

Homogénéisation des propriétés élastiques de structures composites tubulaires obtenues par enroulement de ruban

Homogenization of the elastic properties of tubular composite structures obtained by tape winding

T.Chazeau^{1,2,3}, S.Essongue^{1,2}, M.Montemurro^{1,2} et A.Catapano^{1,2}

1 : Université de Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295
F-33400, Talence, France
e-mail : anita.catapano@bordeaux-inp.fr

2 : Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Universite, I2M, UMR 5295
F-33400, Talence, France
e-mail : marco.montemurro@ensam.eu

3 : OLLOW
7 Av. de Guitayne, F-33610 Canéjan, France
e-mail : thomas.chazeau@ollow-tech.com

Résumé

Le travail proposé se concentre sur l'étude du comportement mécanique des structures composites creuses générées par un procédé d'enroulement de rubans.

De la même manière que dans les pièces composites obtenues par Automated Fiber Placement, le procédé d'enroulement de ruban est responsable de la présence de singularités, principalement de gaps (un espacement entre les rubans UD). Au cours de la thermo-consolidation, ces espaces sont comblés par la matrice liquide provenant des rubans. La migration de la matrice vers les gaps entraîne une variation de la fraction volumique de fibres du centre du ruban vers le gap. Ce phénomène a un impact direct sur les propriétés équivalentes du matériau de l'échelle mésoscopique (du pli équivalent) à celle macroscopique (de la structure). Pour déterminer les propriétés effectives du pli, une stratégie d'homogénéisation est proposée dans ce travail.

La structure tubulaire étant caractérisée par une courbure non négligeable, la stratégie d'homogénéisation à l'échelle mésoscopique est développée pour une cellule unitaire courbée [1]. L'efficacité de la stratégie est prouvée via la comparaison des résultats numériques de l'homogénéisation avec ceux d'un modèle 3D d'une structure tubulaire en full-scale.

Abstract

The proposed work focuses on the mechanical behavior of hollow composite structures produced by a tape winding process. Similar to the presence of gaps in composite parts manufactured through Automated Fiber Placement (AFP), the tape winding process introduces singularities, primarily "gaps" (i.e., spacing between unidirectional tapes). During thermo-consolidation, these gaps are filled by the liquid matrix originating from the tapes. The migration of the matrix into these gaps leads to a non-uniform variation in the fiber volume fraction from the center of the tape to the gap.

This phenomenon directly affects the equivalent properties of the material, transitioning from the mesoscale (at the ply level) to the macroscale (the scale of the tubular structure). To determine the effective properties of the ply at the mesoscale, a multi-scale homogenization strategy [2] is proposed in this work.

Given the non-negligible curvature of the tubular structure, the mesoscale homogenization strategy is specifically developed for a curved unit cell [1]. The effectiveness of the proposed strategy is demonstrated through comparisons between numerical results from the homogenization of the repetitive unit and those from a full-scale 3D model of a single-layer tubular structure.

Mots Clés : Structures composite tubulaire, enroulement de ruban, modélisation multi-échelle, conditions périodiques

Keywords : Tubular composite structures, tape winding, multi-scale-modelling, unit cell

1. Introduction

Les industries modernes sont de plus en plus attirées par les matériaux composites en raison de leurs propriétés exceptionnelles et de leurs applications variées. Pour faciliter un accès plus large à ces matériaux, de nouveaux procédés de fabrication continue, à la fois innovant et économiques, sont envisagés.

Le travail proposé se concentre sur l'étude du comportement mécanique des produits générés par un procédé novateur développé par l'entreprise française Ollow. Conçu spécifiquement pour consolider des bandes de composite à fibres longues unidirectionnelles (UD) en profils creux, la technologie de Ollow utilise un procédé de bobinage de bande particulier pour produire des structures tubulaires en composite à grande vitesse et à faible coût. L'objectif principal est de démocratiser l'utilisation des matériaux composites dans des applications courantes (trottinettes électriques, vélos, raquettes de tennis, etc.).

Cependant, tout comme le placement automatisé de fibres (AFP), le bobinage de bande inhérent à ce procédé peut entraîner la présence de singularités, notamment la présence de gap, c'est-à-dire d'espacements, entre les rubans déposés. Lors de la thermo-consolidation, ces espaces sont comblés par la résine liquide provenant des rubans. La migration de la matrice vers les gaps entraîne une variation non uniforme de la fraction volumique de fibres, depuis le centre du ruban jusqu'aux zones de gap. Ce phénomène influence directement les propriétés équivalentes du matériau, en passant de l'échelle mésoscopique (celle du pli équivalent) à l'échelle macroscopique (celle de la structure tubulaire). Pour évaluer les propriétés effectives du pli à l'échelle mésoscopique, une stratégie d'homogénéisation multi-échelle [2] est proposée dans ce travail.

Cette stratégie implique deux étapes d'homogénéisation. Tout d'abord, la transition de l'échelle microscopique des constituants à l'échelle mésoscopique du pli est réalisée à l'aide de la méthode d'homogénéisation classique basée sur l'équivalence d'énergie de déformation entre le volume élémentaire représentatif (VER) et le milieu homogène équivalent [3]. Grâce à des descripteurs statistiques [4, 5], les VER microscopiques sont générés à partir des données provenant de traitement d'image sur des micrographies d'échantillons de tubes [6]. Cette approche garantit que l'agencement spécifique des fibres et le gradient de fraction volumique qui en dérive dû à la présence d'interstices, est pris en compte à la plus petite échelle.

Ensuite, un modèle mésoscopique paramétré est généré pour déterminer les propriétés élastiques équivalentes d'un pli de la structure tubulaire, en considérant l'impact des singularités du procédé. Ces résultats sont ensuite intégrés dans la formulation du modèle macroscopique, traitant le stratifié comme une structure monocouche équivalente, avec une épaisseur et des propriétés matériaux dépendantes de la présence des singularités du procédé.

2. Stratégie d'homogénéisation multi-échelle

2.1. Echelle microscopique

Une étude statistique [4] [5] d'images prises au microscope optique a été menée précédemment afin de définir le VER à l'échelle microscopique qui fournit les données d'entrée du modèle à l'échelle supérieure par le biais d'une homogénéisation basée sur l'énergie moyenne. La microscopie (Figure 1) montre 2 des 3 zones engendrées par la gap qui sont une zone riche en fibres, une zone de transition et une zone riche en matrice.

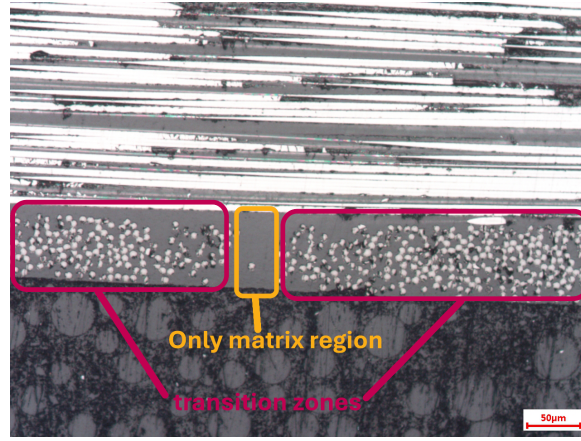


FIG. 1. – Microscopie d'un pli à 0° .

2.2. Echelle mésoscopique

A l'échelle mésoscopique, l'élément de volume périodique d'un pli (Figure 2) possède un rayon de courbure qui ne peut pas être négligé. Il est alors proposé d'effectuer une homogénéisation sur un volume périodique 3D caractérisé par une courbure cylindrique. Une telle géométrie entraîne une modification des conditions limites périodiques. En littérature il est possible de trouver quelques travaux dédiés à l'homogénéisation de structures tubulaires. Dans [1] propose une démarche d'homogénéisation basée sur l'application de contraintes et des déplacements périodiques. En s'inspirant de ces travaux, un nouveau jeu de conditions limites périodiques uniquement en déplacement est proposé afin d'obtenir des déformations unitaires Eq. 2 sur le volume en figure 2. Ces conditions s'appuient sur la loi de Hooke généralisée (Eq. 1) qui permet de calculer les différents termes du tenseur de rigidité (C) lorsque les tenseurs de déformations (ϵ) et de contraintes (σ) sont connus. Afin de simplifier les calculs des composantes C_{ij} , les conditions périodiques et les déplacements imposés font en sorte d'obtenir six cas de déformation unitaire (Eq. 2).

$$\begin{pmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{zr} \\ \sigma_{r\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{rr} \\ \epsilon_{r\theta} \\ \epsilon_{zz} \\ 2\epsilon_{\theta z} \\ 2\epsilon_{zr} \\ 2\epsilon_{r\theta} \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$(\epsilon) = \begin{pmatrix} 0.01 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\epsilon) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.01 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\epsilon) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.01 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\epsilon) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.01 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\epsilon) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.01 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\epsilon) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.01 \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 2})$$

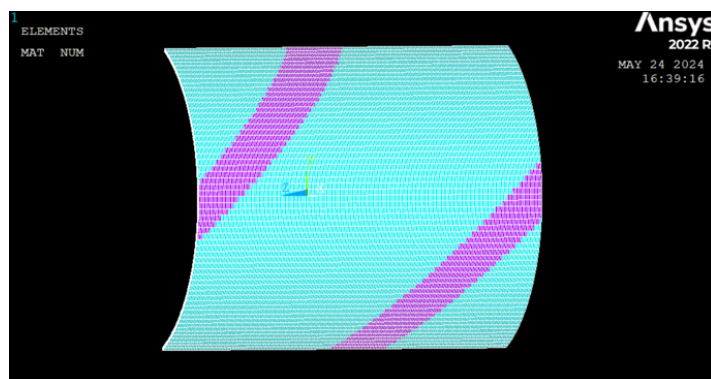


FIG. 2. – Cellule unitaire d'une couche OLLow à 45°.

Les premiers résultats d'homogénéisation numérique réalisés sur le volume périodique de la Figure 2 sont présentés en Figure 3. Ce graphique montre l'évolution des modules apparents en coordonnées géométriques (E_r , E_θ , E_z) obtenus en variant l'angle de dépose du ruban par rapport à l'axe longitudinal z du repère cylindrique.

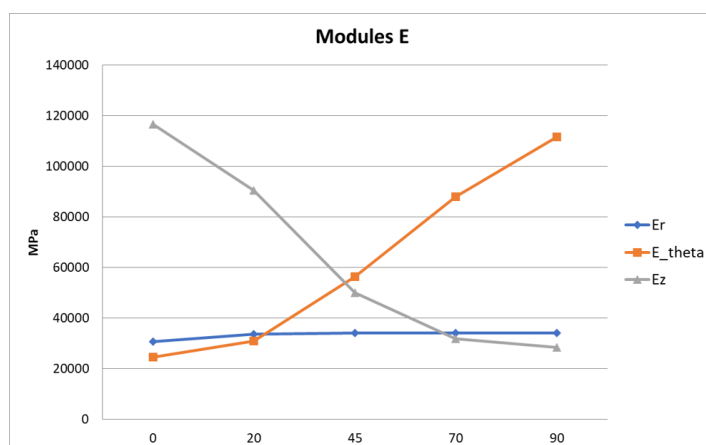


FIG. 3. – Modules de Young d'une couche pour un angle de ruban variant de 0 à 90°.

3. Modèle de validation

Un modèle éléments finis de type shell est proposé dans le but de vérifier les données homogénéisées obtenues. Pour cela, un tube complet mono-couche est modélisé de deux façons ; l'une conserve la mésostructures de base formée par deux matériaux (Figure 4) et l'autre présente un tube homogène mono-matériaux dont les propriétés sont celles données par l'homogénéisation à l'échelle mésoscopique. Ces deux structures, lorsqu'elles sont soumises à des simulations de tests mécaniques classiques (traction, torsion, etc), permettent de comparer le comportement des deux modèles à l'échelle mésoscopique et donc de donner une première validation des conditions périodiques en coordonnées cylindriques développées dans le cadre de ce travail.

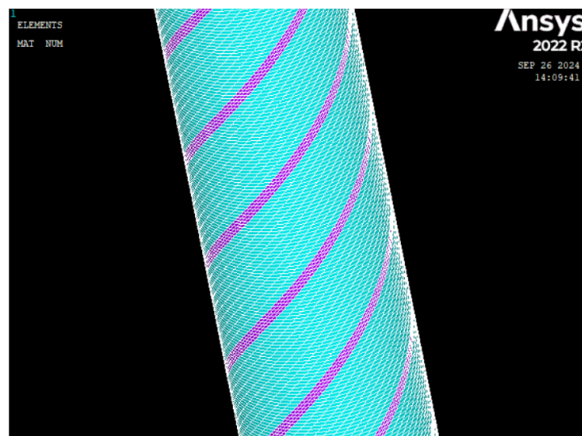


FIG. 4. – Structure mésoscopique d'un tube mono-couche.

Références

- [1] Lionel Gélébart. Conditions aux limites périodiques pour l'homogénéisation numérique de tubes composites. *Comptes Rendus - Mécanique*, 339 :12–19, 1 2011.
- [2] Anita Catapano and Marco Montemurro. A multi-scale approach for the optimum design of sandwich plates with honeycomb core. part 1 : Homogenisation of core properties. *Composite Structures*, 118 :664–676, 2014.
- [3] Julien Yvonnet. *Computational Homogenization of Heterogeneous Materials with Finite Elements*, volume 258 p.29-32. Springer, 2019.
- [4] Wenzhi Wang, Yonghui Dai, Chao Zhang, Xiaosheng Gao, and Meiyong Zhao. Micromechanical modeling of fiber-reinforced composites with statistically equivalent random fiber distribution. *Materials*, 9, 7 2016.
- [5] J Zeman and M Šejnoha. Numerical evaluation of effective elastic properties of graphite fiber tow impregnated by polymer matrix. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49 :69–90, 2001.
- [6] T. Kanit, S. Forest, I. Galliet, V. Mounoury, and D. Jeulin. Determination of the size of the representative volume element for random composites : Statistical and numerical approach. *International Journal of Solids and Structures*, 40 :3647–3679, 2003.