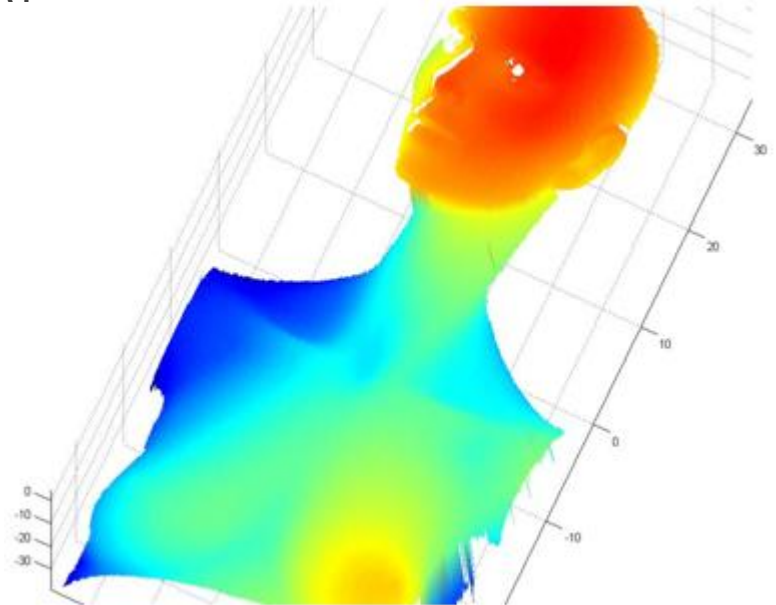
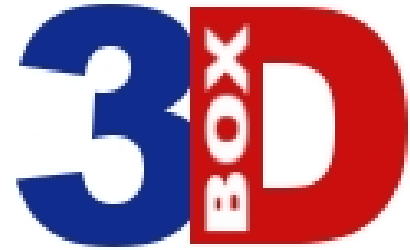


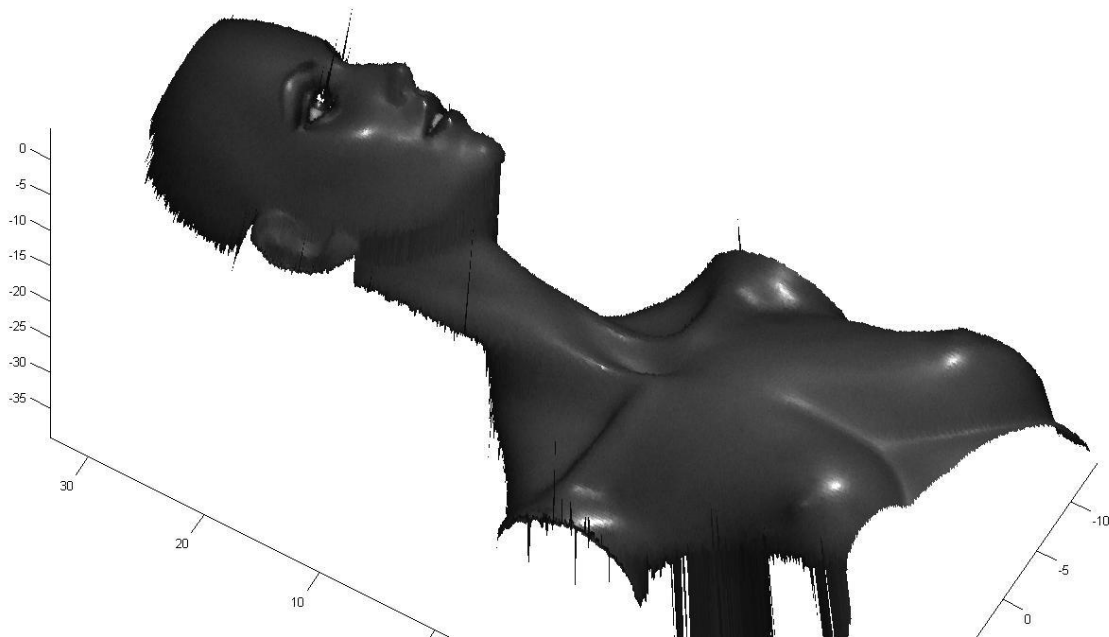
Aurélien ARNAUBEC
Alexandre GOLLUB
Jean-Christophe LAVOCAT
Marcelo PARADA
Wagner SABOIA

Tuteur : Michel LEQUIME



Groupe 61
PT_2007_2426

PROJET TRANSVERSE 3D-BOX



Ecole Centrale Marseille

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu notre tuteur de Projet Transverse, **Monsieur Lequime**, qui a encadré notre travail durant ces quelques mois. Il nous a permis d'avancer de manière coordonnée en nous conseillant sur les technologies à étudier, ainsi que sur les points d'organisation du projet. Sans lui notre projet n'aurait pas pu prendre forme. Les réunions hebdomadaires ont permis un transfert des connaissances efficace, qui a porté sur la gestion du projet et sur les points techniques.

Nous aimerions aussi remercier **Monsieur Chateau** qui nous a permis d'utiliser le laboratoire d'optique à chacune des séances où nous en avons besoin. Ses conseils nous ont permis d'installer le support et l'écran de manière adéquate en salle d'optique.

Une aide initiale a été apportée par **Monsieur Douglas Lanman** qui nous a indiqué quelles *Toolboxes* (voir le lexique pour une définition) utiliser. Il nous a de plus fourni les *Toolboxes* en question. Nous aimerions donc lui faire part de nos remerciements.

Enfin, nous aimerions accorder une attention particulière à **Messieurs Wojdyla** et **Vial** concernant la relecture de ce manuel, ainsi que sur les conseils fournis concernant son contenu.

Sommaire

Remerciements	2
Sommaire	3
Présentation du sujet	4
Fiche descriptive	4
Interprétation du sujet	5
Organisation du groupe	6
QOOQCP	6
FAST	6
WBS – Work Breakdown Structure	7
Chef tournant	8
Répartition des tâches et des postes	8
DotProject	8
Budget	9
Réunions et rapports hebdomadaires	9
Gantt	10
Etude de définition du prototype	11
Etude des méthodes	11
Spécificités attendues de la caméra	17
Caractéristiques et fonctionnement du projecteur	17
Matlab	18
Réalisation du prototype	18
Problèmes rencontrés avec la caméra	18
Décisions prises	19
Création et fonctionnement du logiciel	27
Support mécanique	34
Distorsion et Calibrage	37
Test et présentation des résultats	40
Conclusion	44
Bibliographie	45

Présentation du sujet

Fiche descriptive

promotion 2009 ECM	PROJET TRANSVERSE	Date 03/09/2007
	Proposition	

T U T E U R : Michel LEQUIME

Société : Ecole Centrale Marseille – PGD Optique et Photonique

Nom du contact : **Carole DEUMIE**

Tel : 04 91 05 46 24

Fax :

@mail : carole.deumie@ec-marseille.fr

Web :

PROJET n°

Intitulé : Système de mesure optique 3D dédié à l'enseignement

Descriptif :

Le Projet Transverse proposé vise à développer un appareillage complet de mesure optique 3D, associant :

- Un projecteur vidéo à matrice de micro-miroirs (analogue à ceux qui sont utilisés pour projeter des transparents en cours)
- Une webcam de bonne qualité optique
- Un PC portable d'acquisition et de traitement des données

Le projecteur vidéo sera utilisé pour projeter sur l'objet dont on souhaite acquérir les côtes un éclairage dit structuré (point adressable, ligne balayable, séquence de matrice de lignes N/B obéissant à un code de Grey, mire sinusoïdale à période et phase contrôlées) et à acquérir une séquence d'images de l'objet ainsi éclairé à l'aide de la webcam.

Un traitement approprié des données (triangulation, profilométrie digitale, profilométrie de phase, profilométrie à transformée de FOURIER) permettra de remonter aux coordonnées x, y et z de l'objet dans le référentiel de la caméra.

Les activités prises en charge par le groupe Projet incluent :

- L'étude générale des différentes méthodes,
- La définition complète du montage et sa réalisation
- Le développement des logiciels de génération des éclairages structurés par le projecteur vidéo
- Le développement des logiciels d'acquisition et de traitement des données correspondant aux différentes méthodes identifiées au cours de la phase d'étude générale
- La définition des procédures de calibration et leur mise en œuvre pratique
- Le développement des logiciels de visualisation des données traitées (nuage de points, coupes 2D, rendu volumétrique)
- La qualification métrologique du montage sur des objets tests
- La rédaction d'un manuel d'utilisation.

Les sciences de l'ingénieur mobilisées par ce projet sont l'Optique, le Traitement du Signal, la Mécanique et l'Informatique.

NB : Le système développé durant ce Projet Transverse sera intégré aux montages expérimentaux utilisés par les élèves de l'école durant les travaux de laboratoire organisés en Optique

Interprétation du sujet

L'intitulé initial du sujet est :

“Système de mesure optique 3D dédié à l'enseignement”

Les mots-clés qui nous sont apparus initialement furent donc les suivants : **mesure 3D, enseignement, pédagogie**. Après avoir discuté avec Monsieur Lequime, notre tuteur, et Madame Deumié, notre cliente, les points suivants sont ressortis.

Demande du client :

L'équipe pédagogique Optique Photonique de l'Ecole Centrale Marseille, représentée par Mme Deumié, demande la conception d'un système pédagogique de mesure 3D. Les utilisateurs seront les élèves de l'Ecole Centrale Marseille (en première année ou troisième année) qui utiliseront le produit dans le cadre de Travaux Pratiques (Travaux de Laboratoire pour les uns, et activités expérimentales du Parcours de Génie Disciplinaire Optique et Photonique pour les autres). L'utilisation du produit devra permettre aux utilisateurs de découvrir progressivement des méthodes de mesures 3D. L'ordre de découverte des méthodes se basera sur une complexité de compréhension croissante des méthodes.

On entend par mesure tridimensionnelle l'obtention d'un nuage de points (ou de la surface créée par *interpolation* entre ces points) exploitable par des logiciels spécialisés.

Le produit sera développé pour être utilisé dans l'enceinte de l'Ecole Centrale Marseille, probablement dans une des salles de Travaux Pratiques (TP). Les objets, que l'on mesurera, seront de l'ordre du mètre (par exemple des bustes ou des bouteilles de lait). Le budget de 500€ mis à notre disposition servira à acheter le système d'acquisition des images (voir plus loin) et de construire le support de l'outil. L'ensemble du produit (l'outil et sa documentation) devra être livré le 28 Mai 2008.

Pour plus de détail, voir en Annexe le document : « *Réponse à la demande* ».

Orientation globale du projet :

Nous avons donc décidé de créer un système de projection/acquisition d'images qui permettrait de faire des traitements algorithmiques et dont le principe serait enseigné aux étudiants. Il était prévu, dans un premier temps, d'utiliser une *webcam* ainsi que l'un des projecteurs mis à disposition par l'école. Couplés avec un logiciel que nous avons développé, ces outils constitueraient le système de mesure optique 3D.

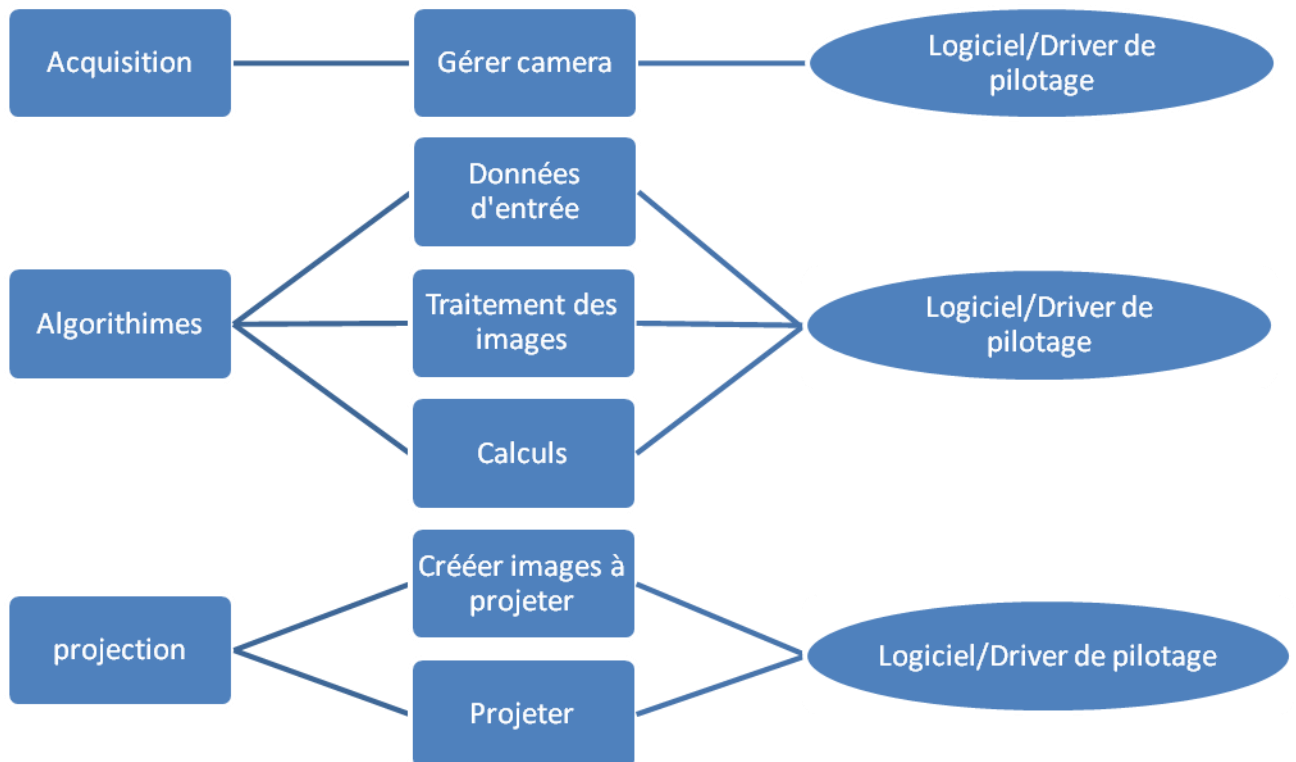
Un des objectifs de notre projet consiste aussi en la création de TP dédiés aux étudiants de l'Ecole Centrale Marseille. Ces TP permettent aux étudiants de prendre en main le logiciel *Matlab* et de raisonner sur des problèmes de traitement de l'image. Les algorithmes leur sont expliqués, et des notions de programmation seront abordées. Cet aspect là couvre donc la partie enseignement de notre projet.

Organisation du groupe

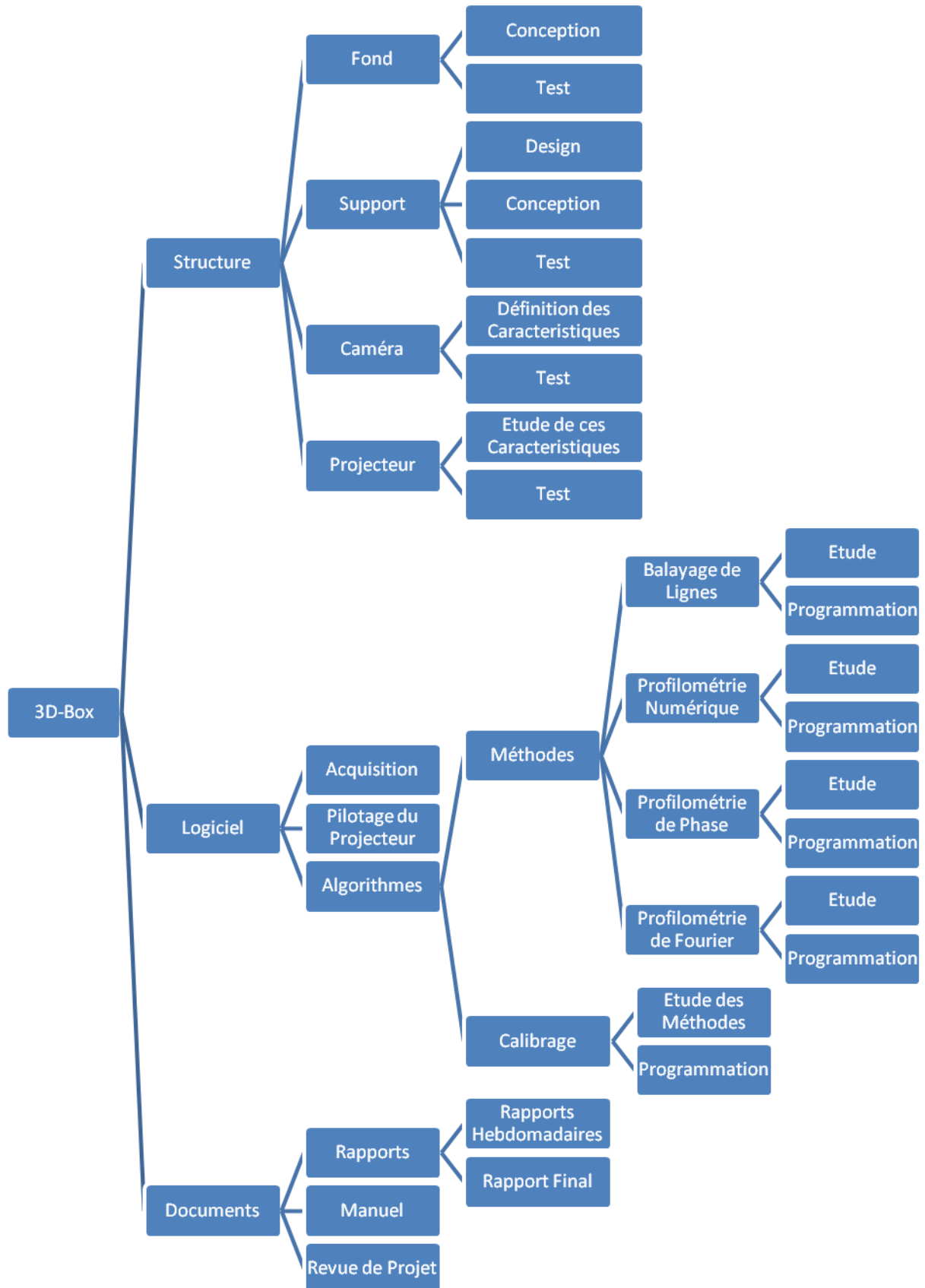
QQOQCP

Quoi	Création d'un prototype (3D-Box) mesurant en 3D des objets peu réfléchissants, sans transparence et de taille caractéristique d'environ 1m.
Qui	Client → Dép. d'optique photonique de l'Ecole Centrale Marseille (Contact: Carole Deumié) Utilisateur → Elèves de TL ou de la troisième année du parcours d'Optique Tuteur → Michel Lequime
Où	Utilisation dans une pièce normale (salle de cours). Eclairage peu intense.
Quand	Fin → Fin prévue entre fin avril et fin mai Réunions → Réunions hebdomadaires avec le tuteur
Comment	Méthodes → Utilisation des méthodes de mesure 3D existantes Instruments → Projecteur fourni par l'école. Ordinateur portable fourni par l'école. Camera pour l'acquisition d'images
Combien	Groupe → 5 personnes Budget → 500€ Produit → Un prototype et un manuel
Pourquoi	But pédagogique. La 3D-Box sera utilisée pour montrer aux élèves le principe d'une mesure 3D en utilisant de l'éclairage structuré.

FAST



WBS – Work Breakdown Structure



Chef tournant

Nous avons décidé de répartir le temps du projet en six mandats. Cette division a été faite non par rapport au nombre de semaines, mais par rapport au nombre de séances du projet transverse. Nous avons décidé aussi que le chef du mandat $n+1$ doit jouer le rôle de secrétaire des séances n . Ce dernier doit s'occuper des rapports hebdomadaires.

Lors de la première réunion nous avons tiré au sort l'ordre des mandats.

Chef	Secrétaire	Début Mandat	Fin Mandat
Alexandre GOLLUB	Wagner SABOIA	16/10/2008	13/11/2008
Wagner SABOIA	Marcelo PARADA	14/11/2008	15/01/2008
Marcelo PARADA	Aurélien ARNAUBEC	16/01/2008	25/02/2008
Aurélien ARNAUBEC	Jean-Christophe LAVOCAT	26/02/2008	24/03/2008
Jean-Christophe LAVOCAT	Alexandre GOLLUB	25/03/2008	22/04/2008

Répartition des tâches et des postes

Pendant les études préliminaires (recherche bibliographique) les tâches de notre projet ont été réparties de la façon suivante :

Recherche Bibliographique	
Caméra et Projecteur	Wagner SABOIA
Balayage de lignes et triangulation	Marcelo PARADA
Profilométrie numérique	Alexandre GOLLUB
Profilométrie de phase	Jean-Christophe LAVOCAT
Profilométrie par transformée de Fourier	Aurélien ARNAUBEC

Après les études préliminaires une nouvelle répartition des tâches a été mise en place :

Répartition de tâches	
Documentation (Rapport et Manuel)	Wagner SABOIA
Calibrage	Marcelo PARADA
Intégration des programmes et interface	Alexandre GOLLUB
Programmation	Jean-Christophe LAVOCAT
Pilotage Projecteur/Caméra et support mécanique	Aurélien ARNAUBEC

DotProject

DotProject est un logiciel gratuit de gestion de projet. Il aide dans la création et dans le suivi des divers aspects du projet comme : la gestion du budget, la création et l'affichage du Gantt, la gestion des documents et bien d'autres. Il se présente sous la forme d'un site internet où il est possible d'insérer et d'administrer toutes les données.

Nous avons utilisé *DotProject* comme base de données, pour conserver les rapports hebdomadaires, les documents scientifiques, les documents intermédiaires (réponse à la demande et revue de projet) et les présentations.

Avec ce logiciel nous avons aussi créé et suivi le *Gantt* et le budget de notre projet. Malheureusement, avec la restructuration du réseau internet de l'école, nous nous sommes

retrouvés dans l'impossibilité d'utiliser ce portail durant un long mois. Nous utilisons donc cet outil moins fréquemment qu'à l'origine de notre projet.

Budget

Nous avons un budget initial de 500 €, qui devait servir à l'achat du système d'acquisition des images (a priori une webcam classique, trouvée sur le marché) et à construire le support de l'outil. Le projecteur (l'appareil le plus cher) est mis à notre disposition par l'école. Après les études préliminaires du prix des instruments nécessaires, nous sommes arrivés au budget prévu de 400€.

BUDGET PREVU	
Webcam	150 €
Structure Mécanique	250 €
TOTAL	400 €

Après avoir constaté des problèmes pratiques dus à l'utilisation d'une webcam classique (contrôle automatique du gain, l'exposition automatique, interpolation, etc.), nous avons décidé d'utiliser une caméra industrielle noir et blanc totalement réglable. Ceci a augmenté considérablement le montant de notre budget. En effet, il fallut non seulement tenir compte du prix élevé de la caméra, mais aussi de la nécessité d'achat d'une lentille pour l'objectif. Il fut, de plus, nécessaire de confectionner un fond noir (support optique), pour que la lumière ne soit pas réfléchiée par le mur, ceci afin d'éviter des lumières parasites et des ombres.

BUDGET ACTUEL	
Caméra Industrielle	710 €
Lentille Objective	200 €
Structure Mécanique	70 €
Support Optique (Fond Noir)	48 €
TOTAL	1028 €

Réunions et rapports hebdomadaires

Les réunions avec le tuteur, d'environ une heure, ont eu lieu chaque Mardi, avant ou après l'horaire réservé pour le projet transverse. Pendant ces réunions, nous amenions au tuteur des informations sur l'état d'avancement du projet et sur les problèmes rencontrés. Nous discutons du rapport hebdomadaire précédent, des questions techniques, ainsi que des problèmes de gestion de projet.

Les rapports hebdomadaires contenaient la description du travail réalisé par chaque membre du groupe au cours de la séance précédente, un résumé de la réunion avec le tuteur et ses conseils, les décisions prises et le travail de chacun pour la séance à venir.

Avec l'accord du tuteur une partie des rapports a été écrite en anglais, étant donné que cette langue est plus couramment utilisée sur les documents scientifiques, et que notre équipe est internationale (3 membres Brésiliens, 2 membres Français).

Etude de définition du prototype

Etude des méthodes

Méthode 1 : Balayage de lignes

Introduction :

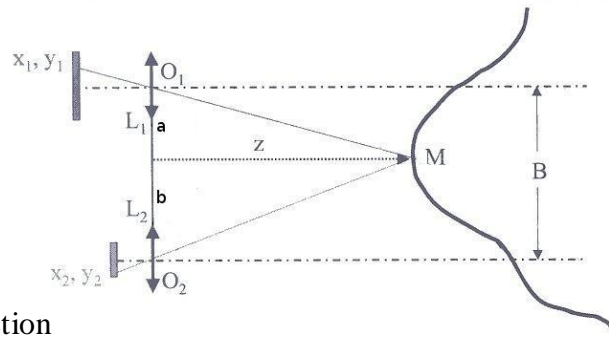
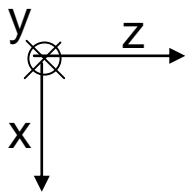
Le procédé de Balayage de lignes est une amélioration de la méthode de *triangulation*. La triangulation consiste à calculer la position d'un point à l'aide de l'effet de parallaxe entre deux références, qui peuvent être deux caméras (vision stéréoscopique) ou une caméra et une source de lumière (généralement un laser, dans notre cas un rétroprojecteur).

Caractérisation des images :

Dans cette méthode on projette des *bords de plage*.

Les bords de plage consistent en une division de l'image en deux, avec une ligne verticale. On allume un des deux demi-plans définis par cette ligne, l'autre demi-plan reste sans éclairage. On commence avec une image entièrement éclairée, et on rajoute des lignes noires, une par une, de la gauche vers la droite, jusqu'à avoir une image toute noire. L'intersection entre les deux parties différemment éclairées est notre « ligne » balayable.

Traitements des images :



(x_1, y_1) - Position des *pixels* de projection

(x_2, y_2) - Position de chaque pixel de la matrice CCD

Le calcul de profondeur s'effectue à l'aide de règles géométriques simples : ainsi on applique deux fois le théorème de Thalès et on obtient le système d'équation suivant :

$$\frac{B - b}{z} = \frac{x_1}{f_1}$$

$$\frac{x_2}{f_2} = \frac{b}{z}$$

La combinaison de ces deux équations donne alors le résultat suivant :

$$z = \frac{B}{\frac{x_1}{f_1} + \frac{x_2}{f_2}}$$

Alors, on obtient x et z , et avec la valeur de z , on obtient y grâce à la relation :

$$y = z \frac{y_2}{f_2}$$

Méthode 2 : Profilométrie Numérique

Introduction :

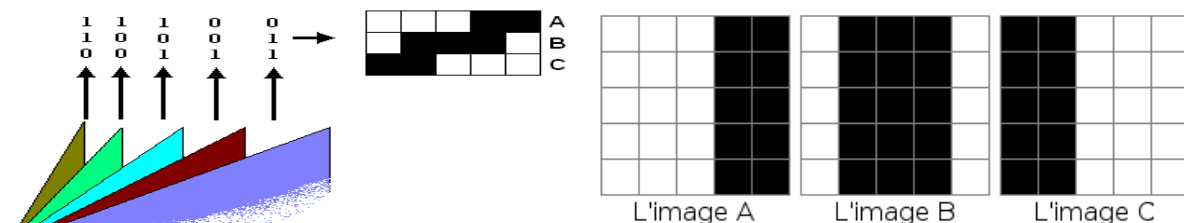
La Profilométrie Numérique se propose de mettre en relation chaque pixel de la caméra avec un pixel du vidéoprojecteur. Nous utilisons la méthode de triangulation pour obtenir les coordonnées (3D) des points de la surface mesurée.

Caractérisation des images :

Cette méthode est une amélioration de la méthode de Balayage des lignes. Nous réglons la caméra et le projecteur de façon à obtenir une absence de parallaxe selon la direction verticale. Il suffit donc de déterminer quelle colonne du projecteur correspond à chaque pixel de la caméra.

Pour cela nous attribuerons à toute colonne un unique code numérique qui définira les images à projeter, ce qui permettra de lier chaque pixel de la caméra à sa colonne du projecteur.

Comme exemple nous pouvons prendre la figure à gauche qui possède 5 colonnes représentant des plans verticaux de projection. Chaque plan est constitué d'un code de 3 bits, ce qui mène à la projection de trois images qui seront composées de pixels blancs (valeur 1) et noirs (valeur 0). L'image A aura les trois premières colonnes allumées, l'image B juste la première et la dernière colonne et l'image C les trois dernières colonnes. Supposons que la hauteur de projection soit de 5 lignes, nous obtenons donc la figure ci-dessous (les images A, B et C représentent les images projetées).



Traitements des images :

Après les projections nous obtenons trois images : a, b et c, correspondant respectivement à la projection des images A, B et C. De cette façon nous avons 3 informations pour chaque pixel : les intensités lumineuses correspondant aux images a, b et c, qui peuvent être hautes (valeurs proches de 1) ou basses (proches de 0). De cette façon nous obtenons un code de trois *bits* pour chaque pixel, qui est le code de la colonne de projection. Nous pouvons donc établir une liaison entre chaque pixel et son plan de projection initial, et il suffit alors de faire une triangulation pour obtenir les côtes de la surface mesurée.

Considérations Supplémentaires :

A) **Numérisation** : La transformation des intensités en bits suppose l'existence d'au moins une image dans laquelle tous les pixels soient éclairés et une autre dans laquelle ils soient tous noirs. Cela pose un problème pour les codes qui n'ont que des 1 ou que des 0.

Pour régler ce problème, nous projetons une image qui éclaire l'objet complètement et une autre sans aucun éclairage. Une autre solution serait l'utilisation de tous les codes possibles, sauf les deux engendrant des problèmes (éclairage total et pas d'éclairage).

B) **Fausse Interprétation** : Nous ne pouvons pas être certains que l'intensité obtenue pour un pixel donné soit la bonne. Pour éviter au maximum ce problème nous établissons le code d'une colonne afin qu'il soit le plus proche possible de ses voisins. C'est bien le cas du codage utilisé dans l'exemple où le code de deux colonnes voisines ne diffère que d'un bit. Ce type de codage est nommé "Code Grey". A part cela, nous pouvons utiliser la méthode de sous-pixel pour trouver exactement la frontière entre les plans de projections.

C) **Répétition des codes** : elle diminue la quantité de bits utilisés pour coder, donc elle diminue aussi la quantité d'images projetées et donc les erreurs d'interprétation. Cependant il est possible de confondre des plans qui sont codés de la même façon.

Méthode 3 : Profilométrie de Phase

Introduction :

La méthode de profilométrie par transition de phase se propose de mesurer la profondeur d'un objet donné grâce à un ensemble de trois images uniquement. Les images projetées sont toutes identiques à une transition de phase près. En effet on projette dans cette méthode un ensemble de franges *sinusoïdales* périodiques. Chaque image est translatée de $\frac{2\pi}{3}$ par rapport aux autres (transition de phase).

Grâce à ces trois images il est possible d'extraire la *différence de phase* introduite par l'objet mesuré. Cette différence de phase est alors calculée en tout point, ce qui permet de créer une cartographie de la phase, et par suite une cartographie de la profondeur de l'objet.

Caractérisation des images :

On envoie trois images : des franges sinusoïdales déphasées, l'une par rapport à l'autre, de $\frac{2\pi}{3}$.

L'intensité des franges est donnée par :

$$I_1 = I'(x, y) + I'' \cos\left(\Phi(i, j) - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$I_2 = I'(x, y) + I'' \cos(\Phi(i, j))$$

$$I_3 = I'(x, y) + I'' \cos\left(\Phi(i, j) + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Ces trois équations permettent de remonter aux trois données du problème : $I', I'', \Phi(i, j)$.

Traitements des images :

Récupération de la phase :

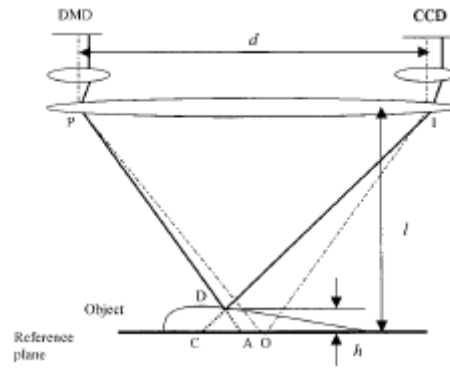
On résout le système d'équation où l'inconnue principale est la phase, et on trouve :

$$\Phi(i, j) = \arctan\left(\sqrt{3} \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3}\right)$$

Ainsi, pour une même scène, après avoir enregistré trois images, on peut donc calculer la phase de chaque pixel.

Récupération de la profondeur à partir de la phase :

L'information de profondeur est contenue dans la phase du signal : le signal est plus ou moins déphasé selon la distance qu'il a parcourue entre l'émission et la réception. L'algorithme suivant permet de remonter de la notion de phase à la profondeur de l'objet étudié.



La différence de phase est donnée par :

$$\Phi_{CD} = \Phi_{CA} = \Phi_A - \Phi_C$$

Et par suite :

$$h = \frac{\overline{AC}}{d(1 + \frac{\overline{AC}}{d})} l$$

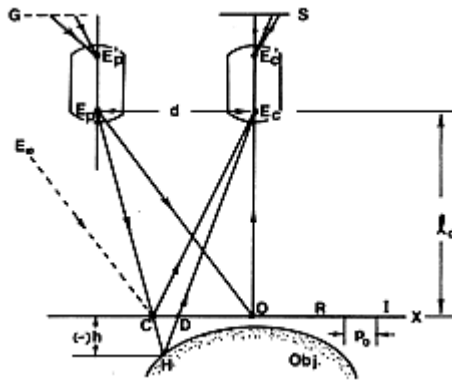
$$h \approx \frac{\overline{AC}}{d} l = \frac{p\Phi_{AC}}{2\pi d} l$$

Ainsi on obtient la profondeur à partir de la phase.

Méthode 4 : Profilométrie par Transformée de Fourier

Introduction :

La profilométrie par transformée de Fourier est un procédé optimisé utilisant l'éclairage structuré, permettant de réduire le nombre d'images nécessaires à la reconstitution du profil.



Caractérisation des images :

En théorie, une seule image suffit. L'image doit être un motif périodique, constant suivant la direction verticale. Cependant, la périodicité introduit une incertitude par saut sur la hauteur du profil. Il est donc préférable de projeter une seconde image de période différente qui permet de lever cette incertitude. Il faut ajouter à cela une image noire et une image blanche pour effectuer la numérisation (ce qui n'est pas indispensable).

$$gr(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{(2\pi i n f_0 x)}$$

Traitements des images :

L'image reçue est une image du même type mais déphasée. La phase contient l'information du profil, à des sauts près. Il faut donc extraire la phase du signal reçu. Pour cela on réalise une *transformée de Fourier* unidimensionnelle sur le signal reçu, puis un filtrage et enfin l'extraction de la phase.

On remonte alors au profil en utilisant la relation suivante :

$$h(x, y) = l_0 \frac{\Delta\Phi(x, y)}{\Delta\Phi(x, y) - 2\pi f_0 d}$$

Spécificités attendues de la caméra

La caméra, qui fait partie du produit final, doit avoir des caractéristiques très spécifiques dues à son utilisation comme instrument de mesure 3D. Ces dernières diffèrent aussi des caméras commerciales normales, qui ont comme but l'aspect esthétique.

Le caractère métrique de notre caméra exigeait une faible distorsion, un contrôle manuel de gain ou un gain fixe, un champ de vue spécifique, une distance focale fixe ou manuellement réglable, une petite ouverture et un faible bruit.

Comme les technologies ont une performance similaire, le type de capteur (CCD ou CMOS) n'a pas une grande influence sur nos mesures.

Pour pouvoir faire la triangulation il faut avoir une petite ouverture permettant le calcul du trajet rectiligne de la lumière de l'objet au capteur CCD. La distance focale et le gain doivent être fixes pendant toute la mesure.

Le champ de vision doit être tel qu'il soit plus petit ou égal au champ de projection du projecteur vidéo.

Il faut aussi que le pilote de la caméra soit compatible avec le logiciel que nous utilisons (MatLab) et que la connexion avec l'ordinateur soit faite par USB.

Type de capteur	CCD ou CMOS
Gain	Fixe ou manuellement réglable
Distance focale	Fixe ou manuellement réglable
Distorsion	Faible
Bruit intrinsèque	Faible
Champ de vue	Egale projecteur (focus $\geq 12\text{mm}$)
Driver	Compatible avec MatLab
Connexion	USB

Caractéristiques et fonctionnement du projecteur

Pour faire les projections, nous avons utilisé un **DLP Front Projector 2300MP**, de la marque **DELL**, qui a été mis à notre disposition par l'école et dont les spécifications techniques sont fournies en annexe.

Le fait que la majorité des projecteurs de l'école sont des *DLP* et que cette technologie soit bien adaptée à nos besoins nous a amené à faire ce choix. Ces projecteurs fonctionnent sur le principe des matrices de micro-miroirs.

Une matrice de micro-miroirs (DMD Digital Micromirror Device, en anglais) est un système électromécanique qui permet la projection d'une image numérique par réflexion des pixels sur des micro-miroirs qui peuvent basculer sur 2 positions différentes : on ou off et la puce, étant entièrement digitale, répond directement à un flux numérique.

La surface contenant les micromiroirs est éclairée par une source de lumière. Chaque miroir peut prendre deux positions : il peut s'incliner de 10° à 15° suivant le même axe, de façon à réfléchir la lumière soit vers une lentille de diffusion « on », soit vers une surface absorbante « off ».

Les structures mécaniques de la puce permettent la mise en mouvement des miroirs. Elles sont placées sur une mémoire de type SRAM. Pendant que les miroirs réfléchissent la lumière, cette mémoire se charge : lorsque toutes les informations sont chargées, tous les miroirs commutent de manière synchrone.

Matlab

Matlab est un logiciel de haute performance, codé spécialement pour le calcul scientifique. Produit par **The MathWorks**, il a comme but de fournir un environnement de calcul numérique dans un langage proche des mathématiques, différent des langages de programmation. Il a aussi des outils de visualisation graphique intégrés afin de faciliter l'exploitation des résultats.

Le langage utilisé par MatLab est un langage interprété qui utilise les *matrices* comme élément principal de calcul. Etant donné que les images sont traitées par l'ordinateur comme des matrices, la manipulation d'images est d'autant plus facile.

Le logiciel dispose de différentes extensions (appelées Toolboxes) qui peuvent servir à diverses applications. Un grand nombre d'extensions est codé par des utilisateurs, qui peuvent mettre à disposition ces Toolboxes librement. Ces Toolboxes peuvent être trouvées sur de nombreux forums scientifiques sur internet.

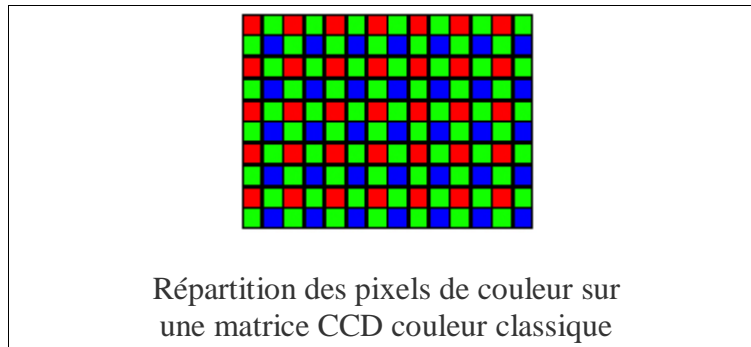
Réalisation du prototype

Problèmes rencontrés avec la caméra

Le choix initial s'est porté sur l'utilisation d'une webcam pour effectuer les acquisitions. L'essentiel était de pouvoir contrôler de la façon la plus spécifique possible l'outil d'acquisition : réglage du temps d'exposition, gain réglable, interpolation des images.

Après quelques recherches sur les sites des constructeurs, quelques modèles sont sortis du lot, et nous avons décidé d'acheter l'un des modèles retenus. Nous avons déjà testé les modèles de webcam que chacun des membres du groupe possédait, mais aucun n'avait de gain réglable même si cela était mentionné dans le pilote de gestion de la caméra.

Heureusement, avant l'achat d'une webcam, nous nous sommes rendu compte que la technologie employée dans une caméra couleur (Algorithme du filtre de Bayer) impliquait une interpolation des données, ce qui aboutissait à de fortes régressions de résolution.



Ce point avait déjà été soulevé par Monsieur Lequime, mais nous ne savions pas que l'algorithme de traitement effectuait une interpolation qui fausserait nos mesures. Ainsi, pour éviter les moyennages dus à cet appareillage, nous avons décidé d'abandonner l'utilisation d'une webcam couleur.

En contactant des sociétés d'astronomes amateurs, nous pensions trouver des webcams noir et blanc, mais il s'est avéré que seuls des réglages post acquisition permettaient d'obtenir du noir et blanc à partir d'une image couleur sur une webcam. Ainsi les distorsions d'une webcam rendent donc inadaptées cet appareil de mesure.

Nous avons donc dû nous résoudre à étudier une alternative pour nos acquisitions. La solution choisie fut d'obtenir une caméra CCD haute définition. Celle-ci est donc en Noir et Blanc et nous permet de régler le gain manuellement.

Décisions prises

Les décisions et actions prises par le groupe peuvent être réparties en 5 domaines bien définis, tout en gardant la chronologie des événements et ses conséquences :

Veille et Gestion de Projet, Objets et Environnement, Appareils Electroniques, Software et Support.

Veille et gestion de projet

Recherche (veille technologique)

L'éclairage structuré n'est pas une technique simple à comprendre. Utiliser un seul capteur optique amovible et réussir une mesure des objets en trois dimensions est encore moins évident. C'est pour ces motifs que la veille technologique au début de notre projet était un point clé pour atteindre deux objectifs principaux : apprendre les différentes méthodes et astuces concernées et par conséquent prévoir toute la problématique de notre projet.

Après une première recherche nous avons réparti l'étude en cinq différents domaines disjoints de recherche. Ces domaines ont été répartis entre les cinq élèves membres du groupe.

Chacun devait trouver des papiers scientifiques et faire un résumé qui était présenté aux autres membres au début de chaque séance. La majorité des informations, comme le lecteur peut le constater dans la bibliographie, ont été extraites de deux instituts, très connus dans le domaine de l'optique : OSA (« Optical Society of America ») et SPIE (« Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers »). Seulement quelques unes proviennent de la société IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Finalement, après avoir réuni toutes les informations importantes, nous avons décidé que notre instrument réaliserait la mesure de profilométrie par quatre méthodes différentes. Ces méthodes coïncident avec quatre domaines de recherche découlant de la veille technologique : Le Balayage de Lignes, la Profilométrie Numérique, la Profilométrie de phase et Profilométrie par Transformée de Fourier. Les méthodes sont citées suivant un ordre croissant de difficulté, pour une personne qui voudrait apprendre progressivement. Nous avons trouvé quand même d'autres méthodes à savoir : les franges de Moiré, Profilométrie Linéaire et les méthodes en couleur. Ces méthodes n'ont pas été choisies, puisqu'elles sont soit des méthodes peu utilisées, soit des méthodes qui ont trouvé des astuces pour prendre moins d'images de l'objet, n'ajoutant pas grand-chose du point de vue pédagogique.

Organisation du groupe

Nous nous sommes organisés pour finir le projet (très ambitieusement) fin avril. Les justifications sont simples : nous voulions avoir une marge raisonnable pour être flexible face à de possibles obstacles pendant le déroulement du projet. De plus, la fin d'année étant surchargée, finir avec un mois d'avance était souhaitable. Evidemment, il y a toujours beaucoup d'obstacles et d'imprévus dans un projet, il nous a donc semblé indispensable de profiter de chaque précieuse seconde consacrée au projet transverse.

Les séances ont été réparties équitablement en cinq périodes. Dans chaque période, il y avait un chef et un rédacteur. Le rédacteur était la personne chargée d'écrire le rapport hebdomadaire. L'objectif du rapport était multiple : moyen de communication avec le tuteur, trace écrite de nos décisions et actions, une description des objectifs et livrables pour la séance subséquente. Le groupe a fait preuve d'une motivation générale pour écrire les rapports en anglais, motivation notamment justifiée par l'hétérogénéité des nationalités des membres. Comme le rédacteur était le plus informé des événements de la période, il devenait le chef de la période suivante.

Le chef était le porte-parole du groupe avec le client et le tuteur. Il était chargé de fixer des rendez-vous, et diriger le groupe pour que le planning soit respecté. Dans le cas contraire, il était chargé de réorganiser le planning (Gantt). La rotation des chefs (et par conséquent de rédacteurs) a été choisie au hasard dès la toute première séance. La répartition des tâches visait à ce que chacun ait un travail disjoint et relativement indépendant en comparaison aux tâches du reste du groupe. Ces tâches, même ayant une durée raisonnable, exigeaient des livrables différents à chaque séance.

Objets et environnement

Dès le début du projet, le groupe s'est demandé de quelle nature serait les objets à mesurer.

On commence par les contraintes liées à la technique d'éclairage structuré. Les objets doivent avoir comme propriétés optiques d'être diffusifs et peu absorbants. En ce qui concerne les formes de l'objet, rien n'empêche les discontinuités. Par contre, l'instrument mesure juste une partie de la surface extérieure de l'objet. En plus, la forme générale de la surface doit être plutôt concave. La raison est simple : selon le degré de convexité d'une partie visible de la surface, il y aura des régions plus ou moins éclairées par le projecteur et non vues par la caméra (zones d'ombre).

Nos exigences par rapport à l'objet concernent les dimensions que l'on a définies mais aussi des enseignements tirés de la phase d'essais. Nous avons décidé que le plus grand objet à mesurer aurait comme plus grande longueur 1 mètre. Ce choix, même s'il est un peu arbitraire, a eu comme principales conséquences le dimensionnement du champ du projecteur et finalement les objets testés. Parmi eux, on pourrait citer des parties du corps humain comme le visage ou un bras, des formes géométriques comme des boîtes ou des boules et finalement des objets de taille moyenne comme des chaussures ou des engrenages. Nous avons rencontré quelques problèmes des parties en couleur plutôt foncées. Même si on a pu régler la sensibilité de la caméra, nous avons averti l'utilisateur que l'on ne peut pas être sûr que des surfaces peu claires seront correctement mesurées (les points incohérents seront supprimés de la surface finale).

L'environnement pour une utilisation optimale de l'instrument est une salle avec un espace suffisant pour l'instrument, l'objet et deux mètres environs entre chaque. Nous avons convenu que notre instrument devait être tolérant à la lumière extérieure. Par contre il y a toujours une limite, l'éclairage direct du soleil étant un cas extrême et non conseillé. Par contre, un éclairage artificiel, s'il est constant pendant la mesure, n'est pas un inconvénient. Néanmoins, des changements abrupts peuvent donner des résultats totalement faux. Ces conditions sont remplies lors des séances de Travail en Laboratoire.

Lentille

Après une étude des produits disponibles sur le marché, nous avons trouvé de nombreuses solutions possibles qui étaient fonction du prix, de la qualité et de la distance focale. Par un calcul géométrique simple, nous avons établi qu'en fonction des paramètres de la caméra et de la distance de travail nous avons besoin d'une distance focale de 12 mm. La décision d'achat a été validée une fois que la compatibilité entre l'objectif et la caméra fut établie. Nous avons choisi une marque connue (Pentax) pour s'assurer de la qualité de celle-ci.

Appareils électroniques

Projecteur

Le projecteur, partie active de la mesure, était une partie du cahier de charge de l'instrument. Pour des raisons de praticité et de coût, nous avons convenu d'utiliser le projecteur qui appartenait à l'école. Ce point n'est jamais apparu comme une contrainte. Le projecteur fut étudié pendant la veille technique. Son contrôle a été réussi grâce à la toolbox « Psychtoolbox ». Pour plus d'information veuillez lire les parties software ou programmation. Seulement un problème inattendu est arrivé : la projection des images ne se fait pas dans l'axe du projecteur mais avec un décalage angulaire. Ce problème ayant été relevé après la réalisation de la structure mécanique nous avons dû réaliser une adaptation avec des extenseurs de pieds. Cette solution visait l'obtention de l'absence de parallaxe selon la dimension verticale.

Ordinateur

L'ordinateur est le point de transit de toutes les informations et commandes. C'est lui qui envoie les ordres de projection et d'acquisition. Nous avons décidé que notre programme devrait fonctionner sur tous les types de systèmes, seulement MatLab et ses toolboxes peuvent seulement être utilisées dans le système d'exploitation Windows (au moins version XP). La vitesse des calculs est évidemment dépendante de la fréquence de son microprocesseur. Comme l'ordinateur utilisé pour le projet doit rester à l'école, le groupe a dès le début demandé l'emprunt d'un des ordinateurs portables mis à disposition pour les projets transverses. Tous les programmes créés dans les ordinateurs annexes devront fonctionner dans l'ordinateur final. Toute information relative au temps de calcul concerne les performances de l'ordinateur final.

Camera

Le choix de la caméra a été la partie la plus délicate de notre projet. La décision dépendait de divers facteurs tels que le budget, la possibilité de réglage des divers paramètres et influençait plusieurs aspects de l'instrument à savoir : sa précision, le traitement d'images, les méthodes qui pouvaient être mise en place, le temps de mesure, le rapport signal à bruit...

La proposition initiale, étant donné le budget limité, était d'utiliser une webcam. Les webcams sont pratiques au sens où l'alimentation et communication sont faites par la connexion USB. Un point primordial est la résolution : c'est la quantité des pixels dans l'image. Une meilleure résolution implique une meilleure précision de l'appareil, mais plus de points à calculer et de temps de traitement. Nous avons choisi une résolution de 1024x768 afin d'obtenir des images haute définition. Nous nous sommes premièrement dirigés vers des webcams de la marque Logitech, surtout grâce au fait qu'elles sont équipées d'optiques de la marque Zeiss de très bonne qualité. Le problème des instruments de mesure est que tous les paramètres doivent être bien fixés pour que l'on puisse calculer les bonnes distances. En revanche après avoir regardé exhaustivement tous les produits disponibles nous n'avons pas

trouvé de caméra ayant une distance focale adéquate et un gain réglable. Suite à un contact par mail, Logitech nous a confirmé ce désagrément.

Finalement on avait trouvé la bonne caméra en ce qui concerne les paramètres réglables : la Philips spc1300nc. Cependant, son champ de vue est beaucoup trop large pour l'utilisation qui lui était réservée. Cela induisait un problème difficile à résoudre au niveau du recouvrement des champs de vue.

Les méthodes de triangulation étant simplifiées par l'utilisation de la parallaxe il était donc judicieux que la caméra puisse être placée dans le même plan que le projecteur. Ceci n'aurait pu être réalisé sans changer l'objectif, changement qui posait des problèmes techniques et temporels importants.

De plus, le fait que la caméra soit couleur posait un autre problème : celui de l'interpolation et du filtrage. Il existe une perte de résolution quand on utilise des caméras couleur à cause de procédures de compression et du filtre Bayer. L'idée du filtre Bayer est que chaque pixel voit une seule couleur et les autres sont obtenues en moyennant les valeurs des pixels voisins. Le fait de moyennner des informations nous fait perdre en précision.

Sachant que la compression d'image (obstacle pour un bon calcul du positionnement des points) existe dans toutes les webcams, nous avons choisi de trouver des caméras professionnelles ou industrielles qui pouvaient répondre à nos exigences.

Nous avons finalement réussi à cibler la caméra nécessaire à notre projet. Elle devait avoir une connexion USB, une résolution de 1024x768, être noir-et-blanc, et avoir un gain et temps d'exposition réglable pour plus d'adaptabilité mais fixes pendant les mesures.

Par contre une telle camera n'existait pas avec les limites budgétaires fixées. Le problème s'est résolu quand M Lequime notre tuteur ait accepté que la charge financière qui concerne la camera soit payée sans être comptée dans le budget.

Après avoir effectué des recherches parmi plusieurs sociétés comme Lumenera, Videology, SiliconImaging, Lord Imaging, Apogee, Hamatsu, The Imaging Source nous avons choisi d'acheter la caméra industrielle suivante :

DMK31AU03 de TheImaging Source équipée d'un capteur Ccd Sony.

Le délai d'attente lors de la réception a été d'un mois et nous avons par conséquent eu un retard important à gérer dans la phase de réalisation.

Software

Le langage de programmation

Le choix du langage de programmation a été réalisé en tenant compte de différents aspects tels que la vitesse de calcul, le temps nécessaire à la programmation et la facilité de manipulation d'images.

Tout d'abord nous avons trouvé une librairie libre publiée par Intel qui s'appelle Open Source Computer Vision Library (OpenCV) dédiée au langage C. Compte tenu de sa complexité, le groupe s'est posé des questions concernant la longueur du temps d'apprentissage lié à cette librairie.

Parallèlement nous avons étudié la possibilité d'utiliser des logiciels de calcul numériques et donc leurs langages de haut niveau, pour des applications en ingénierie comme : LabVIEW, MatLAB ou SciLab. Le premier, est très adapté pour deux parties importantes de notre projet : l'interface graphique utilisateur et la partie contrôle et mesure. Malheureusement en ce qui concerne la partie traitement des images, LabVIEW n'était pas à la hauteur de MatLAB ou SciLab. Ces deux logiciels traitant les données sous forme matricielle, cette caractéristique fut assez intéressante pour le traitement des images.

Le choix final s'est porté sur Matlab, pour lequel nous avons des Toolboxes intéressantes, (boîtes à outils de fonctions) libres, et très adaptés à nos besoins, notamment pour le pilotage du projecteur (Psychtoolbox), le pilotage de la caméra (Acquisition Toolbox) et le calibrage (Camera Calibration Toolbox). Après les premiers essais, nous avons constaté que MatLab était effectivement bien adapté à nos besoins. Le GUIDE (« Graphical User Interface Development Environment ») qui sera décrit plus bas fut aussi un facteur de décision.

Calibrage

Comme déjà décrit dans ce rapport le calibrage consiste à régler deux problèmes assez délicats. Le premier, plus évident à nos yeux, était la calibration de positionnement relatif entre le projecteur, la caméra et l'objet. Le deuxième est basé sur des considérations de la lentille et sa distorsion. Ces problèmes pourraient être considérés comme des projets séparés étant donné la précision envisagée pour le premier problème et la complexité du traitement du signal pour le deuxième.

Grâce à une veille technique assez efficace notre groupe est arrivé à trouver la Toolbox « Camera Calibration Toolbox ». Cet outil utilise la **méthode Zhang** pour le calibrage. Nos recherches avaient préalablement indiqué que cette dernière, ainsi que la **méthode de Tsai**, étaient les plus utilisées et qu'elles donnaient d'excellents résultats. Nous avons donc choisi d'intégrer cette toolbox à notre produit. Cette tâche, ne fut pas triviale. Il fallait surtout bien comprendre les relations existant entre les fonctions, ceci afin que l'interface de notre logiciel et la toolbox soient bien intégrés. De plus, comme cette toolbox ne traitait que du calibrage

d'une camera nous avons ajouté nos propres routines de traitement pour adapter la « Camera Calibration Toolbox » au calibrage du projecteur.

Interface

L'interface du logiciel a été faite grâce à un outil informatique intégré à MatLab appelé GUIDE, « Graphical User Interface Development Environment ». La création d'interface utilise deux aspects complémentaires : un **aspect graphique** construit par blocs élémentaires (comme des boutons, des listes et des fenêtres graphiques) et un **aspect programmation**, dont le code source est basé sur le langage MatLab agrémenté de quelques instructions dédiées. Nous trouvons que le développement d'une interface intuitive et simple est important pour le progrès pédagogique des élèves et qu'il influence leur motivation. C'est pour ces raisons que le code-source de l'interface graphique est le programme principal qui gère les fichiers, les sous-programmes, les routines de contrôle d'appareils électroniques et les fonctions de traitement d'images. Pour plus d'information sur les 5 menus (interfaces) construites veuillez regarder la partie création du logiciel.

Contrôle

Le contrôle des deux appareils électroniques déjà décrits était une phase du projet qui demandait beaucoup de travail. Une première étape nous a permis de mieux comprendre certains des paramètres et fonctions existante dans les toolboxes. Cette étape nous a permis de nous familiariser avec « Psychtoolbox » et « Image Aquisition » (respectivement pour le projecteur et pour la caméra). La seconde étape, assez délicate, fut la mise en œuvre des routines de synchronisation. Cette étape était nécessaire pour arriver à une mesure optimisée. Pour plus d'information, veuillez regarder la partie création du logiciel

Traitement d'images

Même si le groupe possédait un grand nombre de papiers scientifiques sur lesquels s'appuyer, ils n'étaient pas suffisamment précis en ce qui concerne les procédés informatiques. Les algorithmes n'étaient pas, en général, décrits dans les papiers.

Support

Structure mécanique

Si on veut avoir un instrument qui donne de bons résultats avec une précision raisonnable, il faut garantir un positionnement bien défini entre le projecteur et la caméra. Il serait intéressant de montrer l'influence de ce positionnement aux élèves. C'est pour ces raisons que l'on a décidé de créer une structure mécanique stable et bien adaptée aux appareils. De cette façon ceux-ci sont bien fixes pendant les mesures, mais on garde la possibilité de régler la structure sur 5 degrés de liberté. Ces réglages sont aussi une façon de compenser les erreurs de construction de la structure. Nous pourrions ajouter quelques centimètres là où la structure est bancal par exemple.

Nous avons par conséquent projeté, dimensionné et conçu la structure mécanique en suivant les points ci-dessus. Le matériau de base, aluminium, a été choisi pour faciliter la construction et la résistance de la structure.

Optique

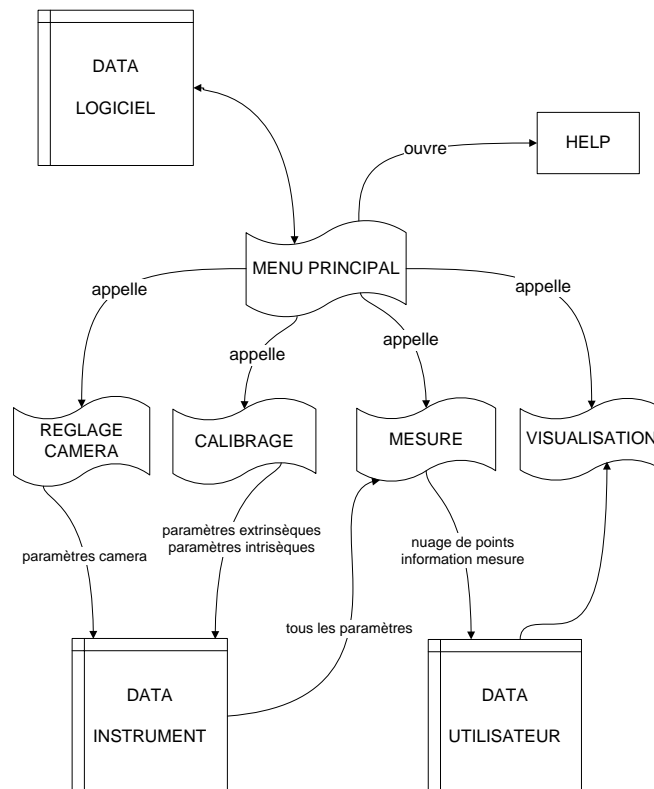
Pendant le déroulement de notre projet nous avons dû construire des outils supplémentaires. C'est le cas, par exemple, du fond noir et du plan de calibration. Durant les premières prises de vue la paroi, derrière l'objet, réfléchissait de la lumière parasite. Après avoir envisagé une méthode informatique pour traiter les images après leur acquisition, nous avons choisi une solution plus facile à mettre en œuvre. Il s'agissait de mettre un fond noir derrière l'objet et de profiter du fait que cette surface ne soit pas « vue » par la camera. Le plan de calibration, pour sa part, ressemble à un tableau d'échecs. Il s'agit d'un élément fondamental pour le calibrage selon la méthode Zhang.

Création et fonctionnement du logiciel

Pour que notre programme soit plus compréhensible nous allons vous le présenter en se basant sur 6 organigrammes (visibles dans les pages suivantes). Pour les lecteurs qui veulent réellement l'utiliser, veuillez lire le manuel dans les annexes. Pour les lecteurs qui comprennent le langage MatLab et veulent donc une vue plus détaillée, veuillez lire le code-source qui se trouve aussi dans les annexes.

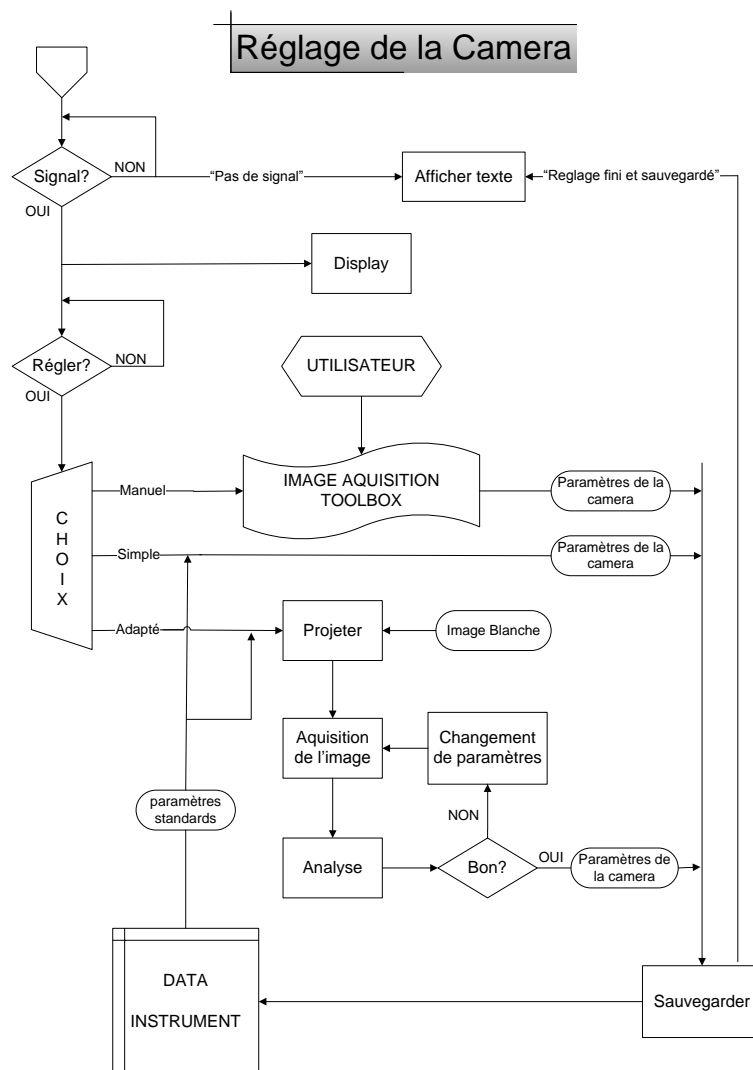
Le premier organigramme, « Vue Générale », représente la gestion des fichiers et des interfaces. Tout d'abord nous avons trois répertoires qui stockent les différents fichiers ainsi que les informations nécessaires au bon déroulement du programme. Ils sont appelés « Data Logiciel », « Data Instrument » et « Data Utilisateur ». Le premier contient toutes les informations persistantes, c'est-à-dire les variables fixes et indépendantes des conditions de l'expérience, de la mesure ou de l'utilisateur. Le deuxième est spécifique au programme. Il contient des informations nécessaires pour réaliser les mesures. Ces informations sont dépendantes de la calibration et donc elles sont susceptibles de changer au cours du temps. Finalement le troisième répertoire contient des informations et variables qui intéressent vraiment l'utilisateur et qui sont exploitées par lui et non par le programme. Nous avons aussi cinq interfaces : « Menu Principal », « Réglage de la Camera », « Calibrage », « Mesure » et « Visualisation ». Le premier étant juste le chef d'orchestre alors que les autres sont les vrais exécuteurs. Ces quatre seront mieux expliqués dans les paragraphes qui suivent.

Vue Générale

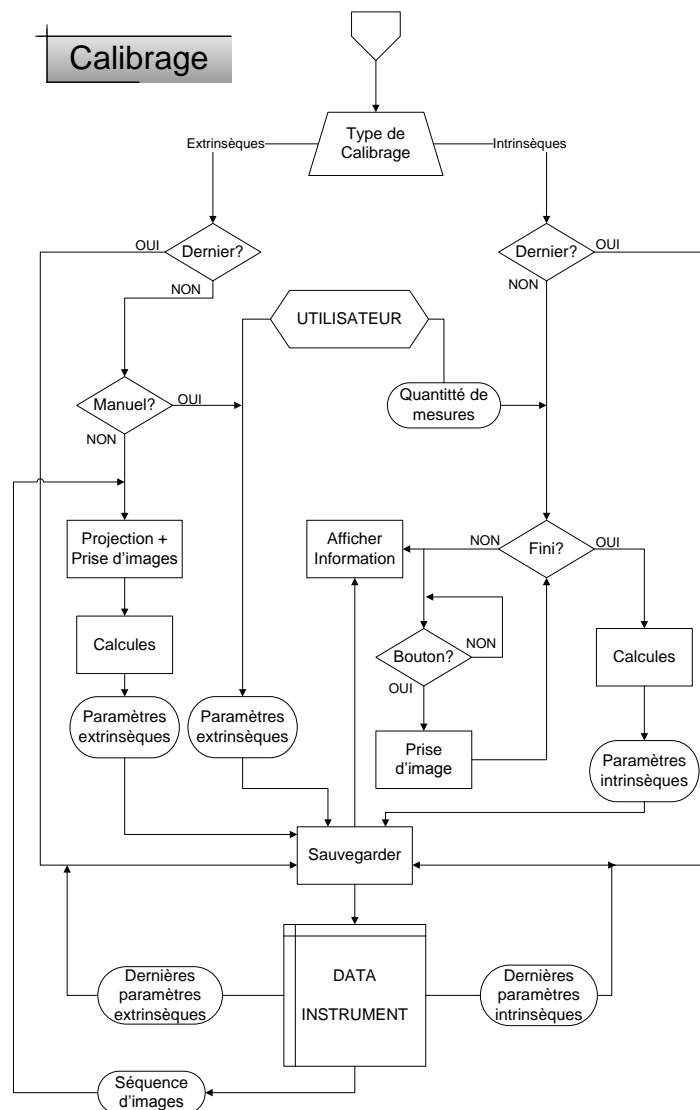


La caméra a un rôle essentiel dans les mesures. Elle doit être réglée de la meilleure façon possible et c'est pour cette raison qu'une interface est dédiée à cette fonction. L'organigramme « Réglage de la Caméra » montre son fonctionnement interne. À travers une fenêtre auxiliaire l'utilisateur peut voir ce que la caméra capte, si tous les branchements sont corrects. A ce moment l'utilisateur a 3 possibilités : faire un réglage manuel, simple ou adapté. Le réglage manuel permet à des gens qui connaissent l'appareil de faire leurs propres choix à partir de l'interface de la toolbox (Image Acquisition).

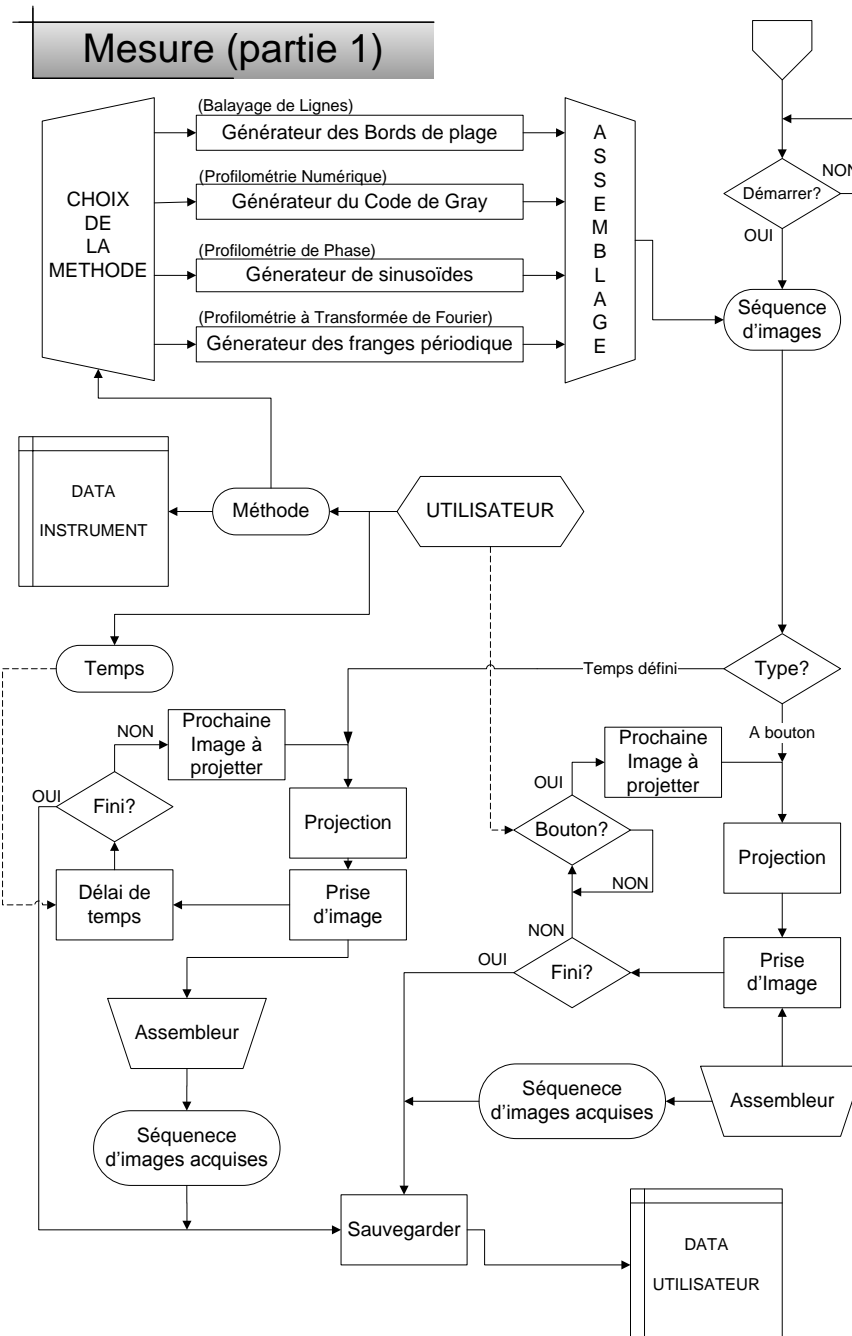
La différence entre un réglage simple et adapté vient de l'ajustement des paramètres qui sont possibles dans la deuxième forme, et standard dans la première. Ainsi, si l'objet est positionné devant l'appareil on peut envisager de trouver des paramètres optimaux en projetant de la lumière blanche dessus. Les paramètres qui méritent d'être commentés sont : le temps d'exposition et le gain de la caméra. La procédure automatique sert à contrôler ces paramètres de façon à ce que les pixels ne soient pas saturés. En fait ces paramètres sont ajustés de façon que l'intensité moyenne arrive à 40% de la limite du capteur, ceci pour des raisons de linéarité de la conversion.



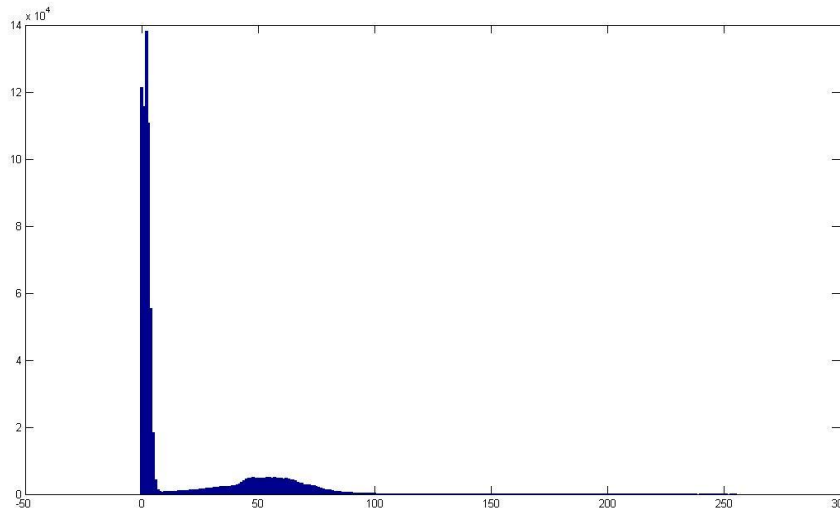
Le calibrage, comme déjà expliqué dans ce rapport, se subdivise en deux catégories : calibrage des paramètres intrinsèques et calibrage des paramètres extrinsèques. Les paramètres intrinsèques concernent la distorsion optique générée par la lentille et son erreur de focus. Les paramètres extrinsèques concernent la position relative entre la caméra et projecteur. Donc le premier calibrage sert à contrôler les aberrations optiques. Le deuxième permet d'obtenir des distances réelles pour la mesure d'un objet. La méthode de Zhang est utilisée pour régler les paramètres intrinsèques à travers plusieurs images d'un échiquier. On profite de cette méthode pour mesurer les paramètres extrinsèques en projetant le même tableau. L'utilisateur a le choix de donner lui même le positionnement relatif entre les appareils.



La mesure se divise en deux organigrammes. La première partie montre la procédure de génération et obtention d'images. L'utilisateur fait le choix de la méthode et ses paramètres inhérents. Le programme génère les images et les met dans une même variable qui s'appelle « séquence d'images ». Pour que la procédure de projection et la prise d'images soient discernables pour l'utilisateur, il peut choisir de la contrôler par un bouton ou en donnant une fréquence de travail à l'appareil. Les images acquises sont ensuite sauvegardées et peuvent être visualisées par l'interface dédiée (qui s'appelle « Visualisation »).



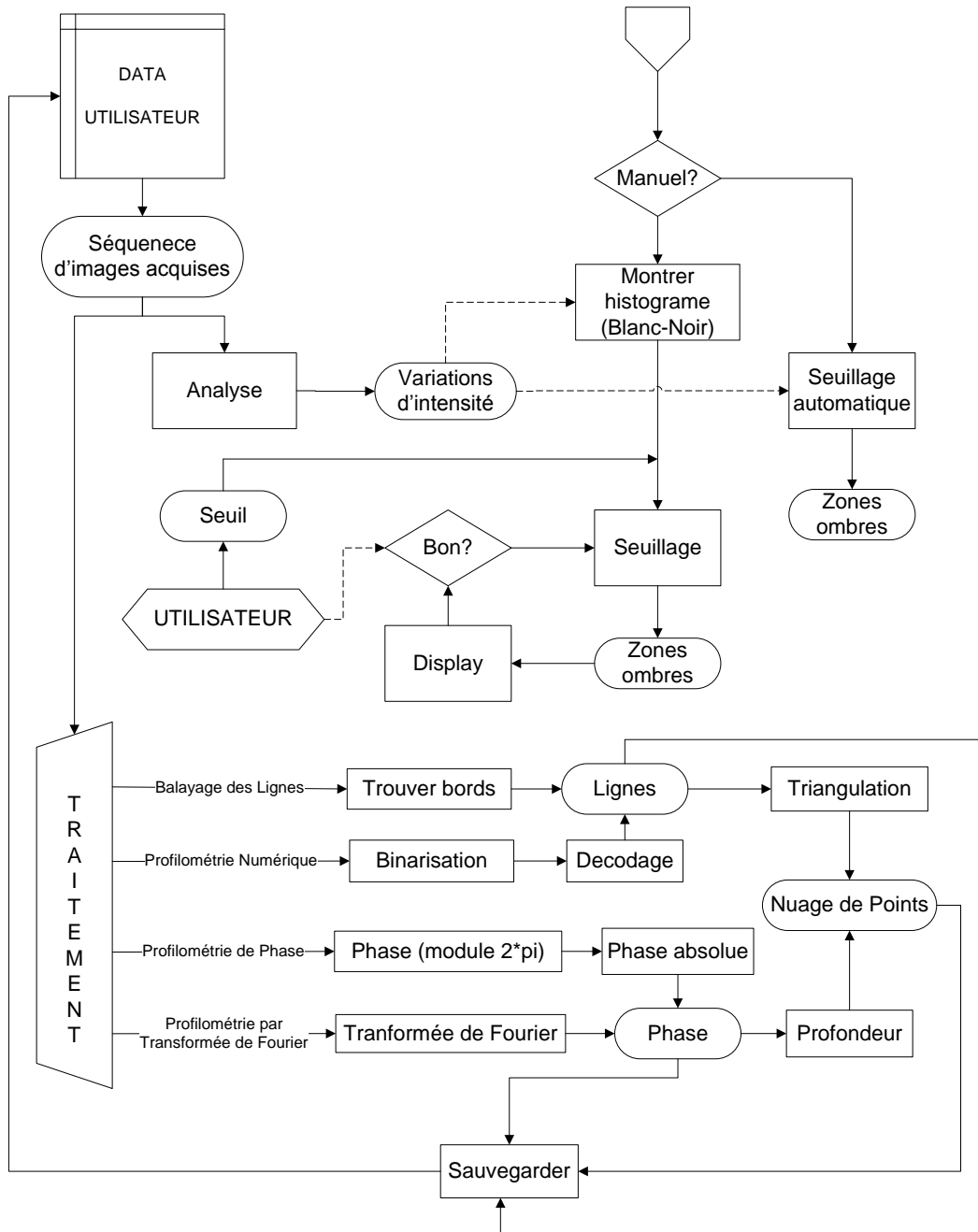
La deuxième partie de la mesure concerne le traitement des images acquises. Avant d'appliquer les procédures spécifiques il faut trouver dans les images quels sont les points qui portent des informations sur l'objet. Par un processus de seuillage on arrive à trouver les zones « d'ombre ». Les zones d'ombre sont les régions d'une image qui n'étaient pas éclairées par le projecteur ou les régions qui appartiennent au fond noir. Au début personne ne savait comment choisir le bon seuil.



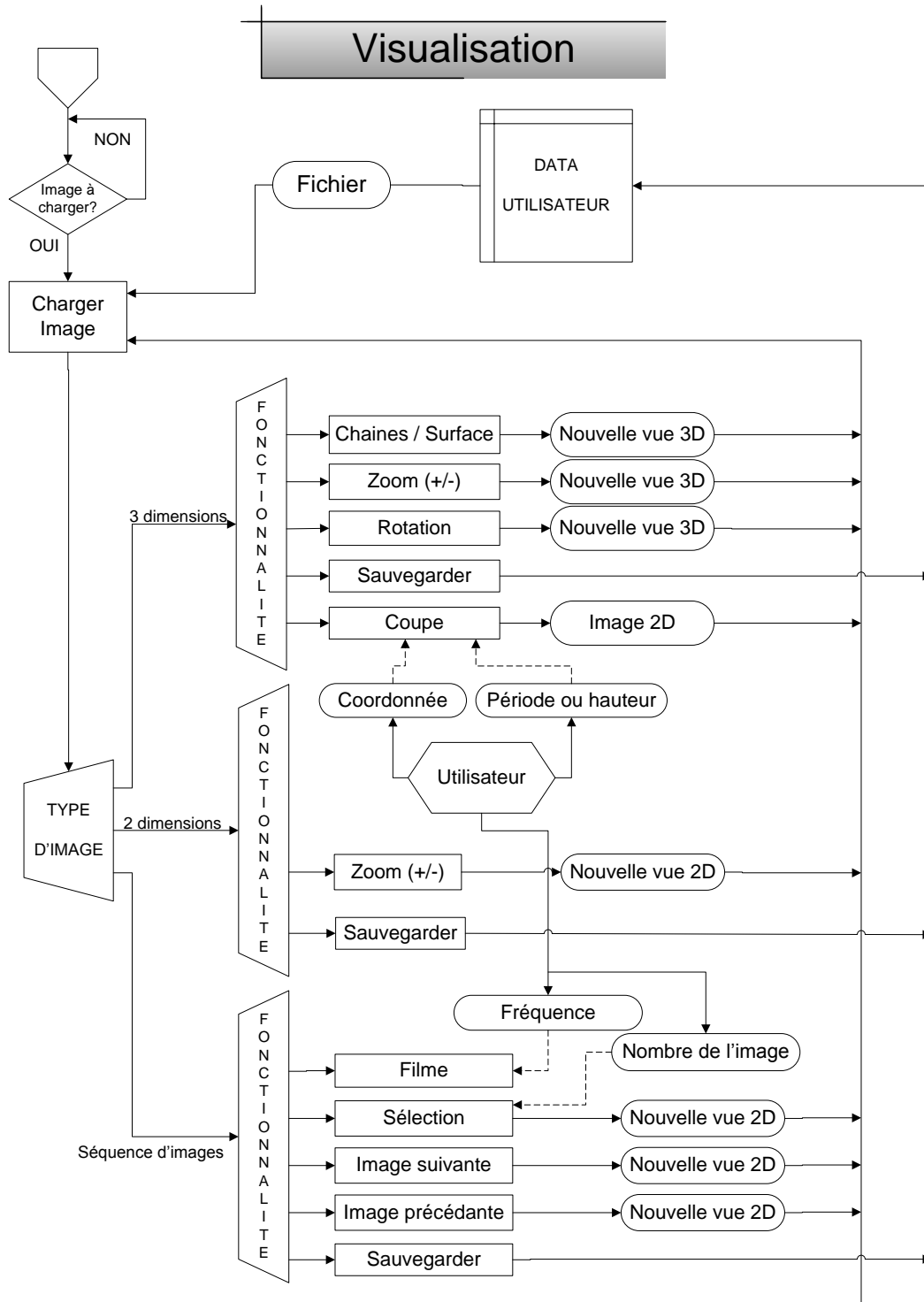
Après une bonne réflexion sur le sujet le groupe a inventé un processus. Ce processus est basé sur la répartition d'intensité des pixels. La figure ci-dessus montre l'histogramme qui permet de définir le seuil. La répartition d'intensité est important pour les faibles intensités : ce sont les points de la zone ombre. La courbe qui ressemble à une gaussienne centré sur 55 est la distribution des points de l'objet. Il est alors facile de percevoir la limite entre la zone d'ombre et la gaussienne. Le choix du seuil peut se faire ensuite soit par l'utilisateur soit automatiquement.

A partir de la zone d'ombre et de la séquence d'images prises on peut extraire les informations intermédiaires (soit les lignes pour les deux premières méthodes, soit les phases pour les deux dernières méthodes). Et en appliquant encore d'autres routines on arrive au nuage des points, le fichier le plus important, qui sera exploité pour l'utilisateur.

Mesure (partie 2)



L'organigramme « Visualisation » montre bien l'adaptabilité de cette interface. Elle peut lire des fichiers qui concernent des images 3d, 2d et mêmes des séquences d'images. Cet outil possède des fonctionnalités qui permettent à l'utilisateur d'exploiter les données. Une fonctionnalité qui mérite d'être citée est la coupe d'un objet 3d en 2d. Celle-ci permet de faciliter la mesure d'une hauteur ou d'un rayon, par exemple.



Support mécanique

La structure devait répondre à certains critères qui ont du être fixés durant une étude préalable.

De cette étude ressortent les critères suivants :

La structure devait être entièrement réglable. Elle se répartie en deux unités : La première étant le support de la caméra et la seconde étant le support du projecteur. La division en ces deux unités permet une grande liberté dans l'espace quant au positionnement relatif des dispositifs.

De plus, le support caméra est réglable dans les trois axes de rotation et de translation. Le support projecteur est réglable suivant les trois axes de rotation.

La structure est entièrement réalisée en acier et aluminium. Elle a nécessité des opérations de découpe et de soudures toutes réalisées par le responsable structure mécanique du projet afin d'en minimiser les coûts.

Le détail des opérations est le suivant :

Unité projecteur :

- ➔ Découpe des barres d'acier et soudure du cadre.
- ➔ Découpe et soudure des pieds
- ➔ Soudure des pates de réglage

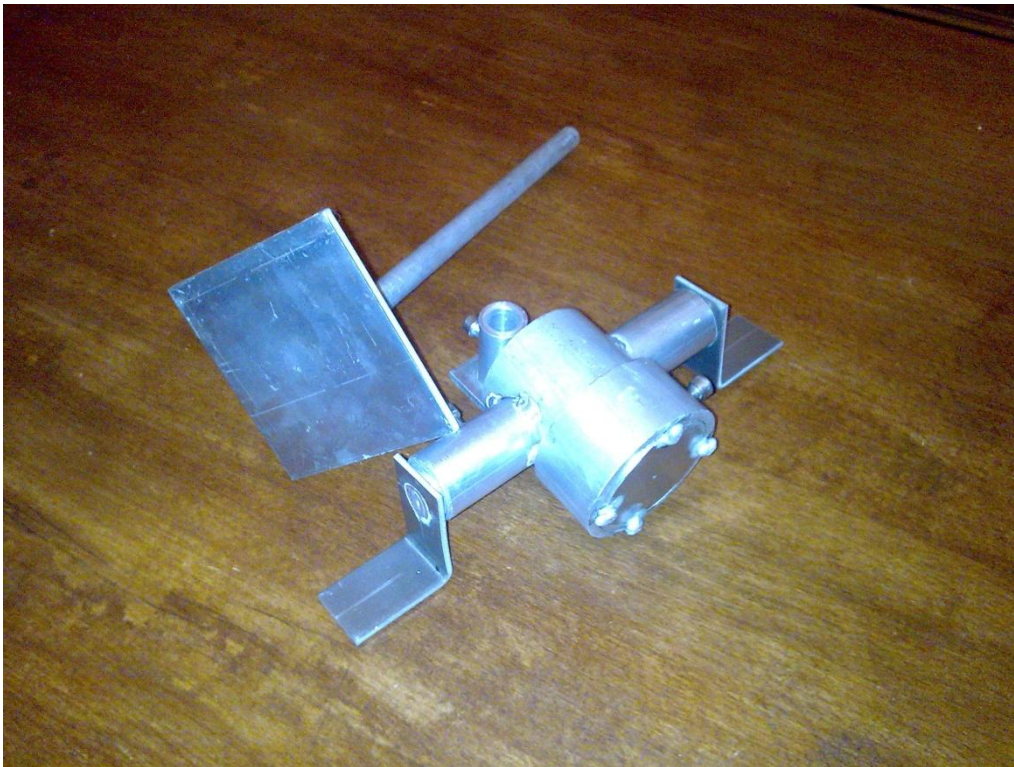
Unité caméra :

- ➔ Découpe des pièces de l'articulation
- ➔ Soudure des pièces de l'articulation
- ➔ Découpe du cadre, encastrement de l'articulation et soudure
- ➔ Découpe et soudure des pieds et des rajouts de pieds.

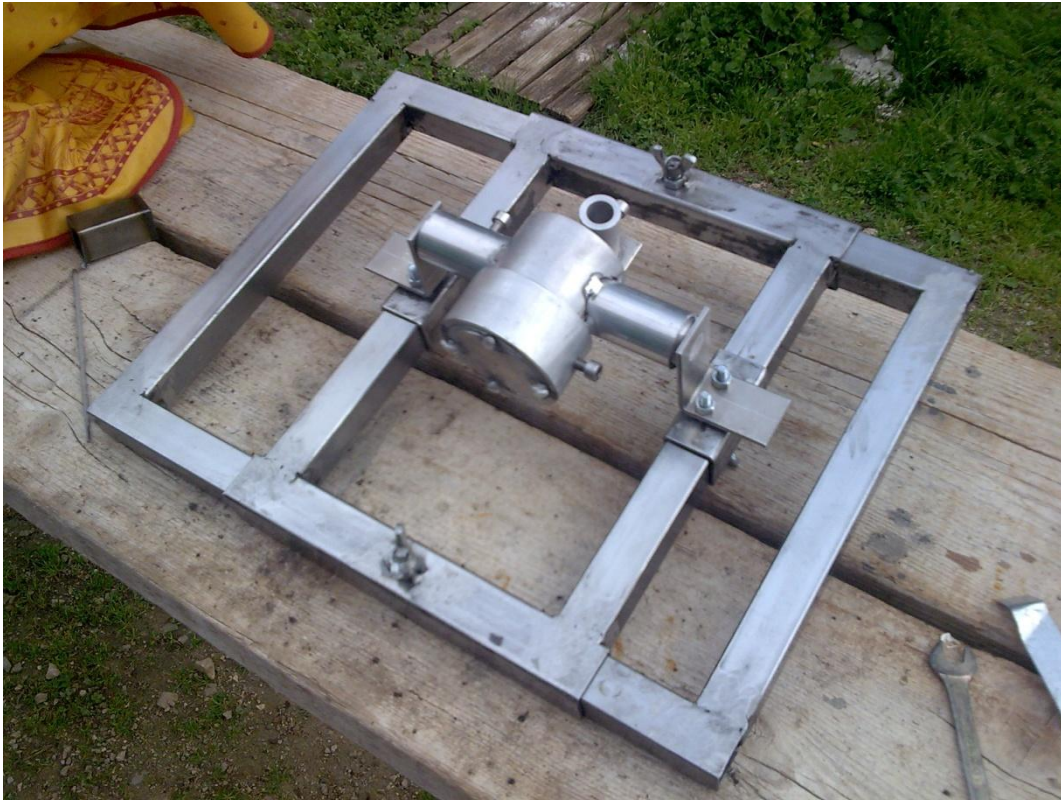
Insertion de l'articulation XoY avant fermeture du cadre :



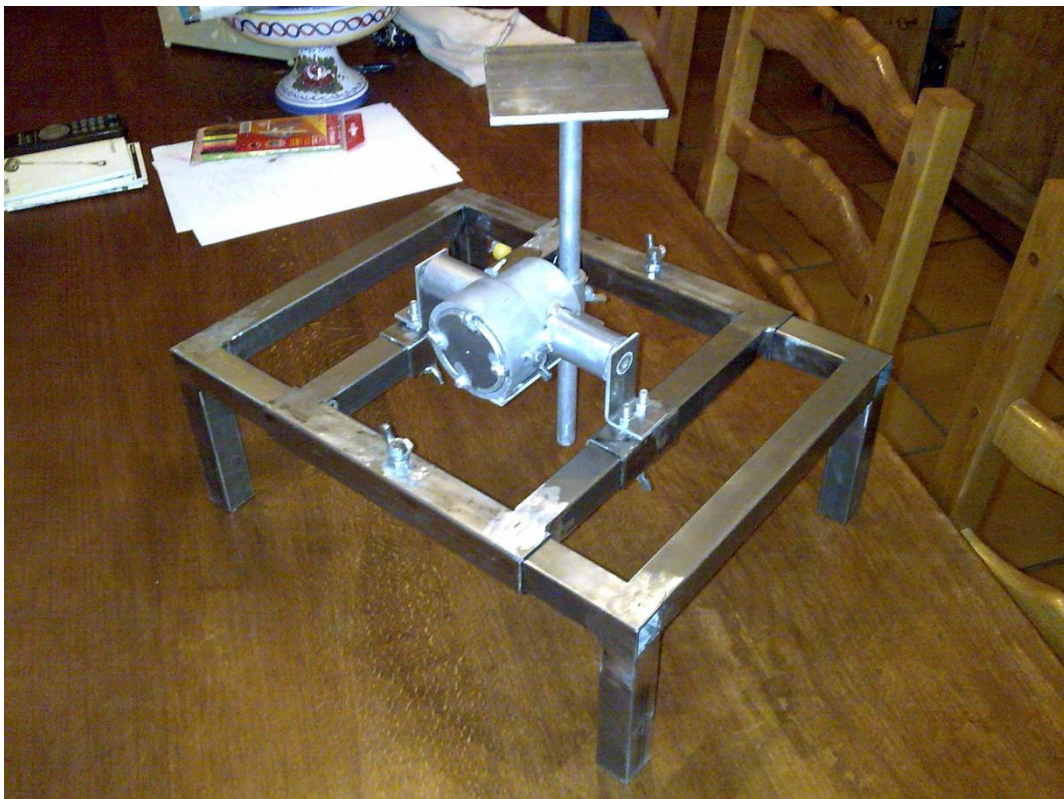
Articulation aluminium des 3 axes de rotation et d'axe de translation Z :



Montage de l'articulation et fermeture du cadre :

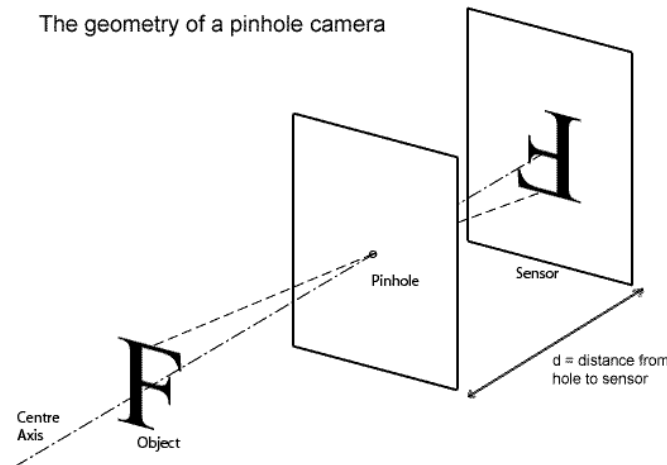


Montage des pieds (la structure caméra est finalisée) :



Distorsion et Calibrage

Le modèle utilisé pour faire une mesure 3D est d'une caméra type pinhole qui, en théorie, n'a pas de lentille et possède une ouverture minimale. Cette type de caméra n'a pas de distorsion, pour bien faire une mesure 3D avec une vraie caméra il est nécessaire que sa distorsion soit minimale.



Calculer la *distorsion* en utilisant un modèle exact de la lentille n'est pas pratique. Il est préférable d'utiliser un modèle empirique.

Il existe différents modèles empiriques. Celui que nous avons utilisé est un modèle du type Zhang tangentiel et radiale dont les équations sont les suivantes :

$$\mathbf{x}_d = \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{bmatrix} = \left(1 + kc(1)r^2 + kc(2)r^4 + kc(5)r^6 \right) \mathbf{x}_n + \mathbf{dx}$$

$$\mathbf{dx} = \begin{bmatrix} 2 kc(3) x y + kc(4) (r^2 + 2x^2) \\ kc(3) (r^2 + 2y^2) + 2 kc(4) x y \end{bmatrix}$$

Où les coefficients kc sont déterminés empiriquement.

Le calibrage se déroule en deux étapes : trouver les paramètres intrinsèques de la caméra et trouver les paramètres extrinsèques du montage. Les paramètres intrinsèques sont décrits par les coefficients kc et la *distance focale*. Les paramètres extrinsèques sont la position de la caméra dans l'espace et son orientation (translation et rotation par rapport au repaire d'origine)

Pour le calibrage nous avons pris plusieurs photos d'un objet connu (dans ce cas, une grille). Nous avons réalisé le montage suivant pour faire le calibrage.

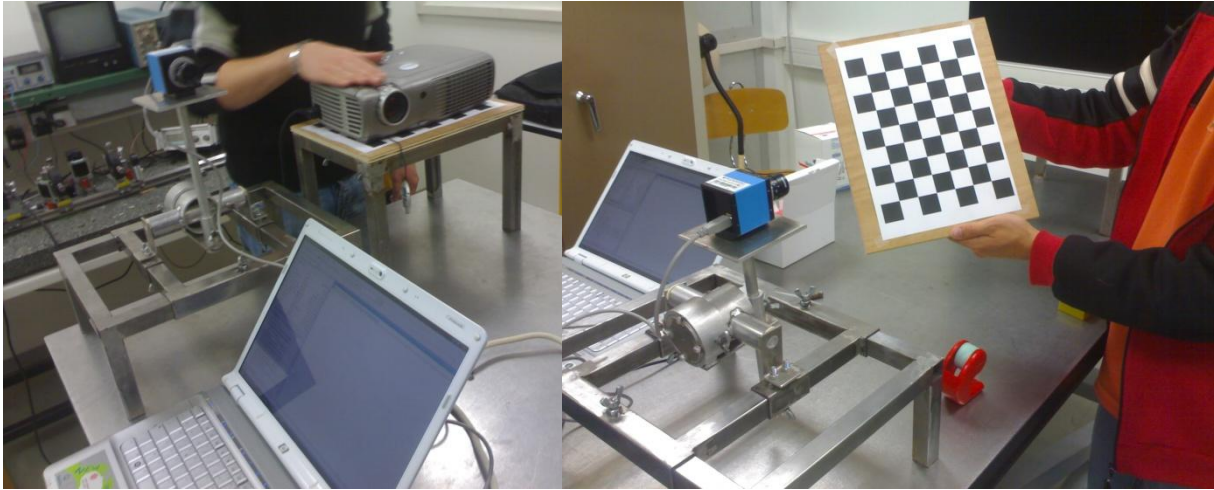


Fig. : Montage pour le calibrage de la caméra

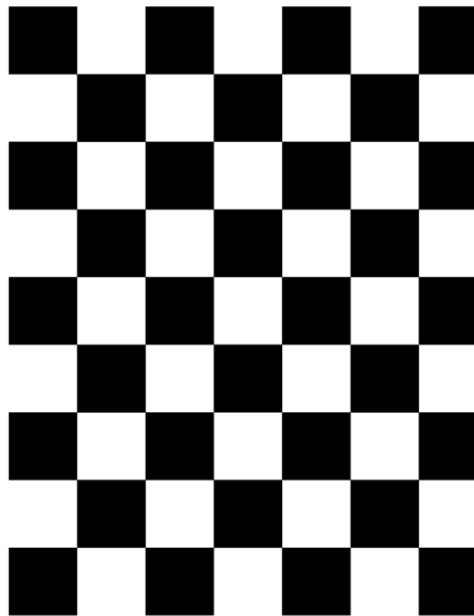


Fig. : Grille utilisée pour le calibrage

Résultats

Les paramètres extrinsèques dépendent de chaque prise de vue. Dans la figure suivante chaque prise de vue était numérotée.

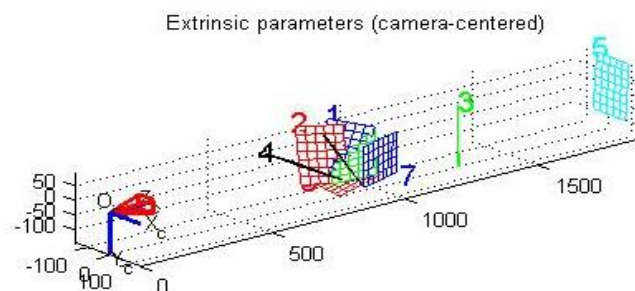


Fig. : Paramètres extrinsèques.

Les paramètres intrinsèques sont calculés selon le modèle précédent et sont donnés en forme de graphique dans la figure suivante.

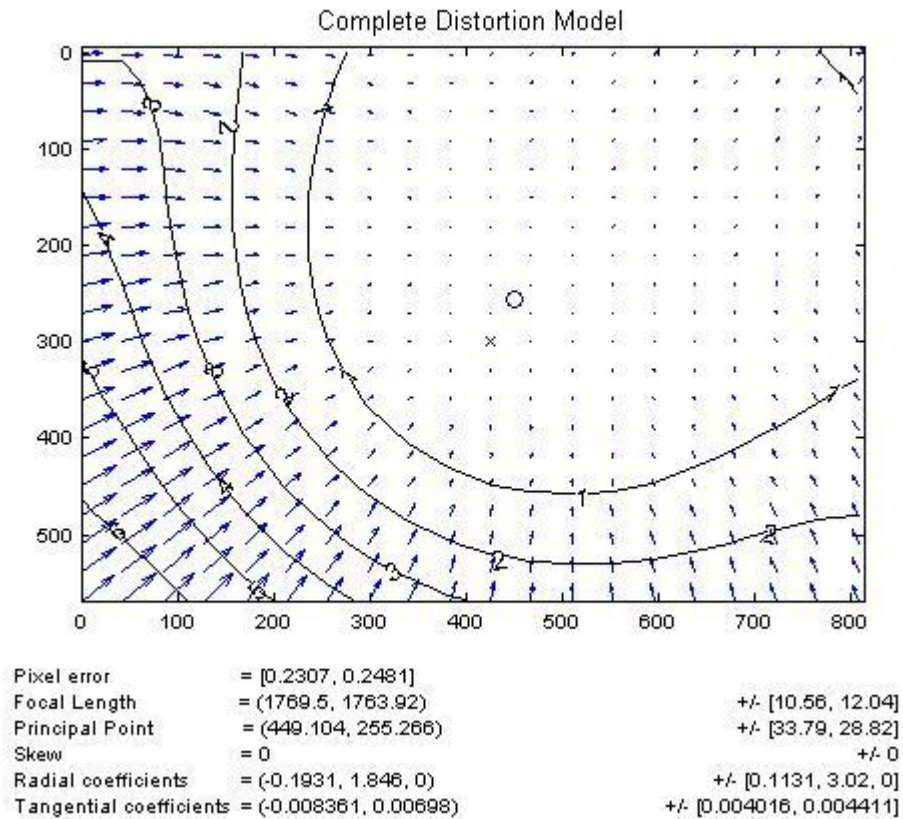


Fig. : Distorsion en pixels

La distorsion maximale de notre caméra est de 6 pixels (située dans le coin en bas à gauche). Cette distorsion est très faible. Nous espérons un résultat de la sorte car la caméra et la lentille utilisées sont des outils de haute qualité.

Test et présentation des résultats

De nombreuses phases de test ont permis de faire avancer les choix et de mettre en évidence les impossibilités techniques. Le dispositif de profilométrie nécessite de pouvoir projeter et acquérir des images, puis de les traiter par des algorithmes informatiques.

La seule donnée du dispositif était le projecteur qui nous a été imposé comme étant un projecteur de type DLP appartenant à l'école. Il en a été de même pour l'ordinateur.

Test d'une Webcam



Le choix le plus complexe a été celui de la caméra adaptée au problème. Nous nous sommes premièrement tournés vers une solution bas coût : une webcam.

Les premiers tests ont alors été effectués en utilisant nos propres webcam afin de valider ou d'invalider ce choix.

Grâce à ces tests, nous nous sommes rendu compte de l'impossibilité de régler la distance de travail : nous souhaitions fixer la distance de travail à environ 2 m, alors que les webcams sont conçues pour acquérir des images avec un grand champ de vision. Cette caractéristique était due à une focale beaucoup trop courte et montée de telle sorte qu'elle ne puisse pas être changée sans adaptation. De plus, toutes les caméras couleurs utilisent l'interpolation et ne sont donc pas fiables pour les résolutions indiquées. Nous avons donc dû nous résoudre à abandonner cette solution.

Toutefois, l'utilisation de webcam nous a permis dans un premier temps de comprendre le fonctionnement des cameras avec notre logiciel de travail (MATLAB). Nous étions alors capables de faire l'acquisition d'images bien que la caméra ne fut pas adaptée.

Projection d'images



Dans le même temps, nous avons dû trouver une solution afin de projeter les images sans cacher l'écran de travail. Ce mode de fonctionnement s'appelle le « Dual Screen » ou « Splitted Screen ». Il consiste à avoir deux affichages différents : un sur l'ordinateur, l'autre sur le projecteur. Une boîte à outils Matlab nous a permis de réaliser cette fonction. Après de nombreux essais (et donc d'échecs) nous avons été en mesure de projeter une image quelconque en mode Dual Screen.

Chaque méthode nécessite que l'on projette une séquence d'image. Nous avons donc choisi de standardiser l'enregistrement de ces séquences sous forme de tenseur d'images afin d'utiliser une seule et même fonction de projection.

Choix d'une Caméra de mesure



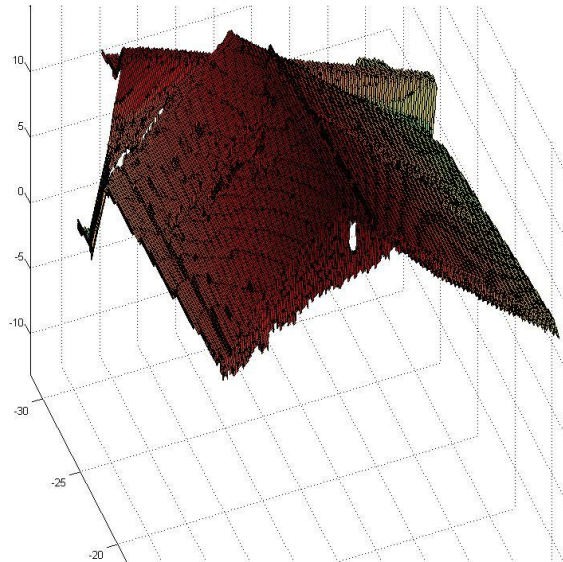
Suite à l'impossibilité de l'utilisation d'une webcam, nous avons essayé de réaliser des acquisitions en utilisant un appareil photo. Malheureusement un appareil photo n'est pas un appareil de mesure mais de rendu photo : nous avons donc été confrontés à des problèmes de réglage de gain et de temps d'exposition. De plus le mode d'acquisition n'était pas pilotable par ordinateur.

Ayant épuisé toutes les solutions bas coût, nous avons dû nous tourner vers une caméra industrielle, conçue pour des acquisitions de mesure. Afin de définir les critères exacts de la caméra, nous avons reformulé totalement l'étude des besoins. Entre la commande et la réception de la caméra, la structure mécanique a été réalisée.

Numérisation de profils

Nous avons donc pu réaliser les premières acquisitions : ces acquisitions ont mis en évidence la nette amélioration de la qualité des images.

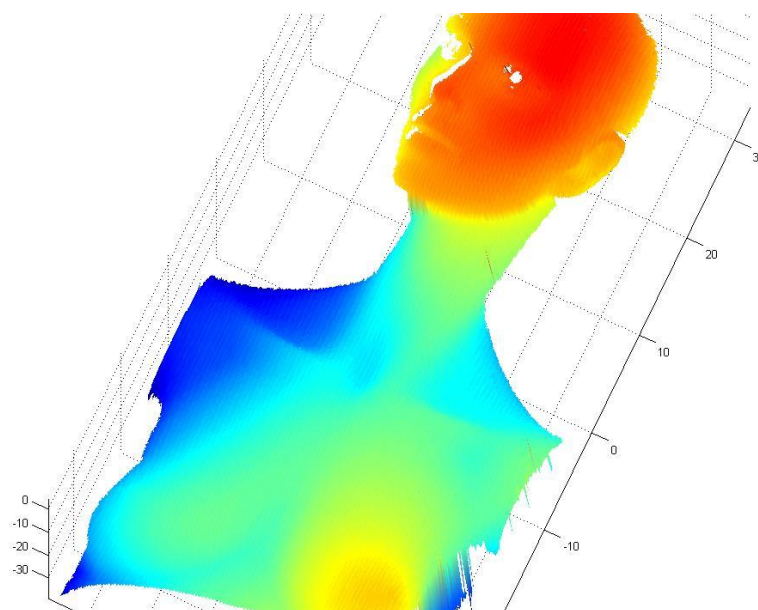
Les acquisitions des séances futures nous ont permis d'aboutir à notre premier succès en profilométrie :

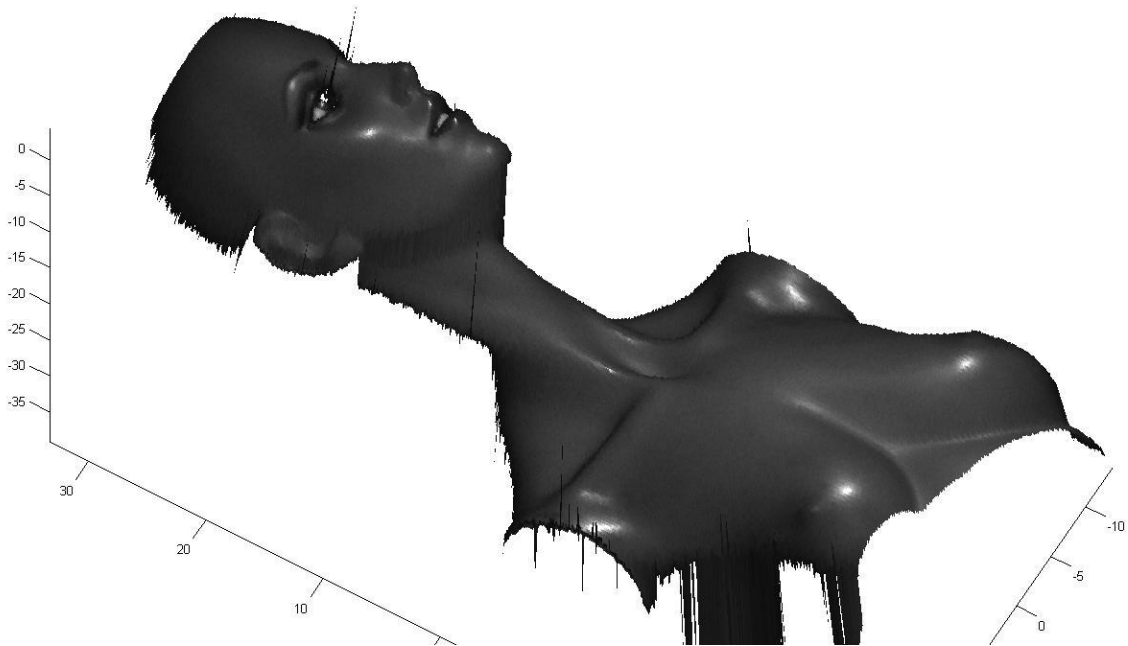


Cette numérisation 3D a été réalisée sur une boîte posée sur un support mécanique. Elle utilise la méthode la plus rudimentaire mais reconstruit de manière fidèle l'objet acquis.

Suite à ce premier succès, nous nous sommes procuré un mannequin, souvent utilisé comme référence en profilométrie. Le rendu a alors été d'une qualité exceptionnelle. Nous avons de plus réussi à implémenter une nouvelle méthode d'acquisition (profilométrie digitale), plus rapide et plus précise.

Voici le résultat de cette numérisation :





Ce résultat s'avère très intéressant autant en terme de rendu que de métrologie. Nous avons pu constater que le rendu correspond exactement au modèle. Il est alors possible de réaliser des coupes afin de vérifier l'exactitude des côtes.

La numérisation d'objets géométriques simples permet d'effectuer des réglages et de vérifier la précision du dispositif. La prochaine étape concerne donc la profilométrie d'objets simples tels qu'une sphère ou une pyramide.

Conclusion

Le projet transverse nous a fait découvrir l'aspect gestion de projet de l'ingénieur, notamment le travail en groupe et le management du temps. Nous avons pu travailler en groupe sur un sujet complexe en découvrant des solutions déjà utilisées ailleurs ou en créant nos propres solutions aux problèmes rencontrés.

La recherche de méthodes existantes de mesure 3D à l'aide d'un éclairage structuré nous a fait rencontrer plusieurs méthodes. Seules quatre furent choisies pour ce projet. Cette recherche nous a aussi montré que pour la recherche scientifique il faut utiliser plusieurs sources en différentes langues, principalement l'anglais.

Nous avons eu la possibilité de travailler avec des instruments optiques, notamment la caméra, le projecteur et la lentille. L'apprentissage du pilotage de ces outils, avec un logiciel comme MatLab, est très important dans différents domaines.

Nous avons gagné de l'aisance dans l'utilisation du logiciel MatLab, vu que toute la programmation a été écrite avec le langage du logiciel.

Comme mentionné sur le Gantt nous avons fait un planning pour finir le projet un mois avant la soutenance. Même si nous n'avons pas réussi à la suivre, cette approche nous a motivé à aller plus loin. Cela nous a donné des repères temporels importants et nous a permis de constater l'avancement ou le retard des tâches. Enfin, cette expérience nous a montré qu'il y a toujours des aléas dans un projet, mais qu'il est possible de les contourner pour bien arriver à la fin du projet.

Bibliographie

Vision globale sur l'éclairage structurée

ZHANG S., HUANG P. S. Novel method for structured light system calibration. *Optical Engineering*, August 2006, vol. 45, n° 8, 8 pages.

REMONDINO F. From point cloud to surface: The modeling and visualization problem, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV-5/W1

MOREL O., SEULIN R., STOLZ C., et al. Eclairage structuré et vision active pour le contrôle qualité de surfaces métalliques réfléchissantes.

CHEN F., BROWN G.M., SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *Optical Engineering*, January 2000, vol. 39, n° 1, pp. 10-22.

Profilométrie Numérique

PAN J., HUANG P. S., ZANG S., et al. Color n-ary gray code for 3-D shape measurement. In: *ICEM12 - 12th International Conference on Experimental Mechanics*, 29 August - 2September (2004), Politecnico di Bari, Italy.

SANSONI G., CORINI S., LAZZARI S., et al. Three-dimensional imaging based on Gray-code light projection: characterization of the measuring algorithm and development of a measuring system for industrial applications. *Applied Optics*, November 1999, vol. 38, n° 31, pp. 4463-4472.

GARTNER H., LEHLE P., TIZIANI H. J. New, highly efficient, binary codes for structured light methods. *Proceedings of SPIE*, January 1996, vol. 2599, pp. 4-13.

LIU W., WANG Z., MU G., et al. Color-coded projection grating method for shape measurement with a single exposure. *Applied Optics*, July 2000, vol. 39, n° 20, pp.3504-3508.

PAN J., HUANG P. S., CHIANG F. Color-coded binary fringe projection technique for 3-D shape measurement. *Optical Engineering*, February 2005, vol. 44, n° 2, 9 pages.

Profilométrie de Phase

HUANG P. S., ZHANG S., CHIANG F. Trapezoidal phase-shifting method for three-dimensional shape measurement. *Optical Engineering*, December 2005, vol. 44, n° 12, 8 pages.

ZHANG S., HUANG P. S. Phase Error Compensation for a 3-D Shape Measurement System Based on the Phase-Shifting Method. *Proceedings of SPIE*, November 2005, Vol. 6000, 10 pages.

TOYOOKA S., WAASA Y. Automatic profilometry of 3-D diffuse objects by spatial phase detection. *Applied Optics*, May 1986, vol. 25, n° 10, pp.1630-1633.

Profilométrie Hybride Numérique et de Phase

ZHANG S., HUANG P.S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement. Optical Engineering, December 2006, vol. 45, n° 12, 8 pages.

SANSONI G., CAROCCI M., RODELLA R. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors, Applied Optics, November 1999, vol. 38, n°. 31, pp.6565-6573.

YOSHIZAWA T., YAMATANI K., FUJITA H. et al. Three-dimensional profilometry using liquid crystal grating. Proceedings of SPIE, April 2003, vol. 5058, pp. 51-60.

YOSHIZAWA T., FUJITA H. Liquid crystal grating for profilometry using structured light. Proceedings of SPIE, November 2005, vol. 6000, 10 pages.

YOSHIZAWA T., YAMATANI K., FUJITA H. et al. Three dimensional surface profilometry using structured liquid crystal grating. Proceedings of SPIE, 1999, vol. 3782, pp. 291-296.

Profilométrie par Transformée de Fourier

LIU W., WANG Z., MU G., et al. Improving Fourier transform profilometry based on bicolor fringe pattern. Optical Engineering, January 2004, vol. 43, n°1, pp.192-198.

Autres Méthodes

MENG L., QIANG F. Three-dimensional profilometry based on coded linear-structure light with isosceles triangle teeth. Applied Optics, November 1999, vol. 38, n°. 31, pp.6528-6531.

GENG Z. J. Rainbow three-dimensional camera: new concept of high-speed three-dimensional vision systems. Optical Engineering, February 1996, vol. 35, n° 2, pp. 376-383.

Webcam

WIKIPEDIA. Webcam – Wikipedia, the free encyclopedia **[en ligne]**. Disponible sur :
< <http://en.wikipedia.org/wiki/Webcam> > (consulté le 23.10.2007).

WIKIPEDIA. Image sensor – Wikipedia, the free encyclopedia **[en ligne]**. Disponible sur :
< http://en.wikipedia.org/wiki/Image_sensor > (consulté le 23.10.2007).

WIKIPEDIA. Algorithme du filtre de Bayer – Wikipedia, the free encyclopedia **[en ligne]**. Disponible sur :
< http://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_photographique > (consulté le 23.10.2007).

Projecteur

WIKIPEDIA. Projecteur – Wikipedia, the free encyclopedia **[en ligne]**. Disponible sur :
< <http://en.wikipedia.org/wiki/Projector> > (consulté le 23.10.2007).

WIKIPEDIA. DLP – Wikipedia, the free encyclopedia **[en ligne]**. Disponible sur :
< <http://en.wikipedia.org/wiki/DLP> > (consulté le 23.10.2007).