

Modélisation du thermoformage de structures en composites tubulaires, et de ses conséquences sur ses propriétés en service

Modeling the thermoforming of tubular composite structures and its impact on in-service properties

Nagui ELGABY^{1,2}, Rubén CAMPOS², Guillaume HELBERT¹, Bertrand LAINE² et Nahiene HAMILA¹

1 : Institut de Recherche Dupuy de Lôme
Bretagne INP
945 Av. du Technopôle, 29280 Plouzané
e-mail : nagui.elgaby@enib.fr, guillaume.helbert@enib.fr et nahiene.hamila@enib.fr

2 : OLLOW
7 Av. de Guitayne, 33610 Canéjan
e-mail : rcampos@ollow-tech.com et blaine@ollow-tech.com

Résumé

Crée en 2018, la startup bordelaise OLLOW a développé un nouveau procédé de mise en forme de structure tubulaires en composite fibreux à matrice thermoplastique. A contrario des autres procédés existant aujourd’hui tels que l’enroulement filamentaire [1, 2], la méthode de OLLOW consiste à enrouler des rubans unidirectionnels de composite à matrice thermoplastique à température ambiante sur un mandrin. Cette étape est suivie par une consolidation dans un moule rigide. Le travail développé dans cette thèse consiste à proposer un outil numérique (modèle d’éléments finis) capable de simuler les étapes de fabrications, afin de réduire les coûts expérimentaux. Le modèle développé doit pouvoir prédire les défauts de fabrication liés aux paramètres d’entrée, tels que le nombre de couches, le nombre de rubans et l’angle de bobinage pour chaque couche et les propriétés mécaniques associées au matériau. Dans ce travail, nous présentons tout d’abord un modèle EF simplifié d’enroulement de rubans autour d’un mandrin. Un modèle analytique est ensuite proposé pour prédire l’état de contrainte à l’intérieur des rubans. Une campagne d’essais sur un montage expérimental original permettant de valider les modèles précédents à l’échelle du ruban est finalement présentée. L’étape de consolidation sera traitée par la suite.

Abstract

Founded in 2018, the startup OLLOW created a new innovative manufacturing technology for tubular composite structures, with fiber reinforcement and thermoplastic matrix. In contrast to other existing technologies today such as filament winding [1, 2], OLLOW’s process consists of winding CFRP tapes at room temperature around a rigid metallic mandrel. The winding step is followed by a consolidation step inside a rigid die. The work developed in this thesis consists of creating a model using the Finite Element Method that would be able to simulate the different steps of manufacturing, in order to reduce experimental costs. The developed model should be able to predict manufacturing defects related to input parameters such as winding angle, number of ribbons and the mechanical properties of the material. First, we develop a simplified FE model of the tape winding around a mandrel. An analytical model is proposed to predict the stress state inside the tapes. An experimental campaign is designed to validate the FE model. The consolidation step will be treated in a subsequent step.

Mots Clés : Ruban composite, Matrice thermoplastique, Enroulement, Eléments Finis, Stabilité

Keywords : Composite tapes, Thermoplastic matrix, Winding, Finite Elements, Stability

1. Introduction

1.1. Procédé OLLOW

Depuis 2018, la société OLLOW développe un nouveau procédé de fabrication de pièces tubulaires au moyen de technologies brevetées. Leur but est de démocratiser l’usage des composites sur les

marchés de masses. Les tubes sont ainsi fabriqués à partir de rubans unidirectionnels composites pré-imprégnés à matrice thermoplastique et à renfort de fibres de carbone. A température ambiante, les rubans sont secs. Le procédé de mise en forme de OLLOW se décompose en 2 à 3 étapes selon la forme finale du tube. Le nombre de couches, le nombre de rubans par couche ainsi que l'angle de dépose des rubans sont déterminés au préalable à l'aide d'un algorithme d'optimisation de trajectoires topologiques respectant un cahier de charges. La première étape est l'enroulement des rubans autour d'un mandrin métallique rigide. Contrairement aux autres technologies de fabrications, les rubans sont déposés sur le mandrin sans consolidation. Cette étape est schématisée sur la Fig. 1. Après avoir déposé toutes les couches, une deuxième étape de cintrage optionnelle permet d'obtenir des tubes courbés. La dernière étape est la consolidation : les tubes sont placés à l'intérieur d'un moule rigide chauffé jusqu'à la température de fusion de la matrice, tandis qu'une pression interne est appliquée à l'aide d'une membrane introduite à l'intérieur du tube. Cette opération permet au tube d'épouser la forme du moule pour obtenir la géométrie finale désirée. Sur la Fig. 2, les paramètres géométriques suivants sont représentés : l_0 est la largeur d'un ruban, le gap désigne la distance entre 2 rubans d'une même couche et α est l'angle de bobinage, défini comme l'angle entre l'axe du mandrin (axe z) et le vecteur tangent au ruban.

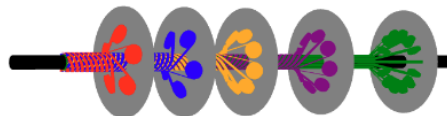


FIG. 1. – Procédé d'enroulement de rubans de OLLOW [3]

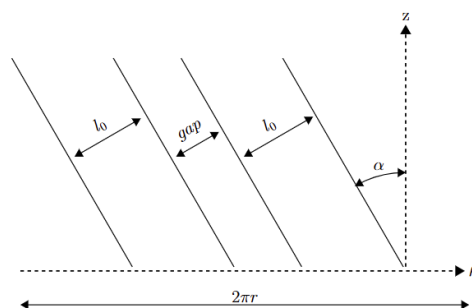


FIG. 2. – Paramètres géométriques d'une couche

1.2. Problématique

Un défaut spécifique au procédé OLLOW est celui de l'effondrement de préforme. En effet, après avoir terminé l'enroulement des tubes, un démandrinage est nécessaire pour placer la préforme dans le moule. Lors de cette étape, quelques empilements perdent leur stabilité et se réorganisent, en subissant un allongement brusque et une réduction de diamètre. Un des premiers objectifs de notre modèle sera de simuler ce phénomène pour pouvoir en identifier les causes, le prévoir et l'éviter.

2. Modèle Éléments Finis

Le modèle numérique est construit en deux temps : un code python discrétise les rubans puis calcule les trajectoires nodales suivant des lignes semi-géodésiques. Un fichier de mise en donnée est ensuite créé en vue de sa résolution par le solveur implicite du logiciel commercial d'éléments Finis ABAQUS. Le

problème est modélisé en formulation quasi-statique, en employant une loi de comportement élastique. Les rubans sont maillés à l'aide d'éléments coques triangulaires. Le frottement inter-couches sera abordé suite à la caractérisation des rubans isolés, et son influence sera considérée dans des travaux futurs.

2.1. Calcul de trajectoires géodésiques

Un code de calcul python génère la géométrie attendue suite à l'enroulement. La trajectoire des nœuds associés aux rubans est déduite de la configuration finale enroulée par leur déroulement incrémental. Ces trajectoires calculées assurent un enroulement sans déformations locales dans les rubans pour simuler simultanément l'enroulement de l'ensemble des rubans comme présenté en Fig. 1. Le contact entre les rubans est activé à l'issue de l'enroulement. Les conditions au bords cinématiques sont ensuite relâchées pour l'ensemble des nœuds à l'exception de ceux placés à l'une des extrémités, pour simuler le démandrinage. Les nœuds en vis-à-vis d'un ruban à l'autre sur la seconde extrémité sont "soudés" au moyen de connecteurs rigides (Fig. 3), à l'image de ce qui est effectué lors du procédé réel de production.

2.2. Résultats

Des simulations d'enroulements de tubes multi-couches ont été réalisées. Certaines configurations ont manifesté un comportement instable du fait du manque de rubans (cf Fig. 4). Il existe des configurations, également, où les tubes sont stables, car ils s'appuyaient sur une combinaison de rubans et points de soudure suffisante garantissant que la préforme reste intacte au moment du démandrinage (cf Fig. 5).

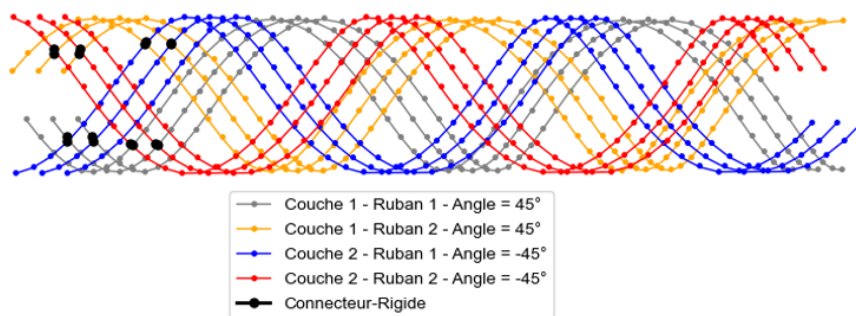


FIG. 3. – Exemple de préforme soudée en 8 positions à son extrémité gauche



FIG. 4. – Préforme instable dû au manque de rubans en absence de frottement

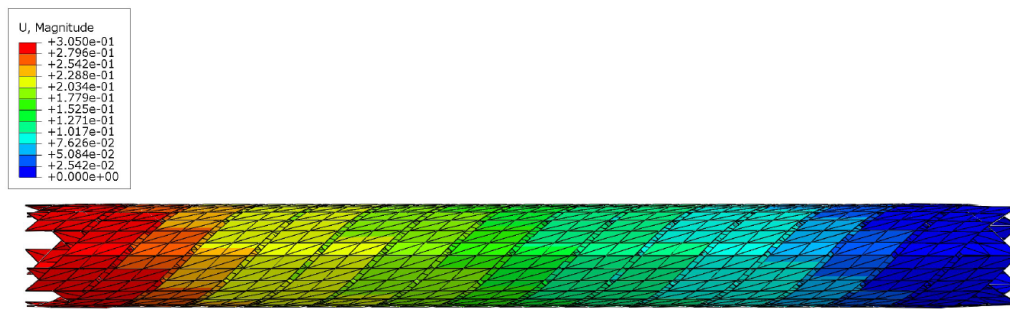


FIG. 5. – Préforme stable composé de 10 rubans repartis sur 2 couches, en absence de frottement

3. Modèle Analytique

3.1. Modélisation de l’enroulement

Parallèlement à la modélisation EF du problème d’enroulement, un modèle semi-analytique complémentaire a été développé pour prédire l’état des contraintes des rubans enroulés. Pour des raisons de simplicité, nous modélisons les rubans en utilisant la théorie des poutres selon l’hypothèse des petites déformations mais en tenant compte des grandes rotations. Le théorème énergétique de CASTIGLIANO est utilisé pour appliquer un moment à l’extrémité d’une poutre inclinée, autour d’un axe fixe (associé au mandrin), afin d’obtenir sa mise en rotation incrémentale pour obtenir une structure d’hélice circulaire. Une comparaison avec d’autres méthodes d’enroulement de poutres en grands déplacements restreintes à un cas bidimensionnel, tel que le ‘Non-Linear Shooting’ [4] ou le ‘Automated Taylor Expansion Technique’ [5] confirme l’efficacité de notre approche, également applicable en 2D.

3.2. Résultats

La méthode analytique a été testée sur diverses configurations de poutres et a démontré une concordance pouvant atteindre plus de 97% sur une centaine de cas analysés (poutres de section circulaire), avec les résultats obtenus par un modèle d’éléments finis de conditions comparables, tant en termes de déplacements généralisés que de contraintes internes. Sur la Fig. 6, une poutre tridimensionnelle sortante du plan est enroulée incrémentalement en un tour. Les rubans subissent une combinaison de flexion et torsion interne, avec torsion dominante pour les angles de bobinage faibles (voisinage de 0°), et flexion dominante pour les angles de bobinage importants (voisinage de 90°).

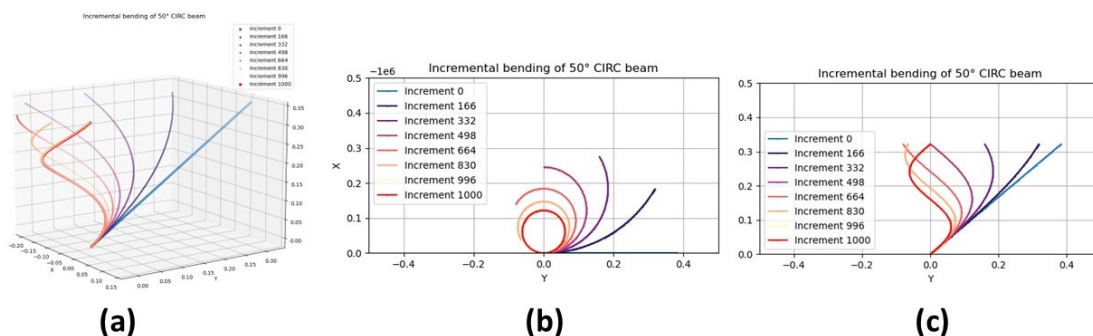


FIG. 6. – Enroulement semi-analytique incrémental d’une poutre : (a) Vue en 3D (b) Projection sur le plan XY (c) Projection sur le plan YZ

4. Campagne expérimentale

4.1. Montage expérimentale et objectifs

Un banc d'essai expérimental (cf Fig. 7) a été conçu spécifiquement pour caractériser la stabilité de structures mono-ruban (puis multi-rubans) enroulées. Ce banc a pour vocation de permettre la validation du modèle numérique aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif. L'idée est de pouvoir enrouler des rubans isolés sur un pseudo-mandrin rétractable. Le pseudo mandrin est construit à partir de fils en nylon tendus, répartis sur le périmètre d'un cercle. La rétraction du mandrin se fait à l'aide d'un système de mise en tension puis relâchement simultanés des fils. Le ruban est ainsi fixé sur une extrémité et libre de translater axialement sur l'autre à l'aide d'une glissière. Il est possible d'assurer un encastrement des deux cotés, ou laisser un degré de liberté supplémentaire libre : la rotation du point fixé, autour de l'axe x . Les rubans réagissent au démandrinage en s'allongeant. Notre objectif est de caractériser cette réponse en fonction des paramètres tels que l'angle de bobinage, le diamètre du mandrin, le nombre de tours du ruban autour du mandrin, et le type de conditions aux limites.

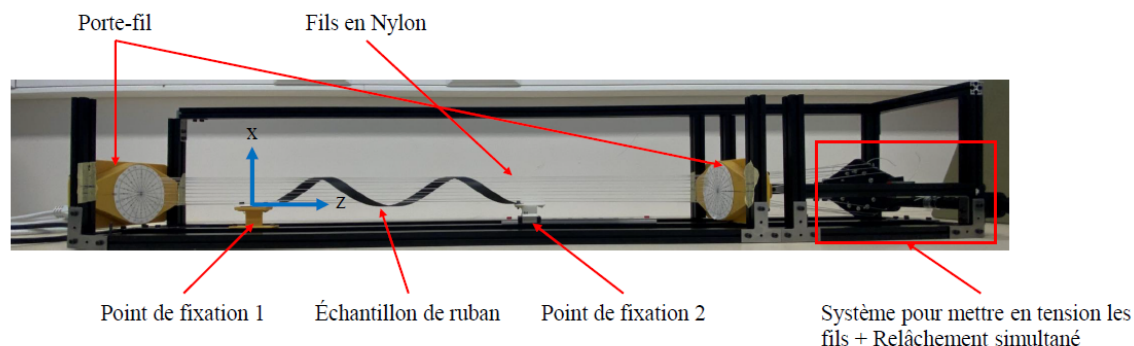


FIG. 7. – Banc d'essai expérimental

4.2. Résultats

Les rubans isolés enroulés en petit nombre de tour manifestent le même comportement qualitativement, quel que soit l'angle de bobinage. En effet, dès le moment de démandrinage, un allongement est observé systématiquement. L'amplitude de cet allongement relatif est d'autant plus grande que l'angle de bobinage α croît. En effet, la réponse est amplifiée dans les régions angulaires où les contraintes internes contiennent plus de flexion que de torsion (cf. modèle analytique). Ce comportement est observé sur la courbe Allongement-Angle de bobinage sur la Fig. 8 et sur les images de la Fig. 9.

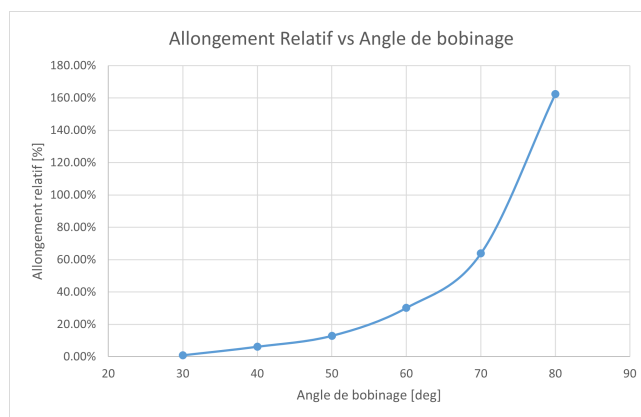


FIG. 8. – Tendence de la courbe d'allongement relatif en fonction de l'angle de bobinage

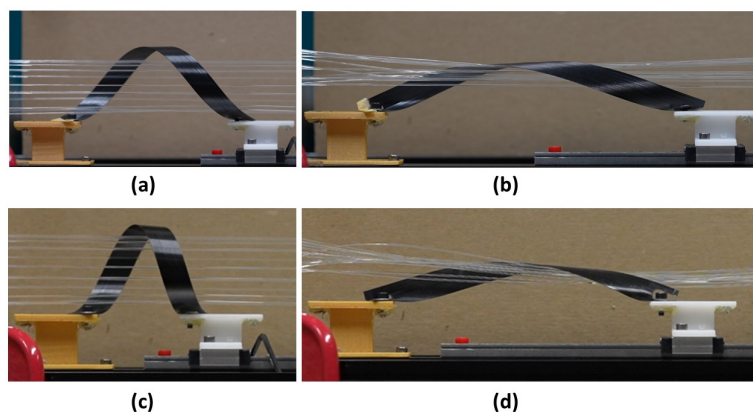


FIG. 9. – Réponse de rubans après relâchement : (a) et (b) Ruban à $\alpha = 50^\circ$ avant et après relâchement (c) et (d) Ruban à $\alpha = 70^\circ$ avant et après relâchement

5. Conclusion

Ce travail, structuré en trois volets, vise à répondre à la problématique du flambement des tubes exposée précédemment. Une méthode semi-analytique a été développée pour prédire l'état de contrainte des rubans pendant l'étape d'enroulement. Le modèle par éléments finis (EF) élaboré permet d'observer le réarrangement des tubes après l'enroulement et fournit des informations cruciales sur leur stabilité. Par ailleurs, la campagne expérimentale réalisée a permis de constituer une base de données indispensable pour valider le modèle EF. À l'avenir, il sera nécessaire d'enrichir ce modèle EF afin de mieux refléter les résultats expérimentaux et d'accroître sa précision.

Références

- [1] M. Azeem, H. H. Ya, M. A. Alam, M. Kumar, P. Stabla, M. Smolnicki, L. Gemi, R. Khan, T. Ahmed, Q. Ma, et al. « Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges : a review », *Journal of Energy Storage* Vol. 49, pp. 103468, 2022.
- [2] A. Brasington, C. Sacco, J. Halbritter, R. Wehbe, R. Harik « Automated fiber placement : A review of history, current technologies, and future paths forward », *Composites Part C : Open Access* Vol. 6, pp. 100182, 2021.
- [3] « Ollow - Site Officiel » 2024.
- [4] A. Banerjee, B. Bhattacharya, A. Mallik « Large deflection of cantilever beams with geometric non-linearity : Analytical and numerical approaches », *International Journal of Non-Linear Mechanics* Vol. 43 n° 5, pp. 366–376, 2008.
- [5] H. Tari « On the parametric large deflection study of Euler–Bernoulli cantilever beams subjected to combined tip point loading », *International Journal of Non-Linear Mechanics* Vol. 49, pp. 90–99, 2013.