

Modélisation numérique des glissements inter-plis dans un renfort cousu (NCF) à l'échelle macroscopique

Numerical macroscale modelling of inter-ply slippage in Non-crimp Fabrics

Jessy Simon¹, Nahiene Hamila²

1 : GeM UMR CNRS 6183
Centrale Nantes, Nantes Université
1 rue de la Noë, F-44300 Nantes
e-mail : jessy.simon@ec-nantes.fr

2 : IRDL UMR CNRS 6027
ENI Brest
945 Av. du Technopôle, F-29280 Plouzané
e-mail : nahiene.hamila@enib.fr

Résumé

Les renforts cousus ou Non-Crimp Fabrics (NCF) sont des matériaux composites caractérisés par une architecture limitant l'ondulation des fibres grâce à une couture qui assure leur cohésion. Ces renforts existent en différentes variantes, selon le type de point de couture utilisé, influençant leur comportement mécanique, notamment leur capacité à se déformer par cisaillement. Les travaux de recherche se concentrent sur l'impact de la couture, souvent modélisée par des approches macroscopiques utilisant des lois de comportement hyperélastique. Cependant, ces modèles supposent une cohésion parfaite entre les plis, ce qui ne correspond pas toujours à la réalité. Pour capturer ces phénomènes, des modèles essentiellement mésoscopiques et complexes ont été développés, intégrant une description détaillée des interactions entre les constituants du renfort. Toutefois, leur coût de calcul élevé limite leur application industrielle. Une alternative plus efficace repose sur une approche Arbitraire Lagrangienne-Eulerienne (ALE), qui permet de modéliser le glissement inter-plis à l'échelle macroscopique sans recours à une gestion coûteuse du contact. Ce travail propose un modèle ALE basé sur un élément fini triangulaire, appliqué à des renforts NCF biaxiaux. Des simulations de tests de caractérisation et de mise en forme démontrent l'efficacité de ce modèle dans la capture des glissements inter-plis.

Abstract

Non-Crimp Fabrics (NCF) are composite reinforcements characterized by an architecture that minimizes fiber undulation through stitching, which ensures cohesion. These reinforcements come in various types, depending on the stitching pattern used, which affects their mechanical behavior, particularly their ability to deform via shear. Research has focused on the effects of stitching, often modeled using macroscopic approaches based on hyperelastic behavior laws. However, these models assume perfect cohesion between plies, which is not always realistic.

To address these phenomena, more complex mesoscopic and macroscopic models have been developed, incorporating detailed contact laws. However, their high computational cost limits their industrial applicability. A more efficient alternative leverages an Arbitrarily Lagrangian-Eulerian (ALE) approach, enabling macroscopic modeling of inter-ply slippage without the need for expensive contact algorithms. This work introduces an ALE model based on a triangular finite element, applied to biaxial NCF reinforcements. Simulations of forming and characterization tests illustrate the model's capability to capture inter-ply sliding effectively.

Mots Clés : Renfort NCF, Glissements, méthode Arbitraire Lagrangien Eulerienne, formage

Keywords : Non-crimp fabrics, Slippage, Arbitrary Lagrangian Eulerian method, forming

1. Introduction

Les renforts cousus ou Non-Crimp Fabrics (NCF) sont une alternative aux renforts tissés dont l'architecture présente l'avantage de limiter l'ondulation des fibres dans la direction normale au renfort. Les nappes de fibres ou de mèches unidirectionnelles sont maintenues ensemble grâce à une couture qui doit garantir la cohésion du renfort lors de sa manipulation et en particulier lors de l'étape de mise en forme. Ils existent plusieurs types de renforts NCF qui se différencient notamment par le point de couture utilisé. Le type de point ou l'orientation du fil de couture vis-vis de l'orientation des plis qu'il assemble a une influence sur le comportement du renfort. Les travaux de recherche se sont en parti concentrés sur l'altération de sa capacité à se cisailer puisque c'est le mode de déformation lui permettant de s'accommoder à la géométrie sur laquelle il est mis en forme [1]. En plus des études expérimentales, des modèles numériques basées sur la méthode des éléments finis ont été développés pour capturer la potentielle asymétrie du comportement en cisaillement engendré par la couture. La plupart des modèles développés s'appuie sur une approche macroscopique où le renfort est considéré comme un milieu continu avec une loi de comportement appropriée permettant de rendre en compte sa nature fibreuse [2, 3, 4]. Ces modèles s'appuient notamment sur des lois de comportement hyperélastique dans lesquels la couture est supposée garantir la cohésion du renfort, c'est-à-dire, l'absence de glissement entre les différentes nappes de fibre. En réalité, le niveau de tension dans la couture et les efforts appliqués sur le renfort lors de sa mise en forme ne permettent pas toujours de respecter cette hypothèse. En ce sens, d'autres modèles numériques ont été développés afin de capturer le glissement entre les plis d'un renfort NCF. Adoptant une vision Lagrangienne, ces modèles sont essentiellement basés sur une description mésoscopique, c'est-à-dire, à l'échelle des fibres ou de pseudo-mèches, nécessitant également une discrétisation du fil de couture [5, 6, 7]. Un autre modèle [8] utilise une approche macroscopique (à l'échelle du pli) ou chaque pli est représenté par un maillage d'éléments 2D reliés entre eux par des éléments 1D discrétisant le fil de couture auquel il faut ajouter une loi de contact anisotrope. Dans tous les cas, ces modèles reposent une gestion coûteuse du contact entre les différents constituants, limitant leur usage sur un plan industriel et ce, même avec l'utilisation de super-calculateurs.

Néanmoins, une autre approche, adoptant une vision ni Lagrangienne, ni Eulérienne, c'est-à-dire, arbitrairement Lagrangienne-Eulérienne (ALE), permet de capturer le glissement inter-plis dans un NCF à l'échelle macroscopique sans nécessiter d'algorithmes coûteux pour la gestion du contact ou une discrétisation à l'échelle mésoscopique.

Ce travail présente une telle approche basée sur la formulation d'un élément fini triangulaire ALE sur lequel un modèle macroscopique ALE de renfort NCF biaxial et orthogonal est construit. La formulation de l'élément triangulaire ALE, la gestion du glissement sur les bords du maillage et la modélisation du renfort NCF seront détaillées. Des simulations de tests de caractérisation et de mise en forme mettant en jeu des glissements inter-plis seront présentés pour illustrer les capacités du modèle.

2. Modélisation

2.1. Formulation d'un élément fini triangulaire ALE

S'inspirant du modèle permettant de capturer les glissements dans les renforts tissés à l'échelle de la mèche [9], le modèle ALE de renfort NCF nécessite d'abord la formulation d'un élément fini ALE capable de représenter une nappe de fibre dans un NCF. Cette formulation ALE est obtenue en paramétrant la configuration spatiale et matérielle de l'élément. Un élément triangulaire à 3 noeuds est utilisé et contient trois degrés de liberté spatiaux et deux degré de liberté matériels qui sont respectivement la position spatiale et la position matériel d'un noeud. La figure 1) illustrent les configurations matérielles et spatiales dans leurs états initial et actuel. Les quantités notées \bullet (respectivement $\check{\bullet}$) décrivent les configurations matérielles (respectivement spatiales). Les quantités notées en majuscules (respectivement minuscules) correspondent aux configurations initiales (respectivement actuelles). Un modèle

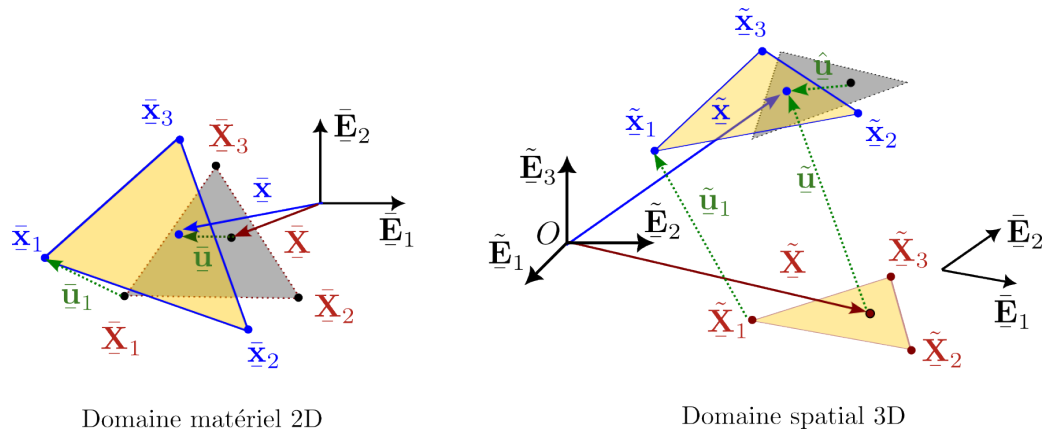


FIG. 1. – Configurations matérielles et spatiales de l'élément linéaire triangulaire ALE.

hyperélastique type Saint-Venant est utilisé pour simplifier la description de la formulation dans un premier temps. Développé dans un code de calcul de recherche (FEMTRAN) basée sur un schéma d'intégration temporelle explicite, l'expression des forces internes de l'élément et de sa matrice de masse condensée sont données.

2.2. Gestion du glissement sur les bords du maillage

Dans une utilisation plus classique (interactions fluide-structures, limitation de la distorsion du maillage), les conditions imposées sur les bords d'un maillage ALE sont relativement simples. En effet, soit le bord est considéré comme Lagrangien, soit le mouvement relatif entre la matière et le maillage est bloqué dans la direction normale à la frontière à l'aide de multiplicateurs de Lagrange, rendant ainsi Lagrangien le maillage dans cette direction (certes non triviale). Dans le cas d'un renfort NCF, le glissement des plis l'un par rapport à l'autre ne permet pas d'imposer de telles conditions car cela reviendrait à empêcher le glissement sur le bord du renfort. Pour palier à cela, l'approche "void-ALE" proposée par Simon et al. [9] dans le cas d'élément 1D représentant les mèches d'un renfort tissé est étendue au cas d'éléments 2D.

2.3. Construction du modèle ALE pour un renfort NCF

L'élément triangulaire ALE et l'approche "void-ALE" sont les ingrédients de base permettant la mise en place du modèle macroscopique ALE de renfort NCF. Le modèle proposé se limite actuellement aux renforts NCF biaxiaux orthogonaux. Le type de point et l'orientation du fil de couture sont quelconques. L'approche proposée permet de modéliser chaque pli indépendamment en utilisant une approche hyper-élasto-plastique nécessaire pour représenter le glissement des fibres au sein d'un même pli. La superposition des éléments représentant un pli avec un élément Lagrangien représentant la couture permet de conserver le caractère pseudo-élastique du cisaillement d'un NCF conféré par l'élasticité de la couture lorsque des glissements inter-pli ne sont pas générés.

3. Résultats

3.1. Simulations de bias-extension test

Des simulations de bias-extension tests sont réalisées afin de mettre en évidence la capacité du modèle à capturer le glissement inter-plis lors de ce type d'essai. Le lien entre la résistance à la compaction transverse et le glissement inter-plis est mis en évidence. En particulier, plus cette résistance est élevée, plus le glissement est important comme illustré dans la figure 2. Le pli initialement en arrière plan apparaît progressivement (couleur verte) dans la zone de glissement maximal. Plus la résistance à la compaction transverse est importante, plus la largeur finale du centre de l'éprouvette est élevée (voir figure).

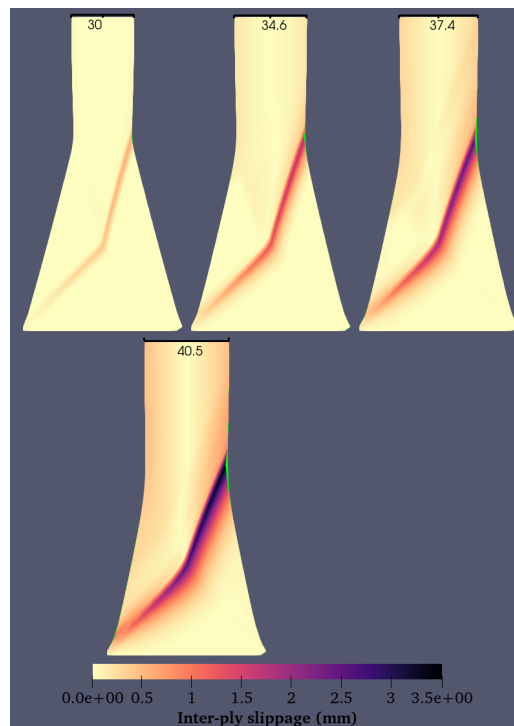


FIG. 2. – Résultats des simulations de bias-extension test avec différentes résistances à la compaction transverse entraînant un glissement inter-plies de plus en plus important.

3.2. Simulation de la mise en forme

Des simulations avec des conditions limites différentes de mise en forme sur une géométrie hémisphérique démontrent la capacité du modèle à représenter de grands glissements inter-plies. La figure 3 montre le résultat de la simulation entraînant le plus de glissement inter-plies.

3.3. Conclusion

Ce travail propose un modèle élément fini macroscopique de renfort NCF permettant de capturer les glissements inter-plies en utilisant une description arbitrairement Lagrangienne-Eulérienne. La formulation de l'élément triangulaire ALE ainsi que la gestion des glissements sur les bords du maillage sont présentés. Le modèle de renfort NCF ALE est ensuite construit à partir de ces deux ingrédients et des simulations de tests de caractérisation et de mise en forme impliquant des glissements inter-plies sont réalisées.

Références

- [1] M. Mei, Y. He, X. Yang, K. Wei, Z. Qu, D. Fang « Shear deformation characteristics and defect evolution of the biaxial $\pm 45^\circ$ and $0/90^\circ$ glass non-crimp fabrics », *Composites Science and Technology* Vol. 193, pp. 108137, 2020, ISSN 0266-3538.
- [2] Q. Steer, J. Colmars, P. Boisse « Modeling of tricot stitch non crimp fabric in forming simulations », Vitoria-Gasteiz, Spain, , pp. 020004, 2019.
- [3] E. Guzman-Maldonado « Experimental and numerical analyses of the mechanical behavior during draping of non-orthogonal bi-axial non-crimp fabric composite reinforcements », .
- [4] B. Schäfer, R. Zheng, N. Naouar, L. Kärger « Membrane behavior of uni- and bidirectional non-crimp fabrics in off-axis-tension tests », *International Journal of Material Forming* .
- [5] G. Creech, A. K. Pickett « Meso-modelling of Non-Crimp Fabric composites for coupled drape and failure analysis », *Journal of Materials Science* Vol. 41 n° 20, pp. 6725–6736, 2006, ISSN 0022-2461, 1573-4803.
- [6] A. J. Thompson, B. El Said, J. P.-H. Belnoue, S. R. Hallett « Modelling process induced deformations in $0/90$ non-crimp fabrics at the meso-scale », *Composites Science and Technology* Vol. 168, pp. 104–110, 2018, ISSN 02663538.

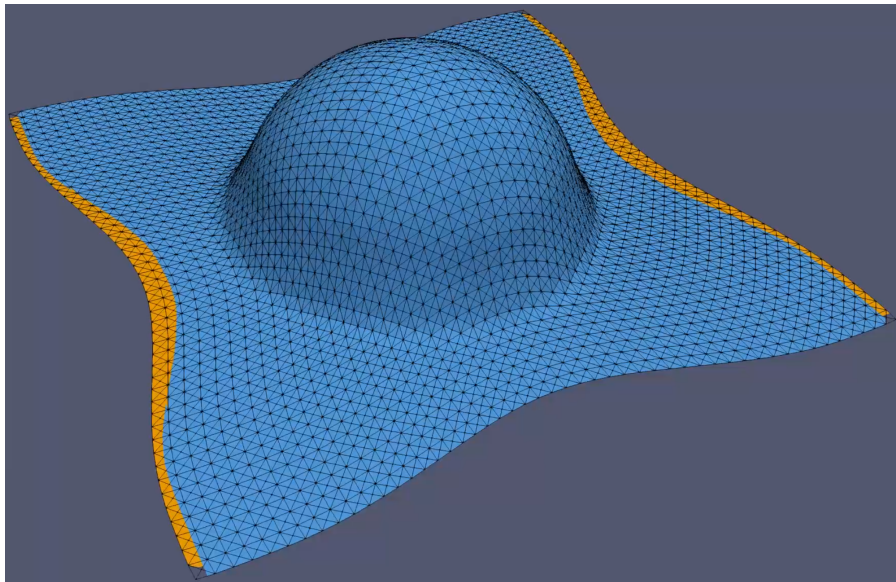


FIG. 3. – Résultat d'une simulation de mise en forme sur poinçon hémisphérique montrant de large glissement inter-plis. Chaque couleur correspond à un pli différent du NCF.

- [7] R. Zheng, N. Naouar, J. Colmars, A. Platzer, B. Schäfer, F. Morestin, L. Kärger, P. Boisse « Mesoscopic finite element modeling of biaxial non-crimp fabric including representative stitch pattern », *Composite Structures* Vol. 339, pp. 118126, 2024, ISSN 0263-8223.
- [8] S. Bel, P. Boisse, F. Dumont « Analyses of the Deformation Mechanisms of Non-Crimp Fabric Composite Reinforcements during Preforming », *Applied Composite Materials* Vol. 19 n° 3-4, pp. 513–528, 2012, ISSN 0929-189X, 1573-4897.
- [9] J. Simon, N. Hamila, S. Comas-Cardona, C. Binetruy « A yarn-scale woven fabric model including significant slippage formulated within the Arbitrary Lagrangian Eulerian framework », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Vol. 420, pp. 116741, 2024, ISSN 0045-7825.