

# Quantification des caractéristiques et du niveau de bruit de mesures par interférométrie Speckle pulsée et analyse de l'influence de certains paramètres expérimentaux

G. Ham<sup>a</sup>, E. Foltête<sup>a</sup>, S. Cogan<sup>a</sup>, P. Jean<sup>b</sup>

a. Institut FEMTO ST, Départ. Méc'Appli, 24 rue de l'Épitaphe, 25030 BESANCON

b. SNECMA, Département Méthodes, Rond-Point René Ravaut, 77550 MOISSY-CRAMAYEL

## Résumé :

*Le niveau de bruit de mesure détermine la taille et la sévérité des défauts détectables dans le cadre d'une procédure de localisation d'erreurs de modélisation. L'interférométrie Speckle semble être un moyen de mesure adapté à la localisation d'erreurs sur de grandes structures du fait de sa haute densité spatiale. On se propose d'étudier les influences de certains paramètres expérimentaux sur la qualité du champ de déplacement obtenu et de fournir un niveau de bruit ainsi qu'une caractéristique des différents défauts de mesure.*

## Abstract :

*The noise level of a measurement determines the size and the amplitude of the defects which can be detected in a structure by using a model error localisation procedure. Electronic speckle pattern interferometry seems to be a good measurement technique for this purpose because of its high spatial resolution. This paper deals with the influence of some experimental parameters on the quality of the displacement field and provides some characteristics of the measurement errors.*

**Mots clefs :** bruit de mesure ; ESPI

## 1 Introduction

La connaissance des incertitudes de mesure permet de déterminer avec quelle proximité la réponse du modèle recalé doit se rapprocher de celle du modèle expérimental. Des méthodes expérimentales qui s'avèrent bien adaptées au recalage de modèle sont les méthodes de type champ du fait de leur forte densité spatiale d'information. Nous nous sommes ici intéressés plus particulièrement à la mesure par interférométrie Speckle électronique pulsée. Une méthode de quantification des incertitudes expérimentales adaptée à ce type d'instrument a été développée. Nous présenterons brièvement la méthode, le montage expérimental et l'instrumentation, puis nous donnerons quelques résultats.

## 2 Méthode et critères de quantification des incertitudes expérimentales

### 2.1 Méthode de quantification

La méthode développée pour la quantification des incertitudes de mesure des systèmes à interférométrie speckle électronique (abrégé couramment ESPI, acronyme anglais) se base sur la mesure des déplacements d'une structure ne se déformant pas lorsqu'elle est excitée périodiquement, c'est-à-dire que les déplacements de la structure correspondent à une combinaison linéaire de ses modes de corps rigide. On considère dans ces conditions que toute composante du déplacement mesuré ne se projetant pas sur la base des modes de corps rigide relève de l'erreur de mesure. En pratique, il subsiste inévitablement une légère composante de corps déformable dans le déplacement de la structure. C'est pourquoi on enrichit la base des modes de corps rigide par quelques modes permettant de représenter ces composantes de

corps déformable. Soit  $B_{pr}$  la base de projection ainsi construite. Soit  $M_{ESPI}$  le vecteur contenant les déplacements d'une image ESPI. A partir d'une image on calcule un vecteur de résidus de projection selon l'équation 1 en calculant la projection de la réponse ESPI sur la base  $B_{pr}$  permettant de minimiser le résidu  $R_{pr}$  au sens des moindres carrés. On note  $c$  le vecteur des coefficients de projection.

$$B_{pr} c + R_{pr} = M_{ESPI} \quad (1)$$

## 2.2 Critères de quantification

Une fois le résidu  $R_{pr}$  calculé on peut le visualiser spatialement en le normant comme donné dans l'équation 2. Ce critère de quantification est un critère local dont la valeur est calculée pour chaque pixel  $i$ . Dans l'équation 2 on a noté  $Mref$  la quantité  $B_{pr} c$  de l'équation 1. Cette quantité correspond à l'image de référence, c'est la mesure que le système interférométrique aurait fournie en l'absence d'incertitudes de mesure.

$$R_l(i) (\%) = \frac{|Mref(i) - M_{ESPI}(i)|}{\|Mref\|_\infty + \|-Mref\|_\infty} 100 \quad (2)$$

Pour permettre une évaluation statistique de l'influence de différents paramètres sur la qualité des images, plusieurs critères globaux sont proposés. Le premier, celui de l'équation 3 quantifie globalement l'écart entre la mesure et l'image. Le second, celui de l'équation 4, permet de donner une indication sur le caractère plutôt local ou global des défauts. Cette indication est importante car un bruit plus ou moins uniforme est plus facile à prendre en compte qu'un faible bruit de fond avec des zones de quelques pixels fortement bruitées. Le scalaire  $m_{R_l}$  de l'équation 4 désigne la valeur moyenne dans l'image du critère local  $R_l$ , la fonction  $F_{R_l}$  désigne la fonction de répartition empirique de ce même critère. Le troisième critère, celui de l'équation 5 permet de quantifier la "rugosité" des images. Les matrices  $M_{amp5}$  et  $Mref_{amp5}$  désignent les matrices donnant pour respectivement chaque image  $M_{ESPI}$  et  $Mref$  l'amplitude de déplacement existant dans un carré de 5 par 5 pixels centré autour de chaque pixel.

$$R_g (\%) = \frac{\|Mref - M_{ESPI}\|_2}{\|Mref\|_2} 100 \quad (3)$$

$$D_g (\%) = 100 - \frac{0,5 - F_{R_l}(m_{R_l})}{0,5} 100 \quad (4)$$

$$I_g (\%) = 100 - \frac{\|M_{amp5} - Mref_{amp5}\|}{\|Mref_{amp5}\|} 100 \quad (5)$$

## 3 Présentation des conditions expérimentales

### 3.1 Le prototype

La structure a été dimensionnée de manière à satisfaire différents types d'exigences. Parmi celles-ci nous citerons les exigences principales :

- Fréquence du premier mode de corps déformable  $\geq 4$  x. fréquence du premier mode de corps solide
- Energie de déformation la plus faible possible pour les premiers modes de suspension
- Surface de mesure de dimension "industrielle" ( $\approx 0,5 \times 0,5$  m)

Le prototype conçu à partir de ce cahier des charges est une structure composée d'une part d'une partie suspendue dont les modes de suspension sont des modes de corps rigide et d'autre part d'une suspension liée au bâti. La structure suspendue se compose de 7 pièces distinctes en AU4G liées par des vis et pèse 34,8 kg. Une vue éclatée simplifiée de la structure suspendue ainsi que ses dimensions sont données dans la figure 1a.

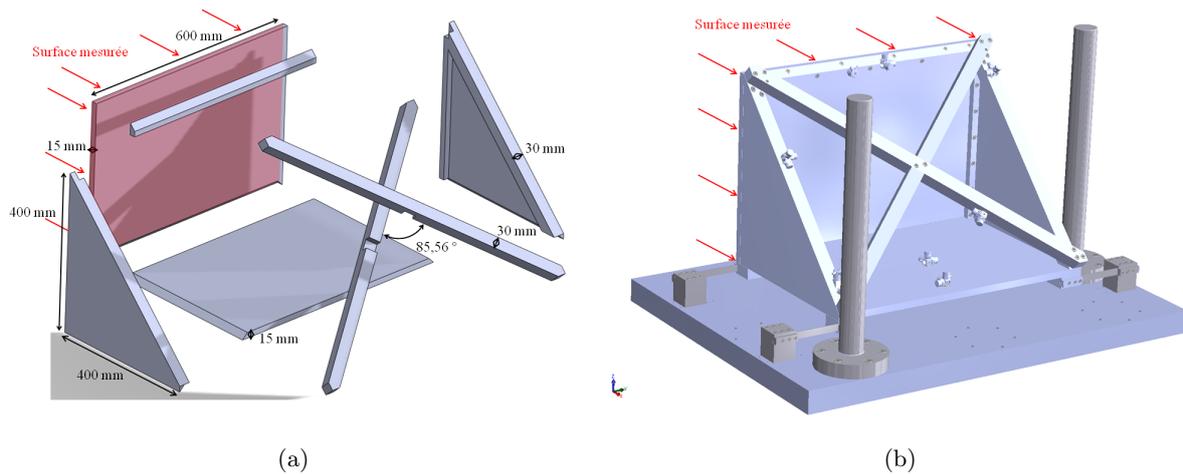


FIG. 1 – Vue éclatée simplifiée de la structure suspendue (figure 1a) et vue de la structure complète avec instrumentation et suspension (figure 1b)

### 3.2 Instrumentation

Un ensemble 18 accéléromètres et 2 têtes d'impédance ont été placés sur la structure. Les points de placement des capteurs et des excitateurs ont été déterminés par une méthode de placement optimal (voir [1]). Outre son rôle de contrôle, ce réseau de capteurs a servi à déterminer le champ de directions de mesure des images ESPI (non détaillé ici, voir [3] qui détaille une méthode possible).

La mesure interférométrique a été conduite avec un système de mesure ESPI de l'entreprise Steinbichler Optotechnik GmbH. La caméra du système, d'une résolution de 1280 par 1024 pixels, a été placée à une distance d'environ 4 m de la surface de mesure. La commande de tir est réglée pour que les interférogrammes soient construits à partir de tirs à deux instants situés de part et d'autre d'un maximum du signal de force. De cette façon, le déplacement mesuré avec le système interférométrique est proportionnel à la partie imaginaire de la réponse. Pour plus de détails on pourra se référer à [2].

### 3.3 Caractéristiques dynamiques expérimentales du prototype

Expérimentalement, 4 modes de suspension ont été identifiés à des fréquences d'environ 13, 45, 61 et 62 Hz. Parmi ces 4 modes, seul le second a été mesuré avec le système ESPI. Le choix de ce mode repose sur l'analyse modale numérique de la structure qui prévoit de très faibles énergies de déformation pour les modes 1, 2 et 4. Le mode 1 a été jugé trop bas en fréquence. Les modes 3 et 4 étant proches en fréquence, le risque qu'il existe en pratique un couplage entre ces deux modes n'est pas négligeable. Le mode 2 (voir figure 2) a donc été choisi pour quantifier le bruit de mesure du système interférométrique. L'amplitude du déplacement mesurée varie de 2 à 20  $\mu\text{m}$  suivant le nombre de franges des images.

## 4 Quelques résultats

Plusieurs centaines d'images de phase issues de la mesure du déplacement de la structure à la résonance de phase du mode 2 ont été prises sous différentes conditions expérimentales. Les paramètres expérimentaux que nous avons fait varier sont :

- Le nombre de franges d'interférence des images interférométriques
- Le niveau de filtrage des images de phase
- Le type de filtre et le niveau de filtrage de l'image du déplacement issue du déroulement de l'image de phase

L'objet mesuré représente dans les images une surface d'environ 750 par 1050 pixels. Les tendances observées concernant l'influence des différents paramètres peuvent s'étendre à d'autres tailles d'objet mais les valeurs optimales trouvées ne s'appliquent que pour les objets dont la taille respecte cet ordre de grandeur. Concernant les résultats présentés ici nous nous limiterons à l'influence du nombre de

franges et du niveau de filtrage de l'image de phase. Les images du déplacement sont systématiquement filtrées avec un filtre gaussien de 31 pixels de taille de noyau. L'algorithme de filtrage de l'image de phase est celui utilisé dans le logiciel FRAMESplus de Steinbichler Optotechnik GmbH, l'intensité du filtrage de l'image de phase est réglable entre 0 et 99%.

L'analyse de l'influence du nombre de franges sur la qualité des images a permis de constater qu'il existait un seuil critique de nombre de franges à partir duquel une augmentation supplémentaire ne permet pas de gains substantiels en terme de résidu au sens de l'équation 3. Ceci est illustré par l'histogramme de la figure 3a donnant la répartition des valeurs médianes du résidu en fonction du nombre de franges et du niveau de filtrage. Chaque barre de l'histogramme donne la valeur médiane d'un ensemble d'une trentaine d'images. Ce seuil critique se situe aux alentours de 18 franges. Toutefois, ce nombre optimal de franges est lié à l'importance du filtrage de l'image de phase. Une analyse plus poussée de son influence est présentée figure 3b. On constate que suivant que l'on considère des images à 8, 16 ou 28 franges d'interférence, les minima de résidu se trouvent pour des valeurs de filtrage de respectivement 80, 70-80 et 60%. Une tendance identique se retrouve concernant les deux autres indicateurs dans les figures 4a et 4b. On obtient à la fois des images de rugosité minimale et avec peu de défauts locaux pour des niveaux de filtrage de 90, 80 et 70% pour respectivement un nombre de franges de 8, 16 et 28.

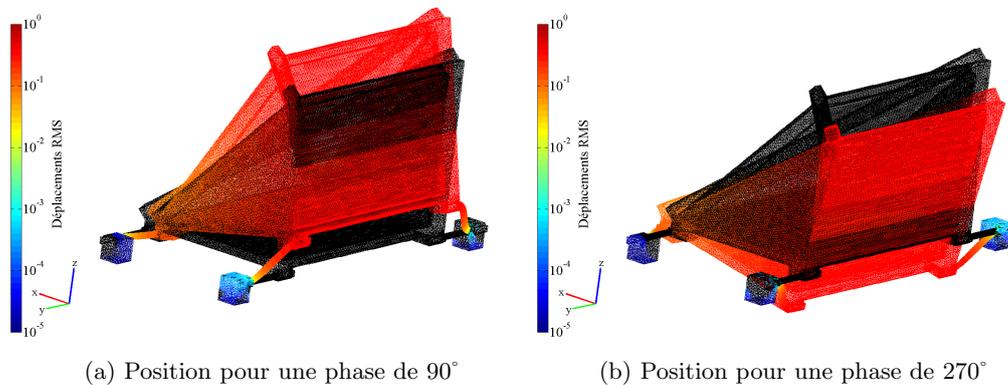


FIG. 2 – Mode 2 expérimental à 44,2 Hz construit par projection des données accélérométriques sur la base des modes de corps solide numériques

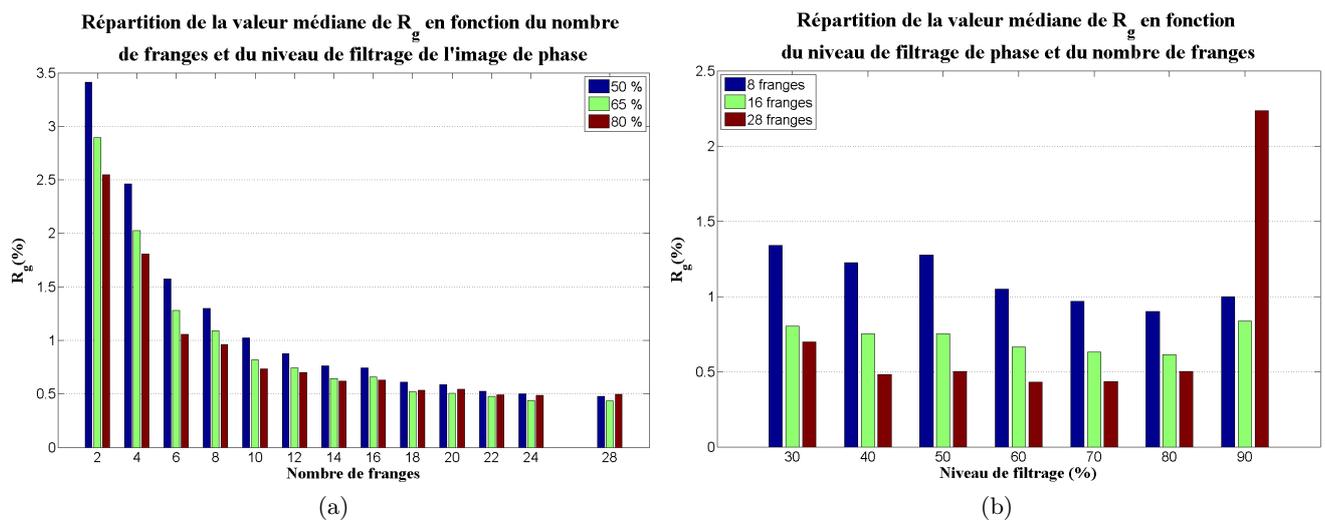


FIG. 3 – Répartition des valeurs médianes du résidu global en fonction (figure 3a) du nombre de franges et du niveau de filtrage (figure 3b)

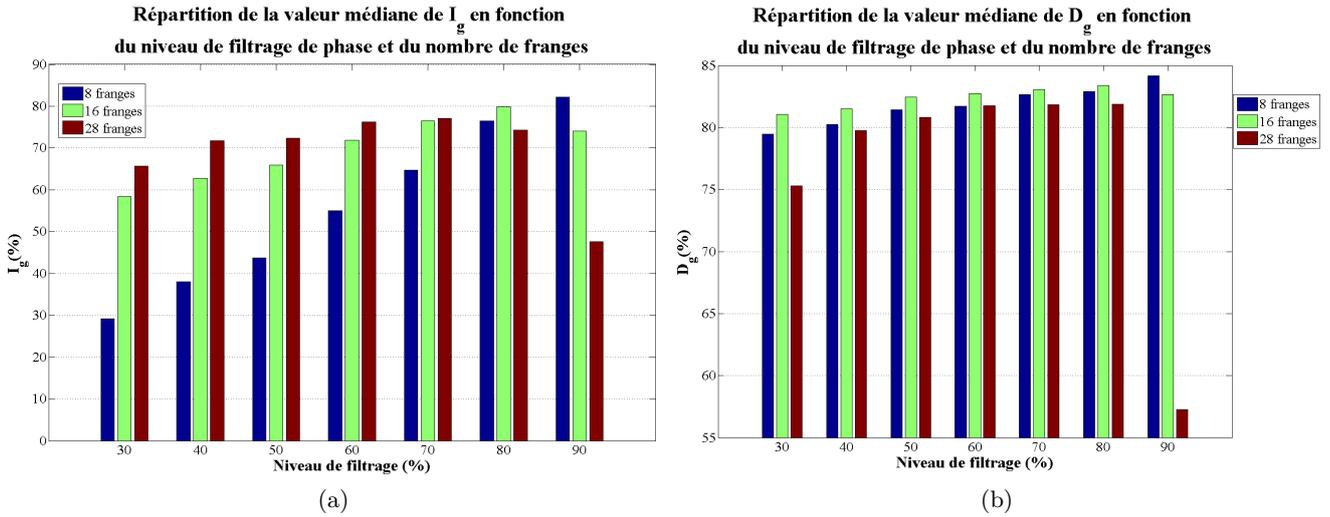


FIG. 4 – Valeurs des indicateurs de rugosité (figure 4a) et de caractère plus ou moins global des défauts (figure 4b), respectivement indicateurs des équations 4 et 5

Le bilan de l’analyse expérimentale des images interférométriques permet de constater qu’une bonne image est obtenue avec un nombre de franges plutôt élevé (de l’ordre de la vingtaine) et un niveau de filtrage de l’image de phase modéré (60 à 70 %). On résume dans le tableau 1 les caractéristiques de l’une des très bonnes images de l’échantillon expérimental au sens des trois critères des équations 3, 4 et 5. On donne également dans la figure 5a un tracé du critère de l’équation 2 qui est un résidu local.

Caractéristiques	Valeurs
$R_g$	0.397%
Nombre de franges	28
Niveau de filtrage de l’image de phase	70%
Type de filtre de l’image de déplacement	gaussien, taille de noyau 31 pixels

TAB. 1 – Caractéristiques d’une très bonne image de l’échantillon expérimental

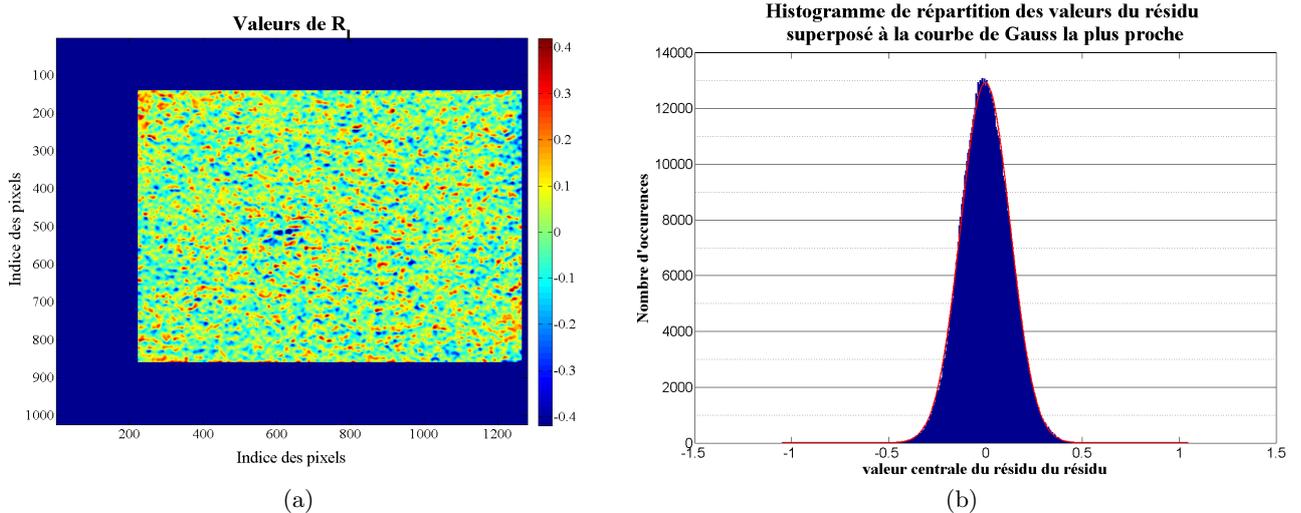


FIG. 5 – Répartition spatiale du résidu local au sens de l’équation 2 pour l’image du tableau 1 (figure 5a) ; histogramme de répartition de cette image (figure 5b)

On distingue sur la figure 5a trois niveaux de bruit. Un premier niveau de très faible amplitude et très courte longueur d'onde, un second niveau d'amplitude modérée et de longueur d'onde de l'ordre d'une dizaine de pixels et un troisième niveau d'amplitude modérée et de très grande longueur d'onde. A cela s'ajoutent des défauts importants mais très limités en nombre et dans l'espace qui sont souvent liés à des problèmes de filtrage ou de déroulement de l'image de phase. Globalement, le résidu local d'une bonne image se répartit selon une gaussienne comme l'illustre la figure 5b. Si l'on considère une série de bonnes mesures, c'est-à-dire qui respectent les prescriptions mentionnées plus haut et qui présentent de bonnes valeurs pour les 3 indicateurs considérés, on constate que la dispersion en terme de résidu global est peu importante, un écart-type de l'ordre de 0,04% est constaté expérimentalement. On donne dans la figure 6 un histogramme de répartition des résidus pour 30 bonnes images.

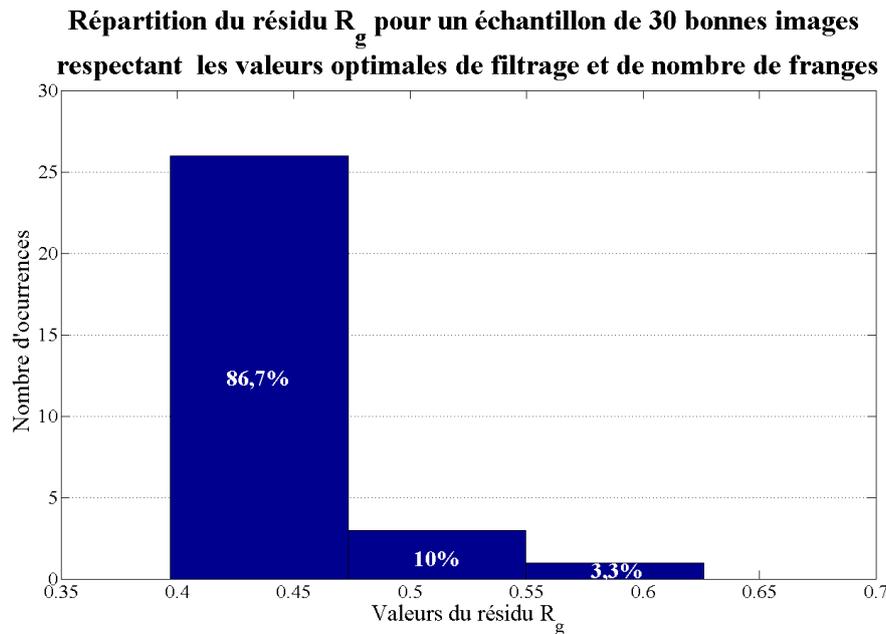


FIG. 6 – Répartition du résidu sur un échantillon de 30 bonnes images au sens des indicateurs des équations 3, 4 et 5

## 5 Conclusion

L'analyse des images ESPI sous différentes conditions expérimentales a permis de déterminer que le choix du filtrage de l'image de phase tout comme le nombre de franges d'interférence avaient un impact important sur la qualité des images, les variations en terme de niveau de bruit pouvant varier du simple au quintuple entre des conditions expérimentales très favorables et des conditions défavorables. Cette analyse a également permis de montrer que lorsque l'on se place dans des conditions de mesure favorables, les variations de qualité d'image, d'une image à l'autre, sont peu importantes.

## Références

- [1] G. Lallement, A. Ramanitranja, S. Cogan, Optimal sensor deployment : application to model updating, *Journal of Vibration and Control*, 4, 29-46, 1998
- [2] G. Ham, E. Foltête, S. Cogan, P. Jean, Identification modale à haute résolution spatiale par méthode optique : méthodologie expérimentale et méthode d'extraction des modes réels, 17<sup>ème</sup> Symposium Vibrations, chocs & bruits, Lyon, 15-17 Juin 2010
- [3] E. Foltête, J. Piranda, J.-L. Raynaud, Quantitative dynamical measurements for model updating using electronic speckle interferometry, *Proceeding of the SPIE*, vol. 4359, pp. 1305-1310, 2001