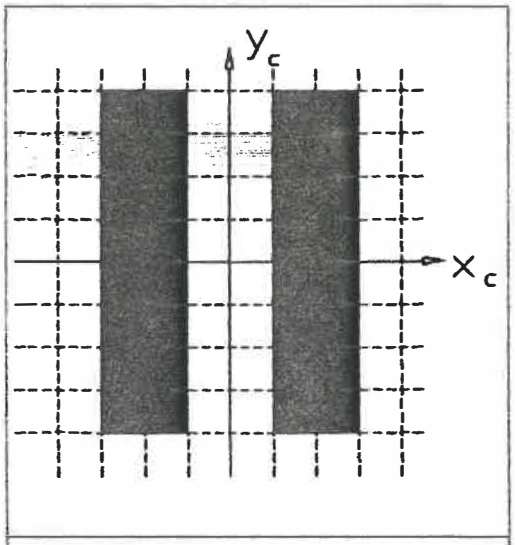

Figure 4.2: Dessin de l'hologramme de la figure 4.1 après numérisation. Sur ce dessin, des pixels sont représentés en lignes discontinues.

La figure 4.1 est une représentation graphique d'une partie d'un hologramme avant numérisation. Les bandes de l'hologramme sont superposées à une représentation graphique de pixels. La valeur numérique associée à chaque pixel après numérisation est influencée par le recouvrement des pixels par les bandes de l'hologramme. Ainsi, le processus de numérisation a pour effet de créer des tons de gris dans l'image de l'hologramme. L'image numérisée de l'hologramme nécessite donc un seuillage. La figure 4.2 est le résultat du seuillage des pixels obtenus après numérisation de la figure 4.1.

L'intensité lumineuse associée à un pixel peut être approximée par la moyenne de l'intensité lumineuse sur la surface du détecteur correspondant au pixel, soit sous forme d'équation:

$$I_{ij} = \frac{1}{uv} \int_{\left(i-\frac{1}{2}\right)u}^{\left(i+\frac{1}{2}\right)u} \left[\int_{\left(j-\frac{1}{2}\right)v}^{\left(j+\frac{1}{2}\right)v} I(x_c, y_c)\, dy_c \right] dx_c \tag{4.2}$$

où $I(x_c, y_c)$ est la distribution d'intensité lumineuse reçue par la caméra;

i est le numéro de ligne du pixel et j, son numéro de colonne;

u la largeur d'un pixel et v, sa hauteur.

Dans la discussion théorique précédente (chapitre 3), nous obtenons l'hologramme avant numérisation (figures 3.8 et 4.1). La numérisation de l'hologramme s'exprime par:

$$H_{ij} = \frac{1}{uv} \int_{\left(i-\frac{1}{2}\right)u}^{\left(i+\frac{1}{2}\right)u} \left[\int_{\left(j-\frac{1}{2}\right)v}^{\left(j+\frac{1}{2}\right)v} H(x_c, y_c) dy_c \right] dx_c \tag{4.3}$$

En substituant l'équation 3.8 pour $H(x_c, y_c)$, il vient:

$$H_{ij} = \frac{1}{uv} \int_{\left(i-\frac{1}{2}\right)u}^{\left(i+\frac{1}{2}\right)u} \left[\int_{\left(j-\frac{1}{2}\right)v}^{\left(j+\frac{1}{2}\right)v} \left(rect\left(\frac{x_c}{T(x_c, y_c)} \right) \otimes pgn\left(\frac{x_c}{2T(x_c, y_c)} \right) \right) dy_c \right] dx_c \tag{4.4}$$

Le seuillage de l'équation précédente peut être réalisé comme suit:

$$H_{ij}=\left\{\begin{array}{ll} 1 \;\; si & \dfrac{1}{uv}\displaystyle\int_{(i-\frac{1}{2})u}^{(i+\frac{1}{2})u}\left[\int_{(j-\frac{1}{2})v}^{(j+\frac{1}{2})v}\left(rect\left(\frac{x_c}{T(x_c,y_c)}\right)\otimes pgn\left(\frac{x_c}{T(x_c,y_c)}\right)\right)dy_c\right]dx_c \geq V_{seuil} \\ 0 \;\; si & \dfrac{1}{uv}\displaystyle\int_{(i-\frac{1}{2})u}^{(i+\frac{1}{2})u}\left[\int_{(j-\frac{1}{2})v}^{(j+\frac{1}{2})v}\left(rect\left(\frac{x_c}{T(x_c,y_c)}\right)\otimes pgn\left(\frac{x_c}{2T(x_c,y_c)}\right)\right)dy_c\right]dx_c < V_{seuil} \end{array}\right\}$$

(4.5)

Si on ne considère que le recouvrement des pixels par les bandes noires de l'hologramme (figure 4.1), on peut imposer une valeur de V_{seuil} égale à 0.5. Toutefois, la non-linéarité de la fonction de transfert (équation 4.1) est telle que la valeur après numérisation n'est pas directement proportionnelle au recouvrement. On ne peut donc pas déterminer une valeur numérique théorique pour V_{seuil}.

Si la grille projeté est une grille de Ronchi la largeur des bandes de l'hologramme est globalement voisine de la distance entre elles. Cette propriété peut nous servir à rendre automatique la détermination de la valeur seuil dans le cas où l'on numérise directement l'hologramme.

4.2.2 Numérisation des images servant à créer l'hologramme

En pratique, on doit numériser des images avec des tons de gris avant d'obtenir l'hologramme. En effet, nous devons numériser l'intensité de deux images, soit celle obtenue lorsque la grille est projetée et celle obtenue sans grille projetée. C'est le résultat de la division de ces deux distributions d'intensité qui constitue l'hologramme expérimental.

L'intensité $I(x_c, y_c)$ reçue par la caméra en présence de la grille ("G" sur les figures 3.1, 3.7 et 3.17) est donnée par l'équation 3.5, d'où:

$$I_{ij} = \frac{1}{uv} \int_{(i-\frac{1}{2})u}^{(i+\frac{1}{2})u} \left[\int_{(j-\frac{1}{2})v}^{(j+\frac{1}{2})v} b(x_c, y_c) \times \left(rect\left(\frac{x_c}{T_c}\right) \otimes pgn\left(\frac{x_c}{T_c} + \frac{\theta(x_c, y_c)}{2\pi}\right)\right) dy_c \right] dx_c \tag{4.6}$$

En absence de la grille ("G" sur les figures 3.1, 3.7 et 3.17), l'intensité des pixels est donnée par;

$$I'_{ij} = \frac{1}{uv} \int_{(i-\frac{u}{2})u}^{(i+\frac{1}{2})u} \left[\int_{(j-\frac{1}{2})v}^{(j+\frac{1}{2})v} I'(x_c, y_c) dy_c \right] dx_c \tag{4.7}$$

La distribution d'intensité $I'(x_c, y_c)$ est donnée par l'équation 3.7, d'où:

$$I'_{ij} = \frac{1}{uv} \int_{\left(i-\frac{u}{2}\right)u}^{\left(i+\frac{1}{2}\right)u} \left[\int_{\left(j-\frac{1}{2}\right)v}^{\left(j+\frac{1}{2}\right)v} b(x_c, y_c) dy_c \right] dx_c \tag{4.8}$$

L'image contenue dans le système de vision après la division des intensités est alors décrite par l'équation suivante:

$$\frac{I_{ij}}{I'_{ij}} = \frac{\frac{1}{uv} \int_{\left(i-\frac{1}{2}\right)u}^{\left(i+\frac{1}{2}\right)u} \left[\int_{\left(j-\frac{1}{2}\right)v}^{\left(j+\frac{1}{2}\right)v} I(x_c, y_c) dy_c \right] dx_c}{\frac{1}{uv} \int_{\left(i-\frac{1}{2}\right)u}^{\left(i+\frac{1}{2}\right)u} \left[\int_{\left(j-\frac{1}{2}\right)v}^{\left(j+\frac{1}{2}\right)v} I'(x_c, y_c) dy_c \right] dx_c} \tag{4.9}$$

Soit:

$$\frac{I_{ij}}{I'_{ij}} = \frac{\displaystyle\int_{(i-\frac{1}{2})u}^{(i+\frac{1}{2})u}\left[\int_{(j-\frac{1}{2})v}^{(j+\frac{1}{2})v}\left(b(x_c,y_c)\times\left(rect\left(\frac{x_c}{T(x_c,y_c)}\right)\otimes pgn\left(\frac{x_c}{2T(x_c,y_c)}\right)\right)\right)dy_c\right]dx_c}{\displaystyle\int_{(i-\frac{1}{2})u}^{(i+\frac{1}{2})u}\left[\int_{(j-\frac{1}{2})v}^{(j+\frac{1}{2})v} b(x_c,y_c)dy_c\right]dx_c}$$

(4.10)

La fonction $I'(x_c,y_c)=b(x_c,y_c)$ étant une distribution d'intensité, ces valeurs numériques sont en tous points plus grandes où égales à zéro. Les points pour lesquels $b(x_c,y_c)=0$ correspondent aux régions non éclairées par le projecteur ("P" sur les figures 3.1, 3.7 et 3.17) et sont donc sans intérêt. Nous avons alors:

$$b(x_c,y_c)>0$$

(4.11)

L'hologramme théorique numérisé (équation 4.5) a des tons de gris différents de ceux de l'hologramme expérimental représenté par l'équation 4.10. La valeur numérique du seuil pour rendre binaire l'image représentée par l'équation 4.10 est fonction de l'intensité locale captée par la caméra, le terme $b(x_c,y_c)$. Or comme le montre l'annexe A, ce terme est fortement fonction de la forme de

l'objet. La valeur numérique de seuillage doit donc être déterminée expérimentalement car elle dépend des caractéristiques de l'objet.

Comme nous l'avons déjà discuté à la section 4.1, la fonction de transfert de la caméra dépend de l'intensité lumineuse totale. Ainsi, la fonction de transfert de la caméra pour numériser l'image représentée au numérateur de l'équation 4.10 est différente de la fonction de transfert utilisée pour numériser l'image représentée au dénominateur de la même équation. En effet, la projection d'une grille de Ronchi peut masquer jusqu'à 50% de l'énergie lumineuse captée par la caméra. La sensibilité de la caméra est donc plus grande lorsque la grille est projetée; c'est pourquoi les valeurs numériques de l'équation 4.10 peuvent être plus grandes que 1.

L'hologramme expérimental n'est donc pas une image binaire, mais une image ayant des tons de gris. Toutefois, les variations locales causées par la couleur de l'objet ou la géométrie du système affectent le numérateur et le dénominateur de l'équation 4.10. Les variations locales causées par ces facteurs sont donc réduites lorsqu'on obtient l'hologramme; c'est pourquoi l'hologramme expérimental accepte plus facilement un seuillage global que l'image de la grille projetée.

4.3 Effet du modèle optique choisi

Nous avons choisi, dans notre modèle de l'optique, de ne considérer que les rayons passant par les point nodaux. Ce choix implique une imprécision dans l'analyse des images captées. La présente section discute des limites imposées par ce choix.

Soit un plan image et un plan objet tels qu'à tout point du plan objet il correspond un point du plan image. La position de ces plans par rapport à la lentille respecte alors la formule de l'opticien pour les lentilles minces*:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \tag{4.12}$$

*Bien que cette équation n'est valide que pour les lentilles minces, elle n'enlève pas de généralité au développement suivant, car elle n'est utilisée que pour positionner les plans images et objet par rapport à la lentille.

4.3.1 Effet du modèle optique, pour la caméra

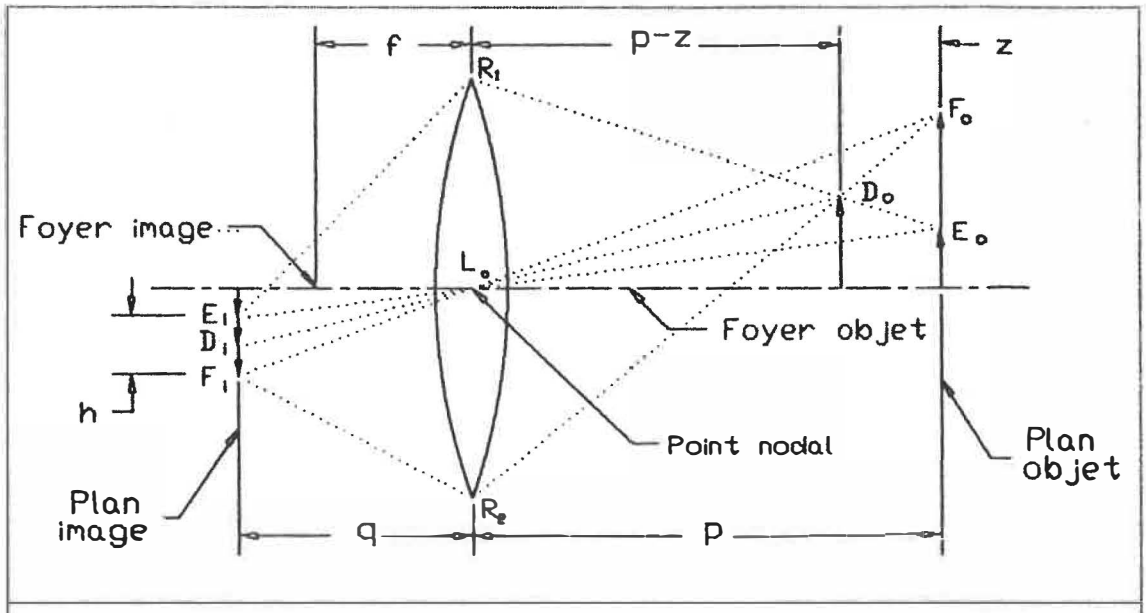

Figure 4.3: Schéma des rayons formant l'image d'un point hors du plan objet, pour une lentille mince.

Soit un point tel D_0 sur la figure 4.3. Le point D_0 est situé à une distance z du plan objet et le rayon lumineux passant par le point nodal L_0 intercepte le plan image en D_1.

Tous les rayons lumineux émis du point D_0 qui atteignent la lentille dans les limites de son ouverture $2R$ contribuent à former son image. Ce sont donc les rayons portés par les bords de l'ouverture tels D_0-R_1 et D_0-R_2 qui déterminent la dimension de la tache dans le plan image. Ces rayons correspondent aux points objets E_0 et F_0

dont les points images conjugués sont E_i et F_i, respectivement. Les point images E_i et F_i sont séparés par une distance h que l'on peut calculer par triangles semblables ($E_i - F_i - L_o : R_1 - R_2 - D_o : F_o - L_o - E_o$):

$$h = \frac{2Rqz}{p(p-z)} \tag{4.13}$$

L'image du point D_o n'est pas uniforme sur la région de dimensions données par l'équation précédente. La symétrie axiale de la lentille rend la tache plus intense en $\acute{D}_i$ et de plus en plus diffuse vers les limites E_i ou F_i de la tache.

L'équation 4.13 montre que la dimension de la tache augmente lorsque l'écart z avec le plan objet augmente. Et plus la dimension de la tache augmente, plus l'image devient difficile à discerner. L'effet se traduit par une perte de contraste dans l'image captée des bandes de la grille projetée.

Cette perte de contraste augmente l'erreur de classement des pixels lorsqu'on effectue le seuillage global de l'hologramme. Ces erreurs de classement génèrent des hologrammes dont la largeur des bandes est nettement différente de la distance entre elles.

Dans le cas présent, on s'intéresse à la grandeur de la tache en termes de bandes d'hologramme et on veut savoir jusqu'à quelle profondeur, par rapport au plan objet, on peut aller avant que les bandes de la grille projetée ne soient confondues. On peut assumer que ceci se produit lorsque la dimension de la tache est égale au double de celle d'une bande de l'hologramme.

Nous prendrons comme limite la largeur d'une bande de l'hologramme car, à ce moment, nous savons que la caméra peut encore détecter les bandes de la grille projetée et ce, même si certains rayons lumineux formant l'image d'une bande interceptent le plan image à l'endroit où d'autres rayons lumineux forment l'image d'une bande voisine. Nous avons:

$$\frac{2Rqz}{p(p-z)} = T(x_c, y_c) \tag{4.14}$$

La valeur de p dans l'équation précédente peut être estimée par la valeur de a_s (voir figure 3.17) donnée par l'équation 3.24, alors que la valeur de q est égale à a_c (voir figure 3.17) qui, elle, est déterminée expérimentalement (voir annexe C). Nous avons donc:

$$z = \frac{T(x_c, y_c)a_s^2}{2Ra_c + a_s T(x_c, y_c)}$$

(4.15)

La valeur numérique de cette limite est fonction des conditions expérimentales, ce dont la section 4.4 discute.

4.3.2 Effet du modèle optique, pour le projecteur

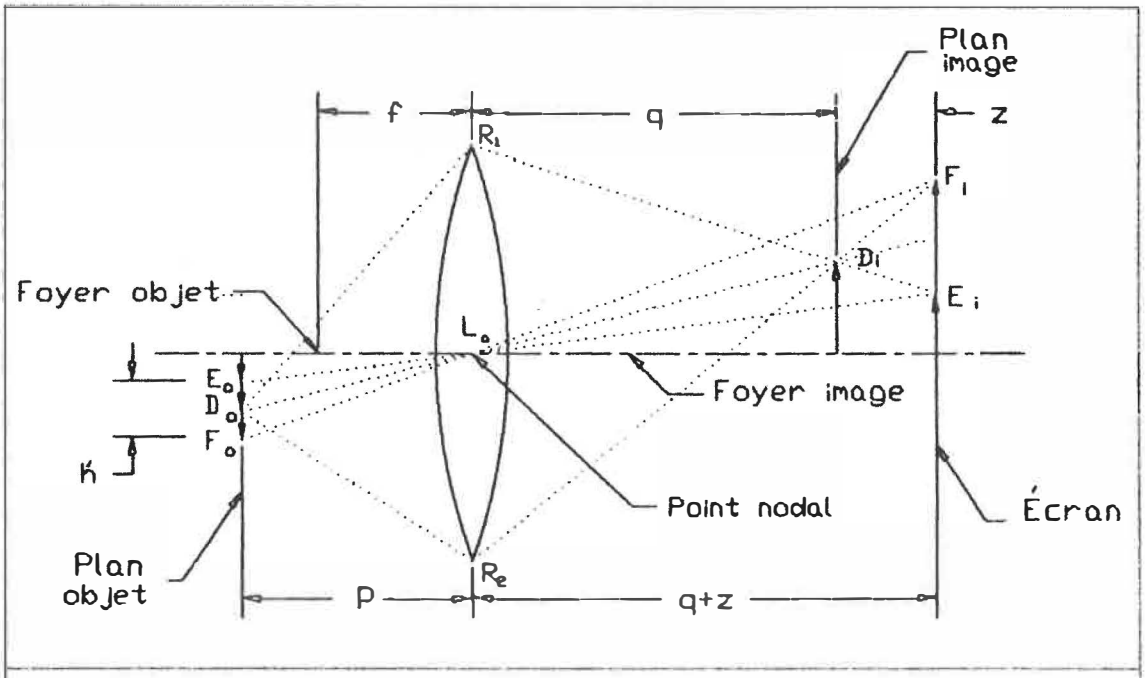

Figure 4.4: Schéma des rayons formant l'image d'un point hors du plan image, pour une lentille mince.

Soit un point tel D_o sur la figure 4.4. L'image de ce point dans le plan image est D_i. On désire connaître la dimension maximale de la région du plan objet dont les

rayons lumineux passent par D_i. Le plan sur lequel on visualise les images projetées est situé à une distance z du plan image.

Tous les rayons lumineux passant par le point D_i qui proviennent de la lentille dans les limites de son ouverture $2R$ contribuent à former une tache de ce point sur l'écran. Ce sont donc les rayons portés par les bords de l'ouverture, tels que $D_o - R_1$ et $D_o - R_2$, qui déterminent la dimension du motif sur l'écran dans le plan objet. Ces rayons correspondent aux points images E_i et F_i dont les points objets conjugués sont E_o et F_o, respectivement. Les points objets E_o et F_o sont séparés par une distance h qu'on peut calculer par triangles semblables ($E_i - F_i - L_p$;$D_i - E_i - F_i$;$E_o - F_o - L_p$):

$$h' = \frac{2Rpz}{q(q+z)}$$

(4.16)

Tous les points à l'intérieur de la région de dimension h du plan objet contribuent à l'image du point D_i sur l'écran. La contribution des différents points n'est toutefois pas uniforme.

L'équation 4.16 montre que la dimension de la région augmente avec l'écart, z, au plan image. Et plus la

dimension de la région augmente, plus l'image devient difficile à discerner. L'effet se traduit par une perte de contraste des bandes de la grille projetée.

Cette perte de contraste induit une perte de contraste dans l'image captée par la caméra, ce qui augmente l'erreur de classement des pixels lorsqu'on effectue le seuillage global de l'hologramme.

Dans le cas présent, on s'intéresse à la grandeur de la tache en termes de bandes de la grille et on veut savoir jusqu'à quelle profondeur, par rapport au plan objet, on peut aller avant que les bandes de la grille projetée ne soient confondues. On peut assumer que lorsque la dimension de la région est égale au double de celle d'une bande de la grille, la grille n'est plus visible sur l'écran.

Nous prendrons comme limite la largeur d'une bande de la grille. Car à ce moment, nous savons que l'image de la grille est encore visible. Et ce, même si certains rayons lumineux formant l'image d'une bande interceptent le plan image à l'endroit où d'autres rayons lumineux forment l'image d'une bande voisine. Nous avons:

$$\frac{2Rpz}{q(q+z)} = T_g \tag{4.17}$$

Puisque le point nodal du projecteur est à la coordonnée (x_{op}, y_{op}, z_{op}) par rapport au référentiel fixé au point nodal de la caméra, nous avons $q = \sqrt{(a_s - z_{op})^2 + x_{op}^2 + y_{op}^2}$ (voir figure 3.17). Et la valeur de p est égale à α_p (voir figure 3.17), qui elle est déterminée expérimentalement (voir annexe D). Nous avons donc:

$$z = \frac{T_g[(a_s - z_{op})^2 + x_{op}^2 + y_{op}^2]}{2Ra_p + T_g\sqrt{(a_s - z_{op})^2 + x_{op}^2 + y_{op}^2}} \tag{4.18}$$

La valeur numérique de cette limite est fonction des conditions expérimentales, ce dont la section 4.4 discute.

4.4 Les conditions expérimentales et l'équipement utilisé.

La figure 4.5 est une photo du montage expérimental utilisé pour la vérification de la méthode. Le tableau 4.1 donne une liste de l'équipement requis. Deux bancs d'optique sont utilisés, un pour la caméra, l'autre pour le projecteur. Ces deux bancs sont disposés comme le montre la figure 4.6, de telle sorte à avoir un angle de **15°** entre eux.

Un repère est placé le long de chaque banc d'optique; ils sont utilisés pour faire toutes les mesures expérimentales de position. Tel qu'indiqué sur la figure

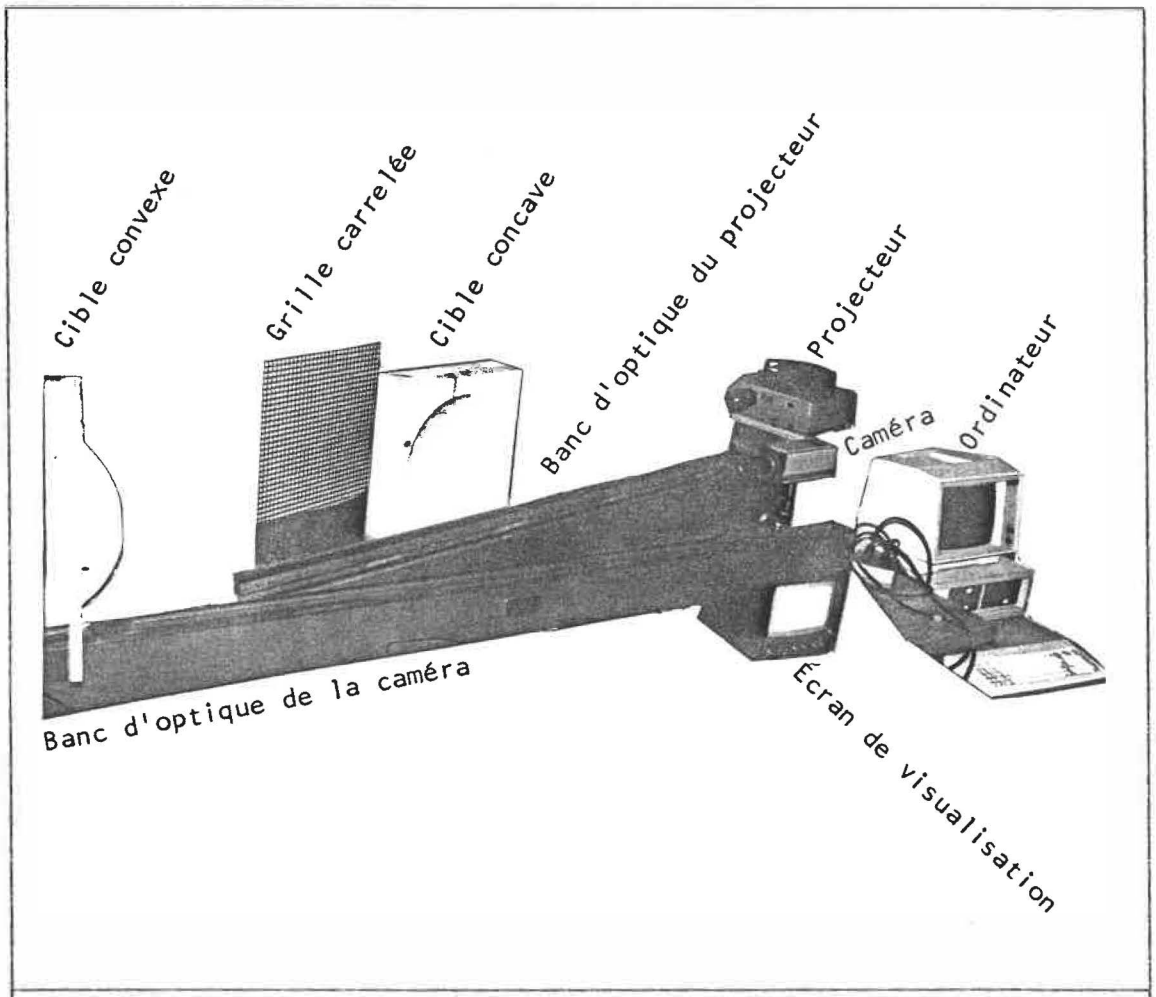

Figure 4.5: Photo du montage expérimental.

4.6, nous avons l'axe z_p, colinéaire à l'axe optique du projecteur, et l'axe z_o, colinéaire avec l'axe optique de la caméra.

L'annexe C décrit la méthode utilisée pour positionner le point nodal objet L_o de la caméra sur le banc d'optique. La mesure est réalisée en plaçant une grille carrelée (voir figure 4.5) à l'avant et à l'arrière des positions de

1	Un ordinateur IBM PC muni d'une carte de numérisation Occulus 200 de Coréco.
2	Une caméra CCTV munie d'un zoom monté sur un banc d'optique.
3	Un projecteur à diapositives muni d'un zoom monté sur un second banc d'optique.
4	Une cible formée d'une surface hémisphérique convexe.
5	Une seconde cible formée d'une surface hémisphérique concave.
6	Une diapositive d'un réseau de Ronchi.
7	Une grille carrelée pour la mesure de la position du point nodal objet de la caméra.
8	Une diapositive pour l'alignement et la mesure de la position du point nodal image du projecteur.

Tableau 4.1: Liste de l'équipement

l'enveloppe de travail désirée. La position trouvée sur le banc de la caméra (voir figure 4.6) est $z_o = 1685 \pm 7mm$. L'annexe C décrit aussi la méthode pour obtenir la distance entre le plan image de la caméra et son point nodal image (a_c sur les figures 3.10, 3.11 et 3.17). Nous obtenons: $a_c = 3020 \pm 14$ *pixels horizontaux*. La même annexe donne la position de l'axe optique de la caméra dans le plan image de la caméra. Nous obtenons: *AXEc*:(*colonne*# 283,*ligne*# 183).

$a_c = 3020 \pm 14$ *pixels horizontaux*
$a_p = 138 \pm 3mm$
$R_{caméra} = 21.6 \pm 0.1mm$
$R_{projecteur} = 25.0 \pm 0.1mm$
$T_g = 0.139 \pm 0.002mm$
$x_{op} = -540 \pm 21mm$
$y_{op} = 10.8 \pm 0.6mm$
$z_{op} = -438 \pm 21mm$
$\beta = 0.0 \pm 0.1°$
$\delta_g = 0.21 \pm 0.03$ *bande*
$\phi = 15.0 \pm 0.1°$
$\theta = 0 \pm 0.1°$
Tableau 4.2: Les conditions expérimentales.

L'annexe D décrit la méthode utilisée pour positionner le point nodal image L_p du projecteur sur le banc d'optique du projecteur. La position trouvée par rapport au repère fixe sur le banc du projecteur (voir figure 4.6) est $z_p = 285 \pm 15mm$. Cette annexe décrit aussi la méthode pour

obtenir la distance entre le plan objet du projecteur et son point nodal objet (a_p sur les figures 3.12 et 3.17). Nous obtenons $a_p = 138 \pm 3mm$.

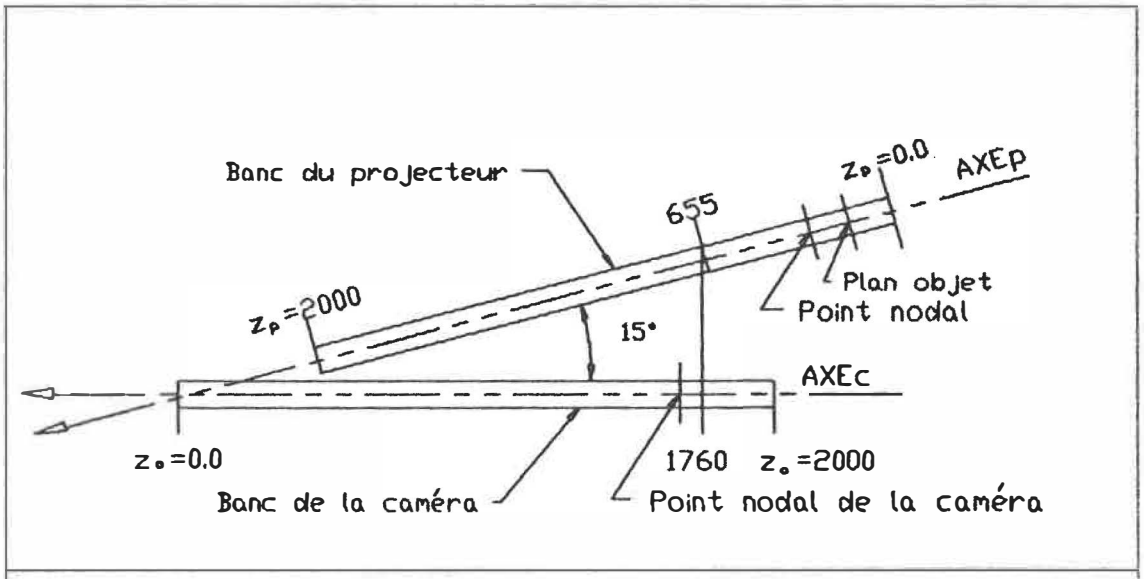

Figure 4.6: Schéma à l'échelle du montage expérimental: "AXEc", l'axe optique de la caméra; "AXEp", l'axe optique du projecteur; "z_o", est un axe de mesure fixé sur le banc de la caméra; "z_p", est un axe de mesure fixé sur le banc du projecteur.

La figure 4.6 montre un schéma du montage. En utilisant les valeurs précédentes, nous obtenons selon une technique expliquée à l'annexe E:

$(x_{op} = -540 \pm 21mm, y_{op} = 10.8 \pm 0.6mm, z_{op} = -438 \pm 21mm)$.

Le diamètre de l'ouverture de la caméra est très approximée par le diamètre de la lentille externe:

$R_{caméra} = 43mm$.

Le diamètre de l'ouverture du projecteur est approximée par le diamètre de la lentille externe: $R_{projecteur} = 50mm$.

L'angle ϕ entre les bancs d'optique est fixé à l'aide d'une équerre à 15°. Toutefois, l'annexe E décrit aussi une technique de mesure de cet angle. Nous obtenons $\phi = 15.0 \pm 0.1°$.

Le pas du réseau de Ronchi a été mesuré à l'aide d'un microscope muni d'un réticule. La technique utilisée est expliquée à l'annexe E. Le résultat est $T_g = 0.139 \pm 0.002$ mm.

Le décalage latéral δ_g des bandes de la grille est calculé en projetant l'image de la grille sur une surface plane. La technique utilisée est expliquée à l'annexe E. Le résultat est $\delta_g = -0.21 \pm 0.03$ *bande*.

L'angle θ est nul, puisque les deux bancs d'optique sont sur la même table et qu'on a pris soin de placer les axes optiques parallèles à leur banc respectif.

L'angle β est mesuré par rapport aux colonnes de pixels de la carte Occulus-200. La méthode utilisée est expliquée à l'annexe E. Le résultat est $\beta = 0 \pm 0.1°$.

Les variables dont les valeurs sont données au tableau 4.2 caractérisent les conditions expérimentales, car elles ne dépendent pas de l'objet observé et elles sont constantes pour le montage utilisé.

4.5 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale est répartie sous deux grands thèmes, soit: la saisie des images et la transformation des images. Il y a toutefois deux types de transformation offerts, soit: la transformation en frange de Moiré et la transformation en une représentation numérique de la forme de l'objet.

4.5.1 Procédure expérimentale de saisie des images

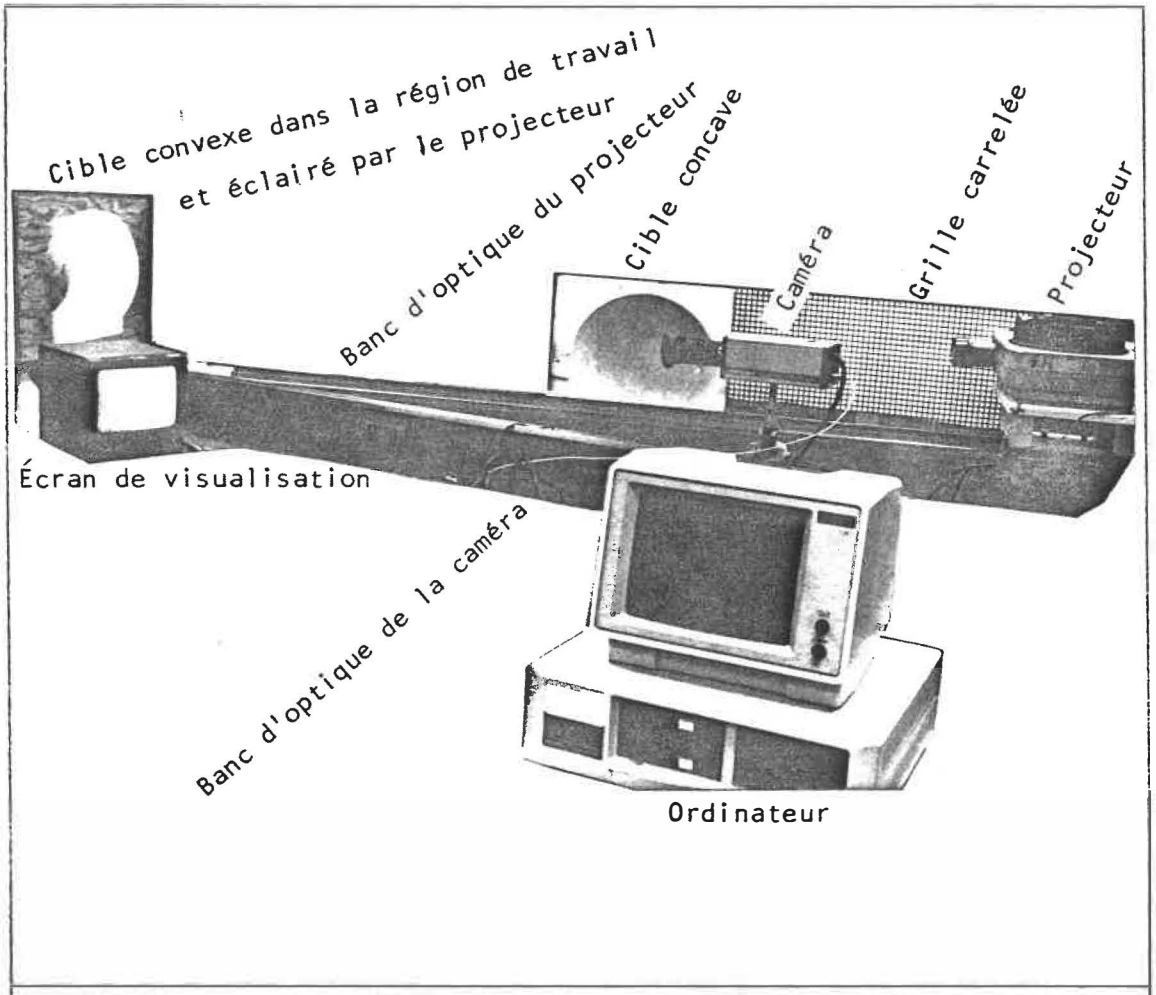

Figure 4.7: Photo du montage expérimental

La procédure expérimentale consiste, en un premier temps, à placer l'objet à analyser dans la région de travail (voir figure 4.7). Cette région de travail est déterminée par les conditions expérimentales de la section 4.4 et les équations de validité de la section 4.3.

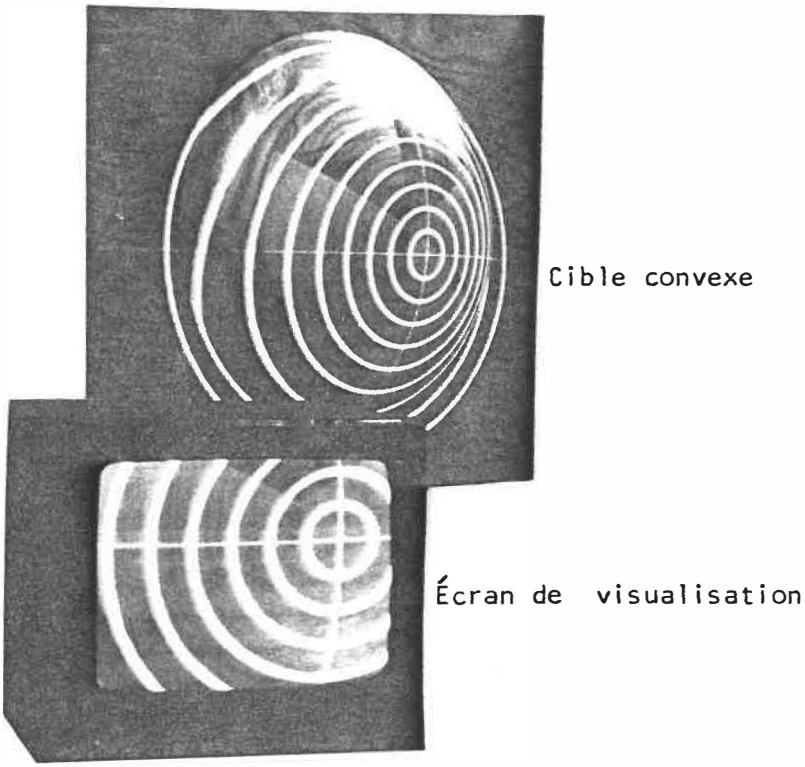

Figure 4.8: Photo de la mesure de la position de l'axe optique du projecteur dans le plan image de la caméra.

La première opération consiste à projeter une croix sur l'objet à analyser (voir figure 4.8). L'utilisateur doit alors agir pour faire coïncider des réticules sur l'écran de la carte Occulus avec les lignes croisées projetées. L'intersection des lignes, sur la diapositive projetée, est

assumée être confondue avec l'axe optique du projecteur. A cette étape, nous positionnons donc l'axe optique du projecteur dans le plan image de la caméra.

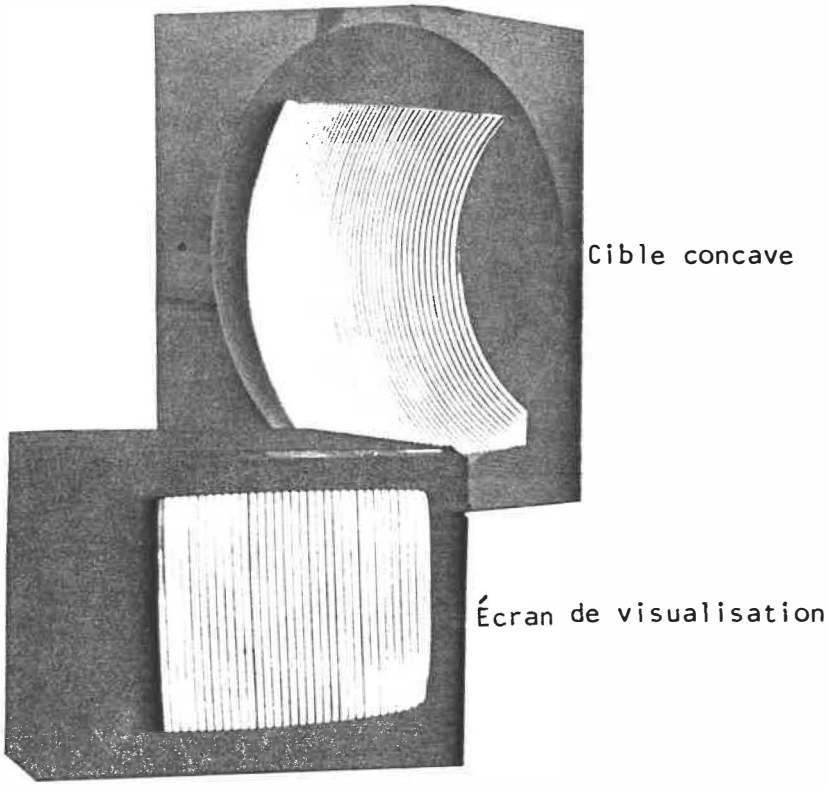

Figure 4.9: Photo de l'image de la grille projetée sur une cible concave

La seconde opération consiste à enregistrer l'image de la grille projetée (voir figure 4.9). L'opérateur change donc tout simplement de diapositive dans le projecteur.

La dernière étape consiste à enregistrer l'image de l'objet sans grille projetée. On enlève alors la diapositive du projecteur.

Nous avons maintenant toutes les informations et images sur disque. La section suivante donne la procédure à effectuer pour obtenir la forme de l'objet.

4.5.2 Procédure de transformation des images en un hologramme expérimental.

Le premier résultat qu'on désire obtenir c'est l'hologramme expérimental de l'objet. Ce résultat est obtenu en utilisant successivement les programmes BRIGHT.EXE et SEUIL.EXE, dont une description est donnée à l'annexe F, ainsi qu'une liste des énoncés à l'annexe G.

Nous avons alors obtenu une empreinte de la forme tridimensionnelle de l'objet.

4.5.3 Procédure de transformation de l'hologramme expérimental en une représentation numérique de la forme de l'objet

Après avoir obtenu l'hologramme, il ne reste plus qu'à le transformer en une représentation numérique de la forme de l'objet. Pour réaliser cette opération, il est nécessaire d'avoir déterminé les conditions expérimentales

de la section 4.4.

L'opération est réalisée en utilisant le programme PROCESS.EXE, dont une explication est donnée à l'annexe F et une liste des énoncés à l'annexe G. L'information maintenant contenue sur la carte OCCULUS-200 est la coordonnée z_s (voir figure 3.17) de la représentation tridimensionnelle de l'objet.

4.5.4 Procédure de transformation de l'hologramme expérimental en franges de Moiré

Après avoir obtenu l'hologramme, nous pouvons le transformer en une représentation visuelle de la forme de l'objet. Pour réaliser cette opération, il est nécessaire de connaître la largeur des bandes de la grille virtuelle qu'on désire utiliser.

L'opération est réalisée en utilisant le programme SCAN.EXE, dont une explication est donnée à l'annexe F et une liste des énoncés à l'annexe G. Les zones maintenant dessinées sur la carte OCCULUS-200 sont les franges de Moiré.

4.6 Conclusion

Le présent chapitre a porté sur le passage vers un montage expérimental du modèle théorique exposé au chapitre

3. Il a déterminé les conditions d'opération imposées, par: le système de numérisation, le choix du modèle optique, les conditions expérimentales.

Nous sommes maintenant prêts à capter la forme d'objets. Le chapitre suivant décrit les données et les résultats expérimentaux.

CHAPITRE 5

Ce chapitre présente les cibles expérimentales et les résultats obtenus. Il fait une comparaison entre les données expérimentales et les objets utilisés comme cible. Il se termine par une discussion sur une amélioration possible.

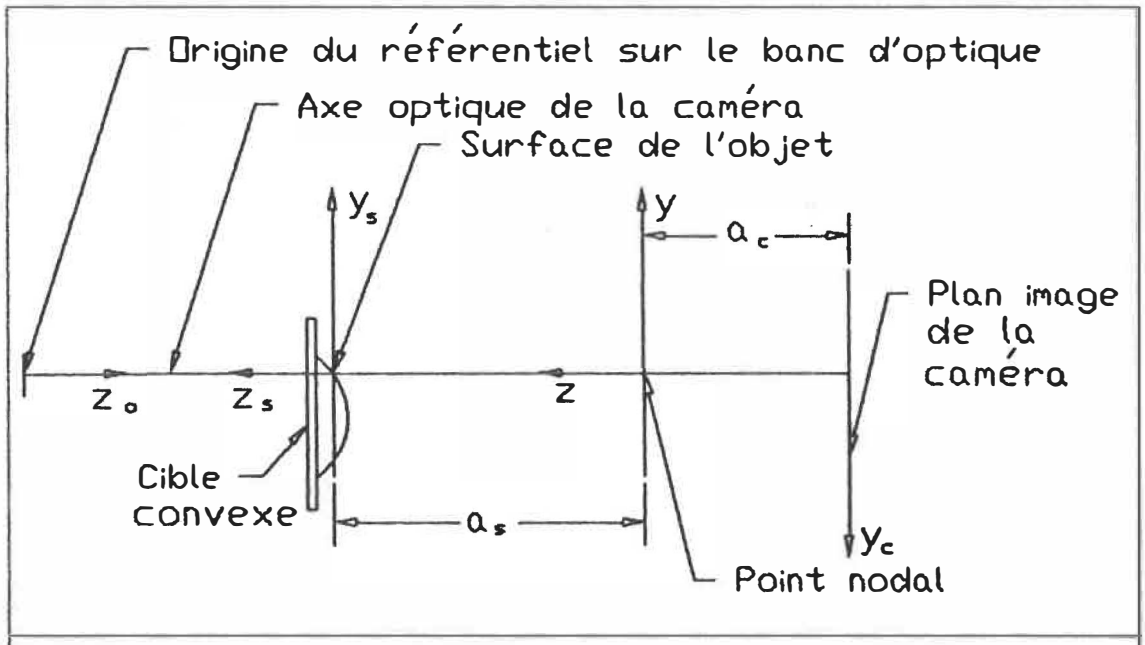

Figure 5.1: Schéma des référentiels théoriques et du référentiel expérimental: z_o est un axe fixé au banc d'optique; (x_s, y_s, z_s) est le référentiel sur la surface de l'objet; (x, y, z) est le référentiel fixé sur le point nodal de la caméra; (x_c, y_c) est le référentiel dans le plan image de la caméra.

La figure 5.1 montre les différentes positions et orientations des référentiels utilisés dans ce chapitre. Sur cette figure on fait le lien entre le référentiel du laboratoire et les référentiels du chapitre 3.

5.1 Cibles expérimentales

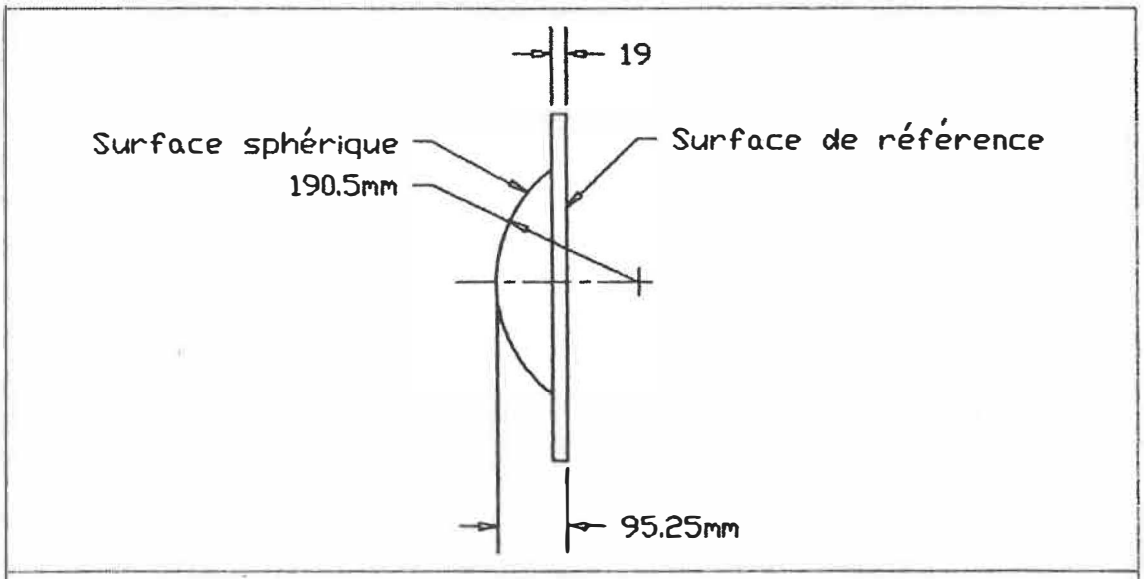

Figure 5.2: Schéma de la cible convexe

Nous avons utilisé trois cibles, soit deux cibles ayant une surface sphérique et une cible ayant une surface plane. Les trois cibles sont des modelage en bois. Une des cibles sphériques est convexe, avec un rayon de courbure de 190.5*mm* (figure 5.2), alors que l'autre est concave, avec un rayon de courbure de 215.9*mm* (figure 5.3).

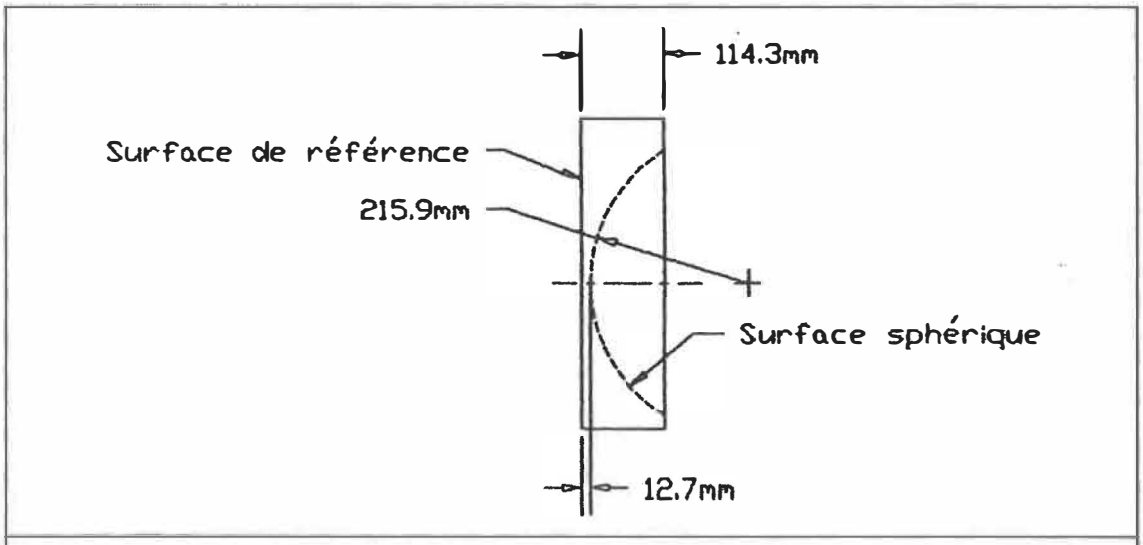

Figure 5.3: Schéma de la cible concave

La figure 5.4, qui est une photographie, nous montre bien le motif irrégulier du grain de bois sur la surface de la cible convexe. Ce motif est par ailleurs complètement éliminé lorsqu'on transforme l'image en un hologramme.

5.2 Données et résultats expérimentaux sur la position de l'objet

Les résultats expérimentaux sont classées en deux catégories, soit la position de l'objet par rapport au point nodal de la caméra discutée dans la présente section et la forme de l'objet discutée à la section 5.3. La présente section porte sur la position de l'objet par rapport au point nodal de la caméra.

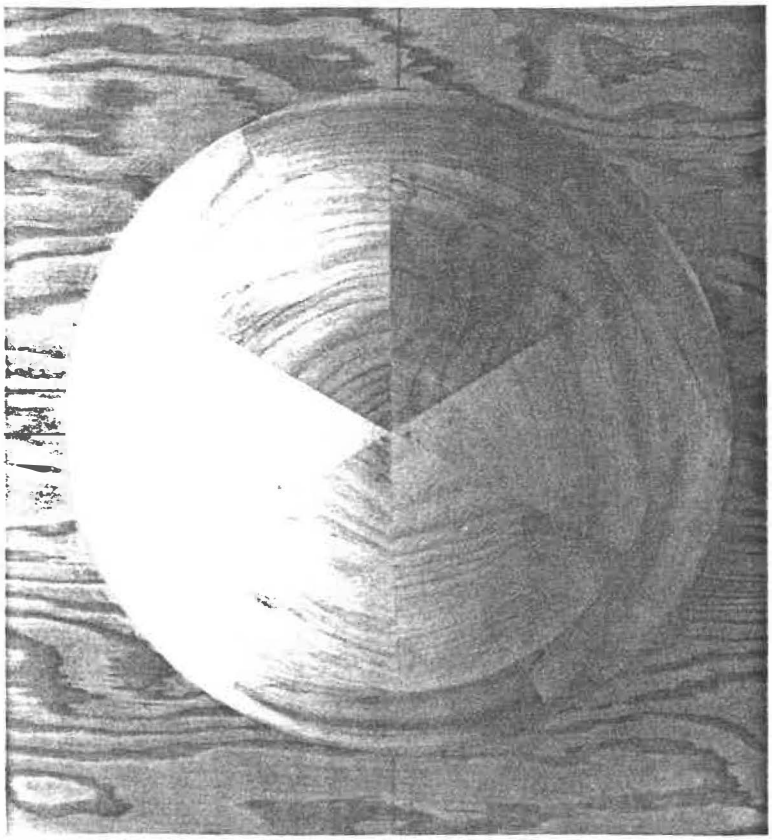

Figure 5.4: Photo de la cible convexe

5.2.1 La cible convexe

La figure 5.5 nous montre la position de l'objet sur le banc d'optique ainsi que la position par rapport au référentiel du point nodal de la caméra.

La position de la surface de référence pour cette cible est à $z_0 = 60mm$. Puisque la position du point nodal est à $z_0 = 1685mm$, la distance entre le point nodal et la surface de référence est $z = 1625mm$. L'objet ayant une profondeur de

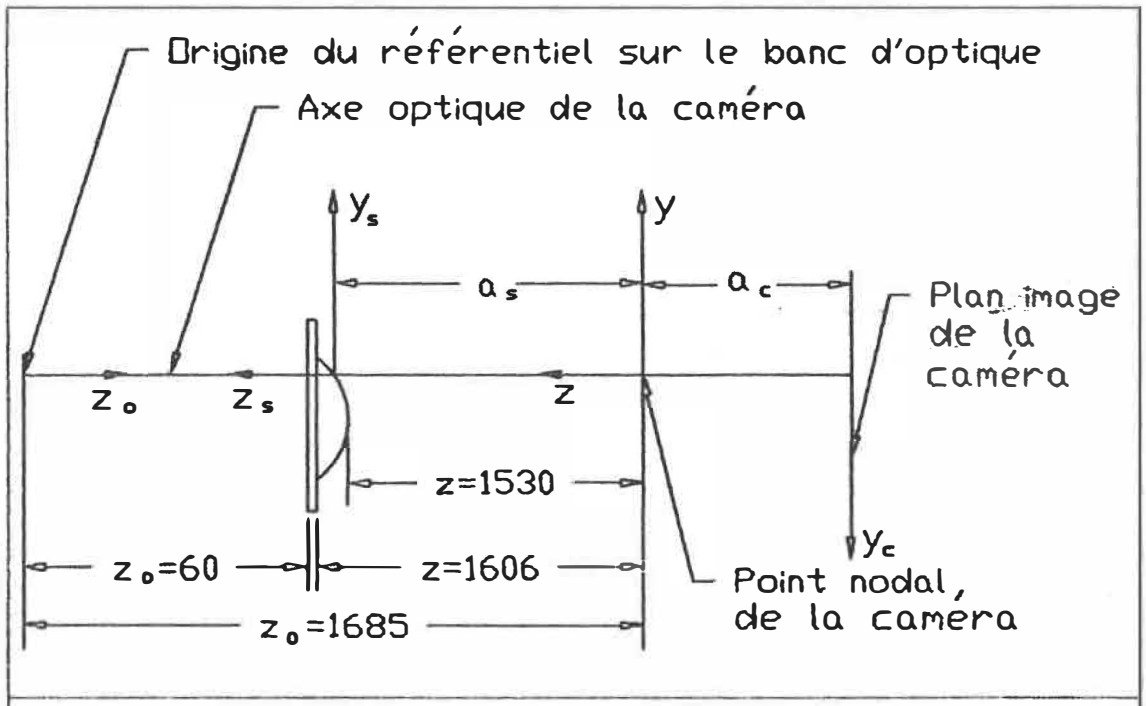

Figure 5.5: Schéma de la position de la cible convexe

$76mm$. La surface observée de l'objet est entre $z = 1530mm$ et $z = 1606mm$ du point nodal de la caméra (voir figure 5.5). En utilisant l'équation 3.24 et $n_{go} = 5.50 \pm 0.25 bandes$ (valeur mesurée expérimentalement) nous obtenons $a_s = 1495 \pm 4mm$. On constate que la valeur de a_s calculée n'est pas dans l'intervalle $1530mm < z < 1606mm$ cette anomalie provient, comme nous allons le montrer à la section 5.2.3, d'une erreur de position de l'axe optique du projecteur.

5.2.2 La cible concave

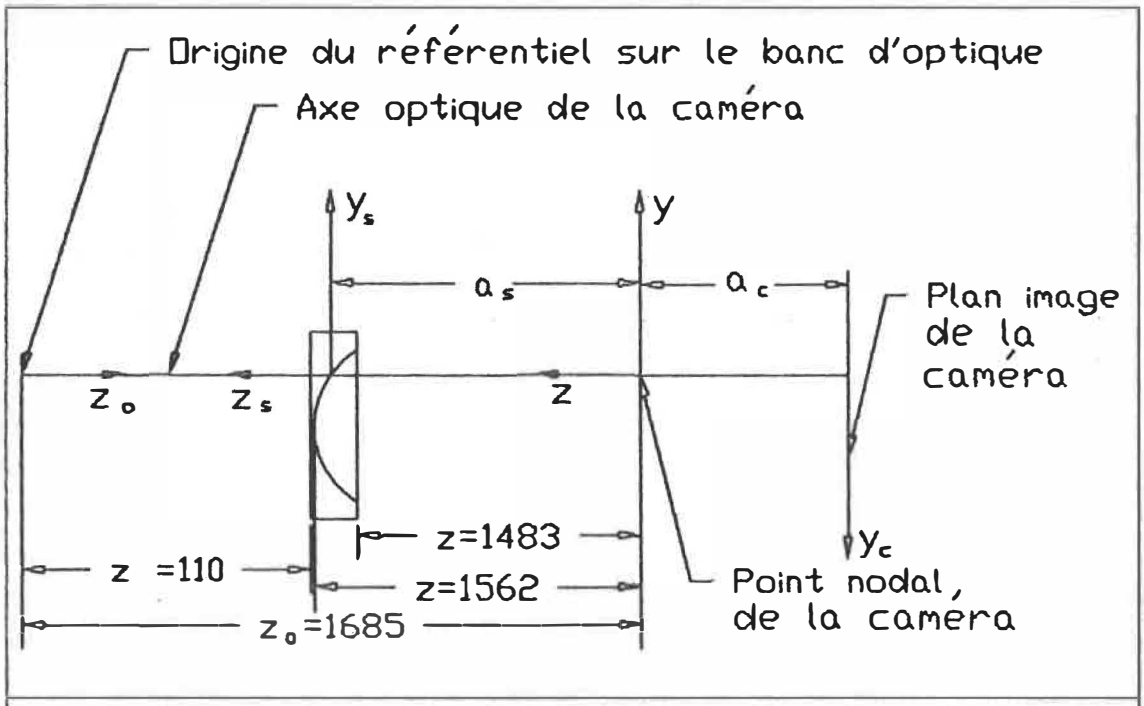

Figure 5.6: Schéma de position de la cible concave

La figure 5.6 nous montre la position de l'objet sur le banc d'optique ainsi que la position par rapport au référentiel du point nodal de la caméra.

Dans le montage expérimental, la surface de référence sur cette cible (voir figure 5.3) est placée à la position $z_s = 110mm$. Puisque la position du point nodal est à $z_o = 1685mm$ (section 4.4), la distance entre le point nodal et la surface de référence est $z = 1575mm$. Le fond de la cavité est à $12.7mm$ de la surface de référence et cette cavité a une profondeur de $101.6mm$. La surface observée de

l'objet est donc entre $z = 1483mm$ et $z = 1562mm$ du point nodal de la caméra (voir figure 5.6). En utilisant l'équation 3.24 et $n_{00} = 5.00 \pm 0.25 bandes$ (valeur mesurée expérimentalement) nous obtenons $a_s = 1502 \pm 4mm$ cette valeur est bien dans l'intervalle $1483 < z < 1562$.

5.2.3 La cible plane

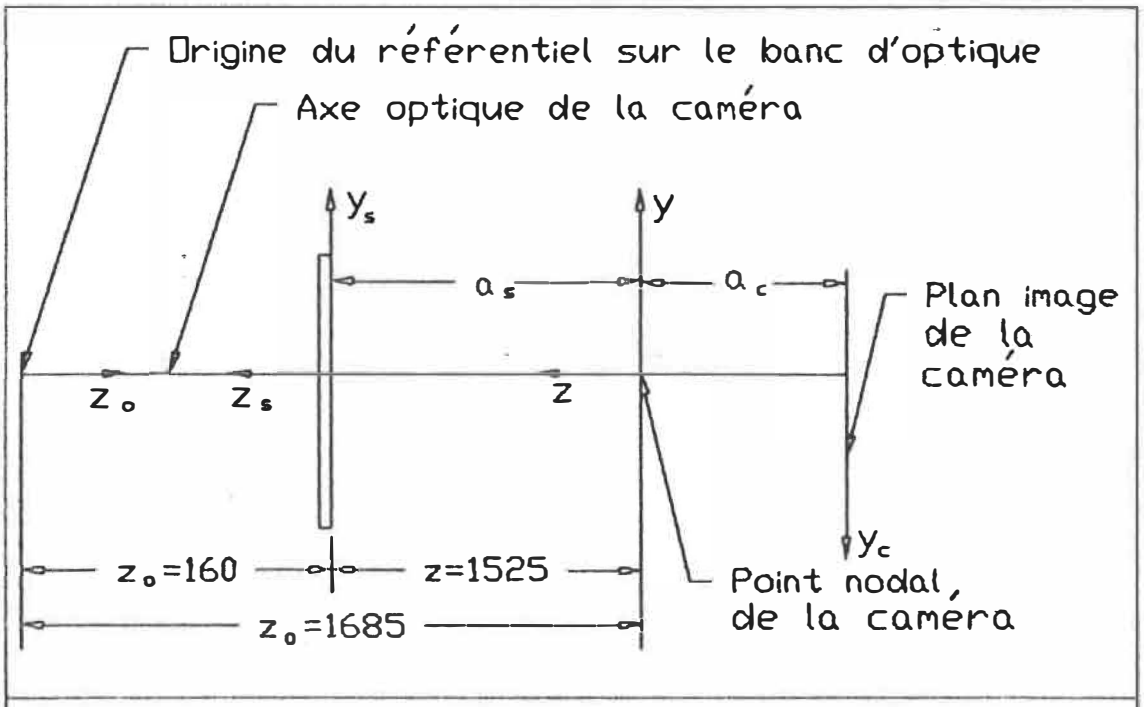

Figure 5.7: Schéma de position de la cible plane

La figure 5.7 nous montre la position de l'objet sur le banc d'optique ainsi que la position par rapport au référentiel du point nodal de la caméra.

Dans le montage expérimental la surface plane est placée à la position $z_o = 160mm$, puisque la position du point nodal est $z_o = 1685mm$ (de la section 4.4). La distance entre le point de référence sur la surface et le point nodal objet de la caméra est $z = 1525mm$. En utilisant l'équation 3.24 et $n_{go} = 7.00 \pm 0.25 bandes$ (valeur mesurée expérimentalement) nous obtenons $a_s = 1472 \pm 4mm$ (voir figure 5.7), ce qui est une valeur trop petite de $53mm$.

On constate que la position calculée par l'équation 3.24 est toujours inférieure à la position actuelle. L'équation 3.24 est réécrite en 5.1, cette équation ne dépend que de la distance en nombre de bandes n_{go} entre l'axe optique de la caméra et l'axe optique du projecteur, car tous les autres terme sont fixés par les conditions expérimentales (valeurs numériques calculés à la section 4.4).

$$a_s = \frac{2T_g(n_{go} + \delta_g)(x_{op}k_1 - y_{op}k_2 + z_{op}k_3) - a_p(x_{op}k_4 + y_{op}k_5 + z_{op}k_6)}{2T_g(n_{go} + \delta_g)k_3 - a_p k_6} \tag{5.19}$$

L'annexe C explique la technique utilisé pour positionner l'axe optique de la caméra et nous n'avons pas de doute sur l'exactitude de cette position. Toutefois, nous avons assumé que l'axe optique du projecteur était au

centre physique de la diapositive c'est pourquoi nous allons maintenant lui calculer une nouvelle position. En inversant l'équation 5.1, nous pouvons calculer la distance en nombre de bandes entre les axes optique du projecteur et de la caméra. Nous avons avec $a_s = 1525mm$:

$$(n_{go} + \delta_g) = \frac{a_p}{2T_g}\left(\frac{a_s k_6 - x_{op}k_4 - y_{op}k_5 - z_{op}k_6}{a_s k_3 - x_{op}k_1 + y_{op}k_2 - z_{op}k_3}\right)$$
$$= 4.167 bandes \qquad (5.20)$$

Nous avions mesuré $(n_{go} + \delta_g) = 6.79$ pour la cible plane, on peut donc dire que l'axe optique du projecteur est à $2.623 bandes$ de l'endroit supposé à l'annexe D.

Si on modifie la distance mesurée pour la cible convexe nous obtenons: $(n_{go} + \delta_g) = 2.667 bandes$, ce qui donne: $a_s = 1535 \pm 4mm$. Cette dernière valeur de a_s est bien à l'intérieur de l'intervalle $1530mm < z < 1606mm$ (voir figure 5.5).

Si on décale la distance en nombre de bandes mesurées pour la cible concave nous obtenons: $(n_{go} + \delta_g) = 2.167 bandes$, ce qui donne: $a_s = 1543 \pm 4mm$. Cette dernière valeur de a_s est bien à l'intérieur de l'intervalle $1483mm < z < 1562mm$ (voir figure 5.6).

5.3 Données et résultats expérimentaux sur la forme de l'objet

Il n'est pas très facile de donner ici une représentation graphique des résultats obtenus. En effet, après avoir réalisé l'expérience, nous avons les coordonnées (x_s, y_s, z_s) (définition du référentiel sur les figures 3.17 et 5.1) de la surface de l'objet, en millimètres, par rapport à un point de l'axe optique de la caméra situé sur la surface. La forme de l'objet est ainsi contenue dans une matrice d'environ 170 000 *points* décrivants le degré d'élévation de la surface de l'objet.

Nous devons dans un premier temps évaluer l'intervalle sur lequel le modèle optique est valide. Afin de calculer l'intervalle de validité du modèle optique nous rappelons les équation 4.15 et 4.18 de la section 4.3.

$$\Delta z = \frac{T(x_c, y_c) a_s^2}{2Ra_c + a_s T(x_c, y_c)} \tag{5.21}$$

$$\Delta z = \frac{T_g[(a_s - z_{op})^2 + x_{op}^2 + y_{op}^2]}{2Ra_p + T_g\sqrt{(a_s - z_{op})^2 + x_{op}^2 + y_{op}^2}} \tag{5.22}$$

La valeur de a_s est assumée comme étant la valeur moyenne des valeurs calculées à la section 5.2, soit: $a_s = 1534 \pm 9mm$. La valeur de $T(x_c, y_c)$ est assumée égale à la largeur minimale des bandes, soit $T(x_c, y_c) = 3 pixels$. Toutes les autres valeurs numériques proviennent de la section 4.4.

La première équation (5.3) donne: $-52mm < z_s < 52mm$, alors que la secondes (5.4) donne: $-80mm < z_s < 80mm$. Ainsi nous pouvons considérer les degrés d'élévations tel que $-52mm < z_s < 52mm$*.

5.3.1 La surface convexe

Les figures 5.8 et 5.9 montrent des coupes de la représentation numérique tridimensionnelle de l'objet. Ces coupes sont réalisées pour différentes valeurs de $y_s = constant$ et d'autres, avec $x_s = constant$. On reconnait sur ces figures sans l'ombre d'un doute une surface convexe.

---

*Ceci constitue une valeur minimale de l'intervalle, car nous avons posé le diamètre d'ouverture de la caméra égal au diamètre de sa lentille externe.

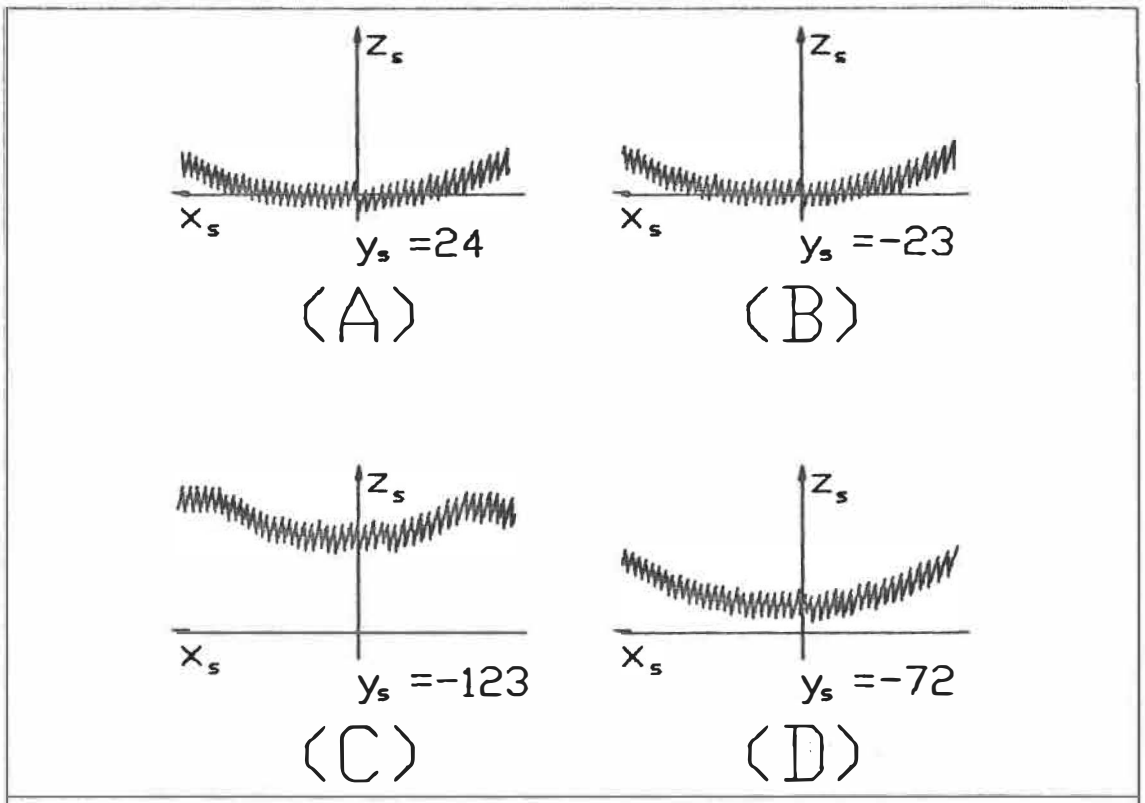

Figure 5.8: Données expérimentales pour la surface convexe. Sur toutes les coupes nous avons approximativement $-105mm \leq x_s \leq 90mm$; la figure (A) représente une coupe de la surface dans le plan $y_s = 24mm$, nous obtenons $-10mm \leq z_s \leq 25mm$; la figure (B), une coupe de la surface dans le plan $y_s = -23mm$ où $-8mm \leq z_s \leq 27mm$; la figure (C), une coupe à $y_s = -123mm$ où $45mm \leq z_s \leq 85mm$; la figure (D), une coupe à $y_s = -72mm$ où $5mm \leq z_s \leq 50mm$.

Les coupes effectuées à $x_s = constant$ contiennent approximativement 470 points, alors que les coupes effectuées à $y_s = constant$ contiennent 363 points. Pour

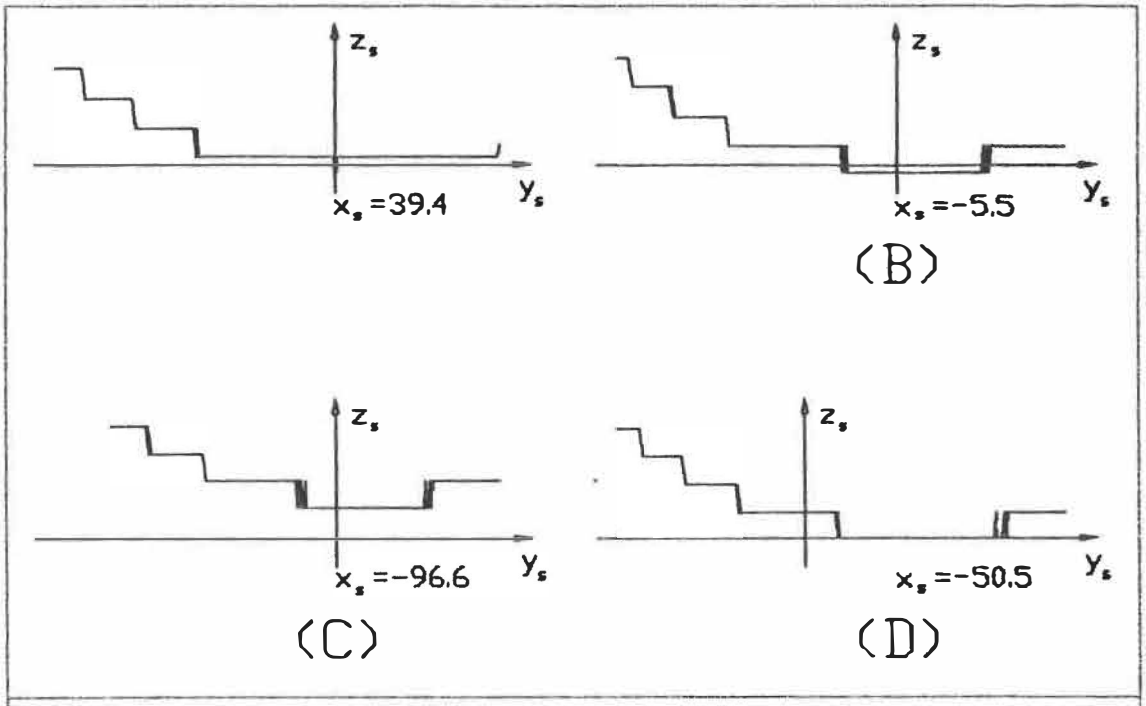

Figure 5.9: Données expérimentales pour la surface convexe. Sur toutes les coupes nous avons approximativement $-100mm \leq y_s \leq 70mm$; la figure (A) représente une coupe de la surface dans le plan $x_s = 39mm$, nous obtenons $-11mm \leq z_s \leq 54mm$; la figure (B), une coupe de la surface dans le plan $x_s = -6mm$ où $-6mm \leq z_s \leq 58mm$; la figure (C), une coupe à $x_s = -97mm$ où $14mm \leq z_s \leq 62mm$; la figure (D), une coupe à $x_s = -50mm$ où $0mm \leq z_s \leq 61mm$.

augmenter la visibilité des données expérimentales sur les figures, les points sont joints par des segments de droites.

Sur chaque coupe, nous pouvons dessiner un arc de cercle de rayon connu épousant le plus possible les données expérimentales. Connaissant plusieurs rayons de courbure

Tableau des résultats pour la cible convexe		
y_s (mm)	Rayon maximum (mm)	Rayon minimum (mm)
49	199	191
25	203	200
-22	204	198
-46	193	180
-71	172	162
-96	156	152
-121	124	119

Tableau 5.1: Les résultats de la mesures de rayons pour la cible convexe

ainsi que les valeur de y_s correspondantes, il est possible de les comparer avec le rayon de courbure actuel de la cible. La figure 5.11 montre le schéma comparatifs pour les valeurs de y_s données au tableau 5.1. On constate que le rayon de courbure obtenu est différent et tel que la surface expérimentale semble plus près de la caméra.

5.3.2 La surface concave

La figure 5.10 montre les dessins de coupes dans les résultats expérimentaux pour la surface concave. On reconnait sur cette figure une surface concave.

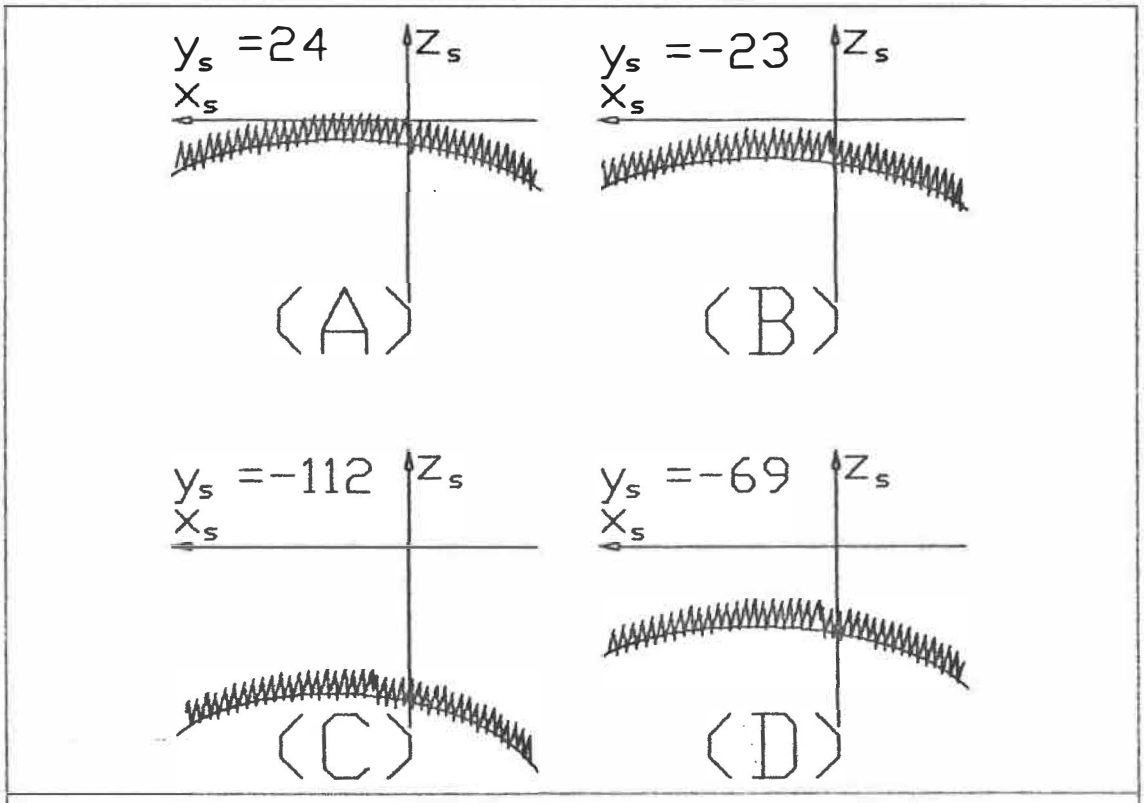

Figure 5.10: Données expérimentales pour la surface concave. Sur toutes les coupes nous avons approximativement $-110mm \leq x_s \leq 60mm$; la figure (A) représente une coupe de la surface dans le plan $y_s = 24mm$, nous obtenons $-30mm \leq z_s \leq 2mm$; la figure (B), une coupe de la surface dans le plan $y_s = -23mm$ où $-40mm \leq z_s \leq -5mm$; la figure (C), une coupe à $y_s = -112mm$ où $-100mm \leq z_s \leq -60mm$; la figure (D), une coupe à $y_s = -69mm$ où $-65mm \leq z_s \leq -25mm$.

La figure 5.12 montre le schéma comparatif avec le rayon actuel de la cible pour les valeurs de y_s données au tableau 5.2.

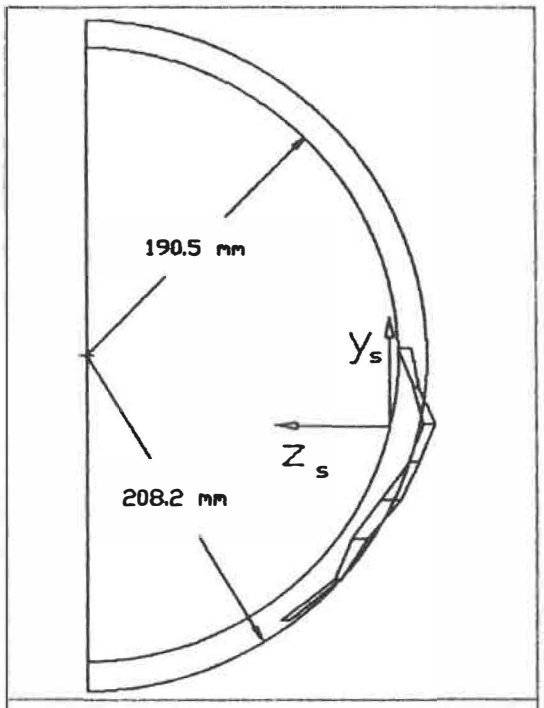

Figure 5.11: Résultats expérimentaux rayon de courbure de la surface convexe. Pour augmenter la visibilité des points ils ont été joints par des segments de droites.

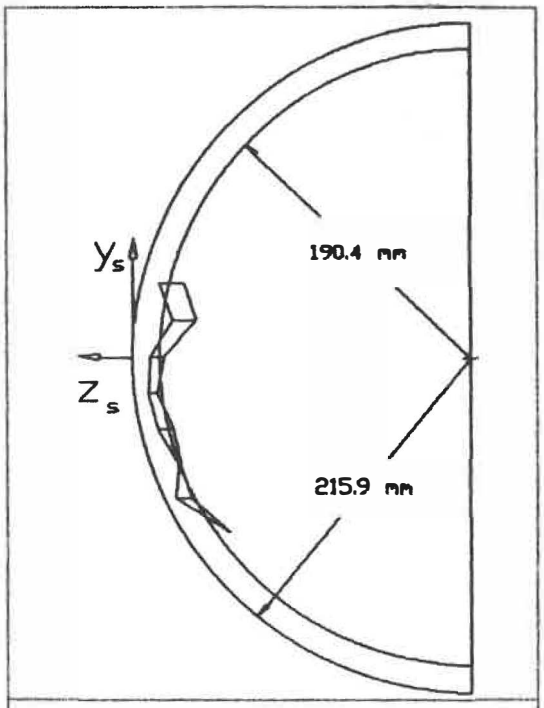

Figure 5.12: Résultats expérimentaux rayon de courbure de la surface concave. Pour augmenter la visibilité des points ils ont été joints par des segments de droites.

On constate que le rayon de courbure obtenu pour chaque cible est différent du rayon de courbure réel de la cible. Cette différence est telle que la surface calculée semble plus près de la caméra qu'elle ne l'est en réalitée.

Tableau des résultats pour la cible concave		
y_s (mm)	Rayon maximum (mm)	Rayon minimum (mm)
48	199	183
24	191	176
1	205	196
-23	206	200
-46	200	190
-69	187	186
-91	189	179
-112	156	154

Tableau 5.2: Les résultats de la mesures de rayons pour la cible concave

5.3.3 La surface plane

Pour la surface plane, nous utilisons l'ajustement par moindre carré d'un plan d'équation:

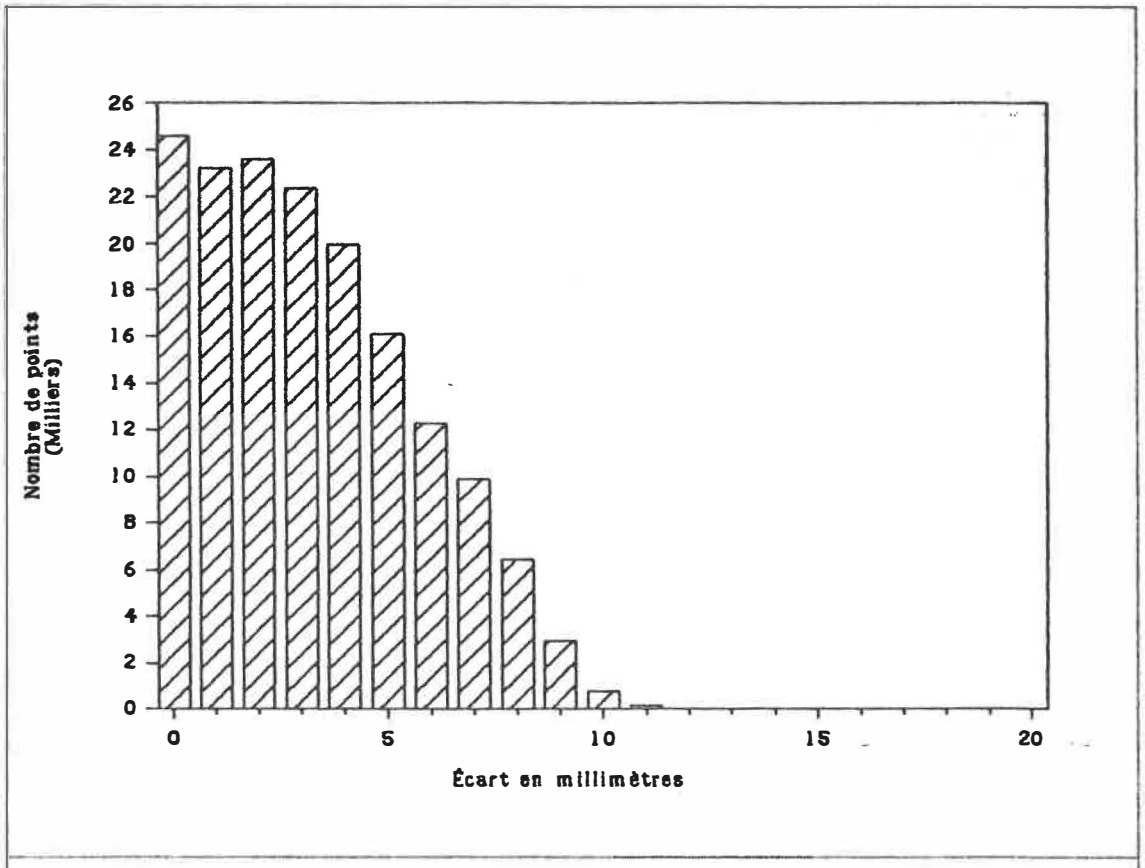

Figure 5.13: Histogramme des écarts entre les points expérimentaux et le plan de régression avec un total de 162976 *points*.

$$z_s = ax_s + by_s + c \tag{5.1}$$

Ce qui nous intéresse ici, c'est l'écart quadratique moyen et l'histogramme des écarts quadratiques. La figure 5.13 nous montre l'histogramme des écarts. Nous obtenons un écart quadratique moyen de 7.9*mm* pour une surface plane de 160*mm* par 170*mm*, numérisée sur une trame de 352*pixels* par

463*pixels*. L'histogramme de la figure 5.13 est bien semblable à une distribution normale, ceci nous assure de la validité du calcul d'un écart quadratique moyen.

5.3.4 La modulation spatiale

Les figures 5.8, 5.9 et 5.10 montrent une oscillation dans les données expérimentales. Cette oscillation est causée par la largeur finie des bandes de l'hologramme. L'orientation de ces bandes est directement fonction des bandes de la grille de Ronchi dont la génératrice est parallèle à l'axe des y_s. La figure 5.14 montre un gros plan de ces oscillations: on constate qu'elles ont une amplitude approximative de 13*mm* et une période de 4*mm* sur l'axe des x_s. Toutes les images utilisées ont été prises dans les mêmes conditions expérimentales; la période et l'amplitude des oscillations est donc la même pour tous les résultats expérimentaux. La contribution de cette modulation au degré d'élévation obtenu pour $x_s = constant$, tel que montré à la figure 5.9, ne peut être caractérisée par une période, mais cette modulation a encore une amplitude de 13*mm*.

La contribution de cette modulation spatiale est par ailleurs facilement observable dans les coupes effectuées à

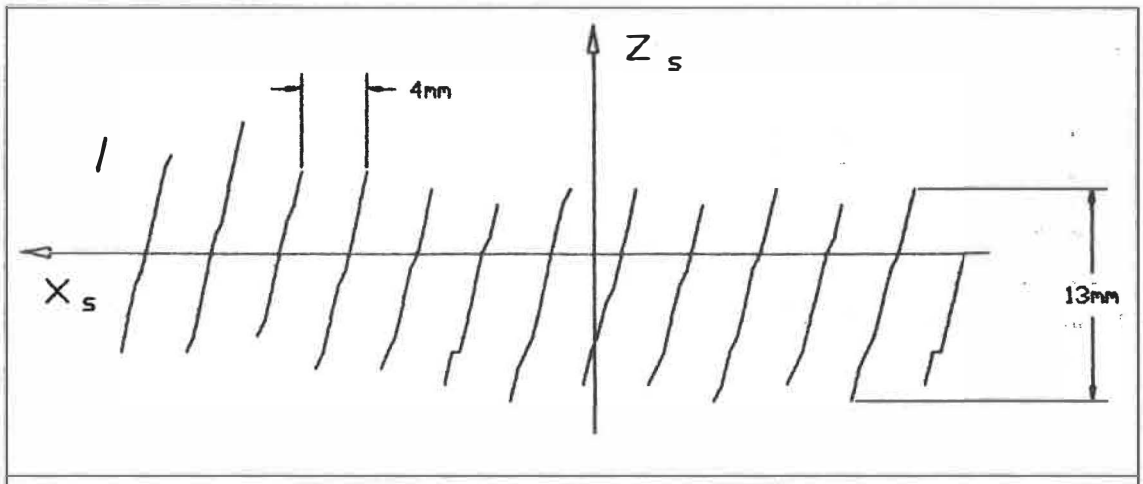

Figure 5.14: Dessin agrandi de l'oscillation des données expérimentales. L'intervalle dessiné correspond à $-30mm \leq x_s \leq 23mm$ et $-9mm \leq z_s \leq 8mm$. Il y a 94 segments de droite sur la figure et chaque segment correspond à un pixel.

$x_s = constant$, car elle a dans ce cas, comme on peut le voir à la figure 5.9, l'effet de créer des paliers dont le degré d'élévation est constant.

C'est cette modulation spatiale qui est la cause de l'écart entre les points expérimentaux et le plan de régression discuté à la section 5.3.3. En effet, l'écart quadratique moyen entre les points expérimentaux et le plan de moindre carré nous donne $8mm$ et sur l'histogramme de la figure 5.13, on constate que les écarts vont jusqu'à $11mm$.

5.4 Amélioration suggérée

Un facteur important dans la qualité des résultats obtenus est la présence de la modulation montrée à la figure 5.14. Cette modulation est causé par la numérotation des bandes de l'hologramme, dont l'incrément est de 0.5 dans le cas présent.

L'amélioration la plus flagrante, qui est relativement facile à réaliser, consiste à faire une interpolation du numéro de bande entre les frontières des bandes de l'hologramme. Une interpolation linéaire permet d'obtenir un numéro de bande de l'hologramme différent pour chaque pixel. Ayant un numéro de bande différent pour chaque pixel, le degré d'élévation calculé varie pour chaque pixel et élimine l'effet de dents de scie observé à la figure 5.8. Cette continuité du degré d'élévation calculé se propage sur les colonnes de pixels et élimine aussi les fortes discontinuités observées à la figure 5.9.

Cette interpolation n'est toutefois qu'une approximation, elle ne donne pas le degré d'élévation exact de la surface à l'intérieur d'une bande de l'hologramme. En effet, on ne connait le degré d'élévation exacte qu'à la frontière des bandes de l'hologramme.

L'interpolation donne toutefois des surfaces plus lisses qui s'approchent un peu plus de la forme réelle de l'objet analysé.

5.5 Conclusion

Les résultats obtenus nous montrent bien la capacité de discerner une surface concave d'une surface convexe. L'analyse des résultats pour une surface plane nous donne un écart du degré d'élévation de 8*mm* pour une surface de 160*mm* par 170*mm*. nous avons constaté que cet écart est causé par la discontinuité dans la numérotation des bandes.

Nous avons réalisé une expérience démontrant la faisabilité de la méthode; utilisé des programmes qui démontrent la possibilité d'un traitement numérique partiellement automatique et utilisé des cibles de couleur non uniforme démontrant l'efficacité de la technique utilisée pour obtenir l'hologramme expérimental.

CONCLUSION

A partir d'une étude théorique des méthodes traditionnelles de mesure tridimensionnelle, nous avons exprimé une relation générale. De cette relation, nous avons élaborée une méthode adaptée à nos besoins. Le souci de rendre la méthode indépendante des propriétés de réflexivité de la surface investiguée nous a conduit à l'utilisation du concept d'hologramme numérique. L'hologramme numérique contient l'information sur la forme de l'objet et ce, sur toute la grandeur de l'image. L'analyse de la formation de l'image d'une grille projetée sur un objet nous a conduit à une formulation mathématique pour un montage général. Cette formulation adaptée pour un système de vision par ordinateur permet de retrouver la forme de l'objet observé.

Nous avons par la suite analysé l'effet de la numérisation de l'image en une trame de pixels. Après avoir exprimé une relation analytique donnant la limite de validité du modèle optique utilisé, nous avons présenté un montage expérimental ainsi que les résultats obtenus.

La qualité des résultats obtenus nous a permis de confirmer l'efficacité de la méthode et ce, malgré la complexité d'analyse de ces résultats. Cette difficulté provient du fait que les résultats expérimentaux représentent un ensemble de points dans l'espace pour lesquels on ne connait pas de relation analytique. Nous avons aussi trouvé que pour rendre la méthode d'utilisation pratique, on doit permettre des hologrammes à numérotation continue ou alors interpoler la numérotation sur la largeur de chacune des bandes de l'hologramme.

La méthode proposée s'apparente aux méthodes exposées dans le chapitre 2, mais elle en diffère essentiellement par le mode d'enregistrement des données qui est sous forme d'hologramme numérique.

Lorsqu'il s'agit de mouvements lents, la présente méthode affirme sa supériorité dès que l'objet se déforme ou se déplace de façon significative pendant le temps nécessaire à l'exécution des mesures directes ou topométriques. Il en serait ainsi, par exemple, d'une construction métallique dont on veut étudier la surface en un grand nombre de points et qui, pendant les nombreuses heures qu'exigerait une micro triangulation, subirait les effets d'une variation de température.

Puisque la méthode enregistre la surface complète de l'objet, elle permet d'effectuer des mesures de façon continue ou en un aussi grand nombre de points qu'il est nécessaire.

Les hologrammes numériques peuvent aussi être conservés; ils sont alors toujours disponibles et permettent des vérifications ou des compléments de mesure.

Ces avantages sont dus essentiellement au mode numérique d'acquisition. Ainsi, les hologramme numérique ont un très vaste domaine d'application qui, du seul point de vue théorique et technique, ne connaît guère d'autres limites que celles de l'acquisition numérique d'image elle-mêmes.

L'utilisation d'hologrammes numériques permet en plus une numérisation <u>automatique</u> de la forme tridimensionnelle d'objets. Le développement de méthodes automatiques ouvre de nouveaux horizons pour les systèmes de vision utilisés en robotique.

On peut citer les exemples d'application suivants:

Dans l'industrie

-Le contrôle de la forme des aubages des turbines hydrauliques et de leurs modèles réduits. (Il s'agit de vérifier, à l'achèvement de la fabrication, le respect du tracé théorique ainsi que la similitude de la pale et du modèle réduit utilisé en laboratoire pour le contrôle des performances de la turbine.)

-L'étude des carrosseries de voiture soit pour une carrosserie déjà construite, soit par relevé d'une maquette à partir de laquelle seront établis les plans définitifs de construction.

En médecine

-Etude de la morphologie de sujets atteints de scoliose et suivi graduel des résultats d'un traitement.

-Etude anthropométrique appliquée à des fins scientifiques ou pour définir des normes dans la confection de vêtements.

-Relevés très fins de la cornée de l'oeil permettant la fabrication de lentilles cornéennes précises, ou la détection de pathologies.

Quelques améliorations sont à envisager; ainsi la version industrielle d'un appareil utilisant la méthode exposée dans ce mémoire nécessitera une procédure de calibration. En effet, tel que présenté dans le mémoire il faut calculer la position des points nodaux chaque fois que l'on change l'ajustement du téléobjectif de la caméra ou du projecteur et ceci appesanti considérablement la procédure de numérisation. Les prochaines recherches que nous ferons seront donc orientées vers la formation d'hologrammes à numérotation continue ainsi que la mise au point d'une procédure de calibration.

ANNEXE A

A : L'intensité lumineuse captée par la caméra

Il s'agit ici de déterminer l'intensité de lumière qui émise par le projecteur atteint le capteur de la caméra. Nous traitons dans cette annexe le problème sans tenir compte du rôle de la grille.

La figure A.1 montre le schéma utilisé pour les explications du texte: un projecteur émet de la lumière sur un élément de surface; une caméra capte la lumière réfléchie par l'élément de surface.

Nous allons suivre les trois étapes importantes que subit l'énergie lumineuse. Soit, le transfert de l'énergie lumineuse du projecteur vers un élément de surface sur l'objet, la réflection dans la direction de la caméra, et le transfert de l'énergie lumineuse de l'élément de surface vers la caméra.

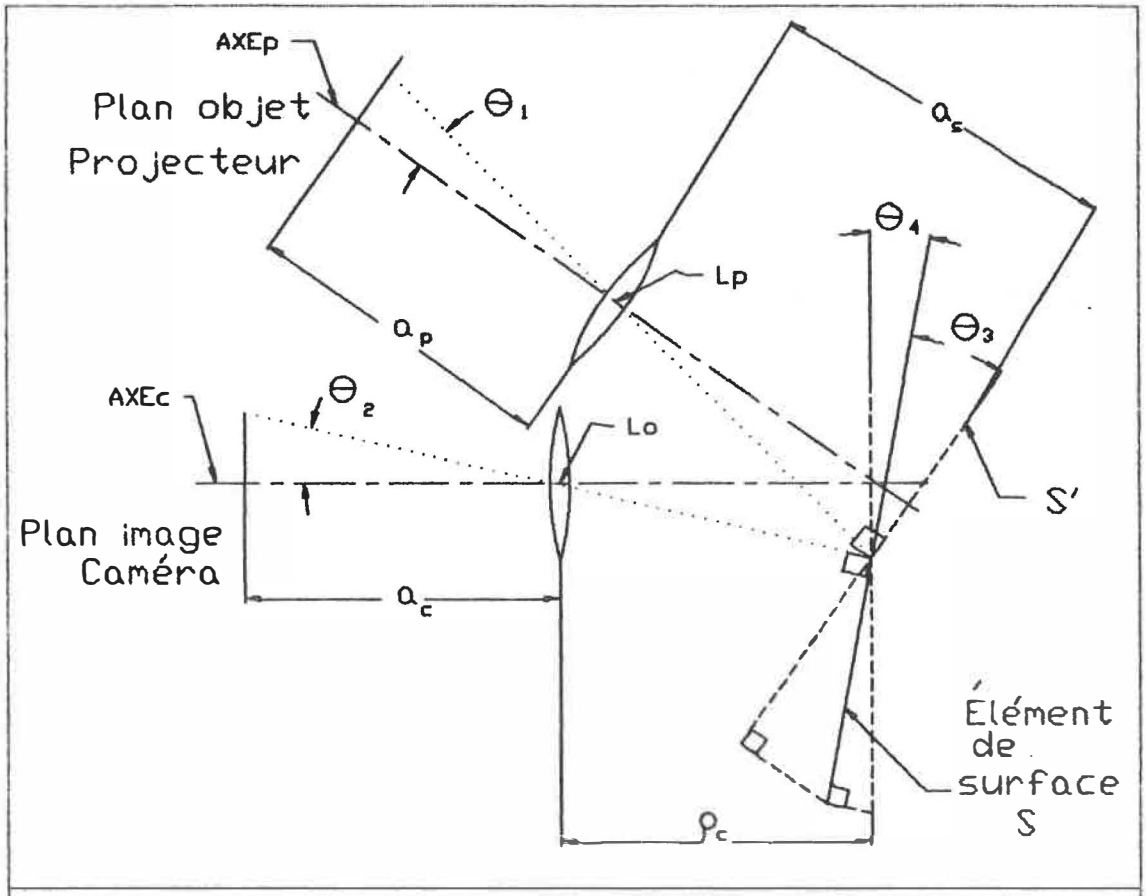

Figure A.1: Schéma d'un rayon émis par un projecteur et capté par une caméra. "AXEc" indique l'axe optique de la caméra; "AXEp" indique l'axe optique du projecteur; "Lo" indique le point nodal, de la caméra; "Lp" indique le point nodal, du projecteur.

A.1 Proportion de l'intensité lumineuse qui émise par le projecteur atteint un élément de surface sur l'objet

L'intensité de l'énergie lumineuse que le projecteur émet n'est pas isotrope, elle est fonction de la direction dans laquelle elle est émise. Ainsi, l'intensité lumineuse

émise par le projecteur $I_o(\theta_1)$ est fonction de l'angle θ_1 entre la normale à la surface du projecteur et la direction de l'objet.

Le projecteur émet son energie lumineuse dans un angle solide Ω_p. L'angle solide dans lequel le projecteur émet est égale à l'angle solide sous-tendu par la portion efficace du plan objet, à la lentille. Ce qui peut être approximé par le rapport de la surface efficace dans le plan objet sur la distance au carré séparant le plan objet de la lentille, a_p^2. Soit:

$$\Omega_p = \frac{S_o \cos\theta_1}{a_p^2} \tag{A.1}$$

où S_o est la surface, dans le plan objet, pouvant être utilisée pour projeter des images;

a_p est la distance entre le plan objet et la lentille (voir figure 3.17);

θ_1 est l'angle entre la direction de projection et l'axe optique du projecteur.

Soit un élément de section S, sur la surface de l'objet, tel que montré à la figure A.1. Pour le projecteur, cet éléments sous-tend un angle solide Ω. Cet

angle solide peut être approximé par le rapport de la surface, S' (figure A.1), sur la distance au carré séparant l'élément du projecteur, a_s^2. Soit:

$$\Omega = \frac{S'}{a_s^2} = \frac{S\cos\theta_3}{a_s^2}$$

(A.2)

où S est l'élément de surface considéré sur l'objet;

a_s est la distance entre la lentille et l'élément de surface (voir figure 3.17);

θ_3 est l'angle entre la surface de l'élément et la direction de projection.

Nous obtenons l'intensité projetée incidente sur l'élément, I_{pi}:

$$I_{pi} = I_o(\theta_1)\left[\frac{S\cos\theta_3}{a_s^2}\right]\left[\frac{a_p^2}{S_o\cos\theta_1}\right]$$

(A.3)

L'intensité de l'énergie lumineuse incidente sur la surface est donc fonction de l'inclinaison de cette surface.

A.2 Proportion de l'intensité lumineuse incidente qui est réfléchie par l'élément de surface

La réflexion du rayonnement est un phénomène complexe: elle fait appel au concept de réflectivité, qui se définit comme le ratio d'un flux énergétique réfléchi sur un flux énergétique incident.

Selon le type de flux incident et de flux réfléchi, on définit plusieurs types de réflectivité[64]. Cependant, un grand nombre de surfaces présentent une réflection diffuse, c'est-à-dire qu'une partie de l'intensité lumineuse réfléchie, l'est uniformément dans toutes les directions. C'est ce type de surface, ayant une composante de réflection diffuse, qui nous intéresse car, pour être détectée, la surface doit réfléchir de la lumière vers la caméra.

Un élément de surface S recevant une intensité lumineuse I_{pi} d'un projecteur absorbera une partie αI_{π}, tandis qu'une autre partie ρI_{π} sera réfléchie dans l'espace environnant. Or ρ est fonction de l'angle d'incidence θ_3 et de la nature de la surface. Quant à la répartition de l'intensité réfléchie, elle sera en général fonction de l'angle d'observation θ_4 (voir figure A.1).

En combinant les équations précédentes, on obtient l'intensité émise par l'élément de surface, I_{se}:

$$I_{se} = \rho(\theta_3, \theta_4) I_o(\theta_1) \left[\frac{S \cos\theta_3}{a_s^2} \right] \left[\frac{a_p^2}{S_o \cos\theta_1} \right]$$

(A.4)

A.3 Proportion de l'intensité lumineuse qui émise par un élément de surface sur l'objet atteint la caméra

L'élément de surface S agit à la manière d'une source pour la caméra (voir figure A.1). On suppose que tout rayon lumineux émanant de l'élément et passant par l'ouverture de rayon R de la caméra atteint le même élément de surface sur le capteur de la caméra. Le système optique de la caméra présente alors une surface S_c:

$$S_c = \pi R^2$$

(A.5)

Une telle surface sous-tend un angle solide Ω_c, au centre de l'élément de surface sur l'objet. Nous avons:

$$\Omega_c = \frac{\pi R^2 \cos\theta_4}{\rho_c^2}$$

(A.6)

où R est le rayon de la lentille de la caméra;

ρ_c est la distance entre la lentille et l'élément de surface;

θ_4 est l'angle entre la surface de l'élément et la direction d'observation.

On suppose que l'élément de surface émet dans un angle solide de 2π. Si la surface S de l'élément correspond à un pixel, nous avons:

$$S\cos\theta_4 = \rho_c^2 \frac{S_i \cos\theta_2}{a_c^2 \tan^2\theta_2}$$

(A.7)

où S_i est la surface d'un pixel dans le plan image de la caméra;

a_c est la distance entre le plan image et la lentille (voir figure 3.17).

En combinant les équations précédentes, on obtient l'intensité captée par la caméra, I_{ci}:

$$I_{ci} = \rho(\theta_3,\theta_4) I_o(\theta_1) \left[\frac{\rho_c^2 S_i \cos\theta_2 \cos\theta_3}{a_s^2 a_c^2 \tan^2\theta_2} \right] \left[\frac{a_p^2}{S_o \cos\theta_1} \right] \left[\frac{\pi R^2 \cos\theta_4}{2\pi\rho_c^2} \right]$$

$$= \left[\frac{a_p^2 R^2 S_i}{2 a_s^2 a_c^2 S_o} \right] \rho(\theta_3,\theta_4) I_o(\theta_1) \left[\frac{\cos\theta_2 \cos\theta_3 \cos\theta_4}{\cos\theta_1 \tan^2\theta_2} \right]$$

(A.8)

L'équation précédente montre une forte variation de l'intensité lumineuse en fonction de l'orientation de

l'élément de surface. Il est donc impossible de connaître l'intensité lumineuse incidente sans avoir une connaissance de la forme de l'objet observé. Mais d'une façon générale, on peut dire que l'intensité lumineuse captée ne peut être uniforme.

ANNEXE B

B Explications algébriques

B.1 Equation du degré d'élévation

Nous définissons un système de référence, (x_c, y_c) dans le plan image de la caméra et un système de référence, (x_p, y_p) dans le plan objet du projecteur (voir figure B.2).

Les relations entre les coordonnées (x_c, y_c) d'un point image A_i et les coordonnées (x, y, z) du point objet A_o s'obtiennent de la figure B.1;

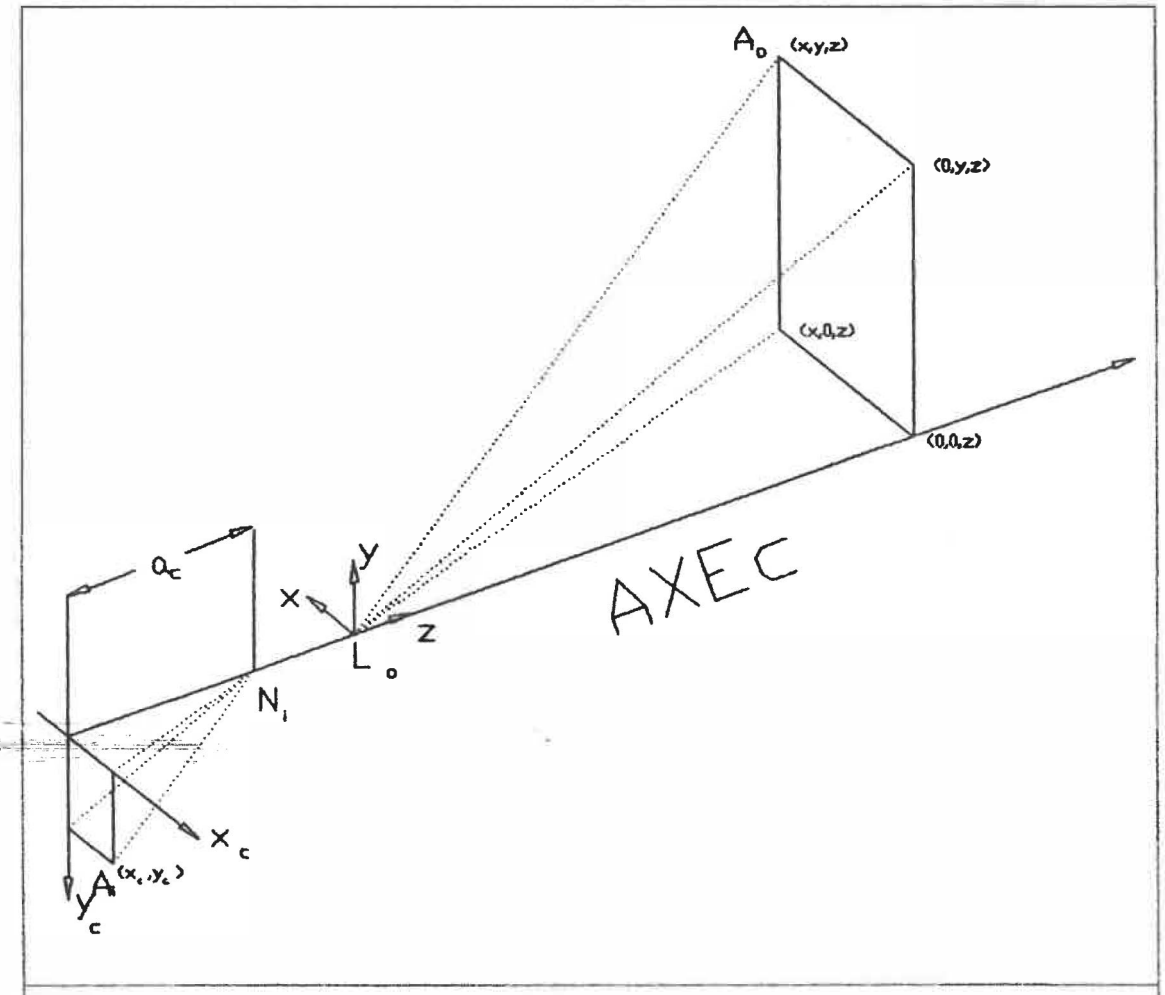

Figure B.1: Formation d'une image à partir de rayons passant par les points nodaux de la caméra

$$x = \frac{z}{a_c} x_c \tag{B.9}$$

$$y = \frac{z}{a_c} y_c \tag{B.10}$$

où a_c est la distance entre le point nodal image et le plan image;

x_c et y_c sont les coordonnées du point Ai dans le référentiel du plan image;

z est la distance sur l'axe AXEc entre le point nodal objet et le point Ao.

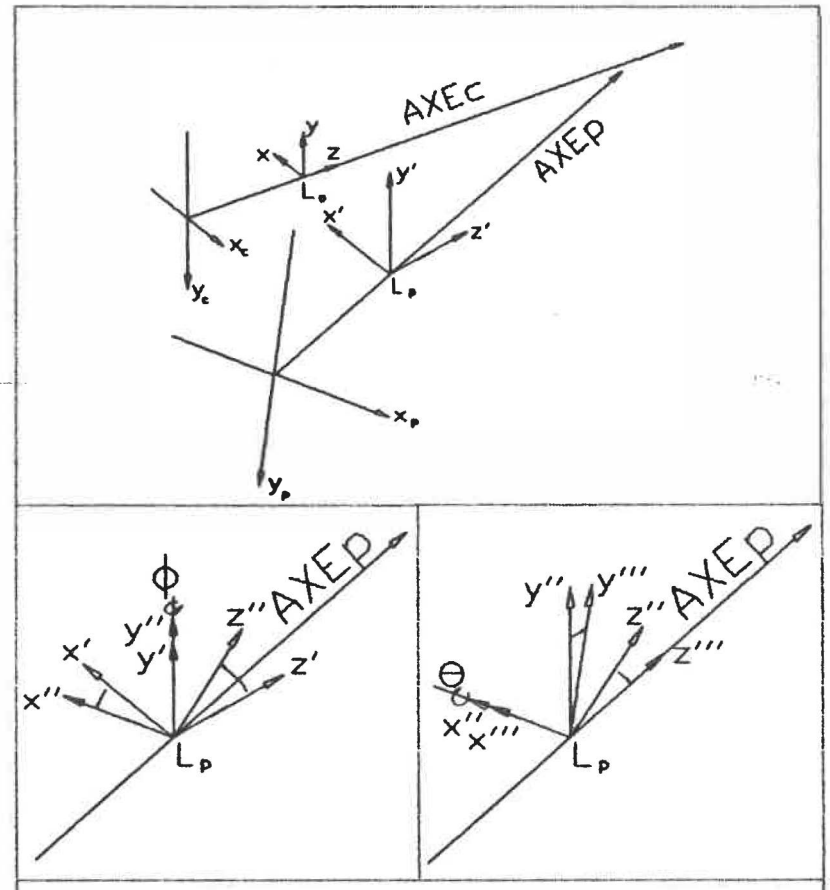

Figure B.2: Relations entre les référentiels

L'origine du système de coordonnées (x''',y''',z''') est située au point nodal L_p du système optique du projecteur, et l'axe optique du système du projecteur AXEp coïncide avec l'axe des z'''(voir les figures B.2 et B.3).

Nous considérons un autre système de coordonnées (x',y',z') avec des axes parallèles au système (x,y,z) mais dont l'origine est au point nodal L_p(voir figure B.2).

On fait pivoter d'un angle ϕ autour de l'axe y' ce système, de sorte à donner un système d'axe (x'',y'',z''), tel que l'axe optique du système de projection AXEp soit dans le plan y''-z''(voir figure B.2).

Puis on fait pivoter ce dernier système (x'',y'',z'') autour de l'axe x'' d'un angle θ de tel sorte à ce que l'axe z''', de se nouveau système (x''',y''',z'''), coïncide avec l'axe optique du système de projection (voir figure B.2).

La position du point nodal image du système de projection L_p est situé au coordonnées (x_{op},y_{op},z_{op}) par rapport au système (x,y,z).

Le point (x,y,z) dans l'espace de l'objet est alors relié au point (x'',y'',z'') dans le système de coordonnées de projection par la relation suivante:

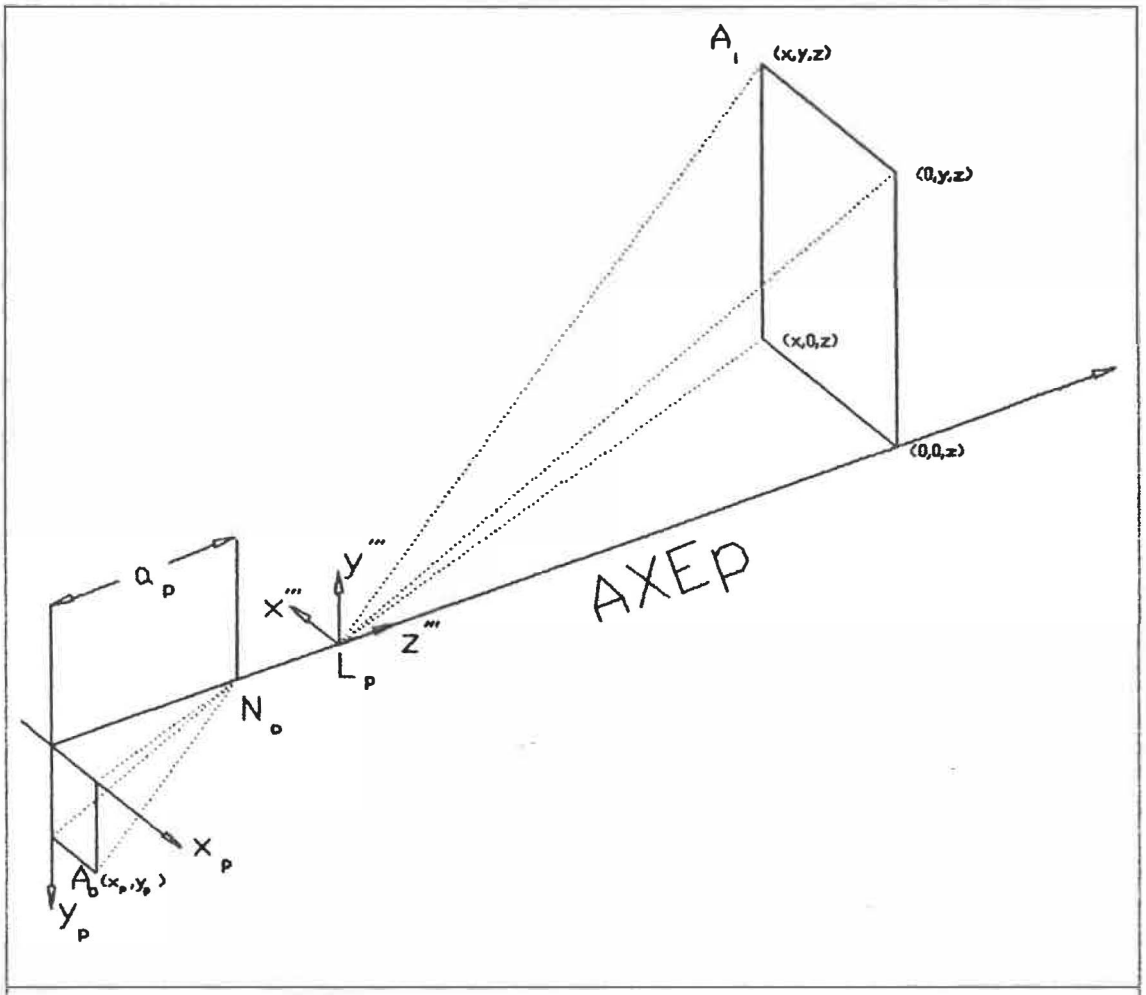

Figure B.3: Formation d'une image à partir de rayons passant par les points nodaux du projecteur

$$\begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ \sin\theta\sin\phi & \cos\theta & \sin\theta\cos\phi \\ \cos\theta\sin\phi & -\sin\theta & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_{op} \\ y - y_{op} \\ z - z_{op} \end{bmatrix}$$

(B.11)

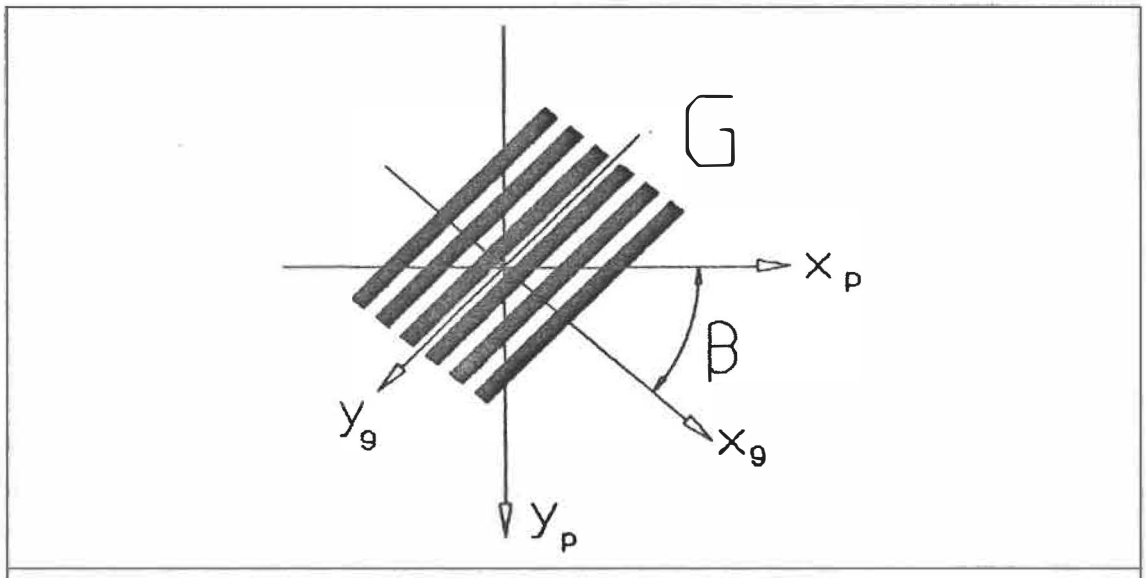

Figure B.4: Schéma de la relation entre les axes du projecteur (x_p, y_p) et les axes principaux de la grille.

La grille de Ronchi n'est pas nécessairement allignée avec le repère (x_p, y_p)(voir figure B.4). La relation entre le point (x_g, y_g) sur la grille et le point (x_p, y_p) dans le plan objet du projecteur est;

$$x_p = x_g \cos(\beta) - y_g \sin(\beta) \tag{B.12}$$

$$y_p = x_g \sin(\beta) + y_g \cos(\beta) \tag{B.13}$$

La relation entre le point (x_g, y_g) dans le plan de la grille et le point (x''', y''', z''') dans le plan de projection est (voir figure B.3 et les équations B.4, B.5);

$$x''' = \frac{z'''}{a_p} x_p = \frac{z'''}{a_p}(x_g \cos(\beta) - y_g \sin(\beta))$$

(B.14)

$$y''' = \frac{z'''}{a_p} y_p = \frac{z'''}{a_p}(x_g \sin(\beta) + y_g \cos(\beta))$$

(B.15)

La largeur des bandes de la grilles de projection est T_g et ces bandes opaques sont numérotées par la variable n_g. L'abscisse dans le plan de la grille est alors;

$$x_g = 2T_g(n_g + \delta_g)$$

(B.16)

où δ_g tient compte du décalage du centre des bandes par rapport au centre du référentiel (x_p, y_p) qui lui correspond à l'axe optique du projecteur.

Pour exprimer la relation entre le point (x_c, y_c) et le point (x, y, z) dans l'espace de l'objet nous avons des équations B.3, B.6 et B.7;

$$(x - x_{op})\cos\phi - (z - z_{op})\sin\phi$$

$$= \frac{1}{a_p}(x_g \cos\beta - y_g \sin\beta)[(x - x_{op})\cos\theta \sin\phi$$

$$-(y - y_{op})\sin\theta + (z - z_{op})\cos\theta \cos\phi]$$

(B.17)

$$(x-x_{op})\sin\theta\sin\phi+(y-y_{op})\cos\theta+(z-z_{op})\sin\theta\cos\phi$$
$$=\frac{1}{a_p}(x_g\sin\beta+y_g\cos\beta)[(x-x_{op})\cos\theta\sin\phi$$
$$-(y-y_{op})\sin\theta+(z-z_{op})\cos\theta\cos\phi]$$

(B.18)

En éliminant y_g des équations B.9 et B.10 il vient;

$$(x-x_{op})(\cos\phi\cos\beta+\sin\theta\sin\phi\sin\beta)$$
$$+(y-y_{op})\cos\theta\sin\beta-(z-z_{op})(\sin\phi\cos\beta-\sin\theta\cos\phi\sin\beta)$$
$$=\frac{x_g}{a_p}[(x-x_{op})\cos\theta\sin\phi-(y-y_{op})\sin\theta+(z-z_{op})\cos\theta\cos\phi]$$

(B.19)

En substituant les équations B.1, B.2 et B.8 dans l'équation B.11 nous obtenons:

$$z = \frac{a_c\{2T_g(n_g+\delta_g)(x_{op}k_1 - y_{op}k_2 + z_{op}k_3) - a_p(x_{op}k_4 + y_{op}k_5 + z_{op}k_6)\}}{2T_g(n_g+\delta_g)(x_ck_1 - y_ck_2 + a_ck_3) - a_p(x_ck_4 + y_ck_5 + a_ck_6)}$$

où

$$\left\{\begin{array}{l} k_1 = \cos\theta\sin\phi \\ k_2 = \sin\theta \\ k_3 = \cos\theta\cos\phi \\ k_4 = \cos\phi\cos\beta + \sin\theta\sin\phi\sin\beta \\ k_5 = \cos\theta\sin\beta \\ k_6 = \sin\theta\cos\phi\sin\beta - \sin\phi\cos\beta \end{array}\right\}$$

(B.20)

L'équation B.12 permet de calculer la distance a_s entre le point nodal de la caméra L_o et la surface de l'objet (voir figure B.5). Cette distance est obtenue en substituant les valeurs correspondantes à l'origine du référentiel (x_c, y_c). Nous avons alors; $x_c = 0$, $y_c = 0$, et $n_g = n_{go}$. Le terme n_{go} est le numéro de bande de la grille dont l'image sur l'objet intercepte l'axe optique de la caméra. Ce terme est donc une valeur obtenue expérimentalement. Nous obtenons avec l'équation B.12;

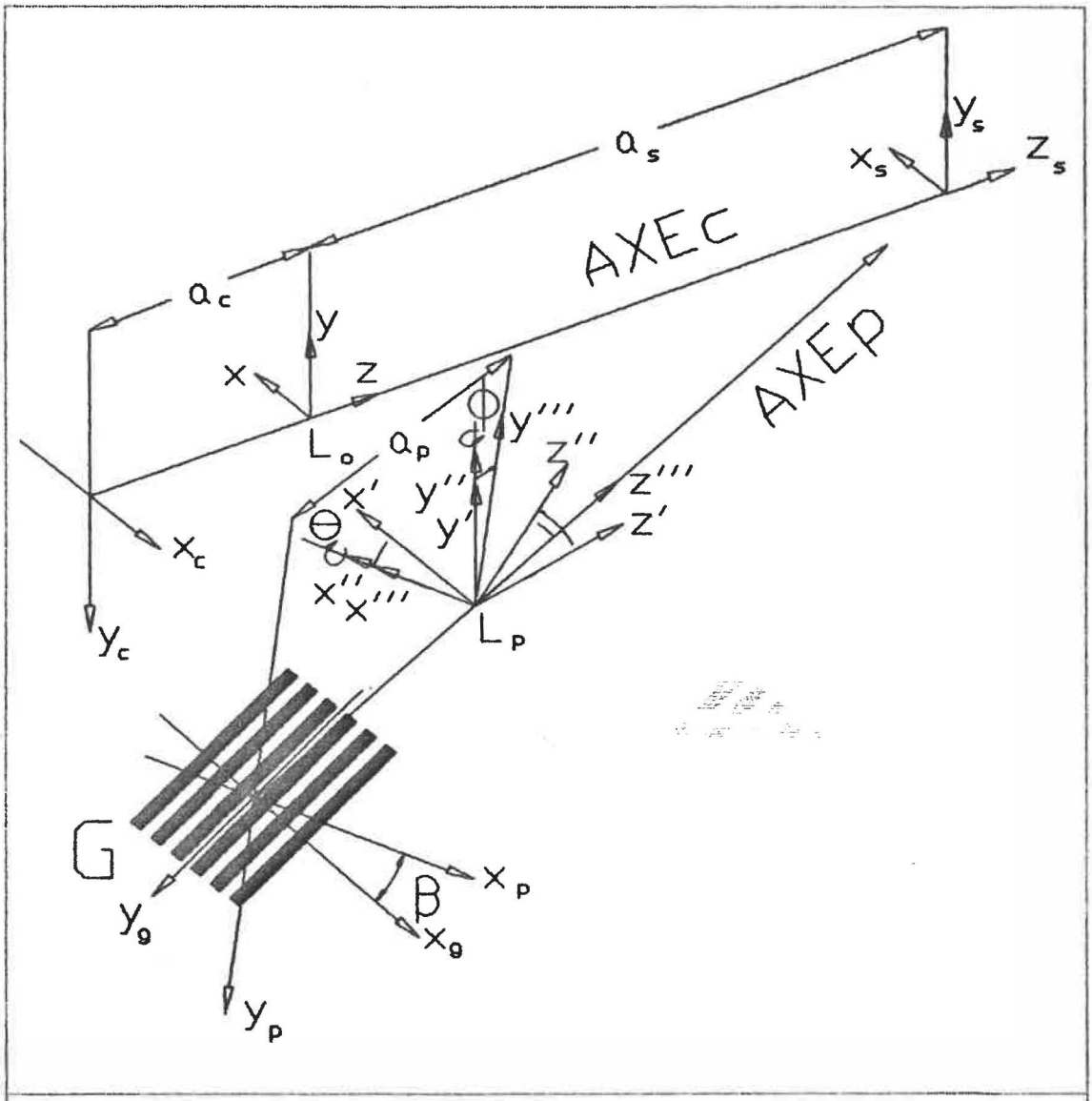

Figure B.5: Schéma de la géométrie du montage: "G" la grille; "Lo" point nodal du système de la caméra; "Lp" point nodal du système de projection; "AXEc" l'axe optique de la caméra; "AXEp" l'axe optique du projecteur.

$$a_s = \frac{2T_g\delta(x_{op}k_1 - y_{op}k_2 + z_{op}k_3) - a_p(x_{op}k_4 + y_{op}k_5 + z_{op}k_6)}{2T_g\delta k_3 - a_p k_6}$$

avec $\delta = n_{go} + \delta_g$.

(B.21)

Nous avons les coordonnées (x_s, y_s, z_s) qui décrivent la surface de l'objet dans l'espace à partir du référentiel(x_s, y_s, z_s) sur la surface de l'objet;

$$x_s = (z_s + a_s)x_c / a_c$$

(B.22)

$$y_s = (z_s + a_s)y_c / a_c$$

(B.23)

$$z_s = \frac{a_c\{2T_g(n_g + \delta_g)(x_{op}k_1 - y_{op}k_2 + z_{op}k_3) - a_p(x_{op}k_4 + y_{op}k_5 + z_{op}k_6)\}}{2T_g(n_g + \delta_g)(x_c k_1 - y_c k_2 + a_c k_3) - a_p(x_c k_4 + y_c k_5 + a_c k_6)} - a_s$$

(B.24)

B.2 Largeur de la bande centrale de la grille dans le plan image de la caméra

On veut avoir T_c la largeur selon l'axe des x_c des bandes de la grille dans le plan image de la caméra.

Ceci est réalisé en substituant dans l'équation B.9 les termes suivant:

$$x_g = T_g; \qquad y_g = 0; \qquad y = 0;$$

$$x = \frac{zT_c}{a_c}; \qquad z = a_s.$$

(B.25)

Nous avons ainsi:

$$T_c = \frac{a_c}{a_s}\left(\frac{T_g k_9[-x_{op}k_1 + y_{op}k_2 + (a_s - z_{op})k_3] + a_p[x_{op}k_7 + (a_s - z_{op})k_8]}{a_p k_7 - T_g k_1 k_9}\right)$$

ou

$$\left\{\begin{array}{l} k_7 = \cos\phi \\ k_8 = \sin\phi \\ k_9 = \cos\beta \end{array}\right\}$$

(B.26)

B.3 Largeur des bandes de la grille de Ronchi requise

On veut avoir T_g la largeur la largeur des bandes de la grille en fonction de T_c la largeur des bandes de l'hologramme.

Ceci est réalisé en substituant dans l'équation B.9 les termes suivant:

$$x_g = T_g; \qquad y_g = 0; \qquad y = 0;$$

$$x = \frac{zT_c}{a_c}; \qquad z = a_s.$$

(B.27)

Nous avons ainsi:

$$T_g = \frac{a_p}{k_9}\left(\frac{(a_s T_c - x_{op} a_c)k_7 - a_c(a_s - z_{op})k_8}{(a_s T_c - a_c x_{op})k_1 + y_{op} a_c k_2 + a_c(a_s - z_{op})k_3}\right)$$

ou

$$\left\{\begin{array}{l} k_7 = \cos\phi \\ k_8 = \sin\phi \\ k_9 = \cos\beta \end{array}\right\}$$

(B.28)

ANNEXE C

C : Calcul de la position du point nodal de la caméra.

La présente annexe porte sur le calcul de la position du point nodal de la caméra, par rapport à un référentiel fixé sur le banc d'optique de la caméra.

Cette annexe est divisée en cinq étapes, soit: la formulation des équations; le changement de référentiel pour ajuster les données expérimentales; la position de l'axe optique de la caméra dans le plan image de la caméra; les mesures expérimentales; les résultats expérimentaux.

C.1 Formulation des équations

Le champ angulaire est la portion de l'espace objet dont l'objectif de la caméra donne une image. La figure C.1 montre un schéma sur lequel le champ angulaire d'une lentille simple est dessiné. Sur cette figure sont aussi dessinés des rayons asymptotiques au champ angulaire et passant par les points nodaux. Le champ angulaire peut donc être caractérisé par la valeur de l'angle α. De la figure

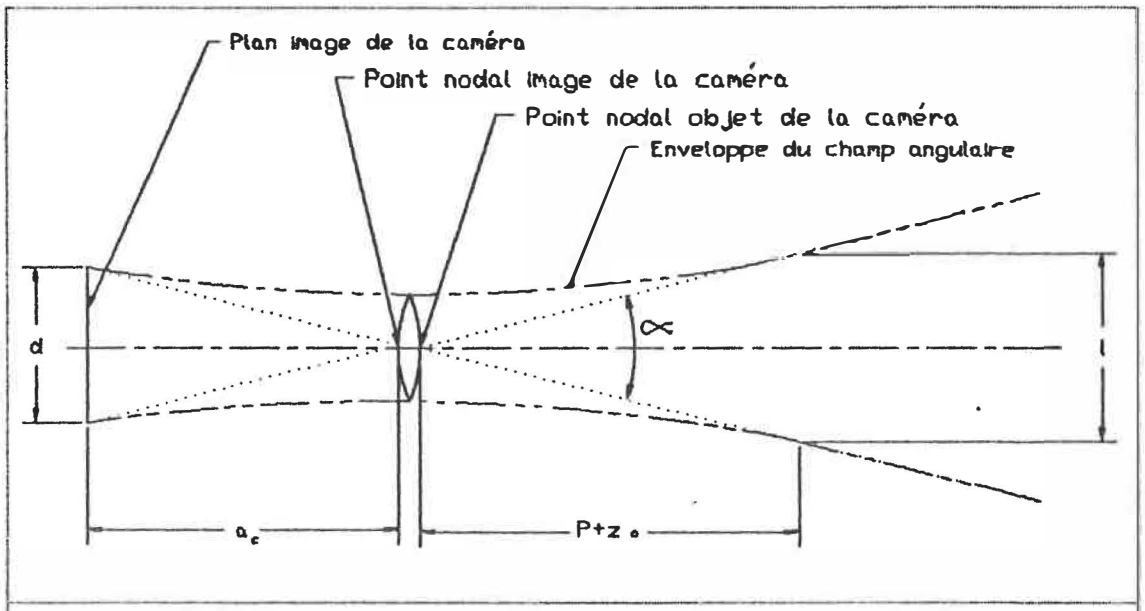

Figure C.1: Schéma du champ angulaire de la caméra

C.1, nous avons les relations:

$$\frac{d}{2a_c} = \frac{l}{2(P+z_0)} = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{C.1}$$

où l est le diamètre du cône;

$(P+z_0)$ est la distance entre le point nodal de la caméra et l'endroit de mesure du diamètre l;

d est le diamètre du cône dans le plan image;

a_c est la distance entre le point nodal image et le plan image.

Comme le montre la figure C.1, les points nodaux d'un système optique convergeant sont à l'intérieur des limites physiques de celui-ci. La position exacte de ces points n'est toutefois pas directement mesurable.

En effet, les points nodaux étant des points mathématiques, leur position ne peut être que calculée. On peut toutefois mesurer la valeur de z_o à partir d'un point arbitraire à une distance P inconnue du point nodal de la caméra. En effectuant la même mesure pour plusieurs autres positions z_o, il est alors possible de calculer la position inconnue P du point nodal.

Soit l'équation précédente sous la forme:

$$l = \frac{d}{a_c}(P + z_o)$$

(C.1)

Par régression linéaire sur des points expérimentaux, nous pouvons obtenir une droite d'équation:

$$y = ax + b$$

(C.2)

Des équations précédentes, nous avons que la pente "a" de la droite de régression est égale à:

$$a = \frac{d}{a_c}$$

(C.3)

Alors que l'ordonnée à l'origine "b" est égale à:

$$b = \frac{d}{a_c} P$$

(C.4)

Ces deux équations nous donnent:

$$P = \frac{b}{a}$$

$$a_c = \frac{d}{a}$$

(C.5)

Afin d'être utile, la mesure de position du point nodal doit être réalisée dans les mêmes conditions expérimentales que celles utilisées pour capter la forme tridimensionnelle de l'objet. C'est-à-dire que l'écran sur lequel sont réalisées les mesures de diamètre doit être situé au même endroit que l'objet dont on désire mesurer la forme.

C.2 Transposition des équations dans le plan image de la caméra

L'enveloppe du champ angulaire n'étant pas visible dans le domaine objet, il n'est pas possible de mesurer directement les diamètres tel que décrit précédemment. C'est pourquoi il faut trouver une technique qui nous donne la même information, mais qui ne requiert pas de mesure dans le domaine objet.

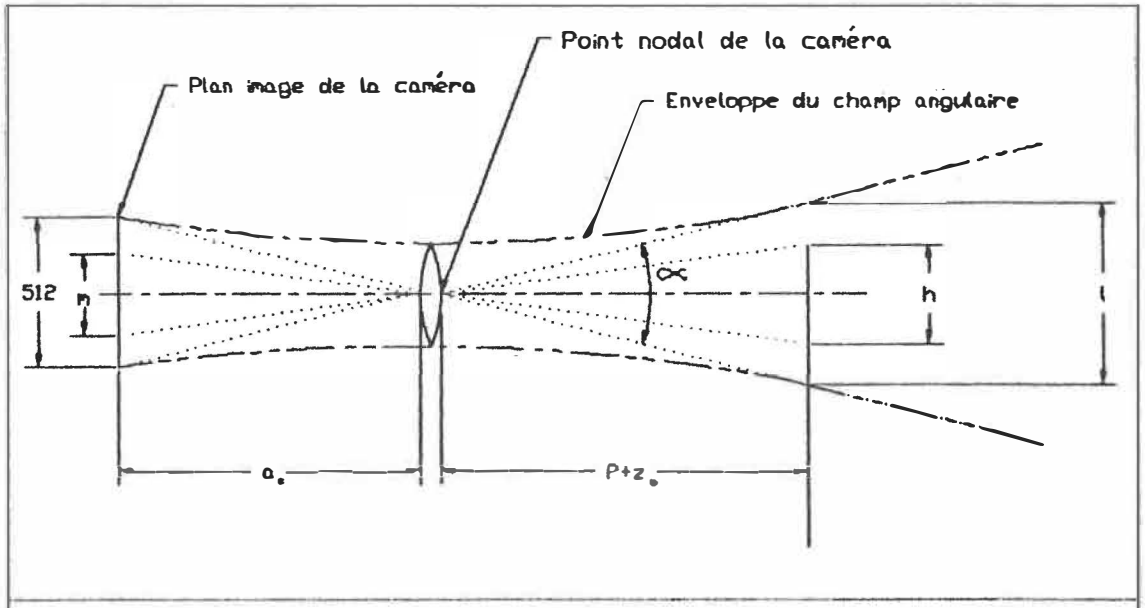

Figure C.2: Schéma du champ angulaire de la caméra

Le nombre de pixels en largeur sur lesquels sont numérisées les images dans le système Occulus-200 est de 512. Si on place devant la caméra un objet de largeur

connue h à une distance z_0 et qu'on mesure sa largeur en pixels, m, la figure C.2 nous montre que nous avons l'équation suivante:

$$l = \frac{512h}{m}$$

(C.6)

Cette formulation est aussi possible, en tenant compte de légères modifications, pour un objet mesuré en hauteur. Le nombre de pixels en hauteur sur lesquels sont numérisées les images dans le système Occulus-200 est de 480. Si on place devant la caméra un objet de hauteur connue h à une position z_0 et que on mesure sa hauteur en pixels, m, nous avons:

$$l = \frac{480h}{m}$$

.

(C.7)

Il est aussi nécessaire de connaître la distance a_c entre le plan image et le point nodal. Or selon l'équation C.3, nous avons, horizontalement;

$$a_c = \frac{512}{a}$$

(C.8)

et verticalement:

$$a_c = \frac{480}{a}$$

(C.9)

La pente des droites n'ayant pas d'unité, la grandeur a_c est connue en nombre de pixels. Le rapport des dimensions d'un pixel est tel que l'on doit multiplier par 0.8 le nombre de pixels verticaux pour avoir le nombre équivalent en pixels horizontaux:

$$pixel\ \ vertical \Leftrightarrow 0.8 pixel\ \ horizontal$$

(C.10)

C.3 Position de l'axe optique de la caméra dans le plan image de la caméra

Tel que montré sur la figure C.2, les mesures doivent être réalisées de part et d'autre de l'axe optique de la caméra. Il faut donc déterminer la position de cet axe optique dans le plan image de la caméra.

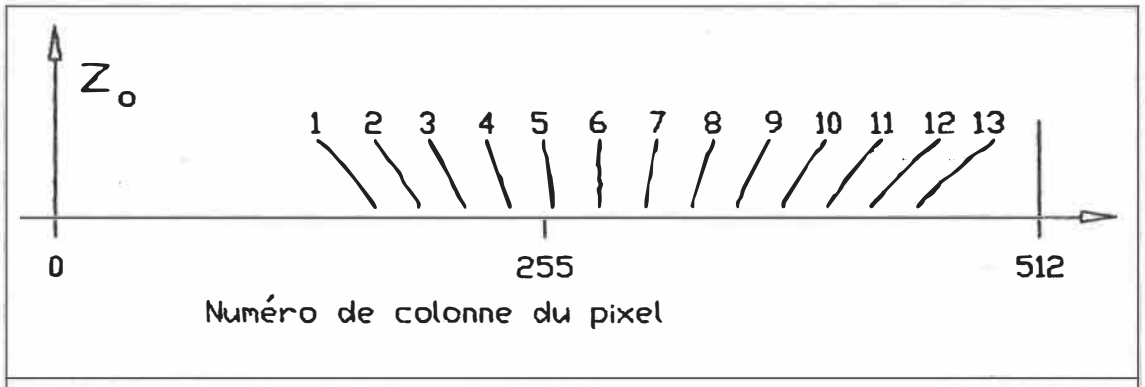

Figure C.3: Dessin des données expérimentales dans le plan image de la caméra, de la position de 13 carreaux sur la ligne 239, pour 14 positions de la grille. "z_o" indique l'axe de mesure du banc de la caméra.

La position de l'axe optique est déterminée comme suit: on place devant la caméra une grille carrelée (voir figure 4.5); on numérise l'image de cette grille; on enregistre sur disque la ligne de pixels 239 et la colonne de pixels 255.

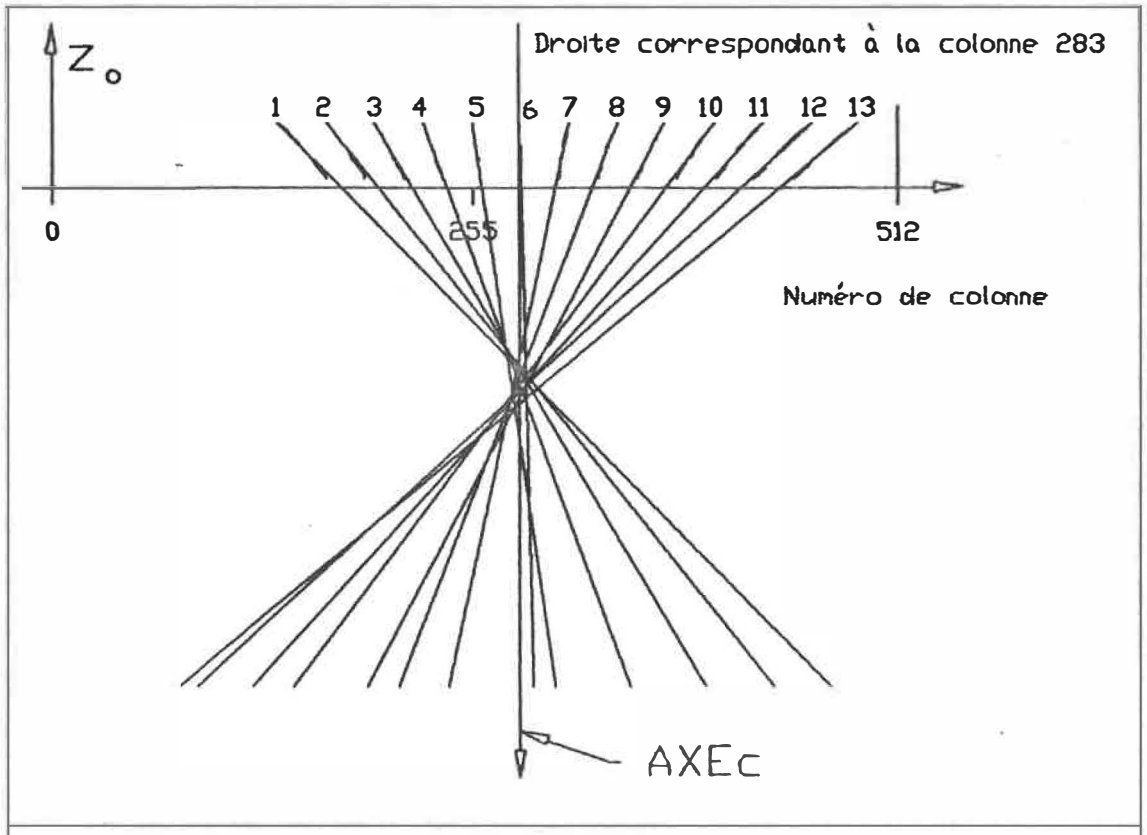

Figure C.4: Schéma des droites prolongeant les points expérimentaux vers un lieu d'intersection (cas de la ligne de pixels). "z_0" indique l'axe de mesure du banc de la caméra; "AXEc" indique l'axe optique de la caméra.

Tel que montré à la figure C.7, on mesure la position, en pixels des bandes noires de la grille. On effectue cette opération pour plusieurs positions sur le banc d'optique. On trace ensuite le dessin des lignes joignant chaque bande noire, en fonction de la position sur le banc d'optique (voir figure C.3 et C.5).

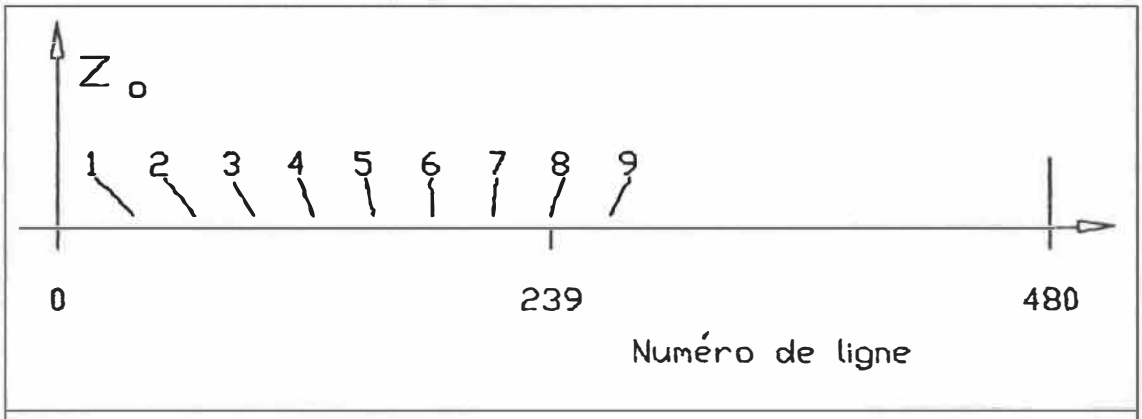

Figure C.5: Dessin des données expérimentales dans le plan image de la caméra, de la position de 9 carreaux sur la colonne 255, pour 10 positions de la grille. "z_o" indique l'axe de mesure du banc de la caméra.

L'opération précédente correspond à tracer les rayons lumineux dans l'espace image. Ces rayons formant l'image des bandes de la grille, dans le plan image de la caméra, doivent s'intercepter à la position de l'axe optique de la caméra. On prolonge donc les droites, ce qui nous donne les figures C.4 et C.6. De ces dernières, on trouve que l'axe optique est sur la ligne 183 et sur la colonne 283.

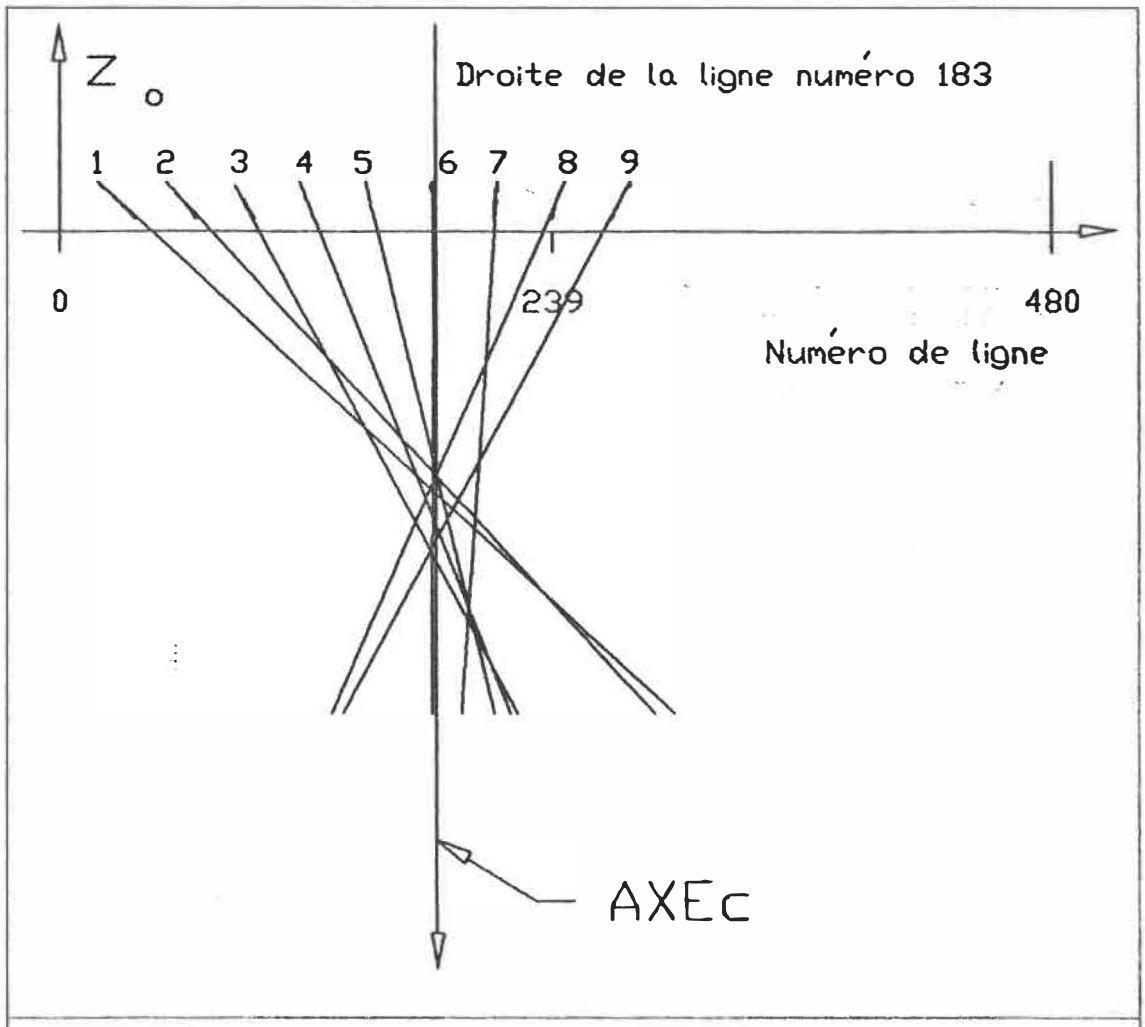

Figure C.6: Schéma des droites prolongeant les points expérimentaux vers un lieu d'intersection (cas de la colonne de pixels). "z_o" indique l'axe de mesure du banc de la caméra; "AXEc" indique l'axe optique de la caméra.

C.4 Données expérimentales

Le point nodal d'un système convergent tel que celui de la caméra se trouve nécessairement à l'intérieur des

limites physiques des lentilles formant le système optique. Nous allons donc prendre comme point de référence pour mesurer z_0, la position médiane des deux lentilles.

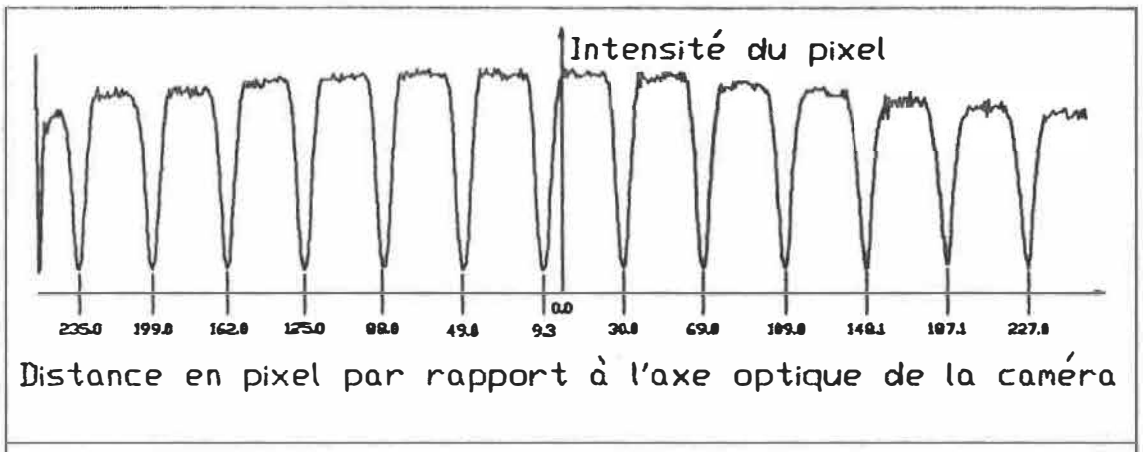

Figure C.7: Graphique de la valeur numérique des pixels en fonction de leur numéro de colonne.

La lentille externe du zoom de la caméra est à $z_0 = 1640mm$, alors que la caméra est à $z_0 = 1740mm$ (voir figure C.8). Nous allons donc nous référer au point $z_0 = 1690mm$ sur le banc de la caméra.

La mesure est réalisée en plaçant devant la caméra une grille carrelée telle que montré à la figure 4.5 du texte. Après avoir fait l'acquisition numérique de l'image de cette grille, on prélève la ligne et la colonne de pixel, à l'aide du programme OCCLGN (voir annexe G). Ce programme écrit un fichier utilisable par le logiciel Autocad. On utilise donc le logiciel Autocad pour mesurer la position

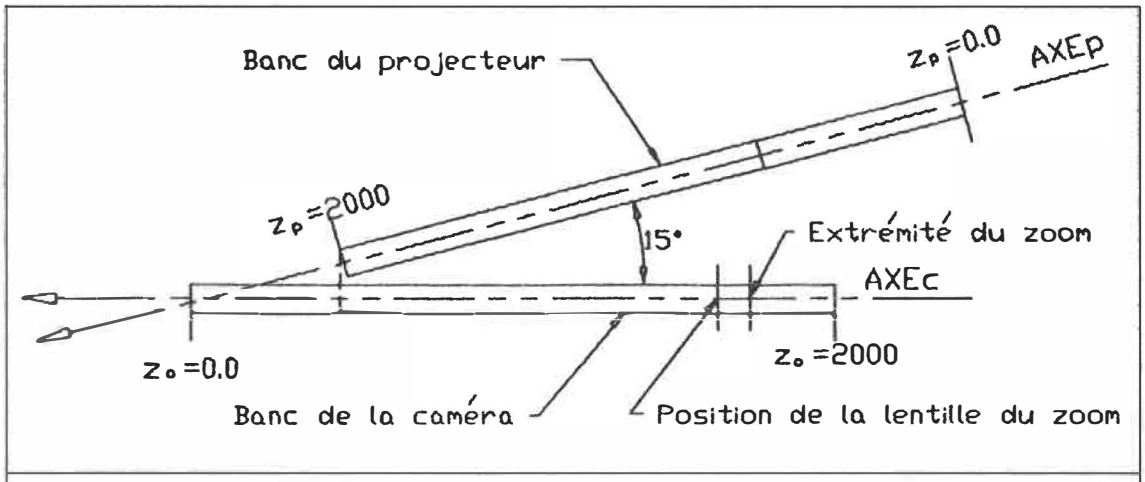

Figure C.8: Dessin du montage expérimental montrant le banc d'optique avec son axe de mesure des positions z_o. "AXEc" indique l'axe optique de la caméra; "AXEp" indique l'axe optique du projecteur.

en pixels des quadrillages de la grille. La figure C.7 montre le résultat de cette opération qui constitue les données expérimentales.

Les dimensions des mailles de la grille ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse. Le grillage utilisé est carré, les espaces entre les bandes métalique mesurent 0.947 cm et les bandes métalliques ont une largeur de 0.320 cm. Ce qui donne une distance entre les mailles de 1.267 cm.

Les axes principaux du carrelage utilisé ne correspondent pas aux axes principaux de la carte OCCULUS,

qui sont ici la ligne et la colonne de pixels. Toutefois, l'angle mesuré avec le programme OCCLGN (voir annexe G) est de 0.4±0.1°.

	Numéro du quadrillage correspondant au numéro de colonne inscrit dans les cases.					
z_o	1	2	3	4	5	6
6	166	189	213	237	259	284
8	165	189	213	236	259	284
10	163	188	212	236	259	284
12	162	186	210	235	259	284
14	160	185	209	234	259	283
16	159	183	209	233	259	284
18	158	182	207	232	259	285
20	156	181	206	232	258	283
22	154	180	206	232	258	284
24	153	179	205	230	257	284
28	150	176	202	229	256	283
32	146	172	201	227	256	283
36	143	170	197	227	255	284
40	137	167	195	225	255	284

Tableau C.1: Tableau des valeurs expérimentales pour une ligne de pixels et 14 positions de la grille

	Numéro du quadrillage correspondant au numéro de colonne inscrit dans les cases.						
z_0	7	8	9	10	11	12	13
6	308	332	355	379	402	425	449
8	308	332	355	379	404	428	451
10	309	332	357	381	405	429	453
12	309	333	358	382	407	432	455
14	308	333	358	383	408	432	458
16	309	334	359	385	410	435	459
18	309	335	360	385	411	436	460
20	309	335	361	388	413	439	464
22	310	336	362	388	415	440	466
24	310	336	363	389	415	442	468
28	310	338	365	392	419	446	472
32	311	339	367	395	422	450	477
36	313	342	369	398	427	456	484
40	314	343	372	401	430	460	488

Tableau C.2 (suite): Tableau des valeurs expérimentales pour une ligne de pixels, et 14 positions de la grille.

	Numéro du quadrillage correspondant au numéro de ligne inscrit dans les cases.										
z_0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	36	66	95	124	153	182	211	239	268	296	325
8	35	64	94	122	153	182	211	240	269	297	327
10	33	63	93	122	152	182	211	240	269	299	328
12	31	62	91	122	151	182	211	241	271	300	330
14	29	60	91	121	151	182	211	241	272	301	332
16	27	59	89	119	150	182	212	242	273	304	334
18	25	56	88	119	150	182	212	243	273	304	336
20	23	55	87	118	150	181	212	244	274	306	338
22	20	53	86	118	150	181	213	245	277		
24	19	51	84	117	149	182	213	245	277		

Tableau C.3: Tableau des valeur expérimentales pour une ligne de pixel, et 14 positions de la grilles

C.5 Statistiques et résultats

Les figures C.9 et C.10 montrent un graphique, ainsi que la droite de régression linaire pour les points pris globalement.

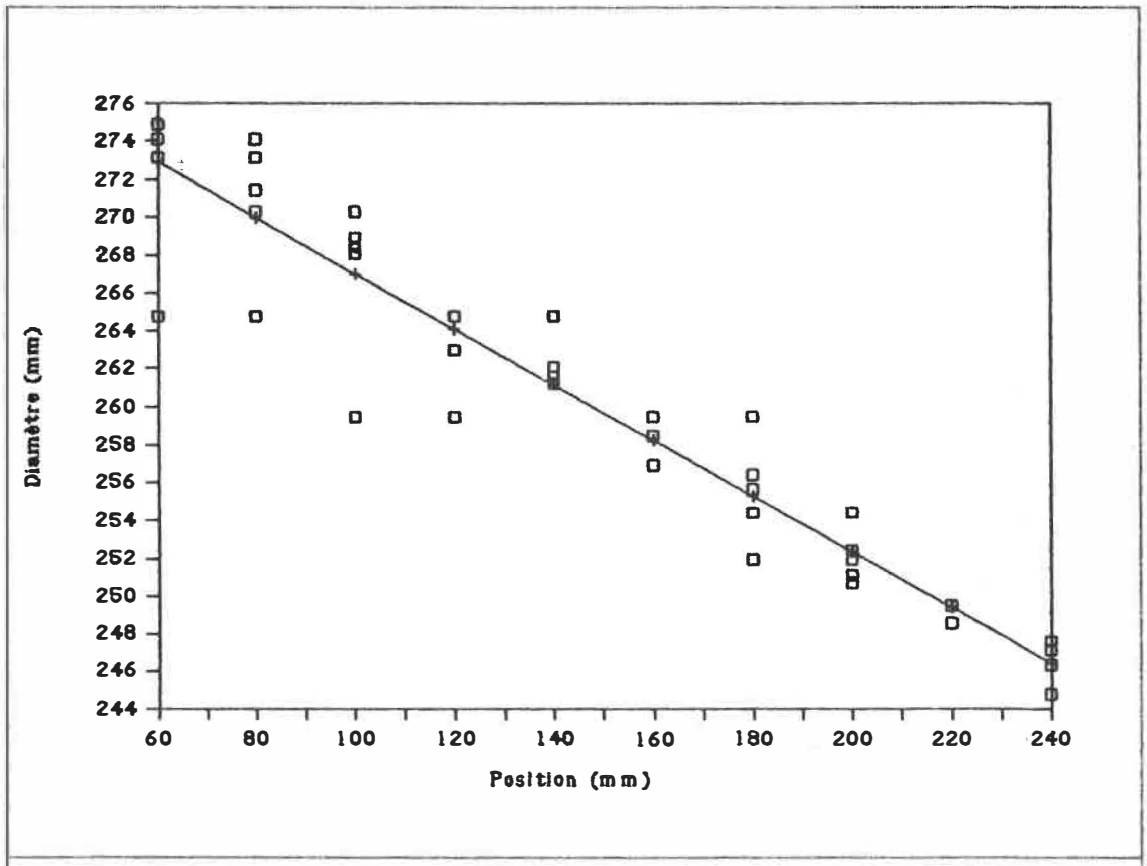

Figure C.9: Graphique de la régression linaire sur les points expérimentaux transformés en diamètre du champ visuel (pour une ligne de pixels).

Dans l'équation C.6, m est un diamètre mesuré de part et d'autre de l'axe optique. Il nous faut donc regrouper deux à deux les positions du quadrillage de la grille. On élimine le grillage numéro 6, car la droite correspondante sur la figure C.4 est pratiquement confondue avec l'axe optique.

	Numéro des grillages utilisés				
	5-7	4-8	3-9	2-10	1-11
a	-0.1689	-0.1690	-0.1696	-0.1699	-0.1703
b	-1.377	-0.511	-0.734	-1.015	-1.317
$p = 1690 - \frac{b}{a}$	1698	1693	1694	1696	1698
$a_c = \frac{512}{a}$	3032	3030	3019	3014	3006

Tableau C.4: Tableau des résultats expérimentaux pour une ligne de pixels et 4 diamètres de la grille.

Le tableau C.4 donne les résultats pour 5 diamètres mesurés le long d'une ligne de pixels. Ce sont les mêmes données que celles utilisées pour faire le graphique C.9. Cependant, le graphique est fait pour l'ensemble des points.

Nous allons maintenant examiner le cas de la colonne de pixels. Il faut encore combiner les quadrillages de la grille, mais cette fois on élimine les grillages numéros 6 et 7, car leurs droites correspondantes sur la figure C.6 sont pratiquement parallèles à l'axe optique.

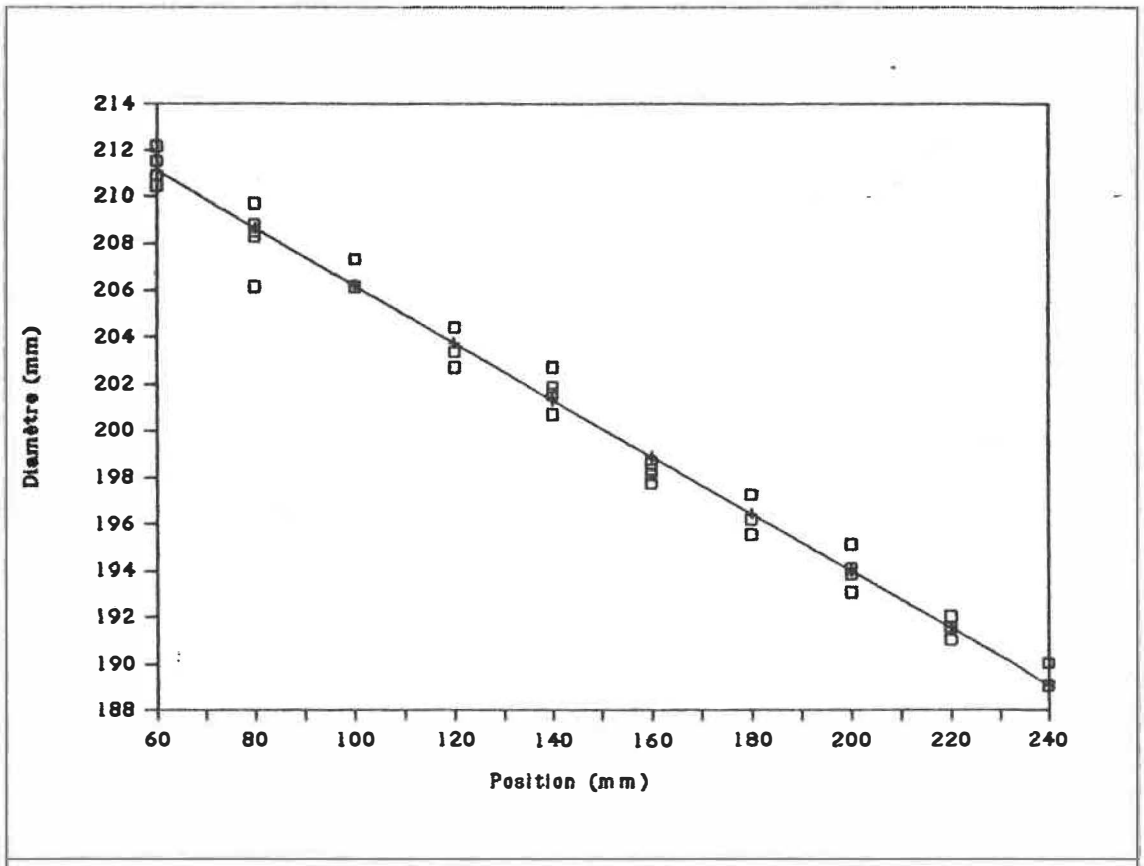

Figure C.10: Graphique de la régression linaire sur les points expérimentaux transformés en diamètre du champ visuel (pour une colonne de pixels).

Le tableau C.5 donne les résultats pour 5 diamètres mesurés le long d'une colonne de pixels. La figure C.10 est un graphique des données servant à trouver les résultats du tableau C.4.

Il faut remarquer ici que les résultats du tableau C.4 sont obtenu avec 70 points expérimentaux, alors que ceux du tableau C.5 le sont avec 46.

	Numéro des grillages utilisés				
	5-8	4-8	3-9	2-10	1-11
a	-0.125	-0.1184	-0.1211	-0.1000	-0.0997
b	7.94	17.615	13.667	10.146	10.112
$P = 1690 + \frac{b}{a}$	1626	1541	1577	1589	1589
$a_c = \frac{480}{a}$	3840	4054	3964	4800	4814

Tableau C.5: Tableau des résultats expérimentaux pour une colonne de pixels et 4 diamètres de la grille

Ainsi, le point nodal est à $z_0 = 1685 \pm 7mm$,

$a_c = 4294 \pm 500$ *pixels verticaux* et $a_c = 3020 \pm 14$ *pixels horizontaux*.

ANNEXE D

D : Calcul de la position du point nodal du projecteur.

La présente annexe porte sur le calcul de la position du point nodal du projecteur, par rapport à un référentiel fixé sur le banc d'optique du projecteur.

Cette annexe est divisée en cinq étapes, soit: la formulation des équations; le changement de référentiel pour ajuster les données expérimentales; la position de l'axe optique du projecteur dans le plan objet du projecteur; les mesures expérimentales; les résultats expérimentaux.

D.1 Formulation des équations

La figure D.1 montre un schéma sur lequel des rayons passant par les points nodaux du projecteur forment une image sur un écran. Le cône ainsi formé peut être caractérisé par la valeur de l'angle α. L'angle α, tel que dessiné sur la figure D.1, peut être calculé par l'équation:

$$\frac{d}{2a_p} = \frac{m}{2(P+z_p)} = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

(D.1)

où m est le diamètre du cône;

$(P+z_p)$ est la distance entre le point nodal image et l'endroit de mesure du diamètre m;

d est le diamètre du cône dans le plan objet;

a_p est la distance entre le point nodal objet et le plan objet.

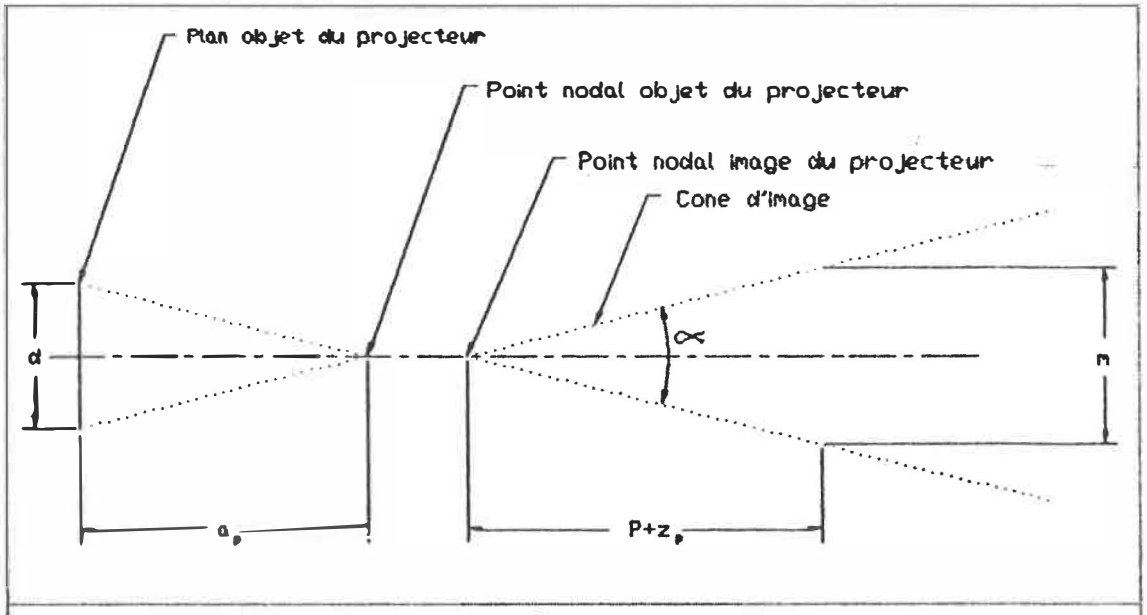

Figure D.1: Schéma de rayons (pointillé) passant par les points nodaux d'un projecteur.

Le point nodal étant un point mathématique, sa position ne peut être que calculée; ainsi, la valeur $(P+z_p)$ est

inconnue. On peut toutefois mesurer la valeur de z_p à partir d'un point arbitraire à une distance P inconnue du point nodal de la caméra.

Tous les rayons lumineux ne passent pas par les points nodaux. Mais dans le cas d'une image pour laquelle la mise au point est adéquate, à tous les points de cette image on peut faire correspondre un rayon passant par les points nodaux.

Le cône montré à la figure D.1 est visible dans le domaine image sur un intervalle de l'axe optique que l'on nomme profondeur de champ. La profondeur de champ est l'intervalle sur l'axe optique pour lequel on obtient une image nette.

Dans ces conditions il est possible de mesurer directement les diamètres, tel que décrit précédemment.

En effectuant la même mesure pour plusieurs positions z_p, il est alors possible de tracer la droite d'équation:

$$m = \frac{d}{a_p}(P + z_p) \tag{D.1}$$

Une diapositive, sur laquelle sont dessinés des cercles concentriques de diamètres différents mesurées avec un

microscope (voir figure D.3), est placée dans l'espace objet du projecteur. On mesure alors le diamètre des cercles de l'image obtenue sur un écran placé à une distance z_p du point de référence. Par régression linéaire sur les points expérimentaux, nous obtenons une droite d'équation:

$$y = ax + b \tag{D.2}$$

Des équations précédentes, nous avons que la pente "a" de cette droite est égale à:

$$a = \frac{d}{a_p} \tag{D.3}$$

alors que l'ordonnée à l'origine "b" est égale à:

$$b = \frac{d}{a_p} P \tag{D.4}$$

Ces deux dernières équations nous donnent les équations recherchées:

$$P = \frac{b}{a}$$

$$a_p = \frac{d}{a}$$

(D.5)

Le point nodal d'un système convergent tel que celui du projecteur se trouve nécessairement à l'intérieur des limites physique des lentilles formant le système optique. Nous allons donc prendre comme point de référence la position médiane des deux lentilles formant le système optique du projecteur.

D.2 Les corrections à apporter sur les données expérimentales

Afin d'être utile, la mesure de position du point nodal doit être réalisé dans les mêmes conditions expérimentales que celles utilisées pour capter la forme tridimensionnelle de l'objet. C'est-à-dire que l'écran sur lequel sont réalisées les mesures de diamètre doit être situé au même endroit que l'objet dont on désire mesurer la forme.

La figure D.2 montre un schéma du montage. L'objet analysé est placé sur le banc d'optique de la caméra. Ceci nous oblige à mesurer les positions de l'écran en termes de z_o, la coordonnée de position sur le banc de la caméra.

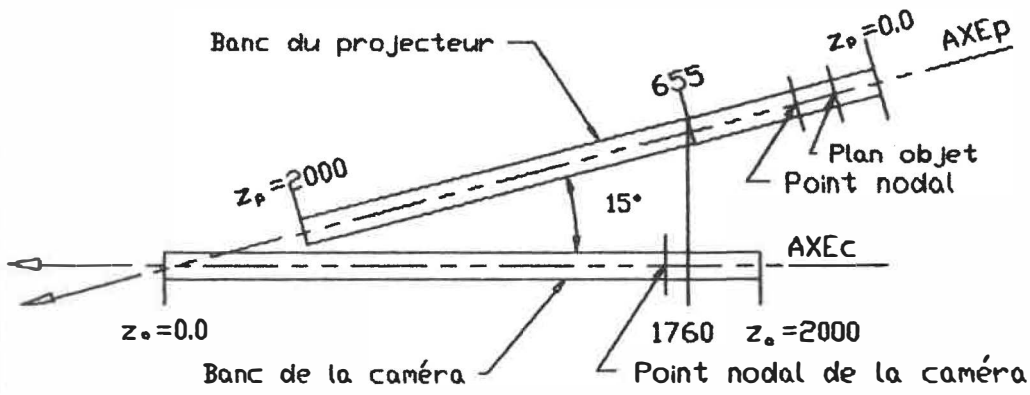

Figure D.2: Schéma du montage expérimental. "AXEp" indique l'axe optique du projecteur; "AXEc" indique l'axe optique de la caméra; z_p indique la coordonnée de position sur le banc du projecteur; z_c indique la coordonnée de position sur le banc de la caméra.

Puisqu'on veut référer à la position de l'écran par rapport à la position médiane des deux lentille du projecteur et qu'on mesure sur le banc d'optique de la caméra, il faut faire un transfert de référentiel aux mesures expérimentales.

Selon la figure D.2, nous obtenons la coordonnée z_p, sur le banc d'optique du projecteur, en fonction de la coordonnée z_c, sur le banc d'optique de la caméra, avec la relation suivante:

$$z_p = -1.03725 z_c + 2480.557$$

(D.6)

Le système optique du projecteur est formé de deux lentilles convexes séparées par environ 100mm (mesure effectuée avec une simple règle graduée) et la face externe de la lentille du projecteur est située à $z_p = 335mm$. Nous plaçons donc notre référence à $z_p = 285mm$ sur le banc du projecteur. La formule suivante donne directement la coordonnée z_p en fonction de la coordonnée z_c, par rapport à un point de référence situé entre les lentilles du projecteur:

$$z_p = -1.03725 z_c + 2195.557$$

(D.7)

Deux séries de mesures sont effectuées: la première dans le plan du dessin (figure D.2; plan horizontal); la seconde perpendiculairement à ce plan (plan vertical). Afin d'utiliser la série de mesures horizontales, on doit corriger pour l'angle entre les deux bancs d'optique. La correction consiste à multiplier par cos(15°).

D.3 Position de l'axe optique du projecteur dans le plan objet du projecteur

Pour mesurer la position de l'axe optique du projecteur, il faut projeter une image sur un écran gradué et mesurer la position des motifs de l'image sur l'écran. On doit refaire cette opération en prenant soin de déplacer l'écran parallèlement à lui-même. Lorsqu'on trace sur papier les lignes joignant les positions d'un motif en fonction de la position de l'écran, on trace le dessin du trajet des rayons lumineux formant l'image. Les droites ainsi obtenues doivent donc s'intercepter à la position du point nodal. Ce point nodal est situé sur une droite perpendiculaire au plan objet du projecteur qu'on identifie alors par l'axe optique du projecteur,

L'opération précédente permet de positionner l'axe optique dans le cadrage de la diapositive. Il ne reste plus qu'à créer une diapositive ayant le dessin d'une croix à la position de l'axe optique.

Cette opération n'a pas été réalisée dans le présent document, car nous avons cru que considérer l'axe optique au centre de la diapositive serait une bonne approximation.

D.4 Données expérimentales

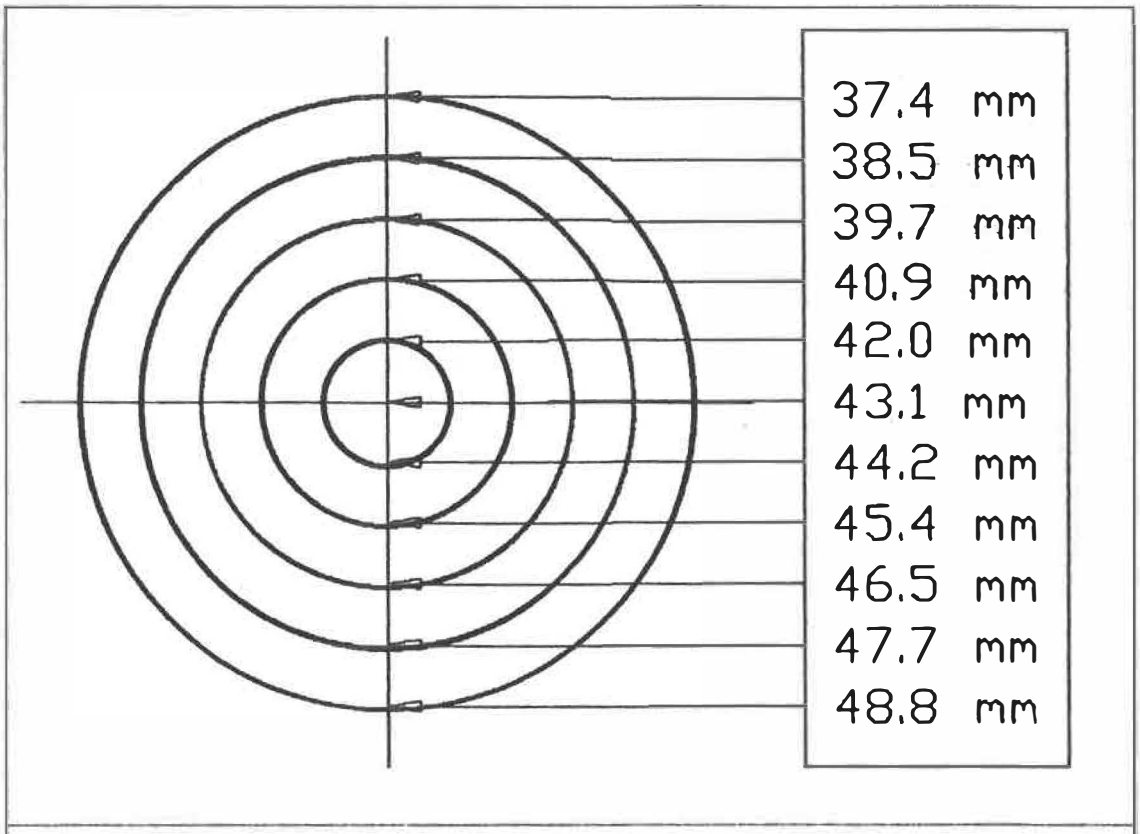

Figure D.3: Mesures expérimentales. Les valeurs numériques lues sur les graduations du microscope sont indiquées à droite.

La présente section donne les tableaux des mesures expérimentales. Celles-ci sont divisées en deux catégories: la première est formée des mesures effectuées sur la diapositive; la seconde est formée des mesures effectuées sur l'image projetée de la diapositive.

D.4.1 Mesure des diamètres de la diapositive

Le diamètre des anneaux de la diapositive utilisée a été mesuré à l'aide d'un microscope. Les mesures obtenues sont montrées à la figure D.3.

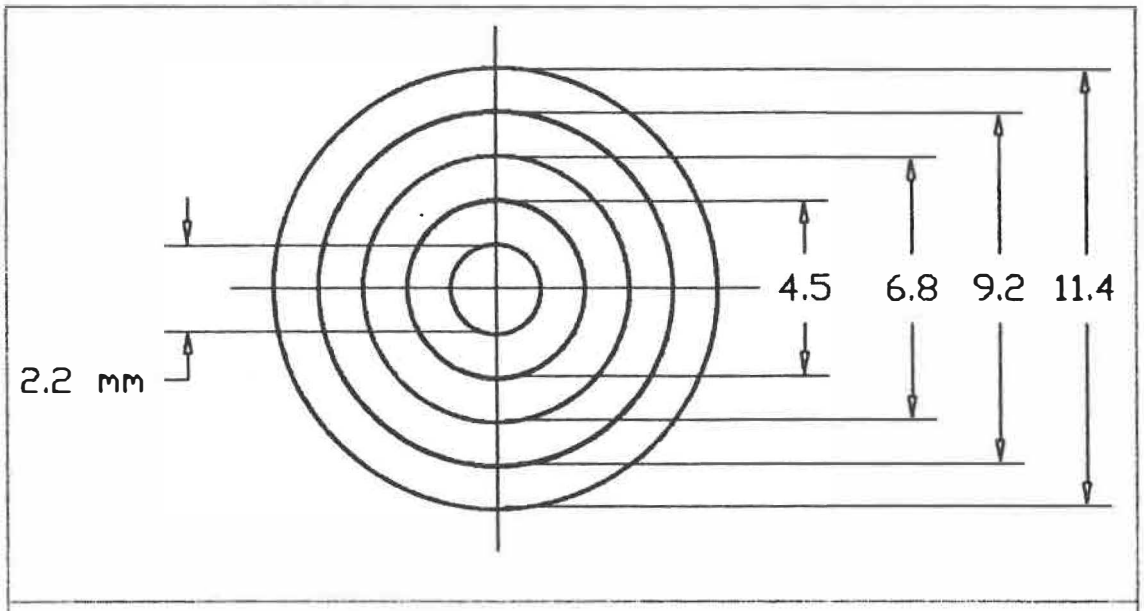

Figure D.4: Diamètre des anneaux en millimètres

La figure D.4 montre le résultat de la mesure des diamètres. La diapositive utilisée ici a été fabriquée par la réduction d'un dessin fait à l'aide du logiciel AUTOCAD. Les diamètres sur le dessin utilisé pour créer la diapositive étaient de 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm et 7 cm. Les rapports des diamètres, mesurés sur le diamètre du plus petit cercle, sont de 2.05, 3.09, 4.18 et 5.18. L'écart est associé à la distorsion de la caméra

utilisée pour faire la diapositive.

D.4.2 Mesure sur l'image projetée de la diapositive

Après avoir fait la mise au point du projecteur de tel sorte à avoir une image nette dans la région de travail, on mesure le diamètre des anneaux projetés. Le diamètre des anneaux projetés a été mesuré directement avec un pied à coulisse, sur un écran positionné dans la région de travail. Puisque la région de travail n'est accessible que par le banc de la caméra, le diamètre des anneaux projetés a été mesuré sur un écran normal au banc d'optique de la caméra.

Série 1		Diamètre			
Position z_c	Position z_p	No 1	No 2	No 3	No 4
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
40	2439	35.55	72.95	108.55	146.10
60	2418	35.72	71.60	107.60	144.95
80	2398	35.225	71.00	107.00	142.80
100	2377	34.95	70.70	106.44	141.55
120	2356	34.56	69.72	105.10	140.70

Tableau D.1: Diamètre mesuré horizontalement sur l'image.

Série 2		Diamètre			
Position z_c	Position z_p	No 1	No 2	No 3	No 4
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
40	2439	34.97	70.95	104.85	141.35
60	2418	34.60	70.00	105.56	140.41
80	2398	33.90	69.35	104.75	139.37
100	2377	34.02	68.60	103.45	138.27
120	2356	33.52	68.22	102.60	131.70

Tableau D.2: Diamètre mesuré verticalement sur l'image.

Série 1	Diamètre			
Position z_p	No 1	No 2	No 3	No 4
(cm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
2439	35.31	70.46	105.82	141.12
2418	34.50	69.16	103.93	140.01
2398	34.02	68.58	103.35	137.93
2377	33.76	68.29	102.81	136.73
2356	33.38	67.34	101.52	135.91

Tableau D.3: Diamètre mesuré horizontalement sur l'image et corrigé pour l'angle de 15° entre les bancs d'optique.

D.5 Statistiques et résultats

Les pentes et ordonnées à l'origine obtenues par régression linéaire pour chaque diamètre sont écrites au tableau D.4.

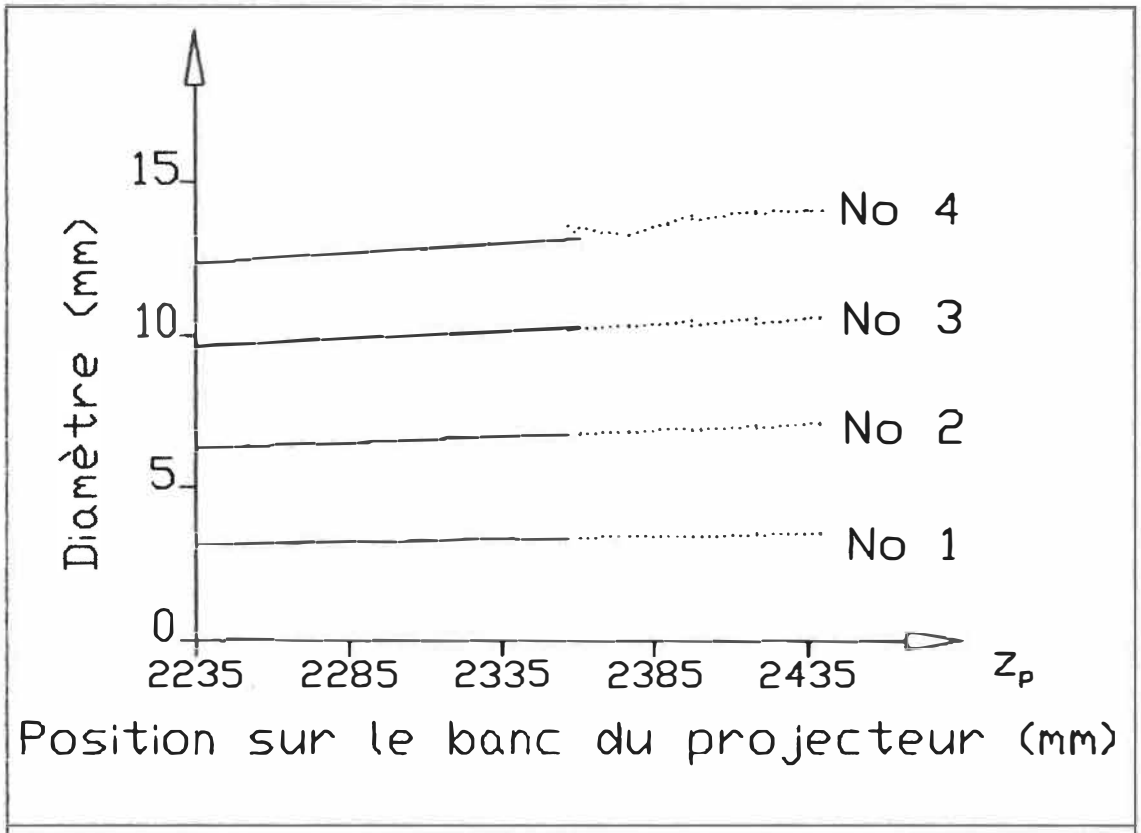

Figure D.5: Graphe montrant une comparaison entre les données expérimentales et le trajet théorique de rayons. Les données expérimentales sont utilisées pour tracer les droites en pointillé, alors que les traits pleins représentent le trajet théorique des rayons lumineux.

	Statistiques et résultats				
Diamètre	1	2	3	4	globale
a	0.0201	0.0348	0.0458	0.0852	0.0178
b(mm)	-8.205	-4.524	7.1334	-41.892	-3.895
$x = \frac{b}{a}$(mm)	-409	-130	156	491	219
$a_p = \frac{d}{a}$(mm)	214	195	201	134	117

Tableau D.4: Résultats de l'analyse

Les valeurs obtenues (tableau .4) nous indiquent que la plage sur laquelle nous avons pris des mesures n'est pas assez grande pour en tirer une information valable. Ceci se remarque sur la figure D.5, qui montre un graphique comparant les valeur expérimentales avec des droites montrant le trajet de rayons lumineux provenant de la position présumée du point nodal. Il est en effet difficile de voir si les points expérimentaux sont dans le prolongement des droites théoriques.

	Statistiques et résultats				
Diamètre	No 1	No 2	No 3	No 4	moyenne
a	0.0162	0.0327	0.0492	0.0654	
$a_p = \frac{d}{a}$(mm)	135.9	137.6	138.2	140.6	138.1

Tableau D.5: Résultat du calcul de a_p

Nous sommes donc contraints de prendre comme position du point nodal la position médiane des lentilles du projecteur. Toutefois, on estime que la position réelle est dans le tiers central de l'intervalle entre les lentilles, d'où:

$$z_p = 285 \pm 15mm.$$

(D.8)

Nous reprenons donc la régression linéaire, mais cette fois, on impose le point (0,0). Les résultats de cette seconde régression sont donnés au tableau D.5. La valeur de a_p est égale à la moyenne des valeur de ce tableau, soit;

$$a_p = 138 \pm 3mm.$$

(D.9)

Il aurait été théoriquement préférable de faire les mesures sur une plus grande plage de positions. Toutefois, la profondeur de champ du projecteur est très petite et l'image devient floue dans le voisinages des points pour lesquels nous avons fait les présentes mesures.

ANNEXE E

E : Mesure des conditions expérimentales

Cette annexe porte sur les différentes techniques utilisées pour calculer les conditions expérimentales.

E.1 La technique utilisé pour mesurer la largeur des bandes de la grille de Ronchi, T_g

La largeur des bandes a été mesuré à l'aide d'un microscope muni d'un réticule, en suivant la procédure suivante:

- aligner le réticule du microscope sur le début d'une bande noire.
- prendre en note la position du tablier 50.0*mm*.
- déplacer le tablier gradué du microscope en comptant les bandes que le réticule intercepte.
- après avoir compté les 47*bandes* noires du réseau, aligner le réticule sur le début d'une bande noire.
- prendre en note la position du tablier 36.9*mm*.
- calculer la course du tablier
  $13.1mm = 50.0mm - 36.9mm$

- diviser la course du tablier par 2 fois le nombre de bandes noires, car pour chaque bande noire il.y a une bande blanche $0.13936 = \frac{13.1}{2 \times 47}$.
- l'erreur sur la mesure est de $0.1mm$ sur la position de début et de fin de course. Ainsi l'erreur sur la course complète est de $0.2mm$. L'erreur sur la largeur des bandes du réseau est donc $0.002mm = \frac{0.2mm}{2 \times 47}$

Le résultat est $T_g = 0.139 \pm 0.002 \ mm$.

E.2 La technique utilisée pour mesurer le décalage latéral δ_g

Le décalage à été mesuré avec un pied à coulisse selon les étapes suivantes:

- projeter une cible munie d'une croix à la position de l'axe optique sur un écran plat et normale au banc optique du projecteur,
- identifier la position de l'axe optique du projecteur sur l'écran,
- projeter la grille sur l'écran,
- mesurer la distance entre le début d'une bande de la grille et l'axe optique, $0.7mm$;
- mesurer la largeur des bandes de la grille, $3.4mm$;
- diviser le décalage par la largeur, $0.2 = \frac{0.7}{3.4}$;

Le résultat est $\delta_g = -0.21 \pm 0.03 bande$.

E.3 Mesure de l'angle β

L'angle β est mesuré par rapport à une colonne de pixel sur la carte Occulus-200. La technique utilisée consiste à projeter la grille sur une surface plane, placée perpendiculairement à la génératrice du banc d'optique. Et à mesurer le décalage des bandes par rapport à une colonne de pixel sur la carte Occulus-200. Le résultat est $\beta = 0 \pm 0.1°$

E.4 Mesure de x_{op} et z_{op} Et ϕ

Ces quantités ont été mesurées avec le logiciel AUTOCAD sur un dessin tracé à l'échelle.

E.5 Mesure de y_{op}

La technique utilisée ici consiste à: projeter sur une surface plane placer à $z_o = 160mm$ sur le banc d'optique de la caméra; mesurer dans le plan image de la caméra la position verticale en pixels *ligne#* 209; soustraire cette position de la position de l'axe optique de la caméra $26 = 209 - 183$; numériser un quadrillage dont la hauteur du carrelage est connue $12.67mm$; mesurer la dimension en pixels du carrelage, 30.5 ± 0.5 *pixels*. Nous avons alors,

$y_{op} = -\frac{26}{30.5} * 12.67 = -10.8 \pm 0.6mm$

ANNEXE F

F : Les outils informatiques créés et utilisés.

Plusieurs programmes sont utilisés pour obtenir la forme tridimensionnelle de l'objet. Dans cette annexe nous donnons une brève description de chaque programme. La notation utilisée est la suivante; lorsque un item est entre parenthèses rectangulaires [], c'est que l'item est facultatif. Toutefois, lorsque l'item est entre parenthèses angulaires <>, il doit obligatoirement être écrit.

Tous les programmes supportent les cartes OCCULUS-200 dont les adresses de bases sont F10 ou F30. Les programmes sélectionnent eux-même l'adresse à utiliser. Une option sur la ligne de commande permet de sélectionner une autre adresse de base.

L'utilisation de programmes séparés permet une plus grande flexibilité dans l'analyse des images captées par la caméra.

Les outils informatiques sont divisés en deux catégories. La première catégorie est formée des outils auxiliaires. La seconde catégorie est formée d'outils de

transformation de l'image sur la carte OCCULUS-200. En tout temps on peut arrêter l'exécution d'un programme en appuyant simultanément les touches [Ctrl] et [Break] du clavier.

F.1 Les outils auxiliaires.

Les programmes auxiliaires ont les noms suivant: "GRAB", "SAVE", "LOAD", "PREP" et "OCCLGN".

F.1.1 Le programme "GRAB".

Le programme GRAB effectue l'acquisition d'une image selon les options écrites sur la ligne de commande. Une liste d'opérations de ce programme est montré à la figure F.1.

Début	
1-	Traitement des options sur la ligne de commande.
2-	Initialisation de la carte Occulus.
3-	Acquisition continue d'image.

Figure F.1: Liste d'opérations du programme "GRAB".

Syntaxe de la ligne de commande: grab [-l] [-i<v>] [-p] [-f<v>] [-c<k>] [-m]

Les options permises sont les suivantes:

l: Conserve la table "look-up tables" courante.

i<v>: Modifie la table "look-up tables" (choix par défaut: 0). <v> est le numéro de la table "look-up table" choisi (valeurs valides de 0 à 7). Les quatre tables standards sont:

0: Intensité normale
1: Intensité inverse
2: Contraste élevé
3: Contraste élevé avec intensité inversée

f<v>: Change l'adresse de base, <v> est l'adresse:

10: Adresse de base F10
30: Adresse de base F30

p: Protection du bit numéro 7 des octets de chaque pixel.

m: Dessin d'une mire centrée sur le présumé axe optique de la caméra.

F.1.2 Le programme "SAVE".

Le programme "SAVE" transfère l'image contenue sur la carte OCCULUS-200 selon les options écrites sur sa ligne de commande. Une liste d'opérations de ce programme est montré à la figure F.2.

Syntaxe de la ligne de commande:
save <nom_de_fichier> [-f<v>] [-m<v>] [-h<v>] [-b<v>] [-g<v>] [-d<v>] [-o<nom_de_fichier>]

Les noms de fichier doivent inclure le nom de l'unité de disque ainsi que celui du répertoire. Le premier nom de fichier est celui dans lequel l'image sera écrite.

Les options permises sont les suivantes:

Début	
1-	Traitement des options sur la ligne de commande.
1-	Ouverture du fichier dans lequel sera écrite l'image.
2-	Lecture d'une ligne de pixel sur la carte OCCULUS-200.
3-	Ecriture d'une ligne dans le fichier ouvert à l'étape 2.
4-	Retourne à l'étape 3 tant que l'image sur la carte n'a pas été couverte.

Figure F.2: Liste d'opérations du programme "SAVE".

f<v>: Change l'adresse de base, <v> est l'adresse:

10: Adresse de base F10
30: Adresse de base F30

m<v>: Masque à utiliser pour lire les octets de chaque pixel.

h<v>: Donne la frontière du haut de l'écran.
Valeur par défaut <v>=0.

b<v>: Donne la frontière du bas de l'écran.
Valeur par défaut <v>=480.

g<v>: Donne la frontière de gauche de l'écran.
Valeur par défaut <v>=0.

d<v>: Donne la frontière de droite de l'écran.
Valeur par défaut <v>=512.

o<nom_de_fichi er>: Indique le nom d'un fichier dans lequel les dimensions à utiliser pour l'écran sont spécifiées (dans l'ordre haut, gauche, bas, droite).

F.1.3 Le programme "LOAD".

Le programme "LOAD" charge dans la carte OCCULUS-200, une image qui a été enregistrée sur disque par les programmes "SAVE" et "PREP". Cette opération est réalisée selon les options écrites sur sa ligne de commande. Une liste des opérations de ce programme est montré à la figure F.3.

Début	
1-	Traitement des options sur la ligne de commande.
1-	Ouverture du fichier dans lequel est écrite l'image.
2-	Lecture d'une ligne dans le fichier ouvert à l'étape 2.
3-	Ecriture d'une ligne de pixels sur la carte OCCULUS-200.
4-	Retourne à l'étape 3 tant que la fin du fichier n'est pas atteinte.

Figure F.3: Liste d'opérations du programme "LOAD".

Syntaxe de la ligne de commande:
load <nom_de_fichier> [-f<v>] [-m<v>] [-c<v>]

Le nom de fichier dans lequel l'image est écrite, doit inclure le nom de l'unité de disque ainsi que celui du répertoire.

Les options permises sont les suivantes:

f<v>: Change l'adresse de base, <v> est l'adresse:

10: Adresse de base F10
30: Adresse de base F30

c<v> Type de champ, <v> est le type de champ désiré:

i: Chargement des lignes impaires seulement
p: Chargement des lignes paires seulement
e: Chargement de toutes les lignes (état par défaut)

m<v>: Masque à utiliser pour écrire les octets de chaque pixel.

F.1.4 Le programme "PREP".

Le programme "PREP" est spécifique à la numérisation tridimensionnelle. Ce programme fait l'enregistrement sur disque des images et informations nécessaires aux programmes de transformations discutés à la section 6.2. Il indique séquentiellement, à l'usager les opérations à faire. Il est principalement divisé en trois étapes, soit: une première étape qui localise, sur l'objet à analyser, l'axe optique du projecteur; une seconde étape du programme enregistre l'image de l'objet lorsqu'une grille est projetée; une dernière étape enregistre l'objet lorsque aucune grille n'est projetée. A chaque étape l'intervention de l'usager est requise pour changer la diapositive projetée et déplacer les réticules sur l'image captée par la carte OCCULUS-200. Une liste des opérations de ce programme est montré à la figure F.4.

Toutes ces opérations sont réalisées selon les options écrite sur la ligne de commande.

Syntaxe de la ligne de commande:
prep <nom_de_fichier> [-f<v>] [-i<v>]

Note: Le nom de fichier est utilisé pour créer deux fichiers avec des extensions différentes(.ima et .fnd) l'usager ne doit donc pas inclure d'extension dans le nom de fichier. Toutefois, le nom de fichier doit inclure le nom de l'unité de disque ainsi que celui du répertoire.

Les options permises sont les suivantes:

Début	
1-	Traitement des options sur la ligne de commande.
2-	Initialisation de la carte Occulus.
3-	Acquisition d'une image par la carte Occulus.
4-	Dessin d'un réticule sur l'écran associé à la carte Occulus.
5-	Intervention de l'usager qui doit déplacer le réticule de telle sorte à le faire coïncider avec l'axe optique du projecteur.
6-	Enregistrement de la position du réticule
7-	Initialisation de la carte Occulus.
8-	Acquisition de l'image de la grille déformée.
9-	Dessin d'un réticule sur l'écran associé à la carte Occulus.
10-	Intervention de l'usager qui doit encadrer la région de l'image contenant le réseau déformé qui sera utilisé pour la suite.
11-	Enregistrement sur disque de la région encadrée.
12-	Initialisation de la carte Occulus.
13-	Acquisition d'une image sans grille déformé.
14-	Enregistrement sur disque de la région précédemment encadrée.
Fin	

Figure F.4: Liste d'opérations du programme d'acquisition de données "PREP".

i<v>: Modifie la table "look-up tables" (choix par défaut: 0). <v> est le numéro de la table "look-up table" choisi (valeurs valides de 0 à 7). Les quatre tables standard sont:

0: Intensité normale
1: Intensité inverse
2: Contraste élevé
3: Contraste élevé avec intensité inversée

f<v>: Change l'adresse de base, <v> est l'adresse:

10: Adresse de base F10
30: Adresse de base F30

F.1.5 Le programme "OCCLGN"

Le programme "OCCLGN" écrit dans un fichier une ligne et une colonne de la carte OCCULUS-200 sous un format utilisé par le logiciel AUTOCAD. Le programme trace des réticules à l'intersection de la ligne et de la colonne que l'opérateur désire enregistrer. L'opérateur peut déplacer le réticule en utilisant les flèches du clavier numérique. Une liste des opérations de ce programme est montré à la figure F.5.

Il est à noter que le programme utilise le bit numéro 7 des octets de chaque pixel sur la carte. L'information dans ce bit est perdue lors du déplacement du réticule. Le fichier créé ne possède que 128 niveaux d'intensité car le bit 7 n'est pas considéré dans la conversion.

Cette opération est réalisée selon les options écrites sur la ligne de commande.

Syntaxe de la ligne de commande: occlgn <nom_de_fichier> [-f<v>]

Début	
1-	Traitement des options sur la ligne de commande.
1-	Ouverture du fichier dans lequel sera écrit le dessin.
2-	Dessin d'un réticule sur l'écran associé à la carte OCCULUS-200.
3-	Intervention de l'usager qui doit déplacer le réticule de telle sorte à le faire coïncider avec la ligne et la colonne, pour lesquelles il désire obtenir un dessin.
4-	Lecture de la ligne de pixel sur la carte OCCULUS-200.
5-	Transformation et écriture des segments de ligne nécessaires au dessin du profil de la ligne, dans le fichier ouvert à l'étape 2.
6-	Lecture de la colonne de pixels sur la carte OCCULUS-200.
7-	Transformation et écriture des segments de ligne nécessaire au dessin du profil de la colonne, dans le fichier ouvert à l'étape 2.

Figure F.5: Liste d'opérations du programme "OCCLGN".

Note: Le nom du fichier dans lequel l'information sera écrite doit inclure le nom de l'unité de disque ainsi que celui du répertoire. Le nom de fichier ne doit toutefois pas contenir d'extension, le programme ajoute lui-même l'extension ".dxf" que le logiciel AUTOCAD nécessite.

Note 1: Ce programme doit pouvoir trouver le fichier "line.def" dans le répertoire courant. Ce fichier "line .def" est simplement un fichier ".dxf" créé par la version d'AUTOCAD que l'on désire utiliser et dans lequel on a pris soin d'effacer les trois dernières lignes " ENDSEC 0 EOF ".

Note 2: Ce programme utilise le bit 7 de la carte OCCULUS. L'image contenue dans la carte OCCULUS ne doit donc pas utiliser ce bit.

L'option permise est la suivante:

f<v>: Change l'adresse de base, <v> est l'adresse:

10: Adresse de base F10
30: Adresse de base F30

F.2 Les outils de transformations.

Les programmes de transformation ont les noms suivant: "BRIGHT", "SEUIL", "SCAN", et "PROCESS".

F.2.1 Le programme "BRIGHT".

Le programme "BRIGHT" effectue la division des intensités des pixels contenus sur la carte OCCULUS-200 par l'intensité de pixel d'une image contenue dans un fichier sur disque. Cette opération s'effectue selon les options écrites sur la ligne de commande. Une liste des opérations de ce programme est montré à la figure F.6.

Syntaxe de la ligne de commande: bright <nom_de_fichier> [-f<v>]

Début	
1-	Traitement des options sur la ligne de commande.
2-	Ouverture du fichier contenant l'image de l'objet sans grille projetée.
3-	Lecture d'une ligne dans le fichier ouvert à l'étape 2.
4-	Lecture de l'intensité d'un pixel sur la carte OCCULUS-200. Division des deux intensité si le dénominateur est différent de zéro. Autrement le résultat est posé égal à zéro.
5-	Ecriture sur la carte OCCULUS-200 du résultat de l'opération à l'étape 4.
6-	Retour à l'étape 4 tant que la ligne de pixels n'est pas terminée.
7-	Retour à l'étape 3 tant que la fin du fichier n'est pas atteinte.

Figure F.6: Liste d'opérations du programme "BRIGHT".

Note: Le nom de fichier est celui qui correspond à l'image sur disque. L'extension habituelle est ".fnd". Toutefois, le nom de fichier doit inclure le nom du contrôleur de disque ainsi que celui du répertoire. L'image correspondante sur la carte OCCULUS a habituellement le même nom mais avec l'extension ".ima". L'image dans la carte OCCULUS-200 peut avoir été chargée par le programme "LOAD".

L'option permise est la suivante:

f<v>: Change l'adresse de base, <v> est l'adresse:

10: Adresse de base F10

30: Adresse de base F30

Le résultat de l'exécution de ce programme est un hologramme de l'objet. Cet hologramme est contenu sur la carte OCCULUS-200. Toutefois, cet hologramme possède des tons de gris tel que discutés à la section 4.3 du texte.

F.2.2 Le programme "SEUIL".

Le programme "SEUIL" effectue la binarisation d'une image contenue dans la carte OCCULUS-200. Cette opération s'effectue selon les options écrites sur la ligne de commande. Une liste des opérations de ce programme est montré à la figure F.7.

Syntaxe de la ligne de commande: seuil [-s<v>] [-f<v>] [-m<v>] [-h<v>] [-b<v>] [-g<v>] [-d<v>] [-o<nom_de_fichier>] [-l] [-r]

Les noms de fichier doivent inclure le nom du contrôleur de disque ainsi que celui du répertoire. Le premier nom de fichier est celui dans lequel l'image sera écrite.

Les options permises sont les suivantes:

s<v>: Spécifie la valeur seuil à utiliser.

f<v>: Change l'adresse de base, <v> est l'adresse:

10: Adresse de base F10

30: Adresse de base F30

m<v>: Masque à utiliser après seuillage.
Valeur par défaut <v>=64

Début	
1-	Traitement des options sur la ligne de commande.
2-	Si la valeur seuil est spécifiée saute à l'étape 7.
3-	Pour tous les pixels de la région donnée en paramètre, compte le nombre de pixels ayant la même intensité.
4-	Dessine l'histogramme linéaire ou logarithmique selon l'option de la ligne de commande.
5-	Intervention de l'usager qui doit déplacer le réticule de telle sorte à le faire coïncider avec la valeur seuil désirée.
6-	Calcule la valeur seuil sélectionnée par l'usager et affiche ce résultat.
7-	Lecture d'une ligne de pixel sur la carte OCCULUS-200.
8-	Pour tous les éléments de la ligne lus à l'étape 7. Si la valeur numérique de l'élément est inférieure ou égale à la valeur Seuil, alors sa nouvelle valeur est zéro. Autrement si la valeur numérique d'un élément est supérieure à la valeur seuil alors sa nouvelle valeur est égale a celle du masque (par défaut 64).
9-	Ecriture des nouvelles valeurs de la ligne de pixels sur la carte OCCULUS-200.
10-	Retour à la ligne 7 tant qu'il reste des lignes de pixels à transformer.

Figure F.7: Liste d'opérations du programme "SEUIL".

h<v>: Donne la frontière du haut de l'écran.

Valeur par défaut <v>=0.

b<v>: Donne la frontière du bas de l'écran.

Valeur par défaut <v>=480.

g<v>: Donne la frontière de gauche de l'écran.

Valeur par défaut <v>=0.

d<v>: Donne la frontière de droite de l'écran.
Valeur par défaut <v>=512.

o<nom_de_fichi Indique le nom d'un fichier dans lequel les
er>: dimensions à utiliser pour l'écran sont spécifiées (dans l'ordre haut, gauche, bas, droite).

l: Prend le logarithme des amplitude avant de dessiné l'histogramme.

r: Prend la racine carré des amplitude avant de dessiné l'histogramme.

Si aucune valeur seuil n'est écrite sur la ligne de commande le programme fait l'histogramme de l'image à l'intérieur de l'encadrement spécifié sur la ligne de commande. L'utilisateur doit alors sélectionner une valeur seuil à l'aide des flèches du clavier numérique. L'amplitude de l'histogramme est linéaire par défaut, ce type n'est pas très utile pour le seuillage d'une image résultant du programme "BRIGHT", c'est pourquoi l'utilisateur peut choisir une amplitude logarithmique.

F.2.3 Le programme "SCAN".

Le programme "SCAN" transforme un hologramme binaire en des franges de Moiré. L'information de l'hologramme doit être contenue dans le bit 6, correspondant à un masque égal à 64. La transformation en zones de même degré d'élévation, est réalisée selon les options écrites sur la ligne de commande. Une liste des opérations de ce programme est montré à la figure F.8.

Début	
1-	Traitement des options sur la ligne de commande.
2-	Si la largeur des régions de transformation n'est pas sur la ligne de commande elle est demandée à l'usager.
3-	Lecture d'une colonne de pixel sur la carte OCCULUS-200.
4-	Pour tous les éléments de cette colonne lus à l'étape 3. Transfère le bit 6 dans le bit 7 pour chaque octet de la colonne.
5-	Ecriture des nouvelles valeurs de la colonne de pixels sur la carte OCCULUS-200.
6-	Retourne à l'étape 3 tant que le nombre de colonnes traitées n'est pas égal à la largeur des régions de transformation.
7-	Lecture d'une colonne de pixels sur la carte OCCULUS-200.
8-	Pour tous les éléments de la cette colonne lus à l'étape 7. Copie le complément du bit 6 dans le bit 7 pour chaque octet de la colonne.
9-	Ecriture des nouvelles valeur de la ligne de pixels sur la carte OCCULUS-200.
10-	Retourne à l'étape 7 tant que le nombre de colonnes traitées n'est pas égal à la largeur des régions de transformation.
11-	Retour à l'étape 3 tant que l'image dans la carte OCCULUS-200 n'a pas été complètement traitée.
FIN	

Figure F.8: Liste d'opérations du programme "SCAN".

Syntaxe de la ligne de commande:

scan [-l<v>] [-c<v>] [-f<v>] [-m<v>] [-h<v>] [-b<v>]
[-g<v>] [-d<v>] [-o<nom_de_fichier>] [-l] [-r]

Les options permises sont les suivantes:

l<v>: Donne la largeur des zones de transformation verticales.

c<v>: Spécifie le numéro de colonne de départ. Valeur par défaut <v>=0.

p: N'efface pas l'hologramme.

f<v>: Change l'adresse de base, <v> est l'adresse:

10: Adresse de base F10
30: Adresse de base F30

h<v>: Donne la frontière du haut de l'écran. Valeur par défaut <v>=0.

b<v>: Donne la frontière du bas de l'écran. Valeur par défaut <v>=480.

g<v>: Donne la frontière de gauche de l'écran. Valeur par défaut <v>=0.

d<v>: Donne la frontière de droite de l'écran. Valeur par défaut <v>=512.

o<nom_de_fichier>: Indique le nom d'un fichier dans lequel les dimensions à utiliser pour l'écran sont spécifiées (dans l'ordre haut, gauche, bas, droite).

Le nom de fichier doit inclure le nom du contrôleur de disque ainsi que celui du répertoire.

Le résultat de l'exécution de ce programme est enregistré sur le bit 7 des octets de la carte OCCULUS-200.

F.2.4 Le programme "PROCESS".

Le programme "PROCESS" transforme un hologramme binaire en une représentation tridimensionnelle de l'objet. L'information de hologramme doit être contenue dans le bit 6, correspondant à un masque égal à 64. La transformation en une représentation tridimensionnelle, est réalisée selon les options écrites sur la ligne de commande. Une liste des opérations de ce programme est montré à la figure F.9.

Début	
1-	Traitement des options sur la ligne de commande.
2-	Demande à l'usager de communiquer les informations requises.
3-	Recherche les bandes dont le bit 6 est égal à 1 et qui est le plus près à gauche de l'axe optique de la caméra.
4-	Mémorise les frontières de la bande trouvée à l'étape 3.
5-	Calcule la valeur numérique de z_s pour chaque pixel de la bande et mémorise le résultat sur la carte Occulus.
6-	Cherche une autre bande vers la gauche dont le bit 6 est égale à 1.
7-	Mémorise les frontières de la bande trouvée à l'étape 6.
8-	Calcul de la valeur numérique de z_s pour chaque pixel de la bandes et mémorisation du résultat sur la carte Occulus.
9-	Retourne à l'étape 6 tant que la frontière de gauche de la région à transformé n'est pas atteinte.
10-	Cherche une autre bande vers la droite de la bande centrale dont le bit 6 est égale à un.
11-	Mémorise les frontières de la bande trouvée à l'étape 10.

12-	Calcul de la valeur numérique de z_s pour chaque pixel de la bande et mémorisation du résultat sur la carte Occulus.
13-	Retourne à l'étape 10 tant que la frontière de droite de la région à transformés n'est pas atteinte.
Fin	

Figure F.9: Liste d'opérations du programme de traitement des données "PROCESS".

Syntaxe de la ligne de commande:

process [-f<v>] [-h<v>] [-b<v>] [-g<v>] [-d<v>] [-o<nom_de_fichier>] [-a<x>,<y>]

Les options permises sont les suivantes:

f<v>: Change l'adresse de base, <v> est l'adresse:

10: Adresse de base F10

30: Adresse de base F30

h<v>: Donne la frontière du haut de l'écran.
Valeur par défaut <v>=0.

b<v>: Donne la frontière du bas de l'écran.
Valeur par défaut <v>=480.

g<v>: Donne la frontière de gauche de l'écran.
Valeur par défaut <v>=0.

d<v>: Donne la frontière de droite de l'écran.
Valeur par défaut <v>=512.

a<x>,<y>: Donne les coordonnées de l'axe optique du projecteur.
Valeur par défaut <x>,<y>=255,239.

o<nom_de_fichi er>: Indique le nom d'un fichier dans lequel les dimensions à utiliser pour l'écran sont spécifiées (dans l'ordre haut, gauche, bas, droite).

Le nom de fichier doit inclure le nom du contrôleur de disque ainsi que celui du répertoire.

Le résultat de ce programme est en millimètre et les élévations varient de -127mm à 127mm. Le programme utilise un octet pour chaque pixel.

Références

1 K.S. Fu, R.C. Gonzalez, et C.S.G. Lee. "ROBOTICS Control, Sensing, Vision, and Intelligence", Mc Graw Hill, Chapitre 6.

2 Jarvis RA., "A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision". IEEE Transactions Pattern Analysis Machine Intelligence PAMI-5,2:122-139 (1983).

3 Strand T., "Optical Three-Dimensional Sensing". Optical Engineering 24(1):33-40 (1983).

4 Kak AC., "Depth Perception for Robot Vision". Dans le "Handbook of Industrial Robotics", Edition Wiley, New York, pp 272-319 (1985).

5 D. Nitzan, R. Bolles, J. Kremers, P. Mulgaonkar, "3D Vision for Robot Applications". NATO Workshop on Knowledge Engineering for Robotic Applications, Maratea, Italy (1986).

6 D.J. Svetkoff, "Towards a High Resolution, Video Rate, 3D Sensor for Machine Vision". Compte rendu de "SPIE Conference on Optics, Illumination and Image Sensing for Machine Vision", 728:216-226 (1986).

7 J. Paul, Besl, "Active, Optical Range Imaging Sensors", Machine Vision and Application 1:127-152 (1988).

8 R.A. Jarvis, "Sensors, Distance Measurement", International Encyclopedia of Robotics: Applications and Automation. Volume 3 P.1493-1505

9 B.K.P. Horn, "Focussing", Project MAC, AL Memo. 160, M.I.T., Cambridge, Mass., May 1968.

10 R.A. Jarvis, "Focus Optimization Criteria for Computer Image Processing", Microscope 24, 163-180 (1976)

11 M.D. Levine, D.A. O'Handley and G.M. Yagi, "Computer Determination of Depth Maps", Computer Graphics Image Processing 2, 134-159 (1973).

12 Y. Yakimovsky and R. Cunningham, "A System for Extracting Three-Dimensional Measurements from a Stereo Pair of TV Cameras", Computer Graphics Image Processing 7, 195-210 (1978).

13 H.P. Moravec, "Visual Mapping by a Robot Rover", Proceding 6th International Conference on Artificial Intelligence, P598-620 (1979).

14 H.H. Baker, "Edge Based Stereo Correlation", Compte rendu de la conférence ARPA Image Understanding Workshop, Université de Maryland en Avril 1980.

15 D. Marr and E.C. Hildreth, "Theory of Edge Detection", Proceding 6th International Conference on Artificial Intelligence. P.598-620 (1976)

16 S.J. Tanimoto, "Image Data Structures", dans "Structured Computer Vision", Academic Press, New York, 1980.

17 L. Piroda, "Shadow and Projection Moire Techniques for Absolute and Relative Mapping of Surface Shapes". Optical Engineering 21:640 (1982)

18 C.A. Sciammarella, "The Moire Method- A Review". Experimental Mechanics 22:418-433 (1982).

19 G. Oster, "Moire Optics: a Bibliography", Journal of Optical Society America 55:1329 (1965).

20 P.S. Theocaris, "Moire Fringes in Strain Analysis". Pergamon Press, New York (1969).

21 Reid GT,"Automatic Fringe Pattern Analysis: A review". Optics and Lasers in Engineering 7:37-68 (1986)

22 Harvey E. Cline, William E. Lorensen, and Andrew S. Holek, "Automatic Moire Contouring". Applied Optics 23:1454-1459 (1984).

23 W.R.J. Funneil, "Image Processing Applied to the Interactive Analysis of Interferometric Fringes". Applied Optics 20:3245-3250 (1981).

24 Gasvik KJ, "Moire Technique by Means of Digital Image Processing". Applied Optics 22(23):3543-3548

25 Reiner Eschback and Olof Bryngdahl, "Subcoded Information Carriers: Hybrid Moiré System". Journal of Optical Society of America 73:1123-1129 (1983).

26 R.P. Khetan, "The Theory and Application of Projection Moire Methods". Ph.D. department of Engineering Mechanics, State University of New York, Stony Brook, Etat-Unis (1975).

27 J.L. Doty, "Projection Moiré for Remote Contour Analysis". Journal of Optical Society of America 73:366-372 (1983).

28 Newport Corp (1987) Product Information. Composante pour système de vision par ordinateur. Fountain Valley, CA

29 Electro-Optical Information Systems(1987), Information sur les produits. EOIS, Santa Monica, CA

30 Masanori Idesawa, Toyohiko Yatagai, and Takashi Soma, "Scanning Moiré Method and Automatic Measurement of 3-D Shapes", Applied Optics 16(8):2152-2162 (1977)

31 Cline HE, Holik AS, Lorenson WE, "Computer-Aided Surface Reconstruction of Interference Contours". Applied Optics 21(24):4481-4489 (1982)

32 Cline HE, Lorenson WE, Holik AS, "Automated Moire Contouring". Applied Optics 23(10):1454-1459 (1984)

33 Hiroshi Takasaki, "Moiré Topography". Applied Optics 12:845-850 (1973).

34 D.M. Meadows, W.O. Johnson, J.B. Allen, "Generation of Surface Contours by Moiré Patterns". Applied Optics 9(4): 942-948 (1970)

35 Rioux M, Blais F, "Compact 3-D Caméra for Robotic Applications". Journal of Optical Society of América A3(9): 1518-1521 (1984)

36 Kinoshita G., Idesawa M., Naomi S., "Robotic Range Sensor with Projection of Bright Ring Pattern". Journal of Robotic Systems 3(3):249-257 (1986).

37 Corle TR., Fanton JT., Kino GS., "Distance Measurements by Differential Confocal Optical Ranging". Applied Optics 26(12):2416-2420 (1987).

38 Mitsuo Takeda, Hideki Ina et Seiji Kobasyashi, "Fourier-Transform Method of Fringe-Patern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry". Journal of the Optical Society of America 72:156-160 (1982).

39 M. Rioux, "Laser Range Finder Based upon Synchronized Scanners". Applied Optics 23(21):3837-3844 (1984).

40 G. Bickel, G. Hausler, M. Maul, "Triangulation with Expanded Range of Depth", Optical Engineering 24(6):975-979 (1985).

41 R. Nevatia, T.O. Binford, "Structured Descriptions of Complex Objects", Compte rendu de la troisième conférence "International Joint Conference on Artificial Intelligence": 641-647 (1973).

42 F. Schmitt, H. Maitre, A. Clainchard, J. Lopez-Krahm, "Acquisition and Representation of Real Object Surface Data". Compte rendu de conférence "SPIE Proceedings Biostereometrics", volume 602 (1985).

43 F. Schmitt, B. Barsky, W. Du, "An Adaptive Subdivision Method for Surface-Fitting from Sampled Data". Computer Graphics 20(4):179-188 (1986).

44 S.M. Cotter, B.G. Batchelor, "Deriving Range Maps at Real-Time Video Rates". Sensor Review 6(4):185-192 (1986).

45 C. Silvaggi, F. Luk, W. North, "Position/Dimension by Structured Light". Experimental Techniques: 22-25 (1986).

46 Servo-Robot, Information sur les produits, Boucherville, Québec, Canada (1987).

47 HYMARC, Information sur les produits, Ottawa, Ontario, Canada (1987).

48 Photonic Automation, Information sur les produits, Santa Ana, Californie, États-Unis (1987)

49 Technical Art Corp, Information sur les produits, Redmond, Wachington, État-Unis (1987).

50 Cyberoptics, Information sur les produits, Minneapolis, Mn, Etat-Unis (1987).

51 Perceptron, Information sur les produits, Farmington Hills, MI, Etat-Unis (1987).

52 Diffracto, Information sur les produits, Windsor, Ontario, Canada (1987).

53 A. Livnat, O. Kafri et G. Erez, "Hills and Valleys Analysis in Optical Maping and its Application to Moiré Contouring". Applied Optics 19:3396-33400 (1980).

54 J.R.T. Lewis, T. Sopwith, "3D Surface Measurement by Microcomputer", Image and Vision Computing 4(3):159-166 (1986).

55 C. Harvey Palmer and Bruce Z. Hollmann, "Transmission of Incoherent Light Between Ronchi Grids", Applied Optique 11, P.780 (1972).

56 José-Philippe Pérez, "Optique Géométrique Matricielle et Ondulatoire", Masson (1984).

57 Joseph W. Goodman, "Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie",(Masson & Cie., Paris, 1972).

58 Wai-Hon Lee, "Contour Map Display Using Computer-Generated Holograms". Applied Optics 14, P.2447 (1975).

59 Brandt, "The Photographic Lens", The focal Press, London (1968).

60 Gerald Oster, Mark Wasserman, and Craig Zeverling, "Theoretical Interpretation of Moiré Patterns". Journal of Optical Society America 54:169-175 (1964).

61 Olof Bryngdahl, Xerox Research Center, Palo Alto, California, "Moiré: Formation and Interpretation". Journal of the Optical Society of America 64:1287-1294 (1974).

62 Gousot, "La télévision monochrome et couleur". Collection technique de l'ORTF, Edition Eyrolles, Paris (1972).

63 Engel C.E. "Photography for Scientist", academic Press London (1968).

64 A.B. De Vriend. "La transmission de la chaleur, Volume 2, Introduction au rayonnement thermique", Gaëtan Morin Editeur, Chicoutimi Québec (1984).

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00290807 5