



HAL
open science

Estimation des incertitudes d'une méthode de mesure de déformées vibratoires par vision 3D

Thomas Durand-Texte, Elisabeth Simonetto, Stéphane Durand, Manuel Melon, Marie-Hélène Moulet

► To cite this version:

Thomas Durand-Texte, Elisabeth Simonetto, Stéphane Durand, Manuel Melon, Marie-Hélène Moulet. Estimation des incertitudes d'une méthode de mesure de déformées vibratoires par vision 3D. Instrumentation, Mesure, Métrologie, 2017, 16 (1-4), pp.71-95. 10.3166/I2M.16.1-4.71-95 . hal-02410616

HAL Id: hal-02410616

<https://hal.science/hal-02410616v1>

Submitted on 3 Jan 2023

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.

Estimation des incertitudes d'une méthode de mesure de déformées vibratoires par vision 3D

**Thomas Durand-Texte¹, Elisabeth Simonetto²,
Stéphane Durand², Manuel Melon¹, Marie-Hélène Moulet³**

*1. Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine - UMR CNRS 6613, 72085
Le Mans cedex 09, France*

thomas.durand-texte@univ-lemans.fr

2. Laboratoire Géomatique et Foncier, CNAM, 72000 Le Mans, France

3. Centre de Transfert de technologie du Mans, 72000 Le Mans, France

RÉSUMÉ. L'objectif du présent article est de présenter le principe d'une méthode de mesure de vibrations, basée sur la photogrammétrie, et d'en déterminer l'incertitude de mesure. L'originalité de la méthode réside dans le système mis en oeuvre : une caméra ultra-rapide associée à un jeu de miroirs générant deux caméras virtuelles. Des simulations numériques sont réalisées afin de quantifier les incertitudes de mesure et de déterminer la configuration optimale du système.

ABSTRACT. This article aims to explain the principle of a vibrations measurement method based on photogrammetry, and to determine the corresponding uncertainty. Its originality comes from the system used : one ultra-fast camera and a set of mirrors generating two virtual cameras. Numerical simulations have been carried out in order to quantify the measurement uncertainties and to determine the optimal configuration of the system.

MOTS-CLÉS : Photogrammétrie ; vibrations ; caméra ultra-rapide ; traitement d'images

KEYWORDS : Photogrammetry ; vibrations ; ultra-fast camera ; image processing

1. Introduction

Dans le domaine de la vibro-acoustique, la mesure de champs vibratoires est un enjeu capital, que ce soit pour étudier le comportement dynamique de structures (Ewins, 2000) ou pour identifier les sources vibratoires excitant une structure (Pezerat, Guyader, 2000). Afin d'effectuer des mesures de vibrations, les outils les plus utilisés sont l'accéléromètre et le vibromètre laser. Néanmoins, outre l'aspect intrusif des accéléromètres, la nécessité d'effectuer une acquisition par point de mesure limite ces techniques aux phénomènes stationnaires. Pour les signaux transitoires, l'holographie acoustique temporelle (Hald, 2001 ; Thomas *et al.*, 2008), l'imagerie par sources équivalentes (Bai, Lin, 2007) ou encore le retournement temporel (Lobreau *et al.*, 2015) sont des méthodes permettant cette fois d'étudier des phénomènes transitoires grâce à un grand nombre de microphones; mais se pose alors le problème du bruit ambiant et de la régularisation due à l'étape de rétropropagation. L'intérêt se porte actuellement sur les techniques de mesure plein champ permettant de mesurer des phénomènes transitoires.

Au delà de ces approches bien établies, différentes méthodes optiques se développent : la déflectométrie (Berry, Robin, 2016), qui mesure la forme d'un objet réfléchissant, l'holographie numérique (Poittevin *et al.*, 2015) qui utilise le principe de l'interférométrie laser afin de mesurer des déplacements, et la photogrammétrie (Baquersad *et al.*, 2017) qui, à partir d'images capturées d'au moins deux points de vue différents, permet de mesurer la forme d'un objet en trois dimensions.

En la matière, Baquersad *et al.* (2017) décrivent les différentes avancées de mesure de vibrations grâce à des méthodes basées sur la photogrammétrie, notamment pour des systèmes difficilement instrumentables : des ponts (Olaszek, 1999), des systèmes rotatifs (Stasicki, Boden, 2014) ou encore des ailes en soufflerie (Graves *et al.*, 2003). Ces méthodes visent généralement à mesurer des déformées modales et sont pour la plupart limitées à des variations stationnaires ou 2D si une seule caméra rapide est utilisée. Néanmoins, le temps de calcul et la quantité de données sont souvent très (voire trop) importants et nécessitent un post-traitement adapté, utilisant les éléments finis par exemple (W. Wang *et al.*, 2011). Malheureusement, les logiciels actuels de photogrammétrie sont souvent mal adaptés à un tel post-traitement. Il est ainsi difficile de gérer la quantité colossale de données tout en limitant le temps de post-traitement (Baquersad *et al.*, 2017).

Il a été montré qu'il est possible de mesurer qualitativement des déformations vibratoires transitoires 3D avec la photogrammétrie, en utilisant une unique caméra ultra-rapide, grâce à des miroirs (Durand-Texte *et al.*, 2016) à partir d'un montage proposé par Inaba *et al.* (1993). On souhaite maintenant optimiser cette méthode afin d'obtenir des résultats quantitatifs avec une meilleure précision.

Cet article présente différents paramètres et les différentes étapes d'une méthode de mesure de phénomènes vibratoires 3D avec une seule caméra, peu de pixels (1024×1024), des miroirs et un nombre important de points de mesures (31×31 points dessinés sur une plaque). On cherche ainsi à définir les limites de la mesure, ainsi que l'in-

fluence des paramètres et des méthodes de traitement sur son incertitude : par exemple, le motif utilisé comme cible pour les points de mesure, la méthode de détection de points d'intérêt et la position de la caméra et des miroirs.

2. Méthode

2.1. Principe de la photogrammétrie

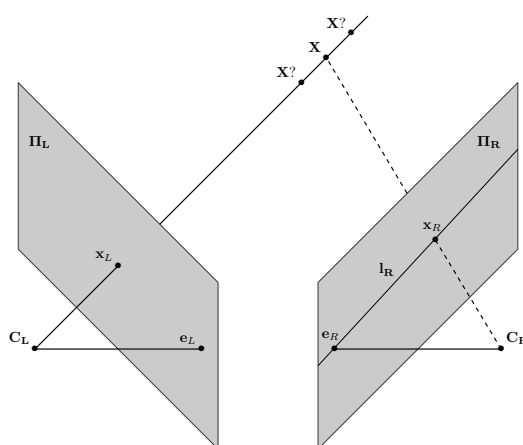


Figure 1. Schéma de principe de la vision par ordinateur adapté de Hartley et Zisserman (2004).

Le principe d'une mesure photogrammétrique repose sur celui de la triangulation : on définit deux plans images Π_L et Π_R (de deux caméras), sur lesquels un point de l'espace X se projette en x_L et x_R . Si l'on connaît la position (C_L et C_R) et l'orientation relative (R_L et R_R) de ces plans dans l'espace, ainsi que la position des points x_L et x_R , il est alors possible de calculer, dans l'espace à trois dimensions (X, Y, Z), la position des droites $(C_L X_L)$ et $(C_R X_R)$. À partir de ces deux droites, on estime la position du point X dans l'espace.

REMARQUE 1. — Il existe toujours une incertitude de mesure. En conséquence, le point x_R ne se trouve généralement pas sur la projection (l_R) de la droite $(C_L X_L)$ sur Π_R . Il est nécessaire de prendre en compte ce paramètre lors de l'étape de triangulation.

REMARQUE 2. — Il est également possible d'utiliser plus de deux points de vue pour une mesure photogrammétrique, ce qui permet de diminuer les incertitudes de mesure.

L'équation (1) décrit la relation entre un point X de l'espace 3D et son image x sur une caméra, en fonction de la matrice caméra K , de la position du centre de

perspective C et de la matrice de rotation R liant le repère monde au repère caméra (cf. équation 2).

$$x = \begin{pmatrix} k * x_c \\ k * y_c \\ k \end{pmatrix} = KR[Id] - C] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

La matrice de rotation est définie telle que :

$$R(\theta, \hat{t}) = Id + \sin(\theta)[\hat{t}]_x + (1 - \cos(\theta))[\hat{t}]_x^2 \quad (2)$$

avec \hat{t} l'axe de rotation, θ l'angle de rotation et $[\cdot]_x$ la matrice anti-symétrique.

La position dans l'espace des points est triangulée à partir de l'équation (3) (Hartley, Zisserman, 2004) qui décrit la relation entre l'image x_L d'un point détecté sur la caméra de gauche, la distance Z_L de ce point à la caméra et l'image x_R du point détecté sur la caméra de droite. On cherche alors la valeur de Z_L qui minimise la distance entre le point détecté à droite et le point détecté à gauche reprojété sur la caméra de droite.

$$x_R = K_R R_{LR} Z_L K_L^{-1} x_L + K_R T_{LR} \quad (3)$$

avec R_{LR} et T_{LR} la matrice de rotation et le vecteur translation entre les deux caméras.

Afin d'obtenir les paramètres internes des caméras K_L et K_R et les paramètres externes du système (R_L , C_L , R_R et C_R), il est nécessaire de calibrer à la fois la caméra et le système. Dans cet article, le calibrage est réalisé avec les outils de la bibliothèque OpenCV (Bradski, 2000), basés sur (Zhang, 2000 ; Bouguet, 2008).

2.2. Protocole de mesure

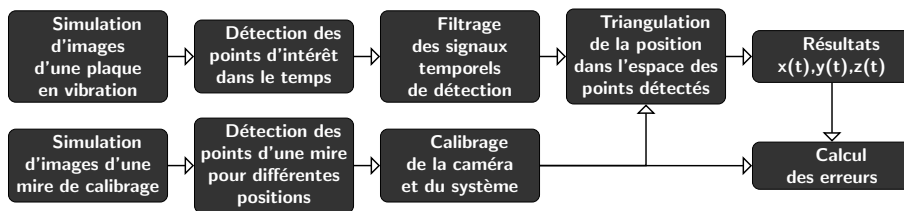


Figure 2. Schéma synoptique de la méthode.

La Figure 2 présente le synoptique de la démarche appliquée. Des images d'une plaque de 330 mm x 330 mm en vibration et d'une mire de calibrage présentant des

motifs cibles sont simulées. Ensuite, les centres des motifs sont détectés sur chaque image. La position des centres détectés pour la mire de calibrage est utilisée pour effectuer le calibrage de la caméra et du système. Puis, les signaux correspondant aux positions détectées pour la plaque en vibration sont filtrés avec un filtre fréquentiel passe-bas. Finalement, à partir des données de calibrage et des signaux filtrés, la position dans l'espace et le temps du centre des motifs est triangulée et comparée avec le signal de vibration de référence afin de calculer des erreurs.

À chaque étape de la démarche, on cherche à minimiser les incertitudes de mesure. Pour ce faire, on compare et on étudie les résultats obtenus pour :

- différentes configurations du système ;
- trois motifs pour les points de mesure ;
- trois algorithmes de détection ;
- deux fréquences de coupure pour le filtrage des signaux temporels.

2.3. Paramètres étudiés

On cherche ici à obtenir la précision de la mesure et à déterminer un certain nombre de paramètres permettant de minimiser les incertitudes. Ces paramètres sont : l'agencement du système, la définition des points de mesure et la méthode de détection. Pour ce faire, deux outils de simulation sont utilisés et comparés : un code de simulation développé pour cet article sous C++ utilisant la bibliothèque OpenCV (Bradski, 2000) et le logiciel de modélisation et de rendu 3D Blender (Blender Foundation, s. d.).

2.3.1. Agencement du système

Pour réaliser une mesure photogrammétrique, au moins deux points de vue d'un objet sont nécessaires. On cherche alors à déterminer les positions et orientations optimales des points de vue afin de maximiser la précision de la mesure. Il est cependant possible d'utiliser une unique caméra afin d'obtenir deux points de vue différents simultanément, et ce en utilisant des miroirs, tel que présenté sur la Figure 3.

En effet, en plaçant un double miroir central (deux miroirs à 90°) devant la caméra, la première moitié de la matrice de pixels regarde vers la gauche de la caméra et la seconde vers la droite. Il suffit ensuite de placer un miroir latéral de chaque côté afin de redresser les vues vers l'objet à mesurer. Ainsi, deux caméras virtuelles sont générées à partir d'une caméra réelle et d'un jeu de miroirs. Ce montage a déjà été utilisé en robotique (Inaba *et al.*, 1993), et a également été étudié pour des applications de stéréovision (Nene, Nayar, 1998 ; R. Wang *et al.*, 2008).

2.3.2. Définition des points de mesure

L'objectif est d'avoir un grand nombre de points de mesure sur la plaque, de l'ordre de 1000. Cependant, les caméras ultra-rapides ne disposent actuellement que de relativement peu de pixels, typiquement 1024×1024 . Avant de définir les points de mesure sur la plaque, il est nécessaire de choisir la technique qui sera utilisée. Il existe

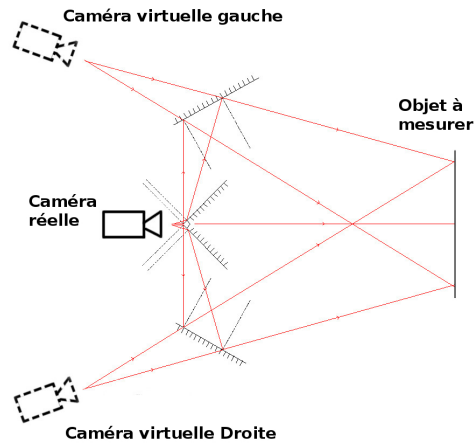


Figure 3. Schéma du montage.

trois approches : le suivi de cibles, la corrélation d'images et l'approche sans cibles (Baquersad *et al.*, 2017).

La méthode retenue ici est le suivi de cibles pour sa relative facilité d'implémentation et sa relative rapidité. La question qui se pose est la suivante : quel motif peut-on suivre de manière suffisamment précise avec peu de pixels à disposition ?

Un premier élément de réponse se situe au niveau des discontinuités du motif, qu'il faut éviter au maximum. Cette hypothèse est vérifiée en comparant trois formes :

- un point blanc sur fond noir ;
- un point blanc à bords profilés gaussiens ;
- un niveau de gris évoluant suivant un profil gaussien.

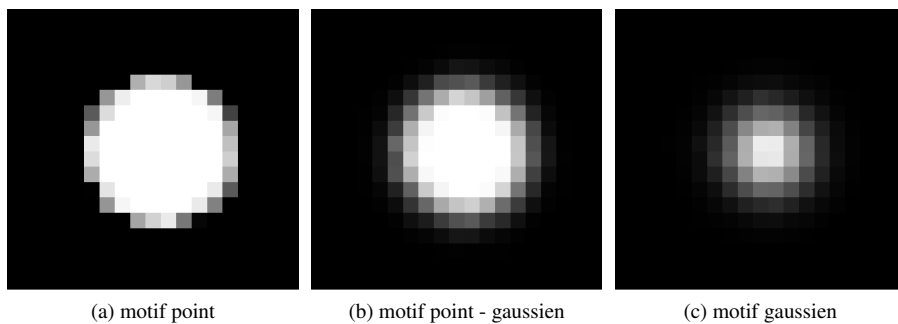


Figure 4. Différents motifs vus par le système.

Sur la Figure 4, les trois motifs sont représentés, tels que vus par une caméra dans une configuration similaire à ce que l'on souhaite réaliser. Le motif point présente une discontinuité importante, ce qui est impossible à rendre correctement sur une image discrétisée. Les autres motifs, quant à eux, présentent moins de discontinuités et semblent être bien imagés et ce malgré le peu de pixels utilisés.

Les transformées de Fourier 2D des sous-images, affichées sur la Figure 5 avec une dynamique de 50 dB, donnent des informations supplémentaires sur la validité des motifs. Le motif "point" contient des hautes fréquences et donc du recouvrement spectral. Les motifs "point - gaussien" et "gaussien" ont un contenu fréquentiel plus limité et ne présentent pas ou peu de recouvrement. Le motif "point - gaussien" a le plus d'énergie tout en évitant les variations trop hautes fréquences et devrait donc fournir les meilleurs résultats.

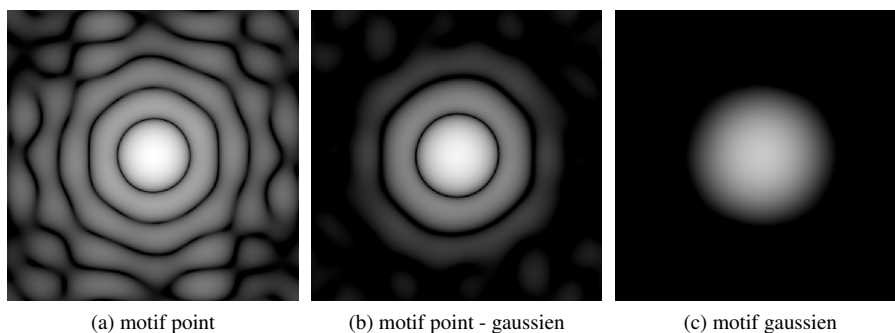


Figure 5. Transformées de Fourier 2D des différents motifs vus par le système.

2.3.3. Méthode de détection

Le but est de mesurer le déplacement de l'image d'un motif sur la matrice de pixels de la caméra. Il faut donc d'abord les détecter. Quelle méthode est la plus précise pour cette détection ? Trois algorithmes sont comparés :

- le "detecteur de blob" implémenté dans OpenCV (Bradski, 2000), basé sur l'algorithme de détection de contour (Suzuki, Abe, 1985) ;
- un algorithme de "moyenne pondérée", moyennant la position (x,y) des pixels en la pondérant par l'intensité de l'image ;
- un algorithme de "détection d'ellipse", basé sur la résolution d'un système à valeurs propres et sur la méthode des moindres carrés (Fitzgibbon *et al.*, 1999).

Pour les algorithmes de moyenne pondérée et de détection d'ellipse, une première détection "grossière" est réalisée avec une méthode de corrélation de motif. S'en suit une étape de traitement d'images (cf. Figure 6) : un masque de forme elliptique est calculé à partir de 8 points correspondant à un certain niveau de gris, détectés autour du pixel central. Les valeurs numériques de la sous-image sont étalées (équation (4))

et filtrée, via une opération de convolution 2D avec un filtre gaussien (cf. équation (5)) pour limiter l'influence du bruit de l'i

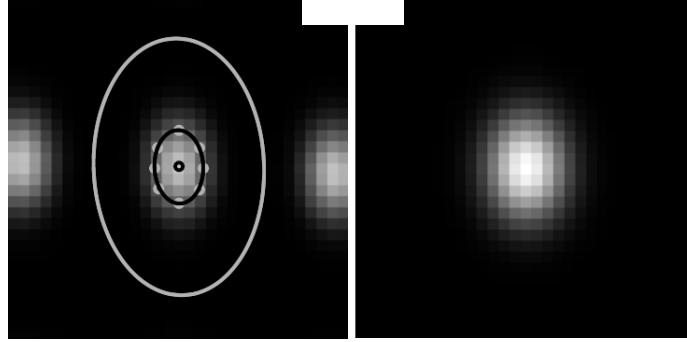


Figure 6. Traitement d'une sous-image. À gauche : calcul d'un masque elliptique (• : 8 points détectés, - : ellipse estimée, - : ellipse agrandie), à droite : image masquée, normalisée et filtrée.

$$I_{\text{étalé}} = \frac{I - \min(I)}{\max(I) - \min(I)} \quad (4)$$

$$f(x)_{1D} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{2 * \sigma^2}\right) \quad (5)$$

Finalement, l'algorithme de détection est appliqué.

REMARQUE 3. — Il est possible de filtrer une image 2D avec un filtre 1D en convoluant (2D) le vecteur du filtre 1D avec son vecteur transposé si le filtre final est réalisable à partir de deux filtres 1D. Le filtre gaussien est ici appliqué en effectuant deux convolutions successives, une dans le sens des colonnes puis une autre dans le sens des lignes, ce qui est équivalent à un filtre gaussien 2D, tout en étant plus rapide.

2.3.4. Filtrage fréquentiel des signaux de déplacement

La mesure et l'enregistrement d'un signal se font à une certaine fréquence d'échantillonnage. Le signal obtenu est donc discrétisé. Or, afin de décrire correctement un signal sinusoïdal, il est nécessaire d'avoir suffisamment de points par période, idéalement 6 à 10 points minimum, si l'on souhaite minimiser les erreurs. Il est alors habituel de réaliser un filtrage fréquentiel du signal pour limiter la bande de fréquence étudiée et de diminuer le bruit de mesure, généralement situé dans les hautes fréquences.

Dans le protocole proposé, un signal de déplacement est mesuré pour chaque point. Un filtre de butterworth d'ordre 9 est appliqué, avec deux fréquences de coupure différentes ($f_e/3$ et $f_e/7$) afin de déterminer la bande de fréquences mesurable.

2.4. Simulations

2.4.1. Choix de l'outil

L'objectif est de simuler 100 images (donc 100 points de mesure temporels) d'une plaque vibrante de dimension 330 mm x 330 mm avec le plus de réalisme possible, et ce pour différents agencements des éléments du montage (cf. Figure 3). Deux outils de simulation sont comparés :

- un code développé sous C++, simulant la projection d'une plaque avec un certain pas spatial sur la caméra, utilisant les équations linéaires de vision par ordinateur (cf. (Hartley, Zisserman, 2004)) et la bibliothèque openCV (Bradski, 2000) ;
- le logiciel de modélisation, animation et rendu 3D Blender (Blender Foundation, s. d.), utilisant le tracé de rayons et intégrant la distorsion optique et le flou de mouvement.

On compare donc les résultats obtenus à partir des images simulées par les deux outils avec les paramètres suivants :

- pour la caméra : la focale est de 50 mm, la taille des pixels est de $14,6 \mu\text{m}$, le centre de perspective est centré sur l'image et l'image est codée sur 8 bits.
- la plaque vibre selon un mouvement de corps rigide avec une composition de 3 fréquences (cf. Tableau 1), avec au moins 10 points par période pour minimiser les erreurs.

Tableau 1. Composantes du signal de déplacement de la plaque

signal numéro	fréquence (normalisée)	amplitude (μm)
1	45/2000	120
2	115/2000	70
3	200/2000	100

L'agencement du système dans les différentes configurations étudiées est présenté dans le Tableau 2 et un exemple d'agencement des éléments en 3D sous Blender est représenté sur la Figure 7. On retrouve le miroir central et les miroirs latéraux de la Figure 3, la plaque mesurée, la caméra mais aussi un spot lumineux.

Tableau 2. Position des éléments pour la première série de simulations

angle caméra virtuelle - plaque	dist. cam. plaque (mm)	m (mm)	n (mm)
30°	1530	640	60
35°	1420	720	60
40°	1310	790	60
45°	1210	850	60
50°	1110	910	60
55°	1010	960	60

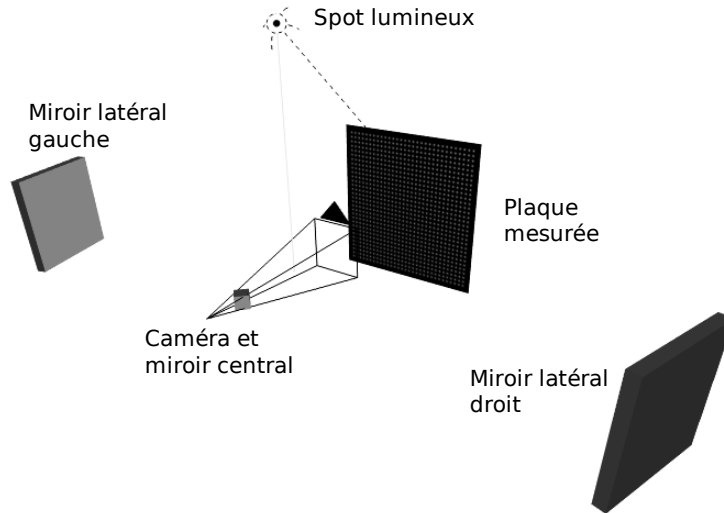


Figure 7. Agencement du modèle réalisé sous Blender.

Le calibrage est vérifié pour les différentes configurations. La Figure 8 montre pour deux points de mesure (dans deux coins de la plaque), le point détecté et la droite épipolaire associée, sur la caméra virtuelle de gauche, pour un angle de 50° entre la caméra et la plaque. Idéalement, le point se situe sur la droite épipolaire. Le motif utilisé est le motif "gaussien".

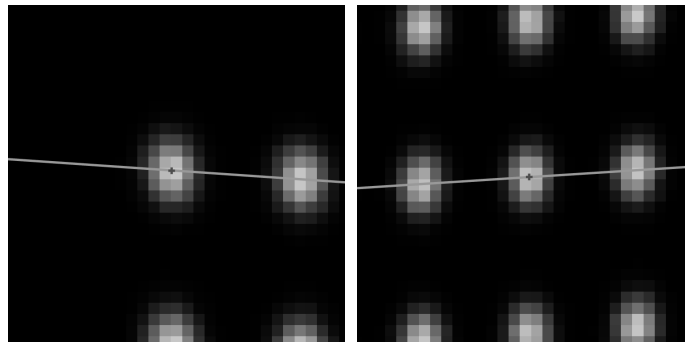


Figure 8. Droites épipolaires dans deux coins de la plaque sur la caméra de gauche.

Les données statistiques sur les distances droite épipolaire - point sont présentées dans le Tableau 3. Idéalement, la distance entre chaque point et la droite épipolaire associée est nulle. Les résultats semblent meilleurs avec les images simulées sous

C++. En effet, un écart plus faible entre les points détectés et les droites épipolaires signifie un meilleur calibrage du système et de la caméra et une détection plus précise de la position des points d'intérêt sur l'image. La moyenne des distances, obtenue avec les images C++, est environ trois fois plus faible que celle obtenue avec les images Blender.

Tableau 3. Distances droites épipolaires et points détectés pour les deux outils de simulation (détecteur de blob)

outils de simulation	moyen (pixels)	maximum (pixels)	minimum (pixels)
Blender	0.034	0.137	$4e - 5$
C++	0.010	0.062	$1e - 5$

Toutefois, on s'intéresse à la triangulation d'une vibration selon l'axe de vibration (Z) et donc au suivi de la position des points d'intérêt. Les résultats d'incertitude sur la triangulation de la vibration de tous les points sont présentés sur la Figure 9 avec le détecteur d'ellipse. L'allure des résultats est similaire pour les autres détecteurs mais l'incertitude est environ deux fois plus élevée pour le détecteur de blob appliqué aux images simulées sous Blender.

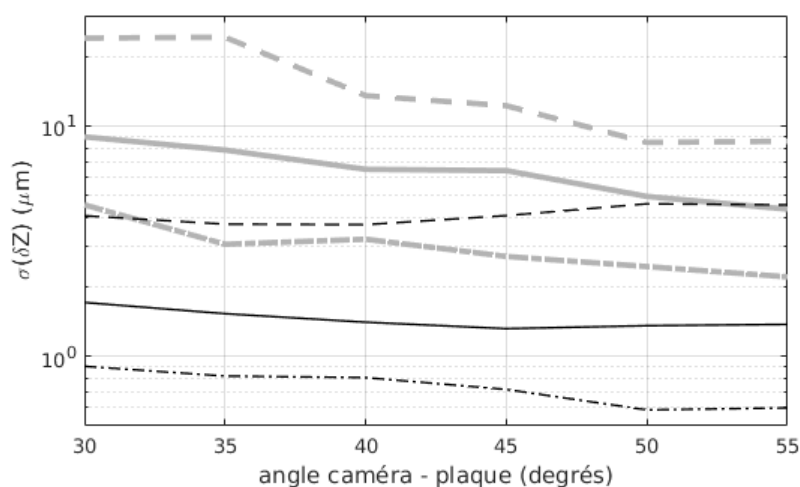


Figure 9. Incertitude sur la triangulation du déplacement de chaque point (selon l'axe Z) (\bullet : Simulation sous C++, \circ : Simulation sous Blender, - : minimum, - - : moyen, - . - : maximum).

Un écart notable est observé entre les résultats obtenus avec les deux outils de simulation. Les résultats obtenus à partir des simulations sous Blender semblent cependant similaires pour toutes les configurations angulaires simulées du système.

On cherche à savoir si l'écart observé vient du pas de simulation de la plaque dans les simulations C++. L'incertitude est donc étudiée pour la précision de la triangulation initiale de la position dans l'espace du centre des motifs pour différents pas de simulation de la plaque. Les résultats sont présentés sur la Figure 10.

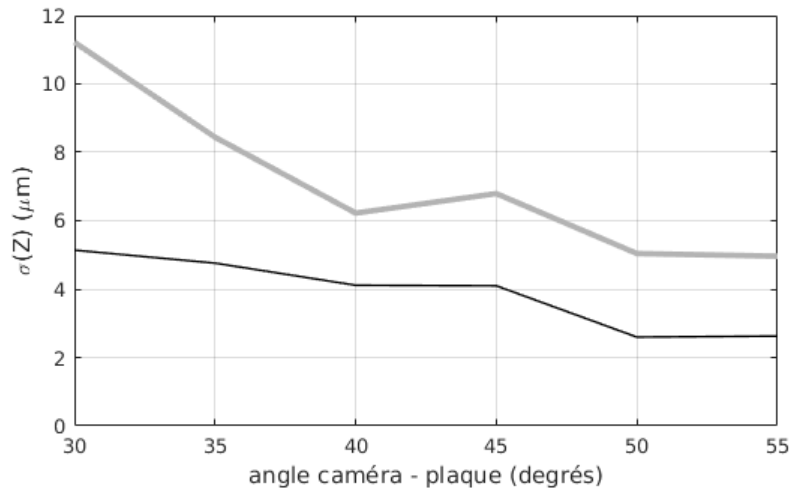


Figure 10. Incertitude sur la triangulation de tous les points sans mouvement (selon l'axe Z) avec des images simulées sous C++ (◉ : un point tous les 1/16 μm , ● : un point tous les 1/32 μm).

Le pas spatial utilisé pour simuler influence les résultats, et le pas utilisé est trop grossier. Afin d'obtenir des résultats réalistes, il est nécessaire d'utiliser un pas très petit, ce qui implique un (trop) gros temps de calcul (plus de 5 min par image).

En conséquence, le logiciel Blender est choisi pour la prochaine étape de simulation. Le calcul par tir de rayons est plus rapide (quelques secondes par image) et la distorsion optique ainsi que le flou de mouvement sont déjà implémentés.

2.4.2. Paramètres des simulations

Le logiciel Blender est utilisé. Pour la caméra, la taille de la matrice de pixels est fixée à 1024 x 1024 pixels avec une largeur de pixel égale à 14,6 μm , la distorsion optique à 0,2%, et l'ouverture du diaphragme à 25%. La défocalisation liée à l'objectif n'est pas prise en compte. La surface des miroirs est définie comme plane et parfaitement réfléchissante, le miroir central est un cube de 25 mm de côté et les miroirs latéraux sont des plaques de 200 mm x 200 mm.

À la différence de la première série de simulations, la taille de l'image sur la matrice de pixels est optimisée pour chaque configuration, puisque l'on a une matrice de pixels plus grande. Sur la Figure 11, sont affichées des images de la plaque dans deux

configurations et une image de la mire de calibrage utilisée. L'agencement pour les différentes configurations est présenté dans le Tableau 4.

Tableau 4. Position des éléments dans la seconde série de simulations

paramètre angle	distance (mm) caméra - plaque	distance (mm) miroir central - latéral	distance (mm) caméra - miroir central
30°	1370	580	60
35°	1200	620	60
40°	1040	645	60
45°	890	650	60
50°	740	630	60
55°	600	595	60

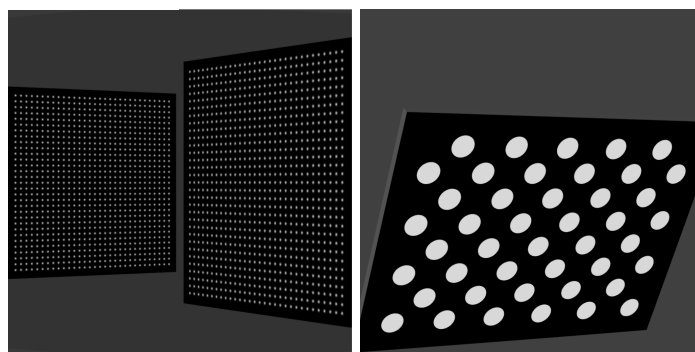


Figure 11. Images de la plaque pour différents angles (30° et 55°) et image de la mire de calibrage, simulées sous Blender avec distorsion optique.

La plage de mesure est de 300 mm x 300 mm et la plaque vibre selon un mouvement de corps rigide sinusoïdal comprenant trois fréquences et amplitudes différentes. Trois signaux sont définis, $s_1(t)$, $s_2(t) = s_1(t)/10$ et $s_3(t) = s_1(t)/100$. Les valeurs des fréquences et amplitudes pour le signal $s_1(t)$ sont données dans le Tableau 5. Afin de se rapprocher d'un cas réel, les fréquences vont de $fe/50$ à $fe/4$ et produisent un nombre entier de périodes pour 100 points de mesure.

Tableau 5. Composantes du signal de déplacement de la plaque $s_1(t)$

composante numéro	fréq. (normalisée par fe)	amplitude (μm)
1	1/50	120
2	1/10	70
3	1/4	100

3. Résultats

Les résultats présentés dans cette section sont obtenus à partir des simulations réalisées sous Blender en prenant en compte la distorsion optique, le flou de mouvement, et en optimisant la taille de l'image de la plaque sur la matrice de pixels. La précision de la mesure de vibrations est étudiée pour trois motifs, trois algorithmes de détection et six agencements différents pour le système. Puis, une étude de signaux temporels mesurés dans la configuration optimale est présentée.

3.1. Influence du motif

Pour étudier l'influence du motif, on s'intéresse à la précision de la triangulation des signaux de vibrations pour une configuration correspondant aux déformées les plus importantes dans le motif, observées pour un angle de 55° . On étudie l'influence de trois motifs sur le suivi temporel de la position des points d'intérêt dans l'espace :

- un point blanc sur fond noir ;
- un point blanc à bords profilés gaussiens ;
- un niveau de gris évoluant selon un profil gaussien.

Les valeurs d'incertitude sur la triangulation de la vibration des points de mesure selon l'axe (Z) avec les différents motifs sont affichées dans le tableau 6. Le motif "point" présente une incertitude environ 10 fois plus élevée que les deux autres, et on note que le motif "point - gaussien" donne la meilleure précision, avec un écart type moyen de $0,28 \mu\text{m}$. Pour le signal $s_1(t)$, les incertitudes sont entre 3 et 5 fois plus élevées et sont environ moitié moins importantes pour le signal $s_3(t)$; mais dans tous les cas, les meilleurs résultats sont obtenus avec le motif "point - gaussien".

Tableau 6. Incertitudes sur la triangulation de la vibration des points de mesure pour un angle de 55° et le signal $s_2(t)$

motif	écart type (μm)		
	moyen	maximum	minimum
point	2,38	13,56	0,35
point - gaussien	0,28	0,49	0,15
gaussien	0,47	1,02	0,24

REMARQUE 4. — Un motif contenant des discontinuités (hautes fréquences) est mal imagé dû au repliement spectral et les résultats de détection sont dégradés. Les motifs "gaussien" et "point - gaussien" limitent le contenu fréquentiel et sont donc mieux imagés et détectés.

3.2. Influence de la méthode de détection

On s'intéresse maintenant à l'influence de la méthode de détection sur la précision de la mesure. Les trois algorithmes sont appliqués sur des images de la plaque. Le motif utilisé est le motif "gaussien".

Dans un premier temps, la triangulation de la forme initiale de la plaque est comparée pour les trois algorithmes de détection. La configuration 55° est choisie. La Figure 12 montre la déformation engendrée par la distorsion optique sur la position initiale avec le détecteur de blob ainsi que la position initiale avec correction de la distorsion optique pour les trois algorithmes de détection. La distance entre la plaque et la mire de calibrage (centre du repère dans l'espace) est de 30 mm.

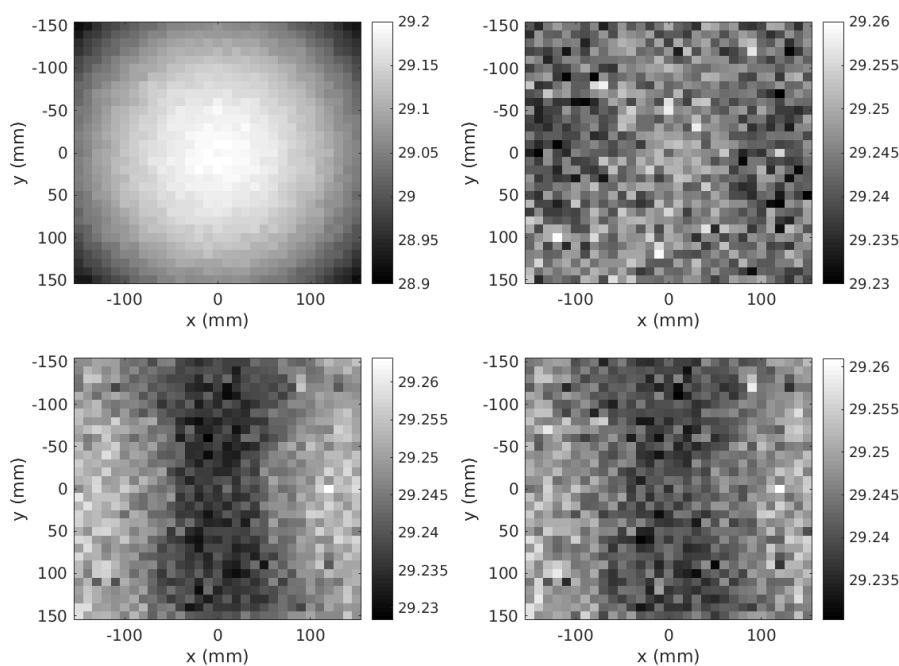


Figure 12. Triangulation à $t = 0$, en haut à gauche : sans correction de distorsion (détecteur de blob), en haut à droite : avec correction (détecteur de blob), en bas à gauche : avec correction (détecteur par moyenne pondérée), en bas à droite : avec correction (détecteur d'ellipse).

On note que :

- la distorsion optique est correctement corrigée ;
- le détecteur par moyenne pondérée affiche le biais le plus fort;
- le biais moyen est de l'ordre de 0,75 mm.

Dans un second temps, les résultats de triangulation selon l'axe Z pour les trois algorithmes de détection sont comparés. Les courbes correspondantes sont affichées sur la Figure 13. Le détecteur de blob présente l'incertitude la plus élevée et les résultats pour le détecteur par moyenne pondérée et pour le détecteur d'ellipse sont équivalents.

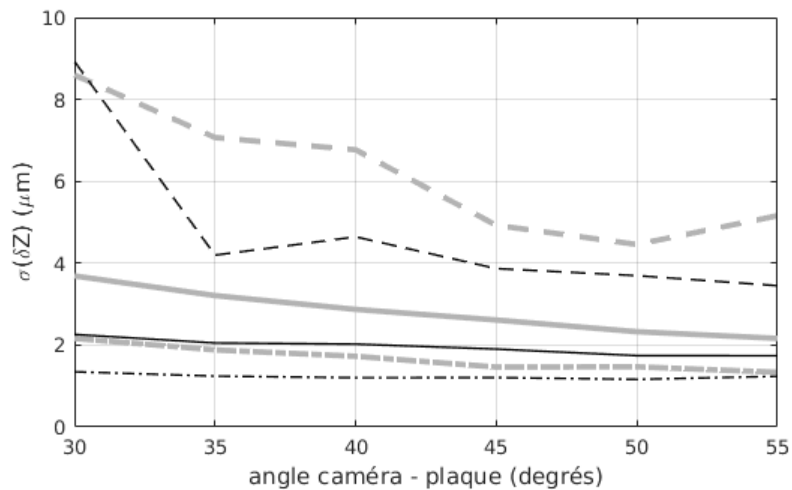


Figure 13. Incertitude sur la mesure de déplacement des points selon l'axe Z .
 (• : détecteur de blob, ● : détecteur par moyenne pondérée, ● : détecteur d'ellipse, - : minimum, - : moyen, - - : maximum).

REMARQUE 5. — Pour la mesure de vibrations, la précision du déplacement des points d'intérêt est plus importante que la précision de la position sur une image.

3.3. Influence de l'agencement

Pour l'analyse de l'influence de l'agencement du système sur la précision de la mesure, on souhaite utiliser une simulation réaliste. La distorsion optique et le flou de mouvement sont donc simulés et la taille de la plaque sur la matrice de pixels de la caméra est optimisée. Le motif choisi est le motif "point - gaussien", et les algorithmes de détection d'ellipse et par moyenne pondérée sont utilisés.

Les résultats de triangulation de vibration selon les trois axes X , Y et Z sont étudiés. La Figure 14 présente les valeurs d'incertitude obtenues avec le signal $s_1(t)$ et le détecteur par moyenne pondérée. L'incertitude est globalement constante quelque soit l'angle choisi et est de l'ordre de quelques micro-mètres.

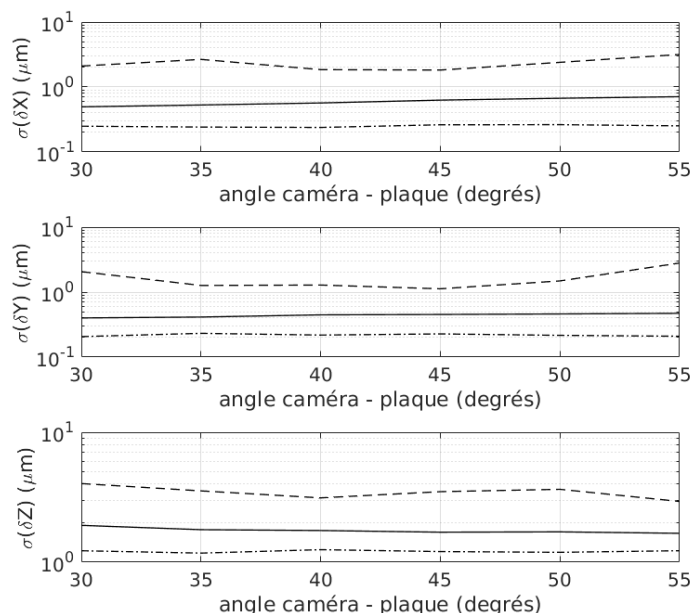


Figure 14. Incertitude sur la mesure de déplacement des points selon les axes X , Y et Z . (-. : minimum, - : moyen, - - : maximum).

3.4. Étude d'un signal temporel dans une configuration optimisée

L'évolution temporelle d'un des signaux triangulés sur 100 points est ensuite étudiée pour la configuration 55° avec le motif "point - gaussien". Le point de mesure choisi est celui dans le coin en haut à gauche de la plaque, afin de prendre en compte la distorsion optique et sa correction dans les résultats. Le signal mesuré (avec le détecteur par moyenne pondérée), filtré avec un filtre butterworth d'ordre 9 et une fréquence de coupure $f_c = f_e/3$ est présenté sur la Figure 15. Sur la Figure 16, la fréquence de coupure est $f_c = f_e/7$. Dans les deux cas, l'erreur maximale est de $[-3,0 +4,3] \mu\text{m}$ pour le signal $s_1(t)$, $[-1,2 +0,5] \mu\text{m}$ pour le signal $s_2(t)$ et $\pm 0,2 \mu\text{m}$ pour le signal $s_3(t)$. Sur la courbe d'erreur de la Figure 16 on constate facilement que l'erreur n'est pas purement aléatoire.

On regarde ensuite la densité spectrale de puissance (DSP) du signal mesuré afin de le comparer avec les trois signaux $s_1(t)$, $s_2(t)$ et $s_3(t)$. Les DSP des signaux mesurés et filtrés sont affichées sur les figures 17 et 18 pour $s_1(t)$ et $s_3(t)$. Afin de limiter les effets de fenêtrage, le signal, contenant un nombre entier de périodes, est recopié 500 fois et fenêtré avec une fenêtre gaussienne. Les fréquences des raies mesurées sont correctes avec des amplitudes proches des valeurs de référence.

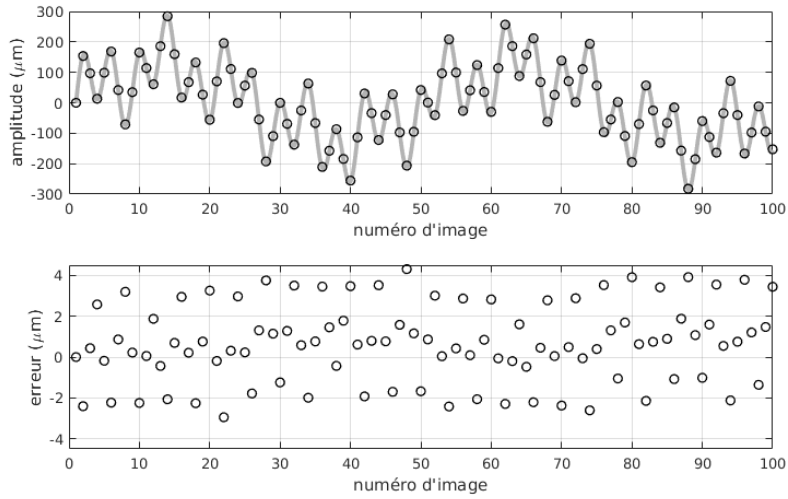


Figure 15. Signal mesuré pour le point en haut à gauche de la plaque (signal $s_1(t)$, $f_c = f_e/3$, \circ : signal mesuré, \bullet : signal vrai).

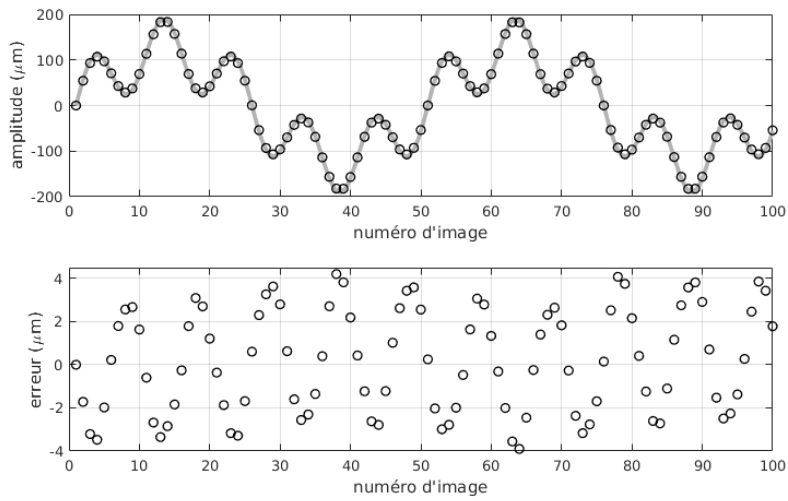


Figure 16. Signal mesuré pour le point en haut à gauche de la plaque (signal $s_1(t)$, $f_c = f_e/7$, \circ : signal mesuré, \bullet : signal vrai).

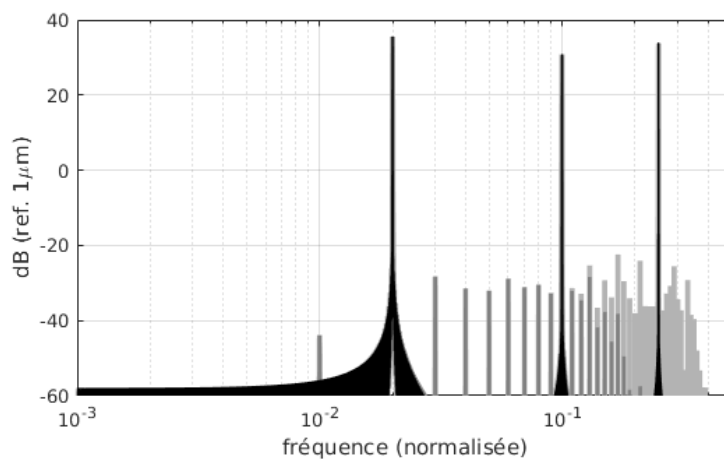


Figure 17. Densité spectrale de puissance du signal de déplacement mesuré pour un point selon l'axe Z (signal $s_1(t)$, ● : signal filtré à $f_e/3$, ● : signal filtré à $f_e/7$, ● : signal de référence).

La limite de la détection est aussi recherchée. La densité spectrale de puissance pour le signal $s_3(t)$ est affichée sur la Figure 18. Les valeurs des amplitudes des raies ainsi que les erreurs associées sont présentées dans le Tableau 7.

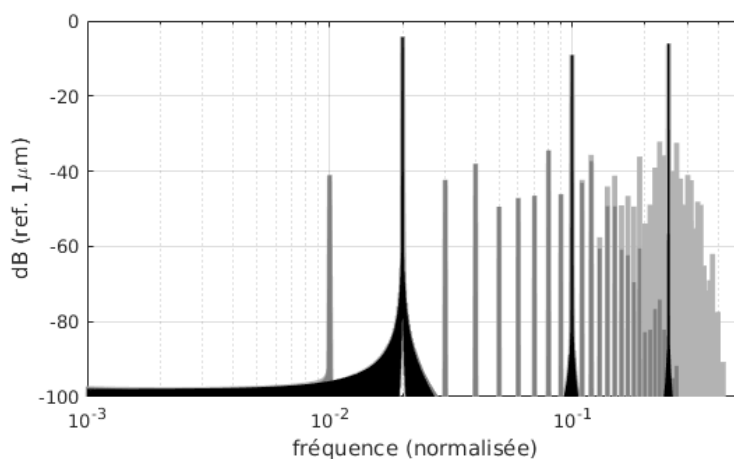


Figure 18. Densité spectrale de puissance du signal de déplacement mesuré pour un point selon l'axe Z (signal $s_3(t)$, ● : signal filtré à $f_e/3$, ● : signal filtré à $f_e/7$, ● : signal de référence).

Les spectres mesurés indiquent la présence de distorsion. En effet, des raies sont visibles à des fréquences pour lesquelles il n'y a théoriquement pas d'énergie. En comparant les résultats pour les trois signaux, on remarque que la distorsion diminue avec l'amplitude (avec une limite à -40 dB pour les signaux $s_2(t)$ et $s_3(t)$) mais que le taux de distorsion harmonique augmente. Il semble que l'on s'approche donc de la détection du mouvement des motifs sur les images.

Les résultats pour la mesure de l'amplitude des différentes raies sont similaires pour les deux algorithmes de détection : l'erreur est inférieure à 1% pour les raies à $fe/50$ et $fe/10$ et d'environ 3% pour la raie à $fe/4$ pour les signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ et $fc = fe/3$. Cependant, l'erreur augmente à environ 5% pour $fc = fe/7$ pour la raie à $fe/10$, et l'erreur moyenne est de 2% pour le signal $s_3(t)$ avec $fc = fe/7$. La fréquence de coupure doit donc être suffisamment élevée pour ne pas affecter la bande de fréquences que l'on souhaite étudier.

Tableau 7. Amplitude des pics des DSP (détecteur d'ellipse)

	raie $fe/50$ amp. (μm)/err.	raie $fe/10$ amp. (μm) /err.	raie $fe/4$ amp. (μm) /err.
signal 100 μm	120	70	100
mesure $fc = fe/3$	119, 1/ - 0, 7%	69, 4/ - 0, 8%	97, 2/ - 2, 8%
mesure $fc = fe/7$	119, 1/ - 0, 7%	66, 6/ - 4, 8%	\emptyset
signal 10 μm	12	7	10
mesure $fc = fe/3$	11, 91/ - 0, 7%	7, 06/ + 0, 2%	9, 68/ - 3, 2%
mesure $fc = fe/7$	11, 91/ - 0, 7%	6, 72/ - 4, 0%	\emptyset
signal 1 μm	1.2	0.7	1
mesure $fc = fe/3$	1, 188/ - 1, 0%	0, 686/ - 2, 0%	0, 965/ - 3, 5%
mesure $fc = fe/7$	1, 188/ - 1, 0%	0, 658/ - 6, 1%	\emptyset

Tableau 8. Amplitude des pics des DSP (détecteur par moyenne pondérée)

	raie $fe/50$ amp. (μm)/err.	raie $fe/10$ amp. (μm) /err.	raie $fe/4$ amp. (μm) /err.
signal 100 μm	120	70	100
mesure $fc = fe/3$	119, 4/ - 0, 5%	69, 6/ - 0, 6%	97, 4/ - 2, 6%
mesure $fc = fe/7$	119, 4/ - 0, 4%	66, 7/ - 4, 7%	\emptyset
signal 10 μm	12	7	10
mesure $fc = fe/3$	11, 94/ - 0, 5%	7, 04/ + 0, 6%	9, 68/ - 3, 2%
mesure $fc = fe/7$	11, 94/ - 0, 5%	6, 75/ - 3, 5%	\emptyset
signal 1 μm	1.2	0.7	1
mesure $fc = fe/3$	1, 24/ + 3, 4%	0, 714/ + 2, 1%	1, 006/ + 0, 6%
mesure $fc = fe/7$	1, 241/ + 3, 4%	0, 685/ - 2, 1%	\emptyset

On s'intéresse finalement à l'influence du bruit de l'image sur la mesure. Pour ce faire, un bruit gaussien conséquent, d'écart type égal à 1,8 et de moyenne nulle, est ajouté aux images simulées. Le point détecté est celui en haut à gauche de la plaque, pour les différentes configurations proposées. Les résultats pour le détecteur d'ellipse et le détecteur par moyenne pondérée avec la plaque vibrant selon le signal $s_1(t)$ sont affichés sur la Figure 19.

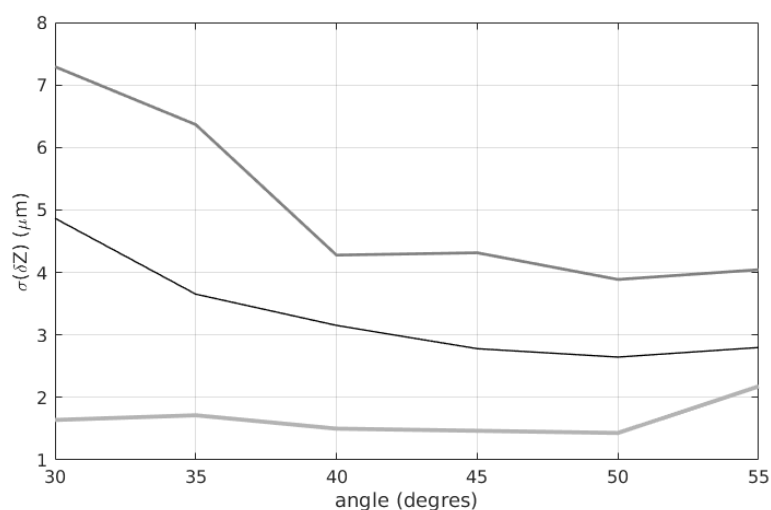


Figure 19. Incertitude sur la triangulation de la vibration selon l'axe Z du point en haut à gauche de la plaque (signal $s_1(t)$, $f_c = f_e/3$, ◊ : image non bruitée, ◻ : image bruitée et détecteur par moyenne pondérée, ● : image bruitée et détecteur d'ellipse).

Le bruit augmente fortement l'incertitude pour les angles inférieurs à 40° et le détecteur par moyenne pondérée est plus sensible au bruit gaussien que le détecteur d'ellipse. Néanmoins, l'écart type reste inférieur à $5 \mu\text{m}$ malgré un bruit surestimé. Les deux méthodes de détection semblent donc relativement bien supporter un bruit gaussien sur les images. Des mesures avec une caméra réelle permettront de mieux définir le bruit et d'optimiser les simulations afin de quantifier plus précisément l'erreur induite.

4. Conclusion

L'influence de différents paramètres et de différentes méthodes de traitement sur les résultats finaux a été étudiée par le biais de simulations, permettant de définir une version optimisée du protocole de mesure.

À partir d'images simulées, il a été prouvé qu'il est possible de mesurer avec 31 x 31 points de mesure simultanément, sur une surface de mesure de 300 mm x 300 mm,

des déformations vibratoires de l'ordre de $1\ \mu\text{m}$ d'amplitude avec une erreur inférieure à 4%, correspondant à une erreur inférieure à $1/7500000$ de la largeur de l'objet mesuré. De plus, les simulations ont permis d'étudier l'influence de différents paramètres et des méthodes de post-traitement sur la précision de la mesure.

Le protocole proposé s'appuie sur la méthode de suivi de points et permet de limiter la quantité de données et le temps de traitement. Notons que la méthode de corrélation d'images permet d'avoir beaucoup plus de points de mesures, de l'ordre de 100000 dans les configurations étudiées, mais avec une erreur généralement de l'ordre de $1/50000$ de la taille de la plage de mesure (Orteu, 2003) et un temps de traitement beaucoup plus long.

Par ailleurs, le motif utilisé est un point clef de la mesure. En effet, avec peu de pixels à disposition, les discontinuités génèrent des bords en escalier de par le repliement spectral. Un motif avec des bords suivant un profil gaussien limite la présence de discontinuités et est donc bien approprié dans le cas présenté.

Il a aussi été observé que l'imprécision sur la localisation exacte du centre des points d'intérêt semble ne pas influencer la précision de la mesure de vibrations. En effet, afin d'optimiser la mesure, l'algorithme de détection doit principalement permettre de suivre très précisément le déplacement des motifs sur les images.

Finalement, la taille de l'objet sur l'image est cruciale. Plus l'angle entre les caméras virtuelles et la plaque augmente, plus l'image prend de place sur la matrice de pixels et plus le déplacement des motifs sur l'image est grand. En conséquence, le choix d'un angle de 55° permet potentiellement de détecter des vibrations d'amplitudes plus faibles. Néanmoins, la déformation des motifs est d'autant plus importante que l'angle est grand. Notons qu'avec un angle supérieur à 55° l'algorithme de détection de la bibliothèque OpenCV (Bradski, 2000) décroche pour le calibrage du système.

Il est intéressant de comparer la méthode photogrammétrique proposée à une méthode d'interférométrie laser : l'holographie numérique (Poittevin *et al.*, 2015). La précision de la mesure est d'environ 20 nm pour l'holographie quelque soit la taille de l'objet (inférieur à 300 mm de diamètre), tandis que pour la photogrammétrie, elle dépend de la taille maximale de la surface de mesure (D) et est d'environ $D/7500000$. Notons aussi que la taille potentiellement mesurable de l'objet est plus grande pour la photogrammétrie. De plus, l'holographie utilise l'interférométrie laser : la mesure est limitée à un seul axe de vibration et potentiellement influencée par le bruit lumineux ambiant, et le déplacement entre deux images ne doit pas excéder la longueur d'onde du laser. La surface doit aussi être la plus réfléchissante possible. Pour la méthode proposée, un spot lumineux LED est bien approprié pour éclairer la surface, il n'y a pas de problème avec la lumière ambiante et le déplacement est mesuré dans les 3 axes de l'espace. Néanmoins, il est nécessaire d'avoir des motifs sur l'objet mesuré. Finalement, le nombre de points de mesure est de 961 pour le présent article et 5916 pour l'holographie (Poittevin *et al.*, 2015). Les deux méthodes sont complémentaires quant aux possibilités de mesures et aux paramètres des configurations.

Toutefois, la méthode permet de mesurer des déplacements et non des vitesses ou des accélérations. Il faut donc faire attention au repliement de spectre si le signal d'excitation contient de trop hautes fréquences. De plus, l'amplitude de vibrations en déplacement décroît de 40 dB/octave, ce qui peut donc être à la fois un avantage (on évite le repliement de spectre) et un inconvénient (il s'agit d'une limite potentielle de la mesure pour les hautes fréquences). Néanmoins, si l'on s'intéresse à des résonances, l'amplitude de vibration est probablement suffisante.

Les limites technologiques de la méthode sont liées aux caméras ultra-rapides, qui ont actuellement une cadence d'acquisition dépendante de la taille de la matrice de pixels; mais la technologie des caméras ultra-rapides s'améliore rapidement. On peut donc s'attendre à voir apparaître prochainement des caméras avec de grandes vitesses d'acquisition avec plusieurs millions de pixels. De plus, la distorsion optique des objectifs, même si elle est corrigeable, induit de la distorsion dans le signal mesuré. En ce qui concerne l'éclairage de l'objet mesuré, le développement actuel de la technologie LED offre de nouvelles possibilités d'éclairage puissant avec un minimum d'échauffement de l'objet éclairé, permettant donc d'augmenter la cadence d'acquisition des images.

Prochainement, des mesures seront réalisées sur une plaque réelle, avec un motif "point - gaussien" imprimé et collé, afin de comparer les résultats obtenus par simulation avec des résultats expérimentaux (pour la méthode photogrammétrique et une autre méthode, avec des accéléromètres par exemple). Les mesures permettront aussi de déterminer le bruit sur les images afin d'obtenir une valeur plus précise de l'impact sur l'incertitude, bien que les algorithmes de détection semblent robustes au bruit. Finalement, un des objectifs est aussi, à terme, de mesurer des objets moins académiques qu'une plaque, tels qu'un haut-parleur ou une carrosserie de voiture.

Remerciements

Ce projet est soutenu par "Le Mans Acoustique" et financé par la région "Pays de la Loire" et le "Fonds européen de développement économique et régional".

Bibliographie

- Bai M., Lin J.-H. (2007). Source identification system based on the time-domain nearfield equivalence source imaging: Fundamental theory and implementation. *J. Sound Vib.*
- Baqersad J., Poozesh P., Niezrecki C., Avitabile P. (2017, mars). Photogrammetry and optical methods in structural dynamics - A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 86, p. 17-34.
- Berry A., Robin O. (2016). Identification des excitations sur des panneaux par la mesure de leur réponse vibratoire et la méthode des champs virtuels. In *Congrès Français d'Acoustique*.
- Blender Foundation. (s. d.). *Blender - a 3d modelling and rendering package*. (<http://www.blender.org>)
- Bouguet J. Y. (2008). *Camera calibration toolbox for matlab*. Consulté sur http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.

- Bradski G. (2000). Open Computer Vision, OpenCV. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*.
- Durand-Texte T., Simonetto E., Durand S., Picart P., Moulet M.-H., Melon M. (2016). Mesure de déformations vibratoires par vision 3d. In *Congrès Français d'Acoustique*.
- Ewins D. (2000). *Modal testing: theory, practice, and application*. Research Studies Press. Consulté sur <https://books.google.fr/books?id=Z4QoAQAAAMAJ>
- Fitzgibbon A., Pilu M., Fisher R. B. (1999, mai). Direct least square fitting of ellipses. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 21, n° 5, p. 476–480. Consulté sur <https://doi.org/10.1109/34.765658>
- Graves S. S., Burner A. W., Edwards J. W., Schuster D. M. (2003). Dynamic Deformation Measurements of an Aeroelastic Semispan Model. *Journal of Aircraft*, vol. 40, n° 5, p. 977–984.
- Hald J. (2001). Time domain acoustical holography and its applications. *J. Sound Vib.*
- Hartley R. I., Zisserman A. (2004). *Multiple view geometry in computer vision* (Second éd.). Cambridge University Press, ISBN: 0521540518.
- Inaba M., Hara T., Inoue H. (1993). A stereo viewer based on a single camera with view-control mechanisms. In *Proceedings of 1993 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, IROS 1993, tokyo, japan, july 26 - 30, 1993*, p. 1857–1865. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.1993.583888>
- Lobreau S., Bavu E., Melon M. (2015, Fev). Hemispherical double-layer time reversal imaging in reverberant and noisy environments at audible frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America*.
- Nene S. A., Nayar S. K. (1998). Stereo with mirrors. In *ICCV*, p. 1087–1094. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1109/ICCV.1998.710852>
- Olaszek P. (1999). Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method. *Measurement*, vol. 25, n° 3, p. 227–236.
- Orteu J.-J. (2003). Mesure de forme et de déformations par stéréo-corrélation d'images : applications et mécanique expérimentale des solides. *Photonique*.
- Pezerat C., Guyader J. (2000). Force analysis technique: reconstruction of force distribution on plates. *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 86, n° 2, p. 322–332.
- Poittevin J., Picart P., Faure C., Gautier F., Pézerat C. (2015, Apr). Multi-point vibrometer based on high-speed digital in-line holography. *Appl. Opt.*, vol. 54, n° 11, p. 3185–3196. Consulté sur <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-54-11-3185>
- Stasicki B., Boden F. (2014). In-flight measurements of aircraft propellers deformation by means of an autarkic fast rotating imaging system. *International Conference on Experimental Mechanics*, vol. 9302.
- Suzuki S., Abe K. (1985, avril). Topological structural analysis of digitized binary images by border following. , vol. 30, n° 1, p. 32–46.
- Thomas J.-H., Grulier V., Paillasseur S., Pascal J.-C. (2008, juillet). Real-time nearfield acoustic holography: implementation of the direct and inverse impulse responses in the time-wavenumber domain. In *15th International Congress on Sound and Vibration, ICSV15*. Daejeon, South Korea. Consulté sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00329188>

- Wang R., Li X., Zhang Y. (2008). Analysis and optimization of the stereo-system with a four-mirror adapter. *Journal of the European Optical Society - Rapid publications*, vol. 3, n° 0. Consulté sur http://www.jeos.org/index.php/jeos_rp/article/view/08033
- Wang W., Mottershead J. E., Ihle A., Siebert T., Reinhard Schubach H. (2011). Finite element model updating from full-field vibration measurement using digital image correlation. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, n° 8, p. 1599–1620.
- Zhang Z. (2000, novembre). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 22, n° 11, p. 1330–1334. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1109/34.888718>