



Mesure de champs couplés visible et infra-rouge pour la détection de l'endommagement dans les composites stratifiés sous chargements complexes

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 aéronefs. 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 instrumentés (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, Infrarouge, 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.

La thermographie infrarouge est utilisée dans le suivi des essais en température, mais également à l'ambiante pour détecter et suivre l'endommagement. En effet, le dégagement d'énergie produit par la rupture du matériau est détectable sous forme de chaleur. Pour permettre de mieux caractériser cet endommagement, il est important de mettre en corrélation l'information thermique et la cinématique de l'essai (Figure 1).

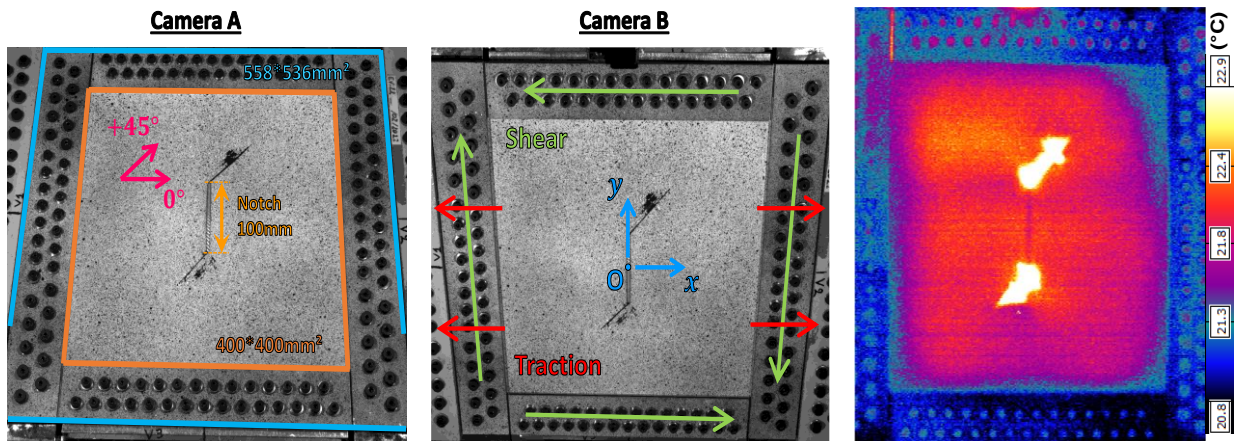


Figure 1: Plate sample geometry and directions on the VERTEX test rig, viewed through both optical cameras used for digital image stereo-correlation (5 Mpx, 2 fps) and the infrared camera (320x256 px, 100 fps), during crack propagation.

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 reprojction), 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] ou de faire d'envisager la fusion d'informations issus de modalités d'images différentes [11].

Objectifs

La CIN multimodale 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. Il est important d'exprimer les quantités mesurées dans un repère commun pour faire dialoguer les deux.

Dans le cas de la mesure cinématique, le mouchetis permet d'établir un lien entre un point matériel et son déplacement ou cours du temps, en « fixant » la texture de l'objet. Ce lien n'est pas forcément présent dans les autres modalités. Pour les observations infrarouges (IR) par

exemple, ce mouchetis de peinture est transparent, et il n'existe alors pas de texture permettant de suivre un point matériel. Il y a donc un « décalage » entre la position du point mesuré à chaque instant et la position des points matériels, on ne peut pas simplement comparer les cartes de déplacements et celles de l'échauffement.

Une opération d'advection du champ thermique mesuré est nécessaire afin de garantir que les mesures sont bien exprimées au niveau des points matériels considérés, c'est l'objet du stage proposé. La formulation de la corrélation utilisée permet d'exprimer naturellement le problème au niveau des points matériels, cependant, le modèle de caméra IR (ici principalement sa position) doit être calibré pour pouvoir la prendre en compte.

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, dont la mesure IR. Le stage vise à compléter le développement de cette méthode et à l'utiliser pour l'étalonnage de système (IR + visible) sur des cas plus complexes du projet. L'objectif final étant d'obtenir une carte commune IR+cinématique afin de mieux identifier les zones endommagées.

Profil

Un candidat possédant une formation en mécanique ou 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 [17]. 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 [18]. Le stage sera encadré par John-Eric Dufour (ICA). La durée du stage est de 6 mois avec un démarrage en Mars-Avril 2023. 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@insa-toulouse.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] **Ali Charbal**, *Mesure de champs thermomécaniques pour l'étude de la fatigue par chocs thermiques*. Thèse de doctorat. Université Paris Saclay (COMUE), 2017.
- [12] **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.
- [13] **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.
- [14] **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.
- [15] **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
- [16] **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
- [17] **J. Serra**. Prix Lopez-Loreta 2018. <https://www.aerobuzz.fr/breves-industrie/joel-serra-laureat-de-la-fondation-lopez-loreta/>
- [18] **J. Serra** – Site internet du projet VIRTUOSE - <https://websites.isae-supaero.fr/virtuose/>