



Fondation Lopez-Loreta

Apprentissage de modèles de structures composites à l'aide de la stéréocorrélation d'images numériques éléments finis

Contexte

Dans le domaine du transport, la quête de performances et de réduction des émissions conduit au développement de matériaux et de structures aux performances spécifiques croissantes. Les matériaux composites occupent ainsi une place prépondérante dans les avions. Leur architecture multi-échelle et leur fabrication sophistiquée rendent néanmoins la prévision de leur comportement mécanique fort complexe. En effet, de nombreux paramètres constitutifs doivent être identifiés afin de construire des modèles numériques prédictifs. La mise en place de tels modèles apparaît pourtant cruciale dans l'ingénierie. D'une part, elle offrirait la possibilité de réaliser des essais virtuels prédictifs afin d'économiser de nombreuses itérations au stade de la conception de structures mécaniques complexes. D'autre part, elle permettrait de limiter drastiquement le nombre d'essais réalisés lors de la certification de ces structures. En effet, concernant ce deuxième point, et en l'absence de modèles numériques véritablement prédictifs, la certification des aérostructures repose encore aujourd'hui sur un grand nombre d'essais à différentes échelles. Plus précisément, on parle de *la pyramide des essais*. En pratique, la caractérisation des paramètres de comportement repose essentiellement sur des essais réalisés à la base de la pyramide, et plus particulièrement à l'échelle du coupon dit élémentaire. À cette échelle, des moyens expérimentaux standards (machines d'essais conventionnelles) sont utilisés pour analyser le comportement d'éprouvettes faiblement instrumentées (jauges, extensomètres...) dont la géométrie, le chargement et parfois le matériau sont simplifiés [1]. De tels essais peuvent ne pas être représentatifs de la structure et de sa sollicitation mécanique réelle. La validation des modèles établis sur la base de ces essais élémentaires, est généralement réalisée à des échelles supérieures, par exemple sur des détails structuraux ou des sous-ensembles. Les dispositifs expérimentaux sont alors très spécifiques [2] et les analyses quantitatives entre essais et modèles numériques se cantonnent à la comparaison de quelques quantités ponctuelles, généralement de type déformation.

Les mesures de champs cinématiques permettent aujourd'hui d'apporter un nouveau regard sur la mécanique de telles structures. En vertu de sa relative simplicité d'utilisation, de son large spectre d'applications (mesure de déplacement, forme, grandes déformations, dynamique), de son caractère trans-échelles (du nanomètre au kilomètre...), et sa propension à exploiter différentes modalités d'imagerie (visible, microscopie électronique, tomographie, etc.), la Corrélation d'Images Numériques (CIN) est devenue la méthode de mesure de champs de référence [3]. Elle a été utilisée pour valider des simulations numériques éléments finis (EF), bien que les comparaisons soient essentiellement qualitatives.

Depuis une quinzaine d'années, de nouvelles formulations, dites *globales* ou *élément finis*, de la CIN ont été proposées [7,8]. Le champ de déplacement (qui est l'inconnu du problème de CIN) est recherché dans un sous-espace d'approximation éléments finis (le même qu'en simulation) dans toute la région d'intérêt. Outre le fait que le support de discrétisation soit le même entre mesure et simulation (ce qui rend la comparaison mesure/simulation directe, triviale et exempt de toute erreur de reprojection), la méthode CIN-EF permet surtout d'intégrer avec plus ou moins de confiance, des connaissances *a priori* sur le comportement mécanique. Cette approche permet de rompre le clivage bilatéral "mesure d'un côté, simulation de l'autre" qui présidait jusqu'ici. Ainsi, il est possible d'incorporer le modèle élément finis dans la mesure, ce qui permet d'envisager de nouvelles approches pour l'identification telles que la CIN intégrée qui permet d'obtenir des paramètres constitutifs directement à partir des images [9]. Il est également possible d'augmenter le modèle numérique d'informations issues de la mesure (correction de la forme, conditions aux limites expérimentales, etc.) [10].

Objectifs

La CIN multiéchelle pour des essais sur éprouvettes structurales

Comme nous l'avons vu, avec la CIN-EF, le pont avec la simulation est simplifié, surtout si le maillage utilisé par la mesure est le même que celui optimisé pour la simulation. Cependant, ce maillage définit alors la résolution spatiale en CIN indépendamment de la texture des images et de la définition des capteurs. Le maillage de la simulation n'est donc, *a priori*, pas optimal au sens du compromis résolution spatiale-résolution de mesure évoqué précédemment. En pratique, la résolution spatiale de la mesure est liée à la résolution spatiale de l'image (taille du pixel en mm). Cette dernière découle du champ de vision et de la définition des imageurs. Au final, l'utilisateur, doit réaliser un compromis entre résolution de l'image et champ de vision. D'une part ce dernier doit être le plus grand possible pour inclure les bords et estimer ainsi les conditions aux limites. Dans le même temps, ce champ de vision doit également être le plus petit possible pour augmenter la résolution de l'image, et donc de la mesure, au moins dans les zones où le champ de déplacement est sensible aux paramètres à identifier. Ces remarques vont dans le sens d'une instrumentation par CIN multi-échelle. Une telle approche a déjà montré sa pertinence en CIN-2D [15].

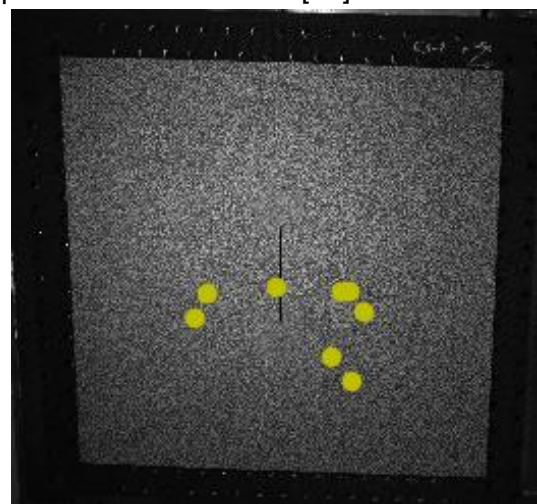
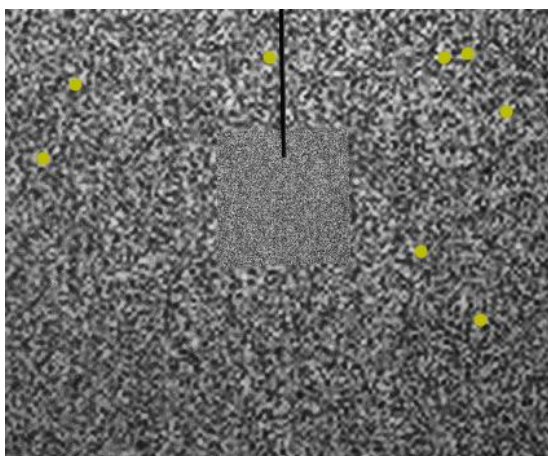


Figure 1 : (gauche) points caractéristiques dans les caméras champs proches ; (droite) points caractéristiques dans les caméras champs lointains

Des travaux précédents ont permis de développer une approche automatisée pour la détection et l'association de points caractéristiques multi-échelles (voir Figure 1). Cette stratégie permet de positionner les caméras de champ proche dans leurs homologues de champ lointain en passant par des caméras dites « de texture ». Une fois que les caméras partagent une référence commune, on peut alors effectuer la mesure directement dans un repère partagé par toutes les caméras, directement sur le maillage en prenant en compte l'information venant de toutes les caméras.

Le stage vise à compléter le développement de cette méthode et à l'utiliser pour l'étalonnage de système sur des cas plus complexes du projet (présence de raidisseurs, problèmes de visibilité), la mesure de forme, puis de déplacement multi-échelle pourra également être envisagée dans un second temps.

Profil

Un candidat possédant une formation en mathématiques appliqués, et un intérêt pour le traitement d'images et la vision est recherché. Une expérience du développement en python est également demandée pour pouvoir comprendre et manipuler le code développé au laboratoire.

Les candidats doivent adresser par mail un CV et une lettre de motivation.

Déroulement du stage

Le stage se déroulera à l'Institut Clément Ader (ICA, UMR CNRS 5312), sur le site toulousain, dans le cadre du projet VIRTUOSE (**VIR**tual **T**esting of aeronautical comp**OS**it**E**s) financé par la fondation Lopez-Loreta [19]. Les recherches s'intégreront dans les activités des groupes Matériaux et Structures Composites (MSC) et Métrologie Identification, Contrôle et Surveillance (MICS).

L'équipe du projet VIRTUOSE est constituée de 8 personnes [20]. Le stage sera encadré par John-Eric Dufour (ICA) et Joël Serra (ICA). La durée du stage est de 6 mois avec un démarrage en Mars-Avril 2022. L'objectif est d'écrire un article scientifique dans une revue à comité de lecture international étant donné qu'une base a déjà été développée dans des travaux antérieurs.

Contacts

- John-Eric Dufour : john-eric.dufour@isae-superaero.fr
- Joël Serra : joel.serra@isae-superaero.fr

Bibliographie

- [1] **Department of defence Washington DC**. Composite Materials Handbook. Volume 1. *Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials*, 1997
- [2] **Wolf K, Kossira H**. *An Efficient Test Method for the Experimental Investigation of the Post-buckling Behavior of Curved Shear Panels*. Amsterdam: ECCM Composite Testing and Standardization; 1992.
- [3] **M.A. Sutton and J.-J. Orteu and H. Schreier**. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*, Springer, New York, NY, 2009
- [4] **M.A. Sutton and W.J. Wolters and W.H. Peters and W.F. Ranson and S.R. McNeill**, *Determination of displacements using an improved digital correlation method*, *Image and Vision Computing*, **1**(3)133-139, 1983.

- [5] **D. Lecompte, A. Smits, H. Sol, J. Vantomme and D. Van Hemelrijck.** Mixed numerical-experimental technique for orthotropic parameter identification using biaxial tensile tests on cruciform specimens, *International Journal of Solids and Structures*. **44**(5):1643-1656, 2007
- [6] **P. Sztefek and R. Olsson.** *Tensile stiffness distribution in impacted composite laminates determined by an inverse method.* *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. **39**(8):1282-1293, 2008.
- [7] **G. Besnard, F. Hild, S. Roux,** "Finite-element" displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Chatelier bands. *Experimental Mechanics*. **46**(6):789-804, 2006
- [8] **J. Fehrenbach and M. Masmoudi.** *A fast algorithm for image registration,* *Comptes Rendus Mathématiques*, **346**(9-10):593--598, 2008.
- [9] **H. Leclerc and J.-N. Périé and S. Roux and F. Hild,** *Integrated digital image correlation for the identification of mechanical Properties,* *Lectures Notes in Computer Sciences*. **5496**:161-171, 2009
- [10] **Robert, L., Velay, V., Decultot, N. and Ramde, S.** *Identification of hardening parameters using finite element models and full-field measurements: some case studies,* *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. **74**(1):3-17, 2012.
- [11] **Garcia, D. and Orteu, J.-J. and Penazzi, L.** *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**:736-742, 2002.
- [12] **J.-E. Pierré, J.-C. Passieux, J.-N. Périé,** *Finite Element Stereo Digital Image Correlation: framework and mechanical regularization.* *Experimental Mechanics*. **53**(7):443-456, 2017.
- [13] **J.E. Pierré, J.C. Passieux, J.N. Périé, F. Bugarin, and L. Robert.** *Unstructured Finite Element-based Digital Image Correlation with enhanced management of quadrature and lens distortions,* *Optics and Lasers in Engineering*, **77**:44-53, 2016.
- [14] **J. Serra, J. E. Pierré, J. C. Passieux, J. N. Périé, C. Bouvet, B. 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**:224-244, 2017
- [15] **J.-C. Passieux, F. Bugarin, C. David, J.-N. Périé, L. Robert,** *Multiscale displacement field measurement using digital image correlation: Application to the identification of elastic properties.* *Experimental Mechanics*. **55**(1):121-137, 2015
- [16] **J.-C. Passieux and J.-N. Périé and M. Salaun,** *A dual domain decomposition method for finite element digital image correlation,* *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **102**(10):1670-1682, 2015.
- [17] **Bouclier, R. and Passieux, J.-C.** *A domain coupling method for finite element digital image correlation with mechanical regularization: Application to multiscale measurements and parallel computing.* *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **111**(2):123-143, 2017.
- [18] **J.C. Passieux, R. Bouclier and J.N. Périé.** *A Space-Time PGD-DIC Algorithm: Application to 3D Mode Shapes Measurements.* *Experimental Mechanics*, 1-12, 2018.
- [19] **J. Serra.** Prix Lopez-Loreta 2018. <https://www.aerobuzz.fr/breves-industrie/joel-serra-laureat-de-la-fondation-lopez-loreta/>
- [20] **J. Serra** – Site internet du projet VIRTUOSE - <https://websites.isae-superaero.fr/virtuose/>