
Corrélation d'Images Volumiques : un outil clé pour l'analyse des composites tissés 3D

Arturo Mendoza*^{1,2}, Julien Schneider³, Jan Neggers⁴, and Stéphane Roux⁵

¹SAFRAN [Paris] – Safran Group – France

²Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay – CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR9026 – France

³Safran Aircraft Engines – SAFRAN (FRANCE) – France

⁴Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay (LMPS) – Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France., Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France., Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS – Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France – France

⁵Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay – Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay – France

Résumé

Résumé

Cette étude explore l'utilisation de la Corrélation d'Images Volumiques (CIV) pour mieux comprendre et maîtriser la fabrication des composites tissés 3D, appliquée aux aubes de soufflante du moteur LEAP. Deux cas d'application principaux sont proposés pour illustrer les défis à relever sur des aubes expérimentales.

Le premier cas s'intéresse à la variabilité du textile entre pièces issues du même procédé. Ici, la CIV permet de comparer des pièces nominalement identiques, malgré des différences métriques fines. Une stratégie d'initialisation spécifique a été développée pour éviter les désalignements locaux. Et le second cas concerne la mesure des déformations résiduelles, afin de caractériser les contraintes internes générées lors du moulage par transfert de résine (RTM). La difficulté repose sur l'identification des déplacements très faibles, compliquée par les artefacts tomographiques.

1. Introduction

Dans le secteur aéronautique, l'utilisation de matériaux combinant légèreté et résistance est primordiale. Les composites tissés 3D répondent à ces critères en raison de leurs propriétés spécifiques remarquables.

Leur procédé de fabrication comprend deux phases principales : *(i)* le tissage du renfort, où les torons de chaîne et de trame sont entrelacés selon des motifs de tissage optimisés pour

*Intervenant

maximiser les propriétés mécaniques ; et (ii) l'ajout de la matrice via moulage par transfert de résine (RTM), où le renfort tissé est placé dans un moule fermé, puis la résine est injectée sous conditions de température et pression contrôlées.

Le procédé de fabrication de composants aéronautiques en composites tissés 3D comporte naturellement des variabilités intrinsèques, maîtrisées grâce à des procédés industriels optimisés et à des contrôles non destructifs rigoureux. Toutefois, pour soutenir le développement des futurs composants et garantir une amélioration continue du procédé, une caractérisation plus fine de ces variations est essentielle. Cette étude se concentrera sur deux phénomènes clés : d'une part les fluctuations de positionnement durant le tissage, et d'autre part les contraintes thermomécaniques générées pendant le refroidissement dans le RTM.

2. Méthodes

2.1 Corrélation d'images

La Corrélation d'Images Volumiques (CIV) (1) vise à déterminer la transformation spatiale nécessaire pour relier des paires d'images volumiques, comme celles obtenues par tomographie. Basée sur l'hypothèse de conservation de niveaux de gris, la CIV cherche le champ de déplacement qui minimise la norme des résidus

. (1)

entre une image de référence et une image déformée . Pour améliorer le conditionnement est généralement contraint à une base cinématique réduite comme celle formée par les fonctions de forme des éléments finis (EF). Enfin, la résolution numérique repose classiquement sur la linéarisation de la formulation variationnelle et un schéma itératif. Alors, une bonne estimation initiale du déplacement accélère la convergence, renforce la stabilité et limite les minima locaux.

2.2 Régularisation mécanique

La régularisation mécanique (2) consiste à ajouter un terme de pénalisation lié à l'écart à l'équilibre, guidant ainsi la solution vers un champ de déplacements physiquement plausible. Ce procédé est contrôlé par un paramètre, la longueur de régularisation , qui définit la zone d'influence du terme de pénalisation. Ce paramètre peut être utilisée pour obtenir une solution via une démarche dite pyramidale ou multi-échelle. Dans cette stratégie, chaque étape moins régularisée est initialisée à partir de la solution obtenue au palier précédent, plus fortement régularisé avec des plus élevées.

2.3 Correction des niveaux de gris

La formulation étendue de la CIV permet gérer des variations locales de niveaux de gris indépendantes du déplacement, telles que les artefacts tomographiques induits par le durcissement du faisceau. Elle consiste à assouplir l'hypothèse de conservation des niveaux de gris (4) :

. (2)

avec les champs de correction additionnels et parfois appelés luminosité et contraste.

La résolution est généralement effectuée à l'aide d'une optimisation par point fixe qui alterne entre une étape considérant uniquement les effets des déplacements et une autre prenant en

compte uniquement les variations des niveaux de gris.

2.4 Recalage avec un modèle

Pour faciliter le dialogue essai-calcul, il est pertinent d'utiliser le même maillage EF pour les mesures CIV et la simulation. Il est donc nécessaire une étape de pré-traitement pour aligner le modèle EF sur l'image de référence, ce qui peut s'avérer délicat pour des composants à géométries complexes.

La CIV peut être utilisée pour recalibrer une version binaire de l'image de référence avec une image binaire issue de la discrétisation du maillage EF. Il est important noter que seules les frontières des régions binaires guident efficacement le recalage. Alors, une approche pyramidale est employée : commençant par des filtrages gaussiens de grande largeur puis en diminuant progressivement leur étendue. Ainsi, une CIV fortement régularisée peut s'affranchir des bords doux pour identifier le déplacement progressivement.

3. Résultats des cas d'études

3.1 Analyse topologique du tissage

L'objectif de ce cas d'étude est de mettre en évidence les différences métriques issues d'un procédé de tissage expérimental appliqué à deux composants nominale-ment identiques. Il est alors proposé d'utiliser la CIV pour mesurer ces écarts (3). Néanmoins, l'application directe de la CIV sur ces matériaux très périodiques converge à des déplacements apparemment cohérents par fragments, mais marqués par " dislocations " aux frontières de ces zones. En effet, l'algorithme reste piégé dans des minima locaux, produisant des déplacements décalés d'un multiple de la période de tissage.

La méthode de correction des régions décalées s'appuie sur un schéma itératif : (i) détection des zones via la segmentation des dislocations (visibles dans les résidus) ; (ii) pour chaque région identifiée, formulation de plusieurs hypothèses de décalage pour tester des multiples des périodes du tissage (dans les trois orientations) ; (iii) évaluation de ces hypothèses et sélection du déplacement qui minimise le résidu le plus, lequel est alors appliqué comme correctif ; et (iv) application de la CIV avec la composition des déplacements par zones comme initialisation pour le calcul.

Une heuristique est proposée : la plus grande région est considérée comme ayant le déplacement correct. La méthode de correction consiste alors à repousser progressivement les dislocations vers les bords de la zone d'intérêt. Cette stratégie est répétée jusqu'à la disparition des dislocations ou jusqu'à ce qu'elles atteignent la frontière et ne puissent plus être déplacées. Dans ce dernier cas, une extrapolation simple du champ de déplacement de la région correcte permet de générer une nouvelle estimation initiale du déplacement qui servira pour une dernière application de la CIV.

Enfin, l'approche a été mise en œuvre sur six aubes de soufflante issues de ce procédé expérimental, avec une d'elles utilisée comme référence (aléatoirement) pour les cinq autres. Le **Figure 1** présente la série de résultats pour une paire de corrélation. Le résidu initial est issu d'un alignement manuel des volumes tomographiques. Le résidu met en évidence des dislocations délimitant deux régions relativement étendues ainsi que plusieurs zones plus petites en périphérie. Le résidu illustre la correction appliquée à l'une des grandes régions, repoussant les dislocations fines vers la périphérie. Enfin, le résidu final correspond à la procédure d'extrapolation suivie par une CIV.

FIGURE 1. Evolution des résidus pour une paire de corrélation : les dislocations visibles dans les premières itérations sont progressivement repoussées jusqu'à être éliminées complètement.

3.2 Déformations résiduelles du composite

L'objectif de ce cas d'étude est d'évaluer l'état des contraintes internes résiduelles générées par le procédé RTM sur des aubes de soufflante expérimentales. Ceci a été évalué avec une campagne expérimentale lors de laquelle les pièces ont été découpées au jet d'eau afin d'induire des déformations résiduelles. Des images tomographiques ont été acquises avant et après la découpe, lesquelles seront analysées par CIV (4). Les sept plans de découpe sont visibles dans la **Figure 2** pour une paire d'aubes, ils délimitent huit régions distinctes le long des torons de trame.

Vu que l'intérêt de l'étude porte sur le comportement à l'échelle du composant, et que les déformations recherchées sont extrêmement faibles, une zone d'observation étendue est nécessaire. Ceci implique une faible résolution, et artefacts du durcissement des faisceaux et cône d'observation.

Pour faire face à ces difficultés, un protocole décomposé en quatre phases principales est proposé : (i) prétraitement, (ii) recalage initial entier, (iii) recalage initial par région, et (iv) recalage fin par région.

La première étape implémente la stratégie de recalage par modèle décrite précédemment, afin d'aligner le maillage EF existant sur l'image post-découpe. Le maillage ainsi aligné est découpé pour reproduire les plans de coupe physiques, pour obtenir un maillage EF distinct par région. La deuxième étape consiste à réaliser un recalage rigide entre l'image de l'aube post-découpe (référence) avec l'image pré-découpe. Une correction des niveaux de gris est appliquée à convergence afin pour gérer les artefacts. La troisième étape s'appuie sur les maillages par région pour réaliser des recalages rigides indépendants sur chaque zone. La quatrième étape applique la CIV par région utilisant le schéma pyramidal. L'approche a été mise en œuvre sur trois aubes expérimentales, fabriquées selon deux procédés distincts. La **Figure 2** présente (vertical) dans un plan situé à mi-épaisseur d'une des aubes. Malgré des calculs distincts pour chaque région, les champs obtenus sont continus à l'échelle de l'aube, ceci valide les résultats obtenus.

FIGURE 2. Déformation (vertical) pour une aube après relaxation post-découpe

4. Discussion finale

Cette étude illustre l'intérêt de la CIV pour l'analyse du procédé de fabrication des composites tissés 3D pour des composants aéronautiques. Les cas d'étude illustrent sa capacité à caractériser et mesurer les variabilités naturelles du procédé malgré les défis liés à l'acutisations et aux déplacements complexes. Ces résultats ouvrent la voie à une meilleure maîtrise et optimisation des procédés de fabrication avec la CIV comme un outil incontournable pour le dialogue essai-calcul et le contrôle non destructif.

Remerciements

Merci à K. Parvathaneni, L. Turpin et Y. Yasothan pour leurs contributions dans le cadre de leurs postdoctorats, ainsi qu'à R. Touze, A. Pillet et K. Aftisse pour leur investissement durant leurs stages. Votre implication a été déterminante pour le bon déroulement de ce projet et la qualité des résultats.

Références

- (1) S. Roux, F. Hild, P. Viot, D. Bernard. *Three-dimensional image correlation from X-ray computed tomography of solid foam*. Composites Part A: Applied science and manufacturing, 2008
- (2) A. Mendoza, J. Neggers, F. Hild, S. Roux. *Complete mechanical regularization applied to digital image and volume correlation*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019

- (3) A. Mendoza, J. Schneider, E. Parra, S. Roux. *The correlation framework: Bridging the gap between modeling and analysis for 3D woven composites*. Composites Structures, 2019
- (4) Y. Yasothan, L. Turpin, J. Neggers, J. Schneider, A. Mendoza, S. Roux. *Residual stress measurement method for 3D woven composite fan blades by Digital Volume Correlation*. Submitted, 2025