



# Estimation directe des déformations à partir d'une paire d'images de motif aléatoire par analyse fréquentielle

J Molimard

## ► To cite this version:

J Molimard. Estimation directe des déformations à partir d'une paire d'images de motif aléatoire par analyse fréquentielle. 20ème congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. 2011. <hal-01092844>

**HAL Id: hal-01092844**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01092844>**

Submitted on 9 Dec 2014

**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 directe des déformations à partir d'une paire d'images de motif aléatoire par analyse fréquentielle

J. Molimard

Laboratoire Claude Goux, UMR CNRS 5146, Université de Lyon, Centre Ingénierie et Santé, Ecole des Mines de Saint-Etienne, 158 cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne, France

## Résumé

*Une approche novatrice pour extraire les déplacements à partir d'images de surfaces encodées avec un mouchetis a récemment été présentée et validée. Mais un enjeu essentiel pour les ingénieurs mécaniciens est l'estimation optimale des déformations. Une approche novatrice permettant l'estimation directe des déformations sans dérivation d'un champ de déplacement est proposée. Les premières estimations métrologiques sont encourageantes : la résolution, proportionnelle à la déformation, est de 9% de la valeur nominale, pour une résolution spatiale de 9 pixels (ZOI 64×64 pixels<sup>2</sup>). Un exemple numérique montre l'intérêt de l'approche. Puis une première étude concerne un composite renforcé par un fibres longues en carbone. Les déformations liées au tissage sont clairement visibles, et les résultats corroborent bien des études précédentes.*

## Abstract

*A new approach for decoding displacements from surfaces encoded with random patterns has been developed and validated recently. But an optimal strain estimation is of major interest for mechanical engineers. Here, we propose a direct strain estimation without any displacement derivation. First metrological results are encouraging: resolution, proportional to strain level, is 9% of the nominal value, for a spatial resolution of 9 pixels (ZOI 64×64 pixels<sup>2</sup>). A numerical example shows the relevance of the approach. Then, first application on a carbon fiber reinforced composite is developed. Fabric intertwining is studied using a tensile test. Over-strain are clearly visible, and results connect well with previous studies.*

**Mots-clés :** mesure de déformation, analyse de phase, matériaux composites

## 1 Introduction

Parmi les méthodes optiques de champ géométrique, la corrélation d'images numérique (CIN) tient une place à part du fait de sa très large diffusion [1 ~ 5]. Cette méthode est naturellement mal adaptée au contexte des petites perturbations, même si récemment, Réthoré [6] a proposé une méthode de régularisation permettant de très bonnes performances. A coté de la CIN classique, la Méthode de Grille a des performances comparables : C'est une méthode d'analyse d'images permettant l'estimation de déplacements plans, fonctionnant dans le cas d'une signature périodique de la surface. Les déplacements sont alors extraits par analyse de la phase, ce qui limite le champ d'application aux petites perturbations [7]. Le choix du codage de la surface pourrait orienter l'utilisateur vers une méthode ou l'autre, mais différents auteurs ont montré que la corrélation d'images pouvait donner de bons résultats sur des signaux périodiques [8], de même qu'une analyse de phase était possible pour un signal aléatoire en utilisant une décomposition en séries de Fourier [9, 10, 11]. Un motif aléatoire est souvent préféré car plus facile à produire dans différents contextes (échelles, nature du matériau, forme de l'objet). Finalement, l'exploration d'une analyse de phase, encore très largement incomplète peut conduire à des résultats très intéressants car elle s'appuie sur une base de connaissance large : évaluation de la distorsion caméra simplifiée [12], extension aux surfaces non planes par projection de franges [13]. Enfin, une modification du noyau de la Transformée de Fourier locale rend le système directement sensible aux déformations [14]. C'est cet aspect très original et prometteur qui est adapté ici à des signatures aléatoires.

## 2 Mesure de déplacements 2D par analyse de phase

Ce travail ayant déjà été présenté par ailleurs [13], seules les principales notions sont rappelées ici. L'algorithme est basé sur l'estimation de phases pour chaque zone d'intérêt (ZOI). Il s'agit d'une généralisation de l'algorithme de transformée de Fourier fenêtrée proposé par Surrel [15]. Dans le domaine fréquentiel, chaque point est affecté d'une phase proportionnelle au déplacement normal à la direction des franges correspondantes, noté  $\theta$ . En l'absence de saut de phase c'est à dire pour de petits déplacements, la relation entre phases et déplacements est donnée par :

$$\begin{Bmatrix} \vdots \\ \Delta \phi_{\theta}^i \\ \vdots \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ \frac{2\pi}{P_{\theta}} \cos \theta^i & \frac{2\pi}{P_{\theta}} \sin \theta^i \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_A \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{Bmatrix} \quad (1)$$

A partir de (1), les déplacements peuvent être estimés en utilisant la pseudo-inverse de A. Cette opération n'est possible que si  $\det(A^t A) \neq 0$ , c'est à dire si deux directions de codage différentes existent dans la carte.

$$\begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{Bmatrix} = (A^t A)^{-1} A^t \begin{Bmatrix} \vdots \\ \Delta \phi_{\theta}^i \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Finalement, la résolution obtenue pour cette méthode dans des conditions communes (ZOI de  $32 \times 32$  px<sup>2</sup>, caméra 12 bits, 31 niveaux de gris de bruit) est de  $3,5 \cdot 10^{-2}$  pixels, et le biais est proche de zéro ( $0,5 \cdot 10^{-2}$  pixels). La résolution spatiale est obtenue en faisant le produit d'autocorrélation de la cartographie de bruit, est de 9 pixels à 50% d'atténuation.

## 3 Implémentation de la dérivation directe

### 3.1 Principe

Le développement proposé ici s'appuie sur le travail de Badulescu and al. [14]. Il est basé sur une dérivation numérique à partir d'une ondelette spécifique. La phase pour une orientation  $\theta$   $\Phi_{\theta}(x,y)$  peut être définie par :

$$\Phi_{\theta}(x, y) = \arg(R_{\theta} + iJ_{\theta}) = \arg \left( \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s(\xi, \eta) \times g(\xi - x, \eta - y) \times \exp \left( -i \frac{2\pi}{P_{\theta}} (\xi \cos \theta + \eta \sin \theta) \right) d\xi d\eta \right) \quad (3)$$

avec :

- $s(\zeta, \eta)$  le signal
- $g(\zeta - x, \eta - y)$  la fonction de fenêtrage.

Alors, la dérivation de  $U_{\theta}$  selon  $\vec{x}$ ,

$$\frac{\partial \Phi_{\theta}}{\partial x} = \left( \frac{\frac{\partial J_{\theta}}{\partial x} \times R_{\theta} - \frac{\partial R_{\theta}}{\partial x} \times J_{\theta}}{J_{\theta}^2 + R_{\theta}^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_{\theta}}{\partial x} = -\frac{2\pi}{P_{\theta}} \Delta \left( \frac{\partial \Phi_{\theta}}{\partial x} \right) \quad (5)$$

Finalement, si la fonction de fenêtrage  $g(\zeta - x, \eta - y)$  est gaussienne,

$$\frac{\partial J_{\theta}}{\partial x} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(x - \xi)}{2\pi \sigma^4} \times s(\xi, \eta) \times g(\xi - x, \eta - y) \times \exp \left( -i \frac{2\pi}{P_{\theta}} (\xi \cos \theta + \eta \sin \theta) \right) d\xi d\eta \quad (6)$$

Pour minimiser l'impact de la signature de la surface, les ZOI de l'image initiale et déformée sont superposées.

### 3.2 Caractérisation

La méthode a été caractérisée en simulant la déformation d'une ZOI soumise à une traction uniforme variant de  $2 \cdot 10^{-5}$  à  $2 \cdot 10^{-3}$ . Pour chaque cas, 60 ZOI sont créés. Le mouvement de corps rigide est nul, de manière à éviter des couplages possibles. Pour chaque cas, les gradients de déplacement sont enregistrés puis le tenseur des déformations mécaniques est calculé ( $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{xy}$ ,  $\omega$ ). Les différents paramètres sont les ZOI ( $32 \times 32$  et  $64 \times 64$  px<sup>2</sup>), le bruit (0 à 31 niveaux de gris), le rayon des mouchetis (de 2 à 16 px), la profondeur d'encodage (8 ou 16 bits).

Du fait du grand nombre de paramètres, un plan d'expériences linéaire a été établi. Les résultats sont présentés Tableau 1. Chaque paramètre présente une variation suffisamment grande pour pouvoir être significative. Il a été nécessaire d'introduire une interaction d'ordre 1 pour rendre le modèle suffisamment réaliste. Finalement, l'incertitude sur la déformation augmente avec la taille des mouchetis et avec le bruit sur l'intensité, et baisse si la taille de la ZOI ou la profondeur d'encodage augmente. La taille des grains de mouchetis et le bruit sur l'intensité sont fortement corrélés. Finalement, les résultats sont largement améliorés si le bruit sur les niveaux de gris est minimisé, par exemple en moyennant temporellement les images.

Les meilleurs résultats sont obtenus dans les conditions suivantes : ZOI de  $64 \times 64$  px<sup>2</sup>, mouchetis de rayon 2 px, bruit nul sur les niveaux de gris, encodage sur 16 bits. L'incertitude moyenne sur la déformation est alors de 58  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Elle est purement aléatoire, sans biais, sans doute liée à l'erreur de quantisation et à la nature particulière de chaque motif. L'incertitude augmente avec le niveau de déformation. Finalement, l'incertitude relative est approximativement constante (9 %).

La résolution spatiale est de 9 pixels pour une ZOI de  $64 \times 64$  px<sup>2</sup>. Cette valeur très basse peut s'expliquer par l'utilisation d'un fenêtrage gaussien, avec  $\sigma = 10,7$  pixels.

	Valeur			Interv. de conf.	
Valeur moyenne	$\beta_0$	$1,07 \cdot 10^{-1}$		98,40%	++++
Taille de ZOI	$\beta_1$	$-7,85 \cdot 10^{-2}$		98,30%	++++
Taille de mouchetis	$\beta_2$	$1,80 \cdot 10^{-1}$		98,00%	++++
Profondeur d'encodage	$\beta_3$	$-7,40 \cdot 10^{-2}$		98,50%	++++
Bruit d'intensité	$\beta_4$	$1,1 \cdot 10^{-1}$		98,00%	++++
Interaction ZOI / mouchetis	$\beta_{12}$	$7,81 \cdot 10^{-4}$		13,50%	-
Interaction ZOI / encodage	$\beta_{13}$	$-1,89 \cdot 10^{-3}$		73,10%	+++
Interaction ZOI / bruit d'intensité	$\beta_{14}$	$-7,97 \cdot 10^{-2}$		97,80%	++++
Interaction mouchetis / encodage	$\beta_{23}$	$-3,86 \cdot 10^{-3}$		93,60%	++++
Interaction mouchetis / bruit d'intensité	$\beta_{24}$	$1,88 \cdot 10^{-1}$		97,80%	++++
Interaction encodage / bruit d'intensité	$\beta_{34}$	$-7,17 \cdot 10^{-2}$		98,30%	++++

Tableau 1. Sensibilité de l'erreur à différents paramètres.

## 4 Exemples

### 4.1 Expérience simulée

Un premier test a été réalisé sur des images simulées, fournies par le GDR 2519 [4]. Le champ de déplacement est une fonction sinus, encodé sur 8 bits, sans bruit. La longueur d'onde du sinus est de 128 pixels, et son amplitude est de 0,02 pixels. L'erreur moyenne sur les déplacements reconstruits pour les directions x et y est ici de 0,003 pixels. Les cartes de déformation (fig. 1) ne concernent qu'une petite zone de la cartographie. Elles sont obtenues par la méthode proposée, et par une méthode plus classique, par approximation diffuse (polynôme d'ordre 1) ajustée de telle sorte que les résolutions spatiales des deux cartographies soient identiques. La méthode proposée est plus efficace en l'absence de bruit, avec une dispersion de  $1,7 \cdot 10^{-4}$  contre  $2,6 \cdot 10^{-4}$ .

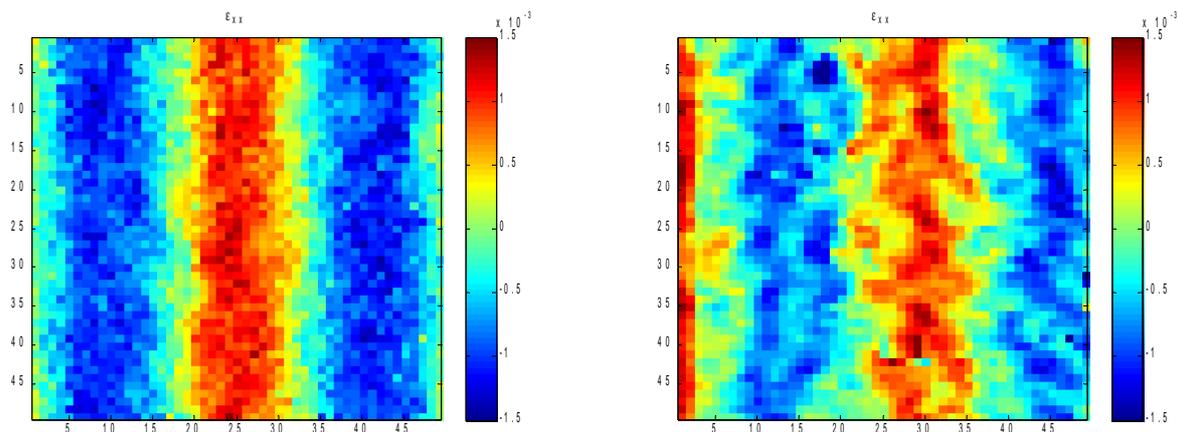


FIG 1. Déformation dans le cas simulé. a/procédure proposée b/approche classique (en m/m).

### 4.2 Champs de déplacement et de déformation sur un monopli de composite carbone tissé

Les composites à renforts carbone sont utilisés fréquemment, en particulier dans l'industrie aéronautique. La présentation des renforts carbone (UD, tissé, NCF) conditionne en grande partie la durée de vie des structures. Les tissages en particulier créent des contraintes locales qu'il est important de pouvoir quantifier pour un dimensionnement optimal. Du fait de la difficulté à décrire la géométrie d'un tissage, l'approche expérimentale est encore un moyen d'études privilégié. Ce travail a été déjà conduit par Lee [16] avec une méthode d'interférométrie différentielle. Ici, l'idée est de proposer un montage optique plus simple à mettre en œuvre, avec une seule caméra.

Les résultats de faisabilité sont donnés Figure 2 et 3. L'éprouvette est constituée d'un mono-ply de tissu carbone (sergé) mis en traction selon la direction horizontale. La taille de la cellule élémentaire de tissu est de  $8 \times 8$  mm<sup>2</sup>. La charge appliquée est de 200 N. L'extraction des informations est faite avec des ZOI de  $64 \times 64$ . Les cartographies de déplacement montrent des variations liées au tissage. Les cartes de déformation (figure 3) ont été filtrées pour des raisons cosmétiques avec un filtre poivre-et-sel, puis un filtre gaussien avec  $\sigma = 9$  pixels. Ici, la résolution spatiale est de 13 pixels. Les résultats présentent les mêmes tendances qualitatives et quantitatives que dans des travaux précédents sur la même structure [16, 17]. On montre ici que le tissage couplé à une mise sous tension du tissu induit une sur-déformation périodique en forme de banane. Le cisaillement est maximal dans les zones riches en résine, à l'intersection des mèches horizontales (dans le sens de la traction) et verticales (dans le sens transverse à la traction).

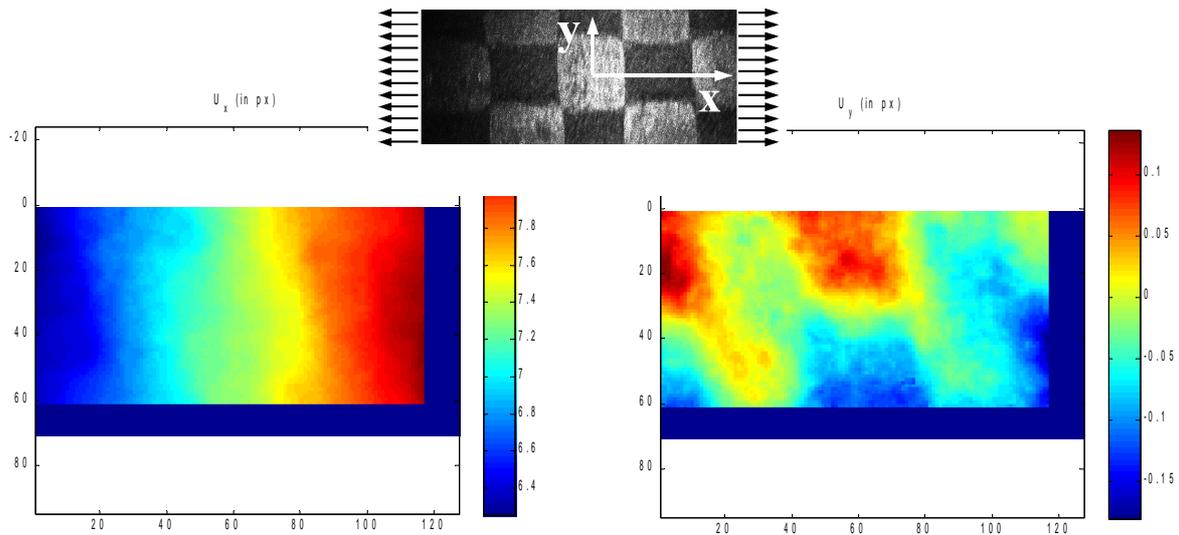


FIG 2. Déplacements obtenus pour un monopli de renfort carbone tissé en traction (en pixels).

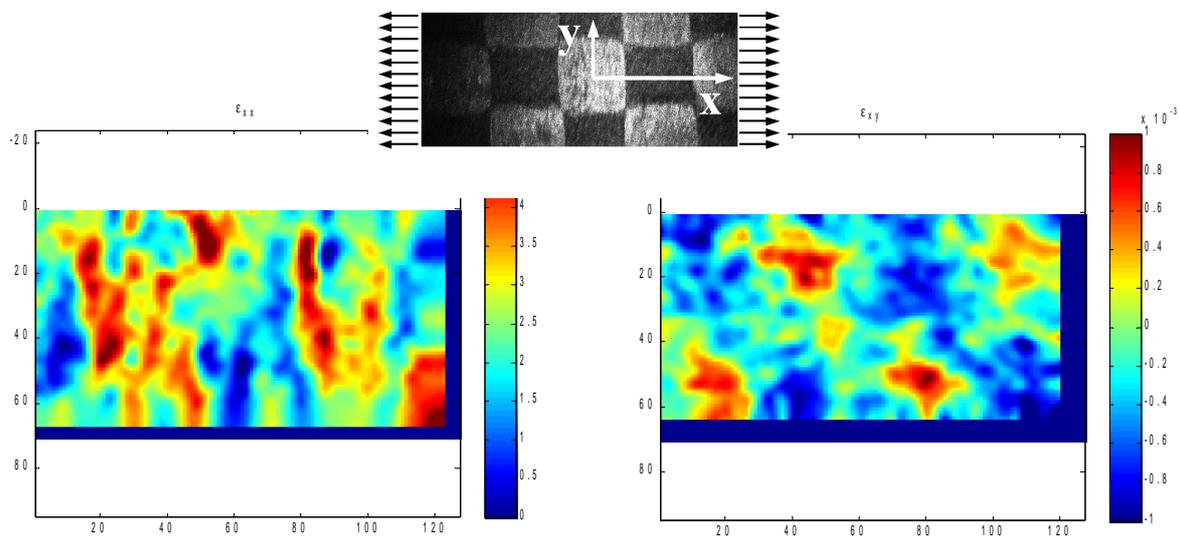


FIG 3. Déformations obtenues pour un monopli de renfort carbone tissé en traction a/ $\epsilon_{xx}$ , b/ $\epsilon_{xy}$ .  
Pleine échelle :  $10^{-3}$  (en m/m).

## 5 Conclusion et perspectives

L'évaluation des déformations est critique pour l'ingénieur mécanicien. Elles sont généralement obtenues par dérivation des champs de déplacement obtenus par les méthodes géométriques usuelles (corrélation d'images numérique, méthodes de grille). Nous avons proposé récemment une approche du traitement d'images basée sur l'analyse de la phase pour obtenir les déplacements. Ici, ce code est étendu à l'évaluation directe des déformations en utilisant un noyau d'extraction/dérivation de la phase. Les premiers résultats sont très prometteurs si le bruit sur les niveaux de gris est contrôlé. Le principal avantage de cette approche pourrait être sa résolution spatiale. L'exemple proposé sur le composite à base de fibres de carbone tissées montre clairement des zones de localisation fortes des déformations.

## References

- [1] M.A. Sutton, W.J. Wolters, W.H. Peters, W.F. Ranson, S.R. McNeill, Determination of displacements using an improved digital image correlation method, *Image and Vision Computing*, 1, 3 (1983) 133-139.
- [2] P.F. Luo, Y.J. Chao, M.A. Sutton, W.H. Peters, Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision, *Experimental Mechanics*, 33, 2 (1993) 123-132.
- [3] D. Garcia, J.J. Orteu, L. Penazzi, A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacements: application to sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126 (2002) 736-742.
- [4] M. Bornert, F. Brémand, P. Doumalin, J.C. Dupré, M. Fazzini, M. Grédiac, F. Hild, S. Mistou, J. Molimard, J.J. Orteu, L. Robert, Y. Surrel, P. Vacher, B. Wattrisse, Assessment of Digital Image Correlation measurement errors: Methodology and results, *Experimental Mechanics* 49, 3 (2009) 353-370.
- [5] B. Wattrisse, A. Chrysochoos, J.M. Muracciole, M. Némoz-Gaillard, Analysis of strain localization during tensile tests by digital image correlation. *Exp Mech* 41, 1 (2001) 29–39.
- [6] J. Réthoré, F. Hild, S. Roux, Extended digital image correlation with crack shape optimization, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 73, 2 (2008) 248-272.
- [7] Y. Surrel, Moiré and grid methods in optics, *SPIE* 2342 (1994) 213-220.
- [8] L. Allais, M. Bornert, T. Bretheau, D. Caldemaison, Experimental characterization of the local strain field in a heterogeneous elastoplastic material, *Acta Metallurgica et Materialia*, 42, 11 (1994) 3865-3880.
- [9] C. Poilâne, E. Lantz, G. Tribillon, P. Delobelle, Measurement of in-plane displacement fields by a spectral phase algorithm applied to numerical speckle photography for microtensile test, *European Physical Journal: Applied Physics*, 11 (2000) 131-145.
- [10] S. Vanlanduit, J. Vanherzeele, R. Longo, P. Guillaume, A digital image correlation method for fatigue test experiments, *Optics and Lasers in Engineering*, 47 (2009) 371– 378.
- [11] J. Molimard, Frequency-based image analysis of random patterns: a first attempt, *Proceeding of Photomechanics'08*, Loughborough, UK, 7-9 July 2008 (2008).
- [12] S. Coudert, Triconnet K., Zebiri A., Surrel Y., Étalonnage transverse d'un objectif de caméra par la méthode de la grille, colloque Photomécanique, Albi, France, 4-6 May 2004. (in French) (2004).
- [13] J. Molimard, G. Boyer, H. Zahouani, Frequency-based image analysis of random patterns: an alternative way to classical stereocorrelation, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, vol. 30,3 (2010) 181-193.
- [14] C. Badulescu, M. Grédiac, J.D. Mathias, D. Roux, A Procedure for Accurate One-Dimensional Strain Measurement Using the Grid Method, 49, 6 (2009) 841-854.
- [15] Y. Surrel, Additive noise effect in digital phase detection, *Applied Optics*, 36, 1 (1997) 271-276.
- [16] J.R. Lee, J. Molimard, A. Vautrin, Y. Surrel, Digital phase-shifting grating shearography for experimental analysis of fabric composites under tension, *Composites: Part A*, 35 (2004) 849–859.
- [17] S.V. Lomov, D.S. Ivanov, I. Verpoest, M. Zako, T. Kurashiki, H. Nakai, J. Molimard, A. Vautrin, Full-field strain measurements for validation of meso-FE analysis of textile composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*; 39, 8 (2008) 1218-1231.