

Modélisation à l'échelle mésoscopique de la géométrie de renforts de composites tissés

A. WENDLING^A, G. HIVET^B, E. VIDAL-SALLÉ^A, P. BOISSE^A

a. Université de Lyon, CNRS

INSA-Lyon, LaMCoS UMR5259, F69621, France

b. Laboratoire Prisme, 8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans Cedex 2

Résumé :

Les simulations numériques à l'échelle de la pièce sont un puissant outil pour prédire la faisabilité de ces pièces. Pour alimenter ces simulations, il est nécessaire de disposer d'un modèle géométrique 3D le plus précis possible de la cellule élémentaire du renfort. Le but de cette étude est donc de développer un préprocesseur cohérent automatisé de modélisation de géométries complexes telles que celles des renforts de type interlock.

Abstract:

Numerical simulations are a powerful tool to predict feasibility of mechanical components. In the case of composite materials with continuous fibre reinforcements, in order to supply these simulations, it is necessary to define a 3D geometrical model of the elementary cell the more precise as possible, which allows to give greater scale models input data. The goal of this study is to develop an automatic and consistent modeling preprocessor for complex geometries like interlock.

Mots clés : modélisation géométrique, échelle mésoscopique, renfort sec, composites.

1 Introduction

De nos jours, les industriels sont de plus en plus intéressés pour intégrer des pièces composites à leurs réalisations; il s'agit notamment des industries du transport et plus particulièrement de l'aéronautique. Actuellement, de nombreuses possibilités s'offrent à eux pour la réalisation de ces pièces. Parmi ces procédés, certains, comme ceux de type RTM (Resin Transfer Molding) consistent à mettre en forme un renfort sec avant d'injecter une résine. Pour alimenter les simulations numériques, il faut pouvoir disposer de modèles précis du comportement mécanique et de la perméabilité des renforts secs. Deux types de méthodes peuvent être envisagées pour définir le comportement mécanique des renforts ; les méthodes expérimentales et les méthodes numériques. Si les premières présentent l'avantage d'être directes et efficaces, elles comportent plusieurs inconvénients : elles sont souvent longues et difficiles à mettre en œuvre. C'est pourquoi il est judicieux de les compléter par les secondes. La simulation éléments finis 3D de la cellule élémentaire semble être l'une des méthodes les plus prometteuses. Dans ce cas, le renfort est modélisé à l'échelle mésoscopique, par l'entrelacement de mèches supposées homogènes, permettant l'obtention de résultats à la fois globaux et locaux. Les propriétés des renforts étant essentiellement dues à leur architecture, ils doivent être représentés avec une grande précision. L'un des points les plus complexes est la représentation précise des zones de contact, pouvant conduire, entre autre, à des interpénétrations de mèches. Ces interpénétrations sont problématiques car elles ne permettent pas la convergence des calculs éléments finis. Des stratégies complexes doivent alors être utilisées pour lever ces difficultés.

2 Modèles géométriques de renforts

Beaucoup de modèles géométriques de cellules élémentaires sont construits à partir de l'hypothèse que les mèches peuvent être modélisées par un tube de section constante le long d'une trajectoire plane et ondulée (Lomov *et al.*, 2001). Or, l'observation des mèches de renforts par des techniques d'imagerie telles que la tomographie montre une géométrie plus complexe (Badel *et al.*, 2008). De ce fait, une nouvelle approche a été développée dans le but de créer un modèle géométrique le plus précis possible. Les propriétés de ce

modèle sont les suivantes : d'une part, la forme des sections varie le long de la trajectoire, amenant à profil de mèche variable le long d'une trajectoire curviligne. D'autre part la cohérence est assurée en respectant deux principes : le premier concerne la tangence des deux mèches au niveau de la zone de contact ; elle est assurée en imposant (grâce à des équations de tangence et de consistance) que la zone de contact de la mèche chaîne et celle de la mèche trame au niveau de l'intersection sont représentées par la même surface. De ce fait, le modèle ne contient ni zones de décollement ni interpénétrations. Le second principe repose sur une bonne description de la zone de contact ; concernant les renforts 2D simples, le nombre et la localisation des contacts sont parfaitement identifiés et dépendent presque exclusivement du motif de la cellule élémentaire. Il est donc possible d'obtenir en seulement quelques minutes des modèles de cellules élémentaires 2D cohérents (FIG. 1). Cependant, les renforts de type interlock, qui sont de plus en plus utilisés notamment dans des applications aéronautiques, posent plus de difficultés ; leur architecture conduit à des renforts épais et de fraction volumique élevée, augmentant de façon conséquente le nombre de contacts. Ces contacts sont difficiles à identifier a priori. Enfin, le modèle géométrique sera construit en utilisant un logiciel CAO 3D standard.

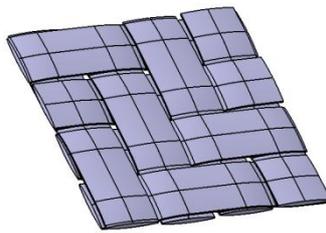


FIG. 1 - Modèle CAO d'un sergé 2x2

3 Stratégie de modélisation et hypothèses

L'objectif de la stratégie de modélisation est de pouvoir obtenir une infinité d'architectures possibles (2D, interlock...). La mise en donnée contient le minimum de paramètres nécessaires à la description de la cellule élémentaire du renfort sec non déformé ; ces paramètres doivent être facilement identifiables par tomographie ou grâce aux données du fournisseur. Il s'agit par exemple des dimensions des mèches constituant le renfort et de la position de chaque mèche par rapport aux autres. A partir de ces données, les coordonnées des différents points nécessaires à la construction de chaque mèche sont calculées en résolvant le système (1) pour chaque mèche de chaque réseau ; (x_s, z_s) sont les coordonnées du sommet de la parabole de paramètre p , n_c est le nombre de contacts de la mèche considérée et z est l'ordonnée du point de contrôle correspondant à l'abscisse x renseignée par l'utilisateur. Ces coordonnées sont automatiquement exploitées pour construire la géométrie 3D du renfort.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{si} = \frac{1}{2} \left(x_{j+1} + x_j - \frac{z_{j+1} - z_j}{p_i(x_{j+1} - x_j)} \right) \\ z_{si} = z_j - \frac{1}{4} p_i \left(x_{j+1} - x_j - \frac{z_{j+1} - z_j}{p_i(x_{j+1} - x_j)} \right)^2 \\ p_i = \left(\frac{x_j z_{j-1} - x_{j+1} z_{j-1} - x_{j-1} z_j + x_{j+1} z_j + x_{j-1} z_{j+1} - x_j z_{j+1}}{(x_{j-1} - x_j)(x_{j+1} - x_j)^2} \right) \\ z_{j+2} = z_{j+1} - p_i (x_{j+2} - x_{j+1}) \left(x_j - x_{j+1} - \frac{z_{j+1} - z_j}{p_i(x_{j+1} - x_j)} \right) \end{array} \right. , \quad \begin{cases} 1 \leq i \leq n_c \\ j = 2i \end{cases} \quad (1)$$

3.1 Armure des renforts

Concernant les tissus 2D, il existe 3 types d'armures (taffetas, sergé, satin) à considérer ; la géométrie de la cellule élémentaire de ces renforts est connue a priori et si ces trois modèles sont créés et paramétrés, tous les renforts 2D peuvent être obtenus. A contrario, en ce qui concerne les renforts de type interlock, il existe une infinité d'architectures, chacune étant dépendante des propriétés mécaniques et de formabilité désirées.

L'utilisateur doit alors pouvoir modéliser facilement ces motifs et éventuellement en créer des nouveaux. Le procédé de modélisation de ce type de renforts sera par conséquent plus long et plus complexe.

3.2 Géométrie des mèches

Chaque mèche est construite comme un tube composé de sections et d'une trajectoire. Cette trajectoire est définie comme une succession de paraboles, représentant les zones de contact entre deux mèches et de segments, correspondant aux zones entre deux zones de contact. Le long de chaque tube, les contacts transverses évoluent et, par conséquent, la forme locale de la mèche. Les mèches sont donc considérées comme des tubes à section variable.

3.2.1 Section de la mèche

Comme pour le modèle 2D (Hivet et Boisse, 2005) et en accord avec les études tomographiques, la forme de section considérée est constituée de deux paraboles reliées par des segments, appelés bords plats (FIG. 2). Cette géométrie présente l'avantage de la simplicité et de pouvoir décrire, avec le même paramétrage, des sections allant de la forme lenticulaire à une bonne approximation des mèches de type « champ de course ».

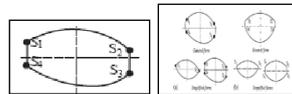


FIG. 2 - Formes des sections des mèches du modèle

3.2.2 Cohérence

Les équations de tangence et de consistance assurent alors que les deux surfaces au niveau de la zone de contact sont identiques. La stratégie utilisée pour assurer la consistance est exactement la même que celle utilisée pour les renforts 2D (Hivet et Boisse, 2005). Les surfaces de contact de chacune des deux mèches sont définies avec la même parabole pour les deux paraboles en contact. Entre deux contacts, comme aucun effort n'est appliqué sauf des tensions résiduelles, les mèches sont supposées droites. Cela conduit à la constitution de la trajectoire de la mèche : une succession de paraboles et de segments droits avec des conditions de tangence ; deux paraboles ne seront jamais directement reliées, un segment, même très petit, existera toujours entre les deux. La section transverse au niveau de la zone de contact sera alors construite avec la même parabole.

3.2.3 Cellule élémentaire

Deux solutions sont à considérer, en fonction du lieu de « coupe » des mèches chaîne et trame, qui dépend du type de conditions limites que l'utilisateur implémentera pour les simulations ; il est donc possible de couper au milieu d'une mèche ou entre deux mèches. Quatre configurations sont donc envisageables en fonction de l'endroit de coupe : le début de la trajectoire et la fin pouvant être paraboliques ou droits.

3.2.4 Paramétrisation

Un système de coordonnées est affecté à la cellule élémentaire: x et y sont affectés respectivement aux directions trame et chaîne et z est normal à x et y . $z=0$ est pris au point le plus bas de la cellule élémentaire (comme si le renfort était posé sur un plan d'équation $z=0$). De cette façon, toutes les coordonnées z des points des trajectoires sont positives.

3.3 Contacts entre mèches

L'une des difficultés est la localisation des contacts entre mèches.

Concernant les renforts 2D, la localisation et le nombre de contacts sont parfaitement identifiés car ces renforts comportent uniquement des contacts de tissage, c'est-à-dire des contacts dus à l'entrelacement des mèches.

La caractérisation des contacts devient beaucoup plus complexe pour des renforts de type interlock car ces contacts sont nombreux et varient en fonction de l'arrangement des mèches. Trois types de contacts sont à considérer (FIG. 3):

- Les contacts de tissage sont dus à l'entrelacement des mèches des deux réseaux, comme ceux des renforts 2D.
- Les contacts latéraux entre mèches d'un même réseau ; le procédé de tissage suppose que les mèches d'un même réseau sont strictement parallèles et espacées. Cette propriété est en général vérifiée pour les renforts 2D et les renforts de faible densité de mèche, mais pour des interlocks plus denses (G1151® par exemple), des contacts latéraux apparaissent entre les mèches d'un même réseau, car l'intervalle entre deux mèches peut être inférieur à la largeur initiale de mèches.
- Les contacts non désirés surviennent lorsque la densité de mèche est élevée et la structure du renfort complexe. Dans ce cas, l'intervalle entre mèches est faible et une mèche supposée droite entre deux contacts de tissage va entrer en collision avec une mèche transverse.

Il est donc difficile de prévoir a priori tous les contacts pour des renforts de type interlock.

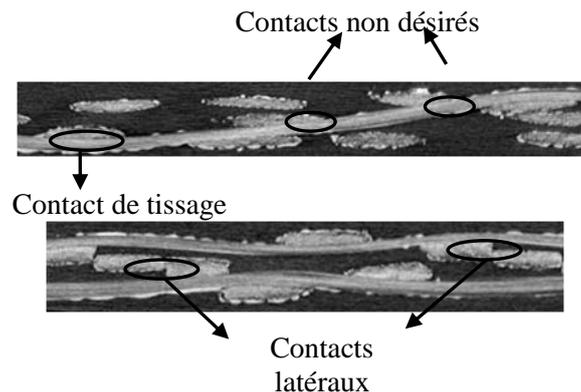


FIG. 3 - Coupe transverse de G1151 et contacts associés

En terme de stratégie de modélisation, les mèches chaîne et trame sont étudiées simultanément de manière à limiter les recherches.

4 Automatisation du procédé et exemple de modélisation du G1151®

Tous les paramètres sont centralisés permettant une lecture rapide. Chaque mèche est construite séparément puis son volume est calculé et toutes les mèches de la cellule élémentaire sont ensuite assemblées; chaque fois qu'une mèche est ajoutée, les intersections entre cette mèche et les autres sont calculées. Les modèles de cellules élémentaires de renforts 2D obtenus sont cohérents (FIG. 1); par contre, le problème devient nettement plus complexe pour les interlocks comme le G1151, sur lesquels un manque de cohérence (interpénétrations) est constaté à la fin de cette étape (FIG. 4), d'où la mise en place d'une procédure de recherche et de gestion de ces interférences.

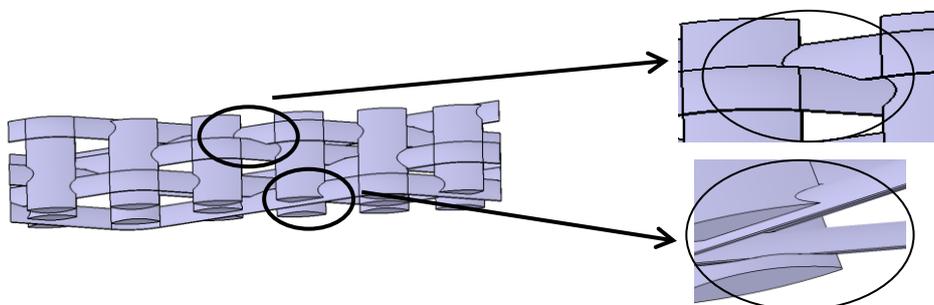


FIG. 4 - G1151 à l'étape 1

A chaque ajout de mèche la recherche d'intersections entre cette mèche et les autres est effectuée grâce à des opérations booléennes de recherche des interférences. Cette opération supprime l'interférence (FIG. 5) sur les mèches de trame, permettant de calculer le nouveau volume de chaque mèche. Pour chacune des mèches,

la différence des volumes final et initial est calculée, permettant à l'utilisateur de définir la démarche à suivre :

- Si la différence des volumes est inférieure à un nombre δ défini par l'utilisateur, l'interférence est juste supprimée ;
- Si la différence des volumes est supérieure à cette valeur δ , deux solutions sont possibles :
 - soit, par une stratégie itérative, les mèches chaînes et trames sont décalées jusqu'à tangence avec éventuellement une modification locale de la largeur et de l'épaisseur de la mèche ;
 - soit l'utilisateur refait une mise en donnée en intégrant les nouveaux contacts.

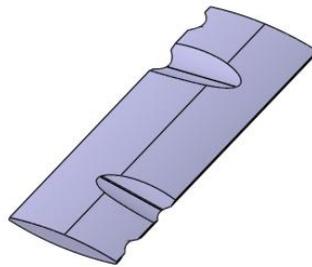


FIG. 5 - Suppression de l'interférence sur une mèche de G1151

Il est alors possible d'obtenir une géométrie cohérente de la maille élémentaire du G1151 (FIG. 6). Le processus itératif sera le même pour tous les interlocks et les 3D et est résumé en FIG. 7.

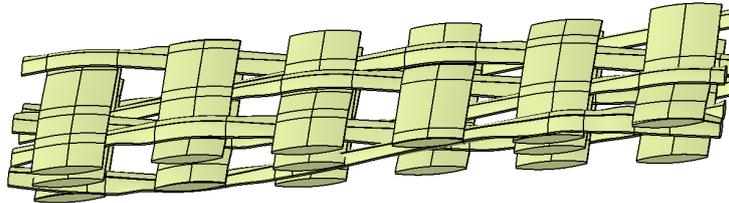


FIG. 6 - Cellule élémentaire de G1151

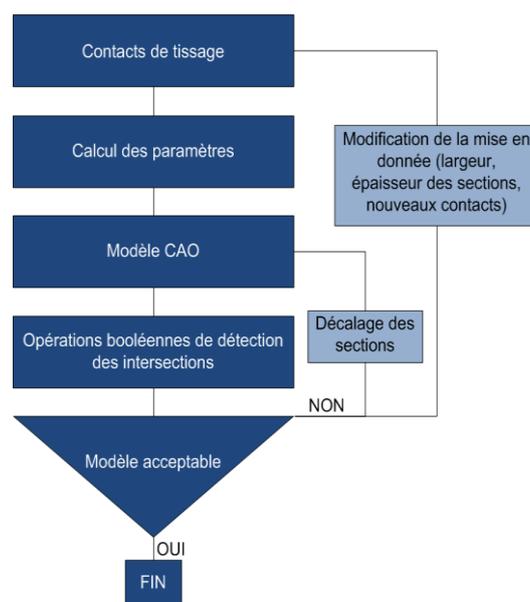


FIG. 7 - Stratégie itérative de modélisation

5 CONCLUSION

Un modèle géométrique 3D de renforts tissés de type interlock a été défini grâce à une stratégie itérative. Il a été réalisé en respectant deux propriétés principales :

La cohérence qui permet d'affirmer que le modèle contient ni interpénétration ni pores au niveau de la zone de contact entre deux mèches

L'évolution de la forme de la section le long de la trajectoire

Ce modèle permet de modéliser tous types de renforts mais plus ce renfort sera complexe, plus la modélisation sera longue et elle-même complexe. Une fois le modèle CAO complètement cohérent obtenu, il sera possible de le mailler pour effectuer des simulations éléments finis.

REFERENCES

- [1] Badel P., Vidal-Sallé E., Maire E. et Boisse P., "Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at mesoscopic scale", *Composites Science and Technology*, **68**, (2008), pp. 2433-2440.
- [2] Hivet G. et Boisse P., "Consistent 3D geometrical model of fabric elementary cell. Application to a meshing preprocessor for 3d finite element analysis", *Finite Elements in Analysis and Design*, **42**, (2005), pp. 25-49.
- [3] Lomov S. V., Gusakov A. V., Huysmans G., Prodromou A. et Verpoest I., "Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites", *Composites Science and Technology*, **60**, (2000), pp. 2083-2095.
- [4] Lomov S. V., Huysmans G., Luo Y., Parnas R. S., Prodromou A., Verpoest I. et Phelan F. R., "Textile composites : modelling strategies", *Composites : Part A*, **32**, (2001), pp. 1379-1394.
- [5] Lomov S. V., Ivanov D. S., Verpoest I., Zako M., Kurashiki T., Nakai H. et Hirose S., "Meso-FE Modelling of textile composites : road map, data flow and algorithms", *Composites Science and Technology*, **67**, (2007), pp. 1870-1891.
- [6] Lomov S. V., Ivanov D. S., Verpoest I., Zako M., Kurashiki T., Nakai H., Molimard J. et Vautrin A., "Full-field strain measurements for validation of meso-FE analysis of textile composites", *Composites : Part A*, **39**, (2008), pp. 1218-1231.
- [7] Robitaille F., Long A. C., Jones I. A. et Rudd C. D., "Automatically generated geometric descriptions of textile and composite unit cells", *Composites: Part A*, **34**, (2003), pp. 303-312.
- [8] Sun W., Lin F. et Hu X., "Computer-aided design and modeling of composite unit cells", *Composites Science and Technology*, **61**, (2001), pp. 289-299.