



**HAL**  
open science

## Mesure de conditions limites par Stéréo-Corrélation d'Images Eléments-Finis régularisée

John-Eric Dufour, Joel Serra, Guillaume Colantonio, Jean-Noël Périé,  
Jean-Charles Passieux

► **To cite this version:**

John-Eric Dufour, Joel Serra, Guillaume Colantonio, Jean-Noël Périé, Jean-Charles Passieux. Mesure de conditions limites par Stéréo-Corrélation d'Images Eléments-Finis régularisée. 15ème colloque national en calcul des structures, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], May 2022, 83400 Hyères-les-Palmiers, France. hal-03717634

**HAL Id: hal-03717634**

**<https://hal.science/hal-03717634>**

Submitted on 8 Jul 2022

**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.

# Mesure de conditions limites par Stéréo-Corrélation d'Images Eléments-Finis régularisée

J.-E. Dufour<sup>1</sup>, J. Serra<sup>1</sup>, G. Colantonio<sup>1</sup>, J.-N. Périé<sup>1</sup>, J.-C. Passieux<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut Clément Ader (ICA), Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées, CNRS UMR 5312-INSA-ISAE-Mines Albi-UPS, Toulouse, Fr.  
john-eric.dufour@isae-supaero.fr

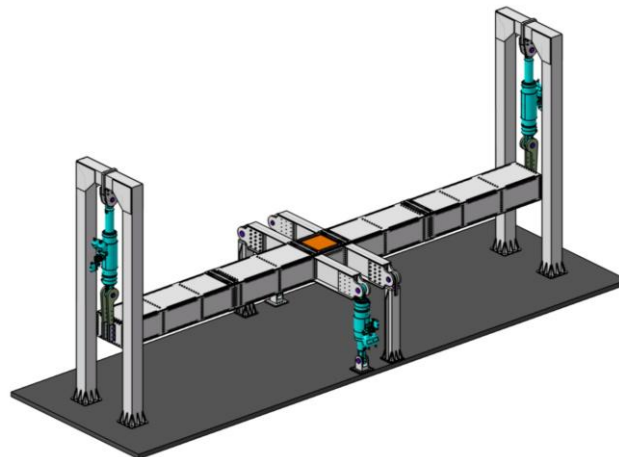
**Résumé** — Dans le cadre du développement d'essais multiaxiaux pour la certification des pièces en matériaux composites, il devient nécessaire de tester les matériaux sous la forme d'éprouvettes dites technologiques et non plus à l'échelle classique du coupon. L'apparition d'effets d'échelles et de structure peut ainsi être prise en compte. Pour s'adapter à ces essais complexes, les outils de mesure doivent être développés pour permettre un meilleur dialogue avec la simulation. Pour cette raison, une version régularisée par la mécanique de la technique de stéréo-corrélation globale a été utilisée pour mesurer des conditions limites 3D à partir de l'observation de la face supérieure d'une éprouvette lors d'un essai multiaxial.

**Mots clefs** — SDIC, Dialogue essai-calcul.

## 1. Contexte

Dans un souci de fluidifier et de procéduraliser le dialogue essai-calcul, les méthodes de mesure par stéréo-corrélation d'images numériques se développent pour adopter un formalisme Eléments-Finis global [1,2], permettant un échange direct avec la simulation et les solveurs commerciaux.

Pour permettre une comparaison entre les essais et les calculs numériques effectués, notamment sur les essais complexes (multiaxiaux, géométries complexes,...), il est important d'appliquer les conditions limites les plus proches de la réalité. L'extraction des conditions limites mesurées et leur transfert à la simulation devient alors une étape importante du dialogue essai-calcul.



**Figure 1:** Modèle CAO de la machine VERTEX utilisée dans cette étude. L'éprouvette est en orange au centre de la machine.

La machine VERTEX [3] permet de réaliser des essais multiaxiaux sur des éprouvettes dites

« technologiques » de taille 400mm x 400mm. Dans le cadre du projet VIRTUOSE, des essais instrumentés par de nombreux moyens optiques (caméras visibles, IR, acoustique, rapide) sont réalisés pour caractériser la fissuration des composites sous des sollicitations complexes. L'architecture de la machine (voir figure 1) impose des déplacements aux bords de l'éprouvette qui sont mal connus et ne permet pas facilement de connaître les flux d'efforts qui passent réellement dans l'éprouvette. Les conditions limites au bord de l'éprouvette sont donc mal définies et pourtant d'une importance critique pour la caractérisation des éprouvettes.

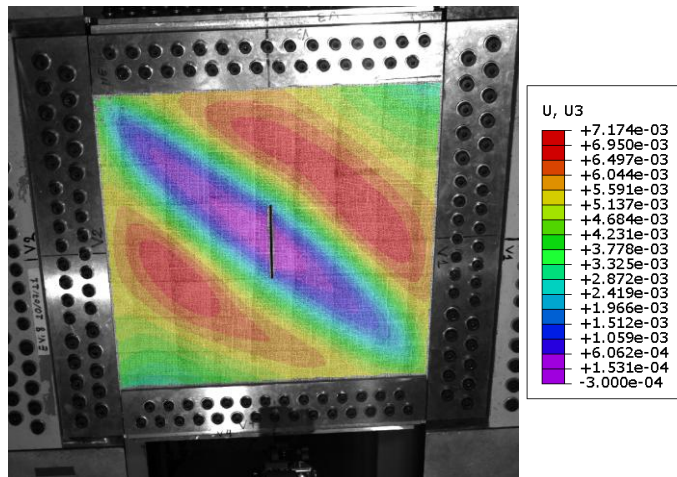
Dans le contexte de ces essais multiaxiaux, on cherche donc à mesurer des conditions limites à partir de la stéréo-corrélation d'images sur un maillage élément-finis adapté au calcul.

## 2. Mesure par stéréo-corrélation régularisée

La mesure par stéréo-corrélation d'images globale [4,1] permet d'obtenir des mesures de déplacements sur la face supérieure de notre éprouvette (voir figure 2) via la résolution du problème de minimisation suivant :

$$\underline{U}^* = \underset{\underline{U}}{\text{Argmin}} \sum_c \int_{\Omega} \left( (f_c \circ \underline{P}_c)(\underline{X}) - (g_c \circ \underline{P}_c)(\underline{X} + \underline{U}) \right) \quad (1)$$

Cette mesure ne permet pas d'accéder à la face inférieure de l'éprouvette. Pour permettre de mesurer des conditions limites dans l'épaisseur (et donc utiliser un maillage 3D et non une simple surface), il est nécessaire de régulariser la mesure.



**Figure 2:** Exemple de champ de déplacement dans la direction hors plan obtenu par corrélation d'images lors d'un essai de cisaillement. On observe un flambement marqué de la plaque.

L'approche de régularisation utilisée dans ces travaux repose sur une régularisation mécanique forte de la mesure. En ce sens, on choisit un espace de recherche pour notre champ de déplacement solution qui satisfasse un ensemble de propriétés données. On peut par exemple écrire l'équilibre mécanique sur le champ de déplacement dans l'éprouvette sous la forme (classique en formalisme éléments-finis) :

$$\begin{pmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_i \\ \underline{U}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ F_{ext} \end{pmatrix}$$

On peut donc écrire le champ de déplacement  $\underline{U}$  complet sous la forme :

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_i \\ \underline{U}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -K_{ii}^{-1}K_{ib} \\ \underbrace{I_b}_{\underline{L}} \end{pmatrix} \underline{U}_b$$

Et le problème de corrélation d'image (1) à résoudre devient alors :

$$\underline{U}_b^* = \underset{\underline{U}_b}{\text{Argmin}} \sum_c \int_{\Omega} \left( (f_c \circ \underline{P}_c)(\underline{X}) - (g_c \circ \underline{P}_c)(\underline{X} + \underline{L}\underline{U}_b) \right) \quad (2)$$

On cherche alors à résoudre un problème uniquement sur le set de nœuds de bord, qui impose un déplacement à tous les nœuds (supérieurs et inférieurs) via le comportement mécanique postulé (via la matrice de raideur). On peut réécrire le problème (2) sous la forme d'une succession de problèmes linéaires :

$$\mathbf{H} \underline{U}_b = \mathbf{b}$$

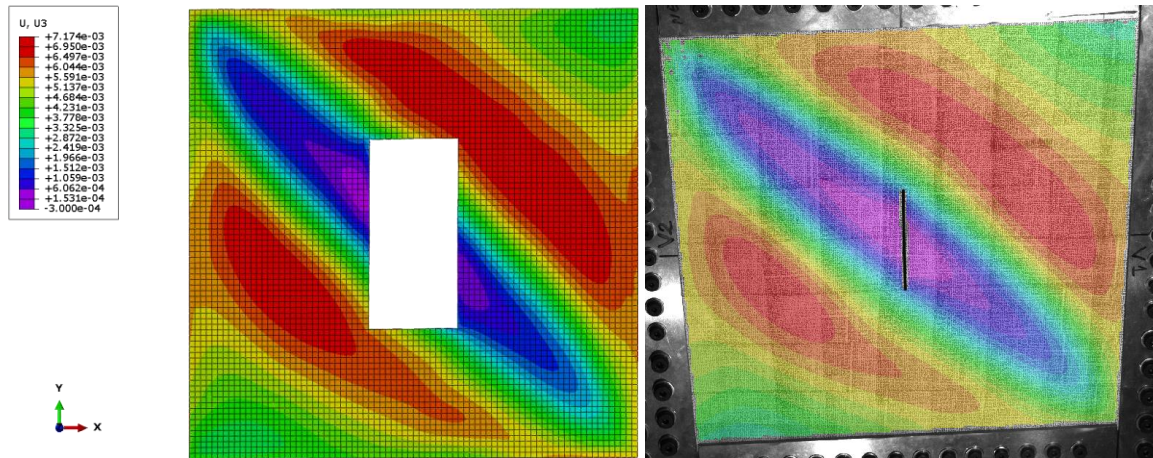
avec  $\mathbf{H} = \mathbf{L}^t \mathbf{M}_{\text{corr}} \mathbf{L}$

et  $\mathbf{M}_{\text{corr}}$  l'opérateur de corrélation issu du problème (1)

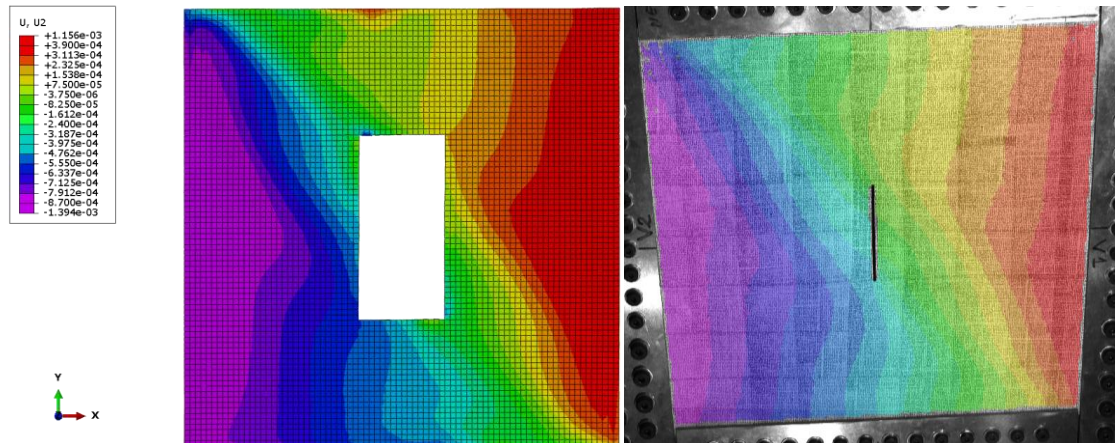
Cette méthode revient à projeter l'opérateur de corrélation sur un sous-espace qui ne contient que les champs mécaniquement équilibrés [4]. Il est important de noter que dans notre cas, la rigidité doit être recalculée régulièrement car on atteint une phase de post-flambement. La forme de l'opérateur  $\mathbf{L}$  change au cours de l'essai et il est important de prendre en compte ce changement.

### 3. Résultats

En appliquant la méthode de mesure régularisée sur un essai de cisaillement, on peut mesurer les déplacements des nœuds de bords de l'éprouvette directement sur le maillage éléments-finis de la simulation. On peut appliquer ces déplacements de nœuds comme conditions limites d'un calcul de statique pour recalculer le champ de déplacement en tout point de l'éprouvette. On peut alors vérifier que les champs obtenus par cette méthode sont cohérents avec la mesure (classique) par stéréocorrélation d'images sur la face supérieure (issue d'un logiciel commercial).



**Figure 3:** Déplacement hors plan mesuré par corrélation d'images régularisée (à gauche) et par une mesure classique (à droite). Les résultats sont cohérents.



**Figure 4:** Déplacement dans le plan mesuré par corrélation d'images régularisée (à gauche) et par une mesure classique (à droite). Les résultats sont cohérents.

## 4. Conclusions et Perspectives

Nous avons utilisé une version régularisée de la stéréo-corrélation d'images intégrant le comportement mécanique supposé d'une plaque en composite pour obtenir des conditions limites d'un essai multiaxial directement sur le maillage élément-finis utilisé pour la simulation. Le calcul des variables d'intérêts et le post-traitement de la solution peut donc être directement effectué dans le formalisme du code de calcul utilisé.

Cette méthode repose sur l'équilibre mécanique postulé dans la plaque, et doit donc être modifiée pour mesurer des essais plus complexes comme des essais avec pression interne. Par ailleurs, la complexification du modèle de comportement du matériau pour mieux prendre en compte certains effets de structure est encore nécessaire (dissymétrie traction/compression dans les fibres, ...) pour affiner la mesure.

## Références

- [1] J.-E. Pierré, J.-C. Passieux, J.-N. Périé. Finite Element Stereo Digital Image Correlation: framework and mechanical regularization, *Experimental Mechanics*, Society for Experimental Mechanics, 57 (3), p.443-456, 2017.
- [2] M Berny, T. Archer, P. Beauchêne, A. Mavel, François Hild. Displacement Uncertainty Quantifications in T3-Stereocorrelation. *Experimental Mechanics*, Society for Experimental Mechanics, 61, pp.771-790, 2021
- [3] Joël Serra, J.E. Pierré, J.C. Passieux, J.N. Périé, Christophe Bouvet, Bruno Castanié, Validation and modeling of aeronautical composite structures subjected to combined loadings: The VERTEX project. Part 1: Experimental setup, FE-DIC instrumentation and procedures, *Composite Structures*, 179, p. 224-244, 2017
- [4] J. Réthoré. A fully integrated noise robust strategy for the identification of constitutive laws from digital images. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 83(6): 631-660, 2010