

PRINCIPES

1. Introduction - Principes mis en œuvre

Mesurer la forme d'un objet existant présente un grand intérêt, aussi bien en ingénierie que dans d'autres secteurs d'activités (médecine, arts, biens de consommation, contrôle de qualité, topographie, fabrication, etc.).

Il s'agit de mesurer la forme d'un objet, sans contact, permettant d'obtenir les coordonnées tridimensionnelles d'un grand nombre de points. Le relief de l'objet est une fonction décrivant l'altitude $z = f(x,y)$ du point de la surface.

On projette des lignes $z_i = f(x,y_i)$ sur la surface.

Les lignes peuvent provenir d'un projecteur diapo, d'une vidéo projection (cadre 1) de l'ombre d'une trame ou d'un interféromètre.

Nous utiliserons un projecteur à écran LCD.

Les lignes quasi-sinusoïdales de pas p_{LCD} seront générées par ordinateur, affichées sur l'écran LCD et projetées avec un grandissement G choisi. Le pas sera $p_0 = G p_{LCD}$ dans le plan image.

Projetées avec une incidence θ sur un plan de référence, les lignes

dessineront un réseau de pas $p = \frac{p_0}{\cos \theta}$

Les franges sont observées par une caméra CCD dans une direction perpendiculaire au plan de référence.

Un plan de référence donne une image semblable à celle du cadre 14.

Projetées sur l'objet d'étude, les franges seront déformées par le relief (cadre 2; cadre 13).

Plusieurs traitements de l'image peuvent être envisagés pour conduire au relief ou au profil.

Nous utiliserons la méthode du **décalage de phase** qui permet un bon contraste. Elle aboutit à une image phasée de l'objet (cadre 16) et au profil après démodulation (cadre 17).

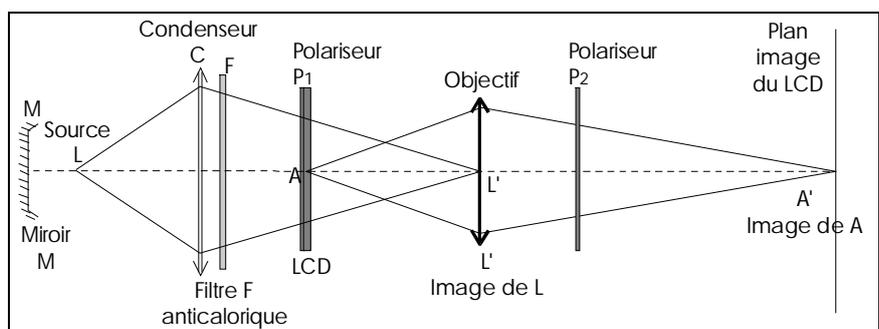
2. Projection des franges.

2.1 Le projecteur

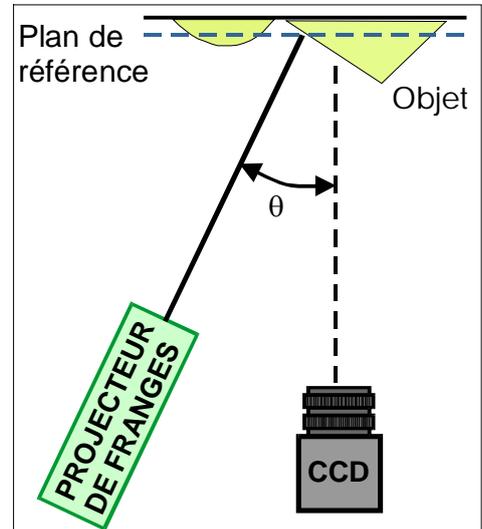
Il a la structure d'un projecteur diapo (cadre 3)

Le LCD muni de son polariseur d'entrée joue le rôle de la diapo. En sortie on devra placer un second polariseur P_2 croisé avec P_1 .

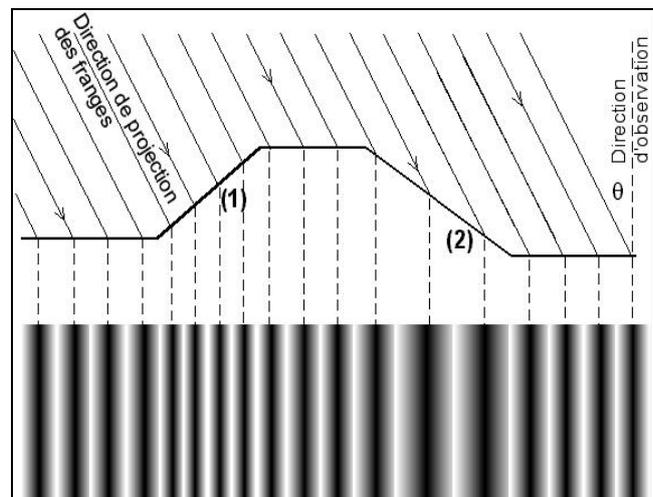
Pourquoi fait-on l'image de la lampe L par le condenseur, au centre de l'objectif ?
Quel élément fait l'image du LCD ?
Pourquoi faut-il un filtre F ?



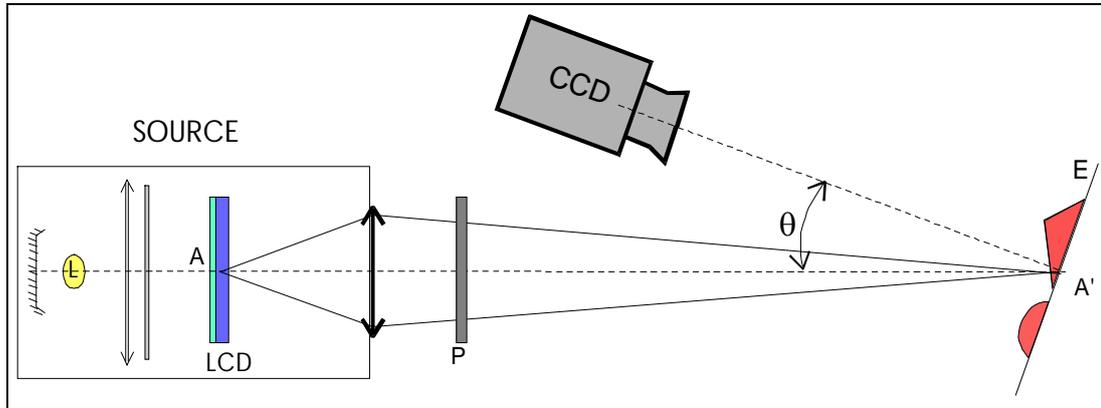
cadre 3 : schéma du projecteur à écran LCD.



cadre 1 : principe du montage



cadre 2 : projection sur un profil



cadre 4 : géométrie du montage optique

2.2 Description et géométrie du montage optique

Disposer les éléments du montage conformément au cadre 4. On veillera à respecter les consignes suivantes :

- E est l'objet de référence (plaque blanche) monté sur support 3D. Le plan de E est incliné de $\theta \approx 15^\circ$ à 20° par rapport à AA'.
- La caméra observe ce plan dans une direction normale au plan E.

2.3 Projection des franges

Réaliser les liaisons :

- alimentation électrique de la source;
- câble en Y en sortie de la carte VGA du micro-ordinateur permettant la liaison avec le moniteur et avec l'écran LCD;
- alimentation de la caméra CCD et sa liaison avec le micro-ordinateur (carte d'imagerie).
- exécuter le logiciel *Visulm*.

Dans "Analyse de franges" - "Images phasées" - "Acquisition avec vidéo-projecteur" appuyer sur le bouton "Exécuter" (cadre 5).

Des franges (dont le pas p_{LCD} est défini en pixels) s'affichent sur le LCD et leur image de pas p est projetée sur l'écran.

Les franges affichées sur le LCD apparaissent dans le cadre "Im0_**"
L'image de l'écran E vu par le CCD apparaît dans le cadre "ImCamera".

Rq : affiner le champ d'observation de la caméra pour éviter qu'elle ne voit sa propre image "Image live" facilite les réglages

2.4 Descriptions des franges projetées sur le plan de référence.

Observer les franges rectilignes de pas p sur l'écran. Le profil d'intensité (le long d'une droite $x \times x$ perpendiculaire aux franges) est :

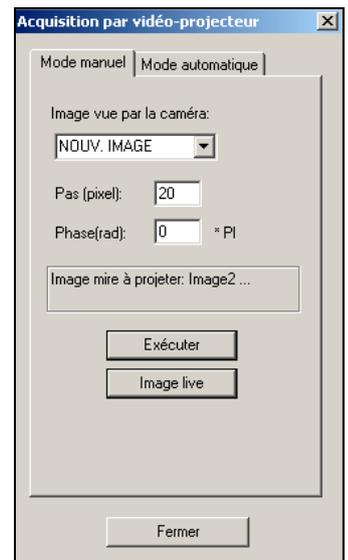
$$I = I_0(1 + C \cos(\varphi))$$

I est l'intensité au point d'abscisse x sur l'écran

I_0 est l'intensité moyenne.

C est le contraste $C = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{MAX} + I_{MIN}}$

φ est la phase : d'une frange à l'autre, la phase varie de 2π . Un point d'abscisse x est caractérisé par la phase: $\varphi_{Réf} = 2\pi \frac{x}{p}$ (1). Elle est périodique de période p .



cadre 5 : définition des franges.

Affiner les réglages (pas des franges, grandissement, mise au point).

Montrez le montage à un professeur

2.5 Projection de franges sur un profil non plan (objet).

Observer le schéma du cadre 6 les franges sont projetées sur un objet non plan et observées avec la caméra.

Un point d'abscisse x et altitude z est caractérisé par la phase

$$\varphi_{Obj} = 2\pi \frac{x + z \cdot \tan(\theta)}{p} \quad (2)$$

On en déduit que la différence $\varphi = \varphi_{Obj} - \varphi_{Réf}$ est cadre 6 : franges projetées sur un profil. proportionnelle à z :

$$\varphi = 2\pi \frac{z \cdot \tan(\theta)}{p} \quad (3)$$

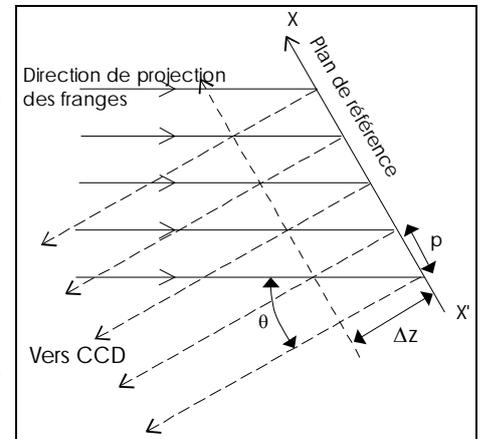
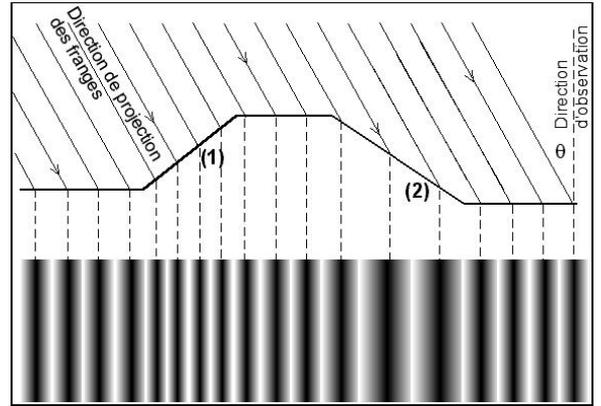
Comment varie le pas des franges vues par la caméra dans le cas d'un profil de pente positive (1) ou de pente négative (2) ?

Montrez avec la relation (2) qu'à l'abscisse x , une variation d'altitude :

$$\Delta z = \frac{p}{\tan(\theta)} \quad (4)$$

provoque un déphasage $\Delta\varphi = 2\pi$.

Démontrer avec le cadre 7 qu'un déplacement du plan de référence $\Delta z = p/\tan(\theta)$ provoque, vu de la caméra, un décalage d'une frange.



cadre 7 : projection sur le plan de référence dont la trace est $x'x$.

3. Le décalage de phase

La méthode consiste à enregistrer **trois autres images des franges** déphasées de $\pi/2$, π et $3\pi/2$ pour l'objet de référence (plan) et pour l'objet dont le relief est à étudier.

Il suffit pour cela de décaler les franges de $p_{LCD}/4$, $p_{LCD}/2$ et $3p_{LCD}/4$.

Les intensités sont des expressions :

$$I_{00} = I_0(1 + C \cos(\varphi(x, y)))$$

$$I_{90} = I_0 \left(1 + C \cos \left(\varphi(x, y) + \frac{\pi}{2} \right) \right)$$

$$I_{180} = I_0(1 + C \cos(\varphi(x, y) + \pi))$$

$$I_{270} = I_0 \left(1 + C \cos \left(\varphi(x, y) + \frac{3\pi}{2} \right) \right)$$

La résolution de ce système d'équations donne le déphasage $\varphi(x, y)$ (modulo 2π) en tout point de la surface étudiée.

L'opération $\varphi * 255/2\pi$ donne l'**image phasée** où l'éclairement de chaque point est l'image de sa phase (exprimée en niveaux de gris NG modulo 256).

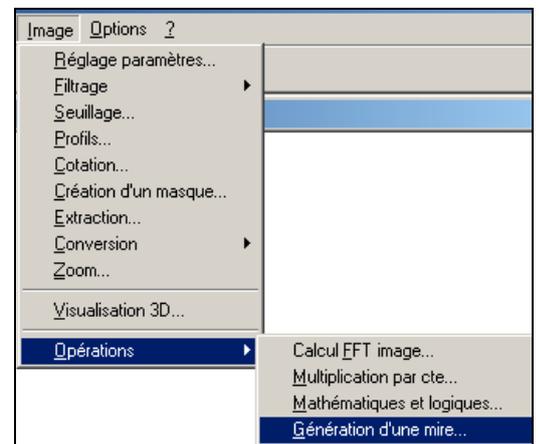
Calculez : $S = I_{270} - I_{90}$ puis $C = I_{00} - I_{180}$ puis

$$T = \frac{I_{270} - I_{90}}{I_{00} - I_{180}}. \text{ Montrez que } \text{ATAN}(T) = \varphi \text{ (modulo } \pi).$$

Étudiez le signe de S et C en complétant le Tableau 1.

φ	0 à $\pi/2$	$\pi/2$ à π	π à $3\pi/2$	$3\pi/2$ à 2π
Signe de S				
Signe de C				

Tableau 1 : Etude des signes.



cadre 8 : générer une mire.

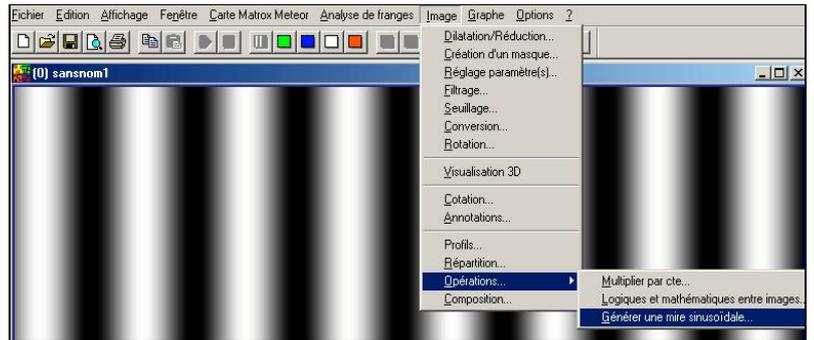
Exemple : on relève l'éclairement en NG d'un point sur les quatre images successives : $I_{00} = 135$; $I_{90} = 93$; $I_{180} = 205$; $I_{270} = 135$.

Quelle est la phase φ (modulo 2π). Montrez que cette phase sera représentée par $NG = 106$ (en niveaux de gris). **Expliquez le détail du calcul.**

La **différence des imagesphasées** $\varphi_{Obj} - \varphi_{Réf}$ permet d'obtenir le profil de l'objet (en NG modulo 256).

La **démodulation** permet d'obtenir le profil en NG.

L'**étalonnage** permet d'obtenir le profil z en μm .



cadre 9 : Réalisation des 4 images déphasées d'un réseau.

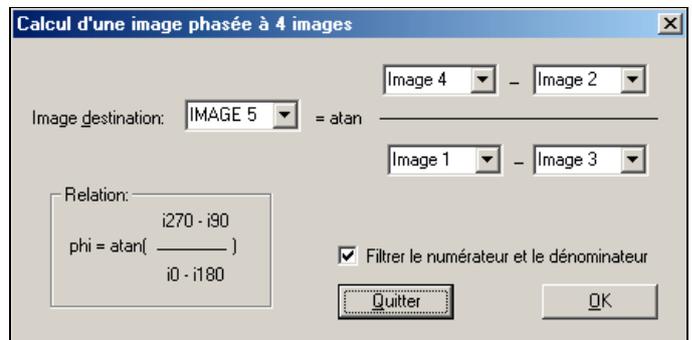
4. Le traitement d'images.

4.1 Réalisation d'une imagephasée

A l'aide de l'outil "*Générer une mire*" (cadre 8) réalisez 4 images d'un réseau sinusoïdal d'"*interfrange = 100 pixels*" définissant le pas et déphasée successivement de 0; 0,5; 1; 1,5 Pi (cadre 9)

Dans "*Analyse de franges*" demandez le calcul de "*l'imagephasée à quatre images*". (cadre 10).

En utilisant la souris, le long d'une ligne horizontale, faire le profil. Il correspond, en NG modulo 256, à l'évolution de la phase modulo 2π .



cadre 10 : calcul de l'imagephasée

4.2 Image modulée - Démodulation.

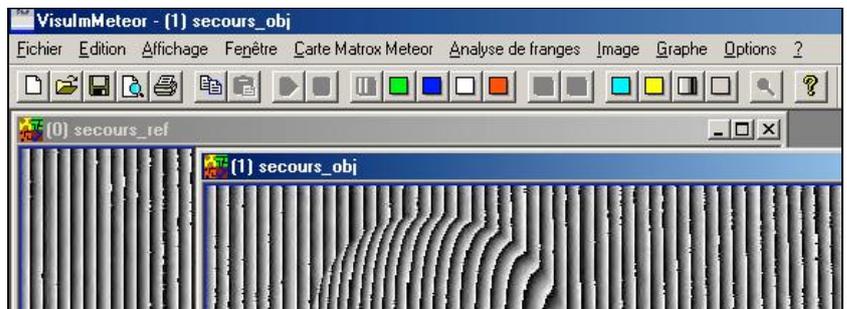
VisulmMeteor.exe permet de générer des franges sur le LCD, l'acquisition et le traitement des images puis l'interprétation des résultats.

La réalisation des imagesphasées est automatisée.

Ouvrir les images *secours_ref* et *secours_obj* du dossier *secours_images*. Ce sont les imagesphasées d'un plan de référence et d'un objet sur lesquels on a projeté des franges (cadre 11).

Dans "*image*", "*opérations*", "*logiques ...*" on fera la soustraction modulo 256 des imagesphasées : obj - réf.

Le résultat est l'image modulée.

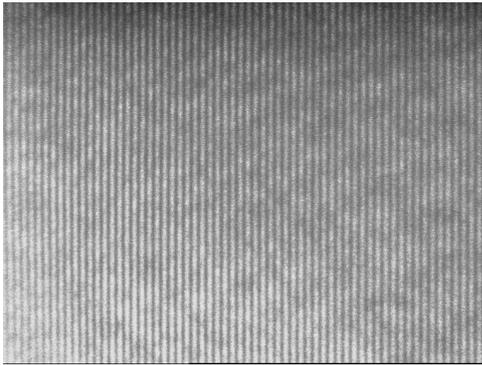


cadre 11 : Images "secours".

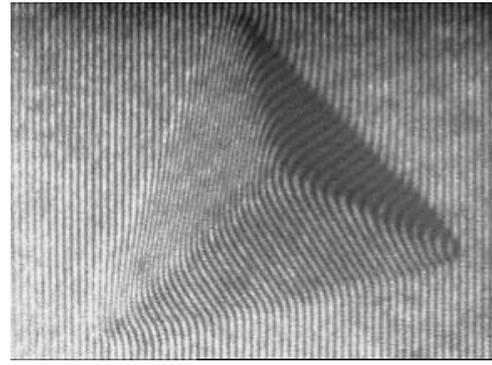
Dans "*Analyse de franges*", "*Imagesphasées*" demandez la démodulation de cette image. On obtient le profil en NG.

Se familiariser avec le logiciel en ouvrant les autres boîtes de dialogue.

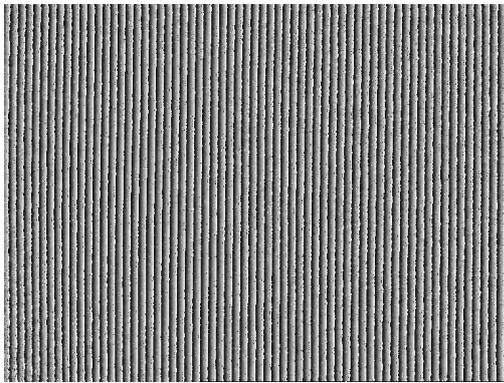
Enregistrez vos images dans un dossier "NOM DU GROUPE" sous *Phasé.tif* ; *Profil.tif* ; *Modulée.tif* ; *Profil_NG.im*.



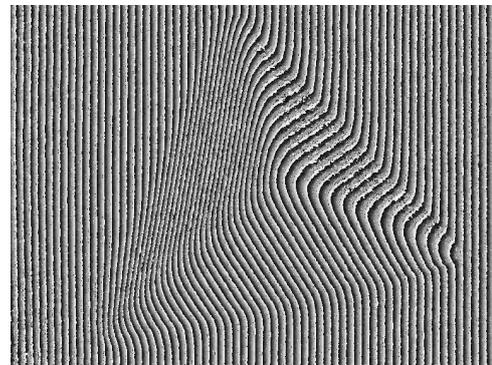
cadre 14 : projection sur un plan de référence.



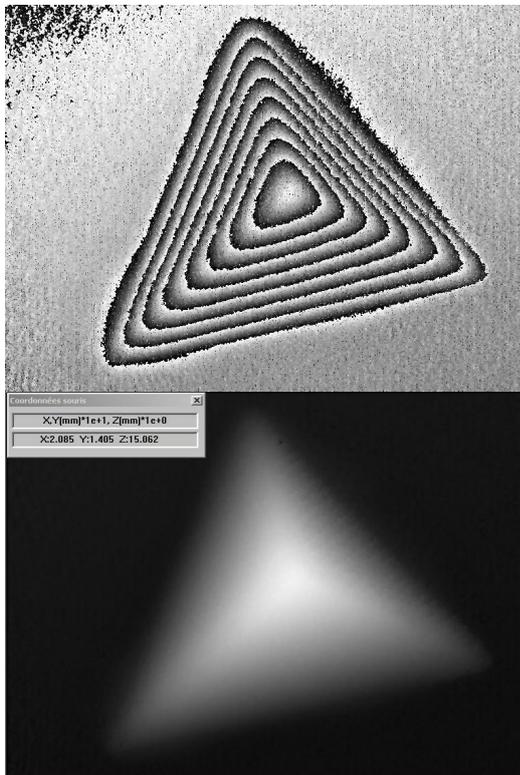
cadre 13 : projection sur un profil.



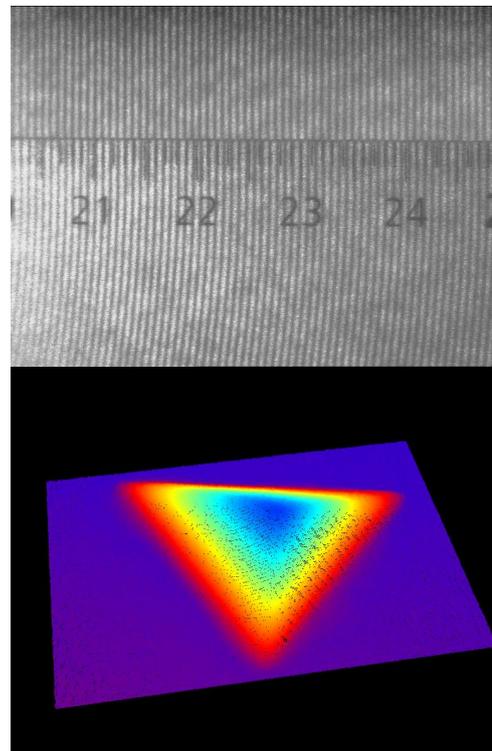
cadre 12 : image phasée du plan de référence



cadre 16 : image phasée de l'objet.



cadre 15 : image modulée ("pliée") de l'objet et image dépliée après démodulation



cadre 17 : Etalonnage en xy et représentation 3D en fausses couleurs de la pyramide

MISE EN ŒUVRE

1. Caractérisation des franges.

1.1 Etalonnage en xy.

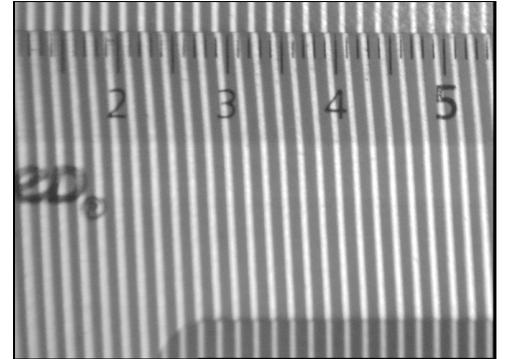
Enregistrer une image du plan de référence *réf.tif*.

Mesurer le pas p vu par la caméra en pixel.

Etalonner en xy les dimensions du plan en visualisant un réglet posé sur l'écran.

Refaire plusieurs fois les mesures.

Compléter le tableau de résultats Tableau 2 :



Faire, dans le dossier "NOM DU GROUPE", un enregistrement *Etalonnage_xy.tif* de l'image des franges et du réglet sur le plan de référence.

Enregistrer votre Tableau 2 sous *Tableau2.xls*.

Mesure N°	1	5	Moyenne
p (pixels)				
p (mm)				

Tableau 2 : mesure du pas des franges.

1.2 Etalonnage en z

En acquisition permanente, déplacez l'objet de référence de Δz jusqu'à ce qu'une frange prenne la place de celle qui la suivait (ou précédait).

Faire plusieurs essais.

Compléter le Tableau 3.

Evaluer Δz avec la formule (4) vue en 2.5 : $\Delta z = \frac{p}{\tan(\theta)}$

Vérifiez qu'il n'y a pas de contradiction entre l'évaluation et le résultat des mesures (même ordre de grandeur).

Mesure N°	1	5
Δz			
Δz moyen = mm			
Δz (calculé) =mm			
Point choisi			
Altitude du point			

Tableau 3 : étalonnage en z

2. Réalisation d'un profil.

Dans [Acq. image phasée à quatre images avec vidéo-projecteur](#), demandez l'acquisition automatique permettant d'obtenir les déphasages de π/2 entre images successives.

Faire ainsi l'acquisition de l'image phasée du plan de référence. L'enregistrer : *réf_phasée.tif*.

Visualiser l'objet (pyramide + calotte sphérique) et réaliser l'image phasée de l'objet. Enregistrer *Obj.tif* et *obj_phasée.tif*.

Poursuivre les opérations (calculs, éventuellement filtrages, démodulation). Enregistrer *Démodulée.tif*.

Dans Options, utiliser "Calibration de l'image en xy et z". Renseigner en utilisant les résultats obtenus en 1 caractérisation des franges. Placez la valeur de Δz dans le paramètre qui permet de définir l'échelle en μm du menu *option*.

Demander le profil et relever (en μm) l'altitude de certains points remarquables du profil de l'objet : *profil.im*

Reprendre la manipulation pour bien maîtriser les différentes opérations. Compléter Tableau 3.

3. Mesure d'une déformation

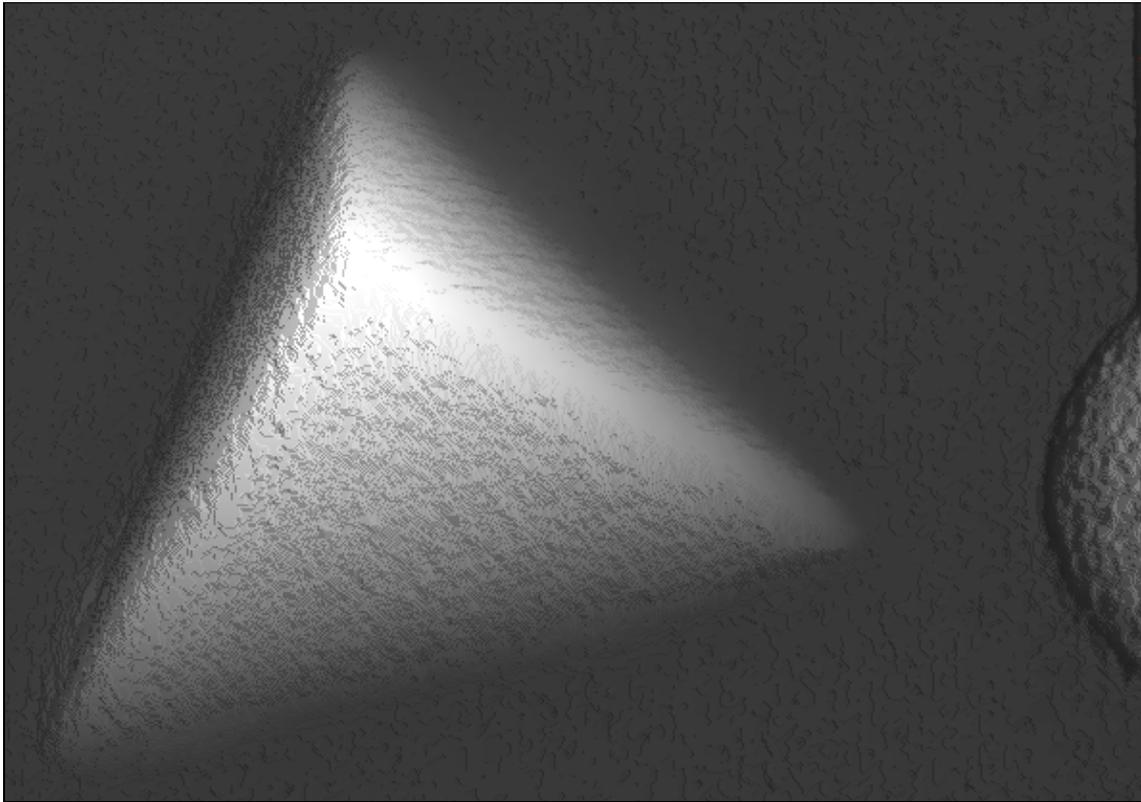
Choisir comme objet une gomme ou une lame en PVC maintenue dans un étau, serrer sans trop la déformer.

Réaliser l'image phasée de cette objet. *Gomme1.tif*.

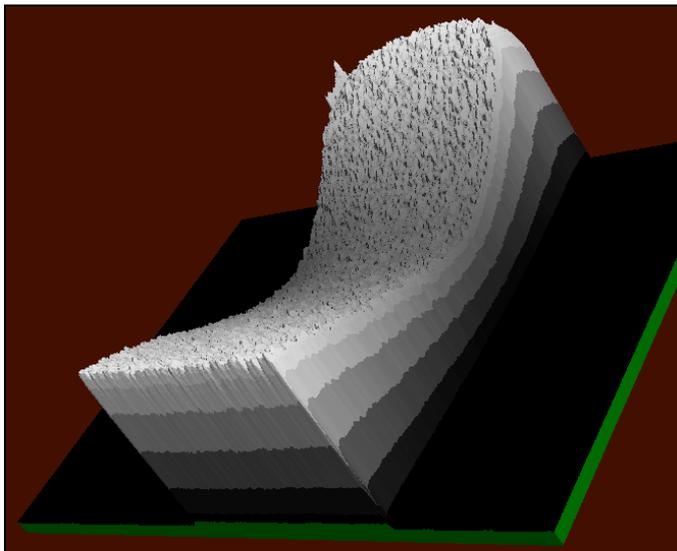
Réaliser l'image phasée de la gomme déformée en serrant l'étau : *Gomme2.tif*.

Réaliser le profil de la déformation : *Déform.im* (voir Cadre 20)

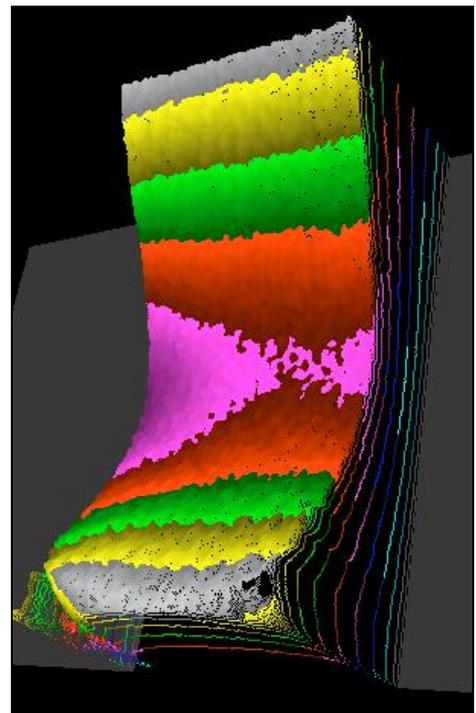
Montrer l'image de la déformation, mesurer la déformation en quelques points et commenter le profil.



cadre 19 : visualisation 3D de la pyramide, objet de l'étude en "Mise en œuvre"



cadre 21 : déformation de la gomme (avec Analyzer)



Cadre 20 : Déform.im avec
visualisation 3D

ANALYSE DES PERFORMANCES**1. Etude de documents**

Ouvrir le dossier "MOIRE_DOC" joint au TP. Lire les documents "Les applications de la lumière structurée" "Visualisation et mesure des déformations" publiés par Holo 3 et "Modélisation de forme 3D par méthode de moiré de projection et analyse par décalage de phases" de Cyril Brèque et Fabrice Brémand.

D'après le document Holo3 :

Quelles sont les principales applications de la technique de Moiré par projection de franges ?

Quelles sont les techniques de projection possibles ?

La méthode du décalage de phase est-elle la seule utilisée ?

Comment réaliser le décalage de phase lorsqu'on utilise un projecteur LCD ? Un projecteur classique ?

Résumez les conditions pour lesquelles la lumière structurée sera préférée aux autres techniques (holographie temps réel, holographie dynamique, TV-holographie, speckle).

Dans le document Breque.pdf

Quel est le principe de décalage de phase utilisé ?

Quel est l'utilité d'un "masque" ?

Comment se fait le calibrage ?

Dans la conclusion : "L'augmentation de la surface étudiée se fait au dépend de la précision" : expliquez cette proposition.

2. Résolution du montage d'étude.

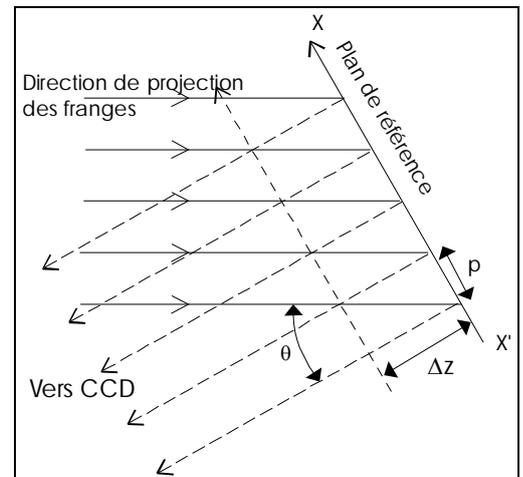
Les nuances de gris s'étalent sur 256 niveaux. On suppose le pas $p = 1,0 \text{ mm}$ et l'angle $\theta = 10^\circ$.

On rappelle (cadre 22) qu'un déphasage de 2π correspond à 256 niveaux de gris (de 0 à 255) et provient (avant démodulation) d'une variation d'altitude donnée par :

$$\Delta z = \frac{p}{\tan(\theta)}$$

Calculer la résolution δz (plus petite différence d'altitude mesurables sur la surface – on admettra que c'est la variation d'altitude pour 1 NG).

Comment peut-on améliorer cette résolution en choisissant d'autres valeurs de p ou/et θ ?



cadre 22 : projection sur le plan de référence dont la trace est $x'x$.

LISTE DU MATERIEL et DES LOGICIELS

<i>Type matériel</i>	<i>Nbre</i>	<i>Remarques</i>
<i>Objet a étudier</i>		
<i>Réglet</i>	<i>1</i>	
<i>Plaque plexi blanc (réf + objets)</i>	<i>1</i>	
<i>Element métallique de liaison</i>		
<i>Source à écran LCD</i>		<i>Alimentation 12 V max Attention : vérifier la présence du filtre anticalorique.</i>
<i>Lentilles (f = 200; 300)</i>	<i>2</i>	
<i>Objectif</i>	<i>1</i>	
<i>Polariseur</i>	<i>1</i>	<i>Direction privilégiée dans la direction du repère jaune</i>
<i>Moniteur supplémentaire</i>	<i>1</i>	
<i>Camera CCD avec objectif</i>	<i>1</i>	
<i>Micro-ordinateur</i>	<i>1</i>	
<i>Imprimante</i>	<i>1</i>	
<i>Carte d'imagerie Meteor II</i>		<i>Dans le micro ordinateur</i>
Logiciels		
 <i>Visu_Im</i>		
 <i>Excel</i>		

cadre 23 : liste du matériel