



HAL
open science

Etude du comportement endommageable de bétons réfractaires par stéréo-corrélation d'images numériques

Laurent Robert, Fabien Nazaret, Hicham Marzagui, Thierry Cutard,
Jean-José Orteu

► To cite this version:

Laurent Robert, Fabien Nazaret, Hicham Marzagui, Thierry Cutard, Jean-José Orteu. Etude du comportement endommageable de bétons réfractaires par stéréo-corrélation d'images numériques. 17e Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-01798899

HAL Id: hal-01798899

<https://hal.science/hal-01798899>

Submitted on 25 Apr 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Étude du comportement endommageable de bétons réfractaires par stéréo-corrélation d'images numériques

Laurent Robert, Fabien Nazaret, Hicham Marzagui, Thierry Cutard & Jean-José Orteu

École des Mines d'Albi-Carmaux
Centre de Recherche Outillages, Matériaux et Procédés
Campus Jarlard, 81013 ALBI Cedex 09
laurent.robert@enstimac.fr

Résumé :

On étudie dans cet article le comportement en traction simple et en flexion 4 points de bétons réfractaires. Ces matériaux présentent un comportement endommageable à de faibles niveaux de déformation, et des phénomènes de localisation qui rendent difficiles les mesures par extensométrie mécanique. L'utilisation de la mesure par stéréo-corrélation d'images permet d'avoir accès aux champs cinématiques, et montre que les sites de localisation peuvent être multiples avant macro-fissures. Pour évaluer la pertinence des mesures de champs pour des déformations très faibles, nous menons une étude des performances métrologiques qui montre qu'on atteint aisément une résolution en déformation inférieure à 10^{-4} . Enfin, les valeurs de déformation macroscopique mesurées sont comparables avec celles obtenues par extensométrie mécanique lorsque celle-ci est possible.

Abstract :

The behavior of refractory concrete is studied on tensile test and 4-points bending test using optical full-field measurement technique. This type of material show a damage behavior for small strain levels, and strain localisations are sometimes difficult to obtain using mechanical extensometry. Using digital images stereocorrelation, comparative results with mechanical extensometry are obtained, and strain field maps present localization areas that occur before the macro-crack.

Mots-clefs :

méthode optique de champ ; stéréo-corrélation ; béton réfractaire ; endommagement

1 Introduction

Les bétons réfractaires sont de plus en plus utilisés dans une gamme de température entre 20 et 1000°C [1, 2]. A ces températures, il est important d'évaluer le caractère endommageable de ces matériaux [3]. Dans cet article, deux matériaux sont étudiés à température ambiante. Le premier est un béton réfractaire dense silico-alumineux à basse teneur en ciment à base d'andalousite [4]. Le second est un composite constitué d'une matrice (granulats de cordiérite et liant géopolymère) renforcé de fibres métalliques courtes en acier inoxydable (fraction volumique 1,5%) [2]. Il est délicat de mesurer les très faibles déformations de ces matériaux en traction par les mesures classiques d'extensométrie mécanique, car la mesure est handicapée par son caractère local alors que le matériau est hétérogène. De plus, ces matériaux sont sujets à la fissuration qui mène à la localisation de la déformation, ce qui complique l'interprétation de la mesure extensométrique puisqu'elle est sensible à la position de l'extensomètre par rapport à la fissure. Des techniques expérimentales ont d'ailleurs été développées pour retarder la localisation, par exemple [5]. Les mesures de champs par stéréo-corrélation d'images vont permettre d'accéder à l'ensemble du champ de déformations surfaciques et de ne plus être dépendant de

la position du capteur extensométrique. Enfin, l'utilisation de la stéréovision permet de s'affranchir des défauts classiquement liés à la corrélation 2D (par exemple, hypothèse que les déformations sont planes, parallèles au plan caméra, et le restant au cours du temps).

Pour valider les résultats, il est proposé en premier lieu d'évaluer la capacité de la méthode à mesurer de faibles déformations. Ensuite, des résultats concernant le comportement en traction du béton réfractaire non renforcé, puis le comportement en flexion 4 points du béton réfractaire fibré, permettront de mieux comprendre le comportement endommageable de ces matériaux.

2 Étude des performances métrologiques

Il est difficile en pratique de se référer à une "vérité terrain", mais on peut estimer un minorant de l'incertitude attachée à la déformation mesurée par stéréo-corrélation en mesurant les déformations apparentes obtenues lors de déplacements de corps rigides d'une éprouvette non déformée [6]. Cette éprouvette en béton renforcé de fibres métalliques, texturée par projection de peinture (mouquetis noir sur fond blanc), sera utilisée pour l'essai de flexion (section 4).

Les images sont prises à l'aide d'un banc stéréoscopique constitué de deux caméras CCD numériques QICAM (Qimaging[©]) de résolution 1360x1036, 8 bits, munies d'objectifs Computar 25 mm f1.3. Le calibrage [7] est fait avec le logiciel vic3D[©] [8] à l'aide d'une mire de 81 cercles blancs sur fond noir (méthode d'optimisation globale). Le score de calibrage (erreur de reprojection globale) est de 0,037 pixel. Pour la corrélation et le calcul des déformations, 3 paramètres sont à choisir :

- la taille de la fenêtre de corrélation f_c , qui définit la résolution spatiale,
- le pas de corrélation p (qui définit les points où la corrélation est effectuée),
- la taille du "filtre" f qui définit le voisinage des points corrélés sur lequel est calculée la déformation (carré de côté la taille du filtre f multiplié par le pas p), qui peut en partie définir la résolution spatiale en déformation (taille de la "jauge optique").

La résolution optique (ou grossissement) est de 94 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, et la résolution de la mesure de déplacements peut être estimée à 1/50 pixels, soit 1,9 μm .

Pour le choix *a priori* d'une fenêtre de corrélation f_c de 25x25 pixels² (résolution spatiale de 2,35 mm) et un pas $p=5$ pixels, nous avons étudié l'influence des tailles de filtre f ($f=5, 9, 15, 23, 31$ et 61, soit respectivement résolution spatiale en déformation de 2.3, 4.2, 7.0, 10.8, 14.6 et 28.7 mm) pour 6 configurations de mouvement de corps rigide (translations et rotations suivant les 3 axes) par rapport à une position de référence. Puis nous avons tracé tous les histogrammes

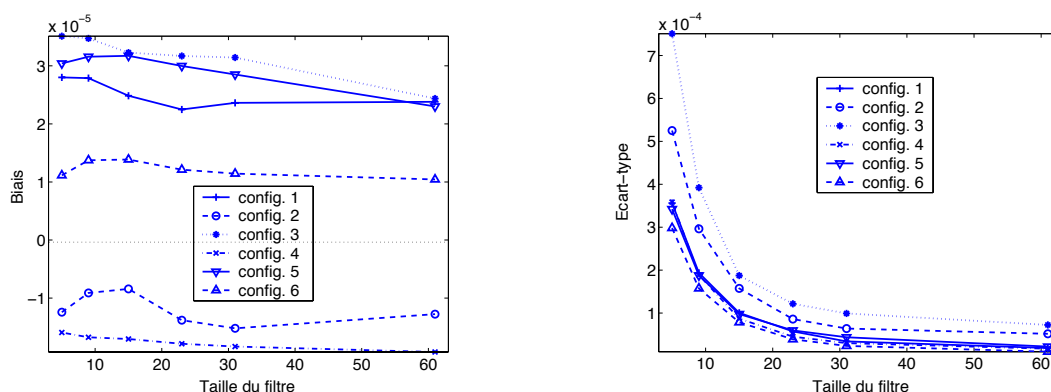


FIG. 1 – Déformation mesurées suivant \vec{x} : biais (à gauche) et écart-type (à droite) en fonction de la taille du filtre pour les 6 configurations de mouvements de corps solides.

de la répartition des valeurs de la déformation suivant l'axe horizontal \vec{x} . La figure 1 en présente

le biais = moyenne des valeurs ou erreur systématique qui caractérise la justesse (à gauche) et l'écart-type pouvant représenter l'erreur aléatoire (à droite). Le biais est compris, suivant les configurations, entre -2.10^{-5} et $3,5.10^{-5}$, et est quasiment indépendant de la taille du filtre. Dans le cas le plus favorable (plus petit déplacement rigide, config. 6), $10 \mu\text{def}$ de biais est obtenu. L'erreur aléatoire décroît de manière exponentielle lorsque la taille du filtre augmente, par effet de moyenne spatiale des déformations. Dans le cas le plus favorable (config. 6), un écart-type de $80 \mu\text{def}$ est obtenu pour une résolution spatiale de 7 mm (filtre 15).

Nous présentons en figure 2 l'influence de la taille de la fenêtre de corrélation f_c sur l'écart-type des déplacements dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) (à gauche), puis sur l'écart-type de la déformation suivant \vec{x} (à droite), pour la configuration 6 (déplacement rigide en mm $U_x=-0.96$, $U_y=0.12$ et $U_z=0.15$). On montre qu'augmenter la fenêtre de corrélation f_c diminue l'écart-type (Fi-

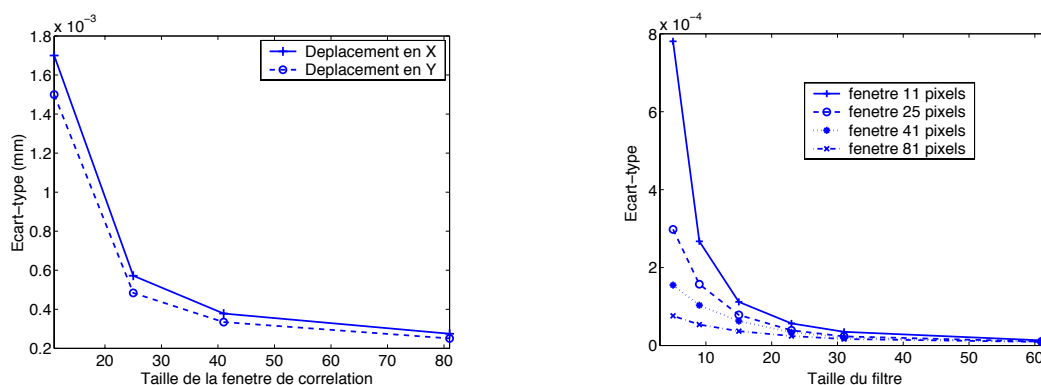


FIG. 2 – Influence de la taille de la fenêtre de corrélation f_c sur la mesure du déplacement (à gauche) et de la déformation (à droite).

gure 2 de gauche) et donc diminue l'erreur aléatoire sur le déplacement. Cependant, lorsqu'on augmente trop f_c , la transformation locale de la fenêtre de corrélation (ici, affine), peut être de moins en moins adaptée. Ceci a pour effet de diminuer d'autant plus l'incertitude sur les déformations (Figure 2 de droite) mais on perd évidemment en résolution spatiale. On voit enfin qu'un important lissage spatial des déformations masque l'effet de la taille de la fenêtre de corrélation.

Une étude portant sur le biais et l'erreur aléatoire des champs de déformation mesurés in situ sur l'éprouvette soumise à la flexion 4 points, en fonction des différents filtres utilisés pour le calcul des déformations, montre qu'on obtient une justesse de l'ordre de 10^{-5} en déformation moyenne. De plus, il semble que la méthode d'estimation de l'erreur aléatoire par mesure de déplacements de solide rigide donne, en comparaison avec les mesures lors de l'essai de flexion, un majorant plutôt qu'un minorant : un écart-type de $30 \mu\text{def}$ est obtenu pour une déformation moyenne en flexion de 10^{-5} , à comparer avec l'écart-type de $80 \mu\text{def}$ obtenu dans le cas du déplacement de solide rigide de la configuration 6 (Figure 1), tous les paramètres étant identiques par ailleurs.

3 Comportement endommageable d'un béton réfractaire silico-alumineux en traction

La méthode de stéréo-corrélation est ici utilisée lors d'un essai de traction sur une éprouvette en béton réfractaire silico-alumineux cuite à 700°C . Sur ce type de matériau, après un comportement linéaire élastique dont la limite dépend du type du béton et de la température de cuisson ou d'essai, un endommagement se développe, se traduisant par une non-linéarité de la courbe de comportement, et par l'apparition d'une déformation permanente après déchargement.

Afin d'observer le développement de la fissuration, il a été choisi de conserver la texture naturelle du béton pour effectuer la stéréocorrélation d'images par vic3D[®]. Les paramètres utilisés sont les suivants (section 2) : $f_c=15$ pixels (résolution spatiale de 0,86 mm), grandissement de 57,6 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, $p=5$ pixels, $f=15$ soit jauge optique carrée de 4,3 mm de côté.

La Figure 3 présente la courbe de comportement obtenue par LVDT et trois cartes en fausses couleurs des champs de déformation longitudinale correspondant respectivement aux points 1, 3 et 4 de la courbe de comportement. La figure 3 (haut à droite) correspond au point 1 de la courbe

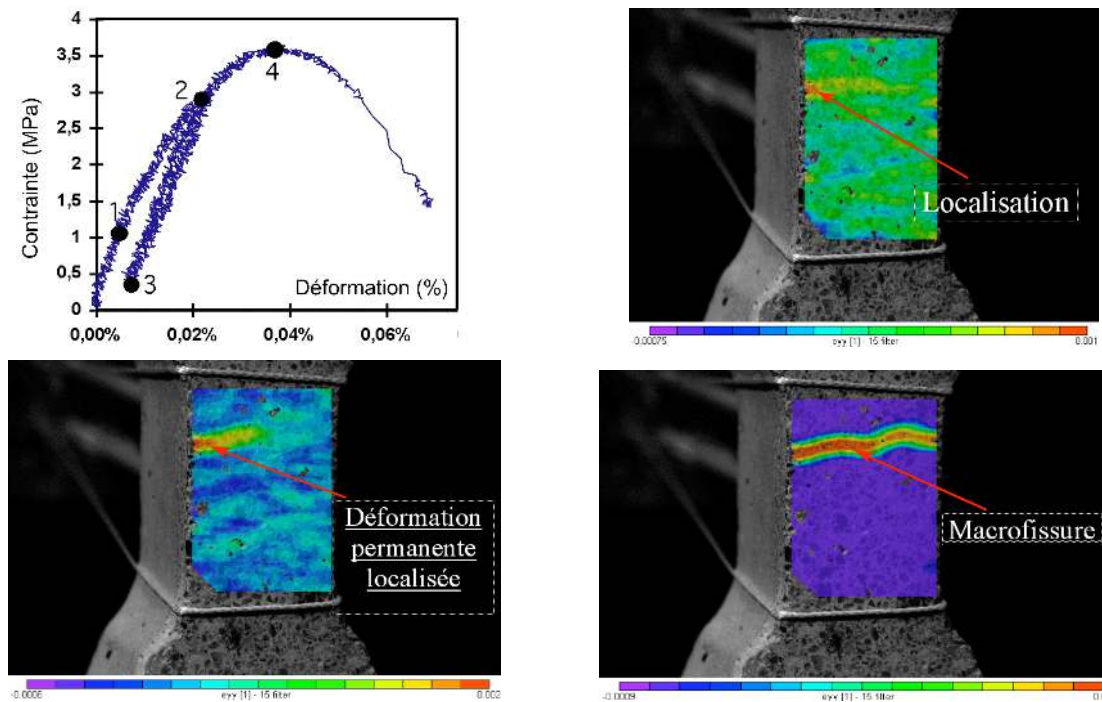


FIG. 3 – Courbe de traction et cartes des champs de déformation longitudinale.

de comportement et montre que le phénomène de localisation de la déformation débute à 1,07 MPa (point 1), le champ de déformation n'est alors plus homogène. Ce niveau de contrainte correspond à la limite du comportement élastique, puisque au-delà de cette valeur la non-linéarité du comportement apparaît. Cette localisation est sans doute due à la présence d'un défaut ou d'une microfissure dans la zone où les déformations locales les plus fortes sont mesurées. Cette zone de localisation perdure jusqu'au niveau haut du premier cycle de chargement (point 2 à 2,95 MPa). La figure 3 (bas à gauche), correspondant au point 3 de la courbe de comportement, montre qu'en fin de décharge, l'éprouvette présente toujours une déformation permanente dans la même zone. Ce résultat suggère que les déformations permanentes peuvent résulter de phénomènes localisés de non fermeture de décohésions ou de microfissures. La suite de l'essai ne présente aucune autre zone de localisation sur la surface observée. A la rupture au point 4 (Figure 3 (bas à droite)), on voit que la macrofissure se propage précisément à partir de la zone dans laquelle la localisation est apparue bien avant le pic de contrainte.

L'endommagement en traction du béton réfractaire dense silico-alumineux étudié se manifeste sous deux formes : il peut être diffus et/ou localisé. Ces observations de champs de déformation mettent en évidence que des phénomènes de localisation peuvent apparaître dès les premiers stades du comportement non linéaire. Elles montrent aussi que l'initiation des macrofissures se fait à partir de ces zones de localisation de l'endommagement. Enfin, les résultats obtenus à partir de la moyenne arithmétique sur la zone d'étude de l'ensemble des valeurs des

déformations sont cohérents avec les valeurs mesurées par extensomètre mécanique lorsque celles-ci sont possibles.

4 Comportement endommageable d'un béton réfractaire renforcé en flexion 4 points

La stéréo-corrélation est utilisée lors d'un essai de flexion 4 points sur une éprouvette en béton réfractaire renforcé de fibres métalliques de dimensions $25 \times 25 \times 150 \text{ mm}^3$, avec les paramètres fixés à $f_c=25$, $p=5$ et $f=15$ (voir section 2). Dans le cas d'un essai classique de flexion 4 points, les données qui sont mesurées sont la force et la flèche. A partir des formules de la théorie des poutres avec l'hypothèse que le matériau est élastique, on peut calculer la déformation en traction sur la face inférieure de l'éprouvette à partir de l'effort mesuré : $\varepsilon = \frac{3F(L-l)}{2Ebh^2}$. Le module d'Young du matériau est connu et est égal à 11 GPa pour le matériau cuit à 500°C et à 35 GPa pour le matériau non cuit. En réalisant une mesure de déformation moyenne par stéréo-corrélation sur la face inférieure sur une épaisseur de 1 mm, on peut comparer les valeurs théoriques de déformations obtenues à partir de l'effort avec celles mesurées par le méthode de stéréo-corrélation (Figure 4). On observe que le niveau et l'évolution des déformations sont

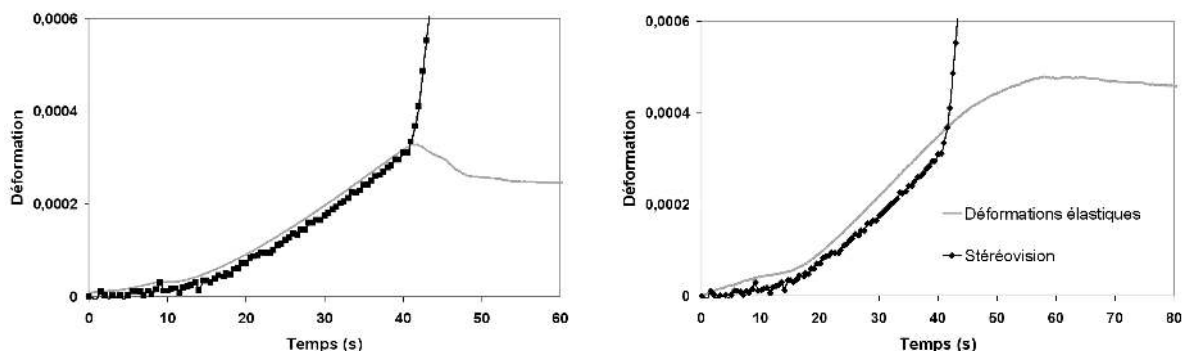


FIG. 4 – Evolution de la déformation élastique sur la face en traction lors d'un essai de flexion 4 points sur un béton réfractaire fibré non cuit (à gauche) et cuit à 500°C (à droite). Comparaison des valeurs calculées (trait continu) et des valeurs mesurées par stéréo-corrélation (points).

équivalents, ce qui valide la méthode. Même pour des niveaux de déformation en dessous de 10^{-4} les résultats sont satisfaisants. D'autre part, on observe, pour le matériau non cuit, que les déformations sont équivalentes jusqu'au pic correspondant *a priori* à la localisation de la déformation. On peut en déduire que le comportement est élastique jusqu'à l'apparition de la fissure. Pour le matériau cuit à 500°C , l'évolution de la déformation mesurée par stéréo-corrélation diverge de la déformation élastique avant le pic.

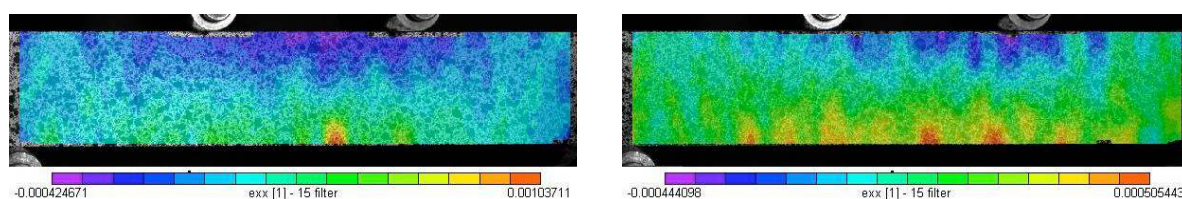


FIG. 5 – Champs de déformation mesurés par stéréo-corrélation dans la direction de l'axe neutre sur un matériau non cuit (à gauche) et cuit à 500°C (à droite) juste avant le pic de charge.

On peut penser que, dans ce cas, le matériau est sujet à un endommagement qui provoque la non-linéarité de la déformation calculée. La stéréo-corrélation montre que cet endommagement

correspond physiquement à une multi-fissuration et donc à une localisation des déformations. L'observation de la figure 5 de gauche montre que dans le cas du matériau non cuit, une seule fissure apparaît. Dans le cas du matériau cuit à 500°C (figure 5 de droite), plusieurs fissures parallèles les unes aux autres s'initient sur la face sollicitée en traction. Ce mode d'endommagement dit de multifissuration apparaît bien avant le pic de charge et explique que la déformation globale mesurée précédemment diverge de la déformation calculée pour un matériau élastique.

5 Conclusions

Nous avons appliqué la méthode de mesure par stéréo-corrélation d'images sur deux types d'éprouvettes en béton, l'une sollicitée en traction, l'autre en flexion 4 points. Nous montrons, sur ces matériaux endommageables, que les mesures des déformations par stéréo-corrélation donnent des résultats très proches (lorsqu'on considère la moyenne spatiale) des mesures par extensométrie mécanique ; De plus, l'aspect local de la méthode nous a permis de montrer comment ces matériaux s'endommagent (multiples sites de localisation avant macro-fissures par exemple). Nous continuons ces travaux sur l'endommagement des bétons réfractaires, les perspectives étant de pouvoir faire ce type de mesure de champ à chaud.

Références

- [1] G. Bernhart, F. Nazaret, A. Martinier, C. Gao, D. Garriga-Majo, T. Cutard, and P. Lours. Design of SPF dies based on advanced material behaviour models. *Materials Science Forum*, 447-448 :123–130, 2004.
- [2] T. Cutard, E. Cailleux, P Lours, and G. Bernhart. Structural and mechanical properties of a refractory concrete for superplastic forming tools. *Industrial Ceramics*, 19 :100–102, 1999.
- [3] F. Nazaret, T. Cutard, and G. Bernhart. Thermomechanical behaviour of a fibre-reinforced refractory concrete : tests and FE analysis. Proceedings of the 6th RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete, Varenna, Lake Como, Italy, 2004.
- [4] H. Marzagui, T. Cutard, E. Yeugo Fogain, M. Huger, C. Gault, N. Prompt, and C. Deteuf. Microstructural changes and high temperature mechanical behavior of an andalusite based low cement refractory castable. Proceedings of the International Conference of Metallurgists, Hamilton, Canada, 2004.
- [5] N. Schmitt, Y. Berthaud, and J. Poirier. Tensile behaviour of magnesia carbon refractories. *Journal of the European Ceramic Society*, 20 :2239–2248, 2000.
- [6] H.W. Schreier, D. Garcia, and M.A. Sutton. Advances in light microscope stereo vision. *Experimental Mechanics*, 44(3) :278–288, 2004.
- [7] D. Garcia. *Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images*. PhD thesis, INP Toulouse/EMAC, 2001.
- [8] Vic3D software. <http://www.correlatedsolutions.com>. Correlated Solutions, Inc., 2002.