



HAL
open science

Mesure de vibrations acoustiques par vision par ordinateur

Matthieu Biggio

► **To cite this version:**

Matthieu Biggio. Mesure de vibrations acoustiques par vision par ordinateur. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. dumas-00915128

HAL Id: dumas-00915128

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00915128>

Submitted on 6 Dec 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

Matthieu BIGGIO

Mesure de vibrations acoustiques par vision par ordinateur

Soutenu le 08 juillet 2013

JURY

PRÉSIDENT : Monsieur José CALI

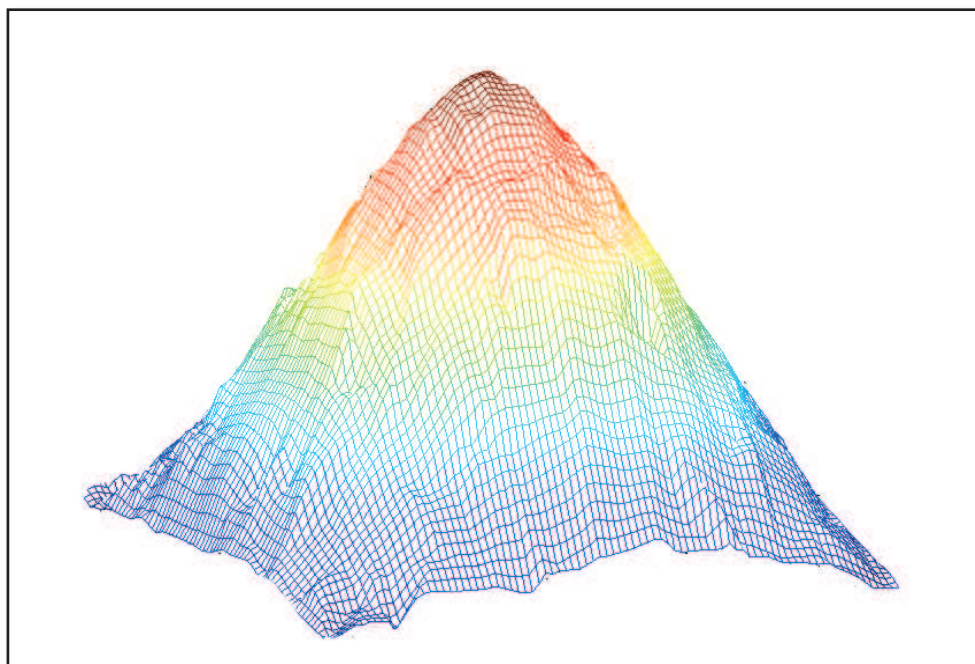
**MEMBRES : Monsieur Stéphane DURAND
Monsieur Charles PEZERAT**

**Professeur Référent
Maître de stage**

Maître de stage : Madame Elisabeth SIMONETTO

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

**MESURE DE VIBRATIONS ACOUSTIQUES
PAR VISION PAR ORDINATEUR**



Soutenu par Matthieu BIGGIO

ENCADREMENT

**Monsieur Stéphane DURAND
Madame Elisabeth SIMONETTO
Monsieur Charles PEZERAT
Madame Marie-Hélène MOULET**

**Professeur Référent
Maître de stage
Maître de stage**

*«La recherche passe par des moments durables et distincts;
intuition, aveuglement, exaltation et fièvre.
Elle aboutit un jour à cette joie et connaît cette joie
celui qui est passé par ces moments singuliers»*

Albert Einstein

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier très chaleureusement Monsieur Stéphane Durand, mon professeur référent, qui a su être à mon écoute lorsque j'en avais besoin et qui m'a grandement conseillé. Je n'aurais pu mener à terme ce projet sans son soutien.

Je remercie mes deux maîtres de stages, Madame Elisabeth Simonetto et Monsieur Charles Pezerat ainsi que Madame Marie Hélène Moulet pour leur encadrement et leurs conseils précieux distillés tout au long de ces vingt semaines. Par extension je tiens à remercier les deux écoles que sont l'ESGT et l'ENSIM pour la mise à disposition de tout le matériel nécessaire à la réalisation de ce projet ainsi que le LAUM pour le financement. Enfin, je remercie le CTTM et plus particulièrement Monsieur Sébastien Surets pour les mesures réalisées avec leurs systèmes et leur traitement.

Merci également à Messieurs José Cali, Frédéric Durand et Eric Labergerie, professeurs à l'ESGT, ainsi qu'à Amine, Cédric, Jordan, Mahmad, Marcell et Yassine qui ont tous participé de prêt ou de loin à l'avancée de ce projet. J'associe Monsieur Hervé Harmange, géomètre expert à Béziers, ainsi que Monsieur Sébastien Vidal, son associé, qui m'ont donné l'envie et la motivation d'exercer ce magnifique métier qu'est géomètre.

Loin des yeux mais près du cœur . . . C'est non sans émotion que je remercie ma famille, et tout particulièrement mes parents et mon frère. Cela fait maintenant trois ans passés loin de vous et voici aujourd'hui l'aboutissement de toute ma scolarité. Vous avez toujours été présents pour moi malgré la distance, vous m'avez soutenu et remotivé lorsque cela était nécessaire. Cela a demandé beaucoup de sacrifices et sans vous je ne serai pas là aujourd'hui.

Enfin, les études mènent parfois à des rencontres inattendues mais au combien importantes. Merci à mes amis, Olivier Gannat et Bertrand Houfflain Delacroix rencontrés à Toulouse mais également Xavier Brunetière. Que ce soit lors du projet ou pour la musique, pour les bons comme pour les mauvais moments, vous avez toujours été à mes côtés et je vous en remercie. Merci également à Marine Moreau (et sa grande famille), plus belle rencontre mancelle que l'on pouvait rêver, pour son soutien sans faille et son amour quotidien.

Je dédie ce mémoire à Derek et Adèle, mon oncle et ma tante partis trop tôt . . .

Table des matières

Remerciements	i
1 Introduction Générale	1
1.1 Problématique	1
1.2 Méthodes vibratoires existantes	1
1.2.1 Accéléromètres piézoélectriques	1
1.2.2 Extensomètres	1
1.2.3 Vibromètres lasers	1
1.2.4 Holographie acoustique	1
1.3 Objectifs du travail de fin d'études	2
I Méthode directe : Utilisation de vraies caméras	3
2 État de l'art	4
2.1 Introduction	4
2.2 La corrélation d'images numériques (D.I.C)	4
2.2.1 Introduction	4
2.2.2 Historique	4
2.2.3 Principe de la méthode	5
2.2.4 Outils industriels	6
2.3 La mesure de franges	8
2.3.1 Historique	8
2.3.2 Principe de la méthode	8
2.3.3 Outils industriels	9
2.4 Corrélation d'images associée à l'interférométrie de speckle	9
2.5 Conclusion	9
3 Processus de restitution photogrammétrique	10
3.1 Introduction	10
3.2 Etapes préliminaires	11
3.2.1 Correction de la distorsion optique radiale	11
3.2.2 Traitement des photos	11
3.3 Traitement avec la texturation grille	12
3.3.1 Présentation	12
3.3.2 Détection des points d'intérêt	12
3.3.3 Mise en correspondance	14
3.3.4 Reconstruction des points	16
3.4 Traitement avec la texturation speckle	17
3.4.1 Présentation	17
3.4.2 Détection et appariement par la méthode SIFT	17
3.4.3 Reconstruction des points	18
4 Validation des processus par simulation et par expérimentation	19
4.1 Géométrie du protocole	19
4.2 Instrumentation utilisée	20
4.2.1 Introduction	20
4.2.2 Appareils utilisés pour l'étude	20
4.3 Validation par simulation	21

4.3.1	Travaux préalables en simulation	21
4.3.2	Méthode utilisant la grille	22
4.3.3	Méthode utilisant le speckle	23
4.4	Validation expérimentale	24
4.4.1	Mise en place du protocole	24
4.4.2	Choix de la méthode de validation	25
4.4.3	Résultats obtenus	25
4.5	Conclusion	28
II Méthode indirecte : Utilisation de miroirs		29
5	Méthode des quatre miroirs	30
5.1	Introduction	30
5.2	Historique	30
5.3	Présentation	30
5.4	Géométrie du protocole	31
5.5	Dimensionnement des miroirs	32
5.5.1	Calcul du champ de vision du NIKON	32
5.5.2	Calcul de la largeur des miroirs	32
5.5.3	Calcul de la hauteur des miroirs	33
5.5.4	Valeurs minimales et maximales pour la taille des miroirs	33
6	Validation par simulation et par expérimentation	34
6.1	Validation par simulation	34
6.1.1	Simulation avec la texturation grille	34
6.1.2	Simulation avec la texturation speckle	34
6.2	Validation par expérimentation	35
6.2.1	Préparation du dispositif	35
6.2.2	Alignement des miroirs par autocollimation	35
6.2.3	Etalonnage	37
6.2.4	Expérience et résultats	38
7	Conclusion générale	40
	Table des figures	42
	Liste des tableaux	43
	Bibliographie	44
	Annexes	46

Chapitre 1 Introduction Générale

1.1 Problématique

Dans le domaine de l'acoustique, l'étude du champ vibratoire des structures est très importante. Prédire leurs réactions permet ainsi de caractériser leur comportement dynamique. Pour cela, nous allons nous intéresser au déplacement normal (de l'ordre de quelques millimètres) que subit un objet lorsque qu'il est soumis à une vibration, de haute ou de basse fréquence. Dans la suite de ce travail, nous restreindrons la vibration à une force ponctuelle appliquée sur l'objet. Nous n'étudierons donc pas ici le déplacement longitudinal (dans le plan de la plaque). Il convient de noter que l'on s'intéresse principalement au déplacement et non à la déformation, même si l'un et l'autre sont intimement liés. La déformation est au déplacement ce que l'altitude est à la dénivelée.

Cependant, les outils vibratoires actuellement à disposition ne sont pas assez satisfaisants pour les acousticiens, car ils recherchent une méthode sans contact et surfacique pour la mesure des déplacements. Ils se tournent alors vers d'autres méthodes.

1.2 Méthodes vibratoires existantes

1.2.1 Accéléromètres piézoélectriques

Ils permettent de mesurer l'accélération linéaire d'un objet puis d'en déduire le déplacement à la surface de ce dernier. Cependant, étant fixés à l'objet, ils ont un effet intrusif de par la masse des capteurs. Ils n'en restent pas moins assez précis et très faciles à mettre en œuvre¹.

1.2.2 Extensomètres

Aussi appelés jauges de contraintes, ils ne mesurent également qu'une déformation locale à partir de la variation de résistance électrique, selon un axe prédéfini [17]. De même que les accéléromètres, ils sont faciles à mettre en œuvre. On trouve aussi les extensomètres en deux dimensions, permettant de mesurer des déplacements dans le plan, déplacements qui sont cependant faussés par les déplacements hors plan (non mesurés) qui introduisent un biais dans les mesures.

1.2.3 Vibromètres lasers

Seuls les vibromètres lasers sont une alternative envisageable pour la mesure de déformations car ils sont sans contact avec l'objet. Il en existe de toutes sortes : haute fréquence, ultrasons . . . Ils mesurent l'effet Doppler, conséquence de la vibration entre le signal émis et le signal réfléchi. La mesure peut être ponctuelle ou surfacique avec les vibromètres laser à balayage. Ces derniers restent cependant difficilement abordables (de l'ordre de 200 000 euros).

1.2.4 Holographie acoustique

Dernière méthode utilisable mais toujours en phase de recherche, l'holographie acoustique s'appuie sur la mesure du rayonnement acoustique pour obtenir ensuite les informations de déplacement². Cet outil d'analyse pour la vibroacoustique fait partie des thèmes de recherche du LAUM.

1. iut-tice.ujf-grenoble.fr/tice-espaces/MPH/EP-gallotLava/wupload/File/Capteurs/TP1-a-Ca-BIBLIO-2010-10-09.pdf
2. acoustique.cnam.fr/recherche/holochamproche.htm

1.3 Objectifs du travail de fin d'études

L'objectif de l'étude est donc de trouver une alternative qui ne présente pas d'inconvénients majeurs. La méthode employée ne doit pas générer de contact avec l'objet et elle doit mesurer la déformation sur l'ensemble de ce dernier et non pas ponctuellement, et ce le plus finement possible.

Nous allons donc utiliser les principes de la photogrammétrie et plus particulièrement de la vision par ordinateur. Pour avoir une information en trois dimensions d'une scène, il faut au moins deux photos de cette dernière depuis deux points de vue différents. C'est le cas de la vision humaine qui, grâce aux deux yeux et au cerveau, nous permet à chacun de voir en trois dimensions. Ici, le cerveau sera remplacé par une chaîne de traitement Matlab et les yeux par des caméras. L'objet étudié sera une plaque mais les protocoles développés dans ce mémoire sont applicables à toute autre surface.

Divers travaux ont été réalisés en amont de ce projet. Débutés en 2009 par Madame Elisabeth Simonetto et Monsieur Charles Pezerat [25], ils ont été poursuivis par Hanen Hamdi, étudiante en Master 2 Recherche à l'ENSIM en 2012, qui a approfondi la modélisation en simulation du champ de déplacement de la plaque et effectué les premiers tests dans le cas réel. Ils ont ensuite été repris par un groupe de trois étudiants de l'ESGT, que sont Xavier Brunetiere, Bertrand Houfflain Delacroix et moi-même, lors d'un projet pré-professionnel en 2013. Lors de ce projet, un protocole pour des mesures dynamiques a été développé ainsi que divers outils et méthodes qui sont venus compléter le protocole principal (sur-échantillonnage, speckle, SIFT). Ce travail de fin d'études s'inscrit dans la continuité de ces travaux avec pour objectifs principaux :

- La validation des résultats en simulation par une expérimentation
- Le développement d'une méthode n'utilisant qu'une seule caméra avec des miroirs

Outre ces aspects, il convient de préciser la démarche qui est employée afin de bien comprendre la manière de procéder pour mesurer le champ de déplacement d'une plaque. Les précédents travaux ont ainsi été repris, synthétisés et agrémentés de références afin de pouvoir avoir une vue d'ensemble sur le projet. D'autres travaux ont été effectués sur cette thématique en dehors de notre projet, qui a donc pour but de proposer une méthodologie complète et détaillée parmi tant d'autres.

Après un bref historique sur les méthodes permettant de mesurer le champ de déplacement d'un objet, nous aborderons dans une première partie le protocole classique de la photogrammétrie utilisant deux caméras qui représentent les deux points de vue différents depuis lesquels on voit l'objet. Une validation en simulation et expérimentale seront ensuite présentées. Dans une seconde partie, nous introduirons un dispositif de miroirs qui permet l'utilisation d'une caméra unique.

Première partie

Méthode directe : Utilisation de vraies caméras

Chapitre 2 État de l'art

2.1 Introduction

Afin de mieux appréhender le comportement mécanique des matériaux, et dans notre cas de connaître le déplacement que subit un objet lorsque celui-ci est excité, il convient de déterminer les déformations tridimensionnelles de ce dernier ainsi que sa forme 3D. Pour obtenir une information sans contact et surfacique, il est préférable d'utiliser des méthodes optiques [21].

Celles-ci se sont beaucoup développées ces dernières années et peuvent être mises en œuvre pour l'extensométrie, science des déformations. Parmi elles, on peut citer le moiré (effet de contraste changeant avec la déformation d'un objet), l'holographie, l'interférométrie, la photogrammétrie ...[4]. L'ensemble de ces méthodes se regroupe dans ce que l'on appelle la photomécanique (Ensemble des métrologies optiques) [2]. Face à la pluralité de méthodes disponibles s'en dégagent principalement deux majeures, développées notamment au niveau industriel. Il s'agit de la corrélation d'images numériques et de la mesure de franges.

2.2 La corrélation d'images numériques (D.I.C)

2.2.1 Introduction

La corrélation d'images numériques utilise le principe de la photogrammétrie, ou dans ce cas de la stéréovision, pour reconstruire une scène en trois dimensions. C'est cette méthode qui nous semble la plus adaptée à notre situation et l'objectif est donc de la mettre en place afin de la rendre accessible au plus grand nombre.

2.2.2 Historique

Utilisée pour la première fois par Aimé Laussedat en 1849, la photogrammétrie repose sur un principe simple : en se basant sur la perception humaine, on va observer le relief par une observation stéréoscopique. Autrement dit, à partir de deux images d'un objet prises à des positions différentes, on est capable de modéliser le relief.

Près d'un siècle plus tard, dans les années 50, Gilbert Hobrough a été le précurseur de la corrélation d'images, utilisant à l'époque des photographies pour identifier les caractéristiques des différentes prises de vues [28]. Travaillant sur un restituteur Kelsh, il démontre le concept de corrélation en comparant analogiquement les niveaux de gris en 1957. Les images numériques ne s'étant développées que vers les années 60 et 70, ce n'est qu'à ce moment là que les premières recherches utilisant ces images dans les domaines de la médecine, de la radiologie ou encore dans la reconnaissance de personne ont débuté. Une chronologie plus détaillée a été réalisée par Azriel Rosenfeld [24].

En 1964, Wasil et Merchant utilisent le principe de la photogrammétrie pour estimer les déformations d'une plaque [30]. A l'époque le système est lourd (plaque de 1.20x1.20m, base de 1.20m distante de 3m par rapport à la plaque) mais l'idée est bien là.

Dans les années 80, les recherches sur l'étude des comportements mécaniques des matériaux ont commencé à exploiter les progrès de la corrélation d'images. Un des premiers travaux a été réalisé par Michael A. Sutton, où il effectue la corrélation de deux images (avant et après déformation avec une seule caméra) à niveaux de gris aléatoires [27]. Cependant, il s'agit bien là de corrélation d'images en deux dimensions, permettant de mesurer des déplacements dans le plan.

En effet, si on utilise un seul appareil photo, on perd la troisième dimension car un point de notre environnement (qui est un point 3D) pris en photo devient un point 2D sur l'image [10].

Il faut ensuite attendre 1993 pour combiner le principe de la photogrammétrie avec la corrélation d'images numériques en deux dimensions afin de pouvoir mesurer les déformations d'un objet (rigide et déformable) en trois dimensions [3]. Aujourd'hui reprise par de nombreux chercheurs, cette technique est largement employée dans de très nombreux domaines de recherche. Dans notre travail, nous utilisons essentiellement les équations de la vision 3D développées notamment par Olivier Faugeras pour la robotique [8].

2.2.3 Principe de la méthode

En résumé : pour accéder au champ de déplacement en deux dimensions à la surface d'un objet, il faut deux images prises avant et après déformation avec une même caméra. Pour observer la forme d'un objet, il faut une paire d'images prises au même instant par deux caméras positionnées à deux endroits différents. Et enfin, pour mesurer le champ de déplacement, il faut deux paires d'images prises à deux instants différents par deux caméras [21]. Tout cela est observable sur la figure 2.1.

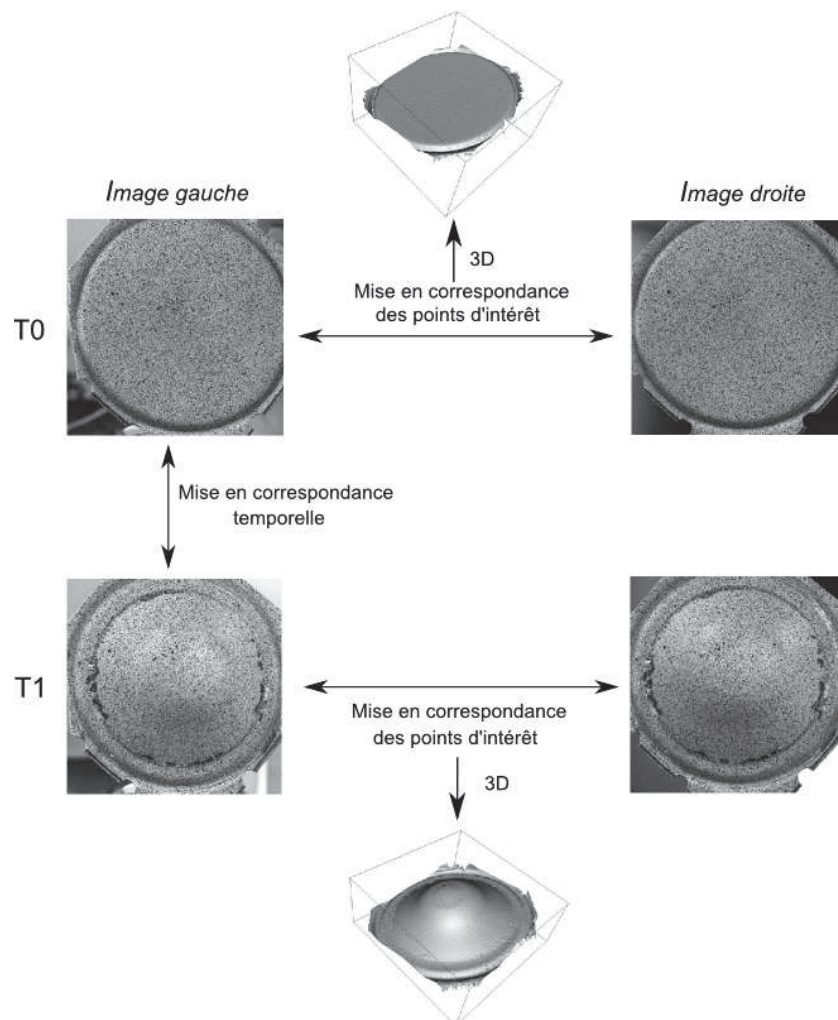


FIGURE 2.1 – Détermination du champ de déplacement d'un objet [21]

Dans tous les cas, la reconstruction du relief de l'objet impose une mise en correspondance des images entre elles et, dans notre cas, impose en plus une mise en correspondance temporelle afin de pouvoir associer les images dans le temps et obtenir l'information de déplacement (Figure 2.1).

Pour pouvoir effectuer cet appariement stéréoscopique, il est nécessaire de disposer de points d'intérêts sur les images, facilement identifiables. L'objectif sera de trouver, à partir d'un point dans l'image 1, son homologue dans l'image 2. Du choix de la texturation de l'objet dépendra le nombre de points d'intérêts, leur répartition . . . On peut envisager différents types de texturation : le tracé d'une grille ou la projection virtuelle de celle-ci avec les avantages et inconvénients de chacun. Au final, tout dépend de ce que l'on veut obtenir, comme nous l'illustrerons par la suite.

Cette méthode requiert donc l'utilisation de caméras dont l'importance est capitale vu que la reconstruction utilise les images prises par celles-ci. De leur qualité dépend nécessairement la précision de la restitution.

Le principe de base de la photogrammétrie étant la triangulation, il convient de noter un désavantage important en cas de forte pente. En effet, quel que soit l'éclairage utilisé, l'ombrage peut inhiber la cartographie de la surface de l'objet [11]. Il faut donc partir du principe que la déformation mesurée sera relativement faible (de l'ordre du centimètre au maximum) afin que cet effet d'ombrage ne vienne pas dégrader la précision de cette méthode ou empêcher la restitution.

2.2.4 Outils industriels

On trouve des applications dans de nombreux domaines, que ce soit en aéronautique, dans le domaine médical ou encore dans l'étude des polymères et de l'emboutissage. Ainsi, de par sa facilité de mise en œuvre, certaines sociétés ont réalisé des applications industrielles à partir de ce principe. En voici une liste non exhaustive :

- Visuol Technologies avec le logiciel ASAME : pour mesurer la déformation, un maillage régulier est déposé par impression sur l'objet à mesurer. La caméra calibre la scène de mesure et enregistre deux images 2D de l'objet sous deux angles différents. Après extraction des nœuds, la reconstruction se fait par triangulation¹. Deux types de caméras sont envisagés pour mesurer les déformations : les caméras de la gamme DCS (à partir de 50000 dollars) pour atteindre une précision de 50 μm ou des caméras de type CMM dont le prix avoisine les 300000 dollars pour atteindre le micron.
- Holo3 avec le logiciel Correli STC : utilisant la corrélation d'images numériques à partir de deux caméras, il permet de cartographier le champ de déplacement à la surface d'un objet, cartographie qui peut se faire en quasi-statique ou en dynamique². Nous n'avons pas beaucoup d'information sur le matériel requis pour les expérimentations, seulement que pour un champ de 1000x1000 mm, la résolution attendue est de 0.01 mm.
- GOM avec le système ARAMIS : ce logiciel est conçu pour l'analyse du comportement des composants et matériaux et utilise donc la stéréo-corrélation d'images pour avoir la mesure des déplacements et des champs de déformation sur la totalité de la surface de l'objet. Une texturation est appliquée sur l'objet à l'aide d'une bombe aérosol acrylique noir mat.

A noter que GOM propose aussi le système TRITOP qui utilise la photogrammétrie pour mesurer les coordonnées 3D des points avec une seule caméra réflex où il est possible de prendre un nombre illimité de photos. Ce dispositif fonctionne avec des cibles collées sur l'objet à mesurer ainsi que des cibles sur support placées tout autour (visibles sur l'illustration 2.2). Chacune est unique et elles doivent être au nombre minimal de 5 par photo et être vues sous 3 angles différents, le tout à la même distance de l'appareil environ. Il est plutôt adapté pour des mesures de déformations sur des surfaces importantes car c'est l'homme qui tient l'appareil photo et choisit donc l'emplacement des prises de vue. On peut également s'en servir afin de définir un référentiel d'étude comme on l'illustrera par la suite (figure 2.3).

1. <http://www.visuol.com/19-74-fr-La-stereo-correlation.html>

2. <http://www.holo3.com/>

Enfin, GOM propose une troisième solution : PONTOS, qui utilise également des cibles de mesure rétro-réfléchissantes pour mesurer les coordonnées et le déplacement en trois dimensions des points. Le système de capteur stéréo est composé ici de deux caméras ultra-rapides ainsi que de pointeurs lasers, le tout placé sur un trépied. On peut alors suivre en temps réel les déplacements des points identifiés par les cibles (par exemple lors d'un crash test)³.

- Le système proposé par Aicon 3D est assez semblable à ce qui est proposé par GOM. Il s'agit de caméras montées sur un trépied ou une barre qui vont pouvoir mesurer des cibles préalablement placées sur l'objet. Après une calibration, les caméras prennent les photos qui sont transmises au logiciel qui traite automatiquement les données (de la même manière que précédemment, en utilisant la photogrammétrie pour accéder aux coordonnées en trois dimensions des points puis aux déformations, jusqu'à 100 μm). La société propose deux versions de son système, avec donc deux capteurs différents : une version haute fréquence (jusqu'à 1000Hz contre 30Hz pour l'autre) et une version haute résolution (5.0 mégapixels contre 1.3), selon les besoins de l'utilisateur.

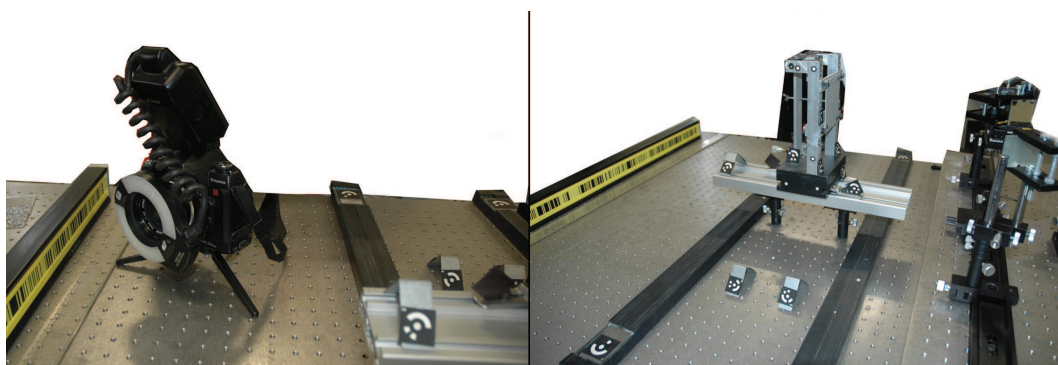


FIGURE 2.2 – Appareil photo utilisé pour Tritop (à gauche) et cibles placées tout autour de la surface à mesurer (à droite)

Les précisions attendues sont très intéressantes (de l'ordre de quelques microns) mais ces logiciels nécessitent l'utilisation de caméras numériques de haute résolution pour faire l'acquisition des images, caméras qui sont extrêmement coûteuses, tout comme la chaîne de traitement et les logiciels nécessaires. Le total se chiffre en centaines de milliers d'euros selon les caméras.

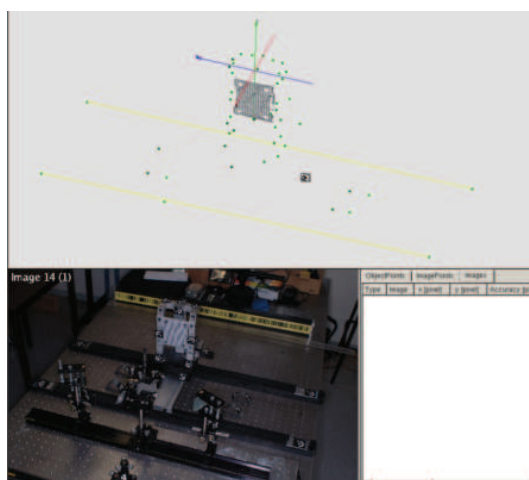


FIGURE 2.3 – Définition du référentiel d'étude grâce à Tritop (CTTM)

3. <http://www.gom.com/fr/systemes-de-mesure/stereo-correlation-dimages.html>

2.3 La mesure de franges

2.3.1 Historique

Entre 1970 et 1990, l'étude du comportement des matériaux se faisait principalement par des méthodes utilisant la technologie laser, source de lumière cohérente, telles que l'holographie, l'interférométrie, le moiré . . . [28]. Cependant, il n'était pas aisé à l'époque de déduire précisément les mesures de déformations à partir des franges d'isodéplacement, d'où la bascule vers les méthodes de corrélation d'images.

Aujourd'hui les problèmes sont résolus concernant l'extraction des informations de déplacements à partir des franges observées, mais ce système reste plus lourd et coûteux que la corrélation d'image à mettre en place, d'où notamment les réflexions quant à la miniaturisation d'un dispositif interférométrique afin de le rendre portable.

2.3.2 Principe de la méthode

L'interférométrie de speckle (ESPI)

L'ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry), ou TV Holography, est une méthode qui se rapproche un peu de l'interférométrie holographique en ce qui concerne le mode de fonctionnement. Tout comme la stéréo-corrélation d'images précédemment, cette technique sans contact permet de mesurer les déplacements à la surface d'un objet [20]. De la même manière, on peut accéder à la forme 3D de l'objet avec un seul capteur CCD et aux déplacements d'un objet avec deux capteurs.

Le principe est le suivant : la surface rugueuse d'un objet est éclairée par deux faisceaux provenant d'un même laser. Les caméras sont ensuite positionnées de manière à capter l'image de speckle. Si l'objet est déformé, la distance entre l'objet et l'image change aussi, engendrant un déphasage. En soustrayant les images entre elles, on obtient les franges d'isodéplacements de l'objet qui nous permettent par la suite d'obtenir le champ de déplacement de l'objet déformé [6].

L'ESPI requiert la mesure de très petits déplacements, ou du moins de déplacements petits par rapport à la taille d'un grain de speckle, alors que la corrélation d'images peut très facilement mesurer des déformations de plusieurs millimètres. En revanche, l'ESPI a elle une sensibilité indépendante de la zone d'étude car elle dépend uniquement de la longueur d'onde du laser. Cela se traduit par le fait que l'on aura une bonne résolution ainsi qu'une bonne précision de la déformation [6].

Vidéoprojection

En remplacement d'un dispositif interférométrique, l'utilisation d'un vidéoprojecteur pour projeter une image de franges générées par ordinateur peut être envisagée. Bien moins coûteux qu'un interféromètre, le vidéoprojecteur n'en reste pas moins une alternative aux capacités disparates.

En effet, comparé à la source de lumière cohérente qu'est le laser, le vidéoprojecteur ne pourra offrir une meilleure précision que l'ESPI. De plus, il faudra tenir compte de sa luminosité et de la gamme de gris qu'il peut offrir, comme cela est présenté dans le projet de recherche sur la profilométrie par projection de franges [5]. La limite de détection du système mis en place à l'aide d'un vidéoprojecteur grand public est de 200 à 300 μm ce qui n'est globalement pas satisfaisant dans notre cas. Tout dépend ainsi de la qualité et des performances du vidéoprojecteur.

2.3.3 Outils industriels

Les applications industrielles proposées permettent de calculer très rapidement des millions de points 3D afin de pouvoir accéder facilement au champ de déplacement de l'objet. Voici quelques techniques industrielles développées utilisant les deux méthodes présentées ci-dessus.

- Holo3 avec le logiciel Fringe Analysis : c'est un logiciel d'analyse d'images de frange qui intègre les techniques de base que sont l'interférométrie de speckle, l'interférométrie holographique ou encore la lumière structurée. Holo3 fournit également les différents capteurs selon la technique que l'on veut employer (capteur ESPI, capteur 3D à lumière structurée ...). L'amplitude de la déformation peut être de quelques microns pour une résolution en déplacement de $0.1 \mu\text{m}$ ⁴. La mesure en trois dimensions du champ de déplacement de l'objet ne se fait que sur demande.
- GOM avec le système ATOS : deux caméras capturent les franges projetées par le projecteur du système ATOS sur l'objet. Ces franges blanches et noires sont projetées en huit séries de largeur croissante. Les pixels de la caméra se verront attribués la valeur 0 ou 1 selon la couleur. L'ordinateur calcule ensuite automatiquement les coordonnées 3D pour chacun de ces pixels de la surface texturée prise en photo. Grâce à la technologie triple scan développée sur les systèmes les plus récents, on peut atteindre des précisions de $20 \mu\text{m}$. Diverses versions d'ATOS sont proposées par le constructeur selon les besoins, avec une entrée de gamme avoisinant les 60.000 euros⁵. Sur la figure 2.4, on peut observer une version ancienne du système.

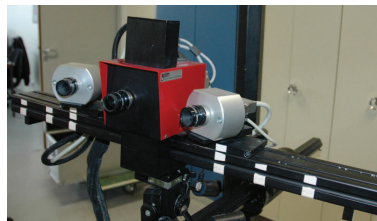


FIGURE 2.4 – *Système ATOS de GOM*

On peut envisager deux types de mesure avec ce système. En effet, il utilise des vignettes (cercle blanc inclus dans un cercle noir) pour se caler et dont il calcule le centre à l'aide du périmètre des cercles. On peut donc effectuer soit une mesure surfacique, où les vignettes permettent de référencer les différentes images entre elles lors de multiples prises de vues, soit une mesure plus ponctuelle sur les vignettes afin d'avoir le centre de chaque vignette comme point d'intérêt.

2.4 Corrélation d'images associée à l'interférométrie de speckle

Enfin, l'avenir réside peut-être dans la combinaison des deux méthodes susnommées où les résultats obtenus concernant les propriétés mécaniques des matériaux sont très bons [22]. L'idée est de combiner les techniques afin de tirer le meilleur parti de chacune d'elles. Ainsi, on retiendra l'utilisation de la corrélation d'images pour des déplacements dans le plan et l'utilisation de l'interférométrie de speckle pour les déplacements normaux [23].

2.5 Conclusion

Nous avons pu voir au travers de ce chapitre les différentes méthodes utilisées pour accéder à l'information de déplacement. Dans notre étude, nous allons nous intéresser plus particulièrement à la corrélation d'images numériques pour deux raisons : elle est relativement facile à mettre en œuvre et peu coûteuse. Ainsi, nous allons maintenant présenter les processus développés.

4. <http://www.holo3.com/IMG/interferoSspeckle.pdf>

5. <http://www.gom.com/fr/systemes-de-mesure/apercu-systeme/atos-triple-scan.html>

Chapitre 3 Processus de restitution photogrammétrique

3.1 Introduction

Afin de mesurer le déplacement que subit un objet lorsque celui-ci est déformé, deux protocoles ont été développés sous Matlab car deux texturations sont envisagées pour la détection de points d'intérêt : une grille et un speckle. Elles seront toutes les deux développées respectivement dans les paragraphes 3.3.1 et 3.4.1. La trame des deux processus est présentée ci-dessous par l'illustration 3.1. A noter qu'ils ne sont pas applicables seulement à notre plaque d'étude mais à toute surface que l'on souhaiterait étudier.

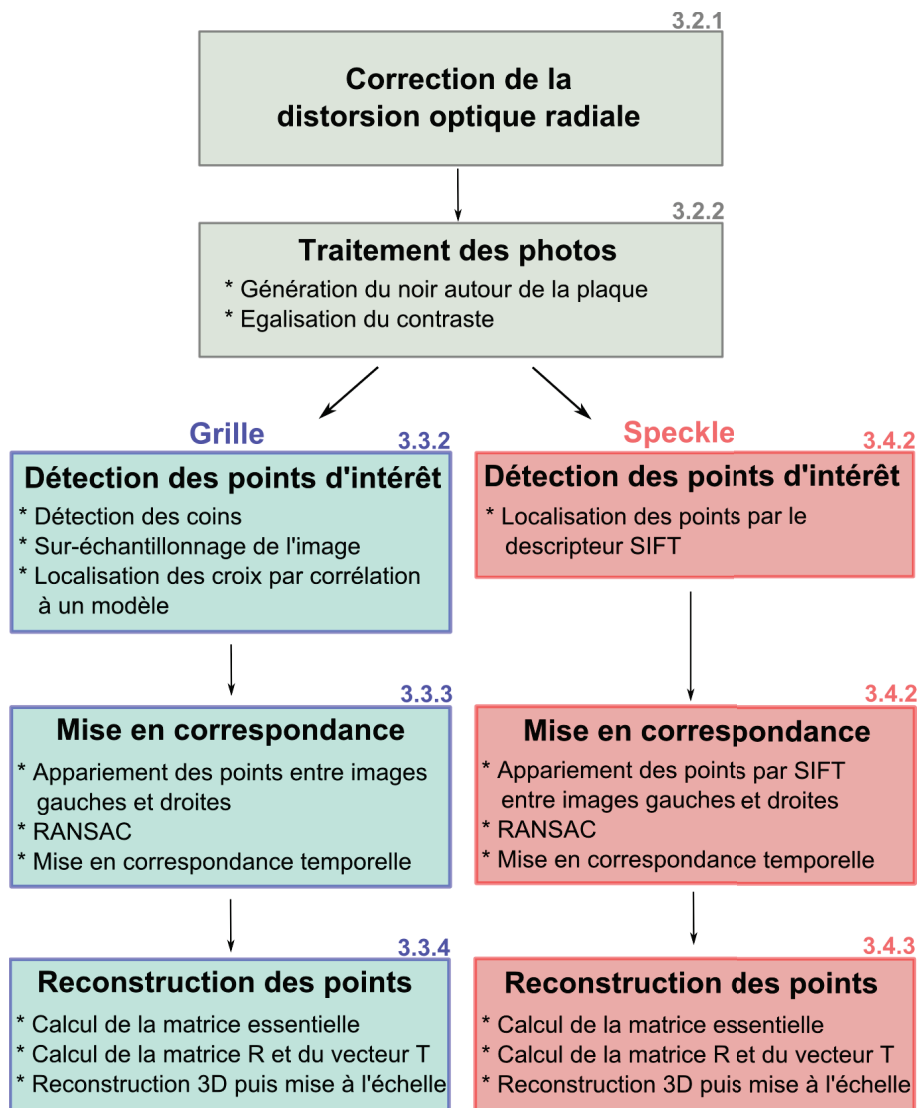


FIGURE 3.1 – Déroulement des deux processus photogrammétrique mis en place

Quelle que soit la texturation, on corrige les photos prises de l'erreur de distorsion puis on effectue deux traitements sur les images qui permettent d'améliorer le processus. Les méthodes diffèrent ensuite selon la texturation mais les étapes sont identiques : détection des points, mise en correspondance puis reconstruction de ces points en 3D.

3.2 Etapes préliminaires

3.2.1 Correction de la distorsion optique radiale

La distorsion optique radiale est due aux lentilles des caméras qui déforment l'image réelle. C'est donc un défaut optique de l'objectif qui se traduit par la courbure des lignes droites du sujet photographié. Cette distorsion peut prendre deux formes : une distorsion en coussinet (ou en croissant) et en barillet. Comme nous le présenterons par la suite, nous utilisons des focales courtes. Ainsi, le phénomène de distorsion observé sera en barillet pour les photos prises par les appareils.

Pour corriger cette distorsion, il convient de réaliser une calibration des caméras. Cette opération permet de définir les paramètres intrinsèques de celles-ci, pour une mise au point donnée. Connaissant ces derniers, on peut reformer l'image sans distorsion en interpolant les pixels déplacés. On détermine ainsi les paramètres suivants :

- la focale de l'appareil (en photogrammétrie, on ne calcule pas exactement la distance focale mais la distance principale car le plan image n'est pas parfaitement perpendiculaire à l'axe optique)
- les paramètres de distorsion (coefficients du polynôme de distorsion de degré 7)
- les coordonnées du PPS, point principal de symétrie où la distorsion est nulle (intersection de l'axe optique avec le plan du cliché)
- les coordonnées du PPA, point principal d'autocollimation (intersection entre le plan image et la perpendiculaire au plan image issue du centre de la pupille de sortie du jeu de lentilles)

Nous avons utilisé le logiciel ETA, développé par l'ENSG (Y.Egels), ainsi que le polygone d'étalonnage de l'ESGT afin d'effectuer la calibration de l'appareil.

3.2.2 Traitement des photos

Ajustement du contraste par CLAHE

Pour améliorer le contraste dans l'image et par extension permettre une meilleure reconnaissance des points d'intérêt, il convient d'effectuer un traitement de l'image. Ce dernier peut être de plusieurs sortes (luminosité, contraste ...) selon nos besoins.

L'idée est donc d'utiliser l'égalisation adaptative d'histogramme (AHE), ou plus précisément une variante appelée égalisation adaptative d'histogramme à contraste limité (CLAHE). Elle permet d'améliorer le contraste d'une image localement en travaillant par régions centrées sur un pixel en évitant la génération de bruit comme la méthode originelle. Le contraste ne sera alors pas ajusté dans sa globalité mais régions par régions, permettant ainsi de l'optimiser sur la grille [31].

Génération du noir autour de la surface étudiée

Sur la photo prise par la caméra, la plaque n'occupe qu'une partie limitée, le reste dépendant de l'environnement. Afin d'éviter un prétraitement sur la photo, nous avons intégré cette génération du noir sur Matlab. Au début du processus, la photo s'affiche et permet à l'utilisateur de cliquer sur les quatre coins de la plaque afin de définir la zone d'étude. Les coordonnées cliquées sont ensuite récupérées et utilisées pour la génération du noir (qui est une simple attribution de la valeur 0 à tout pixel hors de la zone délimitée) autour de la plaque.

3.3 Traitement avec la texturation grille

Comme illustré précédemment, la texturation de la plaque est un facteur important pour la corrélation d'images. Nous envisagerons deux textures différentes dans notre étude.

3.3.1 Présentation

Il s'agit d'une grille simple avec des traits d'une épaisseur fixe et espacés de manière uniforme. L'espacement est un critère très important. En effet, des traits resserrés engendreraient une difficulté dans la mise en correspondance des croix et à l'inverse des traits trop éloignés ne permettraient pas d'avoir un nombre suffisant de points sur la surface. Il faut donc trouver le meilleur compromis pour avoir une grille homogène et efficace.

Avantages

L'avantage principal de l'utilisation de la grille est que l'on a la main mise sur les points que l'on veut mesurer. On sait que ce sont les nœuds de celle-ci qui vont être détectés puis appariés et on sait également qu'ils vont être répartis de manière homogène sur l'objet. On va ainsi savoir précisément le déplacement en chaque nœud de la grille. Elle est également très simple à mettre en œuvre : on peut facilement la dessiner ou l'imprimer sur une pièce. Quel que soit le support, on peut toujours trouver un moyen adapté pour l'utiliser.

Inconvénients

L'avantage principal s'avère cependant être le défaut majeur : l'utilisation de la grille nous limite dans le nombre de points, car on est tributaire des nœuds. De plus, de par la répétitivité du motif, on ne peut pas rajouter de nœuds supplémentaires sous peine de difficultés inhérentes au processus de mise en correspondance.

3.3.2 Détection des points d'intérêt

Détection des coins par Harris

Inventé en 1988 par Harris et Stephens, le détecteur de Harris est une amélioration de celui de Moravec (moins sensible au bruit et réponse moins forte aux contours) et est basé sur l'extraction automatique de coins, points particuliers des contours lorsque ces derniers changent de direction [13]. L'avantage des coins par rapport aux contours est donc leur stabilité car ils sont clairement identifiables.

C'est un algorithme très populaire car facile à mettre en œuvre et qui offre des résultats très satisfaisants lorsque les coins sont facilement distinguables. Vu que nous utilisons une grille dont les traits ont une certaine épaisseur, il faut prendre garde de ne bien garder qu'un coin dans chaque zone d'intersection qui elle en présente quatre. Sachant que ce n'est pas le coin stricto sensu qui nous intéresse, mais plutôt une localisation approximative du centre de la croix, peu importe le coin retenu parmi les quatre.

Calcul automatique de la taille des modèles

A partir du coin détecté, il faut maintenant obtenir le centre de la croix. Pour ce faire, on utilise le principe de la corrélation par rapport à des matrices modèles de croix (impaires afin de pouvoir les centrer sur un unique point, le coin). Cependant, afin que la corrélation soit optimale, la taille des modèles doit être la plus grande possible sans pour autant être supérieure à la distance séparant deux traits de la grille dans l'image. Cela voudrait dire que deux coins se trouveraient dans la zone d'un modèle, engendrant nécessairement une mauvaise détection.

L'automatisation porte sur l'éventuelle modification des paramètres de prise de vue. Si la caméra est déplacée, si l'appareil change (notamment pour sa focale), si la distance de prise de vue ou la base sont modifiées, ou encore si on donne un angle à la prise de vue, l'image de l'écartement entre les traits de la grille sera modifiée elle aussi et donc la taille des modèles sera ajustée en conséquence (figure 3.2).

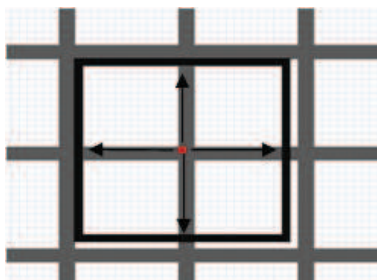


FIGURE 3.2 – *Emprise maximale d'un modèle définie par rapport au coin détecté (en rouge) [1]*

Sur-échantillonnage de l'image

L'objectif du sur-échantillonnage est d'accroître la précision de détermination des centres de croix. Il va affecter à la fois les modèles de croix générés (dont la taille va donc être augmentée) ainsi que les coordonnées des coins détectés par Harris. Il convient de noter que les modèles ne vont pas être sur-échantillonnés, mais plutôt calculés à la taille de la nouvelle image (figure 3.3).



FIGURE 3.3 – *Modèle avant sur-échantillonnage (gauche) et après (droite)*

Concernant le facteur de sur-échantillonnage, il vaut mieux éviter qu'il soit pair. En effet, un pixel de l'image mère serait alors représenté par un nombre pair de pixel dans l'image fille et il ne serait alors pas aisé de trouver un pixel central. Ainsi, nous avons choisi un facteur de trois (comme l'illustre la figure 3.4), qui nous semble le plus adapté car aussi efficace qu'un facteur 5 ou 7 et moins gourmand en temps de calcul. Enfin, concernant le type de sur-échantillonnage à utiliser (plus proche voisin, bilinéaire, bi-cubique), il semble que le bi-cubique offre les meilleurs résultats [1].

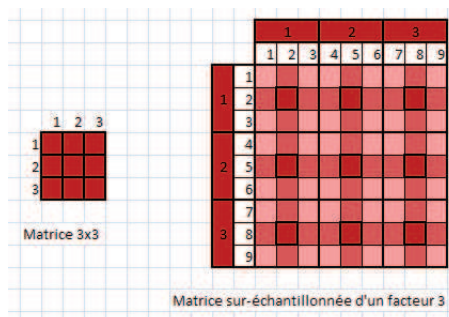


FIGURE 3.4 – *Principe du sur-échantillonnage de l'image [1]*

Affinage de la localisation des croix

Pour obtenir le centre de la croix à partir du coin détecté par Harris, on utilise donc la corrélation par rapport à un modèle de croix (dont la taille a été définie précédemment). Le coin va nous permettre de définir la zone d'étude sur laquelle vont être appliqués ces différents modèles (au nombre de 25 dans notre cas) où l'on va chercher le pixel sur lequel se situe le pic de corrélation. Ces modèles présentent différents pas angulaires afin de coller au mieux aux différentes éventualités, c'est-à-dire si jamais le trait n'est pas strictement droit. L'influence de ce pas est assez limitée et est fixée à 5° pour l'ensemble de notre étude.

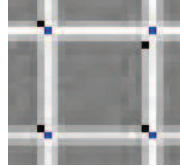


FIGURE 3.5 – Détection des croix (bleu) à partir des coins (noir)

3.3.3 Mise en correspondance

Cette étape est cruciale dans le processus de restitution photogrammétrique : du résultat de la mise en correspondance dépend directement le résultat de la mesure du déplacement.

Mise en correspondance des croix

Une fois que tous les centres de croix sont détectés, il faut les mettre en correspondance sur les images respectives 1 et 2 avant déformation et après déformation. Pour cela plusieurs méthodes sont disponibles parmi lesquelles on peut trouver les méthodes de corrélation. Cette étape est déterminante car elle va conditionner directement la reconstruction en trois dimensions de nos points par la suite. Elle se doit donc d'être la plus efficace possible.

Les méthodes de corrélation ne seront pas du tout efficaces car nos centres de croix se ressemblent tous. Nous n'utilisons pas un motif mais une grille dont les contours sont identiques. Il convient donc d'utiliser une approche différente : en raisonnant colonne par colonne, on parcourt la grille et on incrémente un vecteur avec des 1 si on détecte une croix et un 0 si on n'en détecte pas. On compare ensuite ces vecteurs entre les deux images pour pouvoir mettre en correspondance les centres de croix.

RANSAC

Nous n'avons aucun contrôle sur la mise en correspondance des points d'intérêt. En effet, sont-ils tous détectés ? Et in extenso bien appariés ? Afin d'éviter de mauvais appariements qui viendraient parasiter la représentation de la déformation, nous avons décidé d'utiliser la méthode robuste RANSAC.

RANSAC est l'abréviation pour "RANdom SAMple Consensus". Cet algorithme a été proposé la première fois en 1981 [9]. A l'image de la méthode des moindres carrés, RANSAC permet d'extraire un modèle mathématique à partir d'un ensemble de données, à la différence que ce dernier peut contenir des valeurs aberrantes (la méthode des moindres carrés n'est pas robuste en présence de valeurs aberrantes). C'est d'ailleurs précisément la situation dans laquelle nous sommes : on pense que des erreurs d'appariements sont susceptibles d'apparaître dans l'hypothèse où les mêmes croix ne sont pas détectées sur les deux images.

Le principe de fonctionnement est simple. On sélectionne au départ aléatoirement n points (4 en l'occurrence pour nous afin de reconstruire une homographie) afin de créer le modèle de départ. On va ensuite regarder si les points de l'ensemble de données (en l'occurrence les croix) valident ou non ce modèle. On calcule la distance entre le point résultant de la transformation par le modèle et le point que l'on aurait

dû obtenir : si la distance est inférieure à une certaine tolérance, le point est considéré comme un *inlier* (point que l'on garde). Dans le cas contraire c'est un *outlier* (point que l'on ne garde pas). On procède itérativement jusqu'à trouver le modèle qui maximise le nombre d'*inliers* et on recalcule ensuite le modèle de meilleur consensus à partir de l'ensemble des *inliers* sélectionnés.

Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser l'implémentation de RANSAC réalisée par Peter Kovesi en 2005¹ et où l'homographie de départ est calculée par l'algorithme DLT [15]. Le script de base n'a été modifié que légèrement afin de pouvoir récupérer les indices des *outliers* à partir de ceux des *inliers*, et ce dans l'optique de les visualiser conjointement sur la figure 3.6 et de pouvoir récupérer de manière automatique les bons points homologues.

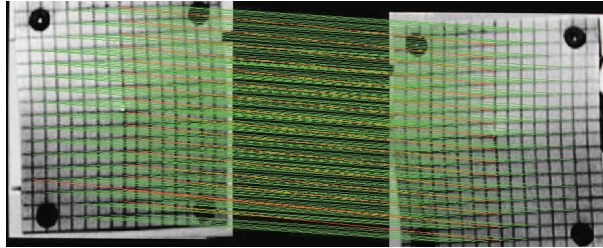


FIGURE 3.6 – Visualisation conjointe des inliers (vert) et outliers (rouge)

L'objectif a ensuite été de corriger automatiquement ces faux appariements (en rouge dans la figure ci-dessus). En effet, il semblait bien que la plupart des croix aient bien été détectées sur les deux images, donc que l'appariement était possible. Après avoir appliqué l'homographie précédemment calculée aux points faux afin de transformer les coordonnées des points de l'image 2 vers celles de l'image 1, nous avons calculé la distance entre chaque point considéré comme faux et les croix détectées originellement. Après avoir gardé le minimum pour chaque distance, on s'est assuré que ce minimum était inférieur à une certaine tolérance, au cas où une croix détectée dans l'image 1 ne le serait pas dans l'image 2. Nous avons ensuite récupéré l'indice du point homologue correspondant afin de créer un nouveau vecteur d'*inliers*. La visualisation figure 3.7 montre clairement que cette fois-ci les points homologues sont correctement appariés.

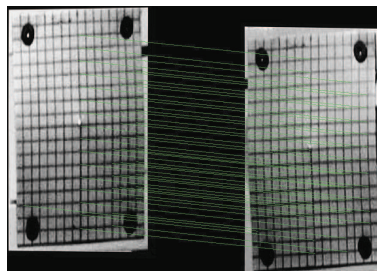


FIGURE 3.7 – Ré-appariement des croix

Enfin, il a fallu concaténer ces nouvelles coordonnées des croix appariées avec celles qui l'avaient été précédemment afin de former des matrices de coordonnées de croix les plus complètes possibles. N'ont vraiment été éliminées que les croix qui n'avaient pas été détectées sur les deux images à la fois.

Mise en correspondance temporelle

C'est cette étape qui va nous permettre d'accéder à l'information du déplacement. Nous allons rechercher les couples de croix avant et après déformation parmi les couples qui ont été associés. Le déplacement longitudinal engendré par la déformation de la plaque étant extrêmement faible, le déplacement de nos centres de croix le sera également. Il est donc intéressant ici d'utiliser la méthode du plus proche voisin afin de trouver les appariements des centres de croix qui minimisent la distance entre eux.

1. <http://www.csse.uwa.edu.au/>

3.3.4 Reconstruction des points

Reconstruction des points 3D

A partir de maintenant, il convient de différencier deux cas : dans le premier, nous connaissons les paramètres extrinsèques de la caméra (rotation, translation). Dans le second, nous ne les connaissons pas. La matrice de rotation et le vecteur de translation nous sont nécessaires afin que la reconstruction 3D puisse être décrite dans le repère caméra gauche.

Les paramètres externes décrivent la position et l'orientation des caméras sur le terrain. On en déduit les paramètres d'orientation relative, qui permettent quant à eux le passage d'un repère caméra à un autre. Cependant, nous choisissons ici de ne pas appliquer les paramètres externes pour deux raisons [25] :

- On perd en précision lors de cette transformation
- On peut faire des mesures du moment où l'on a le facteur d'échelle

Dans tous les cas, le calcul est basé sur la condition de colinéarité (le point terrain M , le sommet de prise de vue S et m la projection de M sur l'image sont sur la même droite) si on a plus de deux images, ou sur la condition de coplanarité si on ne dispose que de deux images, ce qui est notre cas. Or, le problème est non linéaire dans les deux cas et nécessite donc des valeurs approchées pour effectuer une linéarisation, valeurs qui sont difficiles à obtenir ici.

Mais, si on travaille en géométrie projective (sans les notions d'angle et de distance par rapport à la géométrie euclidienne), l'équation de coplanarité est linéaire et il n'y a plus besoin de valeurs approchées. Si les paramètres internes sont connus (ce qui est notre cas), on obtient les paramètres d'orientation relative à partir de la matrice essentielle E [16]. S'ils sont inconnus, la reconstruction des points passe alors par le calcul de la matrice fondamentale F (ou tenseur bifocal) [7] et [14].

Paramètres externes connus Les paramètres externes et internes sont donc connus, ce qui nous permet de calculer directement les points en trois dimensions avant et après déformation. Cela reste bien évidemment un cas théorique, car en pratique on ne peut que difficilement affirmer que l'on connaît parfaitement l'orientation des caméras. Une fois ces points calculés, il ne reste qu'à visualiser la plaque déformée. Nous n'irons pas plus loin avec l'étude de ce cas car nous voulons nous placer dans un contexte plus général.

Paramètres externes inconnus Nous n'avons que les paramètres internes issus de la calibration à disposition. L'objectif est alors de déterminer de cette matrice essentielle (9 éléments) pour résoudre notre orientation relative afin de pouvoir déduire la matrice de rotation R et le vecteur de translation T .

Pour cela, nous allons utiliser la méthode présentée par Henrik Stewenius qui ne nécessite que 5 points pour résoudre le système. Cette méthode propose une résolution polynomiale basée sur la reconnaissance des bases de Gröbner [26]. Cela mène à 10 solutions complexes (utilisation des quaternions) pour la matrice essentielle E . Dans notre étude, on ne s'occupe que des solutions réelles (entre 4 et 6 généralement).

Chaque matrice essentielle génère deux solutions pour R et pour T , ce qui fait quatre possibilités mathématiques différentes. Afin de garder le bon couple géométrique, il faut retenir celui qui d'une part permet la reconstruction des points 3D à l'avant des caméras (coordonnées positives) et qui d'autre part ne génère pas des points trop proches du plan focal [16].

Mise à l'échelle

Cependant, la reconstruction est faite à un facteur d'échelle près. Pour le trouver, nous utilisons l'espacement entre les traits de la grille qui est de 0.5 cm. Nous avons ainsi un point de comparaison sur la plaque réelle pour effectuer cette mise à l'échelle à partir des coordonnées 3D calculées. Cette dernière est donc le rapport entre l'espacement théorique et l'espacement issu des points reconstruits.

3.4 Traitement avec la texturation speckle

3.4.1 Présentation

Lorsque l'on éclaire une surface rugueuse avec de la lumière cohérente (un laser par exemple), on observe un aspect granulaire de la lumière diffusée : il y a une alternance de grains noirs et de grains lumineux répartis uniformément en moyenne. Ce phénomène, communément appelé speckle (tavelures en français), est le résultat d'interférences à ondes multiples. En effet, la lumière diffusée par la surface rugueuse est composée de champs d'ondes d'amplitudes aléatoires provenant des différents points de la surface. L'intérêt du speckle est d'obtenir un motif dont l'autocorrélation spatiale est proche de zéro. Cela signifie qu'il y a très peu de chance qu'un motif se répète sur l'image. Ainsi, sans répétition, nous sommes certains de détecter un nombre de points supérieur à celui que l'on peut obtenir à partir de la grille.

On peut générer différents speckle selon la loi de distribution choisie (loi gamma, loi gaussienne ou bruit aléatoire uniformément réparti) mais également l'ampleur de la gamme de niveaux de gris utilisés et la taille des motifs. La précédente étude a montré que le bruit gaussien donnait les meilleurs résultats, avec notamment un sur-échantillonnage de 7 ou de 10 pour que la taille des motifs soit optimale [1]. Une image de speckle est visible sur la figure 3.8.

Avantages

Le principal avantage du speckle est le nombre de points que l'on va pouvoir détecter. Vue la faible répétitivité des motifs, on aura ainsi un nombre de points beaucoup plus important que la grille. De cette manière là, on pourra être plus sélectif envers certains points mis en correspondance, afin de ne garder que les meilleurs appariements.

Inconvénients

Nous n'avons en revanche aucun contrôle sur la détection et la localisation des points. Malgré leur nombre, ils ne seront pas répartis de manière homogène. Si l'on cherche à mesurer le déplacement en un point particulier, ce n'est clairement pas la bonne méthode. En revanche, pour une mesure surfacique, nous aurons une abondance de points qui nous donnera ainsi une information plus importante sur le déplacement observé.

3.4.2 Détection et appariement par la méthode SIFT

Détection des points d'intérêt

La méthode de détection de Harris est adaptée à la détection de coins, mais le speckle n'en présente pas. Le détecteur SIFT (Scale Invariant Feature Transform) proposé par David Lowe est plus adapté car il permet d'extraire des points d'intérêt robustes aux changements d'échelle, aux variations d'éclairage ainsi qu'aux différentes sources de bruit [18]. Cette robustesse est très intéressante pour nous car elle permet de passer outre les conditions d'éclairage de la plaque qui n'auront pas à être nécessairement identiques lors de la prise des photos.

Vont être détectées sur l'image des zones circulaires centrées sur un pixel. De cette zone va être dégagé le descripteur SIFT correspondant à ce pixel et comprenant 128 valeurs normalisées (il s'agit de valeurs d'attributs calculées à partir d'un histogramme des orientations locales). On récupère également un vecteur de localisation contenant ses coordonnées et les valeurs d'échelle et d'orientation (figure 3.8).

Qui plus est, le gain de temps par rapport à la méthode précédente est considérable : en une seule étape, nous sommes capables d'obtenir les points d'intérêt de l'image.

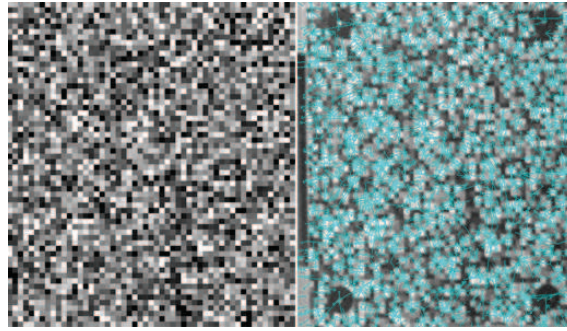


FIGURE 3.8 – Image de speckle et détection des points d'intérêt sur cette image

Mise en correspondance

On calcule à chaque mise en correspondance (entre les images 1 et 2 prises au même instant et entre les images d'un même appareil à deux instants différents) le produit scalaire des vecteurs unitaires de descripteurs. En prenant le cosinus inverse du résultat du produit scalaire, on obtient une bonne approximation de la distance euclidienne car les angles sont faibles, ce qui nous permet de gagner en temps de calcul.

Un appariement est ensuite validé seulement si la distance d'un point d'intérêt par rapport au plus proche point d'intérêt voisin est inférieure au *DistRatio* fixé multiplié par la distance de ce même point d'intérêt au deuxième plus proche point d'intérêt voisin.

RANSAC

Le principe est identique à celui énoncé précédemment lors de l'utilisation de la grille. Cependant, nous n'allons pas chercher ici à effectuer une nouvelle mise en correspondance. Face au nombre important de points détectés par la méthode SIFT et son efficacité en termes de mise en correspondance (quasiment aucun *outlier*), il n'y a pas lieu de rechercher de nouveaux appariements.

3.4.3 Reconstruction des points

Reconstruction des points 3D

A partir de ce moment, nous rejoignons les étapes précédemment décrites avec l'utilisation de la grille. On calcule la matrice essentielle qui nous permet d'obtenir les paramètres d'orientation relative des caméras (matrice rotation R et vecteur translation T) puis on calcule les coordonnées 3D des points d'intérêt SIFT détectés.

Mise à l'échelle

Lorsque l'on utilise un speckle, la mise à l'échelle ne peut plus se faire de la même manière, n'ayant plus de points de comparaison sur la plaque. On ne peut pas non plus utiliser les points d'intérêt car nous ne sommes pas sûrs d'en détecter aux extrémités de la plaque. Cette dernière va alors se faire en utilisant des cibles collées autour de la plaque (en réalité, on peut utiliser tout point facilement identifiable sur les images et surtout qui ne bouge pas). Lors du processus, on va cliquer sur ces cibles pour récupérer les coordonnées images des points puis on va ensuite les intégrer aux points qui vont être reconstruits. Pouvant mesurer la distance entre les deux vignettes, on peut ainsi aisément effectuer un rapport entre la distance théorique et la distance calculée. Afin d'avoir un contrôle, on calcule deux fois la distance entre ces points (avant et après déformation).

Chapitre 4 Validation des processus par simulation et par expérimentation

4.1 Géométrie du protocole

Les études sur la géométrie du protocole ont été réalisées lors des précédents projets [12]. Il en résulte que nous allons utiliser une plaque de 8 cm x 9 cm et d'épaisseur 1 mm en aluminium. Les caméras seront placées sur un plan parallèle à celui de la plaque, afin de minimiser la perte de précision sur l'extrémité de la plaque. Le champ de vision en commun pour les deux appareils sera assez restreint mais suffisant au vu de la taille de notre plaque. Le schéma de principe se trouve en figure 4.1.

La distance D et la base B entre les appareils sont calculées en tenant compte des paramètres des caméras mais aussi de la précision attendue sur la mesure du déplacement (dans le plan perpendiculaire à la plaque). Le tout doit également respecter certaines contraintes comme la visibilité du trait dans l'image avec une épaisseur suffisante et le fait de voir les deux images depuis les deux points de vue. Afin de simplifier les calculs, ces derniers sont effectués en utilisant la géométrie projective.

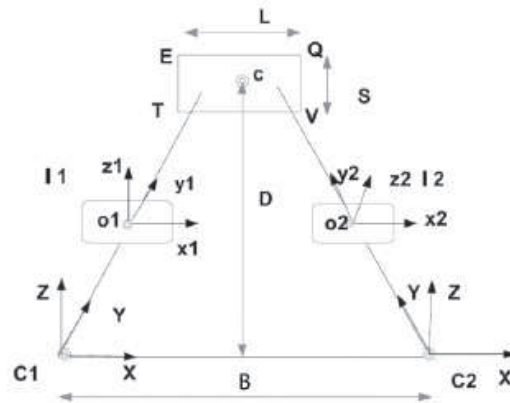


FIGURE 4.1 – Géométrie du protocole [12]

La difficulté posée par la configuration précédente est que pour obtenir une précision correcte, la distance entre la plaque et les caméras doit être courte et la base grande. Cependant, plus la distance est courte et la base grande, plus la plaque va sortir du champ de vision des caméras (à moins d'avoir une focale extrêmement petite qui correspond à un très grand champ). La possibilité de positionner les caméras avec un certain angle θ a été envisagée dans la précédente étude [12], mais les pertes de précision à l'extrémité de plaque devenaient rapidement importantes, malgré un champ de vision commun accru. Cela est notamment dû au fait que chaque point de la plaque est à une distance différente du plan de l'appareil photo dans cette configuration.

Cela peut engendrer certaines aberrations et donc fausser la procédure de corrélation par la suite [29]. Nous avons donc décidé de rester dans cette configuration. Selon le type d'instrumentation utilisé, on pourra ainsi s'attendre à des précisions différentes concernant la mesure du déplacement.

4.2 Instrumentation utilisée

4.2.1 Introduction

Du choix de l'appareil photo dépend la qualité des images prises et donc la précision de la restitution. Si les photos ne sont pas nettes ou si on ne voit pas la plaque entièrement, impossible alors de détecter les croix ou même de visualiser la plaque déformée. Plusieurs paramètres sont à prendre en compte tels que la focale ou encore la taille du pixel.

Concernant la focale d'un objectif, c'est la distance entre l'image d'un objet située à l'infini projetée sur le plan du capteur et le centre optique de cet objectif. On en trouve à focale fixe (50 mm, 300 mm) ou à focale variable (35-70 mm, 70-210 mm). On parle alors de zoom. Une focale plus courte que la focale dite « normale » (50 mm sur un appareil au format 24x36) élargira le champ de vision (on parlera de grand-angle) et inversement une valeur plus grande le réduira mais offrira un grossissement plus important (téléobjectif)¹. Dans notre cas, il nous faut donc une focale courte afin d'avoir un large champ de vision pour voir la plaque sur les extrémités de l'image. Plus la base sera grande, plus notre précision sera bonne.

Concernant la taille du pixel, elle est fonction de la définition maximale que l'appareil peut offrir et de la taille du capteur. Il faut qu'elle soit la plus petite possible afin d'obtenir par la suite une bonne précision lors de la restitution photogrammétrique. Si l'image prise par l'appareil est trop pixellisée, il ne sera pas aisé de détecter des points d'intérêt et de les mettre en correspondance par exemple.

4.2.2 Appareils utilisés pour l'étude

Caméra MINOLTA

Dans un premier temps, le choix s'est porté vers le MINOLTA Dimage EX car c'est le seul exemplaire possédé en double à l'école. Voici ses caractéristiques techniques une fois calibré :

	MINOLTA
Définition maximale (px)	1344x1008
Taille du capteur (en mm)	12.1x9.07
Taille du pixel (en mm)	0.009
Focale (en mm)	10.437
Ouverture du diaphragme	1.9

TABLE 4.1 – *Caractéristiques techniques des appareils MINOLTA*

On obtient les valeurs suivantes concernant le positionnement des caméras :

Précision attendue dans la direction normale (μm)	200	150
D : Distance entre l'appareil et la plaque (en m)	0.387	/
B : Distance entre les deux appareils (en m)	0.322	/

TABLE 4.2 – *Distances de positionnement des caméras MINOLTA*

Appareils Réflex

Face aux capacités limitées du MINOLTA et à la mauvaise qualité des images prises, comme nous le verrons dans la suite de ce mémoire, on envisage l'utilisation d'un seul appareil photo (supposé meilleur) que l'on va être capable de replacer strictement au même endroit afin de pouvoir prendre deux paires d'images. Cet appareil est censé également nous apporter une meilleure précision. On envisage alors l'utilisation de ces deux appareils reflex :

1. <http://www.parlons-photo.com/index.php>

	NIKON D70S	KODAK DCS pro 14n
Définition maximale (px)	3008x2000	4536x3024
Taille du capteur (en mm)	23.7x15.6	36x24
Taille du pixel (en mm)	0.0078	0.008
Focale (en mm)	18-70	24
Ouverture du diaphragme	3.5-4.5	2.8

TABLE 4.3 – *Caractéristiques techniques des appareils Réflex*

Voici les distances de positionnement des appareils obtenues :

	NIKON D70S		KODAK DCS	
Précision attendue dans la direction normale (μm)	200	170	200	150
D : Distance entre l'appareil et la plaque (en m)	0.759	0.759	1	1
B : Distance entre les deux appareils (en m)	0.632	0.744	0.833	1.11

TABLE 4.4 – *Distances de positionnement des appareils Réflex*

Avec l'utilisation de ces appareils, on peut espérer atteindre une précision de 170 voire 150 μm , soit un peu mieux qu'avec les MINOLTA. Cependant, la base du Kodak sera alors trop grande au vu de notre table (90 cm maximum) : nous le laissons donc de côté. Ce gain de précision engendre cependant une contrainte supplémentaire concernant le remplacement à l'identique de l'appareil réflex, comme nous l'illustrerons par la suite.

4.3 Validation par simulation

4.3.1 Travaux préalables en simulation

Génération de la déformée et de la plaque

Nous allons créer une plaque virtuelle en aluminium de 8 cm x 9 cm et de 1 mm d'épaisseur qui sera soumise à une force ponctuelle de 100 Newtons grâce au code développé par Hanen Hamdi [12]. On ne va s'intéresser qu'au déplacement normal car son amplitude est plus importante que celle du déplacement longitudinal (dans le plan de la plaque). Nous allons générer deux plaques : une non déformée ainsi qu'une déformée à $t=0.04$ s, temps qui correspond à un maximum du signal de 200 Hz. On prend une résolution de 0.15 mm afin d'avoir une représentation précise de la plaque Voici les caractéristiques des deux texturations envisagées pour la plaque :

- Caractéristiques de la grille : épaisseur de trait (0.5 mm) et espacement entre les traits (0.5 cm)
- Caractéristiques du speckle : loi statistique (Gauss) et facteur de sur-échantillonnage (10)

En résolvant l'équation du mouvement de la plaque, on peut déterminer l'expression du déplacement normal de la plaque à chaque instant (c'est donc une matrice). Ce dernier est donc déterminé à chaque point défini par notre résolution. On peut visualiser sur l'illustration 4.2 l'allure de la déformation de la plaque.

Génération des photos

Étant en simulation, nous devons donc créer des photos de la plaque avant et après déformation telles qu'elles auraient été prises par les deux caméras. Nous utilisons donc pour cela les paramètres intrinsèques de la caméra obtenus après calibration de l'appareil ainsi que les paramètres externes fixés. Un effet de distorsion est ensuite généré, car lorsque nous passerons à la réalité, les images créées ne seront pas parfaites et présenteront ce défaut optique. Nous essayons donc de nous placer au plus près du cas réel.

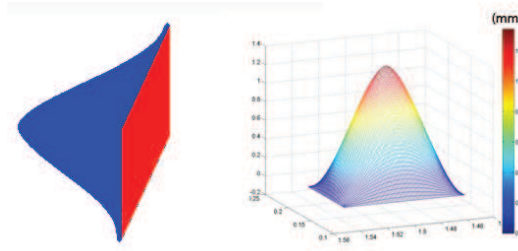


FIGURE 4.2 – *Plaque de départ (rouge) et déformée (bleu) ainsi que les valeurs de déplacement*

4.3.2 Méthode utilisant la grille

Les résultats présentés ici sont issus du protocole présenté au chapitre 3.3. On peut également envisager de ne pas effectuer de sur-échantillonnage de l'image afin de gagner en temps de calcul notamment. Les résultats obtenus sont présentés en Annexe B.

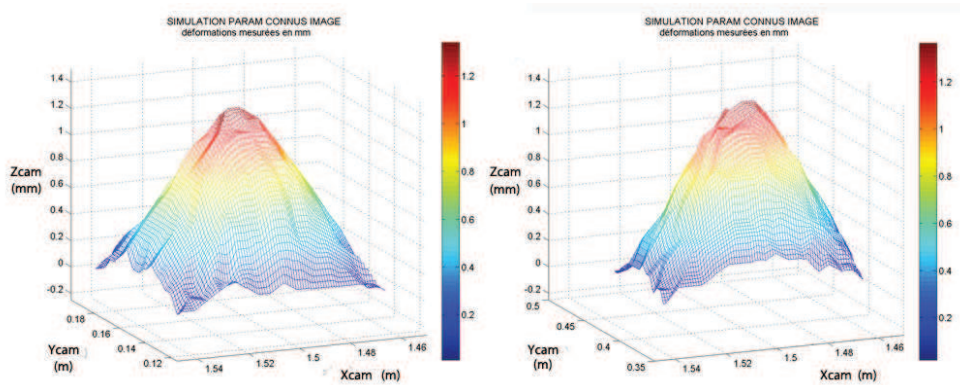


FIGURE 4.3 – *Allure de la déformation avec la grille avec sur-échantillonnage. Les résultats obtenus à partir des Minolta sont à gauche et ceux à partir du Nikon à droite*

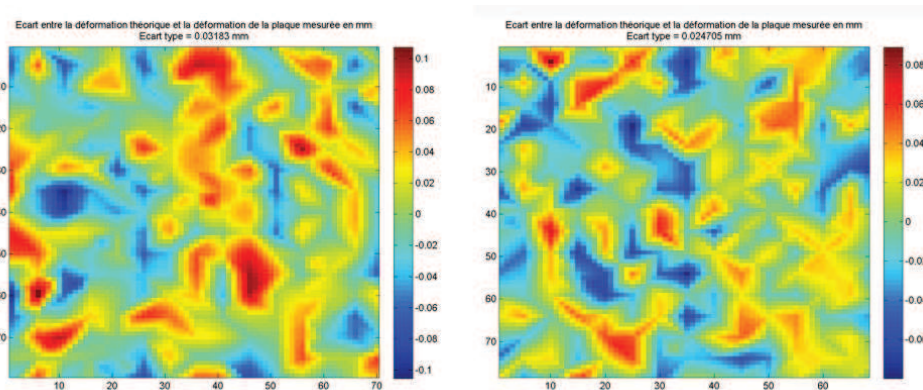


FIGURE 4.4 – *Ecart en mm entre les déplacements théoriques et calculés avec sur-échantillonnage. Les résultats provenant des appareils Minolta sont à gauche et ceux issus du Nikon sont à droite*

Concernant l'allure de la déformée (figure 4.3), on n'observe pas de différences flagrantes entre les deux appareils. Cela est confirmé en terme de précision (figure 4.4) où celle-ci est quasi-équivalente dans les deux cas (environ 25 μm pour le NIKON contre 30 μm pour les MINOLTA). Cela est bien meilleur que la précision théorique que l'on s'était fixé au départ. On observe tout de même des écarts maximum de l'ordre de 100 μm ce qui est très satisfaisant.

On constate que le NIKON semble donner des résultats un peu meilleurs que le MINOLTA mais dans une proportion moindre que la précision attendue au départ ($170\ \mu\text{m}$ contre $200\ \mu\text{m}$).

4.3.3 Méthode utilisant le speckle

Voici les résultats obtenus en utilisant la texturation speckle. Il n'y a pas de sur-échantillonnage mis en place ici.

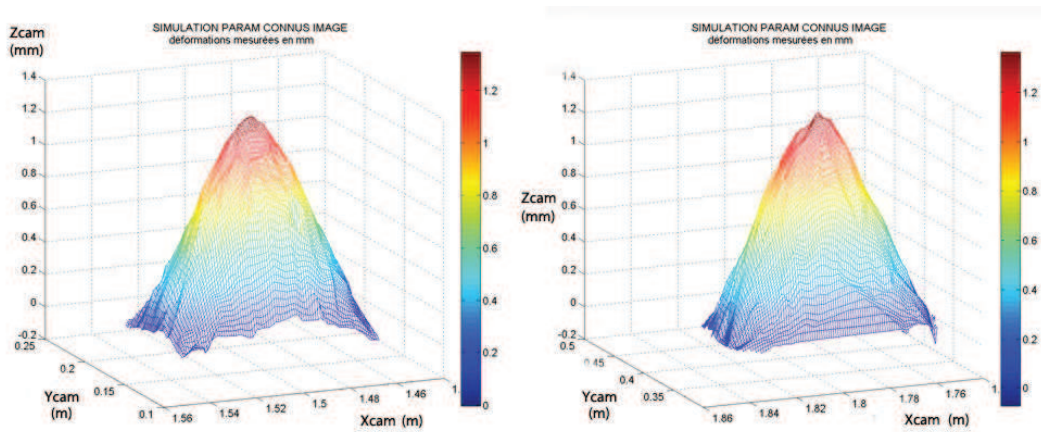


FIGURE 4.5 – Allure de la déformation avec le speckle. Les résultats obtenus à partir des Minolta sont à gauche et ceux obtenus à partir du Nikon à droite.

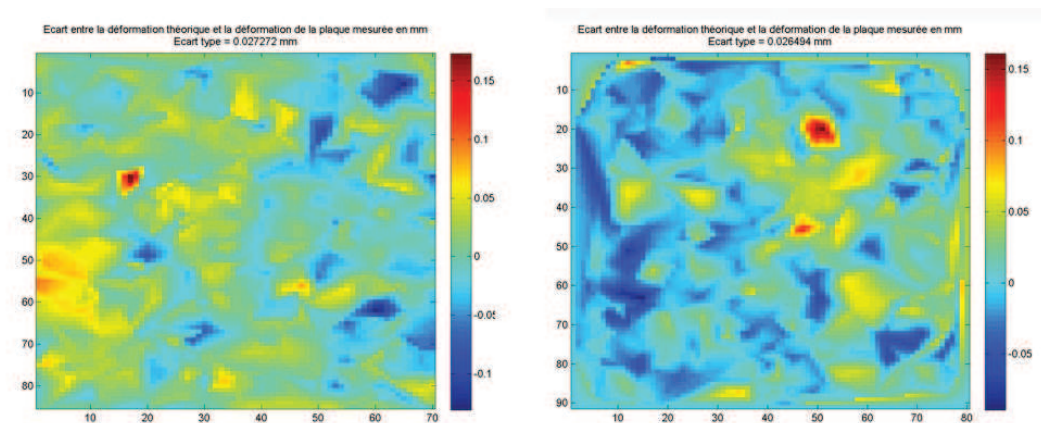


FIGURE 4.6 – Ecart en mm entre les déplacements théoriques et calculés. Les résultats issus des Minolta sont à gauche et ceux issus du Nikon à droite.

L'allure de la déformation (figure 4.5) est très similaire entre les deux appareils. L'aspect est lissé comme lors de l'utilisation du sur-échantillonnage avec la texturation grille, mais pour un temps de calcul bien moins important (5 minutes contre 3 heures). On obtient cet effet là de par le nombre de points d'intérêts qui est doublé au minimum avec le speckle. En termes de précision (figure 4.6), aucune différence significative ne se dégage, ce qui montre qu'il est difficile de dégager un appareil par rapport à un autre en simulation. L'écart type est inférieur à $30\ \mu\text{m}$, ce qui est semblable à celui obtenu avec la grille et le sur-échantillonnage. Cependant, on observe une différence au niveau des écarts de déplacement. Avec le speckle, il y a des maxima plus importants (de l'ordre de $150\ \mu\text{m}$) qui viennent dégrader la précision de l'ensemble qui semble en revanche plus cohérent comparé à la grille sur-échantillonnée.

4.4 Validation expérimentale

4.4.1 Mise en place du protocole

Dispositif pour la plaque

La plaque est montée sur un support élaboré par l'ENSIM lors du premier travail sur cette problématique. Nous l'avons légèrement modifié afin que celui-ci puisse s'adapter sur la table optique pour y être fixé. Derrière la plaque se trouve un système de vis qui permet de déformer ou non cette dernière (figure 4.7).

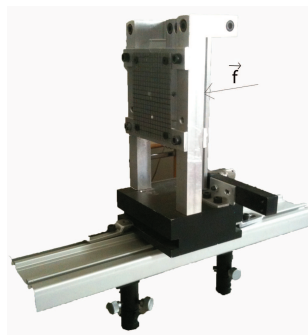


FIGURE 4.7 – Dispositif de fixation et de déformation de la plaque

Caméras MINOLTA

Lors des tests pour déformer la plaque, nous nous sommes rendu compte de la faible qualité des photos prises par les caméras MINOLTA (Le choix du NIKON est illustré en Annexe A). Il était parfois même difficile de détecter les croix selon l'exposition et la luminosité. Le traitement d'image était vraiment aléatoire. De plus, nous ne pouvions pas faire de mise au point manuelle, ce qui explique le flou sur les images. Nous avons ainsi décidé de nous passer de ces appareils pour les expériences pratiques.

Caméra NIKON

Divers dispositifs ont été envisagés pour l'utilisation d'une seule caméra. Cette dernière doit rester immobile et on doit être en mesure de la replacer strictement au même endroit. L'idée retenue consiste à faire coulisser entièrement le dispositif sur une barre et d'avoir deux butées à chaque extrémité placées de manière à ce que la base soit correcte entre les 'deux appareils'.

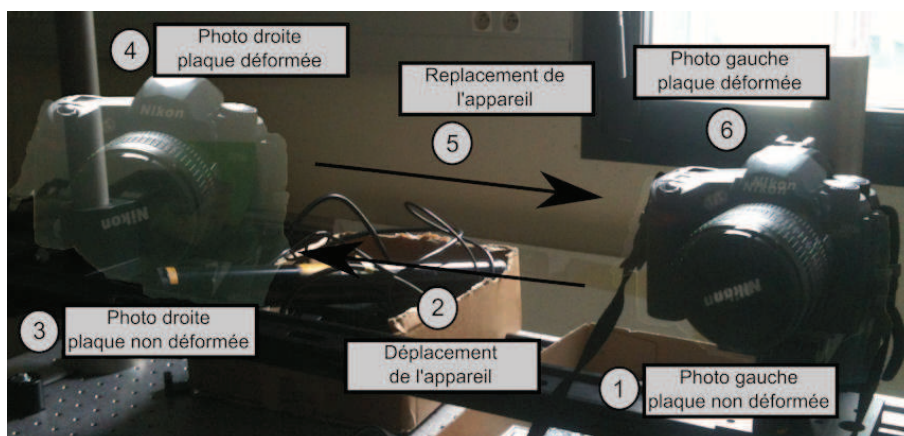


FIGURE 4.8 – Protocole expérimental utilisant une seule caméra

Afin de valider notre dispositif pour l'utilisation d'un seul appareil, illustré par la figure 4.8, nous avons cherché à connaître l'influence qu'un mauvais remplacement pourrait avoir. Nous avons procédé au calcul des déplacements en utilisant d'une part une photo vraie (prise correctement) et d'autre part une photo prise en ne revissant pas le système de fixation de l'appareil. Une fois les coordonnées tridimensionnelles des croix obtenues dans les deux cas, nous avons mis en correspondance les croix entre elles en sélectionnant la croix qui minimisait la distance par rapport à une autre tout en étant inférieure à une certaine tolérance. Nous avons ensuite soustrait les coordonnées Z entre elles pour en déduire l'erreur due à une mauvaise photo.

Avec la photo fautive, les croix étaient en moyenne distantes de 1.3 mm (soit plus de 3 pixels sur l'image), engendrant une erreur moyenne de 20 μm sur la coordonnée du déplacement. Sans mauvais repositionnement de l'appareil, la différence est invisible à l'œil nu. On observe alors un écart entre les croix détectées de 0.4 pixel au maximum, ce qui est cohérent avec une précision de pointé de 0.5 pixel. Notre dispositif pour replacer l'appareil est donc valable.

4.4.2 Choix de la méthode de validation

L'idée originelle était de pouvoir valider nos résultats expérimentaux par ceux de la simulation. Cependant, nous nous sommes rendu compte lors des premiers tests que nous n'étions pas dans des cas similaires. Dans l'expérience, la plaque est maintenue aux quatre coins par des vis qui constituent une contrainte supplémentaire pour le système, contrainte difficilement modélisable en simulation.

Nous avons donc cherché un autre moyen pour valider expérimentalement notre protocole. Il s'est avéré que le Centre de Transfert de Technologie du Mans disposait d'un système ATOS de chez GOM et qu'il était disposé à travailler avec nous pour faire avancer notre projet. Nous comptions utiliser les deux méthodes de mesure proposées par ATOS (présentées au chapitre 2.3.3 de ce rapport). Cependant, malgré plusieurs essais, il n'est pas possible de détecter des croix dessinées à l'intérieur des vignettes. En figure 4.9 se trouve un exemple de test effectué pour la détection des croix en supprimant le contour des vignettes.

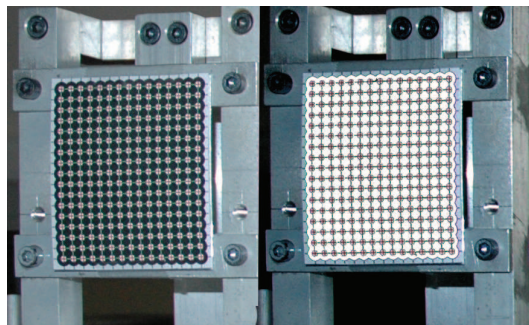


FIGURE 4.9 – Grille de couleur (gauche) pour la suppression des contours noirs des vignettes (droite)

4.4.3 Résultats obtenus

Après le calcul de la position de l'ensemble des vignettes par le système TRITOP (précision de 2 centièmes pour 1m^3) comme présenté au chapitre 2.2.4 avec la figure 2.3, on mesure les déplacements de la plaque dus au serrage de la vis par nos deux méthodes et le système ATOS (4 centièmes pour 1m^3) visible sur la figure 4.10. La définition du référentiel par Tritop permet d'avoir l'ensemble des mesures ATOS dans le même repère. Quant aux précisions, elles sont données par le constructeur et issues de mesures sur un cube d'un mètre de côté. Il est ainsi difficile de donner une précision sur les mesures réalisées à une échelle aussi petite que notre plaque.

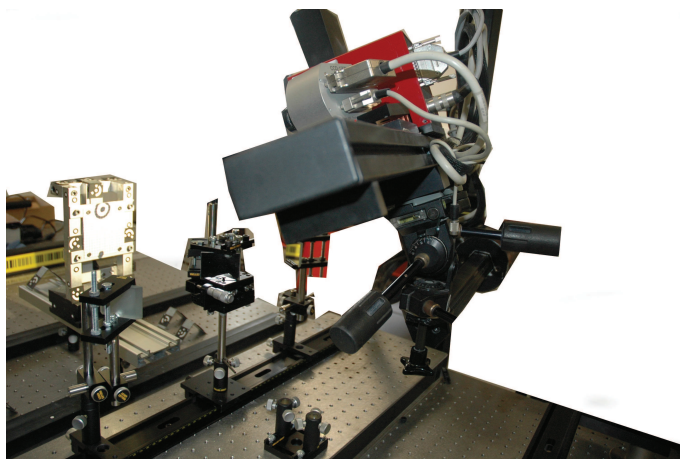


FIGURE 4.10 – *Système ATOS juste avant la projection des franges sur la plaque*

Résultats avec la grille

Intéressons nous dans un premier temps à la forme globale de la déformation. Nous avons pris des photos de la plaque à différents instants matérialisant chacun un état de déformation. A noter un détail très important : la mesure du déplacement avec notre protocole est en relatif spatialement, c'est-à-dire que l'on ne sait pas où est la valeur à zéro sur la plaque.

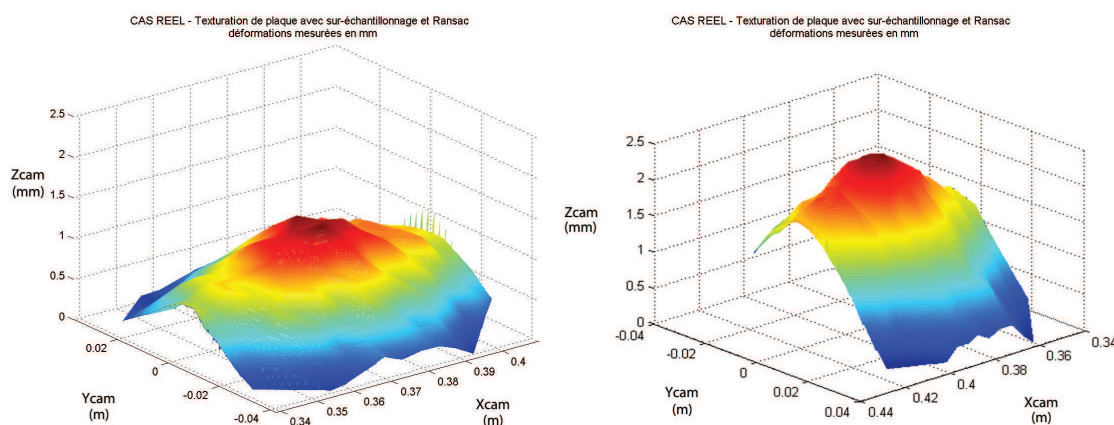


FIGURE 4.11 – *Allure de la déformation à t1 (gauche) et à t2 (droite)*

On observe bien un pic central sur les résultats avec cependant la plaque qui semble se soulever horizontalement, phénomène visible sur la figure 4.11. Au regard des photos prises, cela n'est pas étonnant. En effet, la plaque étant rectangulaire et fixée aux quatre coins, le serrage de la vis entraîne nécessairement une déformation sur les extérieurs du côté le plus long qui est dans le vide. La déformation est également bien plus importante à t2 qu'à t1.

Dans un second temps, voyons les résultats en terme de déplacement mesuré car c'est bien cela qui nous intéresse. A l'aide du logiciel fourni par GOM, il est donc possible grâce à quelques manipulations de récupérer les coordonnées tridimensionnelles des croix dans le référentiel défini par Tritop. Nous avons pu ainsi recueillir une grille centrée de 14x11 croix pour comparer les déplacements mesurés par les différents protocoles. Cette différence est illustrée par les histogrammes 3D en figure 4.12.

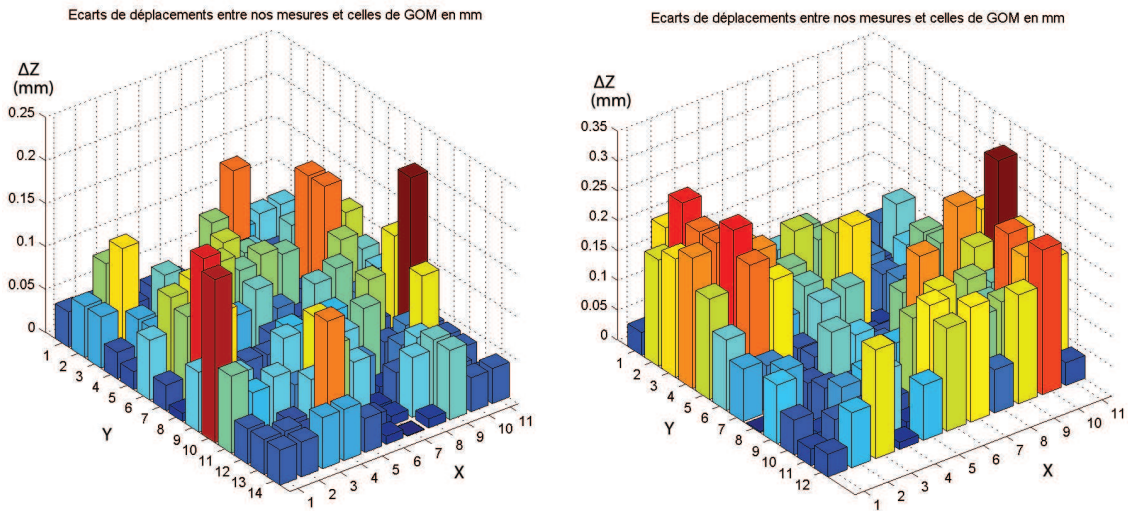


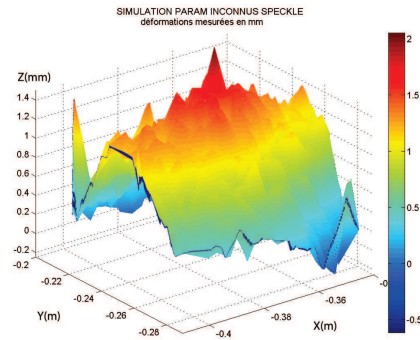
FIGURE 4.12 – *Ecart en mm entre les déplacements mesurés par GOM et notre système à t_1 (gauche) et t_2 (droite)*

Nous obtenons un écart type entre les déplacements mesurés par le système GOM et par notre protocole de $70 \mu\text{m}$ à t_1 et de $130 \mu\text{m}$ à t_2 . Ces valeurs, certes moins bonnes que celles obtenues en simulation, restent inférieures à la précision attendue au départ (environ $160 \mu\text{m}$). L'écart maximal mesuré à t_1 est de $200 \mu\text{m}$, contre $340 \mu\text{m}$ à t_2 . On constate ainsi une grande différence de précision entre les deux instants, qui peut s'expliquer par le fait que la déformation s'est accrue entre ceux-ci. Ainsi, il semblerait que plus la déformation augmente, moins nous sommes précis quant à la détermination des valeurs de déplacement.

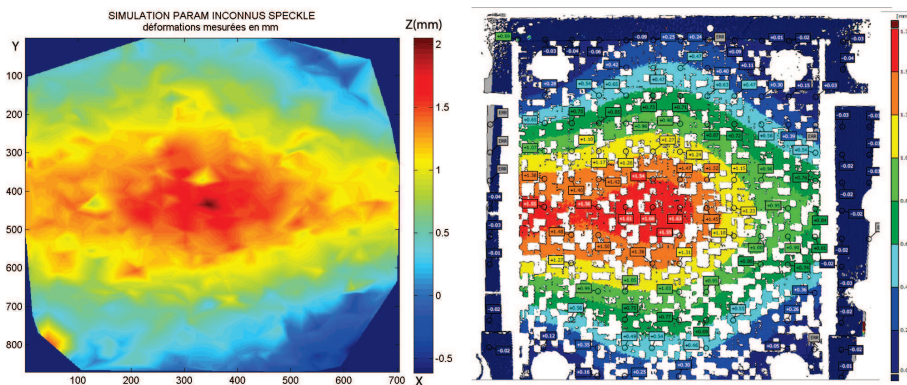
De plus, on observe sur les histogrammes en figure 4.12 que les écarts les plus importants sont situés plutôt en bordure de plaque. Il ne faut pas oublier que nous n'avons pas pu comparer toutes les croix en extrême limite de celle-ci (nous avons ici les 154 croix les plus proches du centre), mais tout laisse à penser que l'écart aurait été plus important. Plusieurs raisons pourraient expliquer cela. Dans un premier temps, on peut imaginer que les déplacements très petits (inférieurs à une trentaine de microns) comme les déplacements grands (supérieurs à deux dixièmes de millimètres) ont tendance à être mesurés de manière moins précise par notre protocole. Dans un second temps, on sait que les croix en bordure d'image sont moins bien détectées de par la géométrie du protocole. Est-ce que cela peut influencer à ce point sur les déplacements ? Il semblerait que oui.

Résultats avec le speckle

Nous avons rencontré quelques difficultés inattendues avec le speckle. Bien que théoriquement insensibles au facteur luminosité par exemple, les points d'intérêt ont du mal à être détectés sur les extérieurs de la plaque. On observe que chaque lancement du processus propose au final une solution différente car les points détectés puis appariés ne sont pas forcément les mêmes. Sachant que nous souhaitons utiliser uniquement le speckle à l'avenir, il faut rentrer plus en détail dans le code développé par David Lowe afin de mieux comprendre et de mieux appréhender la détection des points d'intérêt et leur robustesse. Quoi qu'il en soit, nous avons réussi à obtenir le résultat suivant :

FIGURE 4.13 – *Allure de la déformation avec la texturation speckle*

Malgré la forme globale de la déformation visible sur la figure 4.13, on observe de nombreux petits pics parasites, résultat d'un *Distratio* trop lâche lors de la mise en correspondance des points d'intérêt. Hélas, en le diminuant, on ne pouvait pas avoir de bonne visualisation. Afin de résoudre ce problème concernant le speckle, il serait intéressant de prévoir une surface texturée plus importante que la surface mesurée. Ainsi, nous aurions un maximum de points d'intérêt détectés au centre de la surface texturée et donc sur la totalité de la surface étudiée. De plus, au vu des constatations émises concernant les déplacements mesurés avec la texturation grille, éviter d'avoir des points d'intérêt sur les bords de l'image permettrait certainement de mesurer plus précisément les déplacements.

FIGURE 4.14 – *Cartographie des déplacements avec notre protocole (gauche) et le système ATOS (droite)*

Vu que nous ne sommes pas en mesure de choisir des points particuliers, nous ne pouvons comparer que globalement les résultats avec le speckle. Sur l'allure générale de la déformation, nous sommes cohérents : on constate bien que la partie gauche de la plaque est légèrement plus soulevée que la partie droite. Cependant, on constate des disparités dans la mesure des déplacements. Le pic central est autour de 2 mm pour nous, contre seulement 1.70 mm environ pour ATOS. En observant la figure 4.13, on voit que le pic ressort clairement et il pourrait alors s'agir d'un mauvais appariement. Autre solution possible : la mise à l'échelle ne serait pas correcte et engendrerait ainsi des écarts sur les déplacements. Cette question de mise à l'échelle sur le speckle est également un point important à approfondir si l'on veut l'utiliser à l'avenir, car cliquer des points sur l'image ne semble pas être la meilleure solution.

4.5 Conclusion

Les premières expérimentations ont permis de valider quasi-totalement nos protocoles, qui d'une part modélisent correctement la déformation et d'autre part mesurent les déplacements avec une précision d'environ 0.1 mm, malgré quelques limitations mises en évidence (notamment pour le speckle). Nous allons maintenant introduire dans une seconde partie une nouvelle méthode permettant de s'affranchir de plusieurs contraintes.

Deuxième partie

Méthode indirecte : Utilisation de miroirs

Chapitre 5 Méthode des quatre miroirs

5.1 Introduction

Le système présenté précédemment qui n'utilise qu'une seule caméra a une limite majeure : il ne peut pas fonctionner en dynamique car nous n'aurions pas le temps matériel de déplacer l'appareil. Il permet simplement la validation de la méthode en statique. Ayant l'objectif d'un processus pour des mesures dynamiques, on peut envisager l'utilisation d'un seul appareil, mais qui cette fois ne bouge pas. On va donc chercher à créer deux points de vue différents virtuels à partir desquels nous verrons la plaque. Nous prendrons ainsi virtuellement deux photos, qui occuperont chacune une moitié du capteur du vrai appareil. L'intérêt principal réside dans la suppression de l'erreur de synchronisation des appareils, étant donné qu'il n'y en a plus qu'un.

5.2 Historique

L'idée n'est pas nouvelle et a été envisagée dès 1987. Cependant, les premières méthodes ne permettaient pas de mesures dynamiques. Elles utilisaient un miroir ou du verre que l'on pouvait pivoter. Les images prises n'étaient alors pas simultanées, et on se retrouve en quelque sorte dans la même position que précédemment avec l'appareil que l'on replace dans une position identique. Wang présente différents mécanismes utilisés pour obtenir deux prises de vues différentes sur un même capteur CCD et de leurs principaux défauts : deux miroirs avec un alignement miroirs-caméra difficile à effectuer et un bi-prisme qui génère une importante distorsion sur les images prises [29]. Finalement, le système qui semble le plus abouti est celui qui utilise quatre miroirs.

5.3 Présentation

Le principe de base est celui du stéréoscope à miroirs (figure 5.1). Deux miroirs sont placés devant l'appareil, faisant un angle de 90° entre eux. Le stéréoscope utilise lui deux miroirs extérieurs placés à 45° afin que les rayons réfléchis par ce dernier soient parallèles à ceux sortant de la caméra. Dans notre cas, nous devons générer un angle δ par rapport aux 45° afin d'avoir une zone de recouvrement qui permet de voir la plaque sous deux angles différents.

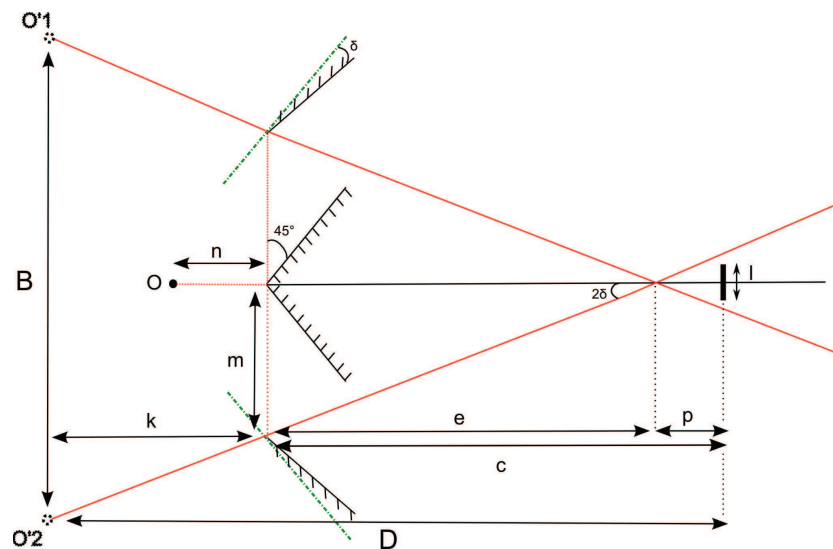


FIGURE 5.1 – Géométrie du protocole 4 miroirs

5.4 Géométrie du protocole

Le système présenté peut être transposé à notre cas. L'idée est de fixer la base B et la distance D entre l'appareil et la plaque pour dimensionner le système tout entier. On fixe aussi la distance n entre le centre optique de l'appareil et l'intersection C des miroirs intérieurs. On va alors jouer sur l'angle δ dont la valeur va dépendre des résultats suivants. En reprenant les équations démontrées [29], on peut ainsi déterminer la distance entre C et les miroirs extérieurs m ainsi que la distance de positionnement c de la plaque par rapport à C .

$$m = \frac{B - 2n \sin(2\delta)}{2 + 2 \sin(2\delta)} \quad (5.1)$$

$$c = D - (m + n) \cos(2\delta) \quad (5.2)$$

Grâce au théorème de Thalès, on en déduit la distance théorique de positionnement de la plaque en fonction de sa largeur l afin que l'on puisse la voir dans la zone de recouvrement :

$$p = l \frac{D}{B} \quad (5.3)$$

Il faut ensuite veiller à ce que :

$$(c - e) < p \text{ avec } e = \frac{m}{\tan(2\delta)} \quad (5.4)$$

Sinon on ne verra pas la plaque dans cette zone.

Quoi qu'il en soit, il y a nécessité de positionner les miroirs avec un certain angle par rapport à 45° sinon les rayons ne se croiseraient pas. Cela diffère donc du précédent protocole qui préconisait de garder les appareils sur un plan parallèle à la plaque afin de minimiser la perte de précision sur l'extrémité de la plaque. A l'aide du code sur la géométrie du protocole développé dans les études antérieures, on peut montrer quelle configuration permet de minimiser cette perte. Pour cela, on joue donc sur les deux paramètres que sont l'angle δ et la précision σ_y sur la mesure hors du plan de la plaque.

σ_y (μm)	δ ($^\circ$)	Angle des caméras ($^\circ$)	Précision à l'extrémité de la plaque (μm)
190	15	30	251
180	16	32	246
170	17	34	243
160	18	36	240
150	19	38	240
140	21	42	246

TABLE 5.1 – *Précisions attendues à l'extrémité de la plaque selon les configurations*

On observe ici que l'on peut s'attendre à une précision de mesure hors du plan de la plaque à l'extrémité de celle-ci de $240 \mu\text{m}$, soit $20 \mu\text{m}$ de plus que si les appareils étaient placés sur un plan parallèle à celui de la plaque. Cela peut sembler conséquent, mais reste à déterminer si cela est plus important ou non qu'un défaut de synchronisation des appareils par exemple. A noter tout de même que la rotation des caméras nous permet d'espérer une précision un peu meilleure que précédemment dans la partie de la plaque la plus proche de l'appareil.

5.5 Dimensionnement des miroirs

Le protocole étant fixé, reste maintenant à déterminer la taille des miroirs. Ceux-ci doivent permettre de voir la plaque en intégralité. Dans notre cas, ils seront de taille raisonnable vu que la plaque ne fait que 8x9 cm. Un système de miroirs pour la stéréoscopie a également été envisagé dans d'autres travaux, mais l'étude s'est surtout orientée sur le dimensionnement de ces miroirs. Les calculs présentés permettent de déterminer leur taille afin que l'intégralité de la zone visible par la moitié du champ de vision horizontal de la caméra puisse être captée. En s'inspirant de leur travail, on peut donc en déduire quel champ de vision est nécessaire pour voir la plaque et donc en déduire la taille minimale des miroirs intérieurs et extérieurs.

5.5.1 Calcul du champ de vision du NIKON

Comme illustré dans le chapitre 4.2.1, le NIKON que l'on utilise est un appareil grand champ de par sa courte focale. À partir de cette dernière et de la taille du capteur, il est possible de déterminer le champ de vision horizontal et vertical de l'appareil (Field of view (Fov) en anglais) qui va nous servir pour déterminer les tailles maximales pour les miroirs. Cela correspond au cas où les rayons sont masqués par l'un des miroirs. On obtient ces angles à partir des formules suivantes¹.

$$FovH = 2 \arctan\left(\frac{\text{largeur}_{\text{capteur}}}{2f(r+1)}\right) \text{ et } FovV = 2 \arctan\left(\frac{\text{hauteur}_{\text{capteur}}}{2f(r+1)}\right) \quad (5.5)$$

$$\text{Avec } r = \frac{f}{\text{Dist}_{\text{objet}} - f} \quad (5.6)$$

Cela correspond pour le NIKON à un FovH de 65,936° et à un FovV de 46,240°.

5.5.2 Calcul de la largeur des miroirs

On calcule donc dans un premier temps l'angle α qui va ensuite nous permettre de déterminer l_1 et l_2 , les largeurs de miroirs correspondantes à l'aide des formules de base dans les triangles quelconques. Pour $l_{1\max}$ et $l_{2\max}$, on utilise le champ de vision horizontal du NIKON déterminé précédemment.

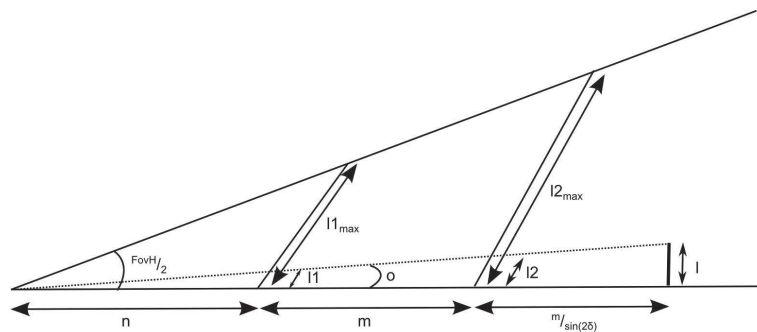


FIGURE 5.2 – *Système déplié pour le dimensionnement de la largeur des miroirs [19]*

1. en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_view

En utilisant la formule des sinus dans les triangles quelconques de la figure 5.2, on aboutit au résultat suivant.

$$l1 = \frac{n\sqrt{2}}{\cot(o) - 1} \text{ et } l2 = \frac{(m+n)\sqrt{2}}{\cot(o) - 1} \quad (5.7)$$

5.5.3 Calcul de la hauteur des miroirs

De la même manière précédemment, on calcule l'angle q qui va nous permettre de voir la plaque. Pour la hauteur maximale des miroirs, on utilisera le champ de vision vertical du NIKON.

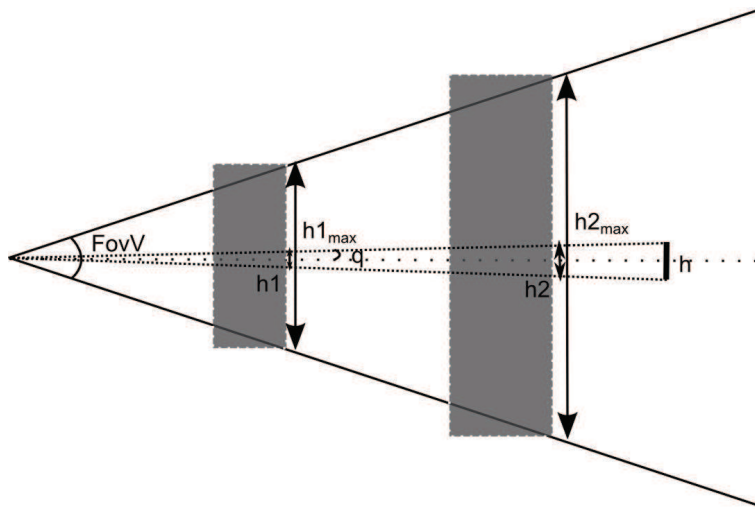


FIGURE 5.3 – Système déplié pour le dimensionnement de la hauteur des miroirs [19]

Pareillement, on utilise la formule des sinus pour en déduire la hauteur des miroirs (figure 5.3).

$$h1 = 2 \tan(q)(n + l1) \text{ et } l2 = 2 \tan(q)(m + n + l2) \quad (5.8)$$

5.5.4 Valeurs minimales et maximales pour la taille des miroirs

On peut donc en déduire la taille des miroirs pour les deux configurations préconisées afin de minimiser l'erreur en extrémité de plaque.

Précision (μm)	Taille des miroirs pour voir la plaque		Taille maximale des miroirs	
	$l1/h1$ (cm)	$l2/h2$ (cm)	$l1_{\text{max}}/h1_{\text{max}}$ (cm)	$l2_{\text{max}}/h2_{\text{max}}$ (cm)
150	2.3/1.9	6.3/5.2	31.2/37	87.12/103
160	2.3/1.9	6.3/5.2	31.3/37	84.5/100

TABLE 5.2 – Tailles minimales et maximales des miroirs

Chapitre 6 Validation par simulation et par expérimentation

6.1 Validation par simulation

A la différence du précédent protocole, nous n'envisagerons que l'utilisation du NIKON au vu de la piètre qualité des images prises par les MINOLTA. En revanche, le script pour la simulation est identique au précédent. On se place dans le cas où le plan focal de l'appareil n'est pas parallèle au plan de la plaque et comme si nous disposions de deux appareils. Pour la simulation, nous avons pris $\theta = 36^\circ$ suite aux calculs de la géométrie du protocole. Ainsi, la précision attendue est de $160 \mu\text{m}$.

6.1.1 Simulation avec la texturation grille

Voici l'allure de la déformation observée dans cette configuration.

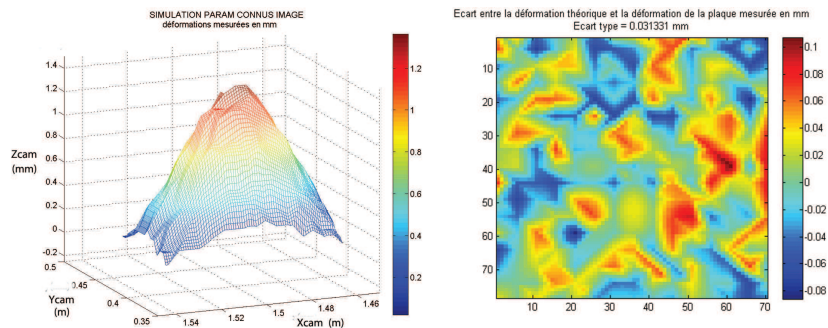


FIGURE 6.1 – Allure de la déformation et écarts de déplacements avec la texturation grille

Le fait d'introduire un angle depuis la prise de vue n'engendre pas de différence majeure dans l'allure de la déformation (visible sur la figure 6.1). Concernant la précision, elle est de $31 \mu\text{m}$ ce qui est légèrement en deçà de celle obtenue précédemment. L'écart maximal est quant à lui de $100 \mu\text{m}$, ce qui reste inférieur à la précision attendue. La simulation laisse donc entrevoir de belles perspectives.

6.1.2 Simulation avec la texturation speckle

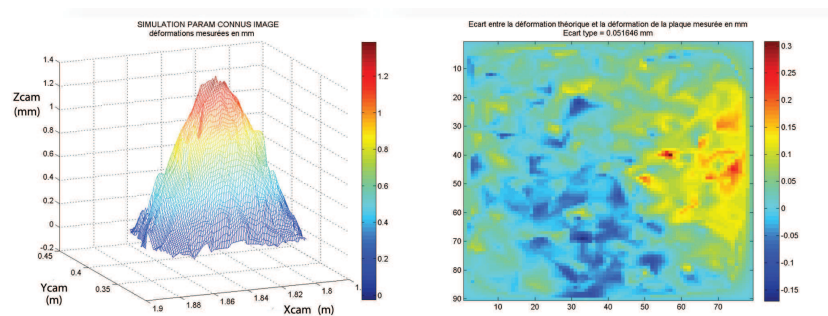


FIGURE 6.2 – Allure de la déformation et écarts de déplacements avec la texturation speckle

L'allure du speckle figure 6.2 est conforme à nos attentes et est semblable aux résultats précédents. En revanche, les écarts entre les déplacements théoriques et calculés montrent un pic à $300 \mu\text{m}$ qui vient dégrader notre précision qui est de $50 \mu\text{m}$. Même si cela reste satisfaisant, il semble donc que le speckle soit moins efficace en simulation dans cette configuration, ce qui peut paraître surprenant au vu de la robustesse des points d'intérêt SIFT.

6.2 Validation par expérimentation

6.2.1 Préparation du dispositif

Le dispositif pour les miroirs a été conçu sur une mini table Melles Griot (90 cm x 30 cm) afin d'être entièrement transportable, et ce dans l'optique de l'étalonnage de l'ensemble du dispositif optique (appareil photo et miroirs). La difficulté majeure a résidé dans la fixation des miroirs (issus de restituteurs photogrammétriques Wild) sur la table Melles Griot. De nombreux montages ont été testés afin de pouvoir non seulement fixer les miroirs, les orienter facilement à notre convenance mais aussi les aligner (figure 6.3). Cependant, le degré de liberté des miroirs est trop important et il est difficile de pouvoir tout gérer.

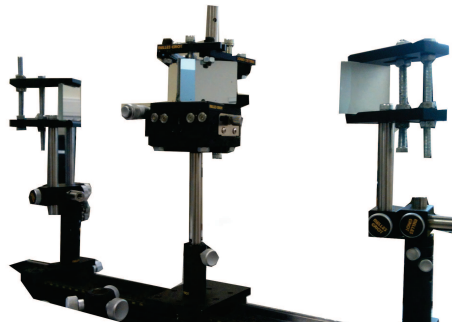


FIGURE 6.3 – Dispositif des quatre miroirs

6.2.2 Alignement des miroirs par autocollimation

Le positionnement et l'orientation des miroirs sont très importants car c'est cela qui va conditionner le fait de voir la plaque ou non. De la simulation sont ressortis des angles intérieurs et extérieurs dont la valeur se doit d'être respectée à 0.1° près pour une différence de précision de $4\ \mu\text{m}$, précision issue d'un test en simulation. Afin de pouvoir mesurer précisément ces angles, nous allons utiliser le principe de l'autocollimation qui permet d'avoir une visée perpendiculaire au miroir. De là et en utilisant des prismes boules suivant le même alignement que celui des miroirs, nous sommes en mesure par résolution de triangles de connaître tous les angles (figure 6.4).

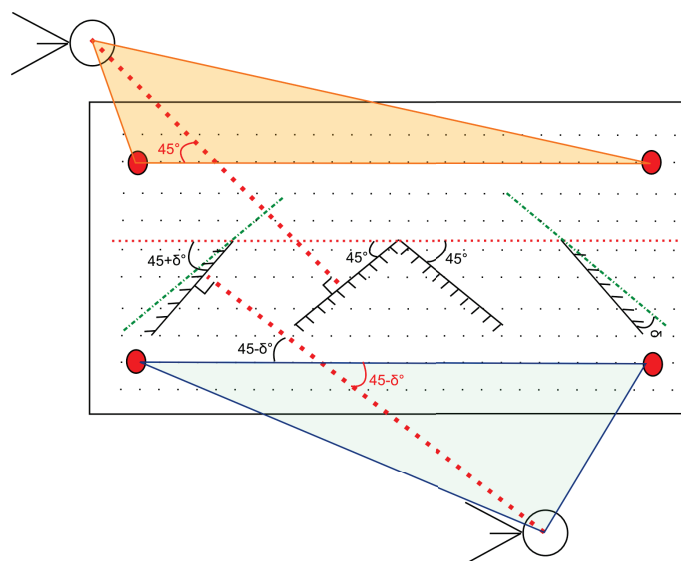


FIGURE 6.4 – Autocollimation pour l'orientation des miroirs. Les cercles rouges correspondent aux prismes qui matérialisent l'alignement des miroirs

En termes de précision, cette méthode est très intéressante et largement satisfaisante dans notre cas. Nous avons utilisé un Leica TM30 pour effectuer nos mesures qui possède un écart type de $\pm 1 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ en distance et de 0.15 mgon (milligrade) pour une visée angulaire. On raisonne ensuite par simple résolution d'un triangle connaissant deux distances et un angle.

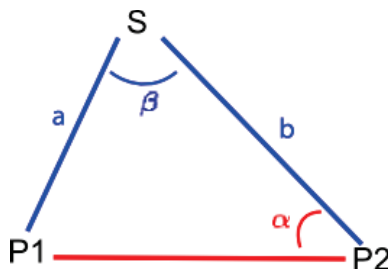


FIGURE 6.5 – Schéma de résolution du triangle

On utilise le théorème d'Al Kashi pour la résolution du triangle figure 6.5 et on aboutit à l'équation suivante :

$$\gamma = 200 - ((L_{prisme} - L_{miroir}) + \alpha) \text{ avec } \alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2} + \arctan\left(\frac{b-a}{b+a} \cot \frac{\beta}{2}\right) \quad (6.1)$$

L'angle γ correspond à l'angle en rouge que l'on cherche à déterminer dans la figure 6.4. L_{prisme} et L_{miroir} correspondent quant à eux aux lectures horizontales sur le prisme et le miroir. En utilisant la loi de composition des écarts types, on obtient la relation suivante :

$$\sigma_\gamma = \sqrt{(\sqrt{2}\sigma_{Hv})^2 + \left(1/4 + \left(\frac{1}{\sin^2(\beta)}\right)^2\right) \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\frac{2a}{(a+b)^2}}{1 + \left(\frac{b-a}{b+a}\right)^2}\right)^2 \sigma_{dist}^2 + \left(\frac{\frac{2b}{(a+b)^2}}{1 + \left(\frac{b-a}{b+a}\right)^2}\right)^2 \sigma_{dist}^2} \quad (6.2)$$

On trouve un écart type final sur l'angle de 0.5 mgon environ. L'autocollimation peut ainsi être envisagée lors de mesures angulaires plus contraignantes.

Les valeurs mesurées pour chacun des quatre miroirs sont résumées en annexe D. Les mesures angulaires sur les prismes sont le résultat de la moyenne entre deux lectures obtenues par double retournement alors que celle sur le miroir provient de la lecture après autocollimation. On peut ensuite calculer la valeur de l'angle formé par la visée sur le miroir et la direction matérialisée par les prismes.

	Angle calculé (gon)	Angle théorique (gon)
Miroir Int. Gauche	50.3	50
Miroir Int. Droit	50.1	50
Miroir Ext. Gauche	30.4	30
Miroir Ext. Droit	30.1	30

TABLE 6.1 – Angle d'orientation des miroirs

Le résultat n'est pas parfait mais nous permet de faire l'expérience. La réflexion sur le dispositif des miroirs a permis de mettre en lumière la complexité de conception d'un tel système. Il faut à la fois pouvoir gérer l'alignement des miroirs, leur inclinaison, leur orientation et la distance entre eux. Dans le cas de futurs projets, il convient d'envisager la fabrication d'un dispositif facilement adaptable sur la table Melles Griot mais également modulable.

6.2.3 Etalonnage

Ayant récupéré les miroirs sur des restituteurs photogrammétriques Wild, nous ne connaissons pas leurs caractéristiques. Afin de pouvoir corriger les aberrations chromatiques dues à ces miroirs, nous allons étalonner l'ensemble du système, c'est à dire l'appareil photo et les quatre miroirs. Cependant, ni ETA ni Photomodeler ne sont en mesure d'effectuer une calibration du système pour une raison simple : les cibles ne sont pas vues en direct et sont présentes deux fois sur les images.

L'idée est alors d'étalonner indépendamment chaque partie du capteur CCD afin d'avoir des paramètres de distorsion propres à chacune des deux images sur le capteur (bien qu'il n'y en ait théoriquement qu'une seule). La question est alors de savoir si la focale et les coordonnées du PPA obtenues étaient correctes. En reprenant le premier étalonnage du NIKON, nous avons donc considéré le capteur CCD comme divisé en deux et calculé les paramètres intrinsèques.

	Capteur normal	Capteur gauche	Capteur droit	Moyenne capteurs
X_{PPA} (px)	-11.9	0.5	-16.5	-8.0
Y_{PPA} (px)	-18.7	-18.0	-14.7	-16.4
Focale (mm)	17.7	17.8	17.8	17.8
X_{PPS} (px)	-10.1	44.2	-37.4	
Y_{PPS} (px)	-21.6	1.6	4.0	

TABLE 6.2 – Valeurs des paramètres internes du NIKON avec ou sans capteur scindé

Les résultats obtenus sont très intéressants. Concernant la focale, on retrouve bien la même valeur qu'avec la calibration de l'ensemble du capteur, et ce à moins de 0.1mm. Il faut cependant veiller à bien avoir des cibles sur différents plans pour que la détermination soit correcte. Pour les coordonnées du PPA, si l'on effectue la moyenne des coordonnées obtenues à partir des deux capteurs, nous obtenons des valeurs différentes entre 2 et 4 pixels. Au vu de la taille du capteur (3008 px x 2000 px), on peut considérer cela comme un résultat probant même s'il est difficile de quantifier réellement la précision de cette méthode. Enfin, on observe que les coordonnées du PPS sont très différentes et ce pour une bonne raison : le PPS est le point où la distorsion est nulle et donc les paramètres de cette dernière dépendent nécessairement des coordonnées du PPS. Elles seront donc propres à chaque partie de capteur.

Nous avons ainsi pu mettre en évidence que la calibration du système miroir peut se faire par l'obtention de paramètres internes propres à chaque partie du capteur CCD dans un premier temps. Nous retrouvons bien la focale du système et la moyenne des coordonnées du PPA est une bonne approximation. Il serait certainement plus judicieux de reprendre les équations pour la calibration d'un système optique et de les adapter à notre cas, afin d'avoir un étalonnage plus fin et une précision sur les paramètres obtenus.

6.2.4 Expérience et résultats

Résultats obtenus avec la grille

Comme cela est observable sur les photos prises par le système des miroirs, les traits de la grille sur la partie droite du capteur ne sont pas droits, résultat d'une mauvaise inclinaison du miroir. Cela est trop complexe à ajuster avec les moyens à disposition mais nous avons pu au moins tester la restitution en redressant les images, conscient d'introduire une erreur dans les mesures.

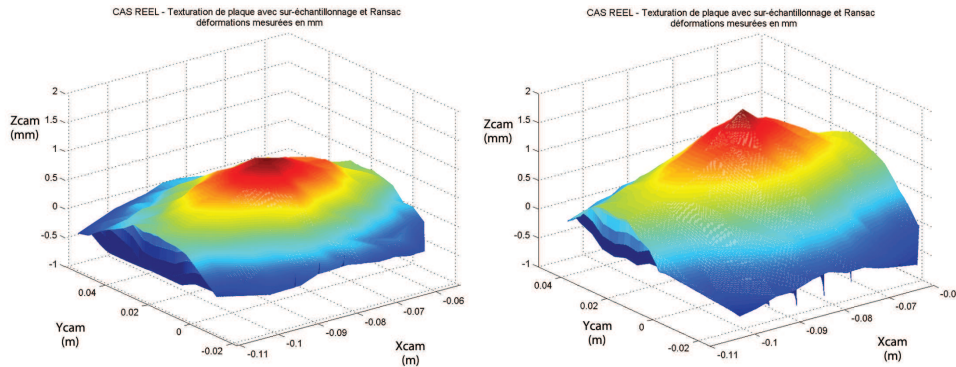


FIGURE 6.6 – Allure de la déformation avec la grille et les miroirs à t_1 puis à t_2

L'allure globale de la déformation est logique, on retrouve bien le pic central sur la figure 6.6. De la même manière, on observe bien une augmentation de la déformation entre t_1 et t_2 . On constate cependant des traits et des incohérences sur les bords de la plaque qui apparaissent suite au meshgrid effectué sous Matlab et dont la provenance est inconnue.

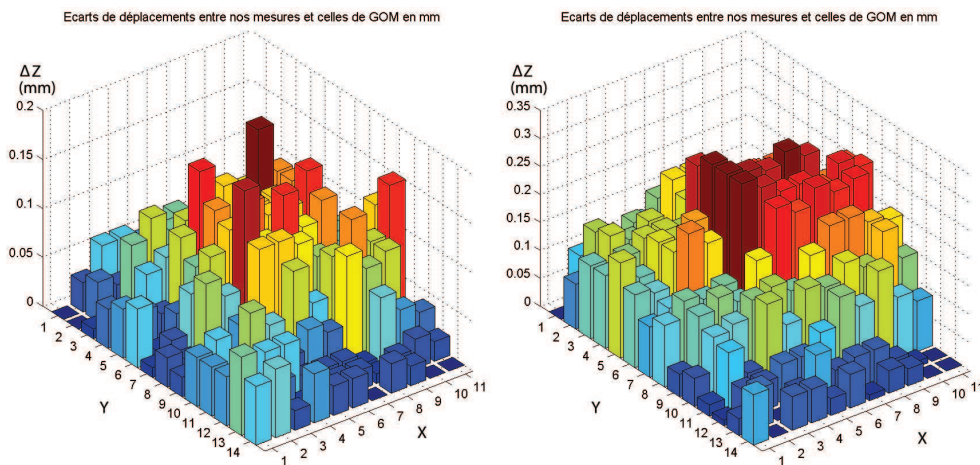


FIGURE 6.7 – Ecart en mm entre les déplacements mesurés par GOM et le système miroir à t_1 (gauche) et t_2 (droite)

Les histogrammes 3D figure 6.7 montrent que les écarts de déplacement les plus importants sont situés sur le bord droit de la plaque. Il est difficile de tirer des enseignements de cette information car nous avons dû retravailler légèrement l'image afin de pouvoir faire fonctionner le protocole. On note tout de même que les écarts types entre nos déplacements et ceux mesurés par le système GOM sont du même ordre que ceux trouvés avec le protocole de la caméra qui se déplace : $60 \mu\text{m}$ à t_1 pour un écart maximal de $180 \mu\text{m}$ et $100 \mu\text{m}$ à t_2 pour un écart maximal de $300 \mu\text{m}$. Ces valeurs sont même légèrement meilleures, venant corroborer l'hypothèse que des déplacements trop importants sont moins bien mesurés par notre protocole. Dans tous les cas, il ne semble pas que la méthode des miroirs vienne dégrader de manière trop importante la mesure des déplacements. Cela est très important car on envisage à l'avenir de n'utiliser que cette méthode.

Résultats obtenus avec le speckle

A l'image de la méthode où la caméra se déplace, nous avons rencontré des difficultés quant à l'utilisation du speckle et nous pouvons en ressortir la même constatation primordiale : il faut que la surface texturée soit plus importante que la surface mesurée pour éviter un manque de points sur les bords de la plaque (observable sur la figure ci-dessous).

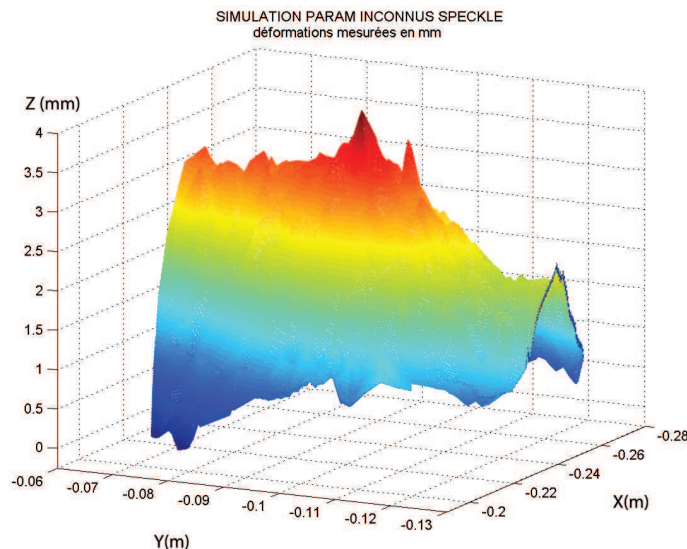


FIGURE 6.8 – Allure de la déformation avec la texturation speckle et les miroirs

Une fois encore, l'allure de la déformation sur la figure 6.8 est tout a fait cohérente. Le pic central est bien visible et la plaque se soulève sur les côtés, de manière plus importante à gauche qu'à droite cependant.

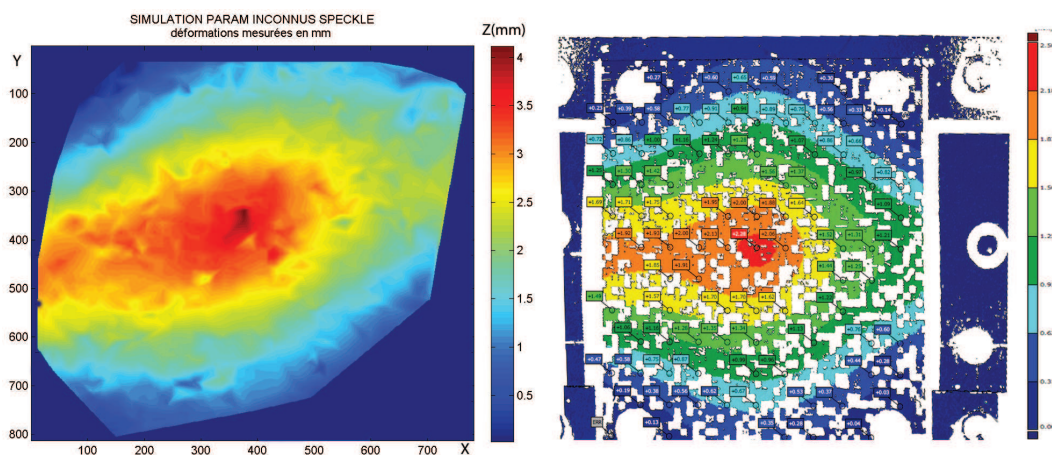


FIGURE 6.9 – Cartographie des déplacements avec notre protocole des miroirs (gauche) et le système ATOS du CTTM (droite)

En revanche, la figure 6.9 montre clairement que nous avons des soucis d'échelle avec le speckle. Cette cartographie illustre parfaitement cette erreur : nous voyons bien dans les deux cas que la plaque se soulève de manière plus importante à gauche mais les déplacements ne correspondent absolument pas (4 mm au maximum pour le protocole avec les miroirs et 2.7 mm pour le système ATOS). Il apparait clairement que c'est notre processus qui ne fonctionne pas correctement car nous n'avons jamais mesuré plus de 2.3 mm de déplacement.

Chapitre 7 Conclusion générale

Ainsi nous avons pu aborder l'association de ces deux domaines que sont la photogrammétrie et l'acoustique dans l'optique de la mesure de très petits déplacements. Bien que nous n'en soyons qu'aux prémices de cette problématique, il est d'ores et déjà possible de dégager plusieurs enseignements.

Nous sommes en capacité de mesurer des déplacements de quelques millimètres et ce avec une précision d'une centaine de microns environ, voire légèrement moins. Différents protocoles ont pour cela été mis en place et expérimentés avec plus ou moins de succès : deux caméras, une caméra qui se déplace et une caméra et quatre miroirs. Cependant, le code reste encore à améliorer, notamment en ce qui concerne le choix de la matrice essentielle et la création des matrices rotation et translation. En effet, il arrive parfois que le calcul aboutisse à certaines incohérences qui, bien qu'identifiables et corrigibles manuellement, doivent être éradiquées pour que le calcul puisse se faire automatiquement. L'algorithme pour la sélection de la bonne solution de matrice essentielle est un élément clé et il s'avère que plusieurs matrices correspondent aux actuels critères de sélection. Il arrive donc qu'une matrice écrase la précédente qui était pourtant la bonne.

L'expérience a également permis de mettre en évidence les différents points faibles du système. Il est très difficile d'orienter les miroirs dans les trois directions (et pas seulement celle pour voir la plaque) et c'est pour cela qu'il faut envisager à l'avenir un système fait sur mesure et facilement adaptable sur la table Melles Griot. Si la grille n'est pas vue droite à travers les miroirs, la restitution ne pourra pas se faire, l'algorithme de mise en correspondance travaillant colonne par colonne. Nous avons également rencontré pas mal de difficultés avec le speckle où il n'était pas toujours aisé de détecter des points sur la totalité de l'image. La mise à l'échelle pose également problème et une alternative à la méthode actuelle doit être trouvée. Enfin, l'ordinateur a également présenté ses limites face au code développé. Nous nous sommes très souvent retrouvés en manque de mémoire pour effectuer les calculs.

Il convient de noter tout de même que les miroirs semblent l'avenir de ce projet car ils présentent de nombreux avantages par rapport à la méthode classique. Aucune synchronisation entre les appareils n'est nécessaire vu qu'il n'y en a qu'un seul et il n'y a plus de soucis de luminosité sur les images car l'appareil ne bouge pas. Il faut veiller à l'environnement des miroirs qui doit tout de même avoir une luminosité assez homogène. Les différents tests effectués tout au long du projet ont montré que des conditions d'éclairage différentes pouvaient nuire à la bonne détection des croix ou du speckle. Le LAUM disposant d'une caméra rapide, un tel protocole peut ainsi être utilisable directement et ne requiert donc pas l'achat de deux caméras très coûteuses.

Nous souhaitons également utiliser uniquement le speckle à l'avenir. Même si nous n'avons pas pu mesurer de précision avec le speckle, on peut imaginer qu'elle est du même ordre que celle trouvée avec la grille, comme le laissent penser les résultats en simulation. Cela sera certes à vérifier plus tard. En attendant, pour des mesures précises sur des points particuliers, l'expérience a montré que la grille fonctionnait correctement.

De nombreuses pistes restent encore à explorer sur cette problématique, avec en première ligne l'automatisation pour les mesures dynamiques. Cela a été fait en simulation mais reste à faire pour le cas réel, de par les difficultés inhérentes à la matrice essentielle. Dans l'optique d'utiliser le speckle comme texturation par défaut, il faudrait approfondir les limites du descripteur SIFT et s'intéresser de plus près au code développé par David Lowe. Si l'on garde les croix, il faudrait alors rendre l'algorithme de mise en correspondance plus robuste à des différences d'orientation des lignes. On pourrait également envisager le calcul de la matrice fondamentale qui permettrait de s'affranchir de la calibration du système. Cette matrice permettrait de récupérer directement les paramètres internes et externes de la caméra, mais engendrerait nécessairement une perte de précision quant à la détermination de ces paramètres de par les inconnues supplémentaires du problème. Il serait intéressant de comparer alors les résultats obtenus à ceux issus d'ETA avec le principe d'étalonnage énoncé précédemment. Des esquisses de code ont été réalisées à ce sujet et sont à poursuivre afin d'arriver à récupérer les mêmes valeurs que celles fournies par un logiciel de calibration tel qu'ETA. Une modélisation théorique de la propagation des erreurs des deux protocoles serait également une piste à envisager. Enfin, l'utilisation d'un logiciel de calcul formel tel que Maple en alternative au logiciel de calcul numérique qu'est Matlab peut être une solution pour gagner en efficacité de calcul.

D'un point de vue personnel, ce projet m'a permis de me confronter à un univers différent : la recherche en laboratoire. Je me suis retrouvé un peu déboussolé face à la pluralité de disciplines que ce projet impliquait et j'ai eu beaucoup de mal à me projeter. Après avoir travaillé un mois à trois personnes dessus, je me suis réellement senti perdu. Mais, petit à petit, j'ai pris confiance en moi et ai réussi à avancer sur cette problématique en développant les outils pour les expériences réelles et la méthode utilisant les miroirs. J'ai beaucoup appris en photogrammétrie et en programmation, domaines dans lesquels j'ai toujours eu un peu de difficultés. Ce projet m'a fait prendre conscience que le métier de géomètre est vaste et que notre formation à l'ESGT nous permet d'avoir une capacité d'adaptation sur des problématiques parfois un peu éloignées du quotidien du géomètre. Enfin, grâce au LAUM, j'ai eu la chance de pouvoir découvrir le monde de l'acoustique par la visite d'un laboratoire à Besançon ainsi que par diverses présentations de doctorants. Ainsi, au final, ce fut une expérience fortement enrichissante.

Table des figures

2.1	<i>Détermination du champ de déplacement d'un objet [21]</i>	5
2.2	<i>Appareil photo utilisé pour Tritop (à gauche) et cibles placées tout autour de la surface à mesurer (à droite)</i>	7
2.3	<i>Définition du référentiel d'étude grâce à Tritop (CTTM)</i>	7
2.4	<i>Système ATOS de GOM</i>	9
3.1	<i>Déroulement des deux processus photogrammétrique mis en place</i>	10
3.2	<i>Emprise maximale d'un modèle définie par rapport au coin détecté (en rouge) [1]</i>	13
3.3	<i>Modèle avant sur-échantillonnage (gauche) et après (droite)</i>	13
3.4	<i>Principe du sur-échantillonnage de l'image [1]</i>	13
3.5	<i>Détection des croix (bleu) à partir des coins (noir)</i>	14
3.6	<i>Visualisation conjointe des inliers (vert) et outliers (rouge)</i>	15
3.7	<i>Ré-appariement des croix</i>	15
3.8	<i>Image de speckle et détection des points d'intérêt sur cette image</i>	18
4.1	<i>Géométrie du protocole [12]</i>	19
4.2	<i>Plaque de départ (rouge) et déformée (bleu) ainsi que les valeurs de déplacement</i>	22
4.3	<i>Allure de la déformation avec la grille avec sur-échantillonnage</i>	22
4.4	<i>Écarts en mm entre les déplacements théoriques et calculés avec sur-échantillonnage</i>	22
4.5	<i>Allure de la déformation avec le speckle</i>	23
4.6	<i>Écarts en mm entre les déplacements théoriques et calculés</i>	23
4.7	<i>Dispositif de fixation et de déformation de la plaque</i>	24
4.8	<i>Protocole expérimental utilisant une seule caméra</i>	24
4.9	<i>Grille de couleur (gauche) pour la suppression des contours noirs des vignettes (droite)</i>	25
4.10	<i>Système ATOS juste avant la projection des franges sur la plaque</i>	26
4.11	<i>Allure de la déformation à t1 et t2</i>	26
4.12	<i>Écarts en mm entre les déplacements mesurés par GOM et notre système</i>	27
4.13	<i>Allure de la déformation avec la texturation speckle</i>	28
4.14	<i>Cartographie des déplacements avec notre protocole (gauche) et le système ATOS (droite)</i>	28
5.1	<i>Géométrie du protocole 4 miroirs</i>	30
5.2	<i>Système déplié pour le dimensionnement de la largeur des miroirs [19]</i>	32
5.3	<i>Système déplié pour le dimensionnement de la hauteur des miroirs [19]</i>	33
6.1	<i>Allure de la déformation et écarts de déplacements avec la texturation grille</i>	34
6.2	<i>Allure de la déformation et écarts de déplacements avec la texturation speckle</i>	34
6.3	<i>Dispositif des quatre miroirs</i>	35
6.4	<i>Autocollimation pour l'orientation des miroirs</i>	35
6.5	<i>Schéma de résolution du triangle</i>	36
6.6	<i>Allure de la déformation avec la grille et les miroirs à t1 puis à t2</i>	38
6.7	<i>Écarts en mm entre les déplacements mesurés par GOM et le système miroir à t1 (gauche) et t2 (droite)</i>	38
6.8	<i>Allure de la déformation avec la texturation speckle et les miroirs</i>	39
6.9	<i>Cartographie des déplacements avec notre protocole des miroirs (gauche) et le système ATOS du CTTM (droite)</i>	39

Liste des tableaux

4.1	<i>Caractéristiques techniques des appareils MINOLTA</i>	20
4.2	<i>Distances de positionnement des caméras MINOLTA</i>	20
4.3	<i>Caractéristiques techniques des appareils Réflex</i>	21
4.4	<i>Distances de positionnement des appareils Réflex</i>	21
5.1	<i>Précisions attendues à l'extrémité de la plaque selon les configurations</i>	31
5.2	<i>Tailles minimales et maximales des miroirs</i>	33
6.1	<i>Angle d'orientation des miroirs</i>	36
6.2	<i>Valeurs des paramètres internes du NIKON avec ou sans capteur scindé</i>	37

Bibliographie

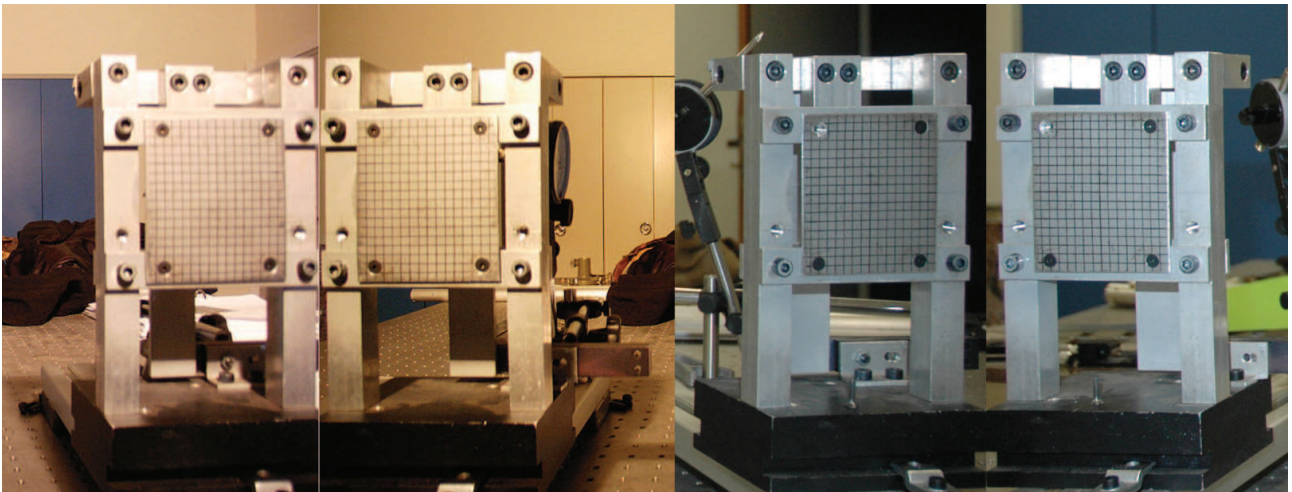
- [1] M.Biggio, X.Brunetiere, B.Houfflain Delacroix, "*Mesure de vibrations acoustiques par vision par ordinateur*", Rapport de projet pré-professionnel, ESGT, Janvier 2013
- [2] F.Brémand, M.Cottron, P.Doumalin, "*Mesures en mécanique par méthodes optiques*", Techniques de l'ingénieur (Introduction), 10 juin 2011
- [3] Y.J.Chao, M.A.Sutton, P.F.Luo, "*Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision*", Experimental mechanics, 33(2) :123-132, Juin 1993
- [4] F.Chen, G.M.Brown, M.Song, "*Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods*", Optical Engineering, 39(01) :10-22, Janvier 2000
- [5] A.Errami, P.Donvez, G.Patton, "*Profilométrie par projection de franges*", Projet de conception d'un banc de mesure, Dossier technique (3-15), Février 2012
- [6] L.Farge, S.Hamdani, Z.Ayadi, M.Nivoit, "*Visualisation des déformations plastiques par interférométrie de speckle*", 17^e congrès français de mécanique, Pages 1-2, Septembre 2005
- [7] O.D.Faugeras, "*What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig?*", Proceedings of European Conference on Computer Vision, 1992
- [8] O.Faugeras, Q-T. Long, "*The geometry of multiple images*", MIT Press, 2004 (New edition)
- [9] M.A.Fischler, R.C.Bolles, "*Random Sample Consensus : A paradigm for Model fitting with applications to image analysis and automated cartography*", Comm. of the ACM, vol 24, Pages 381-395, 1981
- [10] D.Garcia, "*Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images*", Thèse à l'Institut National Polytechnique de Toulouse (introduction), 2001
- [11] J.Garcia, Z.Zalevsky, C.Ferreira, "*Projection of speckle patterns for 3D sensing*", Journal of Physics : Conference Series 139, 2008
- [12] H.Hamdi, "*Mesure de vibrations d'une structure par photogrammétrie ultra-rapide*", Rapport de stage de Master 2 Recherche, 2012
- [13] C.Harris, M.Stephens, "*A combined corner and edge detector*", Proceedings of the 4th Alvey vision conference, pp. 147-151 1988
- [14] R.I.Hartley, "*Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras*", Proceedings of European Conference on Computer Vision, Pages 579-587, 1992
- [15] R.Hartley, A.Zisserman, "*Multiple view geometry in computer vision*", Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-54051-3, 2003
- [16] M.Kalantari, "*Approche directe de l'estimation automatique de l'orientation 3D d'images*", Thèse à l'université de Nantes, Septembre 2009
- [17] J.L.Legoër, J.Avril, "*Capteurs à jauges extensométriques - Mesures de grandeurs*", Techniques de l'ingénieur (Introduction), 10 avril 1992
- [18] D.Lowe, "*Distinctive image features from Scale-Invariant Keypoints*", International Journal of Computer Vision vol. 60, p.91, 2004
- [19] H.Mathieu, F.Devernay, "*Système de miroirs pour la stéréoscopie*", Rapport technique INRIA n°172, Juin 1995
- [20] A.J.Moore, J.R.Tyrer, "*An electronic speckle pattern interferometer for complete in-plane displacement measurement*", Meas. Sci. Technol, Octobre 1990
- [21] J.J.Orteu, "*Mesure 3D de formes et de déformations par stéréovision*", Pages 2-4 2002
- [22] J.Quinta da Fonseca, M.Preuss, "*Mechanical property mapping using image correlation and electronic speckle interferometry*", 2004

- [23] P.L.Reu, B.D.Hansche, "*Digital image correlation combined with electronic speckle pattern interferometry for 3D deformation measurement in small samples*", SEM annual conference and exposition on experimental and applied mechanics 2006
- [24] A.Rosenfeld, "*From image analysis to computer vision : an annotated bibliography, 1955-1979*", 2001
- [25] E.Simonetto, C.Pezerat, "*Feasability of the deformation analysis of a plate subjected to vibrations using recent computer vision methods*", Commission III, WG III/1 2009
- [26] H.Stewenius, C.Engels, D.Nistér, "*Recent developments on direct relative orientation*", ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, 60 :284-294, Juin 2006
- [27] M.A.Sutton, W.J.Wolters, W.H.Peters, "*Determination of displacements using an improved digital correlation method*", Image and vision computing, 1(3) :133-139, Août 1983
- [28] M.A.Sutton, J.J.Orteu, H.W.Schreier, "*Image correlation for shape, motion and deformation measurements*, 1 :1-10 2009
- [29] R.Wang, X.Li, Y.Zhang, "*Analysis and optimization of the stereo system with a four mirror adapter*", Journal of the European optical society, Rapid publications 3, 08033, 2008
- [30] B.A.Wasil, D.C.Merchant, "*Plate-deflection measurement by photogrammetric methods*", Experimental Mechanics, vol 4, Pages 77-93, Mars 1964
- [31] K.Zuiderveld, "*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*", San Diego : Academic Press Professional, Pages 474-485, 1994

Annexes

A. Comparaison entre les appareils MINOLTA et le NIKON

Un point important du projet concerne les appareils photos. Lors du projet d'Hanen Hamdi, les Minolta avaient été utilisés car l'école en possède deux exemplaires. De plus, leur principal avantage était d'avoir une focale très courte (de l'ordre de 10 mm) permettant d'avoir un grand angle. Cependant, nous avons décidé de les laisser tomber au profit d'un seul appareil réflex, le Nikon. En effet, lors de différents tests, nous nous sommes aperçus de la difficulté de modélisation de la déformation.



Photos de la grille prises par les deux appareils Minolta (gauche) et le Nikon (droite)

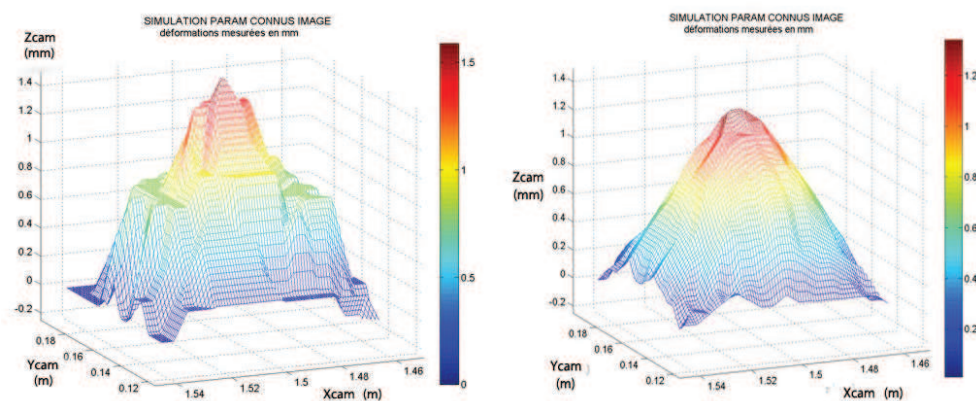
On voit bien sur la figure ci-dessus d'une part la différence de luminosité et d'autre part le flou des images prises par les Minolta. Il n'est pas étonnant de voir que la restitution était parfois impossible à effectuer car le processus n'arrive pas forcément à détecter de coins au départ. Même si nous sommes plus éloignés de la plaque avec le Nikon, les traits et nœuds sont parfaitement observables car nous avons pu régler manuellement la mise au point avant de la bloquer, chose impossible avec les Minolta.

Même si nous n'avons qu'un seul Nikon, cela n'est pas gênant car nous souhaitons valider notre protocole : peu importe dès lors si l'appareil devait bouger tant que l'on était en mesure de le replacer strictement au même endroit. La question ensuite est de connaître l'influence de l'utilisation de tel ou tel appareil. Comme observé dans le mémoire, il n'y a pas de différence significative en terme de précision préconisant l'utilisation d'un appareil plus qu'un autre, d'où le choix final de garder le Nikon plutôt que les Minolta.

B. Utilité du sur-échantillonnage avec la texturation grille

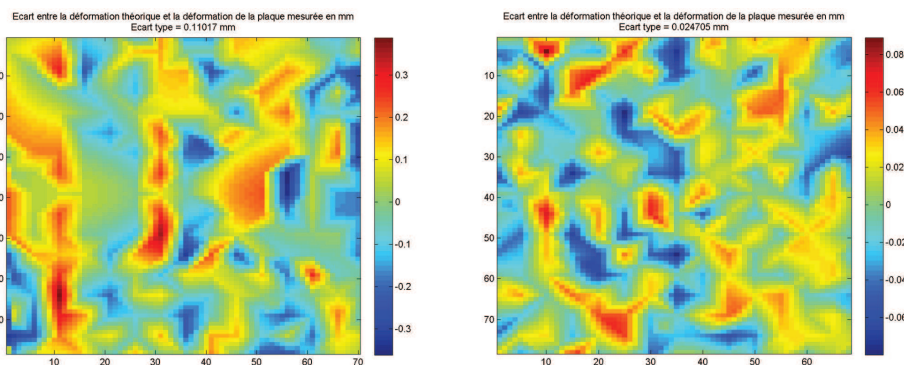
Le sur-échantillonnage de l'image lors de la localisation des centres de croix est une amélioration faite lors du projet pré-professionnel début 2013. L'objectif était de permettre une détermination plus précise des coordonnées des croix. Gourmand en temps de calcul, le sur-échantillonnage n'en reste pas moins d'une grande efficacité.

Différences en simulation



Allure de la déformation avec la grille sans sur-échantillonnage (gauche) et avec (droite)

On observe clairement sur la figure 7 que l'allure tend à être lissée avec l'utilisation du sur-échantillonnage. Pourtant, les croix ne sont pas plus nombreuses : elles sont juste plus précises dans leurs coordonnées (définies originellement à 0.5 pixel près) de par le facteur 3.

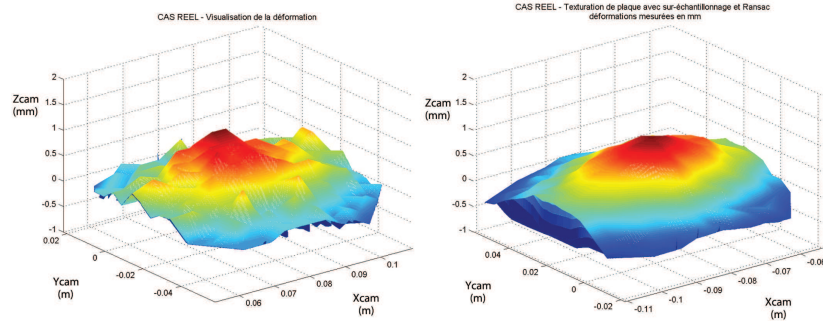


Ecart entre les déplacements théoriques et calculés sans sur-échantillonnage (gauche) et avec (droite)

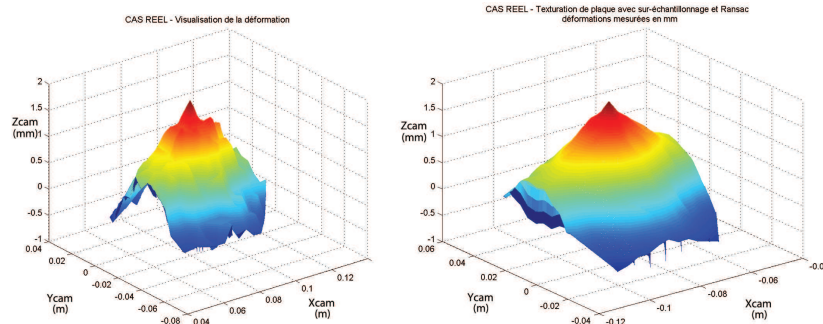
En observant les écarts types respectifs, on retrouve le facteur 3 entre les deux (100 μm sans sur-échantillonnage contre 30 μm avec). Cet aspect lissé se retranscrit bien en terme de précision ainsi qu'en terme d'écart maximal : 0.3 mm sans sur-échantillonnage contre 0.08 mm avec. La différence est significative entre les deux méthodes en simulation.

Différence en expérimentation

Nous avons voulu voir si la différence observée avec l'utilisation ou non du sur-échantillonnage en simulation se retranscrivait bien de manière expérimentale. Nous avons donc calculé les déplacements des deux manières différentes et comparé avec les résultats du système GOM.

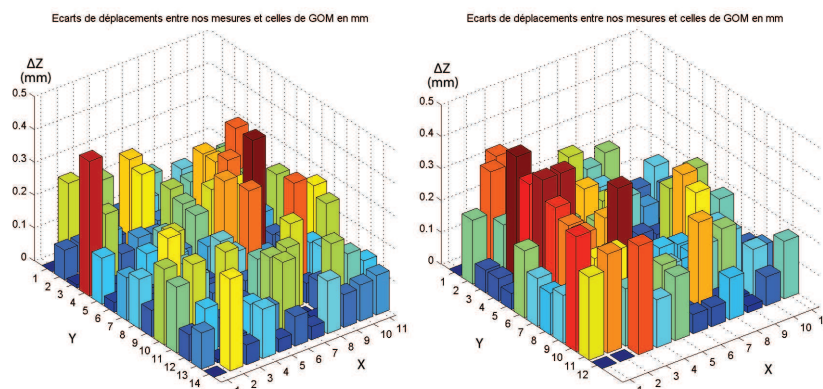


Allure de la déformation avec la grille sans sur-échantillonnage (gauche) et avec (droite) à t1



Allure de la déformation avec la grille sans sur-échantillonnage (gauche) et avec (droite) à t2

De la même manière, l'allure de la déformation tend à être lissée avec l'utilisation du sur-échantillonnage. En terme de précision, on observe sur la figure ci-dessous quelques différences mais dans une proportion moindre que celle attendue. On note une précision d'environ $100 \mu\text{m}$ à t1 pour un écart maximal de $280 \mu\text{m}$ et de $160 \mu\text{m}$ à t2 pour un écart max de $430 \mu\text{m}$. Clairement, on note que l'on obtient des écarts beaucoup plus éloignés sans sur-échantillonnage, avec une répartition plutôt aléatoire de ces écarts.

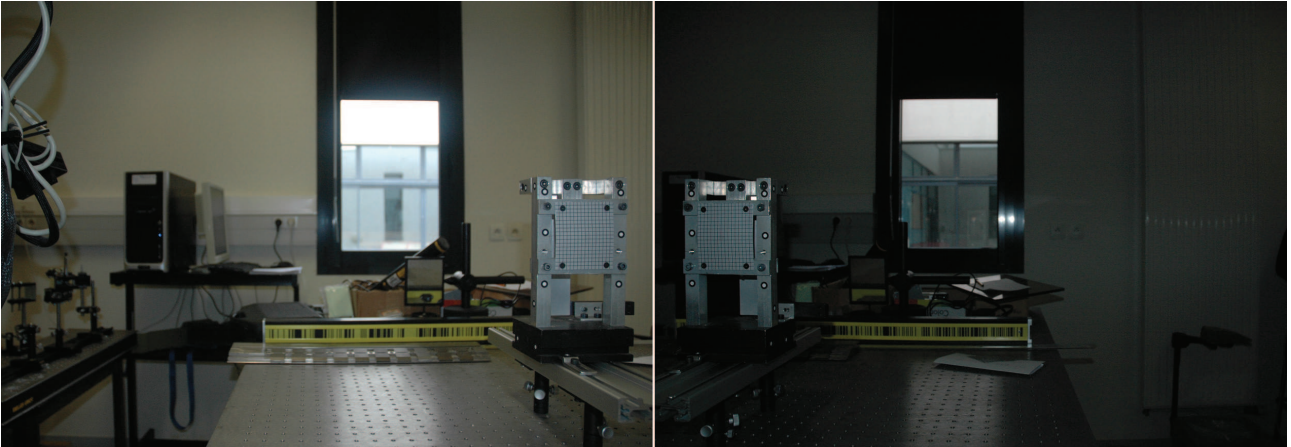


Écarts en mm entre les déplacements mesurés par GOM et notre protocole à t1 (gauche) et t2 (droite)

C. Photos de la grille et du speckle prises par le Nikon lors de l'expérimentation

Méthode d'un seul appareil qui se déplace

Nous cherchons ici à avoir une distance entre les deux appareils la plus grande possible afin d'avoir une bonne précision, ce qui explique que la plaque soit vue à l'extrémité de chaque image sur la figure 7.

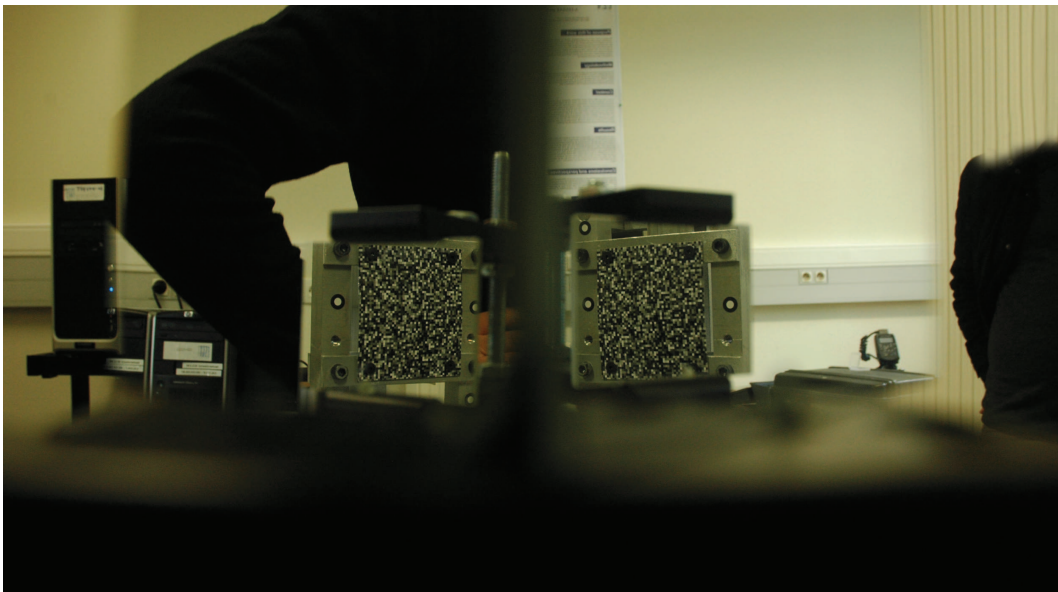


Photos de la grille et du speckle à un instant t

On observe bien la différence de luminosité qu'il peut y avoir entre les deux positions de l'appareil (les photos n'ont reçu aucun traitement d'image). Cela peut engendrer au final des disparités dans la détection des croix voire une incapacité à effectuer la mise en correspondance. L'utilisation d'un projecteur comme seul éclairage devra être mis en place pour les prochaines expérimentations.

Méthode des miroirs

Dans ce cas là, on observe sur la même image la plaque vue depuis deux points de vue virtuels créés par les miroirs. Sur la figure 7, la plaque est donc vue comme si les appareils photos avaient été placés avec un angle de manière à augmenter le champ de vision commun.



Photos de la grille et du speckle à travers les miroirs

Les miroirs n'étant pas calibrés dans toutes les directions, on ne voit pas la plaque de la même manière (elle est penchée du côté droit de l'image). Il faudra ainsi faire très attention à l'avenir quand au système de positionnement et de fixation de ces miroirs. Même remarque que précédemment concernant la luminosité : il faudra prévoir une source unique de lumière afin que les variations ne soient pas trop visibles sur les images.

D. Mesures par autocollimation

Pour ces mesures, nous avons utilisé un Leica TM30. La méthode par autocollimation nous permet de mettre la lunette du tachéomètre perpendiculaire au miroir en superposant la croix du réticule à sa propre image. Cela nous donne ainsi une visée de référence dans les triangles illustrés figure 6.4 du mémoire. Les lectures ont été effectuées avec double retournement : le résultat présenté ici est donc une moyenne des deux visées. Voici l'ensemble des mesures.

	Angle Horizontal (gon)	Distance (m)
Lecture Miroir	45.63027	
Prisme 1	25.65461	1.6040
Prisme 2	49.23992	2.1397

Mesures pour le miroir intérieur gauche

	Angle Horizontal (gon)	Distance (m)
Lecture Miroir	59.04102	
Prisme 1	56.18589	2.2310
Prisme 2	78.66848	1.6962

Mesures pour le miroir intérieur droit

	Angle Horizontal (gon)	Distance (m)
Lecture Miroir	58.83691	
Prisme 1	51.45042	1.6314
Prisme 2	62.57946	2.2439

Mesures pour le miroir extérieur gauche

	Angle Horizontal (gon)	Distance (m)
Lecture Miroir	51.46914	
Prisme 1	101.84815	1.5043
Prisme 2	80.41684	1.7920

Mesures pour le miroir extérieur droit

Prenons pour exemple le calcul pour le miroir intérieur gauche. En reprenant la formule 6.1, on peut calculer l'angle γ que l'on recherche tel que :

$$\gamma = 200 - (45.63027 - 25.65461) - \alpha \text{ avec } \alpha = 129.72551 \text{ obtenu par résolution de triangle}$$

On trouve ainsi $\gamma = 50.29883$ gon soit environ 50.3 gon.

Problématique

Afin de pouvoir mesurer le champ vibratoire d'un objet excité par une onde acoustique, les acousticiens disposent de nombreux outils (vibromètres, accéléromètres, ...) qui hélas ne sont pas satisfaisants car la mesure est ponctuelle et parfois intrusive. L'objectif est alors d'utiliser les principes de la photogrammétrie (méthode sans contact et surfacique) afin de pouvoir mesurer les déplacements à la surface d'un objet. Plus précisément, il s'agit de la vision par ordinateur qui utilise notamment les techniques de traitement d'image. Nous allons ici présenter les divers processus développés ainsi qu'un protocole original n'utilisant qu'une seule caméra pour modéliser le relief (au lieu de deux dans tout processus photogrammétrique traditionnel).

Processus de restitution

Objectif : Mettre en correspondance les images entres elles grâce à des points d'intérêt.

Texturation Grille

- * Détection des coins par la méthode de Harris
- * Sur-échantillonnage de l'image
- * Création des modèles de croix
- * Localisation des centres de croix par corrélation à un modèle (Fig. 1)

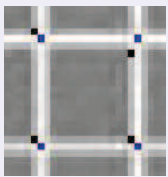


Figure 1 : Détection des coins (noir) puis des croix (bleu) par corrélation à des modèles de croix

- * Mise en correspondance des points entre les images gauches et droite
- * RANSAC pour la suppression des faux appariements et la recherche des bons (Fig. 2)
- * Mise en correspondance temporelle

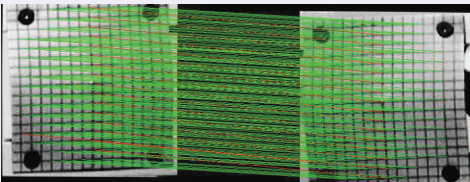


Figure 2 : Détection des mauvais appariements

- * Calcul de la matrice essentielle E
- * Calcul de R et T, paramètres d'orientation relative
- * Reconstruction des points 3D
- * Mise à l'échelle

Texturation Speckle

C'est un bruit blanc aléatoire suivant une loi de probabilité fixée (Gauss) qui a une autocorrélation spatiale proche de 0, soit une faible répétitivité des motifs pour un grand nombre de points d'intérêt détectés.

- * Détection des points d'intérêt par SIFT
- * Mise en correspondance des points d'intérêt par SIFT

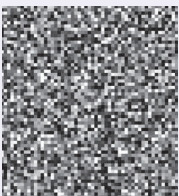


Figure 3 : Image de speckle sur laquelle on peut détecter près de 3000 points d'intérêt

- * Reconstruction identique à celle décrite dans la texturation grille

Protocole à une seule caméra

Objectif : Utiliser une seule caméra pour reconstruire le relief et ainsi supprimer l'erreur de synchronisation entre deux appareils.

Présentation

Sur le principe d'un stéréoscope à miroirs, on crée virtuellement deux appareils photos en introduisant un angle sur les miroirs extérieurs (Fig. 4). En réalité, le capteur CCD de l'unique appareil est séparé en deux et chaque partie capte la zone de recouvrement due à cet angle depuis deux points de vue.

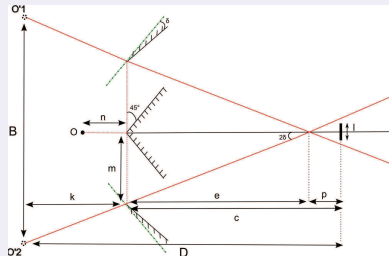


Figure 4 : Principe de la méthode des miroirs

Orientation des miroirs par autocollimation

En effectuant une visée par autocollimation sur chacun des miroirs, on arrive à être perpendiculaire à ceux-ci et ainsi à calculer les angles d'orientation des miroirs. Il faut aussi orienter les miroirs dans les deux autres directions.

Figure 5 : Autocollimation sur les miroirs

Étalonnage du système

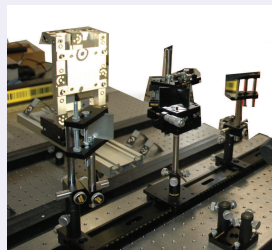


Figure 5 : Dispositif réel

Pour étalonner le dispositif miroir/caméra, les logiciels ETA et PhotoModeler ne fonctionnent pas car on ne peut théoriquement pas voir deux fois les mêmes points sur une image. Pour l'instant, on étalonne les deux parties du capteur CCD indépendamment. Développer un logiciel à partir des équations de calibration semble tout de même l'alternative à mettre en oeuvre.

Résultats expérimentaux

Objectif : Valider notre protocole en utilisant un outil industriel, ATOS de GOM, en comparaison.

Photos de la plaque texturée

Nous réalisons donc deux photos pour chaque texturation : Une avant et une après déformation.



Figure 6 : Photos de la grille et du speckle

Visualisation de la déformation

Le processus Matlab génère donc en sortie une visualisation de la déformation.

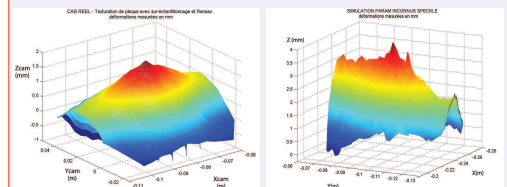


Figure 7 : Visualisation de la déformation de la plaque avec la texturation grille

Figure 8 : Visualisation de la déformation de la plaque avec la texturation speckle

On observe bien un pic central, illustrant bien le serrage de la vis derrière la plaque. L'allure générale correspond à nos attentes.

Comparaison des mesures de déplacement

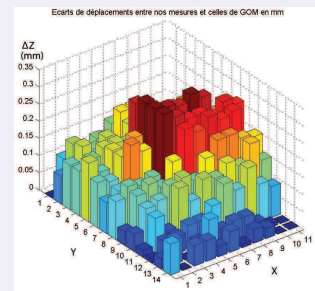


Figure 9 : Différences de déplacements entre les deux systèmes de mesure

Nous observons sur la figure 9 un écart moyen de 9 centièmes entre les mesures des deux systèmes sur la grille et un écart maximal de 3 dixièmes. On observe que plus la déformation augmente, moins nous sommes précis.

Concernant le speckle, malgré une allure de la déformation très proche dans les deux systèmes, nous rencontrons des soucis de mise à l'échelle qui ne permettent pas de dégager une précision du processus utilisant cette texturation.

Conclusion et perspectives

Nous avons ainsi pu voir que l'association des deux domaines que sont la photogrammétrie et l'acoustique est très convaincante. Nous sommes pour l'instant en mesure de mesurer de très petits déplacements avec une précision d'environ 0.1 mm. De nombreux progrès restent à faire sur le code qui présente quelques incohérences lors de la sélection de la bonne matrice essentielle. A l'avenir, de nombreuses pistes peuvent être envisagées avec en première ligne le développement d'un code pour les mesures dynamiques réelles (déjà existant en simulation) une fois les soucis de matrice essentielle résolus. Le speckle est une piste à creuser plus profondément afin de maîtriser un peu mieux la détection des points. L'utilisation de miroirs pour la restitution photogrammétrique semble maintenant évidente car les avantages sont nombreux : pas de synchronisation, un seul appareil, atténuation des variations de luminosité ... Si l'on souhaite se placer dans un cas encore plus général, le calcul de la matrice fondamentale pourrait être envisagé car il n'y aurait à ce moment là plus besoin de calibrer l'appareil en amont.

Mesure de vibrations acoustiques par vision par ordinateur

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2013

RESUME

Dans le domaine de l'acoustique, on s'intéresse au comportement des matériaux déformés par une vibration afin d'accéder à l'information de déplacement, et pas seulement à la déformation. Pour obtenir une information sans contact, surfacique et en trois dimensions, l'utilisation des méthodes optiques telles que la corrélation d'images numériques ou la projection de franges s'avère être une meilleure alternative que les méthodes vibratoires actuelles (extensomètres, vibromètres ...).

L'objectif ici est donc de mesurer le champ de déplacement d'une plaque excitée ponctuellement à partir d'images prises par des caméras et du processus de restitution photogrammétrique mis en place. Différentes caméras et texturations seront en outre testées afin d'atteindre la meilleure précision possible. Enfin, une solution utilisant une caméra et des miroirs sera présentée.

Mots clés : Vision par ordinateur, Acoustique, Photogrammétrie, Corrélation, Speckle, Miroirs

ABSTRACT

In the acoustic domain, we're interested in materials performance deformed by a vibration in order to access the displacement information, and not only the deformation. For contactless, surface and three-dimensional information, optical methods such as digital images correlation or interferometers are a better alternative than current vibratory methods (extensometers, vibrometers ...).

Aim here is to measure the displacement field of a plate punctually excited with photos taken from cameras and the photogrammetric protocol elaborate. Different cameras and patterns are tested to reach the best accuracy. Finally, a solution using one camera and mirrors will be introduced.

Key words : Computer vision, Photogrammetry, Correlation, Acoustic, Speckle, Mirrors