



Présentation d'un système de mesure embarqué - Description, Réalisation et Extension

Dominique Martini, Frédéric Mazerolle, Jean-Paul Charles, Christian Hochard

► To cite this version:

Dominique Martini, Frédéric Mazerolle, Jean-Paul Charles, Christian Hochard. Présentation d'un système de mesure embarqué - Description, Réalisation et Extension. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. <hal-03391367>

HAL Id: hal-03391367

<https://hal.science/hal-03391367v1>

Submitted on 21 Oct 2021

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.



HAL Authorization

Présentation d'un système de mesure embarqué - Description, Réalisation et Extension

D. MARTINI^a, F. MAZEROLLE^a, J-P. CHARLES^a, CH. HOCHARD^a

a. Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20

Résumé :

Dans cet article nous présentons le système de mesure embarqué que nous développons et ses applications. Ce système de mesure est basé sur l'utilisation d'un réseau sans fil de capteurs de déformation et a été conçu pour mesurer la forme de structures flexibles en temps réel. Nous avons ensuite décidé d'étendre ce système à la surveillance des structures grâce à l'identification du chargement en temps réel.

Abstract :

This paper introduces the on-board measurement system we are working on and its applications. This system is based on a wireless network of strain sensors and has been designed to get real-time shape of flexible structures. Then, we decide to extend it to structural health monitoring with real-time structural loads identification.

Mots clefs : SHM, mesures de forme, problèmes inverses

Introduction

Dans le cadre du suivi de santé des structures (Structural Health Monitoring, SHM), la mise en place de systèmes de mesures embarqués connaît un essor croissant. Actuellement, ce type de système est principalement orienté sur la détection de l'endommagement [1] à partir de l'identification directe des champs de déformation et/ou de déplacement. L'objectif est de détecter l'apparition d'un endommagement (ou la limite d'apparition) lors de l'utilisation.

Cependant, ces systèmes de mesure embarqués peuvent aussi donner à l'utilisateur des informations essentielles en terme de réglage, performance et maintenance de la structure avec l'identification globale du chargement appliqué sur la structure en utilisation. Cela est d'autant plus vrai dans les domaines de hautes compétitions, où les structures sont poussées à leurs limites tout en essayant d'en obtenir le maximum de performance. Ce sont des travaux sur des lattes de voiles [2] qui nous ont amenés à cette problématique plus générale dans le nautisme. L'identification de la forme de la voile est un outil essentiel pour son réglage et l'optimisation de son utilisation. Dans un premier temps, nous avons développé un système embarqué de mesure de forme pour les voiles. Puis, nous avons étendu ce système à d'autres types de structures afin d'obtenir l'identification des conditions de chargement en temps réel. Cela permet un contrôle en temps réel, et, associé à des lois d'évolution du comportement, il informe l'utilisateur de l'état de la structure. Cette problématique est particulièrement bien adaptée au nautisme, mais aussi aux nombreux domaines de la mécanique associés au SHM [3, 4](aéronautique, espace, énergie éolienne, ...etc).

Nous nous sommes intéressés à l'élaboration d'un système de mesure permettant à la fois la mesure de forme et l'identification du chargement avec comme contrainte que le système de mesure soit embarqué, peu encombrant et simple d'utilisation. Si les nombreux travaux en mesure de champ [5] nous ont initialement poussés vers des systèmes de mesures optiques, la taille des structures étudiées et leur environnement ne permettaient pas d'obtenir un unique système de mesure embarqué. Comme on le constate dans [6], l'identification de champ par caméra est certes très performante mais, pour l'instant, technologiquement complexe à mettre en oeuvre pour des grandes structures mobiles. Nous nous sommes donc tournés vers la mesure par jauge de déformation qui grâce aux récents progrès des micro technologies permet de réaliser des systèmes de mesures polyvalents, peu encombrants et simples d'utilisation. C'est ce système que nous présentons et les applications qui en découlent.

1 Système de mesure embarqué

1.1 Description du système

Ce système de mesure embarqué est composé d'un réseau de capteurs communiquant par liaison sans fil avec une unité centrale. Les informations sont récupérées et transmises à l'unité centrale par un bus émetteur sans fil.

Chaque capteur est composé de jauges de déformation permettant d'obtenir 3 courbures et d'une électronique réalisant la mesure (cf. figure 1).

Ces capteurs permettent de faire quasiment disparaître la partie analogique du câblage du système de mesure. En effet, seule la courte liaison entre les jauges et l'électronique de mesure utilise un transport analogique de l'information. Cette électronique convertit l'information en données numériques qui sont ensuite transmises au bus. Cela permet d'augmenter considérablement la fiabilité du système puisque ses données sont transportées de manière numérique depuis les capteurs jusqu'à l'unité centrale.

L'utilisation d'un support spécifique est essentielle pour la mesure des structures flexibles car l'installation directe de jauges pose généralement problème (rigidité, manipulation, rangement ...etc) [7]. Chaque élément de mesure est glissé dans un fourreau lié à la structure et a un seul point d'attache. Dans le cas des voiles, chaque fourreau est directement cousu sur la voile. Les éléments de mesure peuvent alors glisser dans leurs fourreaux et ne mesurent que les déformations de courbure et pas celles de membrane.

1.2 Caractéristiques et performances

Ce système permet d'obtenir un écart type de mesure de 10^{-6} déformation à une fréquence de 7Hz en environnement réel. Le bruit augmente ensuite proportionnellement à la racine carré de la fréquence lorsque celle-ci augmente. Pour l'instant, la limite d'acquisition fréquentielle de ce système est de 30Hz mais nous espérons pouvoir dépasser très prochainement cette limite. Cependant, nous avons pu constater que pour les applications sur lesquelles nous avons travaillé (voile et safran), une fréquence d'acquisition de 10Hz suffit à une bonne description des phénomènes. Dans leurs conditions normales d'utilisation, ces structures sont principalement soumises à des chargements à basse vitesse de déformation [7].

Le nombre de capteur que l'on peut théoriquement utiliser est actuellement de 50.

La stabilité en température des mesures est obtenue par des montages en demi-pont des jauges de déformation et grâce au fourreau qui protège l'élément de mesure des variations de l'environnement extérieur.

1.3 Développement

Le développement à venir du système est orienté autour de 3 axes principaux :

- Suppression des raccordements filaires, les capteurs contiennent leur propre émetteur qui communique directement avec l'unité centrale.
- Augmentation de la fréquence d'acquisition, tout en conservant un bruit de mesure à 10^{-6} déformation.
- Augmentation du nombre total maximum de capteurs dans le réseau.

Cela devrait permettre d'alléger et d'améliorer la robustesse du système de mesure, et, d'étudier des évolutions plus rapide de forme ou de chargement.

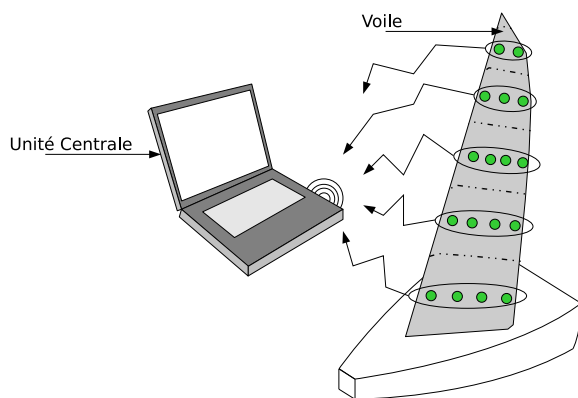


FIG. 1 – Schématisation du système de mesure

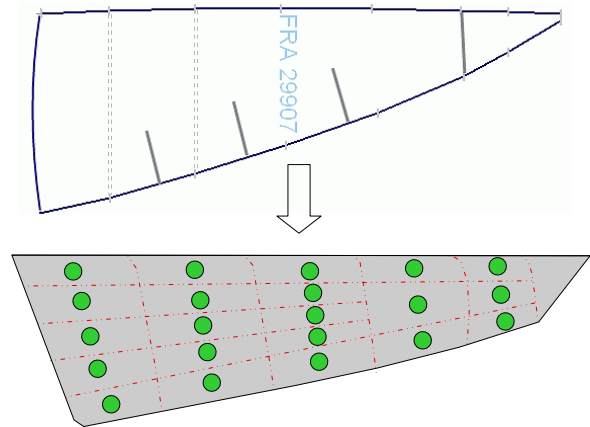


FIG. 2 – Maillage de la voile en fonction de la géométrie et des rubans

2 Réalisations

2.1 Mesure de forme : application aux voiles

2.1.1 Présentation de la méthode

Ce système a initialement été conçu pour la mesure de forme des voiles en temps réel. Il peut s'adapter de manière plus générale à la mesure de forme d'une structure flexible. Un ensemble d'éléments de mesure est

réparti dans la hauteur de la voile. On définit ainsi des panneaux comportant un maillage trapézoïdale dont chaque élément a pour courbures celles mesurées par le capteur qu'il contient (cf figure 2). La reconstruction de la géométrie complète se fait alors à partir des cercles osculateurs correspondants. L'évolution entre les lignes de courbure parallèles est supposée linéaire.

Chaque arc de cercle correspond à un point de mesure qui nous donne la valeur du rayon de l'arc i considéré, R_i , ainsi que la valeur de l'angle a_i . Si on appelle ε_i la déformation mesurée dans la direction de cambrure de l'arc i on a les relations suivantes :

$$R_i = \frac{h_i}{2\varepsilon_i} \quad \text{et} \quad a_i = \frac{L_i}{R_i} \quad (1)$$

à partir de ces données on peut alors reconstruire la ligne de courbure. On remarque que si cette méthode de reconstruction paraît assez simplifiée, elle offre l'avantage d'être directe, bien conditionnée et elle utilise des sommes de mesures qui permettent dans le cas de mesures non-corrélées, de diminuer l'influence du bruit.

2.1.2 Illustration

La mise en oeuvre du système s'est avérée particulièrement simple, et la reconstruction tridimensionnelle donne en temps réel une vue détaillée du panneau équipé des éléments de mesure (cf. figure 3). Le système a permis d'obtenir des reconstructions de panneaux de différentes voiles (grand-voile et génois) au cours de plus de 30 tests en mer (figure 4). La reconstruction permet d'accéder aux paramètres couramment utilisés en mécanique des fluides pour caractériser un aérofoil.

Pour l'instant on ne dispose que d'un petit nombre d'éléments de mesure, ce qui a limité la zone étudiée à un panneau de la voile. Pour l'avenir plusieurs réseaux d'environ 25 éléments de mesure permettront d'obtenir la totalité de la géométrie tridimensionnelle de chacune des voiles d'un voilier pendant la navigation. Cette configuration offrira un nouveau système de mesure embarqué, d'une utilisation particulièrement simple sans élément extérieur à la voile, qui sera à la disposition des spécialistes des réglages. En associant cet outil au relevé des conditions de navigation, le développement des méthodes de modélisation des voiles [8] pourrait aussi bénéficier de comparaisons plus facilement accessibles avec des résultats expérimentaux quantifiés avec précision.

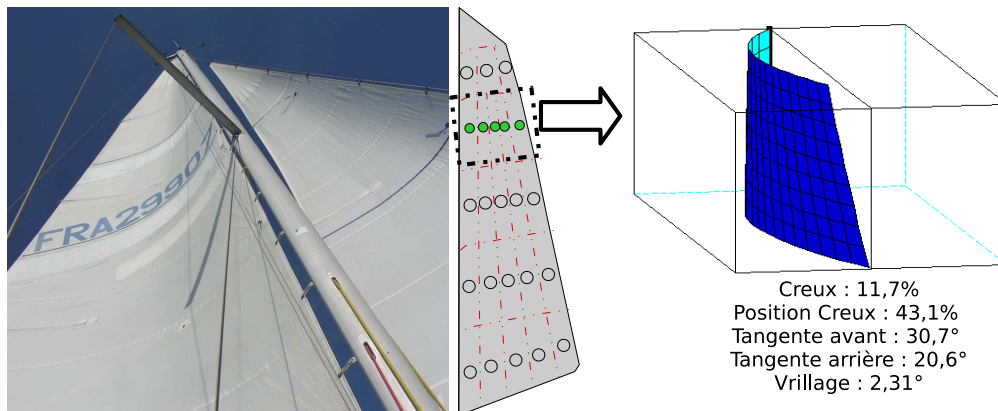


FIG. 3 – Reconstruction d'un panneau d'une grand voile, (vent apparent 10nd)

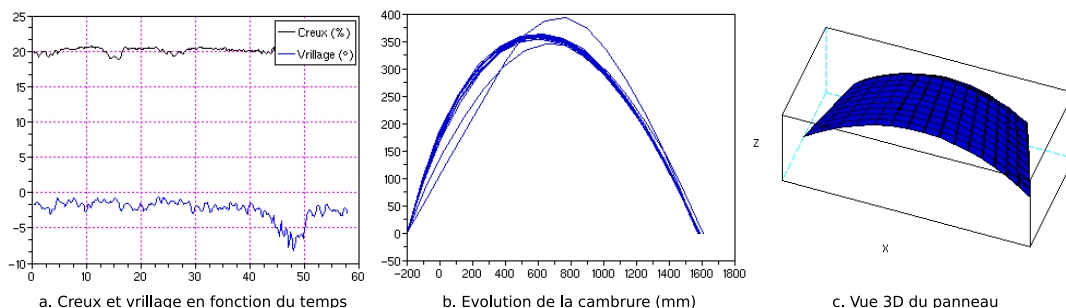


FIG. 4 – Suivi de la forme d'un panneau d'un génois, (vent apparent 12nd)

2.2 Identification du chargement sur structure

Nous nous sommes ensuite intéressés aux applications plus générales concernant la surveillance des structures et notamment la détermination des conditions aux limites. Nous avons alors choisi de revenir vers des structures classiques pour cette identification. Nous avons utilisé une formulation par éléments finis pour résoudre ce problème.

2.2.1 Présentation de la méthode

Si on considère une structure Ω soumise à un chargement inconnu dont on connaît des valeurs du champ de déformation en certains points on peut formuler le problème général sous la forme :

$$\text{Trouver } (\vec{u}, \sigma, \vec{u}_d, \vec{f}_d, \vec{F}_d) \in \mathcal{U} \times \mathcal{S} \times \mathcal{U}_d \times \mathcal{F}_{vd} \times \mathcal{F}_{sd} \text{ tels que :}$$

$$\begin{cases} \vec{div}(\sigma) + \vec{f}_d = \vec{0} & \text{dans } \Omega \\ \sigma = \mathbb{K}\varepsilon(\vec{u}) = \mathbb{K} \left[\frac{1}{2} (\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}') \right] & \text{dans } \Omega \\ \varepsilon = \varepsilon_m & \text{sur } \partial\Omega_m \end{cases} \quad (2)$$

L'utilisation d'une formulation par éléments finis permet d'écrire ce problème sous la forme :

$$\text{Trouver } (U, F_d) \in \mathcal{U} \times \mathcal{F}_d \text{ tels que :}$$

$$\begin{cases} \mathbb{K}U = F_d \\ \mathbb{B}U = \varepsilon_m \end{cases} \quad (3)$$

où U est le vecteur des déplacements nodaux, F_d le vecteur d'effort, \mathbb{K} la matrice de rigidité, ε_m le vecteur des déformations mesurées et \mathbb{B} l'opérateur linéaire liant les déplacements nodaux aux déformations mesurées. L'objectif est d'obtenir une formulation permettant une résolution en temps réel. Par conséquent nous avons cherché à réduire au maximum le problème afin de ne pas utiliser de procédés de régularisation. La première hypothèse que nous avons faite est que le chargement de la structure peut être décrit par un nombre p de paramètres indépendants et que ce nombre est inférieur au nombre n de d^0dl de la structure. Si on appelle F_s le vecteur des paramètres minimaux décrivant le chargement, on peut écrire :

$$F_d = \mathbb{A}F_s \quad (4)$$

La deuxième hypothèse est que le problème direct a une solution, c'est à dire que l'on bloque un mouvement de corps rigide. On peut alors ré-écrire le problème sous la forme :

$$\text{Trouver } (U, F_s) \in \mathcal{U} \times \mathcal{F}_s \text{ tels que :}$$

$$\begin{cases} U = \mathbb{K}^{-1} \mathbb{A}F_s \\ \mathbb{B}\mathbb{K}^{-1} \mathbb{A}F_s = \varepsilon_m \end{cases} \quad (5)$$

On note que ce mouvement de corps rigide définit le repère dans lequel est exprimé la géométrie déformée mesurée. On obtient alors un système de moindres carrés de type :

$$GF_s = \varepsilon_m \quad (6)$$

où $G = \mathbb{B}\mathbb{K}^{-1}\mathbb{A}$ est une matrice $m \times p$, m étant le nombre de points de mesure. La condition d'inversibilité de ce système est que le rang de G soit $rg(G) = p \leq n$. Le choix des matrices \mathbb{B} et \mathbb{A} fait que si il n'y a pas de mesures superposées et que les paramètres de F_s sont indépendants alors leurs rangs sont de p , et celui de G aussi. Par conséquent, seul les paramètres de chargements doivent être judicieusement choisis pour assurer l'inversibilité du système.

L'un des intérêts de cette formulation est que sa stabilité aux erreurs de mesure (conditionnement de G) est quasi-indépendante de la valeur de n . Ainsi, pour une structure donnée, l'utilisation de champs particulièrement riches n'influe pas sur la stabilité de la solution. Cela est vrai à la condition que les champs choisis décrivent aussi bien le comportement réel de la structure que celui aux points de mesure.

2.2.2 Illustration

Pour illustrer cela nous avons considéré dans un premier temps des structures poutres pour lesquels une solution exacte au problème direct est donnée. La solution par éléments finis est construite en respectant les hypothèses des structures poutres, c'est à dire que son champ tend vers le champ solution exact lorsque n augmente. Les figures 5 et 6 montrent l'évolution du conditionnement de G pour les cas de chargements suivants :

- Cas 1 : Poutre soumise à des torseurs d'efforts concentrés à ses extrémités et à une charge répartie sur toute sa longueur.
- Cas 2 : Poutre soumise à des torseurs d'efforts concentrés à ses extrémités, à une charge répartie linéaire et à une densité gaussienne centrée de moments répartis sur toute sa longueur.

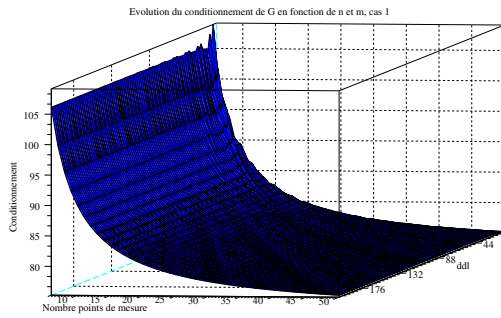


FIG. 5 – Evolution du conditionnement de G en fonction de n et m , cas 1

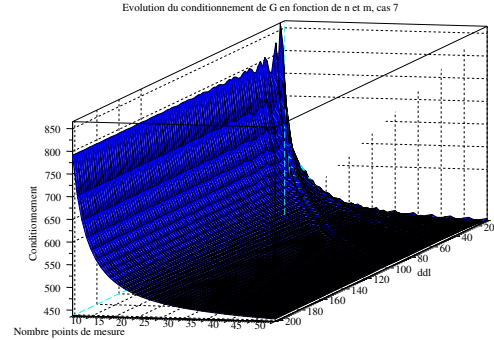


FIG. 6 – Evolution du conditionnement de G en fonction de n et m , cas 2

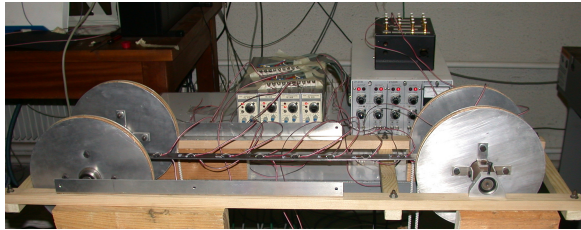


FIG. 7 – Photographie du banc de flexion

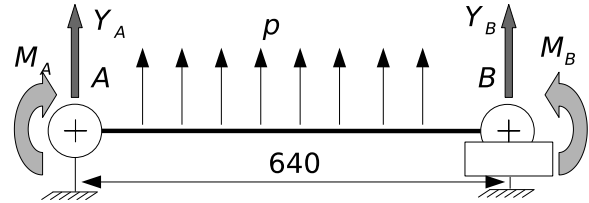


FIG. 8 – Schéma du banc de flexion

Ces exemples permettent d'observer la stabilité du conditionnement en fonction du nombre de points de mesure, m , et du nombre de $d^\circ dl$ de la structure. On constate aussi que le degré d'orthogonalité des fonctions associées aux paramètres à identifier influe sur la stabilité du système.

Afin de valider ces résultats nous avons fait une expérimentation sur une poutre en acier sollicitée en flexion avec et sans charge répartie (son poids propre) à l'aide du montage présenté sur les figures 7 et 8. Cette poutre est instrumentée par 9 jauges longitudinales sur chaque face. On constate alors que :

- La solution (EF) tend bien vers la solution exacte.
- La stabilité des paramètres identifiés ne dépend pas de n .
- La stabilité du champ de déplacement identifié ne dépend pas de n .

Ces résultats sont illustrés sur les figures 9 et 10. La poutre est soumise à son propre poids. La figure 9 donne l'évolution de l'énergie de déformation en fonction du nombre de $d^\circ dl$. La figure 10 montre l'évolution de l'écart type maximum des champs de déformation et de déplacement identifiés en fonction du nombre de $d^\circ dl$. Ces résultats s'étendent a priori aux structures plus complexes. Cependant, l'augmentation du nombre de paramètres de chargement liés à des modèles plus complexes de structure va dégrader la stabilité de cette formulation. On peut cependant noter que la relation obtenue par une analyse statistique des erreurs de mesure [9] permet de déterminer le nombre de points de mesure nécessaire ainsi que leur positionnement en fonction de l'erreur de mesure du système et de la stabilité que l'on souhaite obtenir sur l'identification des paramètres. Ceci est obtenu par la relation suivante :

$$\Delta F_s^2 = (G'G)^{-1} G' \epsilon_m^2 G (G'G)^{-1} \quad (7)$$

où ΔF_s^2 est la matrice de covariance des paramètres et $\Delta \epsilon_m^2$ celle des mesures.

Afin de valider ces résultats nous avons effectué l'instrumentation d'un safran dont des mesures en navigation sont en cours ainsi que la formulation (EF) du problème associé.

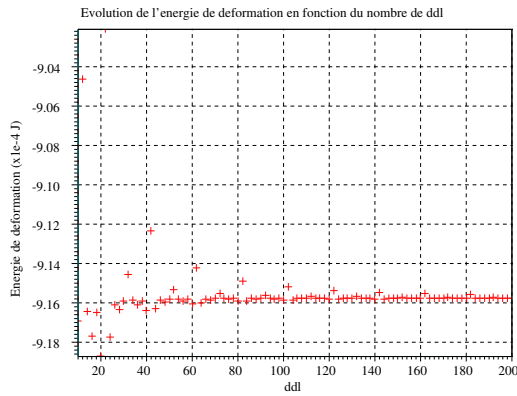


FIG. 9 – Evolution de l'énergie de déformation en fonction du nombre de $d^\circ dl$

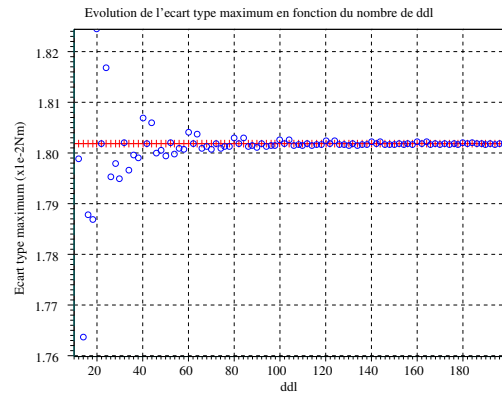


FIG. 10 – Evolution de l'écart type maximum en fonction du nombre de $d^\circ dl$

Conclusion

Le système de mesure embarqué que nous avons développé a montré jusqu'à présent de nombreux atouts vis à vis d'autres systèmes. Si la quantité maximale d'information qu'il peut obtenir est faible devant celle de systèmes optiques, sa polyvalence et sa commodité d'utilisation lui donne des atouts certains pour la mesure en service.

La mesure de forme sur les voiles a permis de valider de nombreuses solutions technologiques et nous conduit à présenter actuellement un système quasiment opérationnel pour la mesure de forme sur la plupart des structures flexibles (membranes, coques et plaques minces, poutres élancées). De plus, le principe de la reconstruction géométrique donne une bonne approximation de la forme de ce type de structure soumise à des champs de pression. Son sens physique se justifie simplement du fait de la mesure d'une courbure sur une surface donnée. Enfin, ce type de système de mesure peut s'étendre à l'identification du chargement d'une structure. Cela montre son intérêt en tant que système embarqué dans le cadre du SHM. Il devrait permettre à terme de remonter aux conditions réelles de chargement d'une structure, mais aussi, d'assurer la mise à jour du comportement de la structure et de contrôler son intégrité.

Références

- [1] Chang F.-K. Structural Health Monitoring 2007 : Quantification, Validation, and Implementation. Stanford DEStech Publication Inc., 2007.
- [2] Sery A. and Charles J.-P. Composite sail batten design. 16th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, 2003.
- [3] Zabaras N., Morellas V., and Schnur D. Spatially regularized solutions of inverse elasticity problems using bem. Communications in applied numerical methods, 5, 547–553, 1989.
- [4] Padmanabhan S. and Kumar A. V. Inverse problem for estimation of loads and constraints from structural response data. AIAA journal, 45(6), 2007.
- [5] Combescure a. G. P., A., Coutellier D., Drapier S., and Bergheau J.-M. 8^{ième} colloque national en Calcul des structures, Giens 2007, chapter Mini symposium identification et mesure de champs, publisher = Lavoisier, year = 2007,.
- [6] Salzmann M., Pilet J., Ilic S., and Fua P. Surface deformation models for nonrigid 3d shape recovery frame uncoupling. IEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 29(8), 2007.
- [7] Bohe V. Comportement mécanique des tissus à voile. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2005.
- [8] Spalatel Lazar M. Modélisation non linéaire et calcul de membranes sous pression. Application à la conception et à l'optimisation de voiles de bateaux. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2007.
- [9] Saporta G. Probabilités analyse des données et statistique. Editions TECHNIP, 1990.