

## Caractérisation du comportement d'une structure lattice composite assemblée

### *Characterisation of the behaviour of an assembled composite lattice structure*

F.-X. Irisarri, C. Huchette, J. Luco, S. Boukobza et J. M. Garcia

DMAS, ONERA, Université Paris Saclay  
F-92322 Châtillon France

e-mail : [francois-xavier.irisarri@onera.fr](mailto:francois-xavier.irisarri@onera.fr), [cedric.huchette@onera.fr](mailto:cedric.huchette@onera.fr), [sarah.boukobza@onera.fr](mailto:sarah.boukobza@onera.fr), [juan-manuel.garcia@onera.fr](mailto:juan-manuel.garcia@onera.fr)

#### Résumé

Dans cette étude, un concept de structure architecturée composite carbone / époxy développé par l'ONERA et NOBRAK est présenté, basé sur un motif octaédrique. Les composants élémentaires fabriqués par TFP sont assemblés entre eux à l'aide de boulons qui participent au comportement mécanique de la structure. Dans ce travail, deux méthodes expérimentales basées sur la corrélation d'images numériques sont utilisées pour mettre en évidence l'influence des assemblages sur le comportement en traction et en flexion de ce type de structures, et proposer une solution de dialogue essais calculs dans l'objectif de construire et identifier un modèle de dimensionnement.

#### Abstract

In this study, a novel concept of architected composite carbon/epoxy structure developed by ONERA and NOBRAK is presented, based on an octahedral pattern. The elementary components, manufactured by TFP, are joined together using bolts that contribute to the mechanical behavior of the structure. In this work, two experimental methods based on digital image correlation are used to highlight the influence of the joints on the tensile and flexural behavior of this type of structure, with the aim of proposing and identifying a sizing model through a dialogue between experiments and calculations.

**Mots Clés :** structure lattice, assemblage, corrélation d'images numériques, amplification de mouvement, UV mapping  
**Keywords :** lattice structure, assembly, image correlation, motion amplification, UV mapping

### 1. Assembler de grandes structures composites à partir d'éléments répétitifs

Les applications aéronautiques et spatiales reposent sur la recherche de matériaux et de structures présentant une rigidité et une résistance exceptionnellement élevées pour une faible densité. De très nombreuses structures sont aujourd'hui réalisées en matériaux composites à fibres de carbone, mais la conception et la fabrication de grandes structures constitue un exercice complexe et coûteux, réservé à des applications à très forte valeur ajoutée. Le concept de structures architecturées lattices assemblées à partir de composants élémentaires proposé par Cheung et Gersehnfeld [1] constitue un paradigme de conception alternatif, basé sur l'assemblage de composants élémentaires répétitifs, peu coûteux et produits en série. Ce concept a été mis en œuvre à l'échelle d'une maquette d'aile volante de 4 m d'envergure [2]. Il conduit à multiplier les assemblages, dont l'étude devient cruciale pour caractériser le comportement d'ensemble de la structure architecturée.

Cette étude se focalise sur un concept de structure architecturée composite carbone / époxy développée par l'ONERA et NOBRAK. Sous des conditions de charge spécifiques, les joints subissent de légers déplacements et rotations, ce qui entraîne une réponse macroscopique non linéaire et pose des difficultés pour la modélisation de leur comportement. En raison de la complexité de leur géométrie, il peut être difficile d'observer et de mesurer les déplacements et les rotations de ces structures, en particulier par des moyens optiques. À notre connaissance, seules quelques études portent sur la caractérisation et la modélisation du comportement mécanique des structures composites architecturées. Nous présentons dans la suite la structure étudiée et la mise en œuvre de

deux techniques d'analyse des résultats expérimentaux, l'amplification de mouvement et la corrélation d'images numériques, dans l'objectif d'alimenter et valider les modèles numériques.

## 2. Une structure lattice composite à motif octaédrique

Le concept étudié dans ces travaux est une structure réalisée en matériau composite avec fibre de carbone Tenax-E HTS40 et résine époxy Resoltech 1050, avec un taux de fibre de 50 %. Les composants élémentaires sont fabriqués par NOBRAK par le procédé TFP (*tailored fiber placement*). Le motif de base est un motif octaédrique inscrit dans un cube de 120 mm de côté. Les assemblages sont réalisés par des boulons M8, en PA66 (Fig. 1) ou en acier pour les besoins de l'étude.

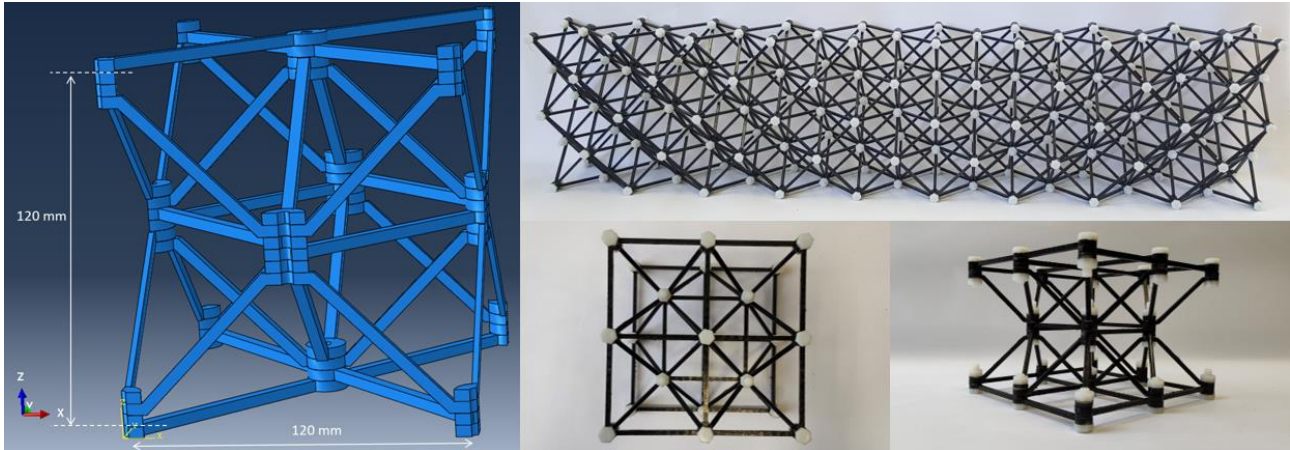


Fig. 1. Structures lattices architecturées à motif octaédrique.

## 3. Configurations expérimentales

Deux campagnes expérimentales ont été réalisées : l'une sur des essais de traction / compression et l'autre sur des essais de flexion. La campagne de traction a été menée sur une machine électromécanique standard de capacité maximale de 1 t, avec une consigne de déplacement à une vitesse de 0,5 mm/min. La campagne de flexion a été réalisée sur la plateforme Stephen, composée d'un marbre de  $1000 \times 1500 \text{ mm}^2$ , alésé pour fixer des éléments sur le plan de travail. Un vérin électrique de 4000 N de capacité et 150 mm de course est utilisé pour introduire l'effort, avec des équerres de fixation permettant diverses configurations d'essais. Lors des essais de flexion sur des structures de grande envergure, l'effort est appliqué à l'aide d'un câble et d'un système de poulies, avec instrumentation du câble et du vérin à l'aide de capteurs d'effort. Les deux campagnes d'essais sont instrumentées avec des caméras optiques pour l'observation des champs cinématiques 3D à l'aide de la stéréo-corrélation d'images (SDIC). L'observation des champs de déplacements est réalisée avec une méthode de corrélation d'images classique à l'aide du logiciel *ViC3D* développé par *Correlated Solutions*.

## 4. Analyse par amplification de mouvement

Afin de mieux comprendre le comportement des structures, une méthode d'amplification de mouvement est proposée. Cette méthode repose sur l'estimation des champs de déplacements 2D en utilisant le protocole DeepFlow [3]. Cette technique permet d'obtenir une estimation dense des déplacements horizontaux et verticaux, c'est-à-dire, une mesure des composantes  $u$  et  $v$  pour chaque pixel. Une fois ces déplacements estimés, l'image initiale est remappée en appliquant les champs de déplacements  $u$  et  $v$ , amplifiés par un facteur choisi. Enfin, l'image remappée est ajustée pour correspondre aux dimensions de l'image originale, permettant ainsi de visualiser la déformée de la structure avec un effet d'amplification.

La Fig.2 montre la courbe de force-déplacement obtenue lors de l'essai de flexion d'un motif  $1 \times 1 \times 1$ . La courbe révèle un comportement fortement non linéaire. Pour mieux comprendre l'origine de cette non-linéarité, la méthode d'amplification de mouvement est appliquée à huit niveaux de déplacement imposé, représentés par des points numérotés sur la courbe macroscopique. Entre les niveaux 1 et 4, où le comportement reste quasi-linéaire, la déformation évolue proportionnellement. Une tendance similaire est observée entre les instants 7 et 8. Toutefois, entre les instants 4 et 7, la courbe présente des non-linéarités marquées. Durant cette phase, l'image amplifiée de la structure sous charge montre un cisaillement prononcé au niveau du nœud central, ainsi qu'une rotation d'ensemble de la fixation. L'effort appliqué sur la structure semble excéder la limite élastique du filetage de la fixation nylon, provoquant des chutes de force visibles sur la courbe de comportement macroscopique. Des déplacements significatifs sont également observés lorsque la structure est sollicitée en traction dans la direction x, avec une cinématique différente impliquant le cisaillement de la fixation, mais aussi des rotations des composants autour de l'axe principal de la vis. Les faibles propriétés de la vis nylon par rapport aux composants composites exacerbent ces phénomènes. Bien que l'amplification des déplacements ne permette pas de mesure quantitative, ces résultats permettent d'identifier les phénomènes significatifs et soulignent la nécessité de modéliser la raideur de l'assemblage numériquement pour capturer le comportement d'ensemble de la structure.

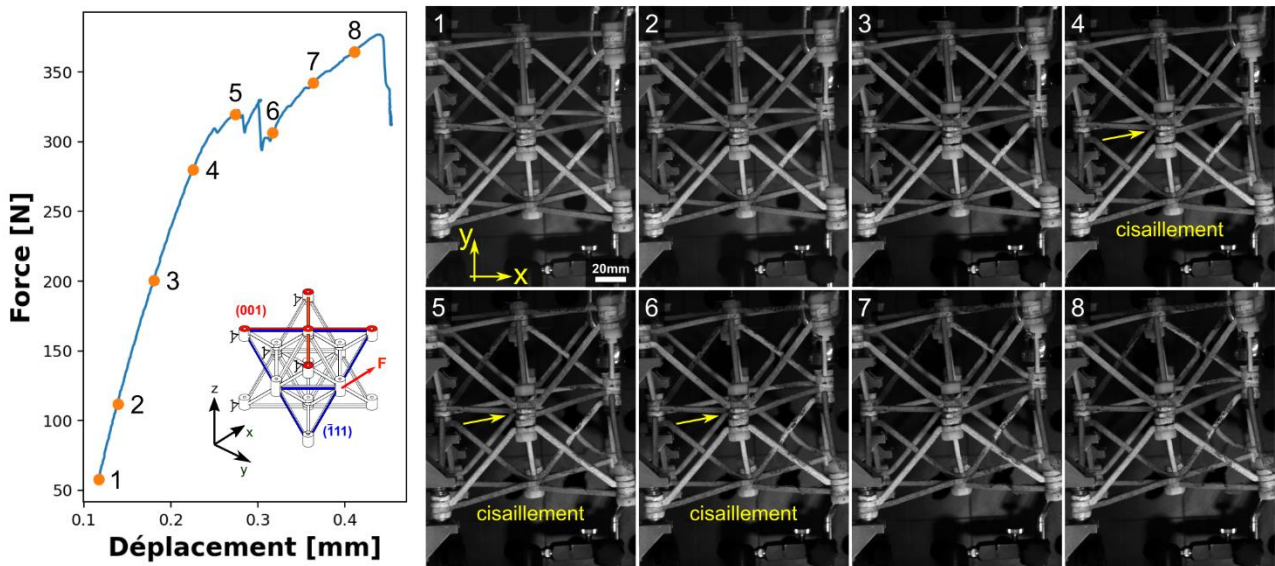


Fig. 2. Courbe force-déplacement obtenue lors d'un essai de flexion sur un motif  $1 \times 1 \times 1$ , avec une de la déformée par un facteur de 20.

## 5. Corrélation d'images et dialogue essais calculs

Afin de comprendre et de modéliser le comportement de ces structures, nous avons cherché à simuler le comportement en traction d'un motif  $1 \times 1 \times 1$  et de le comparer aux essais élémentaires réalisés sur ce motif en traction. La difficulté de la comparaison tient ici dans l'estimation des conditions aux limites réelles appliquées à la structure mais également dans le choix des quantités à comparer. Tout d'abord, en raison de la géométrie de la structure lattice, la densité de points de mesure par CIN est dans les faits très limitée comme le montre la Figure 3. Ensuite, contrairement à un essai de traction sur éprouvette pleine directement prise dans des mors, le passage des efforts est ici assuré par des fixations situées aux sommets de la cellule, liées à une plaque à laquelle le déplacement de la traverse est appliqué (Figure 3).

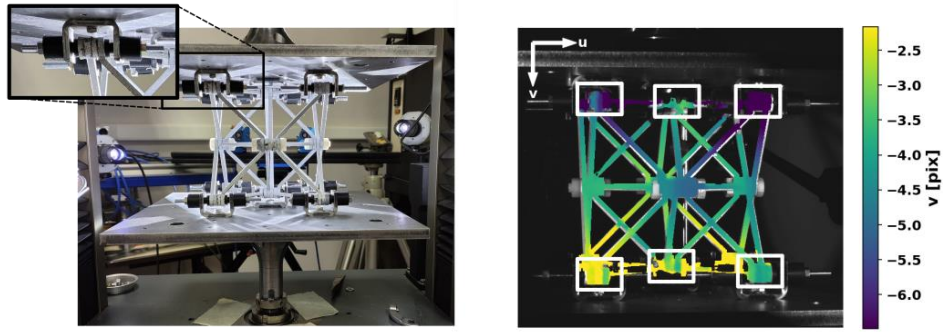


Fig. 3. Présentation du montage de l'essai de traction sur un motif  $1 \times 1 \times 1$  et de la densité des points de mesure obtenus par le système de corrélation d'image numérique.

L'interface entre la plaque et le motif présente un comportement complexe, avec des jeux et une certaine souplesse. Plutôt que de simuler ces jonctions, nous calculons un déplacement correspondant à la moyenne des champs mesurés par SDIC dans les zones d'accroche de la structure à la plaque (au niveau des cadres blancs sur le champ de déplacement de l'image de droite de la Figure 3). Ce déplacement est utilisé en condition aux limites d'un calcul EF sur la cellule et introduit au niveau de chaque assemblage via un nœud maître relié par un couplage cinématique rigide à des nœuds esclaves du maillage. La solution est déterminée par une combinaison linéaire de trois modes élémentaires par point d'attache de la structure (déplacement normal, tangentiel et rotation) comme le montre la Figure 4.

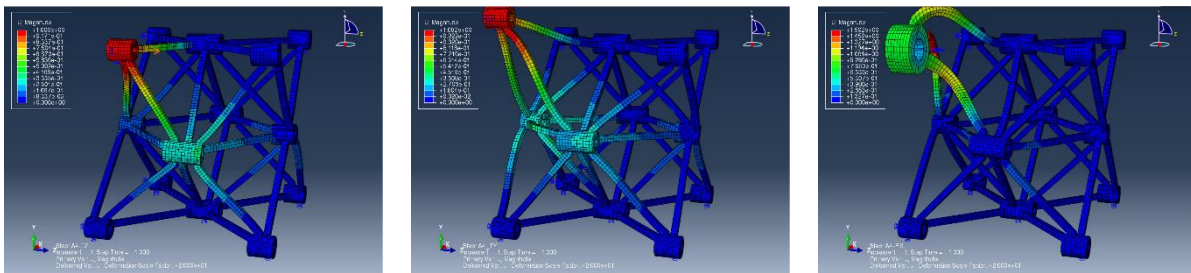


Fig. 4. Champs de magnitude du déplacement pour l'application (a) d'un déplacement transverse, (b) d'un déplacement vertical et (c) d'une rotation pour un point d'attache du motif.

Le modèle employé ici est géométriquement proche de la réalité de la pièce, mais très simplifié au niveau des jonctions, dont les différentes pièces sont fusionnées. La simulation numérique s'avère donc bien plus rigide que l'essai. Afin d'illustrer les erreurs entre le champ mesuré et celui calculé, nous comparons directement les images prises par les systèmes de corrélation à celles générées artificiellement à l'aide d'une technique de mappage UV combinée à une technique permettant de déformer l'image de référence à partir du résultat de la simulation EF de l'essai [1]. Un exemple de cette comparaison est présenté sur la Figure 5 qui montre comment l'application du texturage de l'image de référence sur le maillage déformé permet de générer une image réaliste en utilisant le modèle de sténopé de la caméra et de la comparer directement en termes de niveau de gris avec l'image acquise durant l'essai. La cartographie des erreurs met en évidence les glissements au niveau des interfaces entre les pièces liées, qui échappe au modèle simplifié utilisé. La différence de raideur entre le comportement simulé et celui observé découle donc en grande partie du comportement des assemblages qui est ici prépondérant dans la réponse structurale.

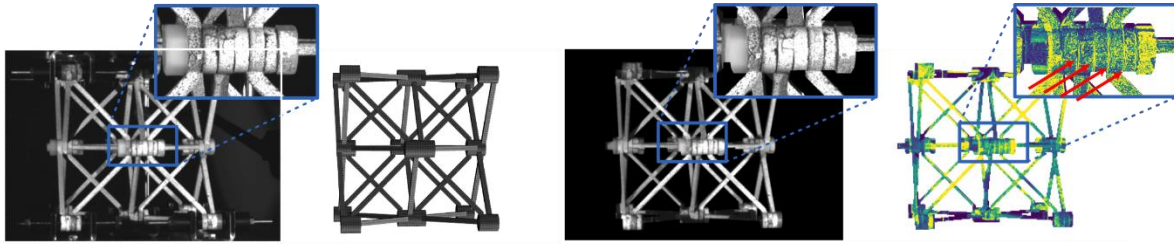


Fig. 5. Comparaison (à droite) entre l'image acquise par la caméra #1 du système de corrélation d'images (à gauche) avec l'image générée par simulation et UV mapping (au centre).

## 6. Conclusions et perspectives

Dans ce travail, un concept de structure architecturée a été proposé et réalisée à partir de l'assemblage de composants élémentaires fabriqués par NOBRAK par le procédé TFP. Chaque composant est réalisé en composite à fibre de carbone longue renforcé d'une résine époxy. La caractérisation et la modélisation de ce type de structures est particulièrement difficile car elle demande de mettre en place de nouveaux dispositifs expérimentaux et de approches expérimentales pour comprendre leur comportement. Dans ce travail, deux méthodes d'analyse sont proposées pour exploiter les images acquises durant les essais de flexion ou de traction réalisés sur un motif  $1 \times 1 \times 1$  de la structure lattice proposée. La première méthode met à profit le code DeepFlow permettant l'estimation de champs denses des déplacements pour générer des images amplifiant les déformées observées par les essais. Cette méthode a par exemple permis de mettre en évidence des phénomènes de glissement au niveau des assemblages. La seconde méthode quant à elle, utilise également les résultats de corrélation d'images mais cette fois-ci pour modéliser le comportement des structures. L'originalité de cette méthode réside dans l'usage de mappage UV pour comparer directement les images acquises avec celles générées virtuellement en utilisant un calcul EF dont les conditions aux limites ont été mesurées au niveau des points d'attaches du motif par CIN. Cette méthode confirme la nécessité de prendre en compte le comportement des interfaces pour estimer la raideur effective de la structure. Ces méthodes seront mises en œuvre sur des structures de plus grandes dimensions constituées de motifs répétés, pour lesquelles il devient difficile d'observer l'ensemble de la cinématique de la structure. Il s'agira également de proposer et identifier un modèle d'assemblages adapté, en s'appuyant sur ces méthodes.

## Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet de recherche SStructures ARchitecturées ACTives financé par l'ONERA. Les auteurs remercient NOBRAK et en particulier Aymeric Azran, Valia Neury et Romain Fré pour la fabrication des pièces.

## Références

- [1] K. C. Cheung et N. Gershenfeld, « Reversibly Assembled Cellular Composite Materials », *Science*, vol. 341, n° 6151, p. 1219-1221, sept. 2013, doi: 10.1126/science.1240889.
- [2] N. B. Cramer *et al.*, « Elastic shape morphing of ultralight structures by programmable assembly », *Smart Materials and Structures*, vol. 28, n° 5, p. 055006, mai 2019, doi: 10.1088/1361-665X/ab0ea2.
- [3] P. Weinzaepfel, J. Revaud, Z. Harchaoui, et C. Schmid, « DeepFlow: Large Displacement Optical Flow with Deep Matching », in *2013 IEEE International Conference on Computer Vision*, Sydney, Australia: IEEE, déc. 2013, p. 1385-1392. doi: 10.1109/ICCV.2013.175.
- [4] « Chapter 7 - Advanced Computer Graphics — VTK Book ». Disponible sur: <https://book.vtk.org/en/latest/VTKBook/07Chapter7.html>