

Maillage de multi-matériaux à partir d'une image 3D : application aux matériaux composites tissés 3D

A. Rassineux¹, G. Fourrier^{2,1}

¹ Laboratoire Roberval, Université de Technologie de Compiègne, alain.rassineux@utc.fr

² DMAS, ONERA, Université Paris Saclay [Châtillon], guillaume.fourrier@onera.fr

Résumé — Nous proposons une technique pour créer un maillage en tétraèdres à partir d'une image 3D segmentée a priori. L'approche repose sur un lissage de la surface des voxels par une technique de subdivision respectant les fractions volumiques et permettant la construction d'un maillage volumique conforme, sans interpénétration et proche de la géométrie réelle. Une technique de décimation multi-volumes permet de réduire significativement la taille du problème. L'approche entièrement automatique est validée à l'aide de VER complexes de composites tissés 3D.

Mots clefs — Maillage – Composites tissés – Approche mésoscopique

1. Introduction

Les travaux présentés ici concernent la création, à partir d'une image 3D pré-segmentée, d'un modèle éléments finis d'un volume élémentaire représentatif (VER) à l'échelle mésoscopique. L'application choisie est celle des composites tissés présentant l'ensemble des difficultés de maillage mais la démarche peut s'appliquer sans restriction à tout autre type de multi-matériaux. L'obtention d'un maillage pour ce type d'architecture complexe est en effet un des principaux points bloquant de la chaîne de simulation numérique. L'objectif est de déterminer les propriétés mécaniques des structures saines ou endommagées, d'étudier l'influence de nombreux paramètres : géométrie et défauts de tissage, fraction volumique de fibre, insertion de porosités, de fissure, de zones délaminées entre autres. Les solutions qui aboutissent à la création d'un maillage réaliste de ces structures restent relativement rares même dans le cas où seule la structure sèche sans matrice est modélisée [1]. Ces approches peuvent être divisées en 2 groupes. La première classe de techniques utilise une description paramétrique des surfaces idéalisées sous la forme de sections extrudées le long d'une courbe à l'image des logiciels WiseTex [2] et TexGen [3]. Les sections peuvent alors varier suivant des hypothèses mécaniques comme la minimisation d'un critère énergétique ou afin de respecter au mieux une tomographie [4]. L'exploitation du paramétrage permet de détecter les interpénétrations et de délimiter les zones de contact. La robustesse de ces approches diminue quand le nombre de contact augmente [5][6]. Une fois le maillage surfacique obtenu, un maillage en tétraèdres de la matrice peut être créé. Afin d'éviter la création d'éléments plats au niveau des surfaces de contact tangentes entre torons, les interfaces doivent être maillées finement. Une approche consiste à insérer un espace entre les surfaces de contact, qui permet d'assurer la conformité du maillage [7] ou la convergence du maillage en tétraèdres mais modifie la fraction volumique. Les autres techniques utilisent une grille pour s'affranchir des problèmes de convergence du maillage. Cette grille peut être uniforme ou adaptée. Le découpage du maillage s'arrête alors quand les frontières offrent une précision acceptable, notamment une représentation fidèle de la fine couche de matrice au niveau des interfaces entre les surfaces tangentes de torons. [8]. L'utilisation d'une grille induit alors un « effet d'escalier » qu'il convient de lisser pour éviter des concentrations artificielles de contraintes [9]. Parmi toutes ces techniques, la voxélisation peut être créée à partir de modèles de type TexGen [10] ou à partir d'une tomographie, une problématique complexe que l'on

suppose résolue dans ce cadre [11]. Cette représentation offre de nombreux avantages comme la robustesse, la représentation des géométries les plus complexes, la conformité du maillage aux interfaces qui permet ensuite l'insertion d'éléments aux interfaces mais aussi des inconvénients majeurs principalement la taille du modèle et l'effet d'escalier.

Nous présentons une technique de maillage [12] basée sur l'utilisation d'une grille en voxels lissée par une technique de Catmul-Clark [13] associée à une procédure de contrôle des volumes de chaque toron. Seule la position des nœuds est modifiée au cours de cette étape. Ainsi la connectivité de la grille n'est pas modifiée et le maillage aux interfaces reste conforme. Pendant le lissage, un contrôle de l'angle entre les plans tangents des surfaces en contact permet d'assurer a posteriori la convergence du maillage en tétraèdres, un point crucial qui constitue l'une des difficultés principales. A l'issue de cette étape, un maillage en tétraèdres de la taille des voxels est créé. Une ultime étape permet de déaffiner le maillage en respectant la conformité des interfaces et la géométrie.

2. Lissage de la surface issue des voxels

2.1. Pré-traitement avant lissage

Les couches de voxels d'épaisseur unité ne peuvent être lissées dans la mesure où aucun nœud supplémentaire n'est créé. La première étape consiste donc à supprimer les voxels isolés, les empilements et couches d'épaisseur unité en affectant un nouveau matériau. Un maillage en quadrangles peut être facilement créé à partir du seul maillage en voxels des torons. Les faces peuvent être ainsi sur la frontière du VER, partagées par un toron et la matrice ou par 2 torons. La position de certains points n'est pas affectée par le lissage : les 8 sommets du VER, les points internes au VER partagés par plus de 3 matériaux et par 2 matériaux sur les faces du VER. Les points représentés en rouge figure 1 appartiennent à 2 torons et à la matrice et leur position demeure inchangée. En revanche, les points internes de la courbe interface (en vert figure 1) sont modifiés.

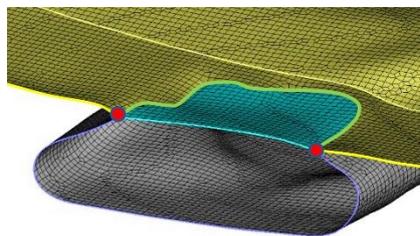


Figure 1 – Interface entre 2 torons

2.2. Lissage par une technique de subdivision de surface

Le lissage de la surface en quadrangles est effectué par une technique de Catmul-Clark [12] durant laquelle aucun nouveau nœud n'est cependant créé. La procédure est brièvement décrite.

La position des nœuds du maillage M^i est modifiée pour créer M^{i+1} . Un point dit point-face est créé au centre de gravité de chaque face. A chaque arête, un point dit point-arête est créé au centre de gravité formé par le milieu de l'arête et les deux points-face des faces partagées par l'arête.

Ainsi, un point v^i du maillage M^i partagé par un ensemble de n faces Ef et par un ensemble de n arêtes Ea est déplacé à la position v^{i+1}

$$v^{i+1} = \frac{cpf + 2 \times cpa + (n - 3) \times v^i}{n} \quad (1)$$

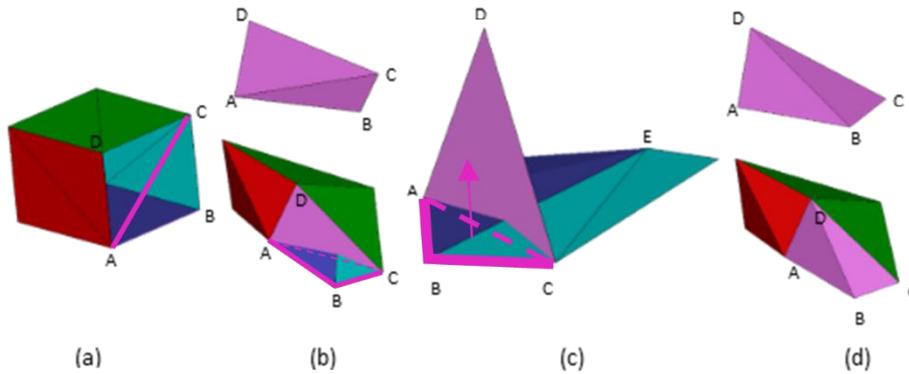
où cpf est le centre de gravité des n points-face de Ef and cpa celui des n points-arête de Se . Le lissage des courbes interface (figure 1) est effectué selon le même principe.

Un des principaux inconvénients de ces techniques est la réduction des volumes. Une procédure de type « inflate and shrink » proposée par Taubin [14] a été adoptée pour assurer le respect des volumes.

2.3. Contrôle de la géométrie et impératifs de convergence

Pendant l'étape de lissage, la matrice subit les modifications des torons. Afin de garantir la convergence, l'angle entre les faces en vis-à-vis de 2 torons différents doit être contrôlé. Pour calculer cet angle, il convient de découper le maillage en quadrangles en un maillage en triangles, une étape qui s'avèrera essentielle pour créer un maillage en tétraèdres. Cette étape, apparemment très simple, est habituellement résolue en choisissant la configuration qui maximise le plus petit critère de qualité des 2 triangles créés. Nous choisirons comme critère de qualité le rapport du rayon du cercle inscrit (ou sphère en 3D) divisé par la plus grande longueur d'arête ramené à l'unité par un coefficient [15].

Néanmoins, durant le lissage, les faces quadrangulaires sont très fortement déformées et ne sont plus planes. Sur la figure 2a suivante, un voxel est représenté dans sa configuration initiale. La face (A,B,C,D) doit être découpée formant ainsi l'arête AC ou BD. La qualité maximale est obtenue avec la configuration AC. Les figures 2b et 2c montrent que l'arête BE intersecte la face ACD. La configuration retenue est représentée sur la figure 2d.

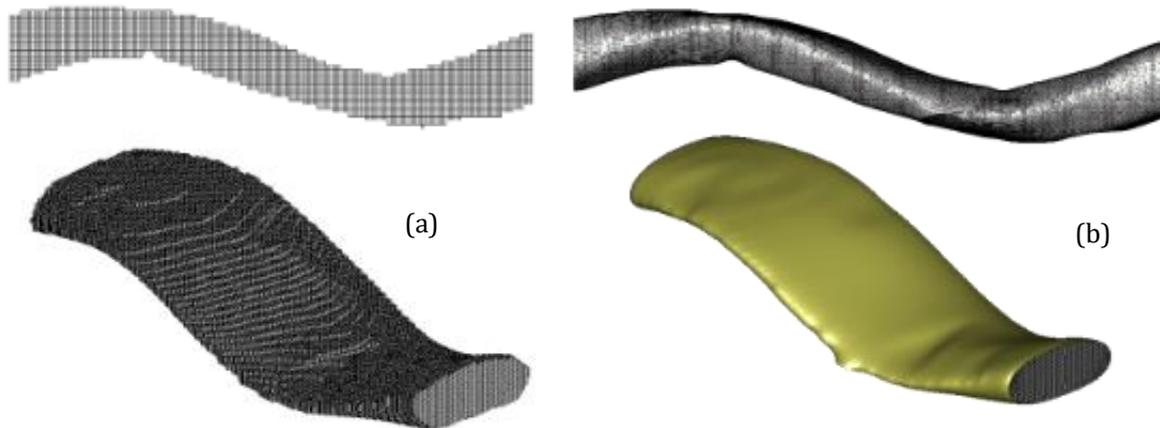


Figures 2 – Découpage d'une face quadrangulaire en triangles

Le maillage en voxels permet d'identifier très facilement les surfaces frontières. Pendant le processus de lissage, le lien entre les quadrangles et le maillage en voxels est conservé ainsi que le lien entre un quadrangle et les 2 triangles issus de son découpage. Il est alors aisé d'exploiter ces structures pour obtenir les 2 quadrangles adjacents à une arête, d'orienter ces faces en fonction du matériau d'appartenance et de calculer grâce aux triangles les angles entre ces faces. Ainsi, au voisinage des surfaces tangentes en contact, il est alors possible de contrôler les angles entre plan tangent par un simple calcul de produit scalaire entre normales aux faces adjacentes. Si cet angle est inférieur à une valeur seuil, qui peut être réglée en fonction de la robustesse du mailleur, la position des points des faces concernés demeure inchangée.

Ces 2 étapes de contrôle des intersections et des angles entre faces adjacentes garantissent la robustesse de l'approche.

L'efficacité de la procédure de lissage est illustrée figure 3. De légères ondulations peuvent être encore observées, un point qui n'est pas mentionné dans la littérature. Néanmoins, l'effet escalier est quasiment éliminé pour 150 itérations.



Figures 3 – Procédure de lissage. (a) maillage initial en voxels. (b) maillage lissé

3. Maillage en tétraèdres des torons et de la matrice

La dernière étape consiste à mailler les torons et la matrice en tétraèdres. Il est possible de mailler directement chaque phase à l'aide d'un mailleur automatique dans la mesure où le lien entre les triangles et la structure en voxel permet d'orienter facilement les surfaces. Dans la pratique, nous utilisons la grille existante et seul l'espace entre le maillage surfacique déformé et les voxels internes est maillé.

Un premier maillage conforme est obtenu dont la taille est proche de celle des voxels. Il convient néanmoins de noter que le nombre de degrés de liberté est supérieur à celui du maillage en voxels car des nœuds supplémentaires ont été créés pour assurer la convergence du maillage [15]. Afin d'envisager des simulations plus coûteuses en temps de calcul que la détermination des propriétés homogénéisées du VER, la taille du maillage doit être réduite. Dans le cas des composites tissés, le nombre de couches dans l'épaisseur des torons est souvent limité et il ne suffit pas de déraffiner le maillage en supprimant des nœuds internes mais il convient aussi de déraffiner les surfaces. Le processus de déraffinement est très couramment utilisé par les mailleurs automatiques pour un unique volume mais rarement abordé dans la littérature dans un contexte multi-volumes en contact.

L'approche utilisée s'inspire des travaux de Baker [16] pour un volume et consiste à coller 2 nœuds d'une même arête si la taille de celle-ci est supérieure à une valeur donnée et de remailler l'ensemble des tétraèdres coïncidents à ces nœuds d'arêtes en contrôlant la qualité du maillage résultant. Une arête est réduite à un point, le milieu de celle-ci généralement. En revanche, afin d'éviter des opérations de projection coûteuses sur le maillage initial, une arête appartenant à la surface d'un toron est réduite au point de l'arête qui optimise la qualité du maillage volumique.

On notera que la technique s'appuie exclusivement sur la connectivité inverse nœud-éléments très simple à mettre en œuvre.

Dans un premier temps, il convient néanmoins de trier les points des différents volumes.

On distingue les points

- A l'intérieur du VER : à l'intérieur d'un toron, sur la surface d'un toron, sur une courbe interface entre 2 torons et dans la matrice. Les points appartenant à plus de 3 torons sont fixés.

- Sur l'une des 6 faces : à l'intérieur d'un toron, à l'interface entre 2 torons, sur une arête du VER. Les points partagés par plus de 2 torons sont fixés ainsi que les 8 sommets.

La suppression d'arêtes ne s'applique pas aux arêtes dont un sommet est fixé. La procédure peut s'appliquer si les points d'une face, d'une arête du VER, d'une courbe interface, sur la surface d'un toron reste sur la même entité. Dans la pratique, la taille de maille souhaitée peut être par exemple donnée par l'utilisateur dans le maillage en voxels. Nous avons choisi dans ces travaux de donner une unique consigne de taille maximale. En outre, afin de représenter les surfaces des torons avec précision, le collage de 2 points d'une arête de surface ne se fait que si les angles entre les faces adjacentes du maillage résultant sont inférieurs à une valeur seuil donnée par l'utilisateur. Enfin, un lissage laplacien [15] est uniquement appliqué aux nœuds internes de torons et de la matrice.

4. Résultats et discussion

L'exemple suivant est le VER d'un matériau composite tissé carbone à matrice thermoplastique PEEK fourni par le CETIM. Il est composé de 8 plis en satin avec un empilement de $[0/90]_{4(s)}$. Le modèle est composé de 140 torons et comporte 12.5M de voxels et plus de 1200 interfaces. Certains torons partagent des zones de contact avec 24 autres torons.

La segmentation a été effectuée à partir d'une tomographie convertie en un modèle de type TexGen. Une voxélisation a été ensuite effectuée. Sur cet exemple, la taille de la grille n'est pas régulière. Afin de réduire le nombre de voxels, la taille d'un voxel dans la plus petite direction est 2 fois plus petite afin d'obtenir un plus grand nombre de couche dans l'épaisseur.

Pour chaque toron et la matrice, le rapport $\frac{\text{Volume après lissage} - \text{Volume initial}}{\text{Volume initial}}$ est calculé. Le déplacement d'un nœud dépasse rarement un demi-voxel. L'écart entre la fraction volumique calculée à partir du modèle en voxels et avec le modèle triangulé est moins de 1.5%. Le lissage de la structure sans la matrice est représenté sur la figure 4.

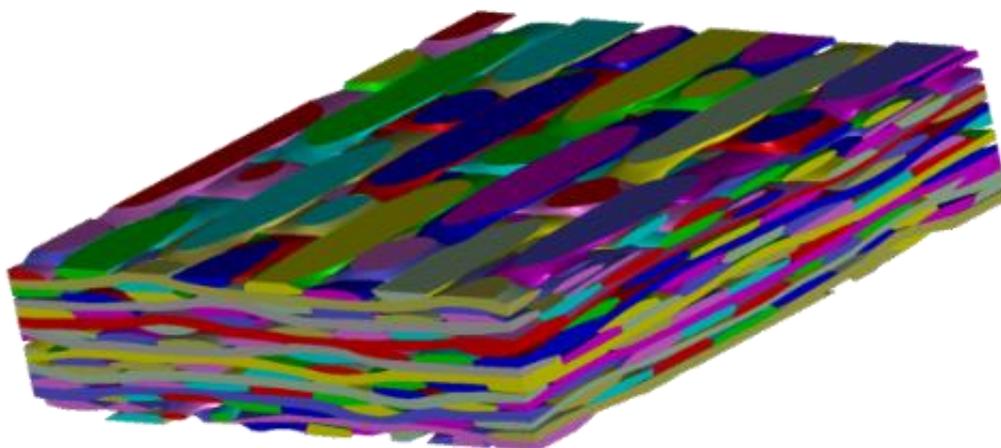


Figure 4 – Procédure de lissage. La matrice n'est pas représentée

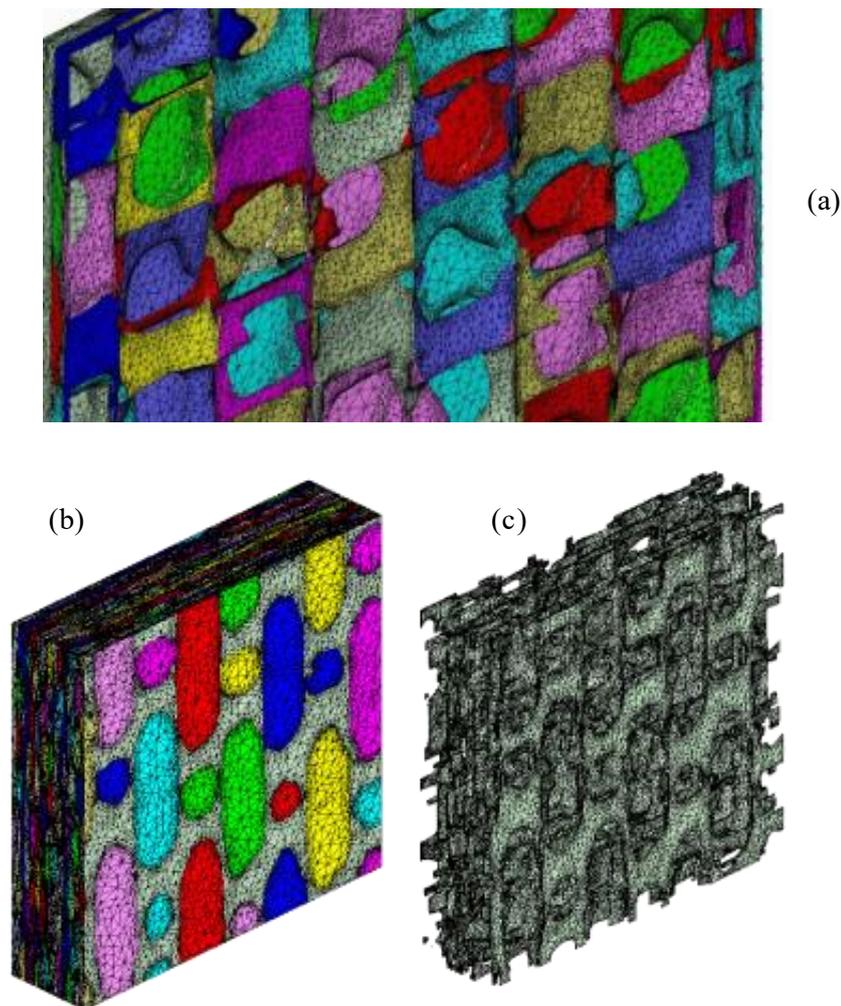
Les résultats du premier maillage en tétraèdre et du maillage décimé sont fournis table 1. Compte tenu du nombre plutôt limité de couches dans l'épaisseur, le nombre de nœuds du premier maillage est largement supérieur à celui du maillage en voxels. Ceci peut s'expliquer par la nécessité de créer des nœuds internes pour résoudre des difficultés de maillage liées aux configurations de type polyèdres de Schönhart [18]. L'étape de décimation permet de réduire considérablement le nombre de degrés de

liberté, plus de 10 fois moins de nœuds par rapport au modèle en voxels. En outre, la qualité du maillage s'en trouve même améliorée.

	Nombre de noeuds	Nombre d'éléments	Q>0.5	Q>0.3	Q>0.1	Q>Qmin	Qmin
Premier maillage	18.4M	105.5M	94.6M	10.4M	0.3M	1310	0.03
Maillage décimé	1.10M	6.5M	3.9M	2.6M	4313	112	0.09

Table 1 – Résultats du maillage en tétraèdres

La figure 5a offre une vue de coupe du maillage décimé et en particulier des interfaces entre torons. Les figures 5b et 5c montrent respectivement le maillage de la surface du VER et de la matrice.



Figures 5 – Maillage du VER composite satin

Les exemples proposés ont été réalisés à l'aide du logiciel MIRAX développé par Alain Rassinoux. Le code est écrit en langage ANSI C. Les différentes étapes ont été parallélisées avec openMP. Avec un processeur Intel(R) Core (TM) i9-9880H CPU @ 2.30GHz et 8 cœurs, la réalisation du premier maillage n'excède pas 5 minutes. En revanche, le temps de calcul pour l'étape de déaffinement est de l'ordre de 40 minutes.

L'approche est entièrement automatique et pilotée par très peu de paramètres. On constate que la complexité des formes n'a pas d'effet sur la robustesse de la méthode.

Références bibliographiques

- [1] Gereke, T., Cherif, C., A review of numerical models for 3D woven composite reinforcements, *Composite Structures*, 209, pp. 60-66, 2019
- [2] Verpoest, I., Lomov, S.V., Virtual textile composites software WiseTex: Integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis, *Composites Science and Technology*, 65 (15-16 SPEC. ISS.), pp. 2563-2574, 2005
- [3] Zheng, Z., Zhao, X., Wang, C., Sun, X.; Investigation of automated geometry modeling process of woven fabrics based on the yarn structures, *Journal of the Textile Institute*, 106 (9), pp. 925-933, 2015
- [4] Naouar, N., Vidal-Salle, E., Schneider, J., Maire, E., Boisse, P., 3D composite reinforcement meso F.E. analyses based on X-ray computed tomography, *Composite Structures*, 132, pp. 1094-1104, 2015.
- [5] Wendling, A., Hivet, G., Vidal-Sallé, E., Boisse, P., Consistent geometrical modelling of interlock fabrics, *Finite Elements in Analysis and Design*, 90, pp. 93-105, 2014.
- [6] Ha, M.H., Cauvin, L., Rassineux, A., A methodology to mesh mesoscopic representative volume element of 3D interlock woven composites impregnated with resin, *Comptes Rendus - Mécanique*, 344 (4-5), pp. 267-283, 2016.
- [7] Wintiba, B., Sonon, B., Ehab Moustafa Kamel, K., Massart, T.J., An automated procedure for the generation and conformal discretization of 3D woven composites RVEs, *Composite Structures*, 180, pp. 955-971, 2017.
- [8] Matveev, M.Y., Brown, L.P., Long, A.C., Efficient meshing technique for textile composites unit cells of arbitrary complexity (2020) *Composite Structures*, 254, 2020.
- [9] Doitrand, A., Fagiano, C., Irisarri, F.-X., Hirsekorn, M., Comparison between voxel and consistent meso-scale models of woven composites, (2015) *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 73, pp. 143-154., 2015.
- [10] Green, S.D., Matveev, M.Y., Long, A.C., Ivanov, D., Hallett, S.R., Mechanical modelling of 3D woven composites considering realistic unit cell geometry, *Composite Structures*, 118 (1), pp. 284-293, 2014.
- [11] Straumit, I., Lomov, S.V., Wevers, M., Quantification of the internal structure and automatic generation of voxel models of textile composites from X-ray computed tomography data, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 69, pp. 150-158, 2015.
- [12] Rassineux, A., Robust conformal adaptive meshing of complex textile composites unit cells, *Composite Structures*, 279, art. no. 114740, 2022.
- [13] Catmull, E., Clark, J., Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes, *Computer-Aided Design*, 10 (6), pp. 350-355, 1978
- [14] Taubin, Gabriel, Signal processing approach to fair surface design, *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*, pp. 351-358, 1995.
- [15] Rassineux, A., 3D mesh adaptation. Optimization of tetrahedral meshes by advancing front technique, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 141 (3-4), pp. 335-354, 1997.
- [16] Baker, T.J., Mesh deformation and modification for time dependent problems, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 43 (6-7), pp. 747-768, 2003.
- [17] Fourrier G., Fagiano C., Hirsekorn M., Rassineux A., Baranger E., Leroy, F-H., Mesoscale modelling of woven composite materials with manufacturing defects, *SAMPE Europe Conference 2020 Amsterdam*.
- [18] Schönhart E., Über die Zerlegung von Dreieckspolyedern. *Mathematisches Annalen*; 98, pp. 309–312, 1928.