Simulation à l'échelle mésoscopique de la mise en forme de renforts de composites tissés

Audrey Wendling

▶ **To cite this version:**

Audrey Wendling. Simulation à l'échelle mésoscopique de la mise en forme de renforts de composites tissés. Autre. INSA de Lyon, 2013. Français. NNT : 2013ISAL0079 . tel-00961196

HAL Id: tel-00961196
https://theses.hal.science/tel-00961196

Submitted on 19 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 2013 ISAL 0079 Année 2013

Thèse

SIMULATION A L'ECHELLE MESOSCOPIQUE DE LA MISE EN FORME DE RENFORTS DE COMPOSITE TISSES

Présentée devant

L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon

Pour obtenir

Le grade de docteur

Formation doctorale

Ecole doctorale Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA)

Spécialité : Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil

Par

Audrey WENDLING

Jury

C. Binetruy	Professeur (Ecole Centrale de Nantes)	Président du jury
P. Boisse	Professeur (INSA Lyon)	Examinateur
J. Bréard	Professeur (Université du Havre)	Rapporteur
G. Hivet	Maître de conférences (Polytech Orléans)	Encadrant
L. Orgéas	Chargé de Recherches, CNRS (Université de Grenoble)	Rapporteur
E. Vidal-Sallé	Professeur (INSA Lyon)	Directeur

Laboratoire de recherche : Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS) – UMR5259

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

26 SIGLE	27 ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
28 **CHIMIE**	29 **CHIMIE DE LYON** **http://www.edchimie-lyon.fr** Insa : R. GOURDON	M. Jean Marc LANCELIN Université de Lyon – Collège Doctoral Bât ESCPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	**ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE** **http://edeea.ec-lyon.fr** Secrétariat : M.C. HAVGOUDOUKIAN eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 65 55 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	**EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION** **http://e2m2.universite-lyon.fr** Insa : H. CHARLES	Mme Gudrun BORNETTE CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 06.07.53.89.13 e2m2@ univ-lyon1.fr
30 EDISS	31 **INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE** **32 http://www.ediss-lyon.fr** Sec : Samia VUILLERMOZ Insa : M. LAGARDE	33 M. Didier REVEL 34 Hôpital Louis Pradel Bâtiment Central 28 Avenue Doyen Lépine 69677 BRON Tél : 04.72.68.49.09 Fax :04 72 68 49 16 Didier.revel@creatis.uni-lyon1.fr
INFOMATHS	**INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES** **http://infomaths.univ-lyon1.fr** Sec :Renée EL MELHEM	Mme Sylvie CALABRETTO Université Claude Bernard Lyon 1 INFOMATHS Bâtiment Braconnier 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 44.82.94 Fax 04 72 43 16 87 infomaths@univ-lyon1.fr
35 **Matériaux**	**36 MATERIAUX DE LYON** **http://ed34.universite-lyon.fr** Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry Ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIERE INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 83 18 Fax 04 72 43 85 28 Jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr
37 MEGA	**MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE** **http://mega.ec-lyon.fr** Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry mega@insa-lyon.fr	M. Philippe BOISSE INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél :04.72 .43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 Philippe.boisse@insa-lyon.fr
ScSo	**ScSo*** **http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/** Sec : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS Insa : J.Y. TOUSSAINT	M. OBADIA Lionel Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.77.23.86 Fax : 04.37.28.04.48 Lionel.Obadia@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier l'institut Carnot I@L pour avoir financé cette étude.

Je remercie Philippe BOISSE, qui m'a proposé ce sujet et a co-dirigé ces travaux durant les deux premières années. Mes remerciements s'adressent aussi à Emmanuelle VIDAL-SALLE et Gilles HIVET qui ont respectivement dirigé et encadré mes travaux de thèse. La réussite de cette thèse est due en grande partie à leur investissement dans l'encadrement de ces travaux et aux riches échanges que nous avons pu avoir.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à Joël BREARD et Laurent ORGEAS pour avoir rapporté mes travaux de thèse ainsi qu'à Christophe BINETRUY pour avoir accepté de présider mon jury. Leurs remarques constructives ont permis d'ouvrir des perspectives intéressantes à ces travaux.

Je tiens à remercier vivement mes collègues, qui m'ont tous, chacun à leur manière, permis d'avancer au cours de ces années de recherche. Je pense notamment à Jean-Luc Daniel pour son aide précieuse sur les simulations, ainsi qu'à Jean Gillibert et Jean-Emile Rocher pour tous les aspects expérimentaux. Merci pour tout.

Je remercie ma famille et mes amis, pour leur présence ou au contraire leur patience, durant ces longs mois.

Pour finir, je pense à toutes les personnes de Polytech'Orléans et de l'INSA de Lyon que j'ai pu côtoyer durant ces années de présence dans les deux établissements, merci pour votre bonne humeur.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

RESUME

De nos jours, l'intégration de pièces composites dans les produits intéresse de plus en plus les industriels, particulièrement dans le domaine des transports. En effet, ces matériaux présentent de nombreux avantages, notamment celui de permettre une diminution de la masse des pièces lorsqu'ils sont correctement exploités. Pour concevoir ces pièces, plusieurs procédés peuvent être utilisés, parmi lesquels le RTM (Resin Transfer Molding), qui consiste en la mise en forme d'un renfort sec (préformage) avant une étape d'injection de résine. Cette étude concerne la première étape du procédé RTM, celle de préformage. L'objectif est de mettre en œuvre une stratégie efficace conduisant à la simulation par éléments finis de la mise en forme des renforts à l'échelle mésoscopique. A cette échelle, le renfort fibreux est modélisé par un enchevêtrement de mèches supposées homogènes. Plusieurs étapes sont alors nécessaires et donc étudiées ici pour atteindre cet objectif. La première consiste à créer un modèle géométrique 3D le plus réaliste possible des cellules élémentaires des renforts considérés. Elle est réalisée grâce à la mise en œuvre d'une stratégie itérative basée sur deux propriétés : d'une part, la cohérence, qui permet d'assurer une bonne description du contact entre les mèches, c'est-à-dire, que le modèle ne contient ni vides ni interpénétrations au niveau de la zone de contact ; d'autre part, la variation de la forme des sections de la mèche le long de sa trajectoire, qui permet de coller au mieux à la géométrie évolutive des mèches dans le renfort. Grâce à ce modèle et à une définition libre par l'utilisateur de l'architecture tissée, un modèle représentatif de tout type de renfort (2D, interlock) peut être obtenu. La seconde étape consiste à créer un maillage hexaédrique 3D cohérent de ces cellules élémentaires, basé sur la géométrie obtenue à la première étape. L'outil de maillage créé permet de mailler automatiquement tout type de mèche, quelles que soient sa trajectoire et la forme de ses sections. La troisième étape à franchir consiste, à partir du comportement mécanique du matériau constitutif des fibres et de la structure de la mèche, à mettre en place une loi de comportement du matériau homogène équivalent à un matériau fibreux. Basé sur les récents développements expérimentaux et numériques en matière de loi de comportement de structures fibreuses, un nouveau modèle de comportement est présenté et implémenté. Enfin, une étude des différents paramètres intervenant dans les calculs en dynamique explicite est réalisée. Ces deux derniers points permettent à la fois de faire converger rapidement les calculs et de se rapprocher de la réalité de la déformation des renforts. L'ensemble de la chaîne de modélisation/simulation des renforts fibreux à l'échelle mésoscopique ainsi créé est validé par comparaison d'essais numériques et expérimentaux de renforts sous sollicitations simples.

Mots-clés : renforts tissés, composites, mise en forme, modélisation mésoscopique, simulation

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

ABSTRACT

Nowadays, manufacturers, especially in transport, are increasingly interested in integrating composite parts into their products. These materials have, indeed, many benefits, among which allowing parts mass reduction when properly operated. In order to manufacture these parts, several methods can be used, including the RTM (Resin Transfer Molding) process, which consists in forming a dry reinforcement (preform) before a resin being injected. This study deals with the first stage of the RTM process, which is the preforming step. It aims to implement an efficient strategy leading to the finite element simulation of fibrous reinforcements at mesoscopic scale. At this scale, the fibrous reinforcement is modeled by an interlacement of yarns assumed to be homogeneous and continuous. Several steps are then necessary and therefore considered here to achieve this goal. The first consists in creating a 3D geometrical model of unit cells as realistic as possible. It is achieved through the implementation of an iterative strategy based on two main properties: on the one hand, the consistency, which ensures a good description of contacts between the yarns, that is to say, the model does not contain spurious spaces or interpenetrations at the contact area; on the other hand, the variation of the yarn section shape along its trajectory that enables to stick as much as possible to the evolutive shape of the yarn inside the reinforcement. Using this tool and a woven architecture freely implementable by the user, a model representative of any type of reinforcement (2D, interlock) can be obtained. The second step consists in creating a 3D consistent hexahedral mesh of these unit cells. Based on the geometrical model obtained in the first step, the meshing tool enables to mesh any type of yarn, whatever its trajectory or section shape.

Keywords: woven reinforcement, composites, forming, mesoscopic model, simulation

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

TABLE DES MATIERES

Table des illustrations 12
INTRODUCTION 17

CHAPITRE 1 : Introduction à l'étude des renforts tissés 21
1.1 Présentation des matériaux composites 22
1.1.1 Définition 22
1.1.2 Matrice 22
1.1.3 Structure des renforts fibreux 23
1.1.3.1 Armures bidimensionnelles 24
1.1.3.1.1 Mats 24
1.1.3.1.2 Unidirectionnels (UD) 24
1.1.3.1.3 NCFs 25
1.1.3.1.4 Tricots 25
1.1.3.1.5 Tissus 2D 25
1.1.3.2 Armures tridimensionnelles 27
1.1.3.2.1 Tresses 27
1.1.3.2.2 Interlocks 27
1.1.3.2.3 Renforts 3D 28
1.1.3.4 Fibres et mèches 31
1.1.3.4.1 Fibres de verre 31
1.1.3.4.2 Fibres de carbone 32
1.1.3.4.3 Caractéristiques des mèches 33
1.1.3.5 Renforts de l'étude 34
1.2 Mise en forme de composites à renforts tissés par les procédés LCM 35
1.2.1 Infusion sous vide 35
1.2.2 Resin Transfer Moulding 36
1.3 Etat de l'art sur la simulation de la mise en forme de renforts tissés 37
1.3.1 Modélisation à l'échelle macroscopique 38
1.3.2 Modélisation à l'échelle microscopique 40
1.3.3 Modélisation de renforts à l'échelle mésoscopique 40
1.3.3.1 Modèles curvilignes 41
1.3.3.2 Modèles géométriques 3D 42
1.3.3.2.1 Modèles à section constante 42
1.3.3.2.2 Modèles à section variable 42
1.4 Conclusion 47

CHAPITRE 2 : Modèle CAO 3D cohérent de mailles à armure complexe 49
2.1 Hypothèses du modèle 50
2.1.1 Géométrie du modèle 50
2.1.1.1 Constitution 50
2.1.1.2 Problématique et enjeux du respect de la cohérence 51
2.1.1.3 Conséquences des contacts sur la forme des mèches 52
2.1.2 Principes du respect de la cohérence 53
2.1.2.1 Contacts entre mèches transverses – Structure du modèle 53
2.1.2.1.1 Trajectoire 53
2.1.2.1.2 Sections 53

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1.2.2 Contacts longitudinaux et transversaux 54
2.2 Paramétrage et mise en équation de la trajectoire des modèles de mèches 56
2.2.1 Notations et paramétrage 56
2.2.2 Stratégie de mise en données 58
2.2.3 Applications à la première mèche chaîne de G1151® 60
2.3 Définition et création de la section initiale des mèches : cohérence au niveau des contacts entre mèches transverses 61
2.3.1 Définition et paramétrage des sections 61
2.3.2 Définitions et notations de l'épaisseur 63
2.3.3 Recherche d'un point commun et actualisation de l'épaisseur 63
2.3.4 Paramètres de la section transverse 65
2.3.4.1 Vérification de la cohérence 65
2.3.4.2 Fermeture de la section 68
2.4 Modélisation CAO 3D 71
2.5 Traitement des interférences latérales et longitudinales 75
2.5.1 Interférences latérales 75
2.5.1.1 Détection des interférences 76
2.5.1.2 Caractérisation de l'interférence 76
2.5.1.3 Suppression des interférences 77
2.5.1.4 Cas particulier des contacts bilatéraux 78
2.5.1.5 Validation 79
2.5.2 Interférences longitudinales 79
2.5.2.1 Détection 79
2.5.2.2 Caractérisation 79
2.5.2.3 Suppression 80
2.5.3 Application à la maille de G1151® 83
2.5.4 Quelques mots sur la mise en données 83
2.6 Conclusion 84

CHAPITRE 3 : Maillage des renforts obtenus par CAO 85
3.1 Préambule 86
3.1.1 Introduction 86
3.1.2 Analyse de l'existant - choix de la stratégie 86
3.1.3 Eléments 87
3.1.4 Définition des différents critères 88
3.2 Prise en compte des critères de qualité pour l'optimisation du maillage 90
3.2.1 Respect du critère d'angle : choix de la stratégie de maillage 90
3.2.1.1 Problématique et conséquences 90
3.2.1.2 Choix de la stratégie 91
3.2.1.3 Détermination des angles critiques 91
3.2.2 Optimisation des paramètres du maillage en fonction du critère de ratio des longueurs 93
3.2.3 Calcul des différentes longueurs de l'élément 93
3.2.4 Mise en œuvre 95
3.3 Mise en œuvre de l'automatisation 96
3.4 Etapes du maillage 99
3.4.1 Import de la géométrie 99
3.4.2 Partition des mèches 99

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.4.3 Génération du "mesh seed" et du maillage 100
3.4.4 Orientation des éléments 101
3.4.5 Création de groupes de nœuds 103
3.4.6 Création des surfaces de contact 105
3.4.6.1 Surfaces de contact entre mèches d'un même réseau 105
3.4.6.2 Surfaces de contact entre mèches de réseaux différents 106
3.4.6.3 Surfaces de contact entre le renfort et les outils 107
3.5 Conclusion 108

CHAPITRE 4 : Loi de comportement 109
4.1. Modèle de comportement 110
4.1.1. Spécificités du modèle de comportement 110
4.1.2. Spécificités du matériau homogène équivalent 111
4.1.3. Suivi des directions matérielles 112
4.2. Comportement en traction 113
4.2.1. Mèches de G986® et G1151® 113
4.2.2. Essais sur mèches du taffetas Chomarat 115
4.3. Comportement en compaction 119
4.3.1. Protocole des essais de compaction sur mèches et renforts 121
4.3.2. Analyse et résultats 123
4.4. Test de la loi de comportement par des essais élémentaires 125
4.4.1. Essais de traction 125
4.4.2. Essai de compaction 126
4.5. Mise en place de la nouvelle loi de comportement 128
4.5.1. Modèle et hypothèses 128
4.5.1.1. Modèle de comportement longitudinal 128
4.5.1.2. Modèle de comportement transverse 130
4.5.1.2.1. Composantes de compaction 130
4.5.1.2.2. Composantes de cisaillement plan 134
4.5.2. Conclusion 135
4.5.3. Validation de la loi de comportement 135
4.6. Comportement tribologique 138
4.6.1. Protocole expérimental 138
4.6.2. Etude d'un essai 139
4.6.3. Bilan des valeurs retenues 143
4.7. Conclusion 144

CHAPITRE 5 : Optimisation des calculs et résultats 145
5.1 Optimisation des paramètres des calculs en dynamique explicite 146
5.1.1 Schéma explicite 146
5.1.2 Profil de vitesse 147
5.1.3 Mass Scaling 148
5.1.4 Ajout d'un facteur d'amortissement 150
5.2 Etude du contact 151
5.2.1 Définition du contact pour les calculs en dynamique explicite 151
5.2.2 Formulation du contact pair 152
5.2.2.1 Méthode de contrainte 152

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.2.2.1.1 Contact de type cinématique 152
5.2.2.1.1.1 Algorithme du contact cinématique 152
5.2.2.1.1.2 Restrictions sur les surfaces impliquées dans le contact cinématique 154
5.2.2.1.2 Contact par pénalisation 154
5.2.2.1.2.1 Algorithme du contact par pénalisation 154
5.2.2.1.2.2 Restriction sur les surfaces impliquées dans le contact par pénalité 155
5.2.2.1.3 Pondération des surfaces en contact 155
5.2.3 Formulation du glissement 157
5.2.3.1 Formulation « finite sliding » 157
5.2.3.2 Formulation « small sliding » 157
5.2.3.3 Formulation « infinitesimal sliding » 157
5.2.4 Application aux renforts 158
5.2.4.1 Contacts entre mèches d'un même réseau 158
5.2.4.2 Contacts entre mèches de réseaux différents 158
5.2.4.3 Contacts entre mèches et outils 159
5.2.4.4 Contacts entre deux plis de renforts 159
5.3 Simulations sur une mèche 160
5.3.1 Traction 160
5.3.2 Compaction 161
5.4 Simulations de mailles élémentaires de renforts fibreux 163
5.4.1 Compaction sur le taffetas Chomarat 164
5.4.2 Cisaillement sur le G986® 166
5.4.3 Traction biaxiale sur le G1151® 167
5.5 Conclusion 169

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 171
BIBLIOGRAPHIE 177
ANNEXES 183

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Table des illustrations

Figure 1. Etapes du procédé RTM 18

Figure1.1. Structure multiéchelle des renforts 24
Figure1.2. Mat de fibres de verre [DAL08] 24
Figure1.3. Renforts bidimensionnels non tissés 25
Figure1.4. Schéma de métier à tisser 26
Figure1.5. Motifs de tissage de renforts 2D [BER05] 26
Figure1.6. Exemples de tresses 27
Figure1.7. Renfort interlock [DEL09, LI10] 28
Figure1.8. Tissage 3D orthogonal [NEM03] [TEX] 28
Figure1.9. Motifs de mailles élémentaires 29
Figure1.10. Définition du motif d'une maille élémentaire 29
Figure1.11. Définition des mèches à partir d'un interlock, dérivé de [TSA00] 30
Figure1.12. Elaboration et assemblage des mèches de fibres de verre [BUE98] 32
Figure1.13. Elaboration des fibres de carbone à partir de fibres acryliques [DUP06] 33
Figure1.14. Infusion sous vide [CHA11] 35
Figure1.15. Etapes du procédé RTM 36
Figure1.16. Différentes échelles de simulation 38
Figure1.17. Exemple de simulation de drapage [BOR03] 39
Figure1.18. Modèles de mailles élémentaires avant et après réarrangement des mèches [DUR12] .. 40
Figure1.19. Modèle analytique de Kawabata [KAW73a] 41
Figure1.20. Modèle de Adanur et Lia [ADA98] 42
Figure1.21. Exemples de renforts 2D et 3D obtenus par TexGen® 43
Figure1.22. Exemples de maillages de sections par TexGen® [SHE07b] 43
Figure1.23. Exemple de renfort obtenu par WiseTex® [LOM00] 44
Figure1.24. Etapes du maillage par MeshTex [LOM07] 44
Figure1.25. Modèles génériques de section [HIV03] 45
Figure1.26. Trajectoire des mèches [HIV05] 45
Figure1.27. Modèle et coupe transverse d'un sergé 2x2 [HIV05] 46
Figure1.28. Maillage voxel avec apparition de contrainte [DEC11] 46
Figure1.29. Modèle et Résultat de Gatouillat 47

Figure2.1. Localisation des différents types de contact dans la maille élémentaire de G1151® 51
Figure2.2. Exemple de trajectoire de mèche (les points Mij sont les extrémités des entités géométriques (segments et paraboles), donc des contacts) 53
Figure2.3. Forme et composition des sections en fonction des zones de contact (non exhaustif) 54
Figure2.4. Positions théoriques et réelles possibles des mèches de trame dans une maille d 'interlock (type G1151®) 55
Figure2.5. Déformation locale de la mèche due à un contact latéral 55
Figure2.6. Paramétrage et définition des hauteurs d'ondulation 59
Figure2.7. Coupe longitudinale de la première mèche de chaîne (211) : localisation des zones de contact avec les mèches transverses 60
Figure2.8. Trajectoire d'une mèche de chaîne de G1151® tracée dans le viewer Scilab® 61

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Figure2.9. Surfaces supportées par les deux paraboles de trajectoire et surfaces de contact entre les deux mèches 62
Figure2.10. Paramètres et définition des points de la section de contact 64
Figure2.11. Fermeture de la section en fonction des différent cas 70
Figure2.12. Comparaison modèle/géométrie réelle pour les deux renforts 2D étudiés 72
Figure2.13. Modèle géométrique de l'interlock simple 73
Figure2.14. Comparaison réel/modèle pour le G1151® 74
Figure2.15. Vue 3D extérieure du modèle de G1151® - interférences latérales 75
Figure2.16. Emprunte laissée par une interférence latérale après opération booléenne d'intersection 76
Figure2.17. Position de la même mèche de chaîne dans différents plans de coupe trame 77
Figure2.18. Exemple de traitement d'une interférence latérale pour deux mèches de chaîne du G1151® en vue de dessus 78
Figure2.19. Profil de mèche suite à une interférence bilatérale 79
Figure2.20. Principe du traitement des interférences longitudinales 80
Figure2.21. Etapes de suppression d'une interférence longitudinale 82
Figure2.22. Modèle final de G1151® 83
Figure2.23. Organigramme de la démarche itérative de création d'une maille élémentaire cohérente à partir de données expérimentales macroscopiques 84
Figure2.24. Arête peu réaliste due à la variation rapide de la forme de la section le long de la trajectoire 84

Figure3.1. Maillage d'une mèche par Patran® 87
Figure3.2. Paramétrage d'un élément 88
Figure3.3. Critères de validité des éléments hexaédriques Abaqus® 88
Figure3.4. Face Taper hexaédrique 89
Figure3.5. Face Warp hexaédrique 89
Figure3.6. Paramètres des éléments 90
Figure3.7. Eléments pouvant être invalidés 91
Figure3.8. Découpage de section dans le cas α>160° 92
Figure3.9. Définition des paramètres de maillage 95
Figure3.10. Etapes du maillage 98
Figure3.11. Partition des mèches 100
Figure3.12. Orientation initiale des éléments (en bleu la première direction, en vert la seconde direction et en rouge la troisième direction) 101
Figure3.13. Definition d'un élément Abaqus® 102
Figure3.14. Réorientation des éléments (en bleu la direction principale, en jaune la seconde direction et en rouge la troisième direction) 102
Figure3.15. Définition des groupes de nœuds 104
Figure3.16. Definition des groupes de noeuds par ligne 104
Figure3.17. Création des surfaces sur un élément 106
Figure3.18. Extrémités de largeur de mèche 106
Figure3.19. Définition des zones de contact entre sections 107

Figure4.1. Résultats d'essais de traction 114
Figure4.2. Dispositif de traction sur mèches 116
Figure4.3. Comportement en traction des mèches de chaine pour le taffetas Chomarat 117
Figure4.4. Comportement en traction des mèches de trame pour le taffetas Chomarat 118
Figure4.5. Courbe type d'un essai de compaction sur renfort tissé [POT08] 120
Figure4.6. Etapes de la compaction des renforts tissés [POT08] 120

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Figure4.7. Forme des plateaux supérieurs pour les essais de compaction sur mèches et renforts .. 121
Figure4.8. Montage pour les essais de compaction 122
Figure4.9. Mèche sous compaction. Vue de dessus 123
Figure4.10. Courbes effort-déformation pour des essais de compaction sur mèche et renfort de taffetas Chomarat 123
Figure4.11. Courbe de recalage des paramètres K_c et γ 124
Figure4.12. Essai élémentaire 125
Figure4.13. Essai de traction élémentaire à 1% de déformation longitudinale (facteur d'échelle des déformations de 50) 126
Figure4.14. Courbe contrainte déformation pour l'essai de traction élémentaire à 1% de déformation longitudinale 126
Figure4.15. Essai de compaction élémentaire dans la direction 3 127
Figure4.16. Contrainte-deformation direction 3 127
Figure4.17. Evolution de R_{23} 133
Figure4.18. Comparaison des valeurs numériques, expérimentales et obtenues par recalage pour un essai de traction 136
Figure4.19. Comparaison des valeurs numériques, expérimentales et obtenues par recalage pour un essai de compression 136
Figure4.20. Comparaison des valeurs numériques et expérimentales pour un essai de compression. Validation du rapport des déformations 137
Figure4.21. Variation de $d\sigma_{22}$ au cours du temps 137
Figure4.22. Banc d'essais de frottement 139
Figure4.23. Variations du coefficient de frottement en fonction de la distance pour les éprouvettes de renfort de taffetas Chomarat 140
Figure4.24. Evolution des coefficients de frottement renfort/renfort en fonction du nombre de cycles pour le taffetas Chomarat 141
Figure4.25. Evolution des coefficients de frottement renfort/métal en fonction du nombre de cycles pour le taffetas Chomarat 142

Figure5.1. Profil de vitesse imposé 147
Figure5.2. Distorsions possibles sur les éléments lors d'un essai de traction sur mèche 148
Figure5.3. Contact cinématique (simple maître/esclave) 153
Figure5.4. Contact cinématique simple et double maître/esclave 153
Figure5.5. Traction sur mèche droite 160
Figure5.6. Comparaison des courbes expérimentales, théoriques et numériques pour un essai de traction sur mèche droite 161
Figure5.7. Comparaison des résultats numériques, expérimentaux et obtenus par recalage pour un essai de compaction sur mèche droite 162
Figure5.8. Comparaison de la répartition des contraintes et des déformations dans les cas de simulation avec et sans mass scaling au premier step 163
Figure5.9. Géométrie déformée d'une maille élémentaire de taffetas Chomarat après 41% de compaction 164
Figure5.10. Courbe de compaction du taffetas Chomarat : comparaison numérique/expérimental 165
Figure5.11. Renfort de taffetas Chomarat. Variabilité des cellules élémentaires 165
Figure5.12. Géométrie déformée d'une maille élémentaire de sergé G986® après 50° de cisaillement 166
Figure5.13. Courbe de cisaillement du sergé G986® : comparaison numérique/expérimental 166
Figure5.14. Géométrie déformée d'une maille élémentaire de G1151® sous traction équi-biaxiale 167
Figure5.15. Courbes de traction équi-biaxiale du G1151® : comparaison numérique/expérimental 168

Tableau 1.1. Caractéristiques des renforts de l'étude 34

Tableau2.1. Expressions des coordonnées des points I, J, K, L 66

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Tableau4.1. Fraction volumiques de fibres des trois renforts étudiés..... 119
Tableau4.2. Paramètres du taffetas Chomarat..... 125
Tableau4.3. Rigidités pour les trois renforts..... 129
Tableau4.4. Paramètres de comportement transverse des renforts..... 134
Tableau4.5. Coefficients de cisaillement des trois renforts..... 135
Tableau4.6. Coefficients de frottement moyens pour le cycle 1..... 143

Tableau5.1. Résultats de calcul en fonction du mass scaling appliqué..... 149
Tableau5.2. Influence du facteur de pénalité sur le pas de temps..... 155
Tableau5.3. Paramètres du calcul de compaction sur mèche droite..... 161

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

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 [HOS86, SCH00, WIN97, LIN05]. En effet, ces matériaux présentent de nombreux avantages, notamment celui de permettre une diminution de la masse des pièces lorsqu'ils sont correctement exploités. Actuellement, la tendance dans les matériaux composites à haute performance est de produire des pièces de structure de dimensions croissantes avec des formes de plus en plus complexes. De nombreuses possibilités s'offrent alors aux industriels 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 (Figure 1). Le RTM fait partie des procédés actuellement en plein essor et est déjà exploité pour des résines thermodurcissables. Cependant, pour des raisons techniques, environnementales et financières, les résines thermoplastiques sont de plus en plus utilisées dans la fabrication de pièces composites pour des applications moyennes séries. L'inconvénient de ces résines thermoplastiques est qu'elles présentent une forte viscosité pouvant engendrer des problèmes d'imprégnations du renfort.

Le projet LCM-TP (Liquid Closed Moulding – Thermoplastiques) s'inscrit dans cette thématique. L'objectif de ce projet est de mettre en place une stratégie et de développer des outils viables industriellement, permettant la mise en œuvre de composites à matrice thermoplastique par un procédé de type LCM, c'est-à-dire de type « moule fermé ». Le procédé plus particulièrement choisi pour cette étude est le RTM [BUN07, BIN04, GAY03] qui consiste en trois étapes : une première étape de préformage consiste à mettre en forme le renfort ; la seconde étape est l'injection de résine au sein du milieu fibreux déformé et enfin, après polymérisation de la résine, la pièce est démoulée (Figure 1). Le projet LCM-TP s'est décliné en deux thèses. La première, intitulée « Adaptation du procédé RTM à la mise en œuvre de matériaux composites à matrice thermoplastique », soutenue par Ghislain Van Den Broek d'Obrenan le 8 novembre 2011 [VAN11] traite de la seconde étape du procédé RTM, l'étape d'injection de résine. Dans ce cas il s'agit d'une résine thermoplastique (polyamide 6).

La seconde thèse, qui fait l'objet de ce rapport, traite de la première étape du procédé RTM. En effet, le comportement de la pièce composite finale est fortement influencé par la densité de fibres, leur répartition ou leur orientation. Or ces paramètres résultent de la déformation du renfort sous l'effet des sollicitations imposées (traction, cisaillement, compaction,…) lors de l'étape de mise en forme. De plus, concernant le procédé en lui-même, les déformations subies lors de la mise en forme sont à

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

l'origine de la modification de l'espace poral dans le renfort et influencent ainsi fortement l'étape d'injection. Il semble ainsi absolument essentiel de comprendre et de modéliser finement cette étape de mise en forme pour aboutir à une bonne maitrise du procédé LCM thermoplastique. L'objet de ce travail concerne donc la modélisation de la mise en forme de renforts fibreux secs.

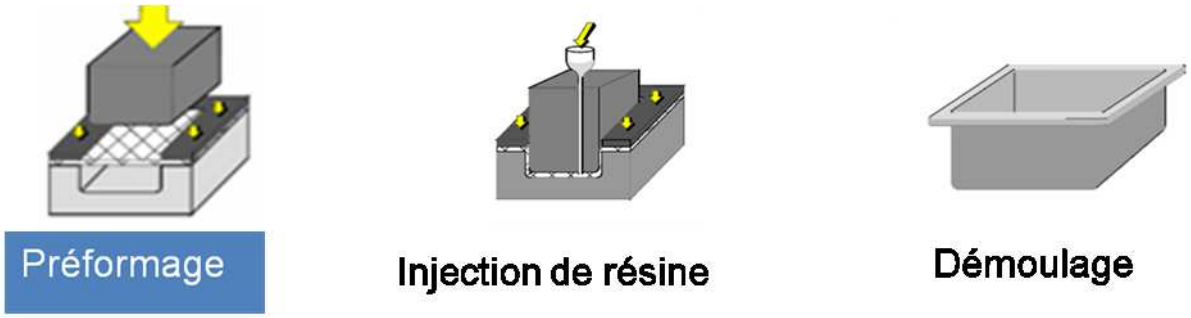


Figure 1. Etapes du procédé RTM

Comme vu précédemment, le comportement mécanique des renforts secs influence fortement le procédé et le comportement de la pièce finale. Il est donc important d'étudier et de disposer de modèles précis de ce comportement de manière à pouvoir prévoir la faisabilité des pièces composites mais aussi d'optimiser les procédés de fabrication. Deux types de méthodes peuvent être envisagés 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 notamment dans le cas des renforts fibreux, et se limitent aux renforts existants. Elles sont par exemple quasi inapplicables pour des études paramétriques ou de sensibilité. C'est pourquoi il est judicieux de les compléter par les secondes.

Les renforts fibreux sont des matériaux multi-échelle puisqu'ils sont composés de mèches, elles-mêmes composées de milliers de fibres. Trois échelles sont définies : l'échelle macroscopique est celle du renfort, l'échelle microscopique étant celle des fibres, l'intermédiaire, l'échelle mésoscopique, correspondant aux mèches de fibres. Bien sûr, les simulations à chacune de ces échelles présentent des avantages et des inconvénients. Les renforts à l'échelle macroscopique n'incluent pas explicitement l'entrelacement des mèches. S'ils sont efficaces et les seuls à fournir des résultats de simulation de mise en forme à l'échelle industrielle aujourd'hui, ils ne peuvent pas être utilisés pour déterminer précisément le comportement mécanique du renfort où l'entrelacement joue un rôle crucial. A l'opposé, les modèles à l'échelle microscopique ont pour objectif de prendre en compte le contact et la distribution des milliers de fibres au sein de la mèche mais les modèles existants aujourd'hui sont encore restreints à quelques dizaines de fibres et sont encore aujourd'hui prohibitifs en temps de calcul pour l'objectif visé.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

L'échelle mésoscopique est donc le meilleur compromis entre réalité et complexité, par la modélisation d'un entrelacement de mèches supposées homogènes. Ces modèles permettent à la fois d'obtenir des résultats globaux, tels que le renfort à l'état déformé, les courbes de comportement ; et locaux, tels que la variation de forme de sections des mèches ou leur déformation. La simulation éléments finis 3D de la cellule élémentaire semble ainsi être l'une des méthodes les plus prometteuses à court terme. C'est donc à cette échelle que ce travail sera mené. Pour illustrer ce point, un état de l'art concernant l'étude de la mise en forme des renforts de composites tissés est présenté au **chapitre 1**. Les chapitres suivants sont alors destinés à mettre en place tous les outils nécessaires à la réalisation de simulations éléments finis à l'échelle mésoscopique de mailles complexes.

Les propriétés des renforts étant essentiellement liées à leur architecture, celle-ci doit être représentée fidèlement. L'un des points les plus délicats est la représentation des zones de contact entre les mèches au niveau des entrelacements. Outre le rôle primordial de la zone de contact dans le comportement mécanique des renforts, une description imparfaite de la zone de contact conduit à des interpénétrations ou des vides qui sont rédhibitoires pour la cohérence des calculs éléments finis. Des stratégies complexes doivent alors être utilisées pour lever ces difficultés. Pour répondre à cette problématique, un modèle géométriquement cohérent pour tout type de cellules élémentaires est présenté au **chapitre 2**. Il permet d'obtenir automatiquement des cellules élémentaires cohérentes au niveau du contact, donc directement exploitables pour les calculs éléments finis.

Afin de mener des calculs éléments finis cohérents à l'échelle mésoscopique, les géométries obtenues doivent alors être maillées à l'aide d'éléments hexaédriques. Il s'agit de géométries gauches pouvant contenir un grand nombre de mèches (interlocks). Il faut donc développer une stratégie de maillage hexaédrique, automatique et efficace. Ceci fait l'objet du **chapitre 3**.

Il faut ensuite définir la loi de comportement du solide homogène équivalent à un matériau fibreux, objet du **chapitre 4**. Cette étape nécessite de modéliser à la fois le comportement des mèches et de leurs interactions.

Enfin, la complexité et la taille croissante des cellules élémentaires, ainsi que la volonté de mettre en place des études de sensibilité et de variabilité sur les cellules, requiert la mise en place de stratégies de calculs les plus efficaces possibles. Des voies d'optimisation de la stratégie de calcul sont donc présentées au **chapitre 5** de ce manuscrit. En outre, ce chapitre permet d'illustrer la démarche globale de modélisation/maillage/simulation à l'échelle mésoscopique conduite dans ce mémoire. Trois types de cellules élémentaires (un taffetas, un sergé et un interlock) sous trois modes de déformation différents (traction biaxiale, cisaillement, compaction) sont présentées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

CHAPITRE 1

Introduction à l'étude des renforts tissés

Ce premier chapitre est une introduction à l'étude de la mise en forme des renforts de composites tissés. Il permet de comprendre les différentes étapes intervenant lors de la fabrication de pièces composites. Il conviendra de présenter dans un premier temps les matériaux composites en général et leurs constituants (renforts, fibres et matrice), ainsi que les différents procédés utilisés pour la fabrication de pièces composites. Enfin une description des différents travaux existants concernant l'analyse de la mise en forme de renforts tissés sera effectuée.

SOMMAIRE

1.1 Présentation des matériaux composites 22
1.1.1 Définition 22
1.1.2 Matrice 22
1.1.3 Structure des renforts fibreux 23
1.2 Mise en forme de composites à renforts tissés par les procédés LCM 35
1.2.1 Infusion sous vide 35
1.2.2 Resin Transfer Moulding 36
1.3 Etat de l'art sur la simulation de la mise en forme de renforts tissés 37
1.3.1 Modélisation à l'échelle macroscopique 38
1.3.2 Modélisation à l'échelle microscopique 40
1.3.3 Modélisation de renforts à l'échelle mésoscopique 40
1.4 Conclusion 47

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1 Présentation des matériaux composites

1.1.1 Définition

D'une manière générale un matériau composite est défini par l'assemblage de plusieurs constituants non miscibles entre eux, permettant de former un matériau dont les propriétés sont supérieures à celles de chacun des composants pris séparément. Pour les applications concernées par cette étude, les composites utilisés sont constitués de deux composants principaux :

- une phase dite "discontinue", le renfort, de nature particulaire ou fibreuse dont le rôle est d'apporter au composite final des performances mécaniques élevées dans une ou plusieurs directions ;
- une phase dite "continue", la matrice, dont le rôle est de lier et transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et qui supporte les sollicitations mécaniques dans les directions où le renfort ne le fait pas.

Les matériaux composites peuvent être divisés en deux classes :

- les matériaux composites à particules, pour lesquels le renfort se trouve sous forme de particules, souvent utilisées pour améliorer les propriétés de la matrice (rigidité, tenue en température…)
- les matériaux composites à fibres, pour lesquels le renfort se trouve sous forme de fibres continues ou discontinues. L'avantage de ces matériaux est de pouvoir moduler "à la carte" les propriétés mécaniques à partir de l'arrangement et de l'orientation des fibres. C'est sur cette classe de matériaux que porte cette étude.

1.1.2 Matrice

En fonction de la nature de la matrice, trois catégories de matériaux composites peuvent être distinguées :

- les composites à matrice organique, les plus répandus dans l'industrie. Ce mémoire y sera consacré, même si une grande partie des concepts seraient exploitables pour les autres familles. Les matrices organiques peuvent être divisées en deux grandes familles :
    - les thermoplastiques qui présentent l'avantage de pouvoir être mis en forme plusieurs fois par chauffages et refroidissements successifs, d'où un certain intérêt concernant leur récupération et leur recyclage;

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

- les thermodurcissables qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois mais présentent des propriétés mécaniques et thermomécaniques plus élevées que les thermoplastiques et une faible viscosité facilitant l'injection. Ce sont les plus utilisés pour les applications structurelles actuelles mais ils sont difficiles à recycler; des méthodes de recyclage commencent à se développer, mais elles sont encore loin d'avoir une efficacité énergétique suffisante pour être appliquées ;

- les composites à matrice métallique ;
- les composites à matrice minérale ou céramique, souvent utilisés pour des applications à hautes températures.

1.1.3 Structure des renforts fibreux

Les renforts fibreux sont classiquement rangés dans les matériaux dits multiéchelles. Cette dénomination fait référence au fait que l'hétérogénéité se situe à l'échelle de ce qui est observable par l'œil humain. Ainsi, suivant l'échelle à laquelle ils sont observés, ils sont composés de mèches (échelle du millimètre), elles-mêmes composées de milliers de fibres (échelle du micromètre) (Figure1.1). Ils peuvent être considérés à la fois comme des matériaux et des structures. L'agencement des mèches peut alors être dit "surfacique" (mats, unidirectionnels, NCFs, tricots et tissus bidimensionnels) ou "tridimensionnelle" (tissus tridimensionnels, interlocks et tresses). De façon générale, un renfort est caractérisé par les paramètres suivants [GAY03, BER05] :

- L'armure, c'est-à-dire la disposition relative des mèches qui le constituent ;
- les mèches (Cf. 1.1.3.4), c'est-à-dire la nature et le type de mèches, eux-mêmes définis par le matériau qui les constitue, le nombre de fibres, les propriétés mécaniques… ;
- l'embuvage, exprimé en %, qui représente l'ondulation des mèches dans le renfort et est exprimé par la relation suivante :

$$e = \frac{l_{mèche} - l_{tissu}}{l_{mèche}} \times 100 \quad \textbf{(1)}$$

- la contexture, qui représente le nombre de mèche par millimètre de tissu ;
- la masse surfacique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

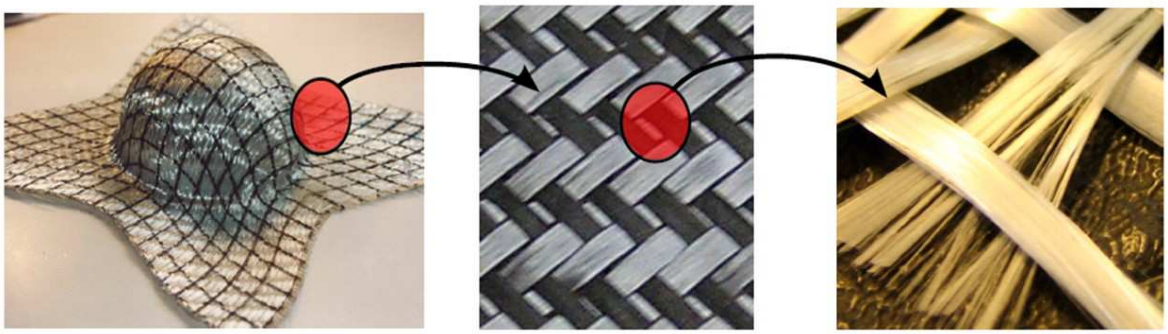


Figure1.1. Structure multiéchelle des renforts

1.1.3.1 Armures bidimensionnelles

1.1.3.1.1 Mats

Ils sont composés de fibres de faible longueur (quelques dizaines de millimètres), disposées dans un plan sans orientation préférentielle (Figure1.2). L'assemblage se fait généralement à l'aide d'un liant. L'absence d'orientation privilégiée des fibres confère au matériau composite final une isotropie de ses propriétés mécaniques dans le plan.

Figure1.2. Mat de fibres de verre [DAL08]

1.1.3.1.2 Unidirectionnels (UD)

A contrario des précédents, il s'agit de nappes de mèches disposées parallèlement (Figure1.3(a)). Ces renforts permettent de transmettre des efforts dans une direction, celle des mèches, toute sollicitation dans la direction perpendiculaire entrainant une séparation des mèches.

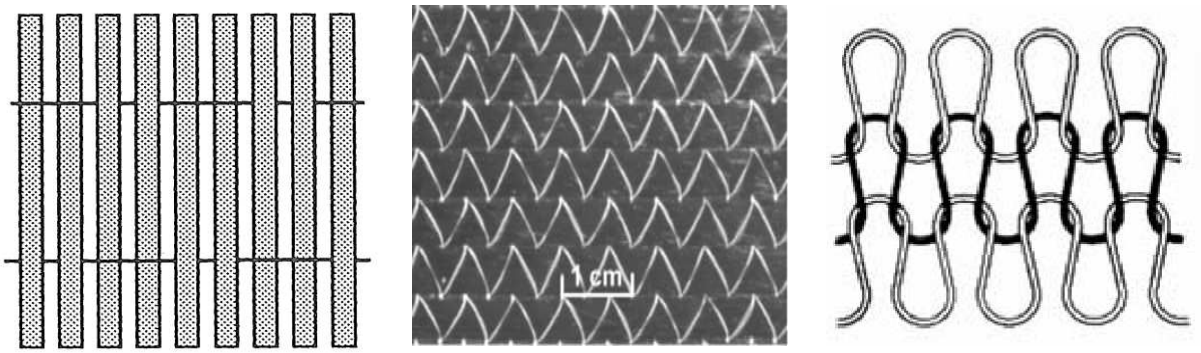
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.3.1.3 NCFs

Il s'agit de renforts non-tissés ou "Non Crimp Fabrics" (NCFs), qui sont constitués de plusieurs nappes d'unidirectionnels solidarisées par des fils de couture, éventuellement dans des directions perpendiculaires (Figure1.3(b)). Les mèches n'étant pas ondulées, ces renforts sont très rigides en traction dans les directions des mèches.

1.1.3.1.4 Tricots

Ils sont obtenus par bouclage d'une unique mèche (Figure1.3(c)), ce qui leur confère une souplesse importante. Ils permettent donc de réaliser des formes complexes, imposant des distorsions importantes par rapport à l'agencement initial.



(a) Unidirectionnel [BER05] **(b) non-tissé ou NCF [BEL12]** **(c) tricot [CAR06]**

Figure1.3. Renforts bidimensionnels non tissés

1.1.3.1.5 Tissus 2D

Il s'agit d'un ensemble de mèches de chaine et de trame s'entrecroisant suivant plusieurs motifs (armure). Ces renforts sont réalisés sur des métiers à tisser (Figure1.4), de sorte que les mèches de chaines sont initialement tendues et s'ouvrent alternativement pour laisser passer les mèches de trame guidées par la navette.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

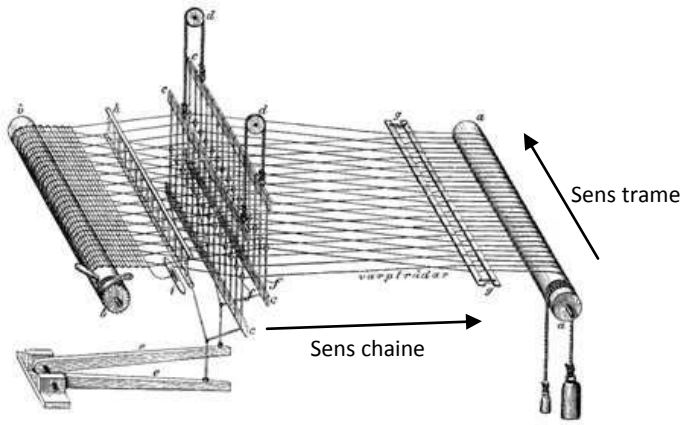
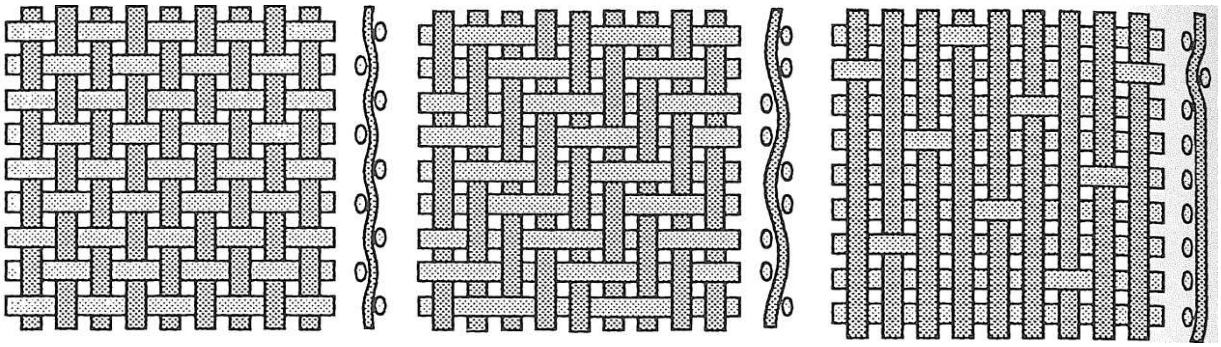


Figure1.4. Schéma de métier à tisser

Initialement, trois sortes d'armures différentes existent :

- la toile ou taffetas (Figure1.5(a)) : chaque mèche de trame passe alternativement sous puis sur les mèches de chaine;
- le sergé m x n (Figure1.5(b)) : chaque mèche de trame passe sous m puis sur n mèches de chaine. Ce mode d'entrecroisement produit sur le renfort des nervures diagonales. La variation des paramètres m et n permet d'obtenir des renforts de rigidité de cisaillement différente;
- le satin de n avec décochement de m (Figure1.5(c)) : chaque mèche de trame passe sous 1 puis sur (n-1) mèches de chaine. L'absence de nervures diagonales est assurée par le décochement m, qui représente un décalage du motif de m mèches de chaines à chaque nouvelle mèche de trame. Ces renforts sont souvent utilisés pour leur souplesse en cisaillement.



(a) taffetas **(b) sergé 2x2** **(c) satin de 8 avec décochement de 6**

Figure1.5. Motifs de tissage de renforts 2D [BER05]

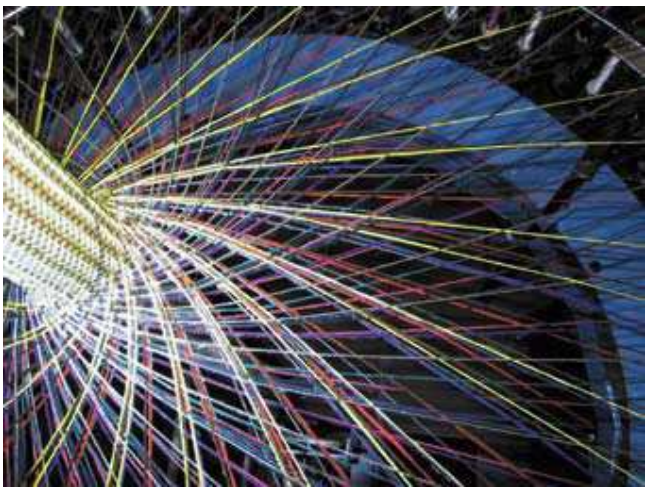
Sur la base des ces architectures classiques, d'autres formes de renforts se développent aujourd'hui, comme l'un des renforts utilisé pour cette étude, dont le motif est un "quasi-UD" qui sera détaillé plus loin dans ce chapitre.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.3.2 Armures tridimensionnelles

1.1.3.2.1 Tresses

Il s'agit d'un tissage cylindrique ou conique des mèches, permettant de réaliser des pièces 3D (Figure1.6). Ces renforts sont notamment utilisés pour satisfaire aux besoins de la construction aéronautique (tuyères…) ou de l'armement [TEL12].



(a) Tressage [NEM03]

(b) Tresse sur gabarit octogonal [TEL12]

Figure1.6. Exemples de tresses

1.1.3.2.2 Interlocks

Il s'agit ici de plusieurs couches de mèches de chaine reliées entre elles par des mèches de trame (Figure1.7). Ce type d'entrelacement, associé aux progrès des procédés de tissage, permet de réaliser une infinité de motifs différents, périodiques ou non. Les renforts de type interlock sont de plus en plus utilisés pour la réalisation de pièces composites de structure car ils présentent l'avantage de permettre la réalisation de pièces épaisses (à partir de renforts de plus en plus épais) tout en évitant les problèmes de délaminage, qui surviennent par superposition de plusieurs couches de renforts 2D par exemple.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

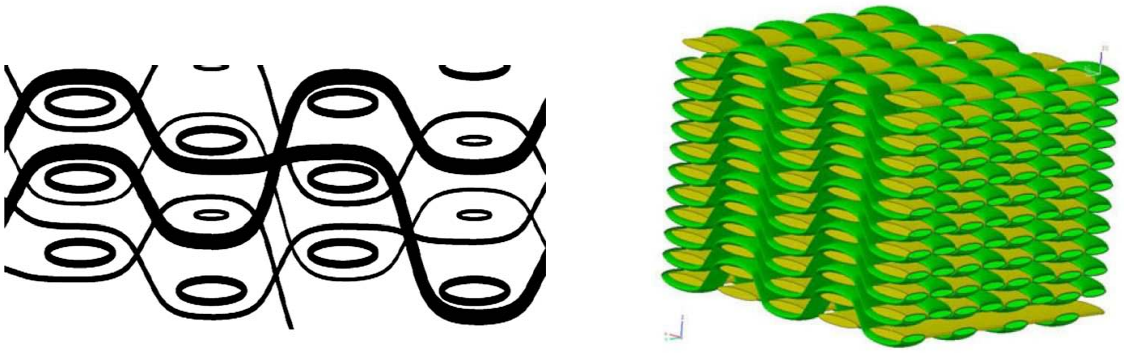


Figure1.7. Renfort interlock [DEL09, LI10]

1.1.3.2.3 Renforts 3D

Les renforts 3D comportent des mèches disposées suivant trois directions orthogonales (Figure1.8). Souvent, il s'agit de plusieurs couches d'unidirectionnels reliées par une mèche orientée dans la direction de l'épaisseur du renfort.

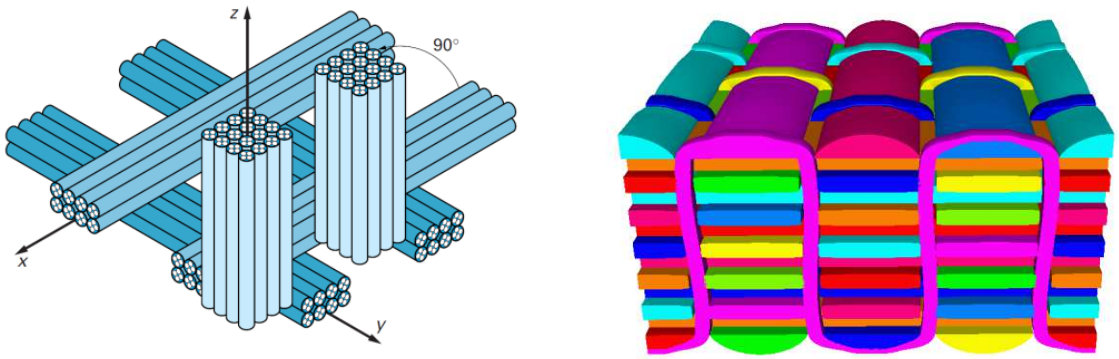
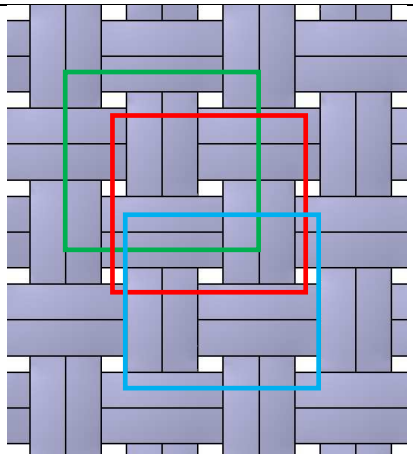


Figure1.8. Tissage 3D orthogonal [NEM03] [TEX]

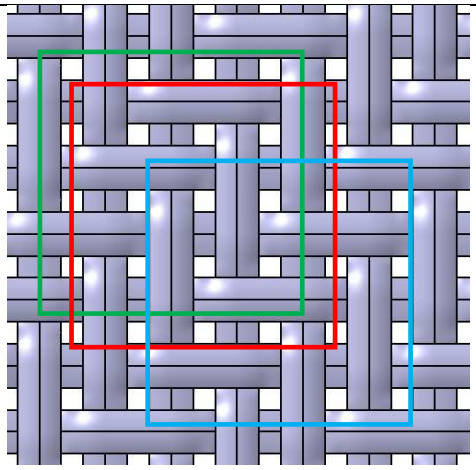
1.1.3.3 Définition de la maille élémentaire

Par nature, le procédé de tissage conduit à la création d'un renfort périodique. La nappe est alors constituée (Figure1.9) de la répétition de ce motif, appelé cellule élémentaire. La Figure1.9 présente des exemples de cellules élémentaires pour un taffetas et un sergé 2x2. Si le nesting désigne traditionnellement le décalage de ce motif, dans cette étude le nesting est considéré comme étant le décalage du motif par rapport à la cellule de base (Figure1.10). Une fois la taille de cellule élémentaire définie (2x2 mèches pour un taffetas, 4x4 mèches pour un sergé 2x2,…), tous les motifs correspondants permettent de générer le renfort et peuvent être considérés comme cellule élémentaire. Il n'existe donc pas une mais une infinité de cellules élémentaires pour un renfort périodique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

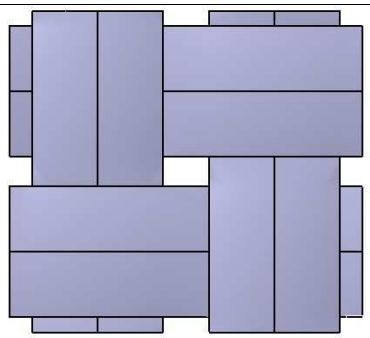


(a) Cellules élémentaires de taffetas

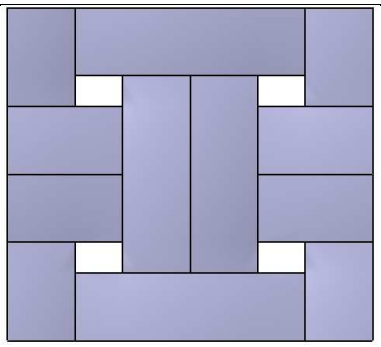


(b) Cellules élémentaires de sergé 2x2

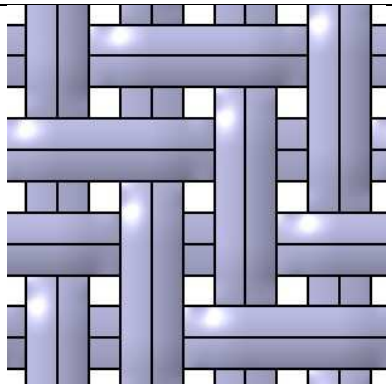
Figure1.9. Motifs de mailles élémentaires



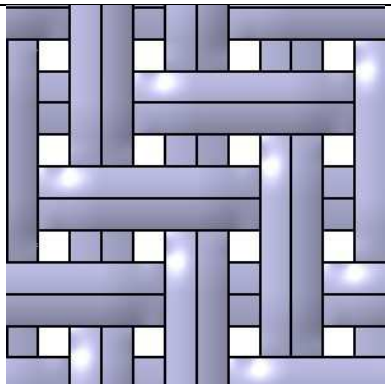
(a) Cellule élémentaire de taffetas standard



(b) Cellule élémentaire de taffetas avec nesting



(c) Cellule élémentaire de sergé 2x2 standard



(d) Cellule élémentaire de sergé 2x2 avec nesting

Figure1.10. Définition du motif d'une maille élémentaire

La modélisation de chacune des mèches constituant la cellule élémentaire prend en compte trois paramètres permettant de définir la position de la mèche au sein du renfort :

- Le réseau auquel elle appartient, c'est-à-dire chaine ou trame.
- La zone dans laquelle elle se situe : une zone est définie comme un groupe de mèches de même coordonnée Z (Figure1.11).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

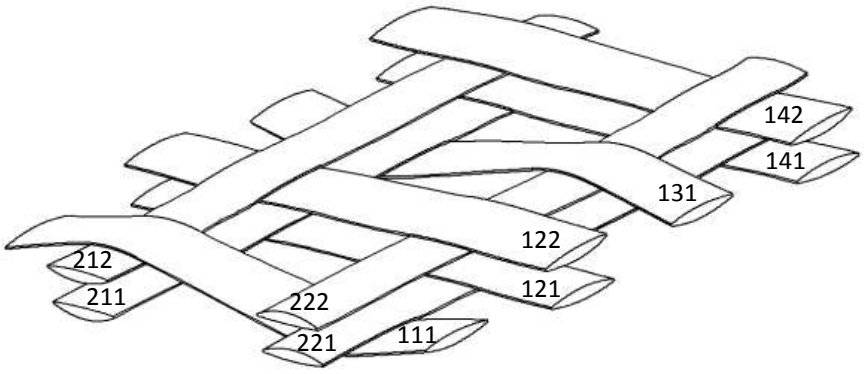


Figure1.11. Définition des mèches à partir d'un interlock, dérivé de [TSA00]

- Le numéro de la mèche : une zone peut comporter plusieurs mèches ; les mèches de chaque zone sont donc numérotées en prenant la mèche numéro 1 comme étant celle de coordonnée Z la plus petite de la zone (Figure1.11).

Dans cette étude, la convention choisie est la suivante : chaque mèche est nommée avec trois nombres. Le premier nombre représente le réseau (1 pour les chaines et 2 pour les trames), le second est celui de la zone et le troisième celui de la mèche. Ainsi, pour l'exemple de la Figure1.11, la mèche 1 de la zone 1 du réseau de chaines est nommée mèche111. Quelques exemples de numérotation sont donnés en Figure1.11.

Si la structure précédente est théoriquement fournie, la réalité peut être un peu différente : non seulement des renforts non périodiques dédiés à des applications spécifiques tendent à se développer mais surtout, la périodicité du renfort n'est pas toujours respectée. Ainsi ramener l'étude du renfort à une seule cellule élémentaire peut s'avérer réducteur. Pour s'approcher de la réalité, il faut donc s'apprêter à :

- étudier plusieurs cellules élémentaires avec des paramètres différents pour aboutir à des données statistiques ;
- ou étudier une cellule de taille plus importante que la théorie, prenant en compte la variabilité du renfort ;
- ou prendre en compte la définition de plusieurs motifs représentatifs de l'architecture pour les renforts non périodiques.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.3.4 Fibres et mèches

Les tissus étudiés dans ce manuscrit seront tous constitués de fibres continues de verre ou de carbone. Les procédés d'élaboration des mèches sont donc explicités pour ces deux matériaux.

1.1.3.4.1 Fibres de verre

Bien que le verre sous forme courante soit caractérisé par une grande fragilité, il présente de bonnes caractéristiques mécaniques lorsqu'il est élaboré sous forme de fibres ainsi qu'un bon rapport performance/prix, d'où son utilisation massive dans les matériaux composites. L'élaboration (Figure1.12) se fait à partir d'un verre filable, dit verre textile, composé entre autres de silice, d'alumine, de chaux, de magnésie… Suivant sa composition, plusieurs types de verres peuvent être obtenus dont les plus classiques sont :

- le verre de type E, de composition standard, qui est le plus utilisé ;
- le verre de type D, utilisé pour ses hautes propriétés diélectriques, notamment pour la construction de matériel de télécommunications ;
- le verre de type C, utilisé pour des applications nécessitant une bonne résistance aux agents chimiques ;
- Les verres de types R et S, aux caractéristiques mécaniques élevées, utilisés pour des structures à hautes performances mécaniques.

Les étapes d'élaboration des fibres de verre sont les suivantes : le verre est d'abord fondu puis maintenu à une température de 1250°C, température à laquelle sa viscosité permet un écoulement par gravité à travers des orifices de quelques dixièmes de millimètres de diamètre. Le verre, en phase plastique, est alors étiré et refroidi. Le diamètre des fibres (5 à 24µm) est conditionné par la vitesse d'étirage et les conditions de refroidissement. Les fibres obtenues sont finalement ensimées (introduction d'un additif), de manière à assurer leur cohésion sous forme de mèches, de les protéger de l'abrasion, de leur conférer une plus grande raideur, de faciliter l'imprégnation par la résine et d'améliorer la tenue mécanique des interfaces fibres/matrice.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

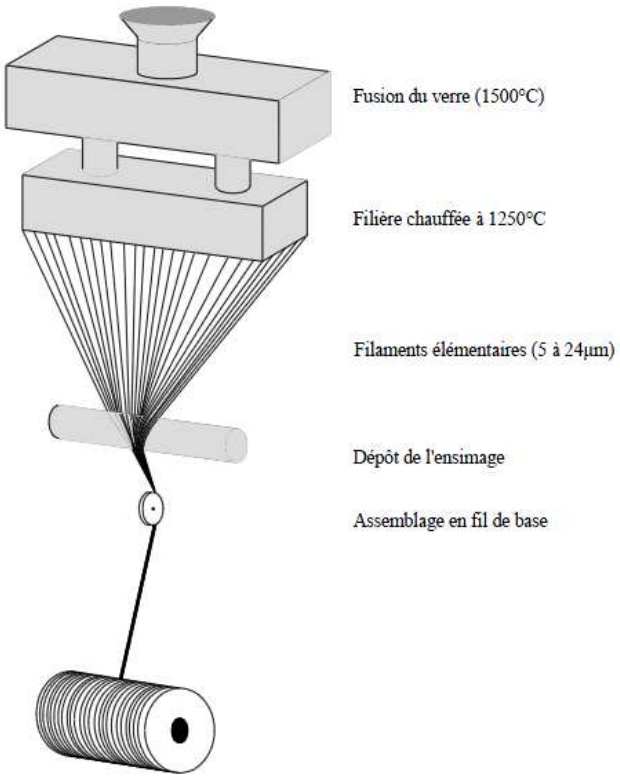


Figure1.12. Elaboration et assemblage des mèches de fibres de verre [BUE98]

1.1.3.4.2 Fibres de carbone

Les fibres de carbone sont utilisées pour leurs bonnes caractéristiques mécaniques associées à une masse volumique faible. Elles sont obtenues à partir d'une matière première appelée précurseur. La qualité des fibres de carbone dépend de la qualité de ce précurseur. Deux précurseurs sont couramment utilisés : les fibres acryliques (polyacronitrile ou PAN) et les fibres de brai, obtenu par filage de résidus de houille ou de pétrole. Les procédés d'élaboration des fibres de carbone diffèrent suivant le précurseur utilisé.

Les fibres acryliques (Figure1.13) subissent d'abord une décomposition thermique sans fusion des fibres, aboutissant à une graphitation dans laquelle la structure initiale des fibres est retrouvée. Les procédés actuels utilisent des filaments acryliques assemblés sans torsion, qui subissent quatre traitements successifs :

- une oxydation : chauffage des fibres à 300°C
- une carbonisation : chauffage progressif des fibres de 300°C à 1100°C. Cette étape permet d'obtenir des fibres HR (haute résistance) ou HT (haute ténacité)
- une graphitation uniquement si des fibres à module d'Young élevées sont souhaitées. Cette étape s'effectue par pyrolyse des fibres à 2600°C ou plus et permet d'obtenir des fibres HM

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

(haut module) ou THM (très haut module) mais dont la contrainte à la rupture est plus faible que celle des fibres HR ou HT

- un traitement de surface qui permet d'augmenter la rugosité des filaments et donc d'améliorer la liaison fibres/résine.

Le brai, quant à lui, est utilisé pour son faible coût. Il est chauffé entre 350°C et 450°C, étape après laquelle un produit intermédiaire entre liquide et cristal (appelé mésophase) est obtenu. Ce produit est ensuite filé, carbonisé et pyrolysé à une température supérieure à 2000°C. Les fibres de brai permettent d'obtenir, par cette méthode, des fibres haut module.

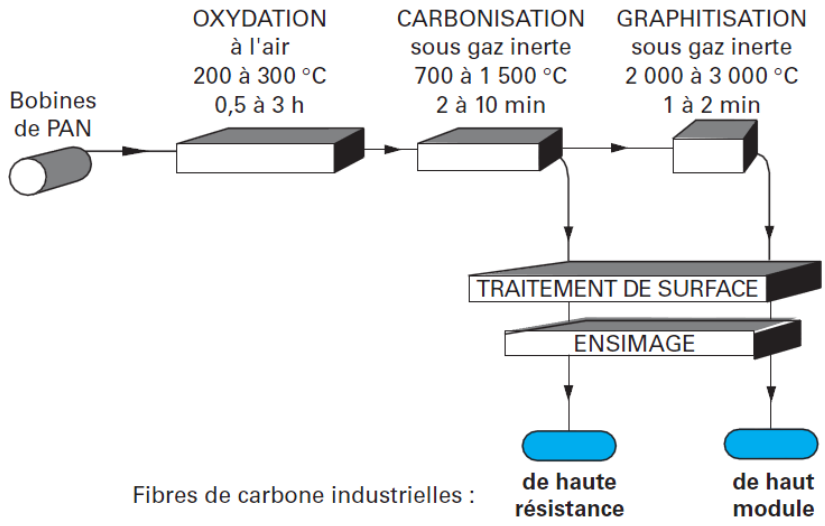


Figure1.13. Elaboration des fibres de carbone à partir de fibres acryliques [DUP06]

1.1.3.4.3 Caractéristiques des mèches

Les fibres sont assemblées sous forme de mèche, lui conférant plus ou moins de cohérence suivant qu'elles sont torsadées, entrelacées ou juste juxtaposées avec ou sans traitement (ensimage, ignifugation,…). Chaque mèche peut contenir plusieurs milliers de fibres. Les propriétés utilisées pour caractériser une mèche sont les suivantes :

- matériau constitutif : ici verre ou carbone
- le type d'assemblage (torsadé…)
- le nombre de fibres exprimé en milliers
- la rigidité en tension exprimée en N
- l'effort à la rupture en tension exprimé en N
- la masse linéique exprimée en tex (1 tex=1 g/km)

Renfort et matrice sont ensuite assemblés pour former une pièce composite grâce à différents procédés de fabrication (Cf §1.2).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.1.3.5 Renforts de l'étude

Pour ces travaux, trois renforts sont utilisés comme application. Un dernier renfort (nommé ici Interlock test), virtuel, dérivé de [TSA00], servira à valider les étapes du modèle CAO 3D. Leurs propriétés sont résumées dans le Tableau1.1.

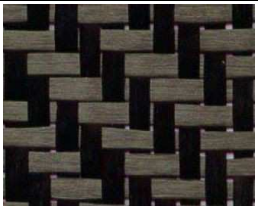
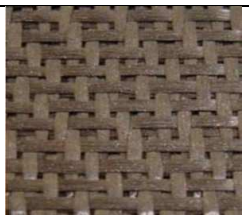
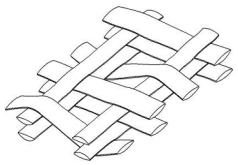
	Taffetas Chomarat	G986® Hexcel	G1151® Hexcel	Interlock test
				
Type d'armure	Quasi-UD	Sergé 2x2	Interlock	Interlock
Matériau constituant les mèches	Verre avec ensimage compatible Polyamide	Carbone	Carbone	
Masse linéique (tex)	1200 (chaines) 68 (trames)	420	396	
Contexture	Chaines et trames : 3 mèches/cm	Chaines et trames : 3.5 mèches/cm	Chaines et trames : 7.5 mèches/cm	Chaines : 3.75 mèches/cm Trames : 2.8 mèches/cm
Largeur initiale des mèches (mm)	Chaines : 3.07 Trames : 0.44	2.68	1.82	2
Epaisseur initiale des mèches (mm)	Chaines : 0.54 Trames : 0.12	0.288	0.28	0.3

Tableau 1.1. Caractéristiques des renforts de l'étude

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.2 Mise en forme de composites à renforts tissés par les procédés LCM

Actuellement, plusieurs procédés de mise en œuvre existent [BER05, GAY03]. Parmi ceux-ci, les procédés de type LCM (Liquid Composite Moulding) permettent de mettre en forme des pièces composites à renforts tissés et matrice polymère. Il s'agit de procédés de moulage s'effectuant entre un moule et un contre moule et faisant intervenir une résine liquide [DAL08]. Ils consistent à placer une préforme sèche dans un moule avant injection ou infusion de résine. Parmi les procédés LCM, les plus utilisés sont le RTM (Resin Transfer Moulding) et l'infusion sous vide.

1.2.1 Infusion sous vide

Il s'agit d'un procédé qui consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique (Figure1.14). Le renfort et la résine sont disposés entre un moule et une membrane étanche. Une pompe à vide est alors utilisée pour créer une dépression permettant à la fois d'étaler et de "débuller" la résine. Ce procédé permet la fabrication de pièces de grandes dimensions, présentant de bonnes qualités mécaniques, une résine uniforme et peu d'inclusions d'air, mais l'épaisseur des pièces n'est pas maitrisable facilement et la qualité de surface est moindre du côté de la membrane. En outre, les cadences sont fréquemment lentes.

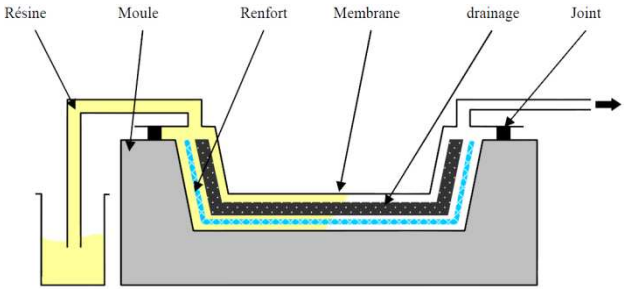


Figure1.14. Infusion sous vide [CHA11]

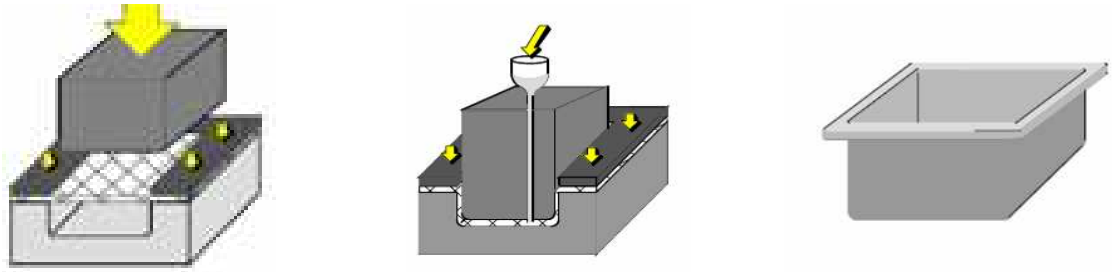
Plusieurs variantes de ce type de procédés existent, comme les procédés de type RFI (Resin Film Infusion), pour lesquels le renfort est posé sur un film de résine solide, ou les procédés de type LRI (Liquid Resin Infusion) pour lesquels le renfort est posé sous un tissu drainant. Dans les deux cas, le tout est disposé dans un sac à vide et la résine infuse à travers l'épaisseur du renfort.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.2.2 Resin Transfer Moulding

Le procédé RTM (Resin Transfer Moulding) est également très utilisé pour la fabrication de pièces composites [POT99, BER05]. Il est décomposé en trois étapes principales (Figure1.15) :

- une première étape de préformage consiste à placer le renfort entre un moule et un contre-moule rigides fermés, ce qui permet de maitriser l'épaisseur de la pièce finale. Des serre-flans peuvent être utilisés pour tendre initialement le renfort et retarder l'apparition de défauts de type plissements ;
- la seconde étape consiste à injecter une résine liquide. Traditionnellement, l'injection se fait à base de résine thermodurcissable. Cependant, l'intérêt croissant pour les problèmes de recyclabilité pousse les chercheurs à adapter les procédés RTM aux résines thermoplastiques, bien qu'elles soient moins adaptées à l'injection à cause de leur plus forte viscosité ;
- une fois la résine polymérisée, la pièce est démoulée.



(a) Préformage (b) Injection de résine (c) Démoulage

Figure1.15. Etapes du procédé RTM

Le préformage est une étape clé de la fabrication de pièces composites. En effet, le comportement de la pièce finale est non seulement influencé par le comportement mécanique du renfort sous sollicitation, mais aussi par les propriétés géométriques du renfort telles que la densité de fibres, leur répartition ou orientation et la position finale des mèches à l'état déformé. Il est par exemple nécessaire de connaitre l'état déformé du renfort après l'étape de préformage de manière à connaitre l'orientation des mèches et donc de prédire l'existence et la taille des pores, pour pouvoir gérer les interactions fluide/structure durant l'étape d'injection. Pour étudier les déformations de renforts secs, deux possibilités existent : la mise en place de méthodes expérimentales permet d'obtenir des résultats directs et de manière efficace, mais leur réalisation est souvent longue, difficile et limitée aux renforts existants. D'où l'intérêt de les compléter par des méthodes numériques. Plusieurs méthodes de simulation de la mise en forme de renforts existent, dépendant de l'échelle d'étude. Ces méthodes sont détaillées dans la partie suivante.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Il existe d'autres procédés par injection de résine, notamment toutes les variantes du RTM, tels que le VARTM (Vacuum Assisted RTM) pour lequel il y a ajout d'une évacuation en bout de moule, le CRTM (Compression RTM) qui fait intervenir une étape de compaction permettant d'augmenter les taux de fibres, ou encore le CIRTM (Co-Injection RTM) pour lequel il y a injection de deux résines différentes.

Tous ces procédés sont actuellement étudiés dans le but d'optimiser la fabrication de pièces composites, en termes de qualité de la pièce finale mais aussi de cadences de production.

L'étude présentée ici s'inscrit dans un projet plus global nommé LCM-TP et financé par l'Institut Carnot I@L (Ingénierie@Lyon). L'objectif est de mettre en place une stratégie et de développer des outils permettant la mise en œuvre de composites à matrice thermoplastique, via un procédé de type LCM. Les différentes étapes de la stratégie de mise en œuvre sont étudiées, à partir de la réalisation de pièces planes, avec différentes couches de renforts. Pour ce faire, un prototype a été conçu pour réaliser et analyser les injections de résine au sein du renfort (taffetas Chomarat décrit en 1.1.3.5) au sein du laboratoire IMP (Ingénierie de Matériaux Polymères), UMR CNRS 5223, de l'INSA de Lyon et l'étude du préformage, première étape commune à tous les procédés de type LCM, fait l'objet de ce mémoire.

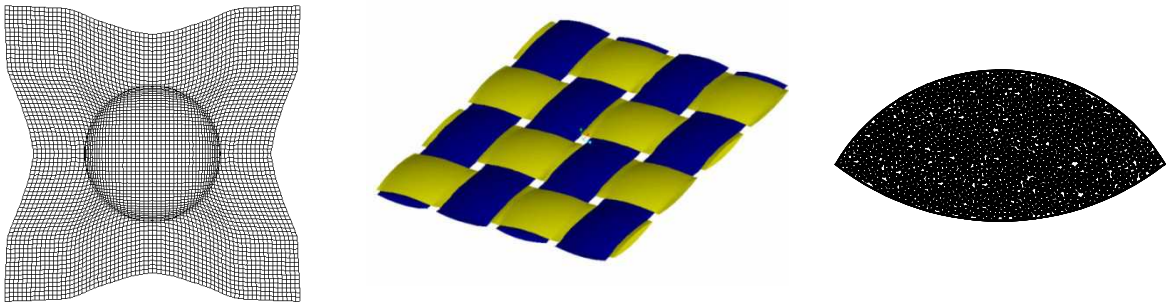
1.3 Etat de l'art sur la simulation de la mise en forme de renforts tissés

L'objectif principal de la simulation de la mise en forme de renforts secs est de pouvoir mettre au point et optimiser le procédé de fabrication de pièces composites. L'utilité des simulations est de donner accès, entre autres informations, à l'orientation des mèches et à la densité de fibres, ce qui permet de prévoir la perméabilité du renfort et donc la qualité de l'injection mais aussi et surtout les propriétés mécaniques de la pièce finale. De par sa structure, le renfort hérite du comportement des mèches, qui héritent du comportement des fibres. D'où l'importance de définir correctement l'échelle d'étude et le comportement des constituants à chacune d'elles. Trois échelles d'étude sont à distinguer (Figure1.16) :

- l'échelle microscopique est l'échelle des fibres et prend en compte le contact et la distribution des milliers de fibres (Figure1.16(c)) ;
- l'échelle macroscopique est l'échelle du renfort, considéré comme un matériau continu. Il est alors modélisé par une membrane ou une coque. A cette échelle, l'entrelacement entre les différentes mèches n'est pas inclus explicitement (Figure1.16(a)) ;

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

- l'échelle mésoscopique est l'échelle intermédiaire entre les deux précédentes et considère des entrelacements de mèches supposées continues. Cette échelle a l'avantage de pouvoir obtenir des résultats à la fois globaux, tels que le renfort à l'état déformé, et locaux, comme les déformations des mèches ou la variation de forme des sections (Figure1.16(b)).



(a) Macroscopique **(b) Mésoscopique** **(c) Microscopique**

Figure1.16. Différentes échelles de simulation

Différentes études existent à ces trois échelles, dont un aperçu est donné ci-après.

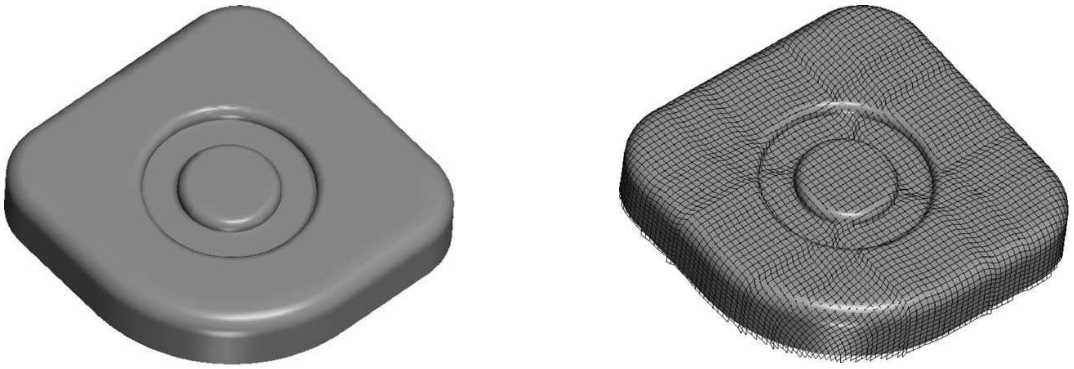
1.3.1 Modélisation à l'échelle macroscopique

La simulation du comportement des renforts tissés à l'échelle macroscopique constitue le but final de la recherche sur la mise en forme de ces renforts. L'objectif est alors de pouvoir prédire l'orientation et la santé des fibres, par exemple l'apparition de défauts de type plissements ou d'endommagement de mèches, à partir des outils et des propriétés des renforts. Toute simulation macroscopique nécessite une caractérisation locale du comportement du renfort. Actuellement, de nombreux modèles existent, qui peuvent être classés en deux catégories :

- les modèles purement géométriques ou cinématiques, tels que l'algorithme du filet, consistent à simuler le drapage (Figure1.17) du renfort sans prendre en compte le comportement mécanique [BOI04, BOR03]. Dans cette approche, les aspects mécaniques ne sont pas introduits et la mise en forme se fait sans effort et sans frottement. Ces modèles reposent sur plusieurs hypothèses fortes : non glissement entre les mèches des deux réseaux, mèches considérées comme inextensibles, rigidité en cisaillement du renfort considérée nulle. Cette méthode a l'avantage d'être rapide et de donner accès aux angles de cisaillement entre mèches des deux réseaux. Cependant, ces modèles ne prennent pas en compte les aspects mécaniques. Initialement prévu et toujours bien adaptés au drapage, ils

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

sont moins adaptés à l'emboutissage où le comportement mécanique joue un rôle important [HAM07]. Les résultats obtenus sont alors imprécis, voire fortement erronés [VAN09] ;



(a) Pièce à draper **(b) Drapage à 0°**

Figure1.17. Exemple de simulation de drapage [BOR03]

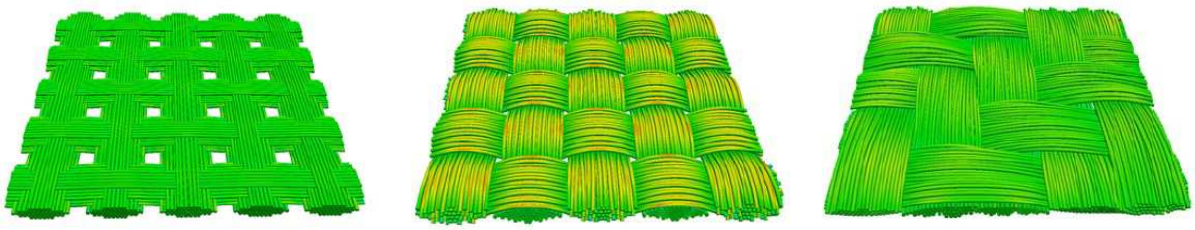
- les approches mécaniques ou éléments finis sont divisées en trois catégories :
  - les approches discrètes, qui sont des extensions de l'algorithme du filet, permettent de simuler simplement le comportement sous sollicitations simples (traction, compaction et cisaillement) en modélisant les renforts par un ensemble de nœuds reliés par des barres assimilées à des ressorts [BEN07, LIU05] ;
  - les approches continues qui considèrent le renfort comme un solide continu, maillé par des éléments finis de coque ou de membrane. La difficulté de ces approches réside dans le choix de la loi de comportement associée aux éléments. Actuellement, plusieurs loi de comportement ont été développées à l'aide d'approches hypoélastiques [PEN05, KHA10] ou hyperélastiques [TEN07, AIM09] ;
  - les approches semi-discrètes, qui sont une combinaison des deux précédentes et dans lesquelles les mèches sont prises en compte implicitement. Des études existent sur des renforts 2D avec des éléments finis de membrane ou coque [BOI06, HAM07, BOI05] et sur les renforts 3D avec des éléments finis 3D [LUY09].

Actuellement, il s'agit de la seule approche efficace qui permette de fournir des résultats à l'échelle des pièces réelles, tels que l'orientation globale des mèches. Cependant, elle n'inclut pas l'entrelacement des mèches et ne donne donc pas accès aux informations plus locales, telles que la déformation du squelette, le glissement des mèches…[ALL09]. D'autres approches se développent pour complémenter celle-ci et sont détaillées ci-après.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.3.2 Modélisation à l'échelle microscopique

Dans ce cas, le constituant de base est la fibre, matériau continu par définition, dont le comportement est défini comme linéaire orthotrope. Si cette approche permet de retomber sur les lois de comportement classiques des matériaux continus, la difficulté des simulations à l'échelle microscopique réside dans la gestion des nombreux contacts existant entre les milliers de fibres constituant chaque mèche. Actuellement, les modèles existants qui s'approchent le plus de la modélisation du comportement des renforts à l'échelle microscopique sont ceux effectuées sur des cordes ou câbles, qui s'apparentent à des mèches contenant moins de fibres et fortement torsadées [GHO07a, GHO07b, REZ04, JIA99, NAW00, DUR98]. Des modèles plus spécifiques ont été développés par Durville [DUR10, DUR05, DUR07], dans lesquels le réarrangement des mèches au cours d'une sollicitation est étudié (Figure1.18). Ces modèles sont encore limités par les temps et les capacités de calcul à quelques dizaines de fibres, qui s'apparentent donc plutôt à des paquets de fibres. En outre, ces modèles sont effectués sur des renforts 2D simples (taffetas, sergé). D'autre part, la répartition des fibres dans la mèche n'est pas complètement maitrisée aujourd'hui. Cette échelle pour les simulations de mise en forme de pièces est donc inexploitable aujourd'hui.



(a) Configuration initiale **(b) maille élémentaire de taffetas** **(c) maille élémentaire de sergé**

Figure1.18. Modèles de mailles élémentaires avant et après réarrangement des mèches [DUR12]

1.3.3 Modélisation de renforts à l'échelle mésoscopique

Intermédiaire entre les deux précédentes approches, les simulations à l'échelle mésoscopique prennent en compte l'entrelacement des mèches, considérées continues. Il s'agit d'un bon compromis entre réalisme et complexité, permettant d'avoir accès à la fois à des résultats locaux (déformation des mèches, variation de forme des sections…) et globaux (renfort à l'état déformé). Pour pouvoir réaliser ces simulations, il est nécessaire de disposer d'une (ou plusieurs) cellule(s) élémentaire(s) du renfort considéré et d'un maillage cohérent de ces cellules. Parmi les problématiques, cette étude se consacre à la simulation de la déformation à l'échelle mésoscopique de cellules élémentaires sous sollicitations simples intervenant notamment lors de la création de plaques ; les interactions entre mèches devront être prises en compte, ce qui nécessite de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

représenter précisément les zones de contact entre les réseaux. Les modèles ne devront donc contenir ni vides entre mèches ni interpénétrations, engendrant des problèmes de maillage. En outre, les renforts étant de plus en plus complexes et comprenant un nombre toujours croissant de mèches, la génération des géométries et du maillage devra se faire de manière automatique. Les modèles devront aussi pouvoir prendre en compte les variations de mailles élémentaires. Pour finir, le maillage devra être effectué de manière à minimiser au mieux les temps de calcul, c'est-à-dire que les éléments ne devront pas être trop petits, tout en respectant la géométrie de la mèche. Si pour l'instant il semble délicat d'envisager une simulation à l'échelle mésoscopique d'une pièce industrielle, modéliser la déformation de quelques mailles élémentaires, éventuellement complexes, serait un atout essentiel pour l'analyse et la simulation de mise en forme des renforts. C'est à cet enjeu que ce mémoire tente d'apporter réponse. Actuellement, plusieurs modèles géométriques et de maillage de renforts existent dont certains sont détaillés ci-après.

1.3.3.1 Modèles curvilignes

Les premiers modèles de renforts ont été développés par Kawabata [KAW73b, KAW73a] ; il s'agit de modèles curvilignes pour lesquels le renfort est modélisé par des barres articulées (Figure1.19) dont le comportement en traction est celui de la mèche seule, élastique, éventuellement non linéaire. Les intersections entre mèches sont modélisées par des ressorts. Ce modèle très simplifié n'est applicable qu'aux renforts de type taffetas et la simplification de la trajectoire, modélisée par une unique droite, entraine des interpénétrations au niveau du contact entre les réseaux lorsque la section transverse est ajoutée et n'est donc pas exploitable pour la modélisation 3D.

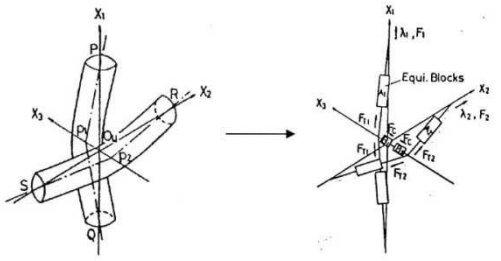


Figure1.19. Modèle analytique de Kawabata [KAW73a]

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

1.3.3.2 Modèles géométriques 3D

Par la suite, des modèles géométriques 3D ont été réalisés, qui peuvent être classés en deux sous-catégories :

1.3.3.2.1 Modèles à section constante

- Les modèles géométriques 3D à section constante, tel que celui développé par [ADA98] (Figure1.20), reposent sur une technique nommée CAGD (Computer Aided Geometric Design). Cette méthode permet de réaliser des modèles 3D de renfort 2D et 3D, en créant des mèches par balayage d'une courbe fermée (circulaire ou elliptique) le long d'une trajectoire, définie par une équation paramétrique. Ces modèles ont inspirés les travaux de Sherburn sur TexGen® [SHE07b], détaillés plus loin.
- Un autre type de modèle géométrique 3D à section constante, GenTex, a été développé par Couegnat [COU08] et permet de générer automatiquement des architectures de renforts différentes en deux temps : le renfort est d'abord modélisé avec des chemins moyens de trame rectilignes puis un principe de minimisation de l'énergie de flexion des mèches est appliqué pour obtenir la géométrie finale du renfort. Entre chaque mèche, un espace paramétrable est inséré.

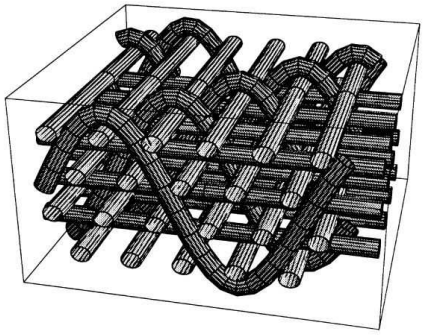


Figure1.20. Modèle de Adanur et Lia [ADA98]

Ces méthodes permettent de modéliser rapidement et très simplement des architectures de renforts. Cependant, elles ne sont pas représentatives de la réalité, la forme des sections de mèches dans les renforts étant fortement variable le long d'une trajectoire [HIV05].

1.3.3.2.2 Modèles à section variable

- Les modèles géométriques 3D à section variable sont nombreux dans la littérature. Parmi ces modèles, un premier mis en œuvre dans le logiciel TexGen® a été développé à l'université de Nottingham [SHE07a]. Initialement créé par Souter [ROB98] à partir de travaux de Robitaille [ROB03, ROB99, ROB00], le développement a été poursuivit et étendu par Sherburn [SHE07b,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

SHE07a]. Ce logiciel permet de générer automatiquement tout type de renforts 2D et 3D (Figure1.21), dans lesquels les mèches peuvent avoir des sections de formes variables le long d'une ligne moyenne. Par contre, chaque mèche étant générée de manière indépendante, la tangence entre les réseaux n'est pas assurée.

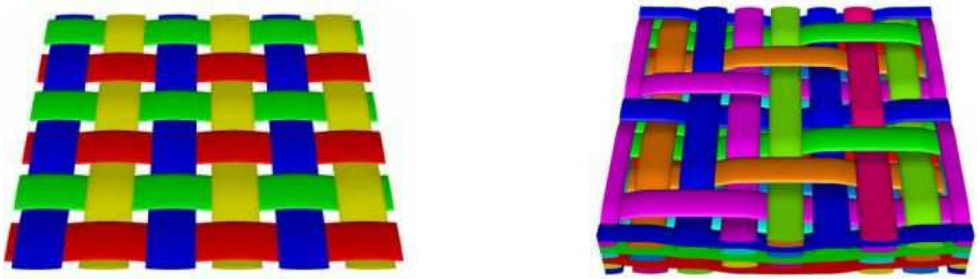


Figure1.21. Exemples de renforts 2D et 3D obtenus par TexGen®

TexGen® présente l'avantage de pouvoir mailler les géométries obtenues en deux étapes : une première étape consiste à mailler chaque section de contact avec des éléments 2D en s'assurant de la compatibilité des maillages de ces sections : en prenant l'exemple de sections elliptiques, chacune d'elles est maillée avec des éléments rectangulaires sauf au niveau des quatre coins, maillés avec des triangles (Figure1.22), de manières à limiter les distorsions d'éléments. Ce maillage est répété de manière équidistante sur les sections le long de la mèche. La seconde étape consiste à relier les maillages de sections adjacentes pour former des éléments 3D volumiques. Les deux maillages 2D doivent alors être compatibles pour pouvoir être liés, c'est-à-dire que chaque élément d'une section doit correspondre à un élément de la section suivante. Ce type de maillage pose donc problème lorsque les sections sont variables le long de la mèche.

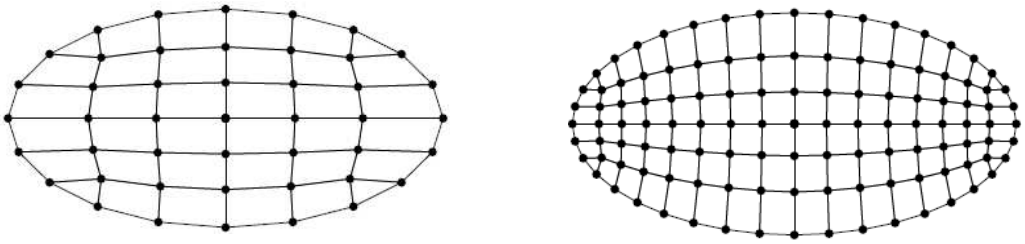


Figure1.22. Exemples de maillages de sections par TexGen® [SHE07b]

- Un autre type de modèle géométrique 3D à sections variables a été développé à la Katholieke Universiteit Leuven et a donné lieu au logiciel WiseTex® [LOM00, VER05, LOM06, LOM07]. Il s'agit de l'outil le plus connu et le plus utilisé dans l'industrie. Il permet de modéliser des géométries de renforts complexes (Figure1.23), notamment 3D à partir de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

modèles analytiques cherchant à minimiser l'énergie de flexion des mèches. Chaque mèche est décrite par sa ligne moyenne, décomposée en plusieurs segments ondulés et par les sections au niveau des intersections. Ces sections peuvent être lenticulaires ou elliptiques symétriques. Initialement, ce modèle ne garantissait pas la non pénétration des mèches des deux réseaux. Ce défaut a été corrigé par la suite [VER05].

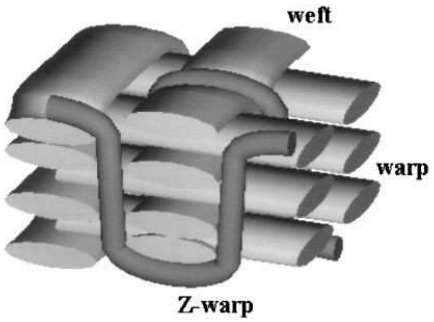


Figure1.23. Exemple de renfort obtenu par WiseTex® [LOM00]

WiseTex® a, par la suite, donné naissance à plusieurs logiciels permettant de réaliser les différentes étapes des calculs numériques, parmi lesquels MeshTex qui permet de réaliser des maillages éléments finis des géométries (Figure1.24), en supprimant les interférences [LOM07] ; chaque mèche du modèle est divisée en plusieurs sous volumes, contenant chacun une intersection et maillés séparément. La cellule élémentaire revient donc à considérer plusieurs sous problèmes, chacun contenant une zone de contact, ce qui permet d'analyser les interpénétrations séparément. Pour ce faire, la distance entre les nœuds des deux mèches en contact est considérée. Les deux portions sont éloignées l'une de l'autre pour éliminer l'interférence puis remises en contact par compression. Cette méthode inspirée des travaux de Zako et al [ZAK03] permet l'obtention de maillages tout en corrigeant les défauts de la géométrie.

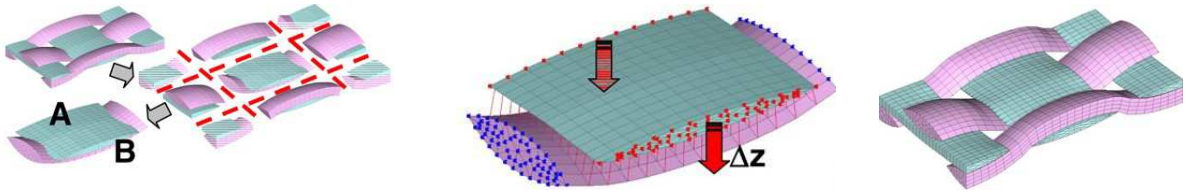


Figure1.24. Etapes du maillage par MeshTex [LOM07]

- D'autres modèles de ce type existent dans la littérature, parmi lesquels celui de Kuhn et Charalambides [KUH99], ou le modèle de Hofstee et Van Keulen [HOF01]. Le premier considère les mèches composées par une trajectoire, succession de sinusoïdes et de segments droits, et de sections adaptées à cette trajectoire, dont le passage de l'une à l'autre se fait par interpolation linéaire. Ce modèle reste toutefois restreint aux taffetas équilibrés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Quant au second, il permet de créer des mèches à sections variables dont la position de chaque fibre est connue en trois étapes : la première consiste à créer le plan moyen de chaque mèche à partir du plan moyen du renfort, puis les faces supérieures et inférieures des mèches sont créées symétriquement et enfin les fibres sont positionnées par une fonction distribuant leur position dans chaque section transverse par rapport au plan moyen. Les inconvénients de ce modèle sont qu'il ne fonctionne que lorsque le plan moyen des mèches n'est pas trop éloigné de celui du renfort et que la tangence au niveau du contact entre les réseaux n'est pas assurée.

- Le modèle de Hivet [HIV05, HIV03] concerne uniquement les renforts tissés 2D (taffetas, sergé, satin) mais permet l'obtention de géométries précises et cohérentes ; c'est-à-dire que la géométrie réelle des mèches est prise en compte (épaisseur et largeur de mèches, forme des sections…) et que tous les contacts entre mèches sont modélisés. La cohérence est obtenue en assurant qu'il n'existe ni vides ni interpénétrations entre deux mèches. Un exemple de renfort cohérent est présenté en Figure1.27 sur un modèle de sergé 2x2. Dans ce modèle, les sections peuvent varier le long de la trajectoire, succession de paraboles et de segments (Figure1.26) et la dissymétrie est prise en compte à partir de trois formes possibles (Figure1.25). Au niveau de chaque contact, deux sections sont définies pour la mèche transverse, encadrant la zone de contact. Les géométries obtenues sont ensuite maillées via le logiciel commercial PATRAN®

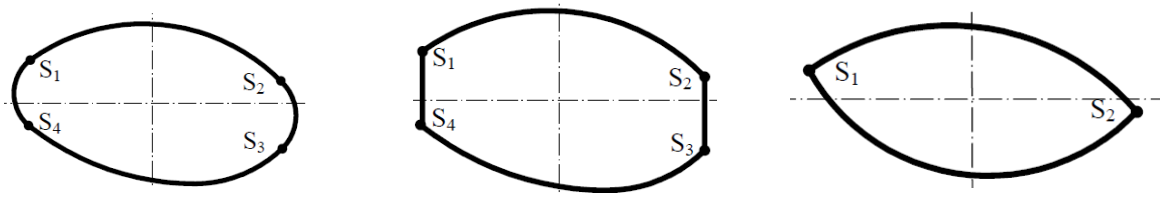


Figure1.25. Modèles génériques de section [HIV03]

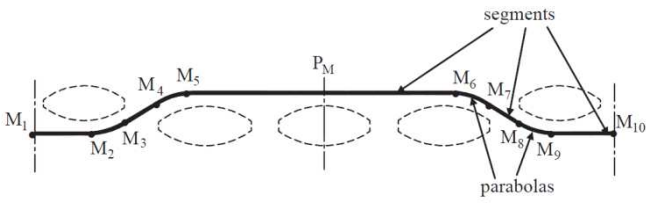


Figure1.26. Trajectoire des mèches [HIV05]

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

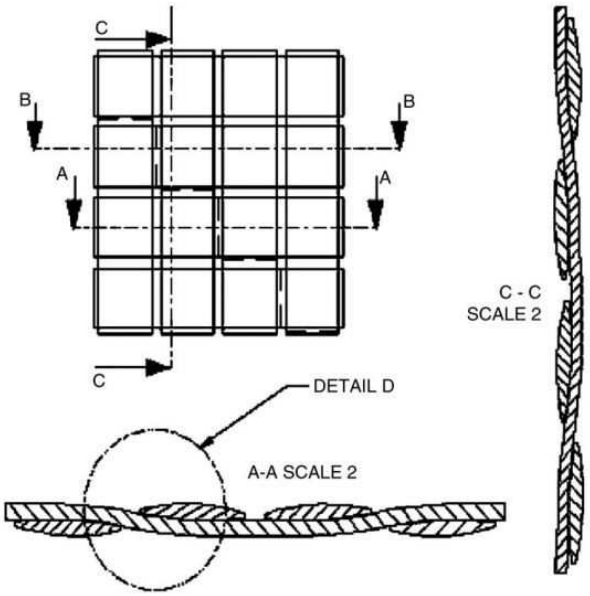


Figure1.27. Modèle et coupe transverse d'un sergé 2x2 [HIV05]

- Concernant les maillages, une des méthodes se développant actuellement est celle basée sur l'utilisation de voxel [POT12, DEC11, IAR09]. Un voxel est l'équivalent d'un pixel en trois dimensions ; un espace voxélisé est donc un espace divisé en plusieurs petits cubes. Les méthodes de maillage par voxel prennent en compte la boite englobant le renfort, entièrement voxélisée. Le renfort est alors inséré dans cette boite et un comportement est affecté à chaque cube en fonction de leur appartenance au renfort ou à la matrice. Cette méthode présente plusieurs avantages : elle permet de mailler tout type de modèles (2D, 3D…) tout en imposant un contact parfait entre les mèches, l'automatisation est possible même si les mèches sont irrégulières (sections variables) et l'application des conditions aux limites est facilité par la distribution régulière des nœuds. Cependant, la continuité des surfaces étant représentée par des cubes, il apparait des concentrations de contraintes locales artificielles (Figure1.28). Cette difficulté peut être contournée en augmentant la densité de maillage, mais les temps de calculs sont alors considérablement augmentés [IAR09].

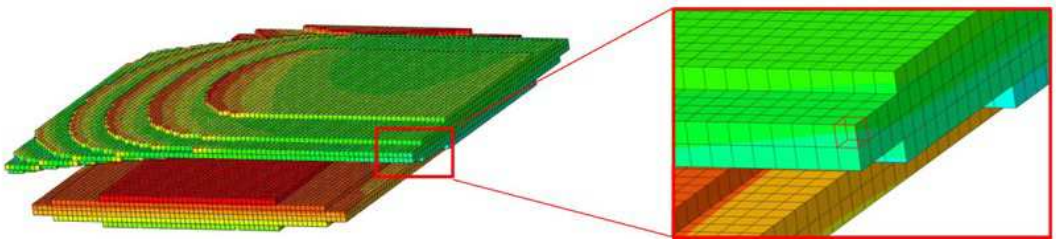
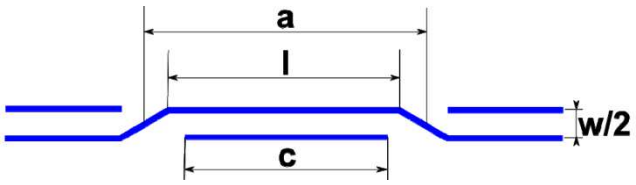


Figure1.28. Maillage voxel avec apparition de contrainte [DEC11]

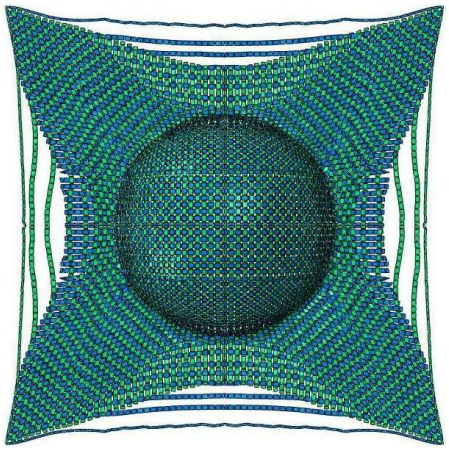
- Un modèle de simulation a été envisagé par Gatouillat [GAT10], s'appuyant sur une description mésoscopique des renforts permettant la simulation de mise en forme de pièces

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

à l'échelle macroscopique. Il s'inspire de la modélisation géométrique de Hivet [HIV03] dans le cas du taffetas, qu'il simplifie par l'utilisation d'éléments de coques (Figure1.29(a)). Ce modèle permet de décrire le comportement en cisaillement des renforts mais aussi de prédire les plissements et glissements de mèches (Figure1.29(b)), mais reste limité aux architectures de renforts simples (2D).



(a) Modèle géométrique de taffetas simplifié



(b) Simulation de mise en forme de renfort avec poinçon hémisphérique

Figure1.29. Modèle et résultat de Gatouillat [GAT10]

1.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les différents types de renforts tissés, leurs constituants et les méthodes de mise en forme. Par la suite, il faudra être capable de prendre en compte l'infinité d'architectures (interlock, 3D…) et de géométries de mèches ainsi que les différents types de matériaux constituants ces mèches lors des simulations.

Actuellement, de nombreux modèles géométriques et de maillage existent mais ne répondent pas aux besoins de cette étude. Le premier objectif envisagé sera donc la création de géométries 3D de renforts complexes. Certains principes issus des modèles de Hivet seront conservés, notamment la cohérence, de manière à n'avoir aucune interférence entre mèches et la tangence au niveau du contact, assurée par l'introduction de deux surfaces identiques pour les deux mèches impliquées au niveau du contact.

L'objectif de cette thèse est alors de développer une stratégie efficace pour simuler le comportement mécanique d'une cellule élémentaire de renforts tissés complexes sous sollicitations simples (traction, compaction mono et multiplis, cisaillement), puis de réaliser les simulations éléments finis associées à l'échelle mésoscopique. Cette étude fait suite aux travaux de thèse de Pierre Badel

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

[BAD08a] en termes de simulation de mise en forme de renforts tissés à l'échelle de la maille élémentaire.

Les besoins sont donc multiples : il va tout d'abord être nécessaire d'obtenir des géométries cohérentes des mailles élémentaires des différents renforts. Ces géométries devront alors être maillées avant d'être intégrées aux simulations. Pour réaliser ses simulations, il faudra tout d'abord identifier les contacts entre mèches et entre mèches et outils, améliorer la loi de comportement du matériau homogène équivalent et enfin déterminer les bons paramètres matériaux. C'est ce qui fera l'objet des trois chapitres suivants.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

CHAPITRE 2

Modèle CAO 3D cohérent de mailles à armure complexe

Ce second chapitre permet de comprendre les concepts et la démarche utilisés pour la création des modèles géométriques. Dans un premier temps, les hypothèses et les équations sur lesquelles le modèle se base puis la stratégie de modélisation de la géométrie initiale seront définies. Enfin, la méthode de gestion des interférences sera présentée.

SOMMAIRE

2.1 Hypothèses du modèle 50
2.1.1 Géométrie du modèle 50
2.1.2 Principes du respect de la cohérence 53
2.2 Paramétrage et mise en équation de la trajectoire des modèles de mèches 56
2.2.1 Notations et paramétrage 56
2.2.2 Stratégie de mise en données 58
2.2.3 Applications à la première mèche chaîne de G1151® 60
2.3 Définition et création de la section initiale des mèches : cohérence au niveau des contacts entre mèches transverses 61
2.3.1 Définition et paramétrage des sections 61
2.3.2 Définitions et notations de l'épaisseur 63
2.3.3 Recherche d'un point commun et actualisation de l'épaisseur 63
2.3.4 Paramètres de la section transverse 65
2.4 Modélisation CAO 3D 71
2.5 Traitement des interférences latérales et longitudinales 75
2.5.1 Interférences latérales 75
2.5.2 Interférences longitudinales 79
2.5.3 Application à la maille de G1151® 83
2.5.4 Quelques mots sur la mise en données 83
2.6 Conclusion 84

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1 Hypothèses du modèle

La première étape nécessaire à la mise en place d'un calcul éléments finis 3D de maille élémentaire est de disposer d'une géométrie maillée. Pour cela, depuis plusieurs années les codes éléments finis proposent des outils de maillage de plus en plus puissants capables de réaliser un maillage plus ou moins automatisé à partir de géométries CAO 3D. Il est donc nécessaire de fournir aux outils de calcul une géométrie CAO 3D réaliste. Dans le cas de renforts secs ou pour lesquels la matrice est en phase liquide (TPs), une description précise des contacts entre les mèches est une propriété essentielle que doit satisfaire le modèle CAO. En effet, la présence d'interpénétrations entre les mèches empêche le déroulement du calcul, la présence de vides conduit à une perturbation significative du comportement mécanique. Respecter une tangence stricte au niveau des contacts entre mèches n'est malgré tout pas un problème simple et pose aujourd'hui de nombreux problèmes à tous les outils de modélisation existants. L'absence de solutions existantes convaincantes mises en évidence dans la partie précédente a donc amené à développer un outil spécifique dont les principes trouvent leur origine dans un outil 2D précédemment développé au LMSP (devenu laboratoire PRISME). Cette partie est dédiée à la présentation de la stratégie mise en place pour atteindre cet objectif.

2.1.1 Géométrie du modèle

2.1.1.1 Constitution

Conformément à la définition d'un modèle géométrique à l'échelle mésoscopique, chaque mèche de la cellule élémentaire est représentée par un volume de type "tuyau", c'est-à-dire un balayage de contours fermés appelés sections le long d'une courbe appelée trajectoire. Les observations issues de travaux précédents [HIV05] ont pu montrer la variabilité des formes de sections le long de la mèche. Le modèle choisi est donc de type "tuyau à section variable" avec interpolation. La première exigence à satisfaire pour le modeleur est sa capacité à créer des volumes de ce type qui conduisent à créer des surfaces gauches.

Le second point qui le différencie de l'outil précédemment développé en 2D est sa capacité à traiter tout type de mailles. En effet, si pour les renforts 2D un nombre très limité d'armures existent, au niveau des interlocks, une infinité de possibilités est envisageable, il n'est donc pas question de se baser sur des armures existantes mais de permettre à l'utilisateur d'imposer lui-même sa propre armure comme c'est le cas par exemple pour WiseTex® [LOM00] ou TexGen® [SHE07a].

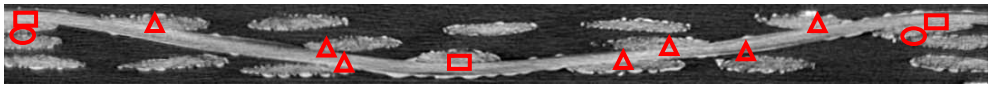
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Enfin, le point essentiel sur lequel se base cet outil est la cohérence. L'objectif est d'obtenir une maille élémentaire nativement cohérente c'est-à-dire qu'il n'est nullement nécessaire de la retoucher avant sa mise en œuvre dans les calculs. C'est cette dernière propriété qui constituera l'originalité et l'efficacité de l'approche.

2.1.1.2 Problématique et enjeux du respect de la cohérence

Si les contacts dans les mailles élémentaires 2D se réduisent souvent à ceux définis par l'armure, la problématique est bien plus complexe dans les interlocks. En effet, la présence d'un grand nombre de mèches dans la cellule élémentaire, ainsi que la volonté d'augmenter leur densité accroit largement le risque de contact à l'intérieur de la cellule. Quatre types de contact différents peuvent alors être identifiés dans une cellule interlock :

- le premier type est identique à celui qui existe dans les cellules 2D, il est intrinsèque à la notion de tissage. Il s'agit des contacts entre mèches transverses qui fournissent au renfort son armure. Ils sont représentés (Figure2.1) par des rectangles. Ils sont par définition bien localisés et ne dépendent que de l'armure du renfort. Dans les mailles avec une faible densité de mèches, ils sont souvent les seuls à exister. C'est le cas dans trois des quatre renforts utilisés dans ce mémoire (G986®, taffetas IMP et interlock test).



(a) Coupe plane (sens chaîne) au niveau de la première mèche de chaîne du G1151® [BAD08b]

(b) Coupe plane (sens trame) au niveau de la première zone de trames du G1151® [BAD08b]

◇ **contact latéral**

▭ **contact de tissage**

△ **contact intermédiaire**

⬭ **contact longitudinal**

Figure2.1. Localisation des différents types de contact dans la maille élémentaire de G1151®

- En observant la coupe tomographique du G1151® (Figure2.1), d'autres types de contacts sont mis en évidence. En effet, l'espacement et l'organisation des mèches de trame ne permet pas à la mèche de chaine (Figure2.1(a)) de traverser la cellule élémentaire sans contact : entre deux contacts de tissage, la mèche de chaîne entre en contact avec d'autres mèches transverses à l'intérieur de la cellule lorsqu'elle traverse celle-ci. Ce type de contact, représenté par des triangles sur la Figure2.1, non désirés mais subis, est appelé « contact intermédiaire ». Bien sûr il s'agit d'une spécificité des mailles interlocks, mais il est aussi

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

intéressant de remarquer que, loin d'être marginaux, ces contacts sont nombreux dans une maille dont la densité n'est pourtant pas très élevée. Prendre en compte ce type de contacts est donc un enjeu très fort pour la modélisation des interlocks.

- En théorie, le procédé de tissage devrait conduire à ce que les mèches du même réseau soient parallèles et séparées. Une fois encore la volonté d'augmenter la densité de fibres dans les renforts aboutit à une réalité quelque peu différente. En effet, l'un des moyens d'augmenter le taux de fibre est de compter sur la souplesse des mèches en compression transverse et la capacité des fibres à se réorganiser pour paramétrer, au niveau du procédé, un espacement entre mèche inférieur à leur largeur. Ainsi lorsque les mèches du même réseau se croisent, elles rentrent en contact. Ce troisième type de contact, représenté par des losanges sur la Figure2.1, dit « contact latéral » est de plus en plus fréquent même dans les mailles 2D.
- Enfin, l'ondulation des mèches de trame, peut également conduire à ce que deux mèches de la même zone qui sont supposées superposées et séparées initialement se touchent. Il en découle ainsi le quatrième type de contact, dit « contact longitudinal », représenté par des ellipses sur la Figure2.1.

Obtenir une cellule élémentaire cohérente consiste donc à identifier, localiser, prendre en compte et traiter tous ces types de contacts pour obtenir une tangence surfacique stricte.

2.1.1.3 Conséquences des contacts sur la forme des mèches

Ces quatre types de contact ont quatre conséquences possibles d'un point de vue géométrique :

- la mèche subit une modification globale de sa position (translation de la mèche dans la cellule) ;
- la mèche subit une modification locale de sa trajectoire et de sa section ;
- la mèche ne subit pas de modification de trajectoire mais une modification locale de sa section. Cela peut s'apparenter à une sorte d'indentation et est rendu possible par sa grande souplesse initiale en compression ;
- la mèche ne subit aucune modification significative.

Ces quatre cas dépendent bien sûr de la nature du contact et de la nature des mèches de la cellule. Prendre en compte l'ensemble de ces contacts consiste donc également à pouvoir gérer l'ensemble de ces conséquences pour obtenir un modèle réaliste.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.1.2 Principes du respect de la cohérence

Pour atteindre l'objectif prévu, les contacts entre mèches transverses (de tissage et intermédiaires) et les contacts entre mèches du même réseau (latéraux et longitudinaux) seront traités différemment.

2.1.2.1 Contacts entre mèches transverses – Structure du modèle

2.1.2.1.1 Trajectoire

La trajectoire est héritée des principes du modeleur 2D qui ont montré leur efficacité, c'est-à-dire une courbe plane composée d'une succession de segments de droites et de paraboles, tangents 2 à 2 (Figure2.2). Les paraboles modélisent les zones de la mèche qui subissent des contacts avec les mèches transverses induisant une ondulation ; les segments modélisent deux cas :

- les zones libres de tout contact : puisqu'aucun effort sur la mèche à part la tension résiduelle due au procédé de tissage ne s'exerce, la mèche est droite (voir Figure2.1) ;
- les zones de contact du type « indentation » pour lesquels aucune modification de trajectoire ne se produit.

Ces deux cas sont traités différemment dans le modèle : les premiers sont identifiés et repérés comme des segments ; les seconds sont considérés comme des paraboles dégénérées, c'est-à-dire dont le paramètre de second degré est nul. Ainsi pour des raisons de simplicité, les zones de contacts sont toujours modélisées par des paraboles, dégénérées ou non.

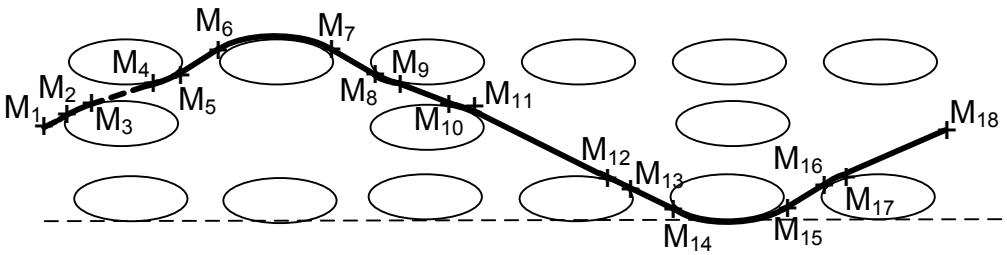


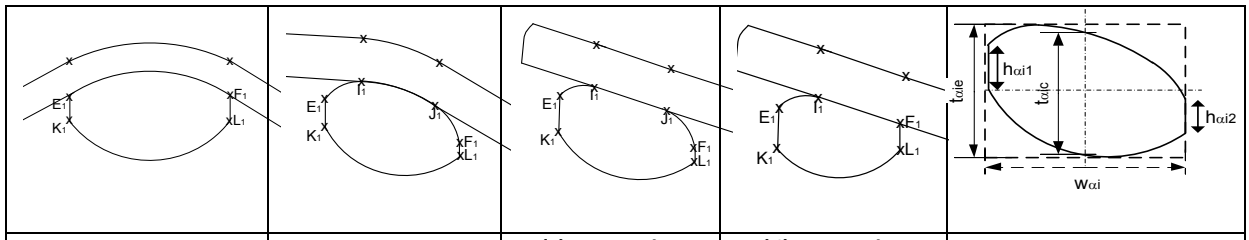
Figure2.2. Exemple de trajectoire de mèche (les points M_{ij} sont les extrémités des entités géométriques (segments et paraboles), donc des contacts)

2.1.2.1.2 Sections

Le concept pour obtenir la cohérence entre mèches transverses est exactement le même que celui qui a été utilisé pour le modeleur 2D et qui a donné d'excellents résultats. L'idée est de décrire la surface de chaque mèche au niveau du contact par la même surface. Une tangence surfacique stricte

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

est alors obtenue par définition. La surface en question est composée des deux paraboles des deux trajectoires au niveau du contact. Ainsi la zone de contact de la section de la mèche transverse est modélisée par la même parabole que celle de la trajectoire de la mèche longitudinale et vice versa. Cette méthodologie sera décrite un peu plus précisément dans la partie suivante. La zone de contact étant décrite par une parabole (éventuellement dégénérée), le contour de la section est fermé à l'aide d'autres coniques (Figure2.3). Le modèle de section pris en compte ici est dit à bords plats, c'est-à-dire que les surfaces latérales de la mèche sont toujours modélisées par des segments de droite. Outre le fait d'être particulièrement bien adapté à un maillage hexaédrique, cette forme permet de décrire efficacement à la fois des mèches lenticulaires si les segments sont très petits et des mèches elliptiques ou rectangulaires. Pour les renforts 2D : deux paraboles et deux segments sont suffisants pour décrire la section. La complexité envisagée ici au niveau des contacts amène à utiliser une à trois coniques de différents types pour la zone de contact et une conique pour la zone libre. Au total une section est constituée de deux à quatre coniques et deux segments de droite. Quelques uns des différents cas sont présentés en Figure2.3.



(a) Section à 4 éléments	(b) Section à 3 paraboles sur la face de contact	(c) Section à 2 paraboles et 1 segment sur la face de contact	(d) Section à 1 parabole et 1 segment sur la face de contact	(e) Paramètres associés à une section

Figure2.3. Forme et composition des sections en fonction des zones de contact (non exhaustif)

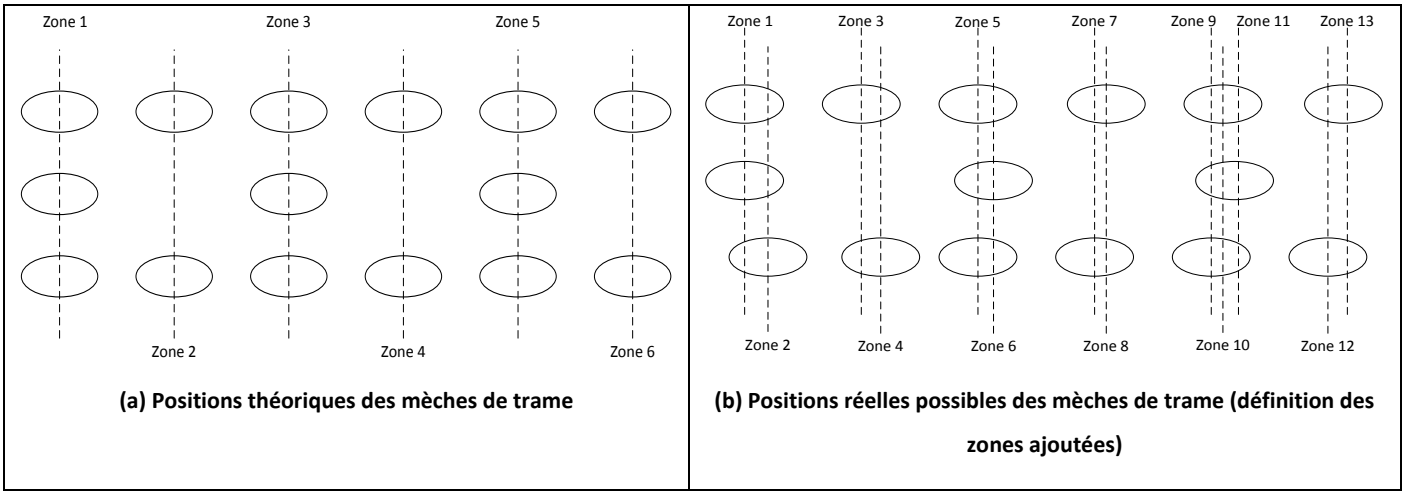
2.1.2.2 Contacts longitudinaux et transversaux

Les contacts latéraux peuvent conduire à une modification de la trajectoire ou de la position de la mèche. Dans un interlock les mèches parallèles et celles de la même zone sont supposées superposées. La structure obtenue est donc de type colonnes de mèches (Figure2.4(a)). Suite à un contact latéral deux conséquences peuvent se produire, qui peuvent être observées par exemple sur la cellule de G1151® (voir Figure2.1) :

- une mèche peut globalement se déplacer, si bien qu'elle n'est plus superposée avec les autres membres de la même zone (ex : première mèche de trame sur la Figure2.1). Cette première conséquence n'est pas problématique car il suffit, au niveau de la mise en donnée, de considérer cette mèche comme n'appartenant pas à la même zone que les deux autres,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

c'est-à-dire transformer l'armure du renfort en ajoutant des zones pour mieux coller à la réalité (Figure2.4(b)). C'est cette première conséquence qui amènera à décrire le G1151® comme composé de 13 zones de trame, alors que théoriquement il n'en possède que 6 ;

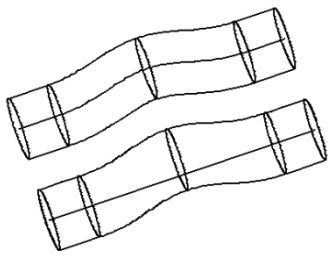


(a) Positions théoriques des mèches de trame

(b) Positions réelles possibles des mèches de trame (définition des zones ajoutées)

Figure2.4. Positions théoriques et réelles possibles des mèches de trame dans une maille d 'interlock (type G1151®)

- la seconde conséquence est un déplacement local de la mèche, bien plus difficile à gérer. En effet, puisque la mèche s'ondule dans le plan horizontal, les mèches du même réseau ne sont plus parallèles, les mèches transverses ne sont plus perpendiculaires, mais surtout la trajectoire de la mèche devient 3D. Cela remet en cause l'hypothèse de trajectoire plane, mais surtout rend la gestion de la cohérence excessivement difficile analytiquement. La solution envisagée consiste à gérer ce problème en conservant une trajectoire plane ; lors de la création du tuyau dans le logiciel de CAO 3D, un déplacement relatif de la section par rapport à la trajectoire plane produit exactement le même effet que la modification de la trajectoire en conservant la section centrée (Figure2.5). Pour prendre en compte les interférences latérales, des trajectoires planes et parallèles peuvent être conservées avec introduction d'un décalage du centre de la section par rapport à la trajectoire.



(a) Ondulation modélisée par une trajectoire 3D

(b) Ondulation modélisée par un décalage de la section

Figure2.5. Déformation locale de la mèche due à un contact latéral

Les principes et les enjeux du modèle étant posés, les parties suivantes sont dédiées à leur mise en œuvre.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.2 Paramétrage et mise en équation de la trajectoire des modèles de mèches

Comme vu dans la partie précédente, seuls les contacts entre mèches transverses sont considérés dans la définition de la trajectoire, les autres étant traités par décalage de la section.

2.2.1 Notations et paramétrage

Une base globale (x_0,y_0,z_0) est affectée à la cellule élémentaire telle que :

- x_0 est la direction trame
- y_0 est la direction chaîne
- z_0 est la normale au plan trame/chaîne du tissu.
- z_0=0 est le point le plus bas de la cellule élémentaire (comme si le renfort était posé sur le plan z_0=0). Les origines des x et y sont également situés sur le coin de la cellule élémentaire, tel que toutes les coordonnées des points de la cellule sont positives.

Conformément à ce qui a été précisé précédemment, la nécessité de pouvoir représenter tout type d'architecture amène à décrire la trajectoire de chacune des mèches de la maille élémentaire de façon indépendante, en fonction de son parcours au sein de la cellule. Quelle que soit la mèche considérée la trajectoire est obtenue à partir du paramétrage et de l'algorithme décrit ci-après, en considérant :

- $\alpha \in \{1,2\}$ indice de réseau tel que : $\alpha = 1$ pour le réseau chaîne, $\alpha = 2$ pour le réseau trame ;
- $n_{c\alpha i}$ le nombre de contacts de la mèche i du réseau α.

Pour tout ce qui va suivre, x représente la coordonnée longitudinale associée à la mèche (x_0 du repère global pour les trames, y_0 du repère global pour les chaînes), et y la coordonnées transverse (x_0 du repère global pour les chaînes, y_0 du repère global pour les trames). En outre, conformément au choix de stratégie fait au chapitre 1, les trajectoires des mèches de chaîne sont planes et incluses dans un plan parallèle à (y_0,z_0), les trajectoires des mèches de trame sont planes et incluses dans un plan parallèle à (x_0,z_0). Par conséquent, le paramétrage des trajectoires sera effectué dans un plan et fera apparaître deux coordonnées : la coordonnée longitudinale x et la coordonnée normale z.

Suite au choix de la cellule élémentaire standard définie au chapitre 1, les bords de la cellule élémentaire se situent en dehors d'une zone de contact (entre deux mèches transverses). Ainsi le premier et le dernier éléments de la trajectoire sont des segments de droite (Figure2.2).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

La trajectoire de la mèche i du réseau α est ainsi composée de (Figure2.2):

- $n_{c\alpha i}$ paraboles notées $P_{\alpha ik}, 1 \le k \le n_{c\alpha i}$, dont les équations sont définies à partir de leurs sommets $S_{\alpha ik}\begin{pmatrix} x_{S\alpha ij} \\ z_{S\alpha ij} \end{pmatrix}$ et d'un paramètre $p_{\alpha ik}, 1 \le k \le n_{c\alpha i}$ tel que :

$$(z - z_{S\alpha ik}) = p_{\alpha ik}(x - x_{S\alpha ik})^2,\ 1 \le k \le n_{c\alpha i} \quad \textbf{(2)}$$

Avec

$$x_{s\alpha ik} = \frac{1}{2}\left(x_{\alpha ij+1} + x_{\alpha ij} - \frac{z_{\alpha ij+1} - z_{\alpha ij}}{p_{\alpha ik}\left(x_{\alpha ij+1} - x_{\alpha ij}\right)} \right),\ 1 \le k \le n_{c\alpha i}\ .\ j = 2k \quad \textbf{(3)}$$

$$z_{s\alpha ik} = z_{\alpha ij} - \frac{1}{4} p_{\alpha ik}\left(x_{\alpha ij+1} - x_{\alpha ij} - \frac{z_{\alpha ij+1} - z_{\alpha ij}}{p_{\alpha ik}\left(x_{\alpha ij+1} - x_{\alpha ij}\right)} \right)^2,\ 1 \le k \le n_{c\alpha i}\ .\ j = 2k \quad \textbf{(4)}$$

Pour le cas des paraboles dégénérées, une équation de droite sera substituée aux équations précédentes.

- $2n_{c\alpha i} + 2$ points de contrôle $M_{\alpha ij}\begin{pmatrix} x_{\alpha ij} \\ z_{\alpha ij} \end{pmatrix}$, faisant donc intervenir $2(2n_{c\alpha i} + 2)$ coordonnées, $1 \le j \le 2n_{c\alpha i} + 2$
- $n_{c\alpha i} + 1$ segments de droites $D_{\alpha ik}, 1 \le k \le n_{c\alpha i}$ raccordant les paraboles entre elles.

Le modèle géométrique de la trajectoire d'une mèche est complètement défini à partir de la donnée des paramètres $p_{\alpha ik}$ et des coordonnées des points $M_{\alpha ij}$. Il fait donc intervenir le nombre d'inconnues suivant :

$$n_{inc} = 2\left(2n_{c\alpha i} + 2\right) + n_{c\alpha i} = 5n_{c\alpha i} + 4 \quad \textbf{(5)}$$

Les conditions géométriques liant les inconnues sont :

- une condition de tangence pour chaque liaison parabole/droite, soit 2 conditions de tangence par parabole (gauche et droite). $2n_{c\alpha i}$ équations de tangence ;
- deux équations de périodicité (continuité et tangence).

Les conditions de tangence sont exprimées par :

- A gauche au point $M_{\alpha ij}\begin{pmatrix} x_{\alpha ij} \\ z_{\alpha ij} \end{pmatrix}$:

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$2p_{\alpha ik}\left(x_{\alpha ij}-x_{s\alpha ik}\right)=\frac{z_{\alpha ij-1}-z_{\alpha ij}}{x_{\alpha ij-1}-x_{\alpha ij}},\ 1\le k\le n_{c\alpha i},\ j=2*k \quad \textbf{(6)}$$

- A droite au point $M_{\alpha ij+1}\begin{pmatrix}x_{\alpha ij+1}\\ z_{\alpha ij+1}\end{pmatrix}$:

$$2p_{\alpha ik}\left(x_{\alpha ij+1}-x_{s\alpha ik}\right)=\frac{z_{\alpha ij+2}-z_{\alpha ij+1}}{x_{\alpha ij+2}-x_{\alpha ij+1}},\ 1\le k\le n_{c\alpha i},\ j=2*k \quad \textbf{(7)}$$

Les conditions de périodicité sont définies par :

- Continuité

$$z_{\alpha i1}=z_{\alpha ij_{\max}},\ j_{\max}=2n_{c\alpha i}+2 \quad \textbf{(8)}$$

- Tangence

$$\frac{z_{\alpha i1}-z_{\alpha i2}}{x_{\alpha i1}-x_{\alpha i2}}=\frac{z_{\alpha ij_{\max}-1}-z_{\alpha ij_{\max}}}{x_{\alpha ij_{\max}-1}-x_{\alpha ij_{\max}}},\ j_{\max}=2n_{c\alpha i}+2 \quad \textbf{(9)}$$

$2n_{c\alpha i}+2$ conditions géométriques ont donc été définies. Pour obtenir une solution unique à ce système d'équations il faut mesurer sur le renfort le nombre de paramètres géométriques ci-dessous :

$$5n_{c\alpha i}+4-2n_{c\alpha i}-2=3n_{c\alpha i}+2 \quad \textbf{(10)}$$

2.2.2 Stratégie de mise en données

Tous les paramètres géométriques définis précédemment peuvent être imposés pour aboutir à une solution. Cependant, le choix du paramètre conditionne la facilité avec laquelle ils sont mesurés sur le renfort. Les coordonnées longitudinales des extrémités des contacts sont, par exemple, parmi les plus faciles à identifier, soit sur une image de tomographie, soit dans le cas d'un modèle simple à partir de la donnée des contacts et de la largeur des mèches. De plus, ils conduisent à une manipulation plus simple du modèle. C'est par conséquent ce choix qui est retenu pour la mise en donnée et les $x_{\alpha ij}, 1\le j\le 2n_{c\alpha i}+2$ sont des paramètres mesurés sur le renfort.

Différentes études [BOI01, BUE98, LOM05, HIV08] ont pu montrer l'influence fondamentale de l'embuvage pour le comportement mécanique des renforts. Il est ainsi essentiel que l'embuvage du modèle représente de façon fine et précise la réalité. En effet, l'embuvage caractérise l'ondulation globale des mèches, donc de la trajectoire, qui confère au renfort tissé la spécificité de son

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

comportement, en traction biaxiale par exemple. Ce paramètre avait ainsi été explicitement intégré pour la mise en donnée du modeleur 2D. Pour cette étude, les trajectoires visées sont bien plus complexes et l'ondulation globale est une information intéressante mais pas forcément suffisante. Pour la mise en données, l'ondulation issue des différents contacts sera caractérisée en envisageant deux cas :

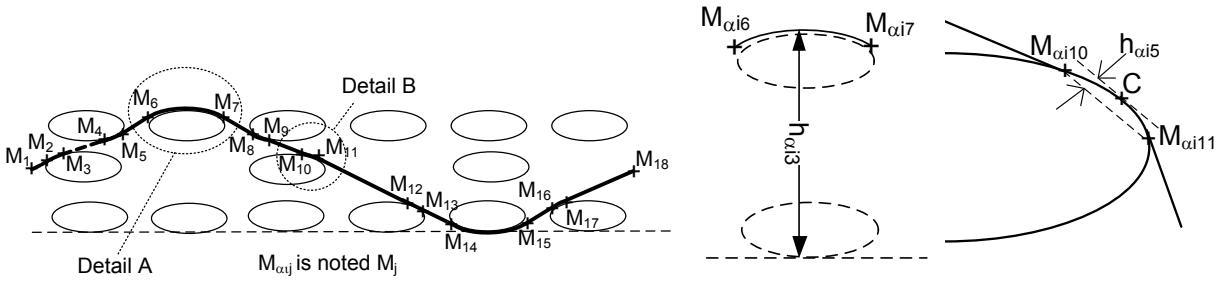
- pour les contacts dont la parabole possède une tangente horizontale (souvent les contacts de tissage), la hauteur de l'ondulation $h_{\alpha ik}$ est définie (et mesurée sur le renfort) comme la hauteur du sommet de la parabole par rapport au plan de base du renfort (plan z_0=0), c'est-à-dire par la coordonnée normale du sommet (Figure2.6(b)). Ce paramètre est d'autant plus intéressant qu'il est particulièrement simple à obtenir pour les contacts de tissage même à partir d'une vue extérieure du renfort (mesure optique 3D externe par exemple). L'équation suivante est alors obtenue :

$$z_{s\alpha ik} = h_{\alpha ik} \tag{11}$$

- Pour les autres contacts, l'idée est de définir ici encore l'ondulation de la parabole. Pour cela, la hauteur de l'ondulation $h_{\alpha ik}$ est définie comme la hauteur de la parabole par rapport au segment reliant les extrémités de celle-ci (Figure2.6(c)). A partir de cette donnée, les coordonnées d'un point de passage de cette parabole $(x_{c\alpha ik}, z_{c\alpha ik})$ sont calculées :

$$x_{c\alpha ik} = \frac{1}{2}\left(x_{\alpha ij} + x_{\alpha ij+1}\right) + h_{\alpha ik}\frac{-Sgn\left(x_{\alpha ij+1} - x_{\alpha ij}\right)}{\left\|\underline{M_{\alpha ij}M_{\alpha ij+1}}\right\|}\left(z_{\alpha ij+1} - z_{\alpha ij}\right) \tag{12}$$

$$z_{c\alpha ik} = \frac{1}{2}\left(z_{\alpha ij} + z_{\alpha ij+1}\right) + h_{\alpha ik}\frac{\left|x_{\alpha ij+1} - x_{\alpha ij}\right|}{\left\|\underline{M_{\alpha ij}M_{\alpha ij+1}}\right\|} \tag{13}$$



(a) Exemple de trajectoire d'une mèche **(b) Détail A** **(c) Détail B**

Figure2.6.Paramétrage et définition des hauteurs d'ondulation

Ceci permet d'aboutir à l'équation suivante :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$z_{C\alpha ik} - z_{s\alpha ik} = p_{\alpha ik}\left(x_{C\alpha ik} - x_{s\alpha ik}\right)^2,\ 1 \le k \le n_{c\alpha i} \quad \textbf{(14)}$$

D'après cette procédure, il est donc possible de choisir d'entrer directement les coordonnées d'un point de passage dans la mise en donnée afin d'aboutir directement à l'équation (14). Cependant l'expérience montre que l'ondulation est un paramètre plus facile à faire évoluer qu'un point de passage. Dans tous les cas, la mesure de hauteur de l'ondulation permet d'écrire les $n_{c\alpha i}$ équations suivantes pour tous les contacts :

$$z_{s\alpha ik} = h_{\alpha ik}\text{, or } z_{C\alpha ik} - z_{s\alpha ik} = p_{\alpha ik}\left(x_{C\alpha ik} - x_{s\alpha ik}\right)^2,\ 1 \le k \le n_{c\alpha i} \quad \textbf{(15)}$$

Au total, la stratégie de mise en données conduit à la mesure des $x_{\alpha ij}$ et des $h_{\alpha ik}$. Associés aux $2n_{c\alpha i}+2$ conditions géométriques, un système d'équations non linéaires de $3n_{c\alpha i}+2$ équations indépendantes à $3n_{c\alpha i}+2$ inconnues est obtenu et permet bien d'aboutir à une solution unique.

Ce système est alors implémenté et résolu grâce à des routines Scilab® qui exploitent la fonction fsolve de Scilab®. Cette fonction permet de résoudre un système d'équations non linéaires et renvoie les informations sur la convergence, ce qui permet d'avoir une bonne idée du déroulement de la résolution. La mise en données est réalisée sur une feuille Excel® détaillée en Annexe 1. Cette feuille est automatiquement lue et interprétée dans Scilab®. A la suite du calcul des éléments géométriques (points, droites, paraboles), un outil de tracé de trajectoire, programmé lui aussi dans Scilab®, récupère les résultats et trace les courbes obtenues afin de vérifier, à ce stade, que les profils des mèches sont conformes à ce qui est attendu. Les mèches transverses sont représentées dans leur position moyenne, uniquement dans le but de pouvoir les situer dans la direction longitudinale.

2.2.3 Applications à la première mèche de chaîne de G1151®

Les notations utilisées sont celles définies au chapitre 1. Les images de tomographie du G1151® permettent de définir les contacts avec les mèches transverses (trame) pour la première mèche de chaîne (211) (Figure2.7).

Figure2.7. Coupe longitudinale de la première mèche de chaîne (211) : localisation des zones de contact avec les mèches transverses

Les extrémités des zones de contacts ainsi que les numéros des mèches transverses sont repérés sur la Figure2.7. Les coordonnées x des extrémités mesurées sur l'image sont disponibles (Annexe 1). Enfin les hauteurs des ondulations à chaque contact sont mesurées et visibles (Figure2.6). Les valeurs

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

entre crochet signifient qu'il s'agit des hauteurs par rapport aux segments reliant les extrémités (Figure2.6). Un [0] est synonyme d'aucune ondulation et donc qu'un segment de droite modélise le contact. Les coordonnées z de tous les points, ainsi que les paramètres de paraboles et les coordonnées des sommets sont alors calculés par Scilab® (Annexe 2) et la trajectoire est tracée dans le viewer (Figure2.8), ce qui permet de vérifier l'allure du profil de la mèche et de rectifier une éventuelle erreur de mise en données très tôt.

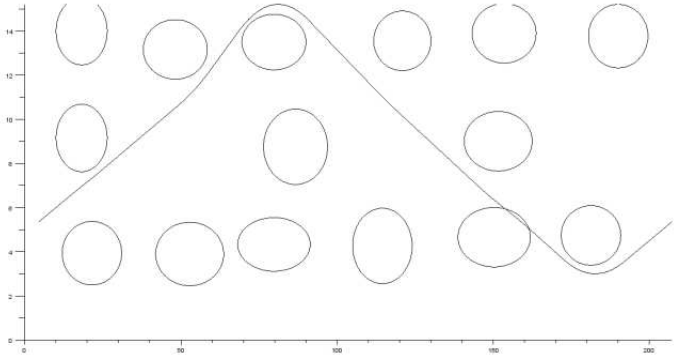


Figure2.8. Trajectoire d'une mèche de chaîne de G1151® tracée dans le viewer Scilab®

2.3 Définition et création de la section initiale des mèches : cohérence au niveau des contacts entre mèches transverses

2.3.1 Définition et paramétrage des sections

Les trajectoires étant définies pour chacune des mèches de la maille élémentaire, les sections de chaque mèche à chaque point de contact doivent être définies. C'est la définition et le calcul de ces sections qui conduisent à respecter la cohérence. Conformément à ce qui a été présenté au début de ce chapitre, les formes des sections qui sont considérées (Figure2.3) dans ce document sont composées de une à trois coniques (éventuellement dégénérées) pour la face de contact, de deux segments de droite pour les parties latérales et d'une conique pour la face libre. L'utilisateur doit alors fournir les données suivantes pour chacune des mèches :

- longueur des 2 segments ;
- épaisseur de la mèche ;
- largeur de la mèche.

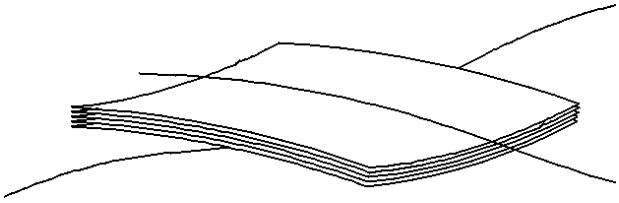
Ces données sont entrées de façon globale pour toute la mèche mais il est possible d'affecter des valeurs particulières localement dans certaines zones.

Deux conditions doivent être respectées pour que la cohérence soit parfaite au niveau du contact :

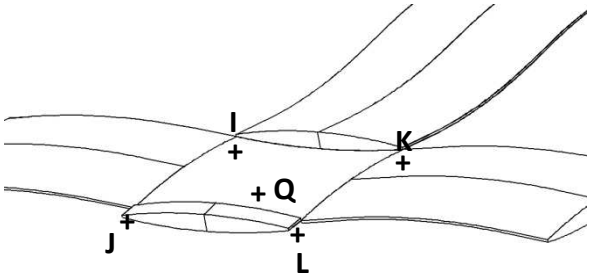
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

- les zones de contact doivent être parallèles ;
- les zones de contact doivent avoir un point commun, si bien qu'elles sont confondues.

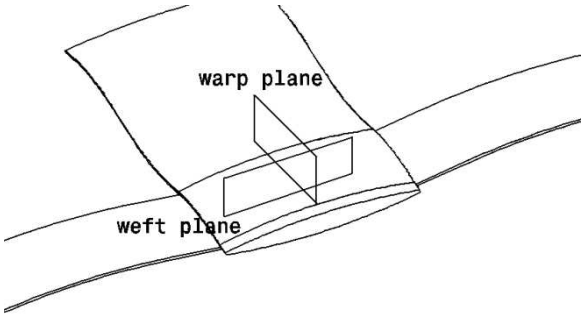
La première condition est intrinsèquement respectée par le modèle en définissant la surface des deux mèches par une surface paraboloïde obtenue à partir des deux paraboles des deux trajectoires dans la zone de contact (voir paragraphe 2.1 et [HIV05]). Les deux surfaces étant définies par les mêmes courbes supports elles sont nécessairement parallèles (Figure2.9). Cette définition conduit à ce que la section de chacune des mèches soit constituée dans la zone de contact par la parabole de la trajectoire de la mèche transverse. C'est cette condition (donc cette courbe) qui constituera le point de départ de la définition de la section.



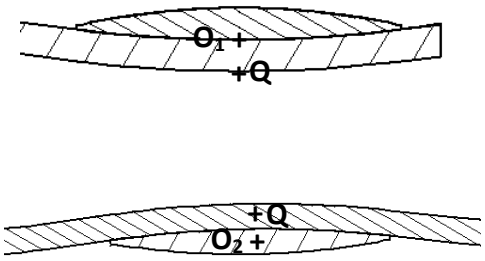
(a) Famille de surfaces parallèles supportées par les deux trajectories de mèches



(b) Surface de contact



(c) Vue extérieure de la zone de contact



(d) Sections de croisement des mèches de chaine et de trame

Figure2.9. Surfaces supportées par les deux paraboles de trajectoire et surfaces de contact entre les deux mèches

Le problème principal est donc de respecter la deuxième condition, c'est à dire définir l'altitude de la surface paraboloïde de contact et donc trouver les coordonnées d'un point Q commun aux deux surfaces (Figure2.9).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.3.2 Définitions et notations de l'épaisseur

Plusieurs définitions de l'épaisseur d'une mèche peuvent être considérées lorsqu'elle est dans son environnement tissé. Il est par exemple possible de la définir par la plus petite distance entre deux plans parallèles tangents, ou comme la plus petite distance entre deux plans tangents de normale z, ce qui peut être assez différent si la section a, par exemple, subi une rotation suite à une torsion de la mèche due aux différents contacts. Il est aussi possible de choisir de regarder l'épaisseur de la mèche dans un plan de coupe particulier, par exemple le plan de coupe médian longitudinal. Dans ce qui suit, deux définitions de l'épaisseur cohabitent permettant d'obtenir un paramétrage simplifié et une écriture plus simple des équations :

- la première, notée $t_{\alpha ie}(M)$ consiste à mesurer la distance minimale entre deux plans horizontaux tangents, de façon similaire à ce qui est classiquement fait pour les tissus 2D (Figure2.3(e)). Cette définition est sans aucun doute la plus intuitive et la plus répandue ;
- la seconde est très utile pour le paramétrage du modèle mais aussi pour la mesure sur les images de tomographie, puisqu'elle permet de définir l'épaisseur de la mèche dans le plan de la trajectoire, c'est-à-dire dans le plan médian longitudinal de la mèche. Il s'agit donc de l'épaisseur de la première mèche de chaîne du G1151® telle qu'elle est vue dans la coupe de la Figure2.1. Elle est notée : $t_{\alpha ic}(M)$ et est aussi représentée Figure2.3(e).

Il est malgré tout à noter qu'à part en cas de déformation significative des mèches, ces deux valeurs sont quasi identiques. De plus, la relation entre les deux est très simple à obtenir à partir des paramètres des courbes de la section.

2.3.3 Recherche d'un point commun et actualisation de l'épaisseur

Soit un contact entre deux mèches transverses, la parabole de la trajectoire de la mèche du réseau i concernée par le contact est notée P_i et son sommet est noté S_i (x_{si}, y_{si}, z_{si}). Pour tout point M de l'espace, une parabole P_{iM} est définie de sorte qu'elle soit parallèle à la parabole P_i passant par M. Le sommet de cette parabole est alors noté S_{iM} $(x_{siM}, y_{siM}, z_{siM})$.

O_1 et O_2 sont définis comme les centres des mèches à l'intersection des plans contenant les trajectoires des mèches de trame et de chaîne.

Les deux points extrémités des paraboles P_i, nommés respectivement A_i, B_i, C_i et D_i sont les deux points obtenus par translation d'une demi-épaisseur ($t_{\alpha ic}$) des deux points A_i et B_i (Figure2.10). D'après la définition donnée de l'épaisseur $t_{\alpha ic}$ et la structure du modèle, C_i et D_i sont sur la surface

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

de la mèche. Les coordonnées de ces deux points peuvent être exprimées à partir de celles des points A_i, B_i et O_i.

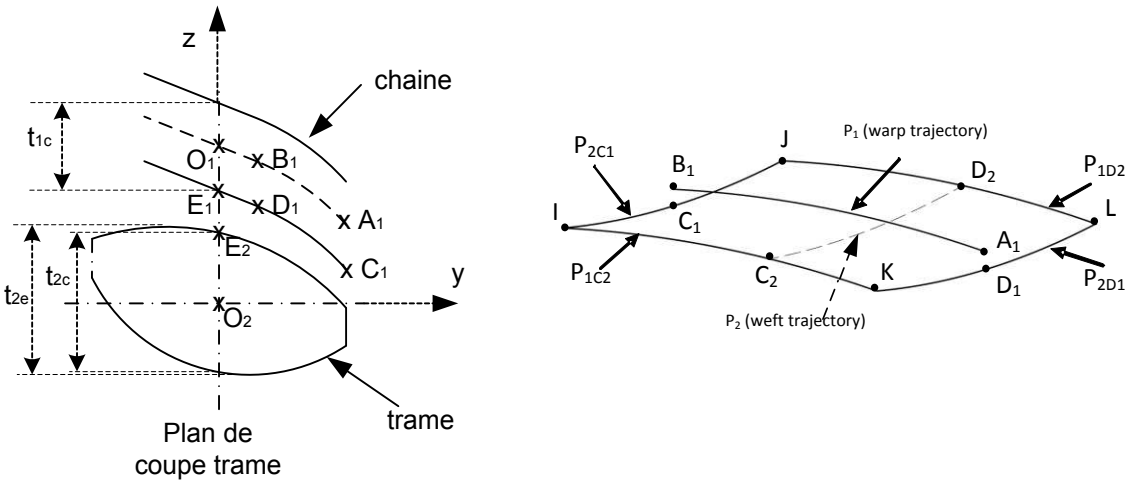


Figure2.10. Paramètres et définition des points de la section de contact

Pour la mèche de trame :

$$C_1 : \begin{pmatrix} x_{C1} = x_{A1} \\ y_{C1} = y_{A1} \\ z_{C1} = z_{A1} + \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\|\overrightarrow{O_1O_2}\|}\frac{t_{1c}}{2} \end{pmatrix}, D_1 : \begin{pmatrix} x_{D1} = x_{B1} \\ y_{D1} = y_{B1} \\ z_{D1} = z_{B1} + \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\|\overrightarrow{O_1O_2}\|}\frac{t_{1c}}{2} \end{pmatrix} \quad \textbf{(16)}$$

Pour la mèche de chaîne

$$C_2 : \begin{pmatrix} x_{C2} = x_{A2} \\ y_{C2} = y_{A2} \\ z_{C2} = z_{A2} - \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\|\overrightarrow{O_1O_2}\|}\frac{t_{2c}}{2} \end{pmatrix}, D_2 : \begin{pmatrix} x_{D2} = x_{B2} \\ y_{D2} = y_{B2} \\ z_{D2} = z_{B2} - \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\|\overrightarrow{O_1O_2}\|}\frac{t_{2c}}{2} \end{pmatrix} \quad \textbf{(17)}$$

Puisque les points C_i et D_i sont sur la surface et issus des extrémités des zones de contact sur chaque mèche, les points M(x,y,z) de la surface de contact commune sont localisés dans le domaine x,y suivant :

$$x_{C2} \leq x \leq x_{D2} \quad \textbf{(18)}$$

$$y_{C1} \leq y \leq y_{D1} \quad \textbf{(19)}$$

Soient I, J, K et L les 4 extrémités de la surface parabolique commune aux deux mèches (Figure2.9), définis et paramétrés par :

$$I : \begin{pmatrix} x_{C2} \\ y_{C1} \\ z_I \end{pmatrix}, J : \begin{pmatrix} x_{D2} \\ y_{C1} \\ z_J \end{pmatrix}, K : \begin{pmatrix} x_{C2} \\ y_{D1} \\ z_K \end{pmatrix}, L : \begin{pmatrix} x_{D2} \\ y_{D1} \\ z_L \end{pmatrix}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Les coordonnées z de ces points sont déterminées à partir des paraboles de contact des mèches de trame et de chaîne, ce qui permet de vérifier et ajuster les données pour vérifier la cohérence.

2.3.4 Paramètres de la section transverse

Les points C_α, D_α, I, J, K, L appartiennent à la surface de la mèche α du côté du contact. Par définition du modèle, pour assurer la cohérence, la parabole associée aux sections de la mèche α au niveau du contact est identique à celle de la trajectoire de la mèche transverse. Ainsi :

- C_1, I, J appartiennent à la parabole P_{2C1}
- D_1, K, L appartiennent à la parabole P_{2D1}
- C_2, I, K appartiennent à la parabole P_{1C2}
- D_2, J, L appartiennent à la parabole P_{1D2}

Les paraboles P_{2C1} et P_{2D1} sont alors définies par les paramètres et les sommets suivants :

$$p_{2C1} = p_2 \quad (20) \qquad p_{2D1} = p_2 \quad (21)$$

$$x_{s2C1} = x_{s2} \quad (22) \qquad x_{s2D1} = x_{s2} \quad (23)$$

$$y_{s2C1} = y_{C1} \quad (24) \qquad y_{s2D1} = y_{D1} \quad (25)$$

$$z_{s2C1} = z_{C1} - p_{2C1}(x_{C1} - x_{s2C1})^2 \quad (26) \qquad z_{s2D1} = z_{D1} - p_{2D1}(x_{D1} - x_{s2D1})^2 \quad (27)$$

Les paraboles P_{1C2} et P_{1D2} sont définies par :

$$p_{1C2} = p_1 \quad (28) \qquad p_{1D2} = p_1 \quad (29)$$

$$x_{s1C2} = x_{C2} \quad (30) \qquad x_{s1D2} = x_{D2} \quad (31)$$

$$y_{s1C2} = y_{s1} \quad (32) \qquad y_{s1D2} = y_{s1} \quad (33)$$

$$z_{s1C2} = z_{C2} - p_{1C2}(y_{C2} - y_{s1C2})^2 \quad (34) \qquad z_{s1D2} = z_{D2} - p_{1D2}(y_{D2} - y_{s1D2})^2 \quad (35)$$

Ces quatre paraboles sont les quatre paraboles de contact des quatre sections du modèle concernées par le contact, c'est-à-dire les deux sections positionnées aux extrémités de la zone de contact sur chacune des mèches. Les 4 paraboles recherchées ont donc été obtenues.

2.3.4.1 Vérification de la cohérence

Chacun des points I, J, K, L appartient donc à deux des paraboles frontières de la surface de contact entre les deux mèches concernées (Figure2.10). La coordonnée peut être ainsi calculée par deux expressions indépendantes. Au final, les coordonnées des points I, J, K et L peuvent être exprimées de la façon suivante (Tableau2.1) :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$x_I = x_{C2}$	(36)	$x_J = x_{D2}$	(37)
$y_I = y_{C1}$	(38)	$y_J = y_{C1}$	(39)
$z_I = z_{s1C2} + p_{1C2}(y_I - y_{s1C2})^2$	(40)	$z_J = z_{s1D2} + p_{1D2}(y_J - y_{s1D2})^2$	(41)
$z_I = z_{s2C1} + p_{2C1}(x_I - x_{s2C1})^2$	(42)	$z_J = z_{s2C1} + p_{2C1}(x_J - x_{s2C1})^2$	(43)
$x_K = x_{C2}$	(44)	$x_L = x_{D2}$	(45)
$y_K = y_{D1}$	(46)	$y_L = y_{D1}$	(47)
$z_K = z_{s1C2} + p_{1C2}(y_K - y_{s1C2})^2$	(48)	$z_L = z_{s1D2} + p_{1D2}(y_L - y_{s1D2})^2$	(49)
$z_K = z_{s2D1} - p_{2D1}(x_K - x_{s2D1})^2$	(50)	$z_L = z_{s2D1} - p_{2D1}(x_L - x_{s2D1})^2$	(51)

Tableau2.1. Expressions des coordonnées des points I, J, K, L

Si la géométrie est cohérente (c'est-à-dire la mise en données correcte) les deux expressions de la coordonnée z de chacun des points sont identiques. Cependant, la mesure des paramètres sur le renfort réel, bien que prévue pour être la plus simple possible, est assortie d'incertitudes. En particulier, l'épaisseur de la mèche est un paramètre assez délicat à mesurer précisément et très sensible au niveau de la cohérence. Ces approximations peuvent ainsi conduire à obtenir deux valeurs différentes pour le calcul de la coordonnée z. Au niveau géométrique cela revient à dire que la surface n'est pas fermée ou que les deux paraboles P_{2C1} et P_{2D1} ne rejoignent pas les deux paraboles P_{1C2} et P_{1D2}. Loin d'être un problème, cet écart permet de rectifier et d'ajuster la mise en données pour obtenir une cohérence parfaite.

Les épaisseurs sont les données les plus approximatives, les plus sensibles et les plus variables. Il est choisi de respecter la cohérence stricte en modifiant les épaisseurs : soit l'épaisseur trame, soit l'épaisseur chaine, soit les deux. Bien évidemment, l'utilisateur est alerté par ce changement et choisit quel mode de rectification il souhaite, ce qu'il souhaite privilégier et de la qualité de ses mesures. La structure du modèle permet de ne travailler que sur un point (ici le point I), les 3 autres sont utilisés pour valider les modifications effectuées. Les valeurs initialement calculées sont affectées de l'indice 0 et sont affinées avec la procédure ci-dessous.

En repartant des deux valeurs de z_I :

$$z_{I10} = z_{s1C2} + p_{1C2}(y_I - y_{s1C2})^2 = z_{C2} - p_{1C2}(y_{C2} - y_{s1C2})^2 + p_{1C2}(y_I - y_{s1C2})^2 \quad (52)$$

$$z_{I10} = z_{A2} - \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\frac{t_{2c0}}{2} - p_{1C2}(y_{C2} - y_{s1C2})^2 + p_{1C2}(y_I - y_{s1C2})^2 \quad (53)$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$z_{I1} = z_{A2} - \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\frac{t_{2c}}{2} - p_{1C2}(y_{C2} - y_{s1C2})^2 + p_{1C2}(y_I - y_{s1C2})^2 \quad \textbf{(54)}$$

$$z_{I1} - z_{I10} = \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\left(\frac{t_{2c0}}{2} - \frac{t_{2c}}{2}\right) \quad \textbf{(55)}$$

$$z_{I20} = z_{s2C1} - p_{2C1}(x_I - x_{s2C1})^2 = z_{C1} - p_{2C1}(x_{C1} - x_{s2C1})^2 - p_{2C1}(x_I - x_{s2C1})^2 \quad \textbf{(56)}$$

$$z_{I20} = z_{A1} + \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\frac{t_{1c0}}{2} - p_{2C1}(x_{C1} - x_{s2C1})^2 - p_{2C1}(x_I - x_{s2C1})^2 \quad \textbf{(57)}$$

$$z_{I2} = z_{A1} + \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\frac{t_{1c}}{2} - p_{2C1}(x_{C1} - x_{s2C1})^2 - p_{2C1}(x_I - x_{s2C1})^2 \quad \textbf{(58)}$$

$$z_{I2} - z_{I20} = \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\left(\frac{t_{1c0}}{2} - \frac{t_{1c}}{2}\right) \quad \textbf{(59)}$$

$$z_{I2} - z_{I1} = z_{I20} - z_{I10} + \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\left(\frac{t_{1c0}}{2} - \frac{t_{1c}}{2} - \frac{t_{2c0}}{2} + \frac{t_{2c}}{2}\right) \quad \textbf{(60)}$$

Pour avoir $z_{I2} = z_{I1}$:

- si tout reste inchangé sauf l'épaisseur chaine ($t_{2c} = t_{2c0}$) :

$$\frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\frac{t_{1c}}{2} = \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\frac{t_{1c0}}{2} + z_{I10} - z_{I20} \quad \textbf{(61)}$$

$$t_{1c} = t_{1c0} + 2\frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}(z_{I10} - z_{I20}) \quad \textbf{(62)}$$

- si tout reste inchangé sauf l'épaisseur trame ($t_{1c} = t_{1c0}$) :

$$z_{I1} = z_{I20} = z_{I10} + z_{I20} - z_{I10} \quad \textbf{(63)}$$

$$-\frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\frac{t_{2c}}{2} = -\frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\frac{t_{2c0}}{2} + z_{I20} - z_{I10} \quad \textbf{(64)}$$

$$t_{2c} = t_{2c0} + 2\frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}(z_{I10} - z_{I20}) \quad \textbf{(65)}$$

- si les deux épaisseurs sont modifiées de façon symétrique :

$$t_{1c} = t_{1c0} + \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}(z_{I10} - z_{I20}) \quad \textbf{(66)}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$t_{2c} = t_{2c0} + \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}(z_{I10} - z_{I20}) \quad \textbf{(67)}$$

Actualisation des points I, J, K, L avec les nouvelles épaisseurs :

$$z_{I1} = z_{I10} - \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\left(\frac{t_{2c}}{2} - \frac{t_{2c0}}{2}\right) \quad \textbf{(68)}$$

$$z_{I2} = z_{I20} + \frac{\overrightarrow{O_1O_2}.\vec{z}}{\left\|\overrightarrow{O_1O_2}\right\|}\left(\frac{t_{1c}}{2} - \frac{t_{1c0}}{2}\right) \quad \textbf{(69)}$$

Cette étape permet de finaliser le premier élément de la section afin de respecter la cohérence parfaite au niveau du contact. Bien sûr il s'agit de l'élément le plus sensible de la section. Les autres éléments sont définis dans la section suivante de façon à respecter les données géométriques de la mèche fournies et obtenir une forme réaliste. Ces routines sont implémentées dans le programme Scilab®, à la suite du calcul des trajectoires. Pour chaque section, les coordonnées des points extrémités du contact et les éléments de définition de la parabole de contact (paramètre p et sommet) sont obtenus.

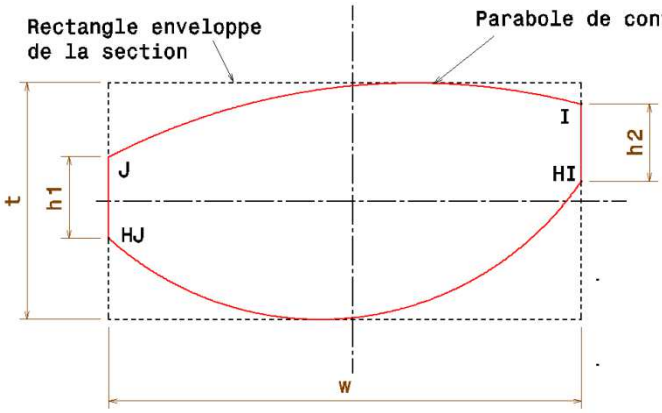
2.3.4.2 Fermeture de la section

Une fois définie la zone de contact, la première partie de la section est terminée, en fonction de la largeur de mèche, via l'ajout de 0 à 2 paraboles tangentes suivant la position de l'extrémité des contacts. Les parties latérales sont les segments de droite dont les longueurs sont entrées par l'utilisateur (Figure2.3). Enfin, la seconde partie (partie libre) est construite pour relier les deux segments de droite et respecter l'épaisseur de la mèche (Figure2.3). Si les deux derniers points ne posent aucune difficulté, le premier fait apparaître plusieurs cas et donne lieu à un traitement particulier, en fonction de la position des extrémités du contact. Deux paramètres k_{sx} et k_{sz} sont définis et ajustables dans le processus. Les critères et les limites définies ici ont beaucoup évolué au cours de cette étude et sont issus de l'expérience de la modélisation des mailles élémentaires acquise au cours de ce travail :

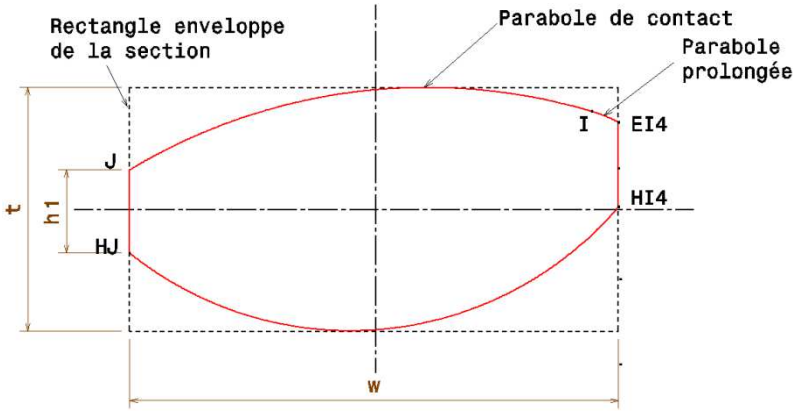
- k_{sx} représente la limite de l'éloignement relatif de l'extrémité du contact par rapport au bord de la mèche ;
- k_{sz} représente la marge tolérée en z entre les extrémités K et L des segments de droite et la demi-épaisseur de la mèche, de façon à éviter que ces points ne se retrouvent plus bas que le sommet théorique de la parabole libre.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

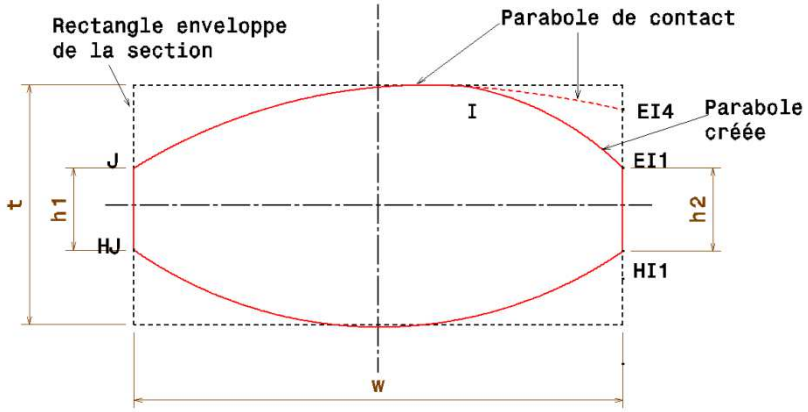
Plusieurs cas sont alors à envisager. La Figure2.11 illustre les différents cas pour une section dont les extrémités du contact sont I et J. Les différentes positions sont présentées pour le point I mais le traitement est identique pour le point J. L'algorithme est détaillé en Annexe 3.



(a) Les extrémités du contact sont sur les bords de la section

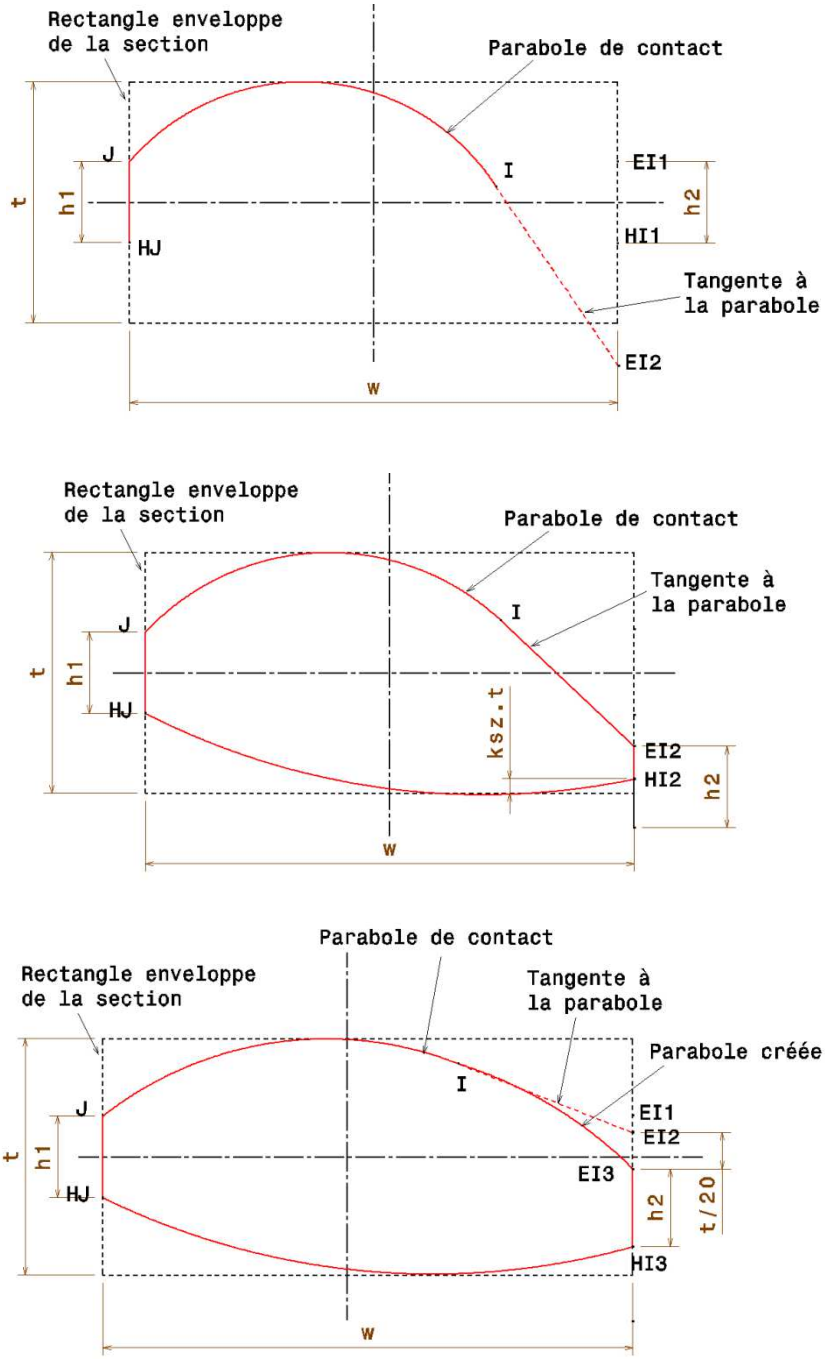


(b) I est proche du bord, la parabole de contact est prolongée



(c) I est loin du bord, une parabole tangente à celle de contact jusqu'au point EI1 est tracée

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(d) La tangente à la parabole coupe le bord trop bas, la section ne peut être fermée. La mise en données doit être revue

(e) Le point EI2 est proche de la surface libre, la longueur du segment latéral [EI2 EH2]est réduite pour respecter la distance minimale ksz.t

(f) La section est fermée grâce au point EI3 décalé de t/20 par rapport à EI2

Figure2.11. Fermeture de la section en fonction des différent cas

Cette seconde étape permet donc de définir complètement la section de la mèche au niveau de tous les points de contrôle. La géométrie 3D de chaque mèche et donc du renfort est ainsi complètement définie. La cohérence est parfaitement assurée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.4 Modélisation CAO 3D

Il faut rappeler que l'idée de départ est d'obtenir un modeleur complètement automatisé. Jusqu'ici les routines Scilab® permettent de calculer, sans interventions de l'utilisateur après la mise en données, tous les paramètres géométriques du modèle. La création automatique du modèle CAO en lui-même est décrite ci-après :

Afin de créer la maquette virtuelle CAO 3D, plusieurs solutions sont possibles, mais une fonction de type tuyau avec interpolation et lissage est nécessaire. En effet, la forme obtenue est du type tuyau avec des sections de formes et de paramètres différents. Les surfaces obtenues sont des surfaces gauches. Bien qu'il soit possible de créer un outil de modélisation de ce type, cela n'est pas envisageable dans le cadre de cette étude et la robustesse d'une conception maison n'est pas assurée, étant données les formes et les précisions demandées pour la cohérence. L'idée retenue est d'exploiter les outils de CAO 3D existants qui sont nombreux, stables et très puissants. Un autre avantage est qu'une fois la géométrie créée, l'utilisation de l'outil CAO 3D permet de modifier ou de faire évoluer avec une très grande souplesse la géométrie en fonction du besoin.

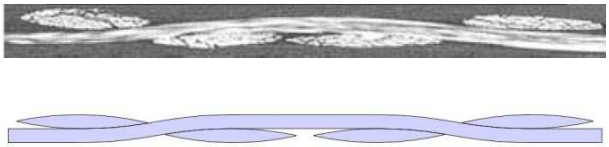
L'inconvénient de cette démarche est qu'il est nécessaire de programmer dans le logiciel d'accueil pour automatiser la procédure. L'outil est donc associé à un logiciel spécifique de CAO. L'utilisation de tout autre logiciel nécessite la reprogrammation des routines. Catia V5® a été retenu pour la performance de ses outils de modélisation, mais aussi car toutes les fonctions peuvent être automatisées à l'aide de routines VBA, programmables par exemple dans Excel®. Cela permet à la fois de programmer dans un langage répandu et de bénéficier d'Excel® pour le traitement et la gestion des données. En outre, la programmation est facilitée par l'enregistrement du code en cours de création d'une fonction. Toutes les routines de création de géométrie initiale ont alors été mises au point :

- création de points, de droites, de paraboles, assemblage et découpe de courbes, de volumes (tuyaux à sections variables,…) ;
- gestion des fichiers pièces : création, enregistrement, assemblage,…

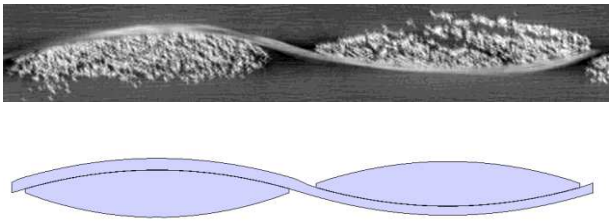
Si cette tâche n'est conceptuellement pas la plus difficile, elle a nécessité malgré tout un temps conséquent de programmation et de mise au point. Pour optimiser cette étape, certaines fonctions élémentaires ou fonctionnalités ont été effectuées en parallèle de ce projet [ROU11, GOD10]. Ces routines permettent finalement de créer de façon complètement automatisée la géométrie initialement calculée sous Scilab®.

Les géométries initiales pour les renforts 2D considérés dans ce mémoire sont présentées en Figure2.12.

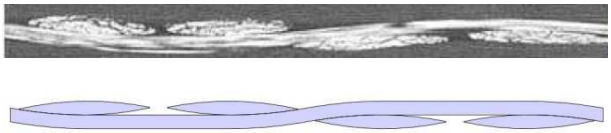
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



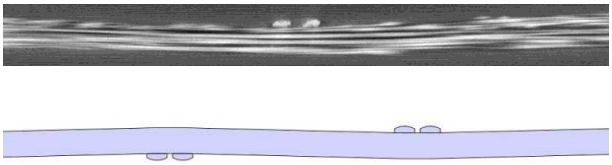
(a) Comparaison réel/modèle pour une coupe trame pour le G986



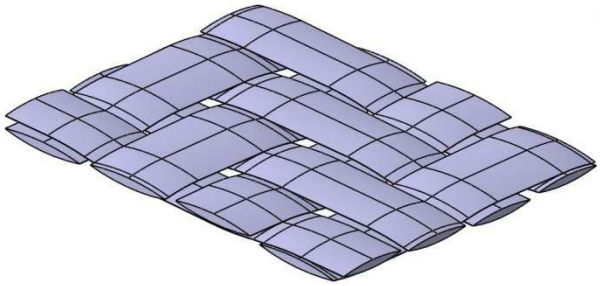
(b) Comparaison réel/modèle pour coupe trame pour le taffetas IMP



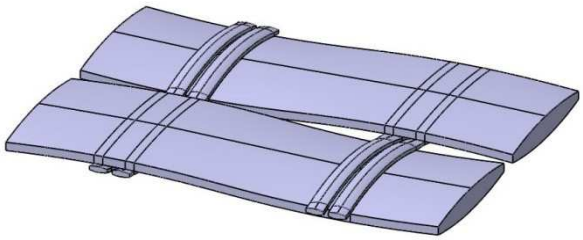
(c) Comparaison réel/modèle pour une coupe chaîne pour le G986



(d) Comparaison réel/modèle pour une coupe chaîne pour le taffetas IMP



(e) Vue 3D extérieure du modèle de G986



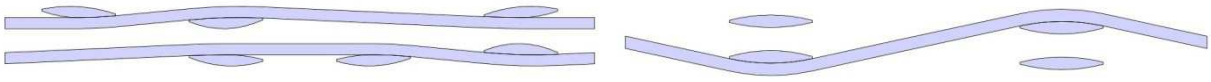
(f) Vue 3D extérieure du modèle de taffetas IMP

Figure2.12. Comparaison modèle/géométrie réelle pour les deux renforts 2D étudiés

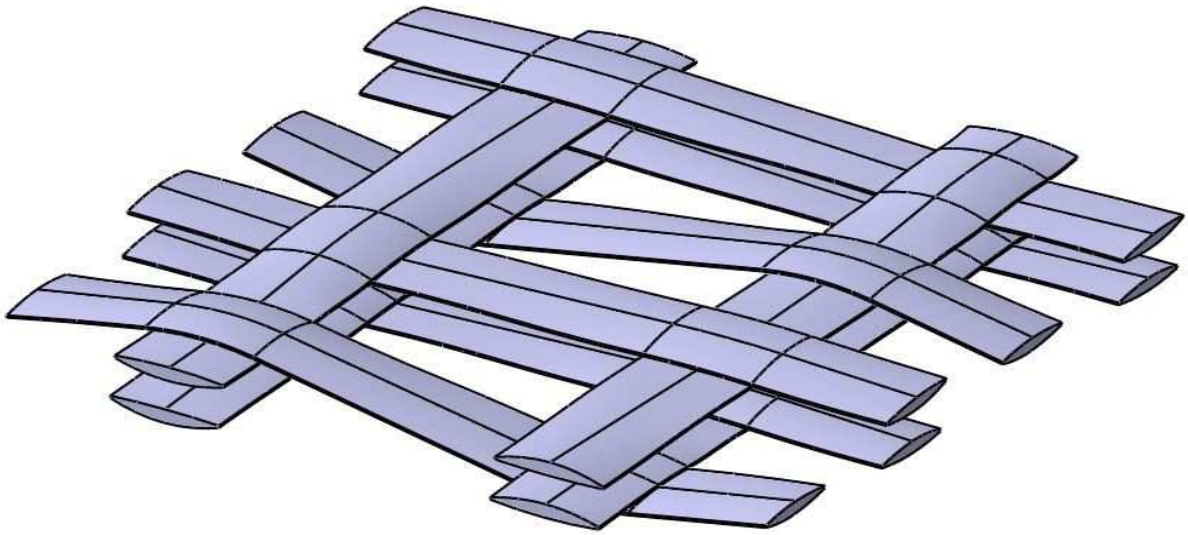
Pour les deux premiers qui sont des renforts 2D, une excellente cohérence entre images et modèle apparait, la cohérence est clairement montrée par les coupes transverses.

Si les images de tomographie pour l'interlock simple ne sont pas accessibles, la Figure2.13 permet de montrer que l'outil permet bien de prendre en compte une architecture de type interlock avec respect strict de la cohérence au niveau des contacts de tissage.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Modèle pour une coupe trame **(b) Modèle pour une coupe chaîne**



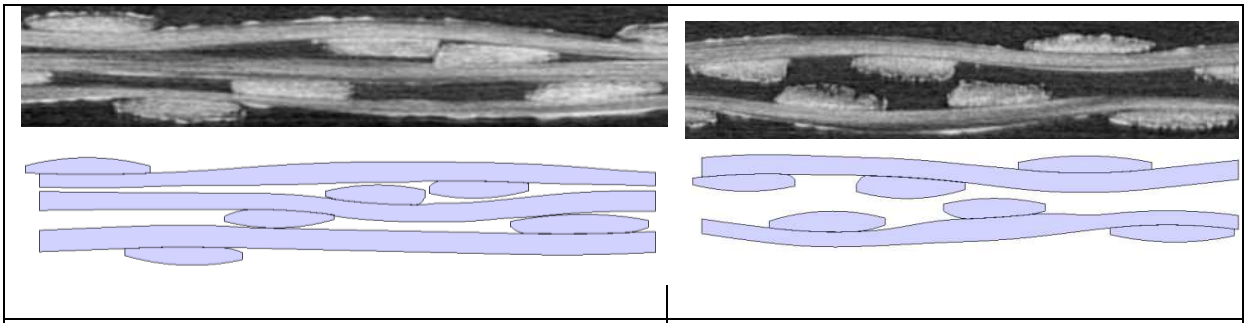
(c) Vue 3D extérieure du modèle

Figure2.13. Modèle géométrique de l'interlock simple

Au niveau du G1151® (Figure2.14), la mise en données est accessible en Annexe 1. Comme cela a été vu précédemment, le décalage global des mèches dans la maille réelle (voir paragraphe 2.1.2.2) a été pris en compte grâce à l'augmentation du nombre de zones. Des zones supplémentaires sont en effet ajoutées pour les mèches qui ne sont pas strictement superposées avec les autres.

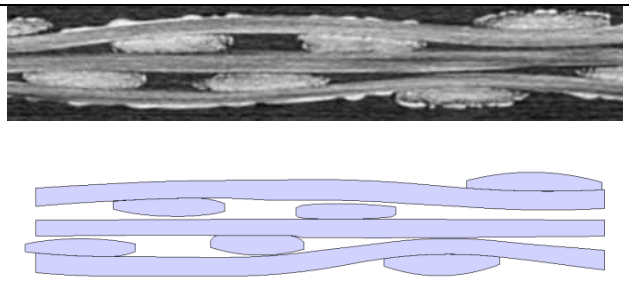
Par exemple, la première colonne de mèches de trame est supposée être une zone de trois mèches superposées. La mèche inférieure est très décalée par rapport aux deux autres. Ainsi, la zone théorique est divisée en deux : une zone contenant les deux mèches supérieures qui sont superposées et une zone contant la mèche inférieure, décalée par rapport à la zone précédente. Ce principe a été systématiquement appliqué pour obtenir finalement 13 zones de trame (contre 6 théoriquement) et la mise en données présentée en Annexe 1.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

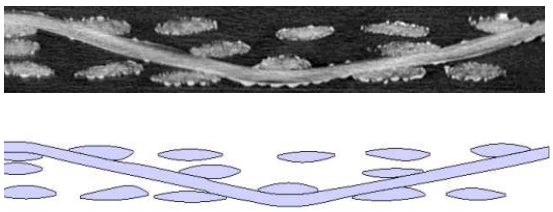


(a) Comparaison réel/modèle pour une coupe au niveau de la première zone de mèches trame pour le G1151®

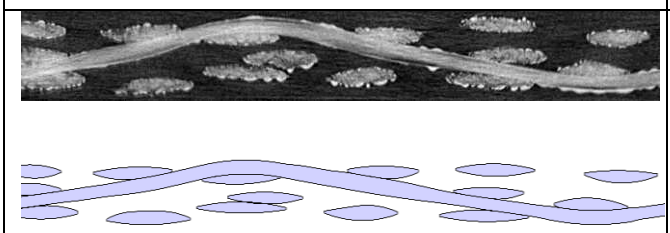
(b) Comparaison réel/modèle pour une coupe au niveau de la cinquième zone de mèches trame pour le G1151®



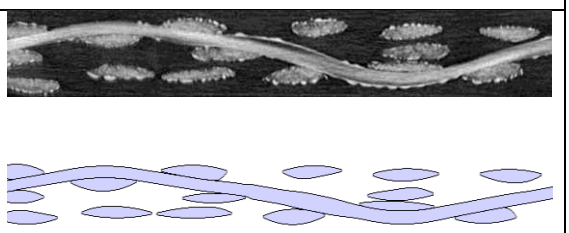
(c) Comparaison réel/modèle pour une coupe au niveau de la dixième zone de mèches trame pour le G1151®



(d) Comparaison réel/modèle pour une coupe au niveau de la première mèche chaîne pour le G1151®



(e) Comparaison réel/modèle pour une coupe au niveau de la troisième mèche chaîne pour le G1151®



(f) Comparaison réel/modèle pour une coupe au niveau de la cinquième mèche chaîne pour le G1151®

Figure2.14. Comparaison réel/modèle pour le G1151®

Une très bonne cohérence entre les images de tomographie et le modèle apparait, preuve que celui-ci possède la capacité de représenter la complexité d'une telle architecture, aussi bien en termes de profil que de formes de mèches. Les contacts sont parfaitement cohérents comme le montrent les différentes coupes. Même si certaines formes de sections seraient à affiner, le modèle obtenu est très cohérent. Il reste malgré tout des imperfections notables au niveau de la géométrie 3D (Figure2.15) : même si l'architecture est bien respectée, des interférences existent entre les mèches de même réseau. Ces interférences évoquées en début de chapitre, n'ont pas été traitées dans le modèle initial, il est donc logique à ce stade de les retrouver. Le paragraphe suivant sera ainsi dédié au traitement des interférences longitudinales et latérales.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

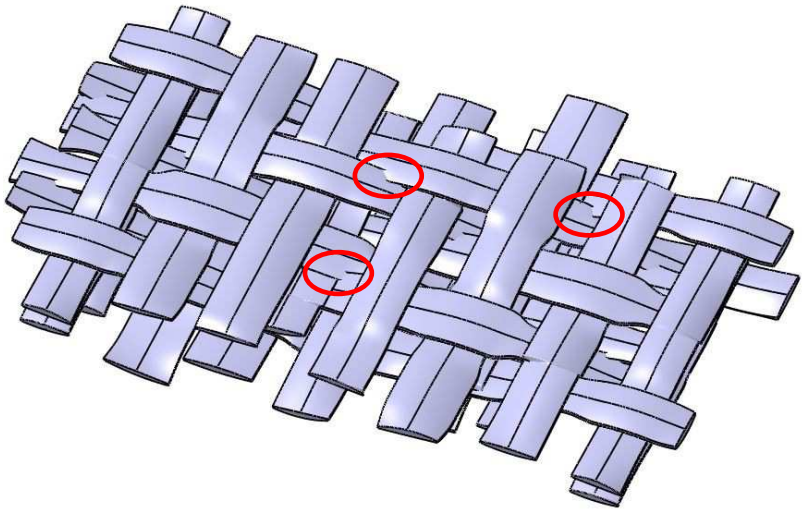


Figure2.15. Vue 3D extérieure du modèle de G1151® - interférences latérales

2.5 Traitement des interférences latérales et longitudinales

2.5.1 Interférences latérales

Comme expliqué au paragraphe 2.1.1.2, il s'agit d'interférences entre mèches du même réseau provenant du fait que l'écart entre deux mèches est plus faible que la largeur naturelle de la mèche et ce à cause de la densité élevée du tissu. Deux cas peuvent être différenciés qui donneront lieu à des traitements différents par la suite :

- dans les zones de contact, la présence de la mèche transverse tend à limiter fortement la probabilité d'interférence latérale. En outre, les données étant implémentées par l'utilisateur, éviter ces interférences est très simple puisqu'il suffit d'affecter localement les bonnes valeurs de largeur aux sections ;
- par contre, le problème majeur provient du croisement de deux mèches du même réseau dans une zone ou elles sont « libres », c'est-à-dire sans contact avec les mèches transverses.

Plusieurs étapes sont nécessaires pour résoudre le problème global des interférences latérales (dans ou hors d'une zone de contact) :

- détection des interférences ;
- suppression des interférences ;
- validation de la géométrie.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.5.1.1 Détection des interférences

Le fait de travailler dans un environnement CAO 3D permet de disposer de plusieurs outils d'analyse et de modification de la géométrie 3D particulièrement intéressants. Parmi ceux-ci, les opérations booléennes de Catia V5® permettent de détecter très simplement toutes les interférences. La stratégie est la suivante : pour une mèche donnée, une opération d'intersection est menée avec toutes les mèches voisines, le volume de l'intersection est alors calculé. Si ce volume est supérieur à la tolérance fixée par l'utilisateur, l'interférence est repérée et les noms des mèches qui interfèrent et le volume de l'interférence sont donnés. L'empreinte laissée sur chacune des mèches par l'intersection permet en outre de localiser précisément la position et les dimensions de l'interférence. Par exemple, l'abscisse du début, de fin, la profondeur,… (Figure2.16)

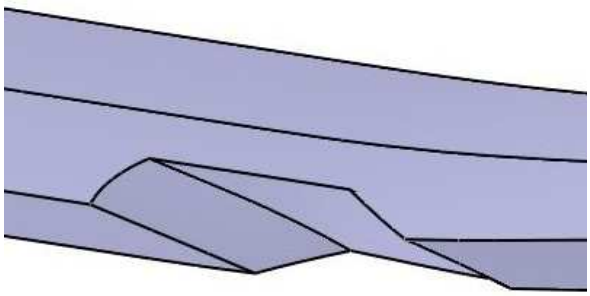


Figure2.16. Emprunte laissée par une interférence latérale après opération booléenne d'intersection

Appliqué à toutes les mèches de la maille élémentaire, une liste de toutes les interférences latérales de la maille est obtenue. Une fois encore, la programmation de cette opération dans des routines VBA permet une automatisation complète de cette étape, conduite sans aucune intervention humaine.

Les intersections étant détectées, il faut ensuite les supprimer. La solution la plus simple serait de supprimer l'intersection d'une des deux mèches ou de la répartir sur les deux. C'est immédiat mais conduit à des sections de forme et de surface peu réalistes. L'objectif poursuivi est donc de retrouver un comportement réaliste des mèches suite au contact.

2.5.1.2 Caractérisation de l'interférence

Les contacts latéraux conduisent à deux conséquences :

- un écrasement local de la mèche et donc une réduction de la largeur ;
- un décalage local de la mèche clairement visible lorsque la même mèche de chaîne est visualisée dans plusieurs plans de coupe différents (Figure2.17).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

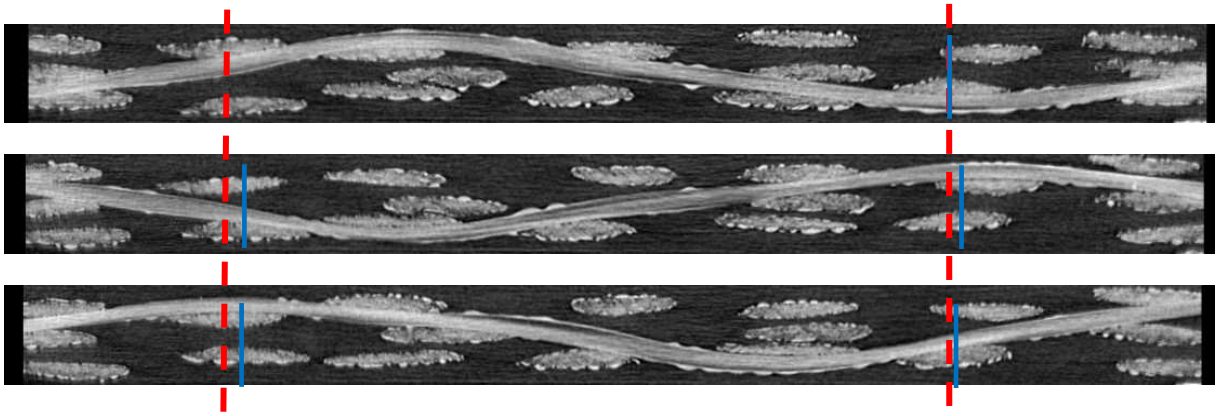


Figure2.17. Position de la même mèche de chaîne dans différents plans de coupe trame

La position et la profondeur de l'interférence peuvent être obtenues :

- soit directement grâce aux outils de mesure de Catia® ;
- soit par le calcul. En effet, les modèles de mèches sont des tuyaux avec bords plats, dont la position du bord extérieur est parfaitement connue. Un algorithme de recherche de croisement entre les trajectoires, associé aux données de largeur de mèche permet d'obtenir à la fois la localisation du contact et la valeur de l'interférence. Soit i_v la profondeur de l'interférence entre deux mèches voisines i et i+1 telle que :

$$i_v = (w_{\alpha i+1} - w_{\alpha i}) \quad \textbf{(70)}$$

C'est cette seconde méthode qui a été codée et qui est utilisée dans le cas des interférences latérales, l'avantage étant de pouvoir déceler immédiatement si l'interférence se situe ou non dans une zone de contact. Si elle se situe dans une zone de contact, elle est traitée par une modification de la mise en données, sinon elle est traitée par la procédure décrite ci-après.

2.5.1.3 Suppression des interférences

Un paramètre r_{lc} est introduit, permettant de définir le ratio entre l'écrasement (la variation de largeur de la mèche ($w_{\alpha i}$)) et le décalage du centre de la section (y_s). Ce paramètre doit être ajusté par l'utilisateur et est finalement destiné à rendre compte, par un paramètre géométrique, du « comportement mécanique » de la mèche dans son environnement tissé afin d'obtenir une forme de mèche plus réaliste. En effet, il dépend de la constitution de la mèche et notamment de l'organisation et de la fraction volumique de fibres qui rendent la résistance à l'écrasement latéral plus ou moins grand. Trois sections sont alors automatiquement ajoutées sur chaque mèche concernée : au début, à la fin et au niveau de l'intersection des trajectoires.

Comme cela a été précisé, l'interférence si elle est traitée ici, ne se produit généralement pas au niveau d'une section de contrôle. Les paramètres initiaux des trois sections de chaque mèche au niveau de la zone d'interférence sont donc calculés par interpolation des deux sections existantes,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

encadrant la zone, en fonction de leur abscisse curviligne. Cette approche est sans aucun doute très proche de celle suivie par le logiciel pour interpoler le volume et les résultats obtenus ont montré une excellente cohérence avec les mesures réalisées directement sur la géométrie Catia.

A partir de ces valeurs initiales, la position et la largeur des sections sont calculées à partir des équations (71) et (72) de façon à obtenir la tangence sur toute la zone d'interférence.

$$w_{\alpha i}^{new} = w_{\alpha i} - r_{lc} i_v \quad \textbf{(71)}$$

$$y_s^{new} = \left(1 - \frac{r_{lc}}{2}\right) i_v \quad \textbf{(72)}$$

Les autres paramètres de la section sont également ajustés, de façon à obtenir une forme de section plus réaliste. Par exemple : la largeur des plats du côté du contact est augmentée en proportion de la profondeur d'interférence. Un exemple de traitement d'une interférence latérale pour deux mèches est présenté Figure2.18.

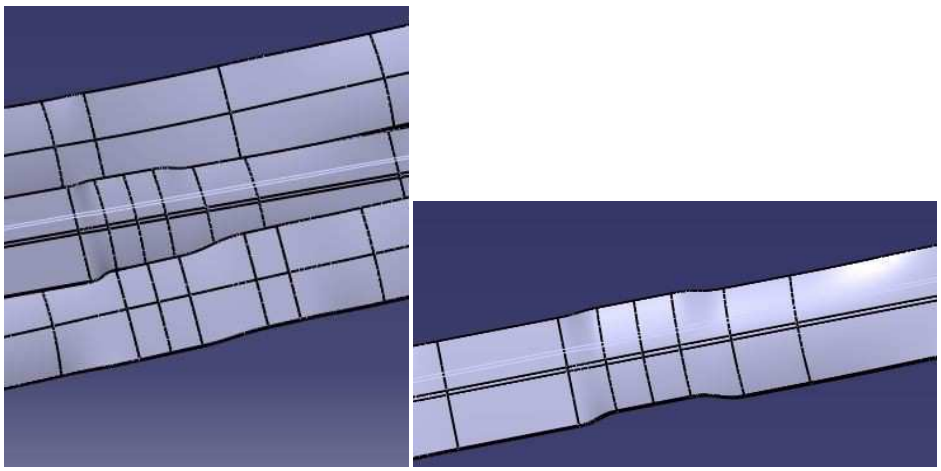


Figure2.18. Exemple de traitement d'une interférence latérale pour deux mèches de chaîne du G1151® en vue de dessus

2.5.1.4 Cas particulier des contacts bilatéraux

Si une mèche est soumise à des contacts latéraux sur ces deux côtés, dans une zone proche, alors le contact est détecté comme bilatéral. La mèche ne peut pas se décaler. Dans ce cas, le paramètre r_{lc} est automatiquement fixé à 1 par l'algorithme pour la mèche considérée et l'intégralité de l'interférence est affectée à l'écrasement de la section. Un profil du type de celui présenté en Figure2.19 est obtenu.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

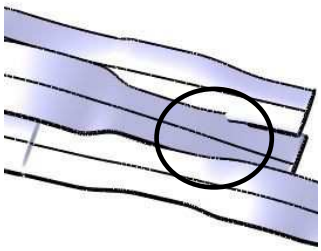


Figure2.19. Profil de mèche suite à une interférence bilatérale

De même, lorsque le décalage de la section est calculé, une seconde vérification est effectuée pour s'assurer que le décalage n'a pas introduit une nouvelle interférence avec la mèche voisine de l'autre côté, sinon le paramètre r_{lc} est ajusté en conséquence.

2.5.1.5 Validation

Une étape de validation est ensuite effectuée sous la forme d'une nouvelle recherche d'interférences.

2.5.2 Interférences longitudinales

Le même type de stratégie peut-être retenu pour l'interférence longitudinale, à ceci près que celle-ci est beaucoup plus faible et plus rare dans les mailles au repos (sans compaction).

2.5.2.1 Détection

La détection est réalisée par opérations booléennes, selon une méthode identique à celle des interférences latérales.

2.5.2.2 Caractérisation

Une autre différence fondamentale est que les surfaces inférieures et supérieures des mèches sont des surfaces gauches (et non un bord plat). La méthode analytique utilisée pour les interférences latérales semble donc beaucoup plus délicate et incertaine à mettre en place. Le choix se porte donc sur l'utilisation et l'automatisation des outils de mesure de Catia V5®. La position et les caractéristiques dimensionnelles sont ainsi fournies directement par le logiciel.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.5.2.3 Suppression

Le ratio r_{cu} est introduit. Il représente la répartition entre l'écrasement (indentation) local de la mèche et le décalage de la section. Celui-ci est par défaut à 1 ce qui conduit à une indentation pure de chacune des mèches sans changement global de forme. En effet, les interférences longitudinales rencontrées, n'induisent aucune modification notable de la trajectoire de la mèche. Rétablir la tangence entre deux formes gauches sans maitriser l'équation (interpolation par Catia V5®) semble une tâche très compliquée. De plus les interférences longitudinales restent jusqu'à présent rares et modestes. Le choix se porte ainsi sur une méthode simplifiée classiquement utilisée dans ce genre de cas, dont le réalisme s'avère bien suffisant par rapport à ce qui est recherché : la création d'une surface plane identique sur chacune des mèches (Figure2.20). La largeur et la profondeur sont calculées par rapport aux caractéristiques dimensionnelles de l'interférence. De plus le fait que les trajectoires des deux tuyaux soient par définition parallèles permet de simplifier tout de même la démarche. Si le principe est simple, la mise en œuvre l'est un peu moins car elle nécessite la modification de la structure des sections dans la zone libre.

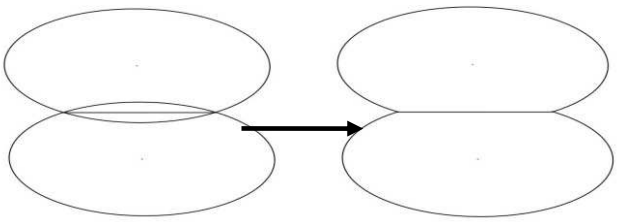
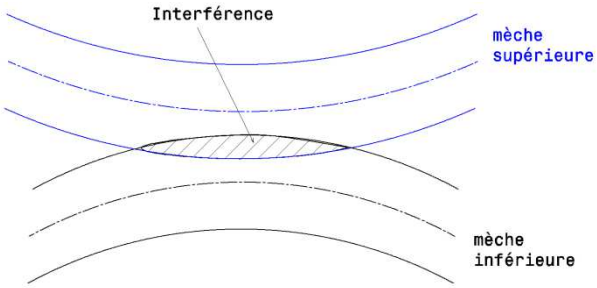
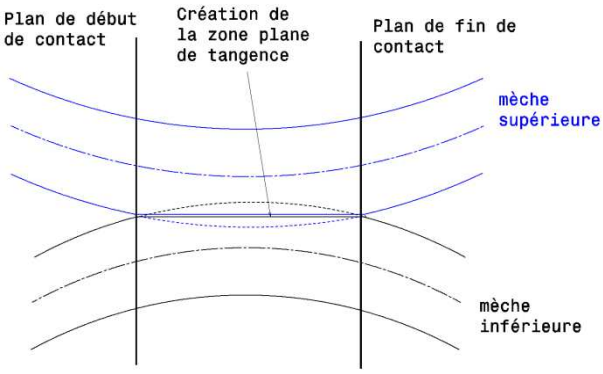
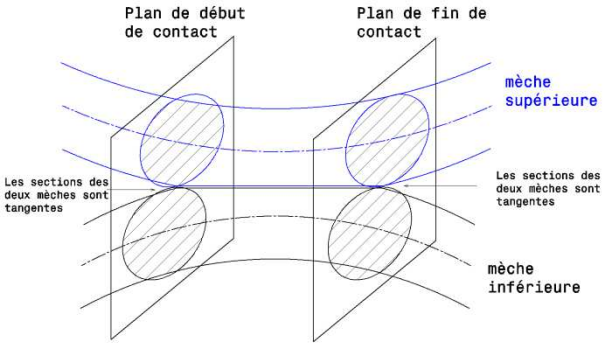


Figure2.20. Principe du traitement des interférences longitudinales

Plusieurs étapes sont ainsi nécessaires et sont représentées en Figure2.21 :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

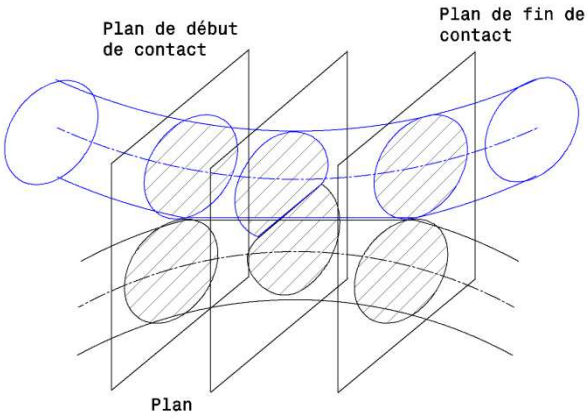
(a) Zone d'interférence entre deux mèches La zone où l'interférence est la plus large est repérée par un plan transverse. L'intersection de ce plan avec les deux mèches permet d'obtenir les deux courbes contours de la mèche à ce niveau. Les points d'intersection entre ces deux courbes sont alors tracés.	
(b) Création des plans transverses de début et fin de contact Un segment de droite est tracé entre les deux points définissant l'intersection et le contour de chaque section est intersecté par ce segment de droite qui constitue alors la zone commune entre les deux mèches.	
(c) Intersection des mèches avec les plans. Les sections des mèches sont alors tangentes Au niveau des extrémités du volume intersecté, deux plans transverses sont également créés. A ces deux niveaux, les deux mèches sont tangentes (début et fin de l'interférence). L'intersection des deux mèches avec ces deux plans permet de définir les deux couples de contours de sections, tangents deux à deux. Les trajectoires des deux mèches étant différentes, retracer le volume de chaque mèche passant par ces trois sections conduit encore à des interférences entre les trois sections créées.	

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

(d) Création d'un troisième plan entre les deux précédents. Définition des contours des mèches au niveau du troisième plan

La dernière étape consiste donc à maîtriser le profil extérieur de chaque mèche. Pour cela :

- Un plan reliant le centre du segment de la section centrale et le point de départ de la section est créé. Ces deux points sont communs à chacune des deux mèches.
- Ce plan coupe également la section de contrôle existante avant l'interférence sur chacune des mèches. Une courbe peut ainsi être créée, tangente au profil de chaque mèche au niveau de la première section et identique sur les deux mèches entre les deux suivantes.



(e) Coupe pour obtenir la tangence des profils

La courbe ainsi obtenue précédemment est réutilisée comme courbe guide de la surface pour reconstruire cette portion de volume de la mèche. Une tangence stricte entre les deux volumes existe. L'étape est alors répétée sur la deuxième moitié de l'interférence de la section centrale.

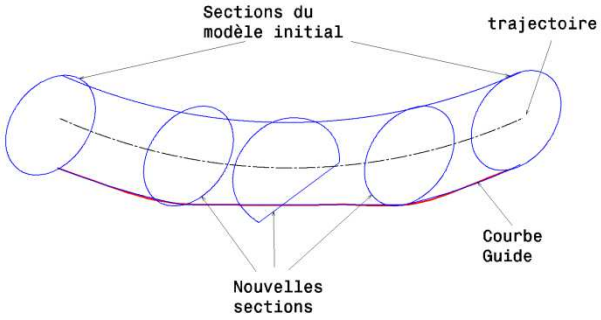


Figure2.21. Etapes de suppression d'une interférence longitudinale

Cette procédure répétée au niveau de chaque interférence longitudinale permet d'obtenir une tangence stricte entre les deux mèches. L'ensemble de ce processus a été codé en VBA afin d'obtenir un traitement complètement automatique. Ainsi les interférences longitudinales sont supprimées sans interventions de l'utilisateur.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

2.5.3 Application à la maille de G1151®

La mise en œuvre de ces deux algorithmes permet d'obtenir une maille élémentaire complètement cohérente (Figure2.22). Les différentes coupes proposées et comparées aux images tomographiques permettent de mettre en évidence la bonne adéquation au niveau de formes pourtant complexes. Cet exemple illustre parfaitement la capacité de l'outil à gérer la cohérence dans des cas complexes avec une bonne représentativité.

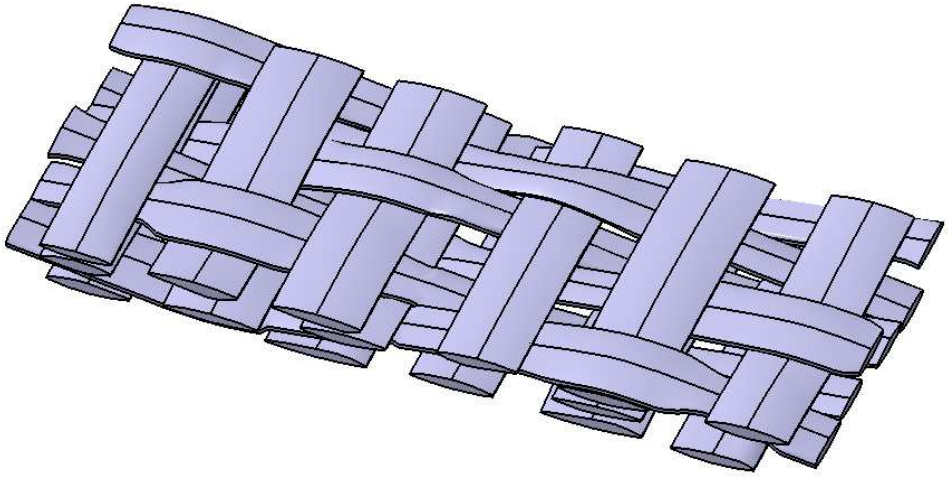


Figure2.22. Modèle final de G1151®

2.5.4 Quelques mots sur la mise en données

Si le modèle proposé a montré sa capacité à représenter des mailles interlocks, le problème de la mise en données reste un peu délicat. Le programme peut être exploité de façon itérative pour affiner la mise en données. En effet, pour un renfort sans images de tomographies, un premier modèle simplifié issu de mesures externes macroscopiques et des contacts de tissage peut être tracé. L'utilisation des opérations booléennes de Catia V5® permet alors de détecter et localiser tous les contacts. Les outils de mesure disponibles permettent à l'utilisateur de modifier la mise en données afin de prendre en compte les contacts détectés. Une nouvelle maille peut alors être créée. Après quelques itérations (une ou deux), une maille élémentaire cohérente est alors obtenue sans recours à l'utilisation de la tomographie. La procédure est synthétisée dans l'organigramme présenté en Figure2.23. Cette stratégie peut s'avérer extrêmement utile car même si la tomographie est de plus en plus répandue, ces essais restent assez longs et onéreux à réaliser.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

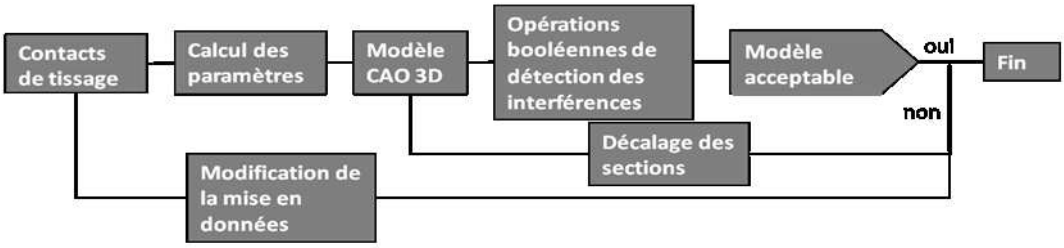


Figure2.23. Organigramme de la démarche itérative de création d'une maille élémentaire cohérente à partir de données expérimentales macroscopiques

2.6 Conclusion

Une stratégie de modélisation CAO 3D complètement automatisée et cohérente de mailles élémentaires 2D et interlocks a été définie et programmée. Passée l'étape de mise en données, les géométries sont obtenues sans intervention de l'utilisateur en quelques minutes, quelques dizaines de minutes pour les cas très complexes. Cette stratégie permet de gérer tous les types de contacts dans tous les types de cellules élémentaires. La capacité de l'outil à gérer des cas complexes a été montrée sur la modélisation du G1151®. Les formes de sections, les positions et les trajectoires de mèches sont réalistes par rapport aux images de tomographie. La géométrie proposée est ainsi directement exploitable pour un maillage et des calculs, ce qui sera l'objet des parties suivantes.

Bien sûr, il est encore possible d'affiner la mise en données et de retoucher le modèle localement pour pouvoir s'approcher encore de la réalité, mais il est aussi clair que la modélisation d'une mèche composée de fibres par un solide homogène possède en son sein quelques limites que seule une description à l'échelle microscopique peut combler. Les transitions entre des sections de profils très différents donnent par exemple lieu à des arêtes peu esthétiques mais qu'il est très difficile d'effacer complètement (Figure2.24). Plusieurs pistes de réflexion sont en cours pour améliorer ce point. Enfin, la mise en données reste une étape longue et assez délicate qu'il serait possible d'améliorer en introduisant des outils d'aide. Sur ce thème encore, des pistes de réflexion sont ouvertes et sont en cours de développement.

L'ensemble est aujourd'hui rassemblé dans un pack de routines Scilab® et VBA sous Excel®, appelé GeoFab.

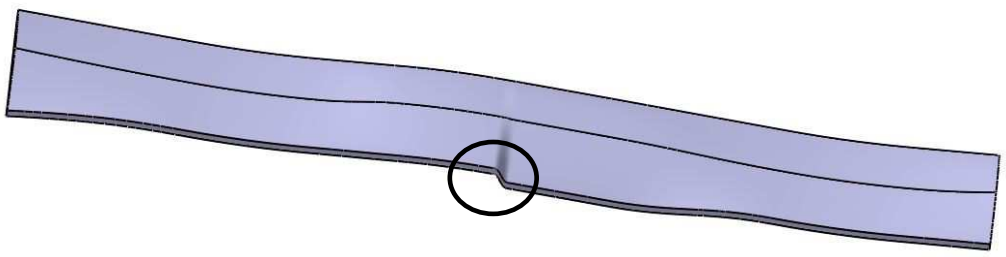


Figure2.24. Arête peu réaliste due à la variation rapide de la forme de la section le long de la trajectoire

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

CHAPITRE 3

Maillage des renforts obtenus par CAO

L'outil GeoFab décrit dans le chapitre précédent permet de disposer d'une géométrie CAO 3D sous Catia V5® importable sous Abaqus® en natif ou à l'aide de formats standards type IGES ou Step. La seconde étape du chemin vers la simulation à l'échelle mésoscopique de mailles élémentaires de renforts tissés consiste à mailler les géométries obtenues. C'est l'objet de ce chapitre.

SOMMAIRE

3.1 Préambule 86
3.1.1 Introduction 86
3.1.2 Analyse de l'existant - choix de la stratégie 86
3.1.3 Eléments 87
3.1.4 Définition des différents critères 88
3.2 Prise en compte des critères de qualité pour l'optimisation du maillage 90
3.2.1 Respect du critère d'angle : choix de la stratégie de maillage 90
3.2.2 Optimisation des paramètres du maillage en fonction du critère de ratio des longueurs 93
3.2.3 Calcul des différentes longueurs de l'élément 93
3.2.4 Mise en œuvre 95
3.3 Mise en œuvre de l'automatisation 96
3.4 Etapes du maillage 99
3.4.1 Import de la géométrie 99
3.4.2 Partition des mèches 99
3.4.3 Génération du "mesh seed" et du maillage 100
3.4.4 Orientation des éléments 101
3.4.5 Création de groupes de nœuds 103
3.4.6 Création des surfaces de contact 105
3.5 Conclusion 108

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.1 Préambule

3.1.1 Introduction

Le maillage souhaité pour les géométries CAO 3D de mailles élémentaires est constitué d'éléments hexaédriques générés par le logiciel Abaqus®. Bien qu'un maillage manuel soit possible, il parait évident au vu de la complexité croissante des architectures de renforts, que cette méthode soit très coûteuse en temps. Outre la complexité des mailles visées, l'idée est également de prendre en compte la variabilité des cellules dans le renfort (voir chapitre 2) ou de pouvoir étudier la structure optimale pour un nouveau renfort. Il est donc nécessaire de pouvoir faire varier rapidement les paramètres du maillage et donc de développer un outil de maillage automatique.

En outre, dans la droite ligne des objectifs précédemment cités, le maillage doit être optimisé de manière à réduire au mieux les temps de calcul. La stratégie employée doit alors être applicable à tous les types de renforts générés sous CATIA V5® avec la densité de maillage souhaitée par l'utilisateur. Le maillage doit être cohérent, paramétré et doit pouvoir simplifier le reste de la mise en données pour les calculs qui suivront, notamment grâce à la définition des zones de contacts et à la mise en place de groupes de nœuds auxquels les conditions aux limites sont appliquées. L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts et les méthodes nécessaires à la mise en place de cet outil de maillage automatique.

3.1.2 Analyse de l'existant - choix de la stratégie

Actuellement, peu de travaux ont été réalisés concernant le maillage de renforts obtenus par CAO. Initialement, les géométries étaient réalisées au laboratoire PRISME à l'aide du logiciel PRO ENGINEER® puis maillées sous Patran® [SAN06] avant d'être importées dans Abaqus® pour les calculs. L'import des géométries dans Patran® engendrait des volumes non triparamétriques. Un volume triparamétrique est constitué exclusivement de surfaces biparamétriques, c'est-à-dire des surfaces comportant toujours trois ou quatre côtés. De manière à obtenir des volumes triparamétriques, il était nécessaire de découper les géométries ; la stratégie consistait à créer des surfaces biparamétriques au niveau des faces supérieures et inférieures de chacune des mèches. Un maillage surfacique était alors réalisé de manière à obtenir le même nombre d'éléments sur chacune de ces surfaces. Le maillage du volume se faisait par la création d'éléments hexaédriques par balayage entre les deux faces de la mèche (Figure3.1). Cette méthode permettait de créer un maillage cohérent des renforts avec des éléments réguliers.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

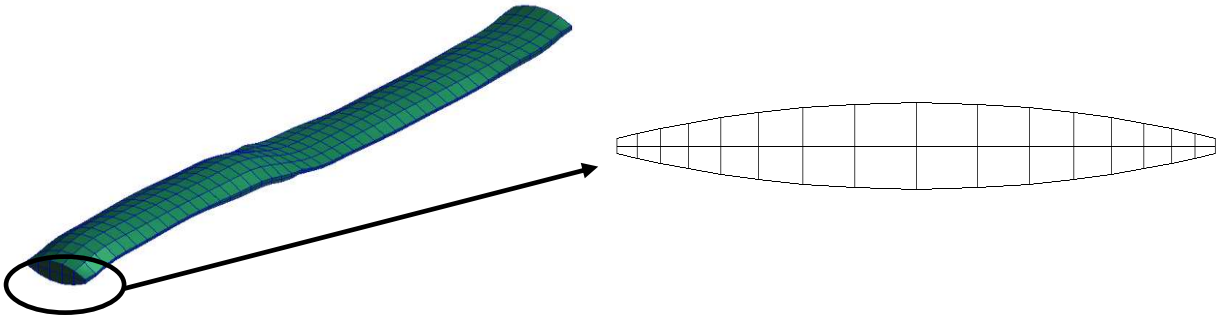


Figure3.1. Maillage d'une mèche par Patran®

Cette stratégie, qui s'est avérée efficace pour les renforts 2D réalisés avec PRO ENGINEER® a dû être modifiée pour plusieurs raisons :

- l'augmentation, ces dernières années, des performances du mailleur inclus dans Abaqus® CAE, permet d'envisager avec plus de sérénité son exploitation pour le maillage de formes gauches ;
- La volonté de réduire le temps de cycle et de simplifier la démarche, pour accélérer le remaillage, conduit également à vouloir supprimer le passage par Patran® pour mailler directement dans Abaqus® ;
- Des difficultés ont été rencontrées lors des transferts de géométrie dans Patran®, ainsi des développements étaient de toute façon nécessaires pour adapter l'outil ;
- Plusieurs fonctionnalités explicitées ci-après dans ce mémoire manquaient également.

Si le maillage recherché est du même type, le procédé d'obtention a dû être modifié. Le choix se porte donc sur une automatisation du maillage directement dans Abaqus®, en utilisant le mailleur d'Abaqus® CAE et ses outils de programmation, c'est-à-dire des scripts Python.

3.1.3 Eléments

Les éléments finis utilisés pour les simulations sont des C3D8R (éléments hexaédriques à huit nœuds et intégration réduite) [BAD08a], ainsi il faut réaliser un maillage par des éléments 3D hexaédriques. La stratégie employée doit pouvoir s'adapter à la géométrie fortement gauche des mèches (voir chapitre 2), qui peuvent notamment engendrer des éléments distordus. Outre la réalisation automatique du maillage hexaédrique des formes gauches, l'une des problématiques essentielles est de pouvoir anticiper les éventuels problèmes liés à la qualité des éléments générés. Pour cela, les critères de validité des éléments constitueront une base essentielle de l'algorithme.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.1.4 Définition des différents critères

Les paramètres caractéristiques d'un élément i sont définis en Figure3.2 : les nœuds sont numérotés de 1 à 4 pour la face dans le plan de la section, h_{i1}^e et h_{i2}^e représentent respectivement les deux hauteurs gauche et droite de l'élément ; l'indice i indique le numéro de l'élément et l'exposant e correspond à un paramètre spécifique à l'élément (dans la suite de ce chapitre, les paramètres géométriques relatifs à la section seront affectés de l'exposant s). l_{i1}^e et l_{i2}^e sont les deux largeurs et L_{i1}^e et L_{i2}^e représentent les dimensions dans la troisième direction. Enfin, n_t est le nombre d'éléments dans l'épaisseur de la section et les bords des mèches seront appelées h_k^s (avec k=1 ou 2 suivant qu'il s'agit du bord gauche ou droit). Les angles aux quatre coins correspondant aux nœuds 1 à 4 seront notés α_{ij}^e, avec j=1 à 4 (Figure3.2).

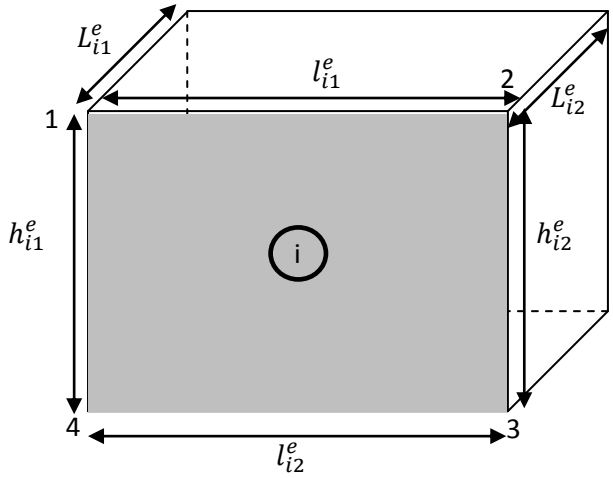
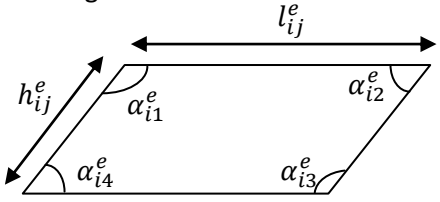


Figure3.2. Paramétrage d'un élément

Dans Abaqus®, trois critères de qualité sont définis pour les éléments 3D hexaédriques (Figure3.3) :

- Critère 1 : le rapport de la longueur la plus grande sur la plus petite ; dans Abaqus®, ce rapport doit être inférieur à 10 ;
- Critère 2 : l'angle minimal sur une surface entre deux arêtes : α_{ij}^e >10° ;
- Critère 3 : l'angle maximal sur une surface : α_{ij}^e <160°.



$$10° \leq \alpha_{ij}^e \leq 160° \quad \textbf{(73)}$$

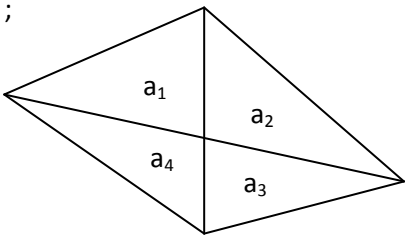
$$\frac{Max\{l_{ij}^e, h_{ij}^e, L_{ij}^e\}}{Min\{l_{ij}^e, h_{ij}^e, L_{ij}^e\}} \leq 10 \quad \textbf{(74)}$$

Figure3.3. Critères de validité des éléments hexaédriques Abaqus®

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

A ces trois critères 3D définis par Abaqus®, deux critères de qualité 2D peuvent être ajoutés de manière à contrôler et améliorer la convergence et la qualité des résultats sur la validité des éléments. Ces deux critères sont ceux définis dans Patran®. Il s'agit des critères nommés :

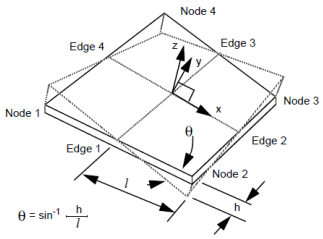
- Face Taper : chaque face est testée comme un élément quadrangle. Il s'agit du rapport de l'aire minimale (multipliée par quatre) des quatre aires créées sur la surface de l'élément et de l'aire totale de l'élément (Figure3.4). Ce critère doit être inférieur à 0.5 pour que l'élément soit valide ;



$$\frac{4min(a_1, a_2, a_3, a_4)}{\sum_{i=1}^{4} a_i} \leq 0.5 \quad \textbf{(75)}$$

Figure3.4. Face Taper hexaédrique

- Face Warp : chaque face est testée comme un élément quadrangle. Ce critère représente la distorsion de l'élément par rapport à un plan normal (Figure3.5). Ce critère doit être inférieur à 0.707 pour que l'élément soit valide.



$$\theta \leq 0.707 \quad \textbf{(76)}$$

Figure3.5. Face Warp hexaédrique

Les trois premiers critères étant les seuls définis explicitement dans Abaqus, ceux-ci seront traités en premier lieu. De manière à simplifier l'approche et sa compréhension, l'analyse se fera, dans un premier temps, sur des éléments quadrangle en considérant les sections transverses des mèches. L'extension des résultats au volumique se fera dans un second temps.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.2 Prise en compte des critères de qualité pour l'optimisation du maillage

3.2.1 Respect du critère d'angle : choix de la stratégie de maillage

3.2.1.1 Problématique et conséquences

Les sections de mèches utilisées pour les modèles CAO 3D présentent une géométrie complexe. D'une part, les courbures des surfaces supérieure et inférieure de chaque section sont opposées (surface supérieure concave, surface inférieure convexe). D'autre part, le bord des sections peut être très petit. Le maillage doit donc pouvoir s'adapter à ces problématiques. Il est donc choisi de calculer les différents critères aux endroits où les éléments ont le plus de probabilité d'être invalidés. Etant donnés la forme des sections (simple courbure) et le maillage souhaité (Figure3.6), les coins de la section conditionnent à la fois les angles les plus grands et les plus petits ainsi que la plus petite taille d'élément. Ainsi, les éléments situés au bord de la section sont les plus pénalisants et sont donc utilisés pour le calcul des angles limites (Figure3.6). Ils conditionnent aussi la plus petite taille d'éléments. A contrario, les éléments situés vers le centre de la section sont dans la zone où l'épaisseur est la plus élevée. Ces éléments peuvent donc être problématiques pour le calcul du ratio des longueurs (Figure3.7) et sont aussi utilisés pour le calcul de ce critère.

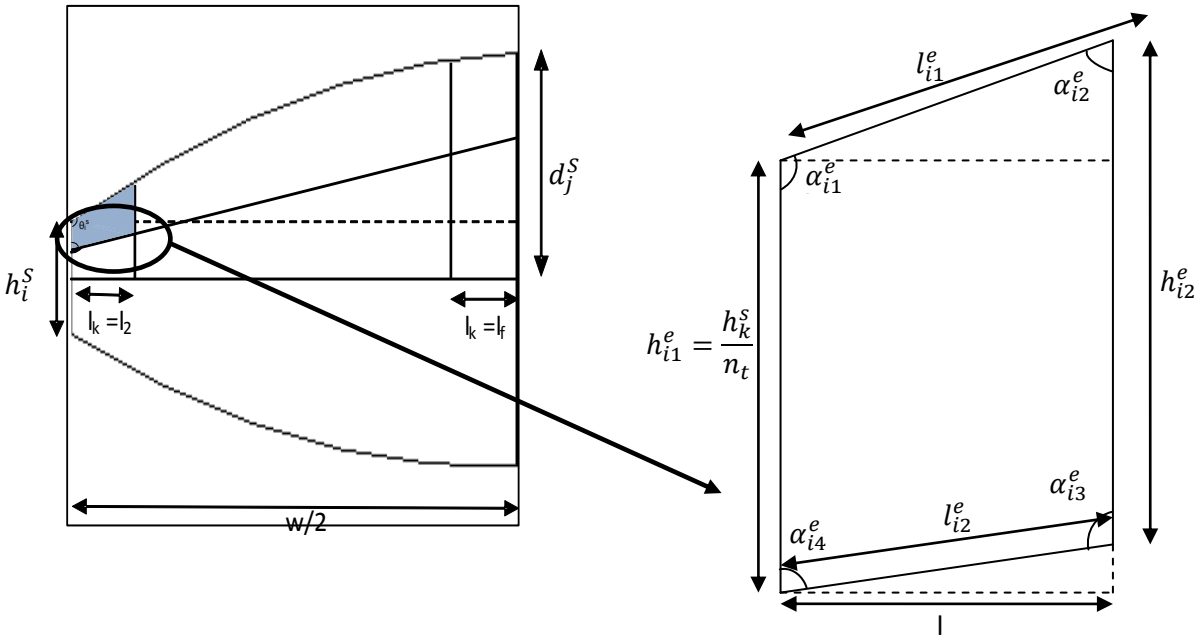


Figure3.6. Paramètres des éléments

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.2.1.2 Choix de la stratégie

L'analyse précédente conduit à s'intéresser aux éléments situés au coin de la section. Leurs arêtes étant liées aux contours de la section, le premier calcul à effectuer est celui de l'angle entre le bord et la tangente à la parabole de section (θ_i^s) afin de pouvoir obtenir un élément de bonne qualité à cet endroit. En effet, cet angle, paramètre inhérent à la géométrie de la section, représente le bombement de celle-ci et est directement associé aux angles α_{ij}^e de l'élément du coin (Figure3.6). Les calculs seront développés sur un élément au coin de la section à titre de démonstration.

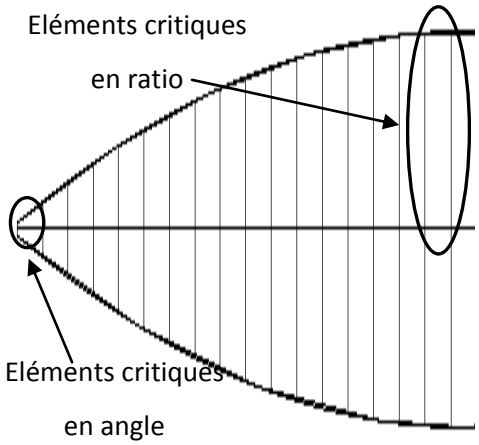


Figure3.7. Eléments pouvant être invalidés

3.2.1.3 Détermination des angles critiques

Concernant un élément au coin, la prise en compte des paramètres de maillage et de la géométrie de la section donne $\alpha_{i2}^e < \alpha_{i4}^e < \alpha_{i3}^e < \alpha_{i1}^e$. Les bornes sont donc imposées par les valeurs limites de α_{i2}^e et α_{i1}^e. Les critères 2 et 3 imposent

$$\begin{cases} \frac{\pi}{18} < \alpha_{i1}^e < \frac{8\pi}{9} \\ \frac{\pi}{18} < \alpha_{i2}^e < \frac{8\pi}{9} \end{cases} \quad \text{ou} \quad \left(\begin{cases} \mathbf{10°} < \boldsymbol{\alpha_{i1}^e} < 160° \\ \mathbf{10°} < \boldsymbol{\alpha_{i2}^e} < 160° \end{cases} \right) \tag{77}$$

Avec

$$\begin{cases} \alpha_{i1}^e = \theta_i^s \\ \alpha_{i2}^e = \pi - \theta_i^s \end{cases} \tag{78}$$

De même, la géométrie de la section (simple courbure, concavité) impose les bornes suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\pi}{2} < \alpha_{i1}^e < \pi \\ 0 < \alpha_{i2}^e < \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \text{ou} \quad \left(\begin{cases} \mathbf{90°} < \boldsymbol{\alpha_{i1}^e} < 180° \\ \mathbf{0°} < \boldsymbol{\alpha_{i2}^e} < \mathbf{180°} \end{cases} \right) \tag{79}$$

Donc

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$\begin{cases} \frac{\pi}{2} < \alpha_{i1}^{e} < \frac{8\pi}{9} \\ \frac{\pi}{18} < \alpha_{i2}^{e} < \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \text{ou} \quad \left(\begin{cases} \mathbf{90°} < \boldsymbol{\alpha_{i1}^{e}} < 160° \\ \mathbf{10°} < \boldsymbol{\alpha_{i2}^{e}} < \mathbf{90°} \end{cases} \right) \tag{80}$$

Les équations (78) et (80) entrainent :

$$\begin{cases} \frac{\pi}{2} < \theta_i^s < \frac{8\pi}{9} \\ \frac{\pi}{18} < \pi - \theta_i^s < \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \text{ou} \quad \left(\begin{cases} \mathbf{90°} < \boldsymbol{\theta_i^s} < \mathbf{160°} \\ \mathbf{10°} < \mathbf{180} - \boldsymbol{\theta_i^s} < \mathbf{90°} \end{cases} \right) \tag{81}$$

C'est-à-dire :

$$\frac{\pi}{2} < \theta_i^s < \frac{8\pi}{9} \quad \text{ou} \quad (\mathbf{90°} < \boldsymbol{\theta_i^s} < \mathbf{160°}) \tag{82}$$

Ainsi, l'angle maximal possible entre le bord de la section et la tangente à la parabole est $\theta_{imax}^{s} = 160°$

Il y a alors deux possibilités :

- $\theta_i^s < 160°$ (la section n'est pas trop bombée), le critère 3 pour l'élément au coin est correct donc celui des autres éléments l'est également. Dans ce cas, la démarche sera celle décrite dans la suite de ce chapitre ;
- $\theta_i^s > 160°$ (la section est trop bombée). Dans ce cas la seule solution est de modifier la géométrie de la section : cette dernière est découpée dans l'épaisseur et par insertion d'une zone triangulaire au bord (Figure3.8). Ce cas ne sera pas pris en compte dans la procédure d'automatisation car il est suffisamment rare dans les renforts techniques. Un maillage manuel est alors choisi.

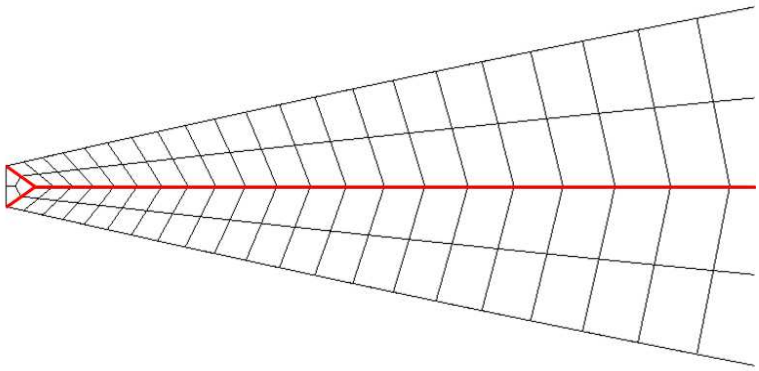


Figure3.8. Découpage de section dans le cas α>160°

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.2.2 Optimisation des paramètres du maillage en fonction du critère de ratio des longueurs

Le but est de pouvoir respecter le critère de ratio des longueurs (critère 1). La stratégie est la même que celle développée pour le critère d'angle : les éléments aux coins et au milieu de la section étant les plus pénalisant, ils seront utilisés pour les calculs dans l'objectif de déterminer les longueur l_{ij}^e et h_{ij}^e en fonction de h_k^s (taille du bord), n_t (nombre d'éléments dans l'épaisseur) et des angles α_{ij}^e.

3.2.3 Calcul des différentes longueurs de l'élément

Soit l la longueur projetée de l'élément sur l'axe horizontal. D'après la Figure3.6, il vient :

$$\begin{cases} h_{i1}^e = \dfrac{h_k^s}{n_t} \\ l_{i1}^e = \dfrac{l}{\sin \alpha_{i3}^e} \\ l_{i2}^e = \dfrac{l}{\sin \alpha_{i1}^e} \\ h_{i2}^e = \dfrac{h_k^s}{n_t} - l\left(\dfrac{1}{\tan \alpha} + \dfrac{1}{\tan \gamma}\right) \end{cases} \quad (83)$$

En outre, la géométrie de la mèche impose que la longueur h_{i2}^e soit toujours supérieure à h_{i1}^e.

Trois cas peuvent donc être considérés en fonction du côté le plus grand :

- h_{i2}^e est le plus grand côté. Il faut donc comparer les rapports suivants :

$$\frac{h_{i2}^e}{h_{i1}^e} \leq 10 \;\rightarrow\; \frac{h_k^s}{n_t} \leq l \leq h_{i2}^e \quad (84)$$

$$\frac{h_{i2}^e}{l_{i2}^e} \leq 10 \;\rightarrow\; l \geq \frac{h_{i1}^e \sin \alpha_{i1}^e \tan \alpha_{i1}^e \tan \alpha_{i3}^e}{10 \tan \alpha_{i1}^e \tan \alpha_{i3}^e + \sin \alpha_{i1}^e \left(\tan \alpha_{i1}^e \tan \alpha_{i3}^e\right)} \quad (85)$$

- l_{i1}^e est le plus grand côté. Il faut donc comparer les rapports suivants :

$$\frac{l_{i1}^e}{h_{i1}^e} \leq 10 \;\rightarrow\; l \leq 10 h_{i1}^e \sin \alpha_{i3}^e \quad (86)$$

$$\frac{l_{i1}^e}{l_{i2}^e} \leq 10 \;\rightarrow\; \frac{\sin \alpha_{i1}^e}{\sin \alpha_{i3}^e} \leq 10 \quad (87)$$

- l_{i2}^e est le plus grand côté. Il faut donc comparer les rapports suivants :

$$\frac{l_{i2}^e}{h_{i1}^e} \leq 10 \;\rightarrow\; l \leq 10 h_{i1}^e \sin \alpha_{i1}^e \quad (88)$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$\frac{l_{i2}^e}{l_{i1}^e} \leq 10 \;\rightarrow\; \frac{\sin\alpha_{i3}^e}{\sin\alpha_{i1}^e} \leq 10 \qquad \textbf{(89)}$$

De plus, si la dimension L_{i1}^e dans la troisième direction est prise en compte, il faudra veiller à respecter les relations suivantes :

$$\begin{cases} 0{,}1 \leq \dfrac{L_{i1}^e}{h_{i1}^e} \leq 10 \\ 0{,}1 \leq \dfrac{L_{i1}^e}{h_{i2}^e} \leq 10 \\ 0{,}1 \leq \dfrac{L_{i1}^e \sin\alpha_{i1}^e}{l} \leq 10 \\ 0{,}1 \leq \dfrac{L_{i1}^e \sin\alpha_{i3}^e}{l} \leq 10 \end{cases} \qquad \textbf{(90)}$$

Finalement, les équations (84) à (90) définissent le critère ratio des longueurs et sont vérifiées et validées pour chacun des éléments pénalisants (bords et centre de section).

Outre le contrôle du maillage par les critères, une stratégie de maillage progressif sur les paraboles de chaque section est choisie de manière à diminuer les temps de calculs et les distorsions des éléments. En effet, la taille des éléments en bord de mèches est limitée par la longueur du plat ; ainsi, en cas de plat de faible longueur (assez courant dans le cas de sections quasi lenticulaires), il faut un élément très petit sur le côté pour respecter le premier critère de validation. Si le maillage est régulier, il faut un nombre considérable d'éléments, ce qui augmente fortement les temps de calcul. D'où l'intérêt d'un maillage progressif qui permet d'obtenir des éléments de tailles différentes en conservant des éléments de bonne qualité (Figure3.9). En outre, cette méthode permet d'adapter le maillage en fonction du calcul. Par exemple, pour un calcul de compaction du renfort, il sera préférable d'avoir a priori des éléments plus hauts que larges au centre de la section de manière à limiter les distorsions pendant le calcul.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

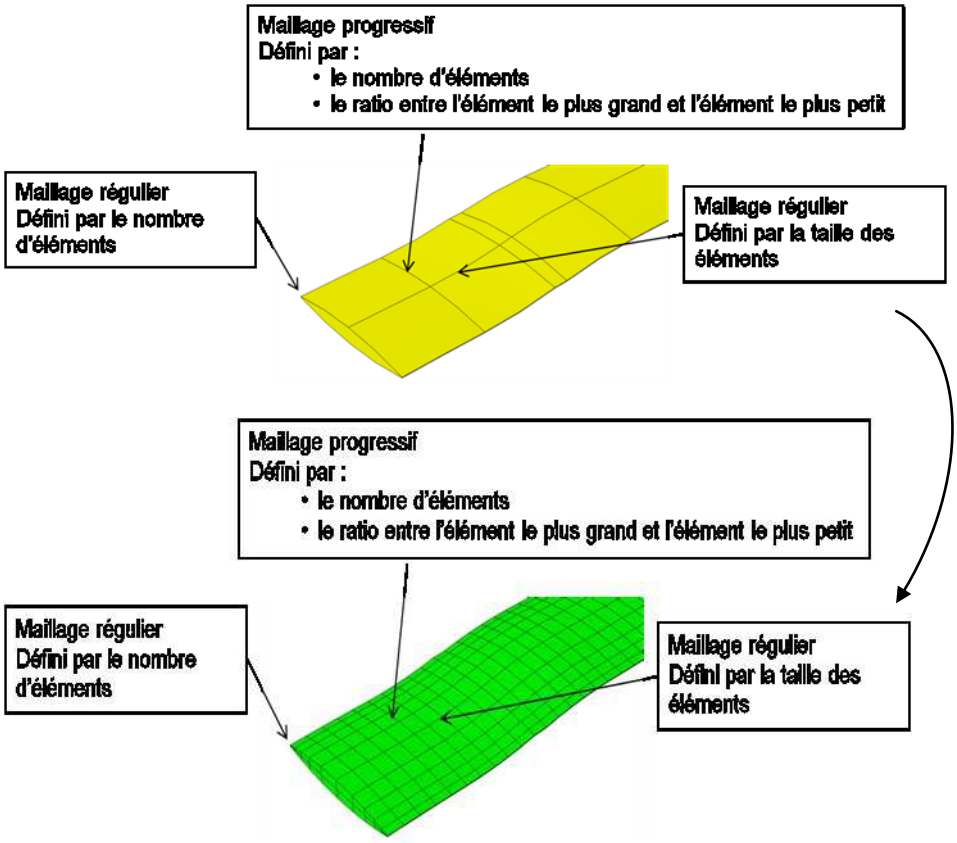


Figure3.9. Définition des paramètres de maillage

Grâce à cette méthode, il est possible d'effectuer un maillage adapté à chacune des mèches constituant le renfort. Cela permet de respecter les différents critères, de prévoir les tailles minimale, maximale et optimale du premier élément en fonction de la longueur du plat sur le côté et finalement d'optimiser les temps de calcul.

3.2.4 Mise en œuvre

Il convient de rappeler que chaque mèche est définie par sa position au sein de la cellule élémentaire, c'est-à-dire :

- le réseau auquel elle appartient (chaîne ou trame),
- la zone dans laquelle elle se situe (une zone étant un groupe de mèche de même cordonnée z),
- le numéro de la mèche dans cette zone.

A ce stade, l'utilisateur renseigne un fichier Excel® (Annexe 4), de même structure que celui nécessaire à la création des géométries, contenant les paramètres du renfort et ceux souhaités pour le maillage :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

- le nom du renfort qui doit correspondre au nom donné après modélisation. Ceci servira à l'import de la géométrie dans Abaqus® ;
- le nombre de zones chaine et trame ;
- le nombre de mèches dans chaque zone ;
- l'échelle à laquelle les mèches ont été créées ;
- les paramètres du maillage pour chaque mèche (Figure3.9) :
  - ✓ le nombre d'éléments dans l'épaisseur de la mèche ;
  - ✓ la taille moyenne des éléments dans la longueur ;
  - ✓ le nombre d'éléments dans la largeur de la mèche ;
  - ✓ le ratio entre la longueur de l'élément la plus grande et la longueur de l'élément la plus petite (maillage progressif).

Une première vérification est effectuée avant le maillage en intégrant les calculs effectués sur les critères de manière à signaler à l'utilisateur si les paramètres enregistrés satisfont ou non aux critères de validité des éléments. Si les critères ne sont pas respectés, de nouvelles valeurs sont proposées.

Le maillage des différentes mèches sera alors généré automatiquement à partir de ces valeurs.

3.3 Mise en œuvre de l'automatisation

Grâce à la mise en place des critères de validité des éléments, l'outil de maillage créé doit permettre, dans un premier temps, de générer un maillage cohérent, adapté aux différents renforts et conforme aux paramètres de maillage définis par l'utilisateur. De plus, cet outil a pour ambition de simplifier au maximum la mise en place des différents calculs. Pour ce faire, un fichier "type" est défini pour chaque cas de sollicitation (traction, compaction…) auquel sont intégrés différents fichiers texte, dits "includes" contenant les informations liées au maillage. Ainsi, un nouveau calcul peut-être lancé sans aucune modification de la mise en données en cas de modification du maillage ou de la géométrie.

Les "includes" doivent être constitués, pour chaque mèche, des éléments suivants :

- la liste des nœuds du maillage avec leurs coordonnées,
- la liste des éléments du maillage avec la table de connectivité associée à chacun,
- les lignes de réorientation des éléments dans le sens des directions matérielles,
- la définition des groupes de nœuds auxquels seront appliquées les conditions aux limites,
- la définition de toutes les surfaces de contact.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Pour cela, il est possible de se baser sur les données fournies par le modeleur géométrique (paramètres géométriques du renfort) :

- le réseau (chaine ou trame), le numéro de la zone et celui de la mèche,
- la coordonnée de la trajectoire de chaque mèche. Il s'agit de la coordonnée X du centre des sections pour les mèches de chaine et Y pour les mèches de trame,
- les coordonnées des centres de section dans le sens longitudinal de la mèche,
- les numéros de section entre lesquelles il y a contact et le signe du contact (en-dessous ou au-dessus de la mèche).

Il est aussi possible de se baser sur les paramètres de maillage entrés par l'utilisateur :

- le nombre d'éléments dans l'épaisseur,
- la taille moyenne des éléments dans la longueur,
- le nombre d'éléments dans la demi-largeur et la valeur du ratio des longueurs.

Une feuille Excel® est remplie, à partir de laquelle un script VBA génère les différents scripts python nécessaires au maillage. Les différentes étapes nécessaires au maillage sont résumées en Figure3.10. Chacune d'elles est détaillée par la suite dans un paragraphe dédié en prenant toujours pour exemple les mèches de chaîne, c'est-à-dire les mèches dont la direction longitudinale est suivant l'axe Y. Les différentes routines s'imbriquent de la façon suivante :

- un premier script « maillage.py » permet l'import et l'assemblage de chacune des mèches et exécute les scripts suivants pour chaque mèche,
- un script recense tous les paramètres nécessaires au maillage de chacune des mèches (coordonnées des centres de section, paramètres de maillage définis par l'utilisateur...),
- un script « maillage_warp.py » (et « maillage_weft.py ») permet de partitionner chaque mèche au niveau des sections définies par la modélisation et de générer les « mesh seed » et le maillage,
- un script « creation_inc.py » permet de générer les fichiers texte nécessaires aux calculs et contenant les nœuds et leurs coordonnées pour chaque mèche ainsi que les éléments et leurs tables de connectivité,
- un script « orientation_warp.py » (et « orientation_weft.py ») permet d'orienter les éléments en fonction des directions matérielles,
- un script « creation_sets_warp.py » (et « creation_sets_weft.py ») permet de créer tous les groupes de nœuds nécessaires aux calculs et de les inclure dans un fichier texte,

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

- un script « creation_surface.py » permet de créer les surfaces de contact, en s'appuyant sur un script « faces.py » qui recense les sections de chacune des mèches pour lesquelles il y a contact avec les mèches du réseau transverse. Les éléments associés à ces surfaces ainsi que les surfaces sont alors inscrits dans un fichier texte nécessaire aux calculs.

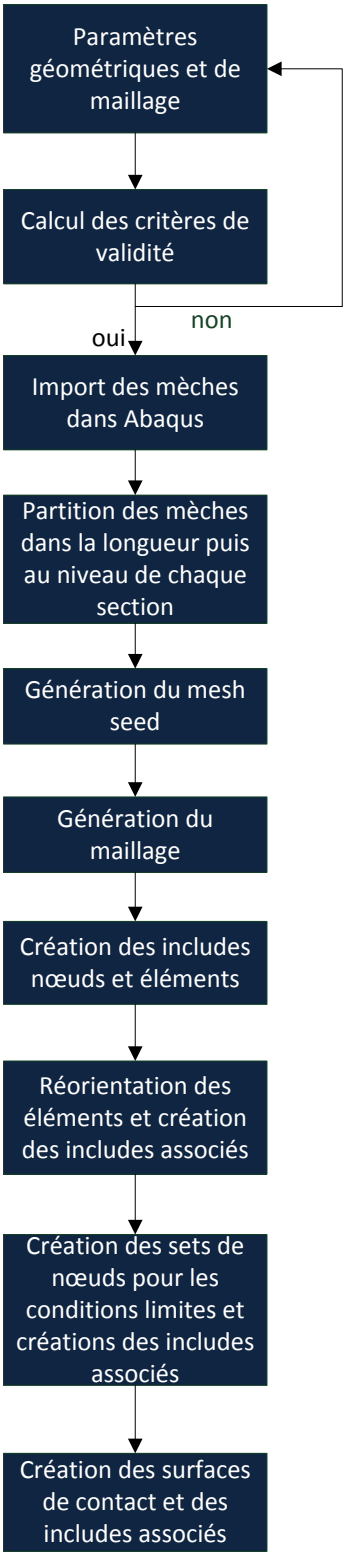


Figure3.10. Etapes du maillage

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.4 Etapes du maillage

3.4.1 Import de la géométrie

Dans un premier temps, la géométrie au format .stp est importée dans Abaqus® à partir du dossier généré lors de la modélisation. Si besoin, l'échelle est prise en compte pour revenir aux dimensions réelles du renfort. Le second script est alors exécuté ; il permet d'intégrer les paramètres du programme : le nom de la mèche, le réseau, le numéro de la zone, celui de la mèche, le nombre et la position des sections, la coordonnée transverse de la trajectoire, les paramètres du maillage définis par l'utilisateur. Toutes ces données sont utilisées par les scripts suivants pour réaliser les différentes fonctionnalités.

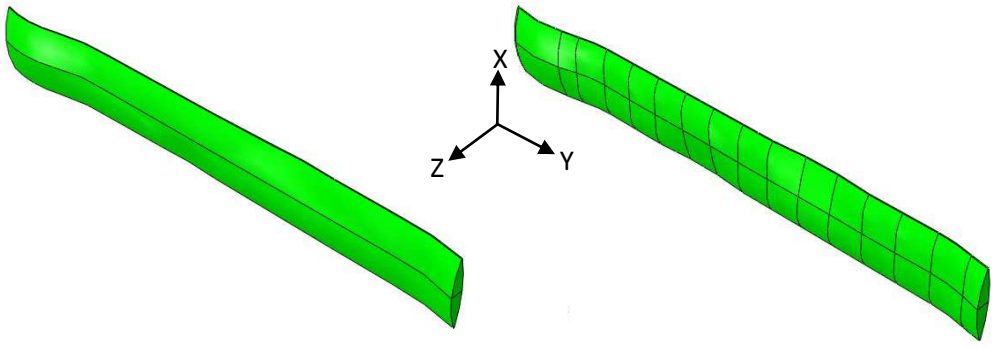
3.4.2 Partition des mèches

Certaines mèches étant fortement ondulées ou de géométrie complexe (formes gauches), le maillage hexaédrique ne peut se faire directement. Il est alors nécessaire de découper ces mèches et de mailler chaque "tronçon" l'un après l'autre.

Plusieurs possibilités existent pour créer une partition dans Abaqus®. Celle retenue est une partition dite "par trois points". Ces trois points constituent un plan de coupe de la mèche. Dans un premier temps les mèches sont découpées dans le sens de la longueur (Figure3.11(a)), au niveau de la trajectoire. Trois points non alignés sont donc créés dans le plan de la trajectoire pour toutes les mèches, de manière à définir un plan dans tous les cas de figure.

A la suite de cette première partition, les "demi"-mèches sont découpées à leur tour au niveau de chaque section (Figure3.11(b)). Les volumes entre deux sections de contrôle de la mèche constituent en effet des tronçons "naturels", simples à exploiter. La méthode est la même que précédemment : trois points sont créés dans le plan de chaque section repérée grâce à son centre. Ces trois points permettent de définir le plan de partition. Après ces deux étapes de partition le résultat présenté Figure3.11(b) est obtenu.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) partition suivant la trajectoire **(b) partition suivant les sections**

Figure3.11. Partition des mèches

Les mèches partitionnées sont prêtes à être maillées automatiquement après l'échantillonnage des arêtes (mesh seed), qui définit la finesse du maillage dans les différentes directions.

3.4.3 Génération du "mesh seed" et du maillage

Pour réaliser automatiquement la segmentation de chaque arête, celles-ci sont classées par type, en fonction du "mesh seed" qui y sera appliqué. Pour ce faire, les coordonnées des points aux extrémités des arêtes sont utilisées, par exemple pour les mèches de chaîne :

- si les deux points ont la même coordonnée Y et la même coordonnée X (Figure3.11), l'arête est située au niveau du bord plat de la mèche, donc suivant z. Elle est alors maillée en considérant le nombre d'éléments dans l'épaisseur ;
- si les deux points ont la même coordonnée Y mais des coordonnées X différentes, il s'agit d'une des paraboles de section et le maillage à ce niveau est progressif et fonction du nombre d'éléments transverses entrés ;
- dans tous les autres cas, il s'agit d'une arête longitudinale qui est donc maillée en fonction de la taille moyenne des éléments longitudinaux entrée. Dans ce cas, bien que ce soit la taille des éléments qui ait été définie, il s'agit en réalité d'un maillage par nombre d'éléments sur les arêtes longitudinales de chaque tronçon. En effet, il est plus facile de définir le maillage dans la longueur de la mèche à partir de la taille des éléments mais cette valeur ne tient pas compte, d'une part de l'ondulation de la mèche et, d'autre part, de la différence entre les longueurs dans les différents tronçons, ce qui peut entrainer des variations notables suivant les tronçons. Le nombre d'éléments par tronçon est calculé par :

$$n = Max\left\{\frac{longueur\ de\ l'arrête\ du\ tronçon}{longueur\ totale\ de\ la\ trajectoire}.Nombre\ d'éléments, 1\right\} \quad \textbf{(91)}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Le maillage de chaque tronçon est alors généré avec des éléments hexaédriques à intégration réduite (C3D8R) avec un algorithme de type MEDIAL AXIS, qui permet de suivre parfaitement le "mesh seed" imposé.

Puisque les nœuds et les éléments seront utilisés par la suite pour définir la mise en données, un quatrième script est exécuté. Il s'agit uniquement de recenser tous les nœuds et éléments de chaque mèche et de les inclure dans un fichier "include". Les fonctions python pour Abaqus® permettent directement d'obtenir ces informations, de même que les coordonnées des nœuds et la table de connectivité de chaque élément.

A ce stade, ces 3 premières étapes et ces 4 scripts permettent de réaliser un maillage hexaédrique cohérent et conforme aux paramètres entrés par l'utilisateur. De plus, les caractéristiques du maillage sont stockées et accessibles. Tous ces éléments sont utilisés dans les parties suivantes pour préparer la mise en données.

3.4.4 Orientation des éléments

Au chapitre 1, l'anisotropie du comportement des mèches a été évoquée. Cette anisotropie étant liée à l'orientation des fibres, ici de la mèche, il est absolument nécessaire d'orienter chaque élément de manière à suivre parfaitement les directions matérielles. En effet, après import et maillage des mèches, tous les éléments ne s'orientent pas de la même manière (Figure3.12).

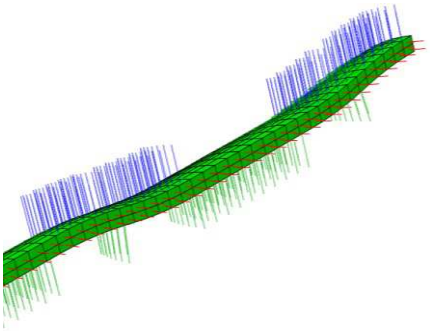


Figure3.12. Orientation initiale des éléments (en bleu la première direction, en vert la seconde direction et en rouge la troisième direction)

Les éléments sont orientés en définissant un repère lié à chacun d'eux. Un nouvel "include" par mèche est donc créé, il contient chaque élément avec la nouvelle orientation, correspondant à l'orientation matérielle.

Pour créer le nouveau repère, il est nécessaire de définir :

- le nœud origine du repère,
- deux nœuds qui, avec l'origine, définiront les deux premières directions. La troisième direction est, bien sûr, automatiquement définie pour compléter le repère direct dans les

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

directions des arêtes de l'élément. L'axe principal de l'élément est la direction longitudinale de la mèche, le second axe est dirigé dans la largeur et le troisième dans l'épaisseur.

Il faut préciser que le repère associé à l'élément de la Figure3.13 est le repère global et le positionnement de l'élément dans ce repère n'est pas connu initialement. Ainsi, la connectivité des éléments est utilisée.

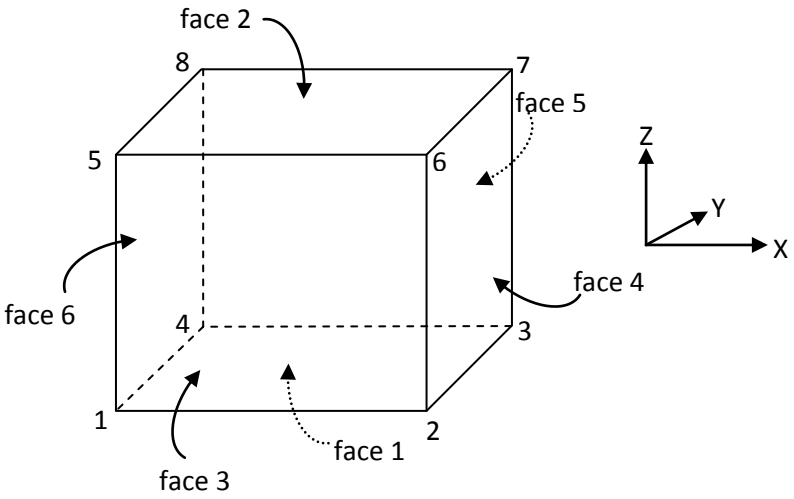


Figure3.13. Définition d'un élément Abaqus®

Les 8 nœuds issus de la connectivité sont triés par comparaison de leurs coordonnées. Par exemple (Figure3.13), pour trouver le nœud origine (nœud 1) pour les mèches de chaine, il faut :

- regrouper les quatre nœuds de coordonnées Y minimales,
- parmi ces quatre nœuds, trouver les deux nœuds qui ont les coordonnées X minimales,
- le nœud considéré comme origine sera celui de ces deux nœuds dont la coordonnée Z sera minimale.

Les deux autres nœuds sont obtenus par le même principe (Nœuds 2 et 4 sur la Figure3.13).

L'application de cette stratégie à tous les éléments permet d'aboutir à une orientation conforme aux directions matérielles comme cela apparait sur la Figure3.14.

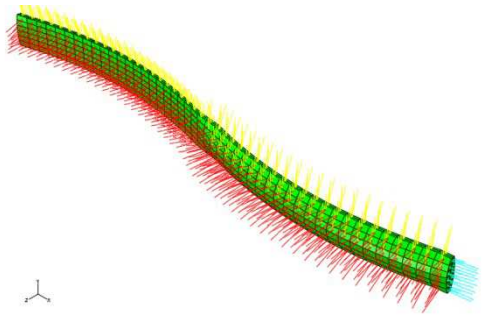


Figure3.14. Réorientation des éléments (en bleu la direction principale, en jaune la seconde direction et en rouge la troisième direction)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Pour finir, un fichier "include" est généré ; il contient chaque élément avec les nœuds qui lui sont associés, ainsi que la définition de la nouvelle orientation appliquée à cet élément et le nom du matériau qui lui est associé. Les paramètres associés à ce nom de matériau sont définies dans un second temps.

3.4.5 Création de groupes de nœuds

L'étape suivante consiste à exécuter un sixième script permettant la mise en place de groupes de nœuds auxquels seront appliquées les conditions aux limites lors des calculs. Les groupes nécessaires sont les suivants (Figure3.15) :

- groupes définissant une face :

  Compte tenu de la géométrie de la mèche (bords plats), celle-ci est constituée de 6 faces. Les nœuds de chacune des faces doivent être classés dans des sets différents nommés side1 à side6. Néanmoins, suite aux partitions dans Abaqus®, la surface du solide est constituée de n surfaces. Le code Python permet de retrouver automatiquement les nœuds appartenant à une surface. Il suffit donc d'associer les surfaces définies dans Abaqus® aux faces du solide. Les coordonnées des points composant la surface sont utilisées pour obtenir ce lien, selon la procédure suivante :

  - ✓ Extrémités des mèches, side1 et 2 : tous les points ont respectivement la même coordonnée longitudinale que le centre de la première et de la dernière section (coordonnée Y pour les mèches de chaine, X pour les mèches de trame) ;
  - ✓ Bords plats, side3 et 4 : ce sont les deux autres surfaces verticales, c'est-à-dire dont les points ont la même coordonnée transverse. La répartition entre side3 et side4 se fait par comparaison avec l'abscisse du plan contenant la trajectoire. Les nœuds recherchés ont alors respectivement la coordonnée transverse minimale et maximale ;
  - ✓ Faces supérieure et inférieure, side5 et 6, regroupent toutes les surfaces restantes. Pour répartir les surfaces entre side5 et side6, la démarche suivante est utilisée : pour chaque surface, une surface de side3 ou de side4 est associée (elles ont une arête commune). L'altitude (direction z) relative du centre de la surface à classer par rapport à celle du centre de la surface de side3 ou 4 permet de définir si elle est dessus ou dessous et ainsi de l'affecter à side5 ou 6.

- groupes définissant un coin :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Il s'agit de regrouper les nœuds des quatre coins de la mèche. Pour ce classement, les redondances de nœuds entre les différentes faces sont utilisées. Par exemple, si un nœud appartient à la fois à side1, 3 et 5, c'est un coin.

- groupes définissant des lignes pour side1 et side2 :
    - Ces groupes sont constitués des lignes de nœuds de side1 et 2 (Figure3.16). Ces nœuds doivent être pris dans le même ordre pour chacune des faces opposées de la mèche de manière à appliquer les bonnes conditions de périodicité. Les nœuds sont d'abord classés en sous-groupe de coordonnée transverse identique croissante (X pour les mèches de chaine, Figure3.16). Il suffit ensuite de classer à l'intérieur de chaque sous groupe les nœuds en fonction de leur coordonnée Z pour définir chaque ligne de nœuds.

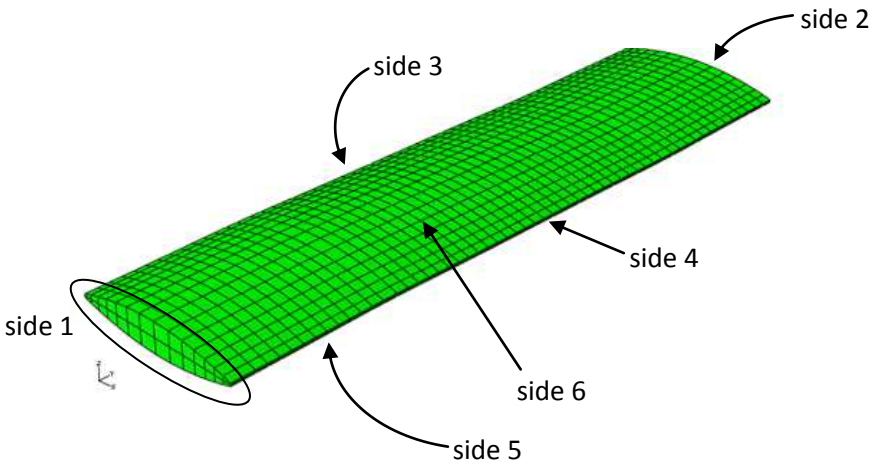


Figure3.15. Définition des groupes de nœuds

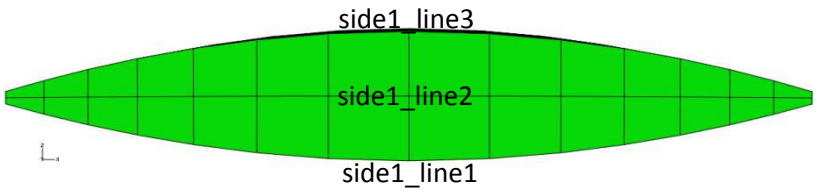


Figure3.16. Définition des groupes de nœuds par ligne

Tous les groupes de nœuds recherchés étant créés, ils sont répertoriés dans un fichier texte (un par mèche), qui sera intégré aux calculs.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

3.4.6 Création des surfaces de contact

L'un des éléments majeurs qui conditionne le comportement d'une maille élémentaire de renfort sec est le contact entre les mèches. C'est d'ailleurs la nécessité d'une bonne description de ces contacts qui a conduit à proposer un modèle géométrique cohérent au chapitre 2. L'accroissement du nombre de mèches dans les calculs à l'échelle mésoscopique (mailles complexes ou prise en compte de plusieurs mailles) s'accompagne bien sur d'une forte augmentation des zones de contact. Accélérer et simplifier la mise en données des calculs passe donc nécessairement par une définition automatique des surfaces en contact.

Parmi les différentes stratégies de définition des surfaces de contact dans Abaqus®, celle qui permet de s'adapter au mieux à tous les types de contact est de créer ces surfaces à partir des faces des éléments correspondants. La démarche est donc la suivante : dans un premier temps, les surfaces de contact sont repérées et créées, puis les éléments associés sont récupérés. Ensuite, la face de l'élément correspondant à la surface souhaitée est recherchée. Il y a enfin création d'un groupe d'éléments avec la face associée à chacun d'eux. Ce groupe est alors inscrit dans un fichier texte qui servira aux calculs. Trois types de surfaces sont à distinguer :

- Les surfaces de contact entre mèches d'un même réseau,
- Les surfaces de contact entre mèches de réseaux différents,
- Les surfaces de contact avec les outils dans le cas d'un calcul en compaction ou avec un autre renfort dans le cas de calculs multi-couches.

3.4.6.1 Surfaces de contact entre mèches d'un même réseau

Dans ce cas, les surfaces appartenant à side3 puis à side4 sont assemblées. Les éléments associés sont alors récupérés directement grâce au code python. Il suffit alors de trouver la face de chaque élément appartenant à cette surface. Dans Abaqus®, tous les éléments sont définis de la même façon (Figure3.13) ; l'enchaînement des nœuds de la table de connectivité est toujours le même et définit toujours les mêmes faces de l'élément :

- face 1 définie par les nœuds 1, 2, 3, 4
- face 2 définie par les nœuds 5, 6, 7, 8
- face 3 définie par les nœuds 1, 2, 5, 6
- face 4 définie par les nœuds 2, 3, 6, 7
- face 5 définie par les nœuds 3, 4, 7, 8
- face 6 définie par les nœuds 1, 4, 5, 8

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

La méthode de création des surfaces est à nouveau basée sur les coordonnées des nœuds de l'élément et sur la table de connectivité de cet élément (Figure3.13). Prenons un exemple simple sur une mèche de chaine : soit l'élément représenté en Figure3.17 avec les numéros des nœuds qui lui sont associés. Pour créer la surface de contact avec la mèche de la zone suivante, il est nécessaire de récupérer la face de l'élément composée des nœuds 315, 526, 816 et 830.

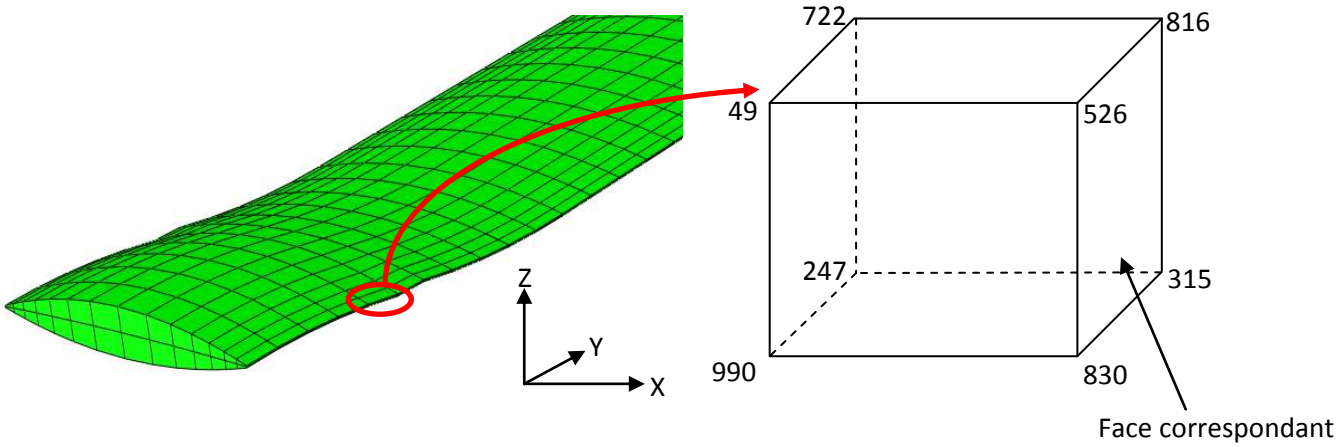


Figure3.17. Création des surfaces sur un élément

La première étape consiste à récupérer la table de connectivité de l'élément, grâce aux fonctions python. Le résultat pour ce cas est le suivant : 990, 830, 315, 247, 49, 526, 816, 722. Il suffit ensuite de récupérer les coordonnées des nœuds et de déterminer les quatre nœuds qui ont la coordonnée X maximale. Les nœuds 315, 526, 816 et 830 sont alors obtenus et correspondent respectivement aux nœuds 3, 6, 7, et 2 de la table de connectivité, c'est-à dire la face 4.

3.4.6.2 Surfaces de contact entre mèches de réseaux différents

Le modèle géométrique définit précisément les zones de contact entre les mèches transverses puisqu'elles se situent entre deux sections de contrôle. A partir des données du modèle géométrique, on détermine :

- L'abscisse X_{Cs} de la trajectoire,
- les abscisses des points extrêmes de la section (Figure3.18) grâce à X_{Cs} et à la largeur de la mèche :

$$X_{Linf} = X_{Cs} - \frac{L}{2}, X_{Lsup} = X_{Cs} + \frac{L}{2}, \text{ avec L la largeur de la mèche.} \quad \textbf{(92)}$$

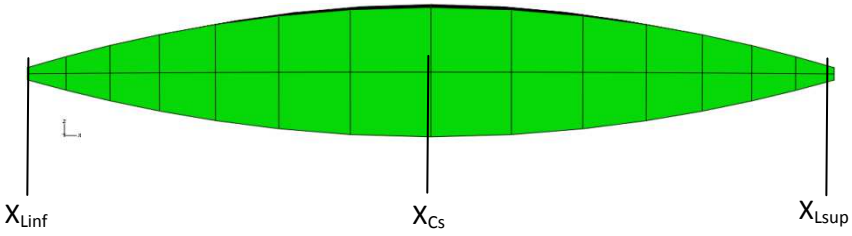


Figure3.18. Extrémités de largeur de mèche

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Toutes les mèches de trame sont alors parcourues jusqu'à ce que les abscisses de deux sections de contrôle soient comprises entre X_{Linf} et X_{Lsup}. Ces sections sont par définition les extrémités de la zone de contact.

Le contact entre deux réseaux se situe initialement à l'intersection entre les deux mèches. Cependant, lors des calculs, un écrasement étant possible, cette zone de contact peut augmenter. Il est donc nécessaire de considérer une zone plus grande. Les sections amont et aval de la zone de contact sont donc considérées comme extrémités de la zone de contact (Figure3.19).

Les deux numéros de sections ainsi que le sens du contact (dessus ou dessous) sont récupérés avant de passer à la mèche de trame suivante. Il est fait de même pour les mèches de chaîne. Ces données sont alors sauvegardées dans un script python (faces.py) et seront alors disponibles pour la suite du programme.

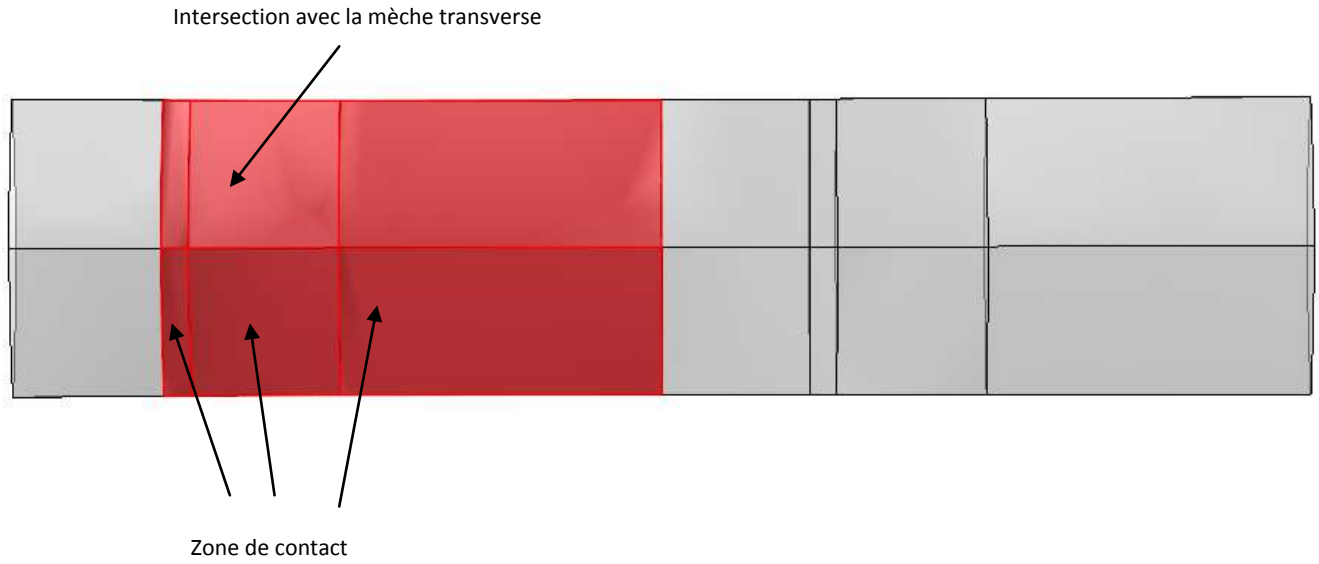


Figure3.19. Définition des zones de contact entre sections

Les surfaces de contact sont créées entre les deux sections répertoriées précédemment et sur la surface supérieure ou inférieure de la mèche en fonction du sens du contact. Les éléments correspondants à chacune de ces surfaces sont récupérés et la bonne face déterminée selon la même procédure que pour les contacts entre mèches d'un même réseau (paragraphe 3.4.6.1).

3.4.6.3 Surfaces de contact entre le renfort et les outils

Ici encore, il faut considérer les surfaces initialement en contact, mais également celles susceptibles de l'être lors du calcul. Ainsi, toute la surface supérieure apparente des mèches supérieures dans le renfort est considérée. Elle est obtenue en enlevant à la face supérieure de chaque mèche la surface de croisement avec une mèche transverse. De même pour les mèches inférieures du renfort, pour lesquelles toute la surface inférieure apparente sera considérée. La méthode de création de ces surfaces est la même que dans le paragraphe précédent : les sections entre lesquelles se situe le

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

contact permettent de déterminer les surfaces à créer, puis les éléments sont déterminés ainsi que les faces correspondant au contact.

Pour chaque mèche, un fichier "include" est créé avec la définition de tous les contacts, c'est-à-dire les surfaces définies par les éléments associés à la face entrant en contact.

3.5 Conclusion

A partir d'un modèle CAO 3D géométriquement cohérent, une stratégie de maillage basée sur les critères de validité des éléments a été définie, elle a conduit à la programmation d'un outil permettant de mailler automatiquement, en hexaèdres, tous types de renforts en seulement quelques minutes et sans l'intervention de l'utilisateur après définition des paramètres de maillage. D'autre part, tous les fichiers contenant les paramètres nécessaires à la mise en place des calculs sont générés. Cette démarche permet de faire appel à ces fichiers texte lors du calcul sans modifier sa structure globale. Il suffit donc de créer pour chaque type de sollicitation (traction, compaction, cisaillement…) un fichier type qui ne sera plus modifié quel que soit le renfort. Il va sans dire que cette méthode permet un gain de temps considérable (du jour à la minute) lors de la mise en place du calcul et, bien sûr, lors du maillage des renforts. Les aspects concernant les calculs en dynamique explicite et la mise en place de ces calculs font parties des prochains chapitres.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

CHAPITRE 4

Loi de comportement

L'objectif est de mettre en œuvre un outil fiable et efficace de simulations par éléments finis 3D de déformations de renforts à l'échelle mésoscopique ; pour ce faire, les mèches sont représentées par des solides homogènes. Outre un modèle géométrique cohérent avec un maillage conforme, définis respectivement aux chapitres 2 et 3, il faut définir la loi de comportement du matériau homogène équivalent à un matériau fibreux. En effet, étudier le comportement de la maille élémentaire revient à analyser le comportement des mèches et les interactions entre celles-ci. Le comportement de la mèche seule, quant à lui, hérite à la fois du comportement des fibres qui la compose et de leurs interactions. Ceci nécessite donc d'étudier le comportement des mèches et des renforts sous diverses sollicitations mécaniques. Ensuite il faut pouvoir représenter les sollicitations et la périodicité de la structure en appliquant les conditions aux limites adéquates sur la maille élémentaire. Enfin, des essais expérimentaux sur renforts et mèches du matériau considéré sont effectués afin de déterminer les bons paramètres matériaux à intégrer à la loi de comportement.

SOMMAIRE

4.1. Modèle de comportement 110
4.1.1. Spécificités du modèle de comportement 110
4.1.2. Spécificités du matériau homogène équivalent 111
4.1.3. Suivi des directions matérielles 112
4.2. Comportement en traction 113
4.2.1. Mèches de G986® et G1151® 113
4.2.2. Essais sur mèches du taffetas Chomarat 115
4.3. Comportement en compaction 119
4.3.1. Protocole des essais de compaction sur mèches et renforts 121
4.3.2. Analyse et résultats 123
4.4. Test de la loi de comportement par des essais élémentaires 125
4.4.1. Essais de traction 125
4.4.2. Essai de compaction 126
4.5. Mise en place de la nouvelle loi de comportement 128
4.5.1. Modèle et hypothèses 128
4.5.2. Conclusion 135
4.5.3. Validation de la loi de comportement 135
4.6. Comportement tribologique 138
4.6.1. Protocole expérimental 138
4.6.2. Etude d'un essai 139
4.6.3. Bilan des valeurs retenues 143
4.7. Conclusion 144

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.1. Modèle de comportement

Le besoin se porte donc sur la définition d'un modèle de comportement mécanique représentatif du matériau homogène équivalent au matériau fibreux constitutif des mèches. Une loi de comportement hypoélastique de ce type a déjà été développée par Pierre Badel ([BAD08a]) et a permis d'obtenir d'excellents résultats, après calculs en dynamique explicite, présentés dans diverses publications ([BAD09, BAD08c, BAD08b, NGU11]). Cependant cette loi, basée sur des formulations exponentielles de la compaction des mèches, nécessite d'être identifiée grâce à des essais sur renforts et peut poser certains problèmes numériques pour des hauts niveaux de compaction. C'est pourquoi, une nouvelle approche est proposée dans ce chapitre. Elle est basée sur une autre forme de loi de comportement en compaction, issue des modèles expérimentaux de la littérature et identifiée grâce à des essais sur mèches, ce qui permet d'envisager la simulation sur renforts non existants, basés sur des mèches connues (par exemple pour faire des études avec différentes architectures).

4.1.1. Spécificités du modèle de comportement

Le modèle de comportement pour la simulation mésoscopique de la mise en forme de renforts secs doit prendre en compte à la fois les non linéarités géométriques engendrées par les grands déplacements et grandes déformations des mèches, mais aussi les non linéarités matérielles liées à la structure des mèches constituées de milliers de fibres. En effet, la particularité des matériaux fibreux réside dans le comportement des mèches, association du comportement des fibres seules et de l'assemblage de ces fibres sous forme de mèche. De plus, les fibres qui constituent ces mèches, compte tenu de leur très grand élancement, présentent une rigidité quasi exclusivement longitudinale et peuvent glisser les unes par rapport aux autres. L'approche proposée ici pour simuler la mise en forme de mailles élémentaires de renforts est une approche hypoélastique non linéaire [BAD08a], qui permet de répondre simplement à ces exigences. Afin de pouvoir être implémentée dans des codes éléments finis classiques comme Abaqus® par exemple, une approche continue du comportement de la mèche est considérée en prenant soin d'intégrer à la loi de comportement du matériau homogène équivalent les spécificités liées à la nature fibreuse du matériau. C'est de la capacité de la loi de comportement du matériau homogène équivalent à modéliser au mieux l'hétérogénéité du paquet de fibres que dépendra, en grande partie, la fiabilité des calculs.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.1.2. Spécificités du matériau homogène équivalent

Le modèle de comportement du matériau homogène équivalent doit traduire les caractéristiques du matériau fibreux :

- le comportement longitudinal de la mèche pilote les principaux aspects de la transformation du renfort. La rigidité de la mèche dans la direction longitudinale est nettement supérieure à toutes les autres rigidités ; cela nécessite de suivre parfaitement cette direction pour ne pas cumuler d'erreurs (actualisation des contraintes par exemple). Cet aspect est traduit par la nécessité de suivre parfaitement les directions matérielles lors des grandes déformations subies par le renfort (cisaillement par exemple). Cela se traduit par la mise en place d'une dérivée objective adaptée aux milieux à une direction de fibres [BAD08a, HAG04] ;
- le comportement transverse intervient dans la plupart des sollicitations (traction biaxiale, cisaillement dans le plan...). Les mèches étant très rigides longitudinalement, les directions transverses sont les directions privilégiées des déformations ; il est donc important de définir un modèle de comportement fiable dans ces directions. Les observations par tomographie montrent une isotropie transverse de la distribution des fibres. Il est donc fait l'hypothèse d'isotropie mécanique transverse [BAD08a]. Le comportement d'une section de mèche est alors considéré comme étant la combinaison d'un changement de surface et d'un changement de forme. Cet aspect se traduit au niveau du tenseur de déformation par la décomposition en une composante sphérique (ε_s) et une composante déviatorique (ε_d) ;
- enfin, la faible rigidité de flexion des mèches est prise en compte en introduisant un module de cisaillement faible par rapport au module longitudinal [GAS00].

Ces caractéristiques permettent de définir un tenseur de comportement isotrope transverse reliant l'incrément de contraintes de Cauchy à l'incrément de déformations dans la base f_i :

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl} d\varepsilon_{kl} \tag{93}$$

$$[C_{f_i}] = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{1212} & 0 & 0 \\ & Symétrie & & & C_{2323} & 0 \\ & & & & & C_{1313} \end{bmatrix} \tag{94}$$

Ce tenseur de comportement peut prendre une forme plus simple, comme celle proposée par P. Badel [BAD08a]:

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$[C_{f_i}] = \begin{bmatrix} E^* & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \left(\frac{A+B}{2}\right) & \left(\frac{A-B}{2}\right) & 0 & 0 & 0 \\ & & \left(\frac{A+B}{2}\right) & 0 & 0 & 0 \\ & & & G & 0 & 0 \\ & Symétrie & & & B & 0 \\ & & & & & G \end{bmatrix} \quad \textbf{(95)}$$

- E^* est le module d'Young apparent, tel que $E^* = E\frac{S_0}{S}$, S_0 étant la section initiale, S la section actuelle et E le module d'Young de la mèche ;
- G est le module de cisaillement ;
- $A = A_0 e^{-p\varepsilon_s} e^{n\varepsilon_{11}}$ et $B = B_0 e^{-p\varepsilon_s}$. A_0 et B_0 sont des coefficients élastiques représentant respectivement les rigidités relatives à la variation de surface et à la variation de forme des sections, le facteur p représente l'augmentation de ces deux rigidités. Ces trois paramètres sont calculés à partir d'essais de compaction sur renfort.

4.1.3. Suivi des directions matérielles

L'un des problèmes majeurs posé par un matériau fibreux concerne le suivi de la direction forte d'anisotropie, qui correspond ici à la direction longitudinale des mèches. Si cette direction n'est pas parfaitement suivie, des erreurs se produisent et peuvent se cumuler, conduisant à des résultats erronés [BAD08b]. Cet aspect est géré par la définition d'une dérivée objective basée sur la rotation de la direction des fibres. En général, pour les matériaux continus classiques, la dérivée de Green Naghdi (ou de Jaumann) est utilisée. Ces dérivées utilisent la rotation moyenne du solide et ne permettent donc pas de suivre précisément les directions matérielles [HAG04]. Une autre solution doit donc être envisagée. Généralement, pour les matériaux très fortement orientés, comme ceux de cette étude, il est conseillé d'utiliser la rotation de la direction forte d'anisotropie. Les étapes de réactualisation des directions matérielles sont alors les suivantes [BAD08a] :

- En premier lieu, la direction des fibres $\underline{f_1}$ est calculée à partir de la direction initiale et du gradient de transformation :

$$\underline{f_1} = \frac{\underline{\underline{F}}.\underline{f_1^0}}{\left\|\underline{\underline{F}}.\underline{f_1^0}\right\|} \qquad \text{Avec : } \begin{cases} \underline{\underline{F}} \text{ le tenseur gradient de la transformation} \\ \underline{f_1^0} \text{ la direction initiale} \end{cases} \quad \textbf{(96)}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

- $\underline{f_2}$ est ensuite actualisé de la même manière que $\underline{f_1}$ puis projeté dans le plan normal à $\underline{f_1}$ pour construire la base orthonormée actuelle dont la direction 1 est celle des fibres, c'est-à-dire :

$$\underline{f_2} = \frac{\underline{\underline{F}}.\underline{f_2^0} - \left(\left(\underline{\underline{F}}.\underline{f_2^0}\right).\underline{f_1}\right)\underline{f_1}}{\left\|\underline{\underline{F}}.\underline{f_2^0} - \left(\left(\underline{\underline{F}}.\underline{f_2^0}\right).\underline{f_1}\right)\underline{f_1}\right\|} \quad \textbf{(97)}$$

- Enfin, la dernière direction est déterminée par le produit vectoriel suivant :

$$\underline{f_3} = \underline{f_1} \times \underline{f_2} \quad \textbf{(98)}$$

Cette approche, codée dans une VUMAT spécifique, ayant prouvé son efficacité [BAD08a] est utilisée pour les simulations conduites dans ce travail.

Le problème du suivi des directions matérielles étant réglé, les paragraphes suivants sont destinés à identifier la loi de comportement pour chacune des mèches étudiées. Cette identification du comportement est réalisée à partir de données bibliographiques et de résultats existants pour les renforts G986® et G1151® (Hexcel) et à partir d'essais expérimentaux sur les mèches qui sont détaillés dans la suite de ce chapitre pour le taffetas Chomarat. Le comportement en traction est identifié à partir d'essais de traction sur les mèches, de même la mise en place d'essais de compression sur mèches permet d'obtenir le comportement en compaction. Enfin, différents essais de frottement (mèche/mèche, renfort/renfort et renfort/métal) permettent d'obtenir les différents coefficients de frottement nécessaires à la mise en place des conditions de contact.

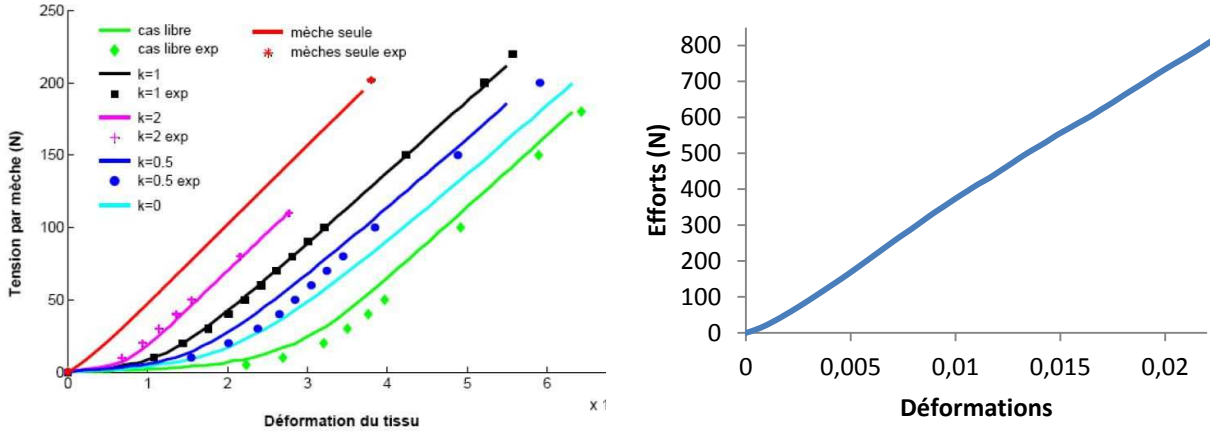
4.2. Comportement en traction

4.2.1. Mèches de G986® et G1151®

De manière générale, le comportement en tension de la mèche peut être marqué par une non-linéarité en début d'essais (Figure4.1). Cette non-linéarité est due au fait que les mèches sont composées de l'agencement de plusieurs milliers de fibres dont l'ondulation, le parcours moyen ou l'enchevêtrement diffèrent au sein d'une même mèche. Le résultat est que toutes les fibres ne se tendent pas simultanément en début d'essai. Cependant, pour les tissus techniques utilisés classiquement et concernés par ces travaux, les utilisateurs recherchent une rigidité des mèches la plus élevée possible à fraction volumique de fibres constante. Les fabricants recherchent donc et réussissent à obtenir des mèches constituées de fibres quasi parallèles. Ainsi le comportement en

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

traction de ces mèches est quasi linéaire [BOI01], ce qui peut être notamment constaté pour les mèches de G986® (Figure4.1(a)) et de G1151® (Figure4.1(b)).



(a) Résultats d'essais de traction sur G986® [BAD08a] **(b) Résultats d'essais de traction sur G1151® [HIV11b]**

Figure4.1. Résultats d'essais de traction

Les résultats présentés en Figure4.1 montrent que la rigidité des mèches est élevée et les déformations admissibles avant la rupture des fibres sont petites et inférieures au pourcent (HPP). La contrainte étant une notion mal définie pour les mèches, les résultats de traction sur mèche seule sont exprimés par la tension (F) comme une fonction linéaire de la déformation longitudinale $\left(\frac{dl}{l_0}\right)$, telle que :

$$F = K\left(\frac{dl}{l_0}\right) \quad \textbf{(99)}$$

Avec l_0 la longueur initiale de la mèche et K la rigidité de la mèche, supposée constante durant l'essai et correspondant à la pente de la courbe de traction sur mèche. Pour les deux renforts, ces rigidités sont donc de 46 500N pour le G986® et 37 400N pour le G1151®.

Si les données existent déjà dans la littérature pour le G986® et le G1151® [BAD08a,HIV11b], le taffetas Chomarat doit faire l'objet d'une campagne d'essais pour pouvoir déterminer le comportement du renfort mais aussi des mèches de chaque réseau. Le renfort et les mèches de chaîne sont donc testés en traction. Le comportement des mèches de trame est déduit de ces essais grâce à une loi de Weibull. Le protocole utilisé et les résultats de ces essais sont présentés ci-après.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.2.2. Essais sur mèches du taffetas Chomarat

Le protocole d'essais décrit ci-après a été développé par Jean-Emile Rocher (thèse de Jean Emile ROCHER en cours au laboratoire PRISME dans le cadre du projet européen 3DLightTrans) et permet d'obtenir des résultats fiables pour des essais de traction sur renfort ou sur mèches seules. Ce protocole a été développé pour pouvoir réaliser des tests de traction sur mèches grâce à une machine de traction classique équipée de mâchoires pour la fixation des éprouvettes et d'une cellule d'efforts.

Les éprouvettes, composées d'une seule mèche, sont fixées entre des plaques d'aluminium grâce à de la colle de type araldite. Une pression est appliquée sur ces plaques pendant 24h, correspondant au temps de séchage de la colle. La mèche est ensuite marquée pour permettre l'acquisition optique par suivi de marqueurs. Les plaques (talons des éprouvettes) sont alors directement fixées dans les mors d'une machine de traction (Figure4.2), en prenant soin de conserver la verticalité de la mèche. Pour ces essais, une précharge doit être imposée à la mèche, de manière à caler le début de tous les essais. Il s'agit d'un protocole type pour les essais de traction sur mèche. La précharge définie dans ce protocole est de 0.5cN/tex. Les essais de traction dans le sens de la mèche sont effectués avec une vitesse de 2mm/min, de manière à réaliser un essai quasi-statique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Figure4.2. Dispositif de traction sur mèches

Le graphe représenté en Figure4.3 montre les résultats du comportement en traction pour 4 mèches de chaine extraites du taffetas Chomarat. Ces essais permettent d'obtenir la rigidité de ces mèches en calculant la pente de la partie linéaire de la courbe, correspondant à la partie élastique concernée par cette étude. La rigidité des mèches de chaine obtenue est de 29 600N. Les résultats de ces essais correspondent bien aux valeurs traditionnellement admises pour les mèches de verre de type E (élongation maximale moyenne de 1.39% pour une contrainte maximale moyenne de 845.51MPa).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

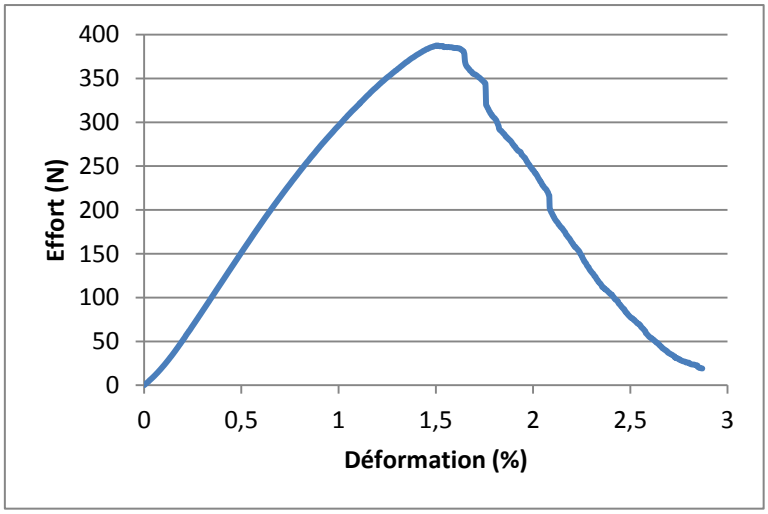


Figure4.3. Comportement en traction des mèches de chaine pour le taffetas Chomarat

Outre le protocole, J.E. Rocher a aussi pu montrer qu'il est possible d'identifier de façon précise le comportement en traction des mèches de verre à partir d'une loi de Weibull, des paramètres constitutifs de la mèche et des fibres. Les mèches de trame étant à la fois très petites, très délicates à manipuler mais aussi très difficile à détisser, c'est cette deuxième stratégie qui a été employée.

Pour cela, une contrainte peut être définie pour les mèches, correspondant à l'effort de traction ramené à la somme des sections des fibres. Elle sera notée σ_f avec :

$$\sigma_f = \frac{F}{n_f S_f} \quad \textbf{(100)}$$

n_f, S_f sont respectivement le nombre et la section des fibres.

Avec, pour la mèche de chaîne :

- $S_f = \frac{\pi d_f^2}{4}$ et $d_f = 16\mu m$ pour le taffetas Chomarat, d'après les données fabricants ;
- m la masse linéique des mèches : λ=1200 tex ;
- μ la densité du verre E utilisé : μ=2540 kg/m^3.

Soit $n_f = \frac{m}{10^6 \mu S_f} = 2300$ fibres par mèche de chaine.

Le comportement en traction des mèches peut alors être exprimé par une loi de Weibull, telle que :

$$\sigma_f = \frac{E}{100} \varepsilon_{11} e^{-L\left(\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_0}\right)^m} \quad \textbf{(101)}$$

Avec σ_f la contrainte longitudinale, ε_{11} la déformation longitudinale de la mèche, E le module d'Young des fibres (ici 73 000 MPa), L la longueur utile de l'échantillon et ε_0 et m les paramètres d'échelle et de forme de la distribution de Weibull [CHI84] obtenus à partir des essais de traction sur

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

mèche. A partir de la courbe (Figure4.3) les paramètres de Weibull identifiés sur la mèche de chaîne sont ainsi : $\varepsilon_0 = 1.42$ et $m = 8$.

Conformément à la stratégie annoncée, l'utilisation de ces paramètres et des équations (100) et (101) permet d'obtenir le comportement en traction de la mèche de trame. Les résultats sont présentés en Figure4.4.

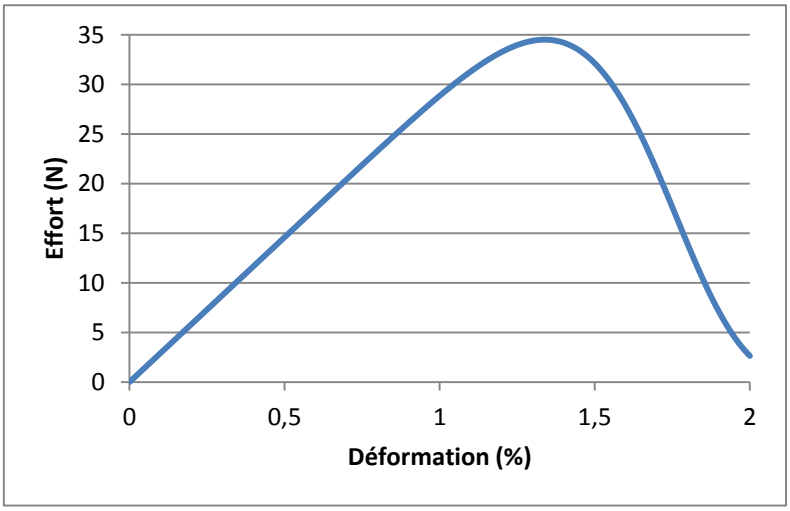


Figure4.4. Comportement en traction des mèches de trame pour le taffetas Chomarat

De même que pour les mèches de chaine, cette étude se limite à la partie élastique de la courbe, permettant de déterminer la rigidité des mèches de trame qui vaut alors 2900N.

Ces essais sur les mèches de verre du taffetas Chomarat confirment bien le fait que le comportement en traction des mèches des renforts considérés, et plus généralement pour la majorité des renforts techniques dont les mèches sont issues de roving, est linéaire.

Le module d'Young obtenu vaut alors 68 900MPa (contre 73 000MPa environ dans la littérature pour le module d'Young du verre E, soit un écart d'environ 5%). Ceci permet de confirmer que la rigidité des mèches est équivalente à la somme des rigidités des fibres qui la constituent et donc que les fibres sont quasi parallèles.

La fraction volumique de fibres peut aussi être déduite. Elle est définie telle que :

$$V_f = \frac{\lambda}{\mu S_m} \qquad \textbf{(102)}$$

S_m est la surface de la section transverse de la mèche (définie par l'enveloppe du paquet de fibres). Ici, S=1.16mm^2.

Dans le cas des mèches de chaine du taffetas Chomarat, $V_f = 40.7\%$, ce qui correspond aux gammes de valeurs de fraction volumique de fibres définies dans la littérature [PEA95, CHE06]. La fraction volumique des différents renforts est résumée dans le Tableau4.1.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Taffetas Chomarat	G986®	G1151®
$V_f = 44\%$	$V_f = 49\%$	$V_f = 51\%$

Tableau4.1. Fraction volumiques de fibres des trois renforts étudiés

4.3. Comportement en compaction

La compaction des mèches est un des modes de déformation privilégiés, puisqu'elle intervient dans la plupart des sollicitations du renfort tissé (traction biaxiale, cisaillement, compaction,…). La caractérisation du comportement en compaction des mèches est en outre très importante car elle a une influence directe sur la fraction volumique de fibres et donc, par exemple, sur la perméabilité locale de la mèche, primordiale pour la réalisation d'injections sans défauts [BIC97]. Toutefois, il s'agit d'un comportement difficile à caractériser expérimentalement, les essais sur mèches n'étant pas simples à réaliser. C'est pourquoi ce comportement est généralement identifié par méthode inverse à partir d'essais macroscopiques [BAD08b, GAS00, HAG04, POT08]. Le comportement des mèches en compaction est caractérisé par un changement d'aire dans le plan transverse, c'est-à-dire dans le plan perpendiculaire aux fibres, lié à une réorganisation des fibres et donc à une réduction des espaces entre fibres. Par conséquent, il s'agit d'un comportement non linéaire lié à la discontinuité du matériau. Plusieurs étapes se produisent lors d'un essai de compaction (Figure4.6) et sont visibles sur les courbes pression/épaisseur qui présentent deux parties linéaires entre lesquelles s'insère une partie non-linéaire (Figure4.5) [POT08, CHE99, ROB98] :

- en début d'essai, les fibres se réorganisent et les espaces entre fibres diminuent. Il apparait alors une faible résistance des mèches à la variation d'épaisseur. Cette étape est dominée par la capacité de flexion des fibres ;
- une fois les espaces comblés, l'effort de compression augmente, entrainant une augmentation des contacts entre fibres et donc une augmentation du frottement fibre/fibre résistant à l'effort de compression. Le comportement est alors non linéaire, correspondant à une augmentation rapide de la résistance de compaction des mèches ;
- enfin, l'association des deux phénomènes précédents (diminution des vides entre fibres et fin du glissement des fibres) a pour conséquence que l'effort de compaction est supporté essentiellement par les fibres. La courbe de compaction est alors linéaire et directement liée au module transverse des fibres.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

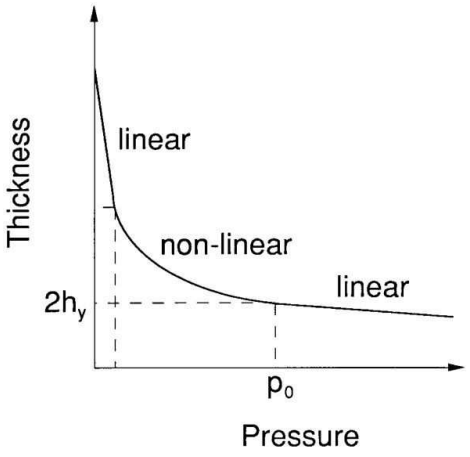


Figure4.5. Courbe type d'un essai de compaction sur renfort tissé [POT08]

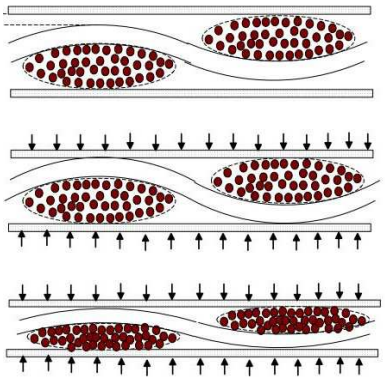


Figure4.6. Etapes de la compaction des renforts tissés [POT08]

La grande variabilité d'épaisseur de l'éprouvette, notamment à l'état initial, montre qu'il est souvent préférable d'étudier le comportement en compaction en fonction de la fraction volumique de fibres. De plus, la description précédente de la physique liée à la compaction des mèches montre bien que la compaction est gouvernée par la densité de fibres et donc par sa fraction volumique. En effet, quelle que soit la mèche considérée, toute réduction des vides entre fibres, c'est-à-dire toute augmentation de la fraction volumique de fibres entraine une augmentation de la rigidité de compaction.

Ainsi, la rigidité de compaction pour les mèches constituées de fibres alignées est classiquement exprimée en fonction de la fraction volumique de fibres [ROB98, SAU99, KRU08, TOL98, LAT11].

Il est alors possible d'exprimer la pression de compaction uniaxiale P comme une fonction de la fraction volumique de fibres, tel que :

$$P = K_c(V_f^\gamma - V_{f0}^\gamma) \text{ [TOL98, LAT11]} \quad \textbf{(103)}$$

Avec V_{f0} la fraction volumique de fibres initiale de la mèche et K_c et γ des coefficients à identifier à partir de courbes expérimentales de compaction sur mèche. Pour les applications utilisant les

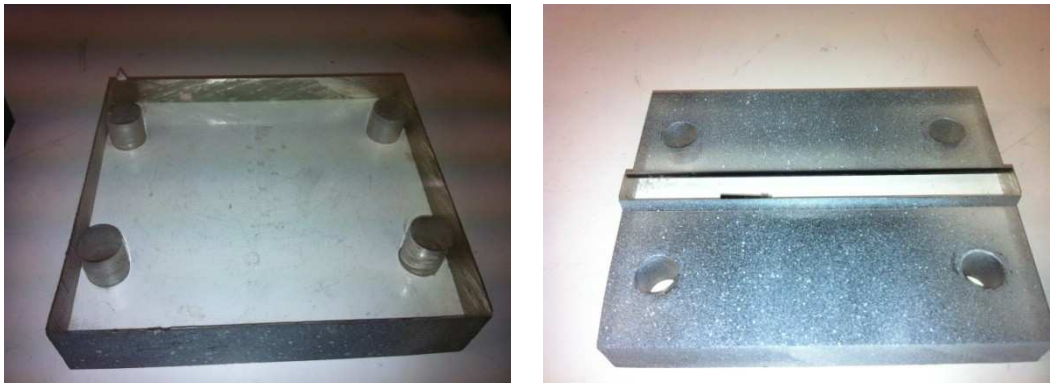
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

renforts tissés, la fraction volumique de fibres maximale dans les mèches après compaction est généralement comprise entre 0.5 et 0.7 [CHE06].

L'objectif ici est donc d'identifier les paramètres de la loi de comportement énoncée précédemment en fonction de la fraction volumique de fibres. Des données existent dans la littérature pour le G986® et le G1151® ; pour le taffetas Chomarat, des essais de compaction sur mèches sont effectués au laboratoire PRISME. Le protocole et les résultats obtenus sont décrits ci-après.

4.3.1. Protocole des essais de compaction sur mèches et renforts

Les essais de compaction sont réalisés sur les mèches de chaine et le renfort de taffetas Chomarat. En effet, ces essais demeurent très difficiles à réaliser et la géométrie et la structure des mèches de trame du taffetas Chomarat ne permettent pas d'envisager des essais de compression sur celles-ci avec le matériel existant. Le protocole a été développé au sein du laboratoire PRISME et utilise une machine de traction (Figure4.8) sur laquelle des plateaux circulaires sont adaptés sur les mors supérieur et inférieur pour réaliser les essais de compression. Le plateau supérieur est constitué de PMMA, de formes différentes suivant qu'il s'agit d'un essai sur mèche ou sur renfort (Figure4.7), permettant de visualiser l'échantillon en vue de dessus à travers le PMMA à l'aide d'une caméra CCD (1024X1376 avec objectif 25mm). Cela permet la mesure de l'étalement sous compaction par analyse d'image.



(a) Plateau supérieur pour renforts **(b) Plateau supérieur pour mèches**

Figure4.7. Forme des plateaux supérieurs pour les essais de compaction sur mèches et renforts

Le plateau inférieur est posé sur un plateau rotulé permettant d'assurer le parallélisme des deux plateaux. Sur ce plateau, une cale en acier, pour les essais sur renforts, ou en céramique, (10mmX10mm) pour les essais sur mèches, est utilisée pour assurer une bonne planéité de la surface en contact. Une seconde caméra placée au niveau de la section transverse permet la mesure de l'écrasement de la mèche (caméra 1024X1280). Un premier écrasement à vide (plateau sur plateau)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

est tout d'abord effectué avec une charge de 1kN pour obtenir le parallélisme des deux plateaux. Une décharge est alors effectuée puis une recharge à 10N de manière à obtenir le zéro de déplacement de la traverse. L'échantillon est ensuite placé et les essais s'effectuent avec une vitesse de déplacement traverse imposée à 0,1mm/min jusqu'à un effort maximal de 500N.

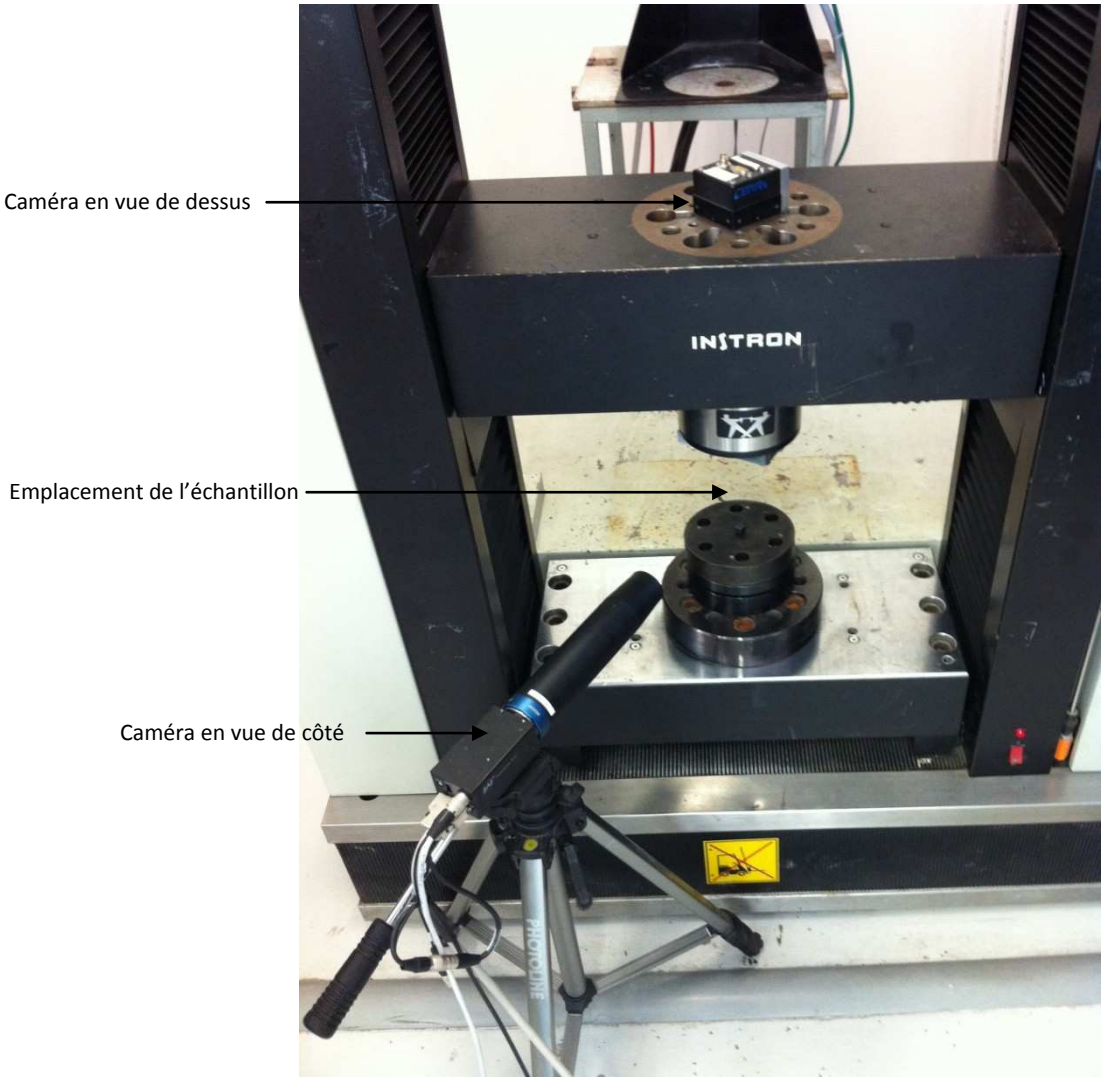


Figure4.8. Montage pour les essais de compaction

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.3.2. Analyse et résultats

Les images obtenues par l'acquisition vidéo (Figure4.9) sont alors analysées, permettant d'accéder à la déformation dans le sens de la compaction (par exemple celle de Hencki H_{33}) et à l'étalement de la mèche (H_{22}).

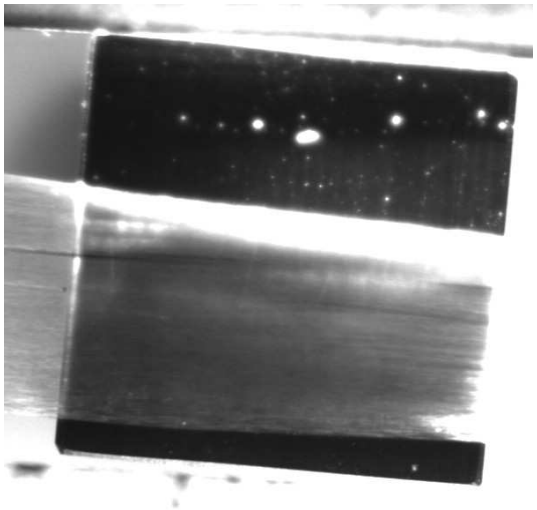
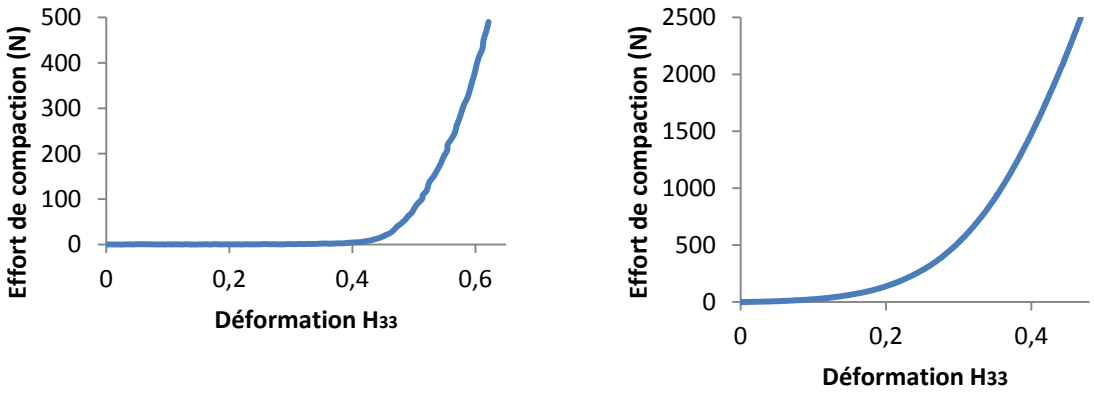


Figure4.9. Mèche sous compaction. Vue de dessus

Cette méthode permet en outre d'obtenir les courbes effort-écrasement de la mèche et du renfort (Figure4.10).



(a) Essai de compaction sur une mèche de chaine du taffetas Chomarat

(b) Essai de compaction sur renfort de taffetas Chomarat

Figure4.10. Courbes effort-déformation pour des essais de compaction sur mèche et renfort de taffetas Chomarat

Ces résultats peuvent également être exprimés sous la forme Pression/fraction volumique.

Les essais de compaction sur mèche et renfort confirment les résultats issus de la littérature, c'est-à-dire que les courbes présentent deux parties linéaires entre lesquelles s'insère une partie non-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

linéaire. De plus, la forme de la courbe obtenue est compatible avec celle donnée par l'équation (103) [LAT11, TOL98].

[NAU11] a montré que la section des mèches en sortie de bobine est rectangulaire. En faisant l'hypothèse d'une répartition uniforme de pression, la contrainte σ_{33} peut être considérée uniforme et les coefficients K_c et γ sont identifiés pour le taffetas Chomarat à partir de la courbe expérimentale $\sigma_{33} = f(V_f)$ en Figure4.11. Les valeurs déterminées sont :

$$\gamma = 14$$

$$K_c = 850$$

Ces valeurs sont cohérentes avec les grandeurs données par la littérature pour des mèches de fibres de verre [TOL98]. Les valeurs des ces paramètres pour les renforts de G986® et G1151® sont celles données par [TOL98] pour les mèches de fibres de carbone.

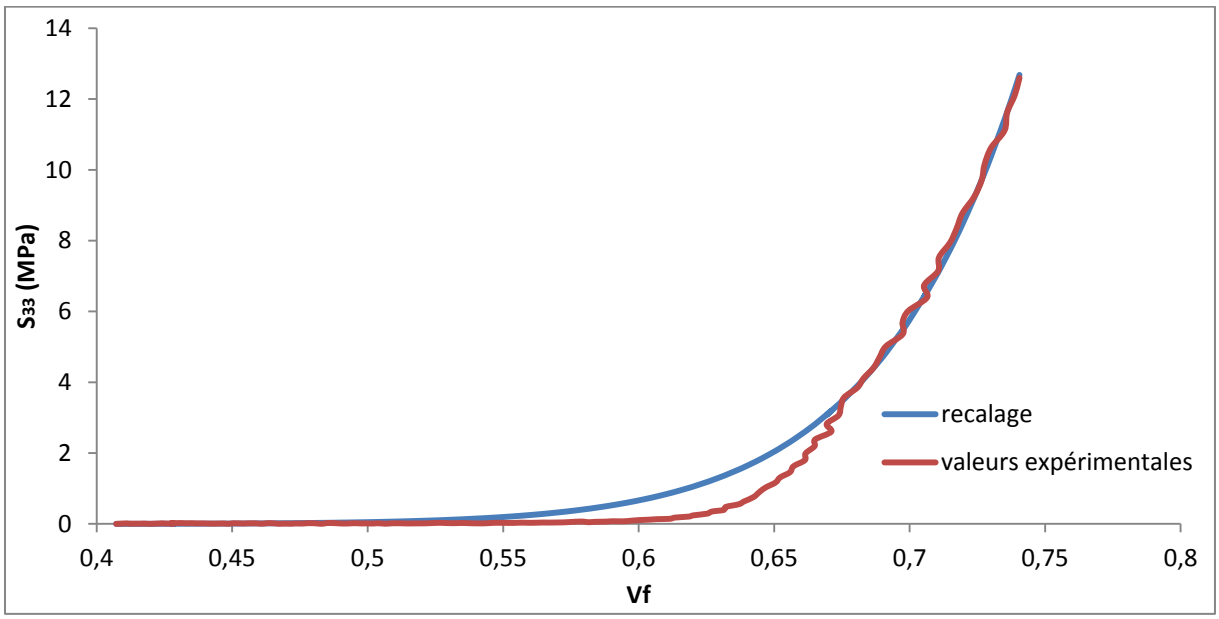


Figure4.11. Courbe de recalage des paramètres K_c et γ

A ce jour, peu d'essais ont été effectués et les résultats ne sont pas toujours exploitables. Cependant, ils permettent de mettre au point la démarche envisagée et d'effectuer les premières simulations. Par la suite, il faudra affiner les résultats en affinant les protocoles et post-traitements d'essais et en multipliant le nombre d'essais.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.4. Test de la loi de comportement par des essais élémentaires

Afin de valider l'implémentation mais aussi de vérifier que le modèle permet bien de rendre compte du comportement souhaité pour la structure fibreuse, des essais élémentaires sont réalisés. Un seul élément hexaédrique de 2mm de côté est alors défini tel que présenté en Figure4.12. Les fibres sont orientées suivant la direction X et le matériau utilisé est celui du taffetas de verre, dont les paramètres sont résumés en Tableau4.2. Les calculs se font en déplacements imposés.

$E^*\ (MPa)$	A_0	B_0	n	p
74 000	0.256	0.256	16	2.6

Tableau4.2. Paramètres du taffetas Chomarat

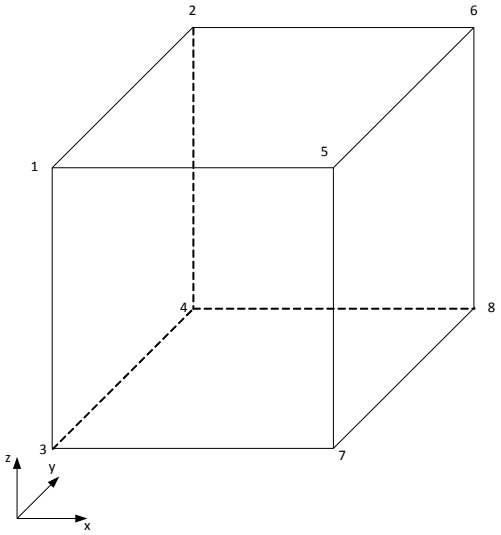


Figure4.12. Essai élémentaire

4.4.1. Essai de traction

Le premier test numérique consiste en 1 élément en traction dans la direction des fibres. Pour ce cas, les déplacements sont imposés dans la direction X aux nœuds de la face droite (5, 6, 7 et 8). Les nœuds 4 et 1 sont fixes dans la direction Z et Y respectivement et les nœuds 1, 2, 3 et 4 sont bloqués en X. Le nœud 3 est encastré pour supprimer les mouvements de corps rigide. Les essais (Figure4.13) sont effectués à une vitesse de 15mm/s avec un déplacement total souhaité de 0.2mm (soit une déformation finale d'environ 1%, correspondant à la déformation maximale pour le verre). Le résultat du calcul est obtenu en quelques secondes (24s) et la courbe $\sigma_{11} = f(\varepsilon_{11})$ est tracée (Figure4.14). La courbe montre bien un comportement linéaire et les valeurs correspondent aux

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

essais effectués sur la mèche de verre. Cet essai permet de valider la mise en œuvre de la loi de comportement dans le sens des fibres.

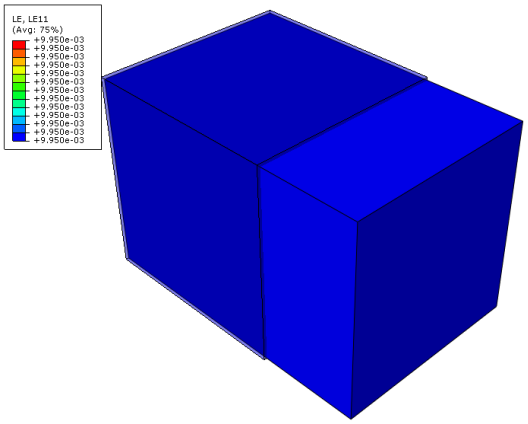


Figure4.13. Essai de traction élémentaire à 1% de déformation longitudinale (facteur d'échelle des déformations de 50)

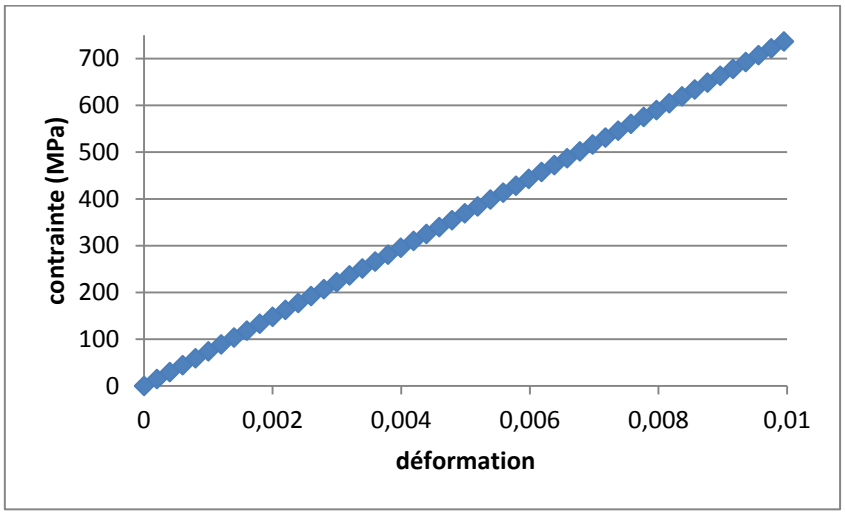


Figure4.14. Courbe contrainte déformation pour l'essai de traction élémentaire à 1% de déformation longitudinale

4.4.2. Essai de compaction

Pour ce cas, les déplacements sont imposés dans la direction –Z aux nœuds de la face supérieure (1, 2, 5 et 6). Les nœuds 4 et 7 sont fixes dans la direction X et Y respectivement et les nœuds 3, 4, 7 et 8 sont bloqués en Z. Le nœud 3 est encastré pour supprimer les mouvements de corps rigide. Les essais sont effectués à une vitesse de 15mm/s avec un déplacement total souhaité de 1.5mm (soit une déformation finale d'environ 55% (Figure4.10)).

Remarque : Les tests effectués avec la forme exponentielle de la loi de compaction montrent une instabilité numérique. En effet, avec les paramètres identifiés par P. Badel sur une mèche de verre semblable à celle utilisée ici, le calcul a dû être arrêté pour cause de divergence au bout de plus d'une journée. La déformation atteinte dans la direction 3 dépasse à peine 40%. Ce taux de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

compaction est inférieur à celui obtenu lors des essais expérimentaux sur mèches et donc à celui attendu localement sur les éléments lors du calcul. En outre, les contraintes dans la direction 3 augmentent fortement (Figure4.15 et Figure4.16) jusqu'à plus de 10^{12}MPa, ce qui ne parait pas réaliste. Cette divergence numérique semble être liée à la forme de la loi de comportement transverse et confirme qu'une forme différente de loi de comportement permettrait de se conformer aux modèles de compaction de la littérature mais aussi de stabiliser les calculs.

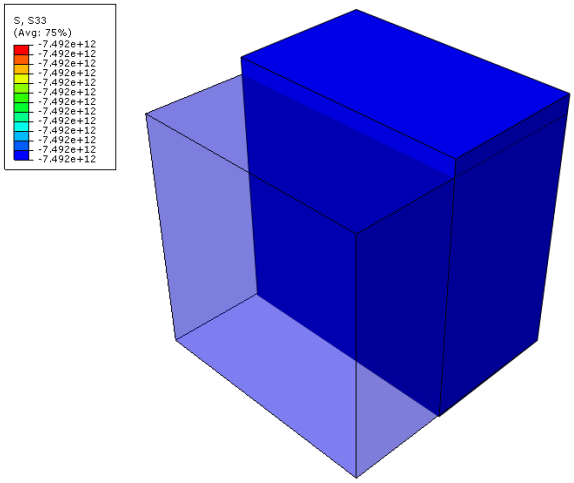


Figure4.15. Essai de compaction élémentaire dans la direction 3

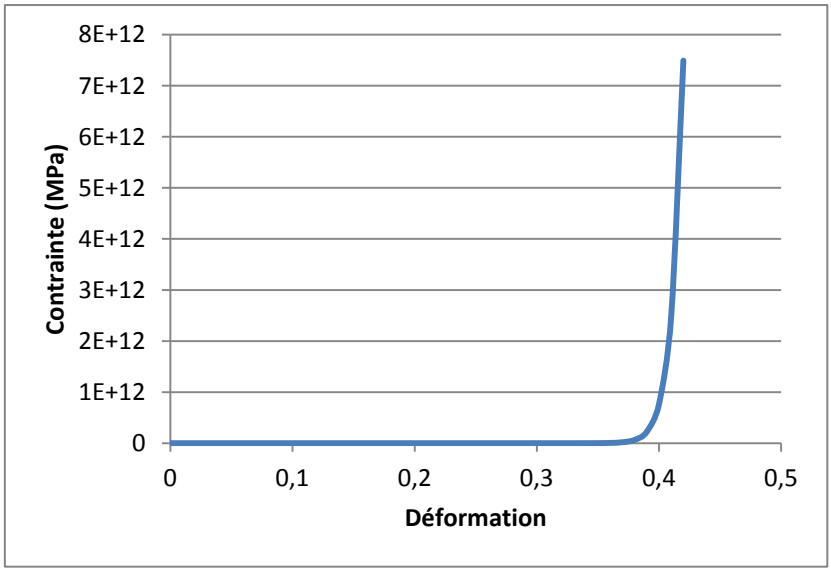


Figure4.16. Contrainte-deformation direction 3

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.5. Mise en place de la nouvelle loi de comportement

4.5.1. Modèle et hypothèses

4.5.1.1. Modèle de comportement longitudinal

Comme expliqué précédemment, les mèches des renforts étudiés ici sont constituées de fibres quasi parallèles et la rigidité globale de la mèche est très proche de la somme des rigidités des fibres.

La rigidité en traction des mèches est ainsi uniquement fonction du nombre de fibres et peut donc être considérée comme indépendante de la surface de ces mèches et des déformations transverses. Il est par conséquent possible de considérer que l'incrément de déformation longitudinale $d\varepsilon_{11}$ est indépendant des autres déformations (déformations transverses et cisaillement). De même, si le réseau de fibres peut-être assimilé à un réseau de fibres parallèles, les déformations longitudinales n'entrainent pas non plus de déformations transverses. Cette dernière hypothèse a pu être vérifiée par des mesures de ces déformations transverses (mesures optiques) lors des essais de traction sur mèche seule pour le taffetas Chomarat. Si un léger rétrécissement de la largeur initiale de section est constaté en début d'essai, ce rétrécissement est plutôt lié au foisonnement des fibres extérieures lorsque la mèche n'est pas sollicitée, qu'à une réelle modification de section en cours d'essai. Les mesures de déformations transverses apparaissent en effet très faibles et peuvent donc être négligées.

Deux conclusions peuvent être tirées de cette analyse :

- Au niveau du tenseur de comportement isotrope transverse défini au paragraphe 4.1, les coefficients de poisson ν_{12} et ν_{13} sont nuls, ce qui se traduit au niveau du tenseur de comportement par : $C_{1122} = C_{1133} = 0$;
- La forme de la loi reliant l'incrément de contrainte normale à la déformation longitudinale peut donc s'écrire :

$$d\sigma_{11} = f(d\varepsilon_{11}) \quad \textbf{(104)}$$

Avec $d\sigma_{11}$ l'incrément de contrainte normale et $d\varepsilon_{11}$l'incrément de déformation longitudinale.

Les courbes expérimentales expriment l'effort sur la mèche en fonction de la déformation longitudinale au sens des petites déformations. Il faut donc relier les efforts aux incréments de contraintes ($d\sigma_{11}$) et les déformations aux incréments de déformations ($d\varepsilon_{11}$). Etant données les déformations mises en jeu, les tenseurs de grandes déformations de Hencky et de petites

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

déformations sont équivalents. La mesure de déformations utilisée pour les essais peut donc être exploitée pour identifier la loi de comportement.

Lors de l'essai de traction, les contraintes peuvent être considérées homogènes dans le matériau équivalent ; il est alors possible d'écrire que $\sigma_{11} = \frac{F}{S_m}$, avec S_m la surface de la section transverse de la mèche. A partir de la relation $F = K\frac{dl}{l_0}$, il vient :

$$\sigma_{11} = \frac{K}{S_m}.\frac{dl}{l_0} \quad \textbf{(105)}$$

Toutes ces observations conduisent à proposer un modèle de comportement longitudinal en accord avec les travaux de thèse de P. Badel, de la forme suivante :

$$d\sigma_{11} = \frac{K}{S_m}.d\varepsilon_{11} \quad \textbf{(106)}$$

La rigidité K à intégrer aux calculs est alors obtenue directement des courbes expérimentales à partir d'essais de traction sur les mèches du renfort et la surface S_m est réactualisée à chaque incrément de calcul.

Finalement, trois paramètres du tenseur de comportement recherchés sont identifiés :

$$C_{1111} = \frac{K}{S_m}, C_{1122} = O, C_{1133} = 0 \quad \textbf{(107)}$$

Les rigidités K étant données dans le tableau suivant :

Taffetas Chomarat	G986	G1151
Chaines : K=29 600N Trames : K=2 900N	K=51700N	K=37400N

Tableau4.3. Rigidités pour les trois renforts

La partie suivante s'intéresse au comportement transverse de la mèche et plus particulièrement à la compaction du réseau de fibres.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.5.1.2. Modèle de comportement transverse

4.5.1.2.1. Composantes de compaction

Suite à l'analyse du comportement en traction, la forme de la matrice de comportement du matériau isotrope transverse équivalent est la suivante :

$$[C_{f_i}] = \begin{bmatrix} C_{1111} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{1212} & 0 & 0 \\ & Symétrie & & & C_{2323} & 0 \\ & & & & & C_{1313} \end{bmatrix} \quad \textbf{(108)}$$

C_{1111} a déjà été défini dans le paragraphe précédent à partir d'essais de traction, les six autres composantes sont donc à déterminer.

L'exploitation et l'analyse des résultats d'essais de compression permettent de définir C_{2222}, C_{3333}, C_{2233}, C_{2323}. Pour analyser cet essai de compaction, étant données la géométrie de la mèche et l'absence de coefficient de Poisson transverse/longitudinal, le cas de déformations planes est considéré, ce qui permet de réduire la matrice de comportement à :

$$\begin{pmatrix} d\sigma_{22} \\ d\sigma_{33} \\ d\sigma_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{2222} & C_{2233} & 0 \\ & C_{3333} & 0 \\ Symétrie & & C_{2323} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\varepsilon_{22} \\ d\varepsilon_{33} \\ d\varepsilon_{23} \end{pmatrix} \quad \textbf{(109)}$$

Conformément à ce qui a été évoqué dans la partie bibliographique (Paragraphe 4.1), les tenseurs de contrainte et de déformation (et leurs incréments) peuvent être décomposés en une partie sphérique et une partie déviatorique. Ce formalisme est fréquemment utilisé dans les modèles micromécaniques de paquets de fibres [CAI92, SIM96, BAD08a]. Ils s'écrivent respectivement :

$$d\sigma_S = \begin{bmatrix} \frac{d\sigma_{22}+d\sigma_{33}}{2} & 0 \\ 0 & \frac{d\sigma_{22}+d\sigma_{33}}{2} \end{bmatrix} \text{ et } d\varepsilon_S = \begin{bmatrix} \frac{d\varepsilon_{22}+d\varepsilon_{33}}{2} & 0 \\ 0 & \frac{d\varepsilon_{22}+d\varepsilon_{33}}{2} \end{bmatrix} \quad \textbf{(110)}$$

$$d\sigma_d = \begin{bmatrix} \frac{d\sigma_{22}-d\sigma_{33}}{2} & d\sigma_{23} \\ d\sigma_{23} & \frac{d\sigma_{22}-d\sigma_{33}}{2} \end{bmatrix} \text{ et } d\varepsilon_d = \begin{bmatrix} \frac{d\varepsilon_{22}-d\varepsilon_{33}}{2} & d\varepsilon_{23} \\ d\varepsilon_{23} & -\frac{d\varepsilon_{22}-d\varepsilon_{33}}{2} \end{bmatrix} \quad \textbf{(111)}$$

Le comportement mécanique est alors décomposé en un comportement sphérique et un comportement déviatorique, chacun reliant les contraintes et les déformations du même nom. Dans un premier temps les contraintes et déformations sphériques uniquement sont considérées. Il faut donc chercher la relation de comportement :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$d\sigma_S = C_S d\varepsilon_S \quad \textbf{(112)}$$

Les essais effectués et détaillés précédemment permettent d'obtenir les courbes relatives à une compression libre de mèche dans la direction 3 ($\sigma_{22} = 0$) donc :

$$\sigma_S = \frac{\sigma_{33}}{2} \quad \textbf{(113)}$$

D'autre part, d'après [NAU11], l'hypothèse suivante peut être faite : la section des mèches en sortie de bobine est rectangulaire (de largeur l et d'épaisseur e), la forme lenticulaire étant obtenue suite au tissage et à l'enchevêtrement des mèches. Le cas est donc celui de la compression pure d'un parallélépipède rectangle homogène, ce qui entraine $\sigma_{33} = cte = -P$.

Ainsi en se référant aux équations (103) et (113), il vient :

$$\sigma_S = \frac{\sigma_{33}}{2} = -\frac{K_c}{2}(V_f^\gamma - V_{f0}^\gamma) \quad \textbf{(114)}$$

Calcul de la fraction volumique de fibres :

$$V_f = \frac{n_f v_f}{v_m} \quad \textbf{(115)}$$

Avec :

- n_f le nombre de fibres dans la mèche
- v_f le volume d'une fibre
- v_m le volume de la mèche

L'hypothèse de fibres parallèles au sein d'une mèche impose que toutes les fibres d'une mèche (et donc la mèche) suivent la même trajectoire, donc que la longueur des fibres et celle de la mèche sont les mêmes. Le rapport des volumes entre mèche et fibre se réduit alors à un rapport des surfaces transverses, c'est-à-dire :

$$V_f = \frac{n_f S_f}{S_m} = \frac{n_f S_f}{el} \quad \textbf{(116)}$$

Les déformations de Hencky dans les directions 2 et 3 sont :

$$H_{22} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad \textbf{(117)}$$

$$H_{33} = \ln\left(\frac{e}{e_0}\right) \quad \textbf{(118)}$$

L'expression de la fraction volumique (116) devient alors :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$V_f = \frac{n_f S_f}{e_0 l_0 e^{(LE_{22}+LE_{33})}} \quad \textbf{(119)}$$

En intégrant (119) à l'équation (114) :

$$\sigma_S = -\frac{K_c}{2}\left(\left(\frac{n_f S_f}{e_0 l_0}\right)^{\gamma} e^{-2\gamma LE_s} - V_{f0}^{\gamma}\right) \quad \textbf{(120)}$$

$d\sigma_S$ est alors obtenu en dérivant l'équation (120) :

$$d\sigma_S = K_c \gamma {V_f}^{\gamma} d\varepsilon_s \quad \textbf{(121)}$$

La loi recherchée entre les incréments de contrainte et de déformation sphériques est ainsi obtenue à partir des paramètres identifiés directement sur la courbe de compaction sur mèche (K_c et γ).

Il suffit ensuite de résoudre le système suivant pour déterminer les différents coefficients de la matrice de comportement :

$$\begin{cases} 0 = C_{2222} d\varepsilon_{22} + C_{2233} d\varepsilon_{33} \\ d\sigma_{33} = C_{2233} d\varepsilon_{22} + C_{3333} d\varepsilon_{33} \\ d\sigma_{23} = C_{2323} d\varepsilon_{23} \end{cases} \quad \textbf{(122)}$$

Avec :

- $C_{2222} = C_{3333}$ car le matériau est isotrope transverse
- $d\varepsilon_{22} = r_{23} d\varepsilon_{33}$, avec r_{23} une fonction du coefficient de Poisson du matériau constitutif des fibres, identifiée à partir des essais de compaction sur mèche.

L'identification des déformations transverses au cours de l'essai de compression sur mèche n'est pas simple car les déformations mises en jeu sont très faibles, mais aussi et surtout la cohésion du réseau fibreux sur les bords de la mèche n'est pas toujours bonne. Ainsi, la courbe obtenue à partir de ces essais (Figure4.17) donne des résultats qu'il faudrait affiner en améliorant les protocoles et post-traitements. Cependant, l'allure de la courbe (Figure4.17) permet une première approximation du rapport des déformations R_{23} (avec $r_{23} = dR_{23}$). Ce rapport représente la pente de la courbe présentée en Figure4.17. Il est constaté que la pente augmente au cours de la compaction. R_{23} n'est donc pas constant au cours de l'essai. Si les résultats sont très dispersés du fait de la difficulté de post-traitement des images, il est de toute façon possible de faire passer une loi puissance. De plus, à un faible taux de fibre (comme le V_{f0} dans ce cas), le rapport des déformations est quasiment nul. Enfin, il semble physiquement cohérent de considérer que lorsque la fraction volumique de fibres tend vers 1, le rapport des déformations tend vers le coefficient de Poisson du matériau constitutif des fibres, c'est-à-dire :

- Si $V_f = V_{f0}$, alors $r_{23} = 0$;

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

- Si $V_f = 1$, alors $r_{23} = \nu_{23mat}$ avec ν_{23mat} le coefficient de Poisson du matériau constitutif des fibres.

L'expression de r_{23} est alors de la forme :

$$r_{23} = -\nu_{23mat} V_f^{n-1} \quad \textbf{(123)}$$

Le coefficient n est à identifier sur la courbe représentant les déformations. En intégrant l'équation (123), il est possible d'obtenir la forme du rapport des déformations R_{23} à recaler sur les courbes expérimentales :

$$R_{23} = -\frac{\nu_{23mat}}{n}\left(V_f^n - V_{f0}^n\right) \quad \textbf{(124)}$$

Pour le taffetas Chomarat (Figure4.17), n=2.4.

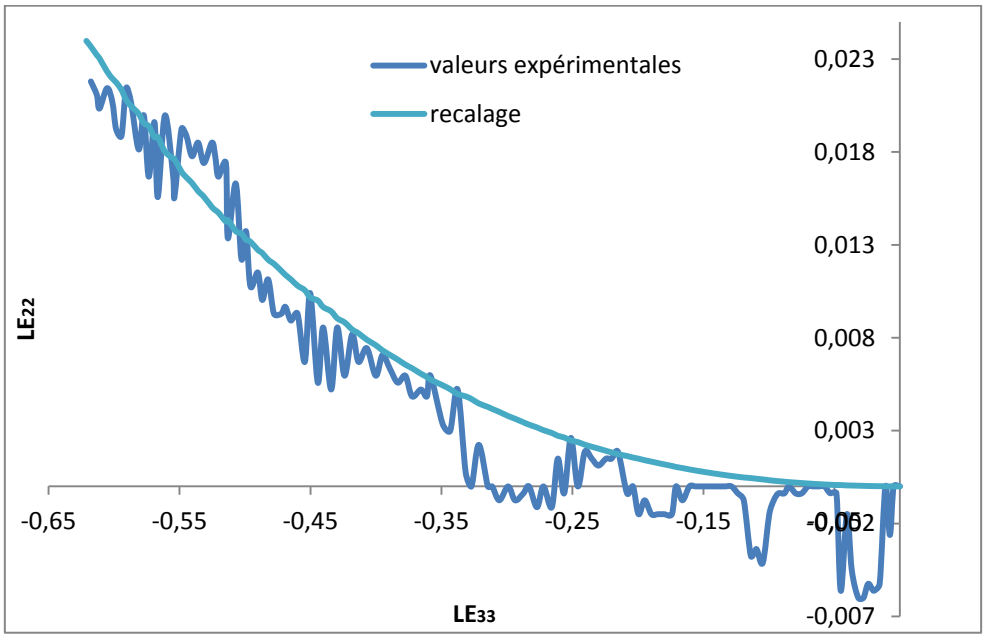


Figure4.17. Evolution de R_{23}

La résolution du système (122) donne :

$$\begin{cases} C_{2222} = C_{3333} = \dfrac{K_c \gamma {V_f}^{\gamma}}{1 + \nu_{23mat} V_f^{n-1}} \\ C_{2233} = \dfrac{\nu_{23mat} V_f^{n-1+\gamma} K_c \gamma}{1 + \nu_{23mat} V_f^{n-1}} \end{cases} \quad \textbf{(125)}$$

Avec $C_{2323} = \frac{(1-\nu_{23mat} V_f^{n-1}) K_c \gamma {V_f}^{\gamma}}{1+\nu_{23mat} V_f^{n-1}}$ obtenu par résolution du système en utilisant les composantes déviatoriques des contraintes et des déformations.

Finalement, le comportement transverse s'exprime de la façon suivante :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$\begin{pmatrix} d\sigma_{22} \\ d\sigma_{33} \\ d\sigma_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{K_c\gamma {V_f}^{\gamma}}{1+\nu_{23mat}V_f^{n-1}} & \frac{\nu_{23mat}V_f^{n-1+\gamma}K_c\gamma}{1+\nu_{23mat}V_f^{n-1}} & 0 \\ & \frac{K_c\gamma {V_f}^{\gamma}}{1+\nu_{23mat}V_f^{n-1}} & 0 \\ Symétrie & & \frac{(1-\nu_{23mat}V_f^{n-1})K_c\gamma {V_f}^{\gamma}}{1+\nu_{23mat}V_f^{n-1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\varepsilon_{22} \\ d\varepsilon_{33} \\ d\varepsilon_{23} \end{pmatrix} \quad \textbf{(126)}$$

Les composantes C_{2222}, C_{3333}, C_{2233}, $C_{2222} = C_{2323}$ du tenseur de comportement ont donc été identifiées à partir des courbes de compaction sur mèche, pour le taffetas Chomarat. Pour les autres renforts les données permettant d'identifier ces composantes sont disponibles dans la littérature et au laboratoire. L'ensemble des paramètres obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Paramètre	Taffetas chomarat	G986	G1151
Kc	850	500	500
γ	14	14.5	14.5
n	2.4	2.4	2.4

Tableau4.4. Paramètres de comportement transverse des renforts

Pour compléter l'identification du tenseur de comportement, il faut déterminer les composantes de cisaillement C_{1212} et C_{1313}. C'est l'objet de la partie suivante.

4.5.1.2.2. Composantes de cisaillement plan

Les composantes C_{1212} et C_{1313} représentent les modes de cisaillement dans les plans (1,2) et (1,3) respectivement. Pour les matériaux isotropes, ces coefficients s'expriment en fonction du module d'Young et du coefficient de Poisson. L'un des points délicats pour la représentation du matériau fibreux par un matériau homogène équivalent est le comportement en flexion. En effet, à comportement en traction équivalent, la rigidité de flexion est beaucoup plus faible dans le cas de la structure très hétérogène des mèches [DEB08]. Malgré tout il est intéressant de remarquer que lorsqu'elles sont dans le renfort, les modes de cisaillement plan (1,2) et (1,3) des mèches sont essentiellement sollicités par la flexion (il n'est bien évidemment pas souhaitable de faire cisailler les mèches). Ces deux modules de cisaillement peuvent donc être utilisés pour ajuster la rigidité de flexion de la mèche. Lorsqu'elles sont modélisées par un matériau homogène équivalent, cette faible rigidité de flexion se traduit alors en imposant des modules de cisaillement 12 et 13 faibles. Le comportement du matériau homogène équivalent étant isotrope transverse, il sera fait l'hypothèse que $C_{1212} = C_{1313}$. Pour déterminer ces coefficients pour les renforts étudiés, des essais de flexion de type Peirce sont effectués sur chacune des mèches constitutives des trois renforts étudiés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Paramètre	Taffetas Chomarat	G986	G1151
$C_{1212} = C_{1313}$	$1.2N.mm^{-1}$	$1N.mm^{-1}$	$1N.mm^{-1}$

Tableau4.5. Coefficients de cisaillement des trois renforts

4.5.2. Conclusion

Le modèle de comportement isotrope transverse associé au matériau homogène équivalent à une mèche de renfort a été établi et identifié. Il permet aussi de rendre compte du comportement spécifique du réseau fibreux. Si des avancées seraient encore à réaliser notamment pour la réalisation et l'analyse de l'essai de compaction, ce modèle de comportement peut être identifié par des essais sur mèche seule. Les formes de loi de comportement définies sont conformes aux modèles reconnus aujourd'hui dans la littérature.

Dans la partie suivante, le modèle proposé est implémenté dans la VUMAT spécifique [BAD08a] d'Abaqus®.

4.5.3. Validation de la loi de comportement

Afin de valider l'implémentation et la conformité de la nouvelle forme de la loi de comportement, des essais élémentaires sur un élément en traction et en compaction ont été réalisés. Pour cela les tests effectués en 4.4 sont repris en remplaçant la loi de comportement initiale par celle qui vient d'être définie. Les résultats obtenus sont présentés en Figure4.18 à Figure4.20. Concernant l'essai de traction (Figure4.18), la forme obtenue est la même que celle attendue et la rigidité obtenue numériquement (26 924N) correspond bien à la rigidité obtenue expérimentalement (26 900N). Concernant les essais de compression, la Figure4.19 montre que le comportement implémenté dans Abaqus® correspond à la valeur théorique et reproduit avec la même qualité le comportement expérimental. La Figure4.20 montre l'évolution du rapport des incréments de déformation en fonction de la fraction volumique de fibres. Les valeurs données par Abaqus et le comportement recherché sont cohérents à partir d'une fraction volumique de 0.5. Cependant, des oscillations sont constatées pour les faibles fractions volumiques de fibres, ce qui peut s'expliquer par la très faible rigidité initiale en compression associée au non respect de l'équilibre intrinsèque au schéma explicite. Contrairement à ce qui est attendu, l'incrément de contrainte $d\sigma_{22}$ n'est pas nul (Figure4.21), ce qui perturbe le calcul de l'incrément de déformation. L'impact est d'autant plus fort que la rigidité de compression est faible. Une des pistes possible pour résoudre ce problème serait une optimisation des paramètres du schéma explicite ou un traitement numérique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

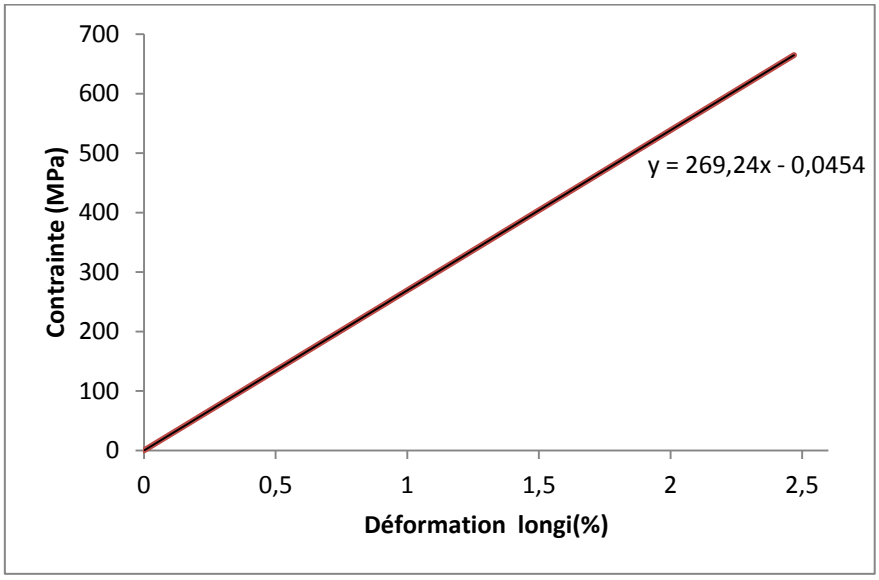


Figure4.18. Comparaison des valeurs numériques, expérimentales et obtenues par recalage pour un essai de traction

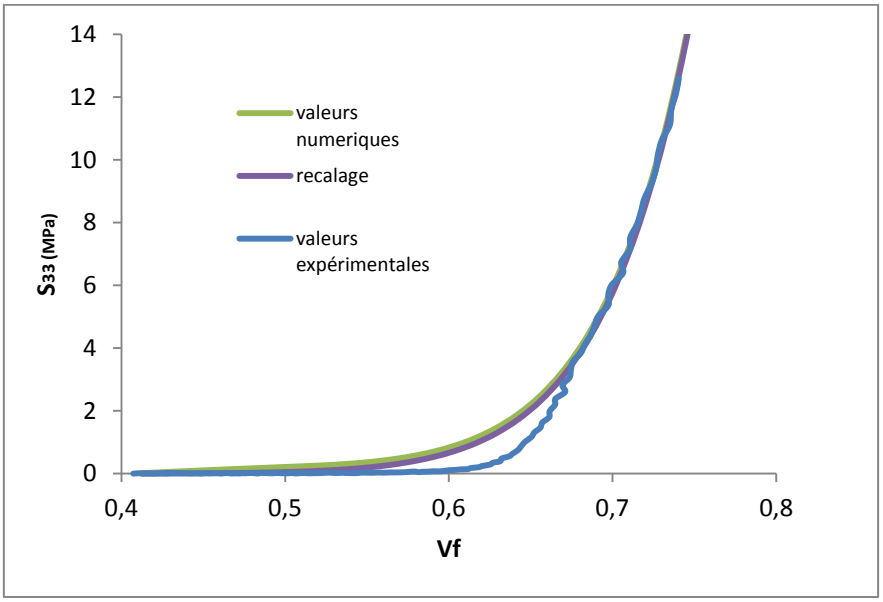


Figure4.19. Comparaison des valeurs numériques, expérimentales et obtenues par recalage pour un essai de compression

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

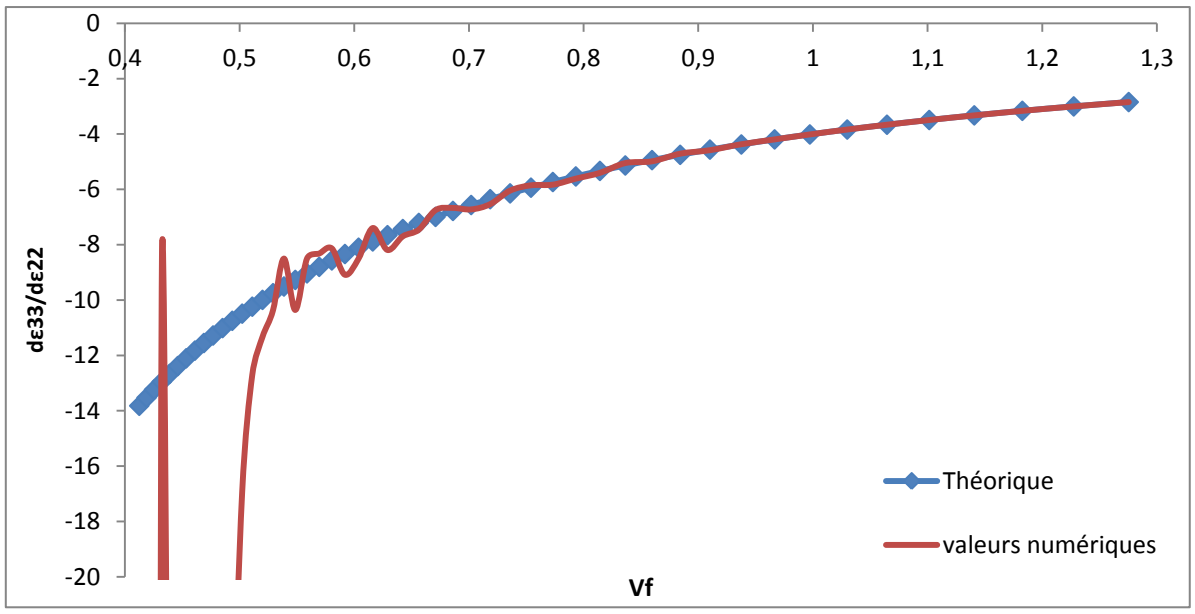


Figure4.20. Comparaison des valeurs numériques et expérimentales pour un essai de compression. Validation du rapport des déformations

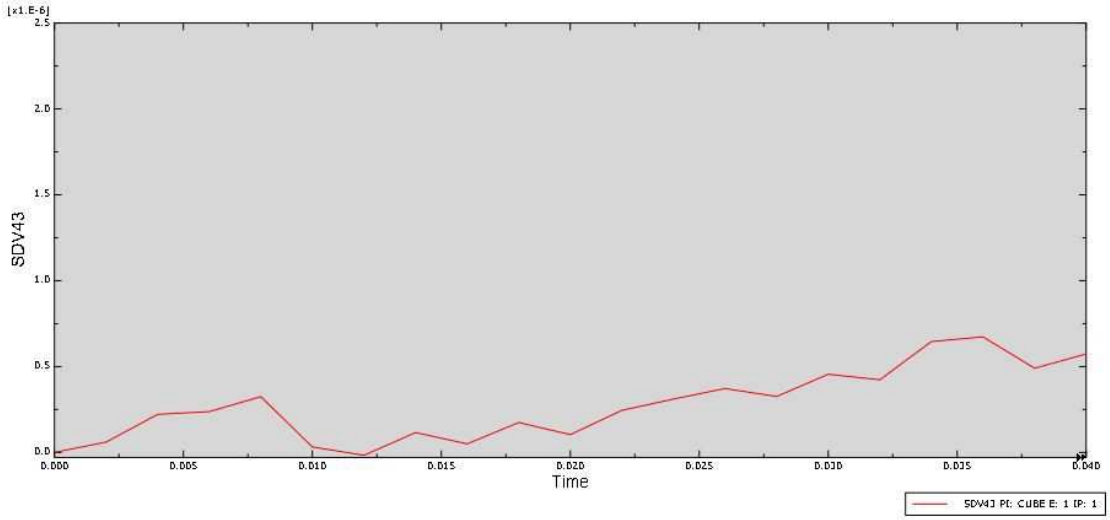


Figure4.21. Variation de $d\sigma_{22}$ au cours du temps

Les différents tests numériques élémentaires, sur un élément ou une mèche permettent de valider le comportement implémenté dans la VUMAT. Le comportement obtenu est bien conforme à celui attendu pour un réseau fibreux.

Afin de pouvoir réaliser des simulations de renforts tissés, un dernier paramètre est important à identifier : le facteur de frottement mèche/mèche au sein de la maille élémentaire et mèche/acier entre la maille et les éventuels outils. La partie suivante traite de ce point.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.6. Comportement tribologique

La simulation de la mise en forme de renforts tissés fait intervenir trois types de contact différents :

- Le contact entre mèches d'un même réseau ;
- Le contact entre mèches de réseaux différents ;
- Le contact entre le renfort et les outils (métalliques).

Pour pouvoir alimenter les simulations, ces trois contacts sont pris en compte différemment et le coefficient de frottement de chacun de ces contacts doit être déterminé. Des essais de frottement ont donc été effectués au sein du laboratoire PRISME et le protocole ainsi que les résultats obtenus sont détaillés ci-après. Les essais sont détaillés sur le taffetas Chomarat à titre d'exemple.

4.6.1. Protocole expérimental

Le banc d'essais utilisé (Figure4.22) pour les essais de frottement a été développé au sein du laboratoire PRISME dans le but d'analyser le frottement tissu/tissu, tissu/outil et mèches/mèches, avec diverses orientations relatives et d'étudier l'influence de la mésostructure sur le comportement tribologique des renforts ([HIV11, ALL12, ALL09]). Le principe correspond à ceux généralement observés dans la littérature et se rapporte au glissement inter-plis durant le préformage de renforts ; il comprend deux plaques d'acier en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre : la plaque inférieure a un mouvement de translation horizontale dans une direction fixée, avec une vitesse constante et réglable. Un variateur est utilisé pour imposer le déplacement avec des vitesses variant de 0 à 100mm/s. La plaque supérieure est fixe et chargée verticalement avec un poids dont la masse et la position sont réglables, de manière à ce que la pression de contact soit uniforme. Son déplacement latéral est limité par une gouttière. Cette plaque est reliée à un capteur d'efforts permettant de mesurer l'intensité de l'effort de contact tangentiel lors de l'essai, calibré et utilisé sur une plage de 0 à 20N, ce qui permet d'avoir une précision de 0.01N. Les matériaux à tester sont fixés sur chacune des deux plaques et un système d'acquisition permet d'enregistrer les mesures d'effort effectuées durant l'essai. Il est alors possible de déterminer le coefficient de frottement entre les deux matériaux, calculé par la loi de Coulomb :

$$f = \frac{T}{Mg} \qquad \textbf{(127)}$$

Avec T l'effort de frottement tangentiel mesuré par le capteur d'efforts, M la masse totale de la plaque supérieure avec l'échantillon et g l'accélération de la pesanteur.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Figure4.22. Banc d'essais de frottement

4.6.2. Etude d'un essai

Des essais ont été effectués sur les trois tissus de cette étude, à chaque fois pour 10 cycles (c'est-à-dire 10 passages sur la même plaque). Cependant, puisque les phénomènes et la conclusion sont identiques pour tous les renforts et pour garder l'homogénéité par rapport à la partie précédente, seuls les essais sur le taffetas Chomarat seront détaillés et exploités pour le raisonnement. Pour ces renforts, les essais de frottement ont été faits dans les cas tissu/tissu avec des orientations à 0°/0° et 0°/90° et tissu/métal à 0° et 90°. Les résultats obtenus pour un essai sont du type de ceux présentés en Figure4.23, qui concerne le premier cycle d'un essai de frottement tissu/tissu avec une orientation à 0°/0° pour le taffetas de verre. La masse étant constante au cours d'un essai, le coefficient de frottement au sens de la loi de Coulomb et l'effort de frottement sont proportionnels. Il est donc possible de tracer directement le coefficient de frottement en fonction de la distance parcourue sur l'éprouvette. Le résultat de la Figure4.23 montre une forte augmentation du coefficient de frottement en début d'essai, correspondant au temps de réponse et de stabilisation de la vitesse de déplacement de la plaque mobile, avant d'osciller autour d'une valeur plus stable. Ces variations sont liées aux hétérogénéités mésoscopiques du renfort [ALL12] et permettent de conclure que le frottement tissu/tissu est rythmé par des chocs intervenant à l'échelle mésoscopique et donc, qu'il fait bien intervenir le contact mèche/mèche. Ces chocs sont d'autant plus significatifs lorsque les mèches sont fines et fortement embuvées. [ALL12].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

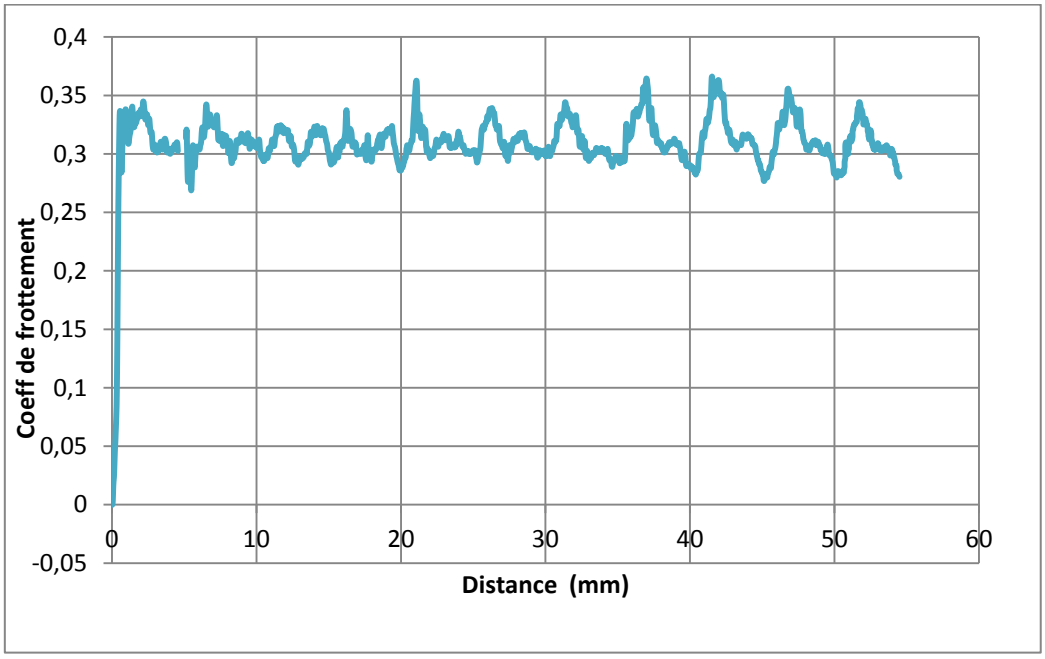
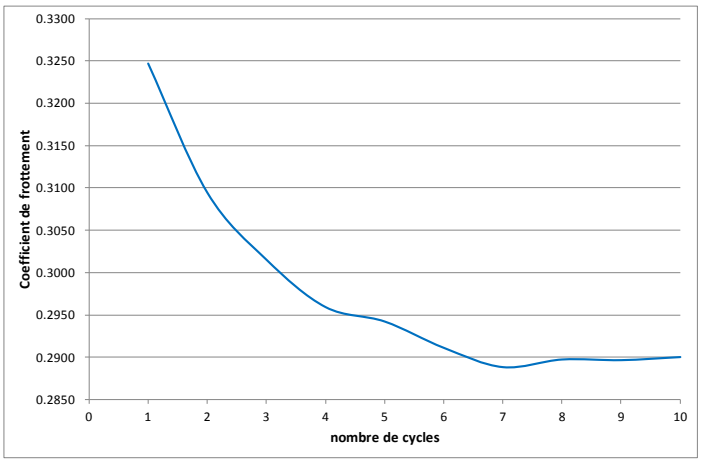


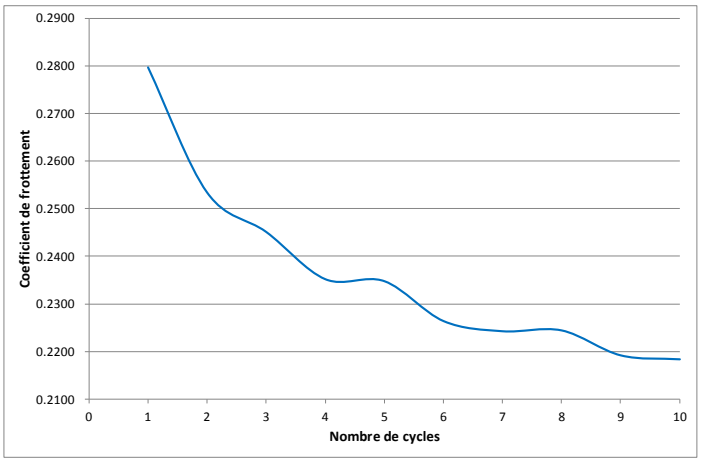
Figure4.23. Variations du coefficient de frottement en fonction de la distance pour les éprouvettes de renfort de taffetas Chomarat

A partir de ce graphe, une valeur moyenne du coefficient de frottement est déduite sur une période stable. Ici, elle est évaluée à 0.325. Il est procédé de la même manière pour les cycles suivants et pour les orientations à 0°/90° et les essais tissu/métal. Les résultats obtenus, concernant la variation du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles sont présentés en Figure4.24 et Figure4.25. Le Tableau4.6 est un récapitulatif des valeurs moyennes admises pour le coefficient de frottement.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



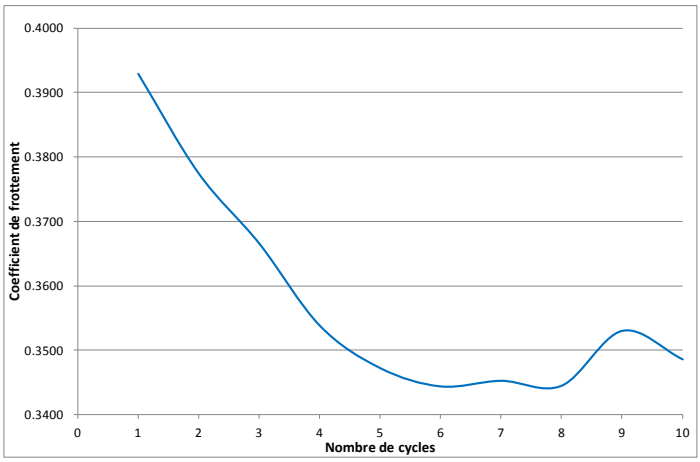
(a) Orientation 0°/0°



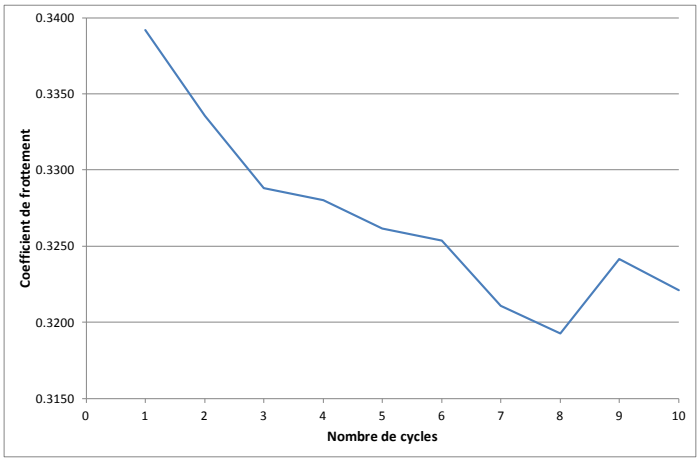
(b) Orientation 0°/90°

Figure4.24. Evolution des coefficients de frottement renfort/renfort en fonction du nombre de cycles pour le taffetas Chomarat

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Orientation 0°



(b) Orientation 90°

Figure4.25. Evolution des coefficients de frottement renfort/métal en fonction du nombre de cycles pour le taffetas Chomarat

Sur ces divers graphes, conformément à la littérature, il est constaté une diminution des valeurs du coefficient de frottement entre les cycles. Ceci s'explique par un effet de polissage entre les différents cycles, causé par l'abrasion des fibres d'une part, la réorganisation des mèches d'autre part [ALL12] et la constitution d'un troisième corps. De même, l'orientation relative des fibres et des couches affecte le coefficient de frottement. Sachant que l'opération de mise en forme et les essais sur renforts sont réalisés en une seule étape, le coefficient initial est considéré. Concernant l'orientation, l'influence étant modeste, elle sera négligée dans cette étude.

Le Tableau4.6 présente le bilan des coefficients de frottement retenus.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.6.3. Bilan des valeurs retenues

	Essai	Orientation	Coefficient de frottement
G986®	Tissu/métal	0°	0.18
	Tissu/métal	90°	0.22
	Tissu/tissu	0°/0°	0.28
	Tissu/tissu	0°/90°	0.19
	Mèches/mèches	0°/0°	0.36
	Mèches/mèches	0°/90°	0.22
G1151®	Tissu/métal	0°	0.17
	Tissu/métal	90°	0.17
	Tissu/tissu	0°/0°	0.67
	Tissu/tissu	0°/90°	0.537
	Mèches/mèches	0°/0°	0.57
	Mèches/mèches	0°/90°	0.54
Taffetas Chomarat	Tissu/métal	0°	0.393
	Tissu/métal	90°	0.34
	Tissu/tissu	0°/0°	0.325
	Tissu/tissu	0°/90°	0.28
	Mèches/mèches	chaines/chaines Trames/trames	0.298 0.128

Tableau4.6. Coefficients de frottement moyens pour le cycle 1

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

4.7. Conclusion

Les coefficients de frottement utiles pour la mise en œuvre et le recalage des simulations à l'échelle mésoscopique étant déterminés, l'ensemble des paramètres du comportement sont maintenant disponibles. En effet tous les paramètres de la loi de comportement du matériau homogénéisé et les paramètres associés au contact ont été identifiés. Une remarque s'impose néanmoins à ce stade : à part pour la mèche du taffetas Chomarat, les paramètres matériaux n'ont pas donné lieu à une caractérisation expérimentale. Ceux-ci ont été estimés à partir des propriétés de la fibre, de la structure de la mèche (nombre de tex, nombre de fibres, dimensions,…) et de lois de comportement issues de la bibliographie ([CHI84, TOL98, LAT11]). Bien sur, les résultats ne sont pas aussi précis qu'avec une identification directe sur des essais sur mèche ; ce point sera à garder à l'esprit lors des comparaisons expérimental/numérique sur les renforts. Cette démarche semble néanmoins extrêmement prometteuse car elle pourrait permettre de s'affranchir d'essais longs et difficiles à mener sur les mèches et sur les renforts. La campagne expérimentale menée sur la mèche de verre du taffetas Chomarat permet d'illustrer parfaitement ce point. En effet, les paramètres de comportement en traction sont approchés avec une excellente précision sur une mèche de type roving et les paramètres de la loi de compaction obtenus expérimentalement ne sont pas si éloignés de ceux définis théoriquement dans [TOL98] pour un roving de verre ([γ ; Kc]=[14 ; 850] contre [15.5 ; 700]). Enfin, si le coefficient de Poisson pose encore problème, il a été vu que les essais menés peinent un peu à fournir un résultat précis. Nul doute que ces approches vont s'améliorer dans les années à venir, en témoignent les études sur le comportement des milieux fibreux ([LAT11], Projet ANR MécaFibre, GDR Milieux fibreux,…).

De plus, dans les deux chapitres précédents, une géométrie cohérente maillée a été obtenue. Il est donc maintenant possible de réaliser les simulations de mise en forme à l'échelle mésoscopique. La mise en place et l'optimisation de la stratégie de calcul est l'objet du chapitre suivant.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

CHAPITRE 5

Optimisation des calculs et résultats

Pour mettre en œuvre des simulations efficaces de déformations de renforts tissés, un modèle géométrique de mèche et un maillage cohérents ont été présentés aux chapitres 2 et 3. La nouvelle approche de la loi de comportement du matériau homogène équivalent à un matériau fibreux présentée au chapitre 4 permet d'être identifiée uniquement par des essais sur mèche seule, sortie de bobine. Afin d'améliorer encore les performances des calculs, il est nécessaire de mettre en place des lois de contact ciblées, applicables aux renforts tissés, mais aussi une optimisation des paramètres de calcul du schéma dynamique explicite. Ces différents aspects sont présentés dans ce chapitre puis appliqués et validés sur une mèche seule « sortie de bobine ». Ces stratégies sont alors exploitées pour mener à bien les simulations sur les VER de renforts. Différents cas de sollicitations sont alors simulés sur les trois renforts de l'étude.

SOMMAIRE

5.1 Optimisation des paramètres des calculs en dynamique explicite 146
5.1.1 Schéma explicite 146
5.1.2 Profil de vitesse 147
5.1.3 Mass Scaling 148
5.1.4 Ajout d'un facteur d'amortissement 150
5.2 Etude du contact 151
5.2.1 Définition du contact pour les calculs en dynamique explicite 151
5.2.2 Formulation du contact pair 152
5.2.3 Formulation du glissement 157
5.2.4 Application aux renforts 158
5.3 Simulations sur une mèche 160
5.3.1 Traction 160
5.3.2 Compaction 161
5.4 Simulations de mailles élémentaires de renforts fibreux 163
5.4.1 Compaction sur le taffetas Chomarat 164
5.4.2 Cisaillement sur le G986® 166
5.4.3 Traction biaxiale sur le G1151® 167
5.5 Conclusion 169

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.1 Optimisation des paramètres des calculs en dynamique explicite

Cette partie a pour objectif d'analyser les différents paramètres intervenant dans les calculs en dynamique explicite et leur influence sur les calculs de manière à déterminer les paramètres optimaux pour les simulations de déformations de renforts tissés, notamment le pas de temps idéal permettant à la fois la convergence et l'efficacité des calculs. Etant donnés les incréments de déformations et de contraintes mis en jeu, l'ensemble des calculs présentés dans ce chapitre est réalisés en double précision.

5.1.1 Schéma explicite

Les calculs de dynamique explicite sont particulièrement bien adaptés aux analyses quasi-statiques comportant de nombreuses conditions de contact, ce qui est le cas de cette étude. L'équation d'équilibre du schéma explicite s'écrit à tout instant sous la forme :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + \{F_{int}\} - \{F_{ext}\} = 0 \quad \textbf{(128)}$$

Avec $\{F_{int}\}$ les efforts internes, $\{F_{ext}\}$ les efforts externes, $[M]$ la matrice de masse diagonalisée et $[C]$ la matrice d'amortissement, telle que :

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad \textbf{(129)}$$

$[K]$ étant la matrice de rigidité et α et β des coefficients d'amortissement.

Le calcul des accélérations s'effectue à chaque incrément de temps t donnant une solution en vitesse à l'instant $t + \frac{\Delta t}{2}$ et une solution en déplacement à l'instant $t + \Delta t$. Le critère de stabilité de la solution est donné pour un matériau isotrope par :

$$\Delta t \leq \Delta t_c = L\sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad \textbf{(130)}$$

Avec E le module d'Young du matériau, ρ sa masse volumique et L la longueur caractéristique des éléments. Le temps de calcul sera donc limité par la taille du plus petit élément du maillage. Dans les analyses 3D, raffiner un maillage d'un facteur n augmente le temps de calcul d'un facteur n^3. Concernant les simulations Abaqus®, les incréments de temps peuvent être imposés ou calculés par le logiciel, ce qui sera le cas ici. Lorsqu'ils sont définis par Abaqus®, l'efficacité numérique est assurée par le fait qu'ils sont aussi proches que possible de la limite de stabilité sans la dépasser. En outre, la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

stabilité du calcul est assurée par l'utilisation de nombreux petits incréments de temps, ce qui ajoute aux avantages de la méthode explicite, car l'utilisation de petits incréments simplifie le traitement des contacts, permettant à la solution d'avancer sans itérations. Cette méthode permet en outre de prendre en compte la non-linéarité matérielle liée à la structure fibreuse des mèches.

5.1.2 Profil de vitesse

Concernant les simulations, la première étape consiste à imposer une vitesse. Il a été choisi d'imposer un « step » (profil de vitesse) de type « smooth » (lissé) de manière à gérer l'accélération initiale et la stabilité finale. Le pilotage en vitesse de type « smooth » s'est en effet avéré le plus efficace pour le pilotage des degrés de liberté. Une fois la vitesse imposée, plusieurs critères de validation sont vérifiés : dans un premier temps, la stabilité des calculs est contrôlée, c'est-à-dire que les oscillations (typiques des calculs en dynamique explicite) sont faibles et les éléments ne sont pas distordus. Ensuite, un critère important est celui du rapport des énergies cinétique et de déformation. Pour qu'une simulation quasi-statique soit acceptable, l'énergie cinétique ne doit pas dépasser 10% de l'énergie de déformation. Enfin il est nécessaire d'avoir le minimum de dispersions sur les résultats : pour un même incrément, l'homogénéité des valeurs est recherchée.

En prenant l'exemple de l'essai de traction sur mèche seule, plusieurs essais ont montrés que la vitesse maximale à imposer est 20mm/s et la forme du « step » est illustrée en Figure5.1.

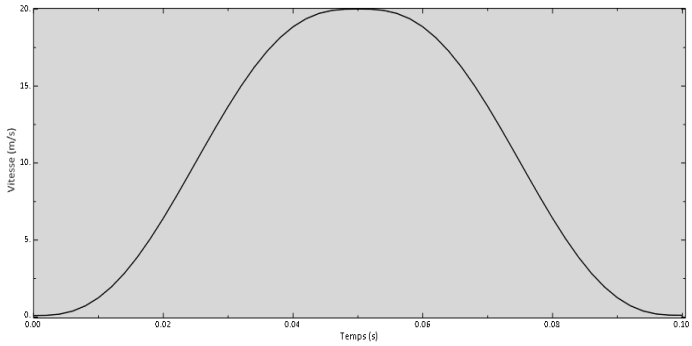


Figure5.1. Profil de vitesse imposé

En imposant uniquement ce profil de vitesse, sans intervention des autres paramètres, le temps de calcul reste élevé (30min) et il apparait des distorsions d'éléments (première colonne du Tableau5.1). La première solution qui pourrait être envisagée est de diminuer la vitesse. Cet essai a été effectué en divisant la vitesse par 10. Le calcul se poursuit plus longtemps (36 incréments sur 50) mais avec un temps de calcul énorme pour une mèche en traction (presque 7h de calcul). En outre, les éléments se distordent fortement (Figure5.2) et bien sûr, les résultats sont loin d'être homogènes (parfois plus de 100% d'écarts dans un même incrément).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

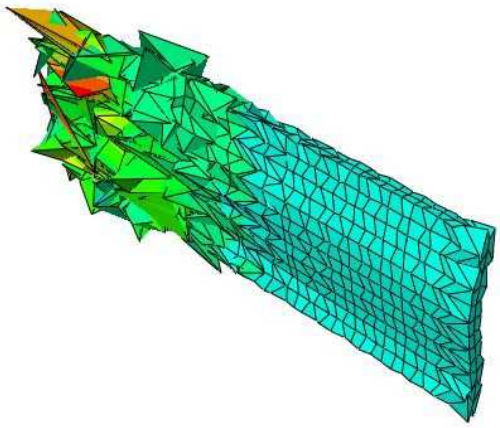


Figure5.2. Distorsions possibles sur les éléments lors d'un essai de traction sur mèche

Il faut alors ajuster les autres paramètres du schéma explicite, à la fois pour faire converger les calculs et pour diminuer les temps de calcul, ce qui peut être non négligeable lors de la mise au point de modèles de renforts avec de nombreuses mèches et conditions de contact. L'influence de ces paramètres sur les simulations est détaillée dans les paragraphes suivants.

5.1.3 Mass Scaling

L'équation (130) montre que le pas de temps des calculs en dynamique explicite est proportionnel à la racine de la masse volumique. Une masse volumique faible conduira donc à un pas de temps faible et par conséquent à des calculs longs. De ce fait, pour augmenter la vitesse de calcul, deux possibilités existent : augmenter la vitesse ou augmenter la masse volumique. La première solution n'agit pas directement sur le pas de temps et, comme vu dans le paragraphe précédent, ne permet pas forcément de faire converger les calculs. A l'inverse, l'équation (129) montre qu'une augmentation de la masse agit aussi sur la matrice d'amortissement. Toute augmentation de la masse provoquera donc à la fois une diminution du temps de calcul et la stabilisation de ces calculs grâce à un meilleur amortissement. Une augmentation artificielle de la masse des éléments, appelée « mass scaling », peut alors améliorer l'efficacité des calculs tout en conservant la même précision, une hausse de la masse d'un facteur f^2 réduisant le nombre d'incréments d'un facteur f et donc le temps de calcul par ce même facteur. Toutefois, la masse ne peut être augmentée indéfiniment, la limite étant donnée par comparaison de l'énergie cinétique et de l'énergie de déformation. Pour que le calcul conserve sa stabilité, l'énergie cinétique doit être au maximum égale à 10% de l'énergie de déformation. Concrètement, l'introduction de « mass scaling » dans un modèle quasi-statique peut être effectuée en modifiant directement la masse volumique du matériau. Il y a alors deux possibilités qui peuvent s'appliquer ensemble ou séparément :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

- Le « mass scaling » peut être fixe et appliqué à tout le modèle. Dans ce cas le facteur de « mass scaling » multiplie toutes les masses des éléments assemblés dans la matrice de masse nodale globale.
- Le « mass scaling » peut être variable et utilisé pour multiplier la masse des éléments périodiquement pendant un « step ». Cette possibilité est utile lorsque les rigidités qui contrôlent l'incrément changent drastiquement durant un « step ».

Pour illustrer ces propos, différents essais sont effectués en traction sur la mèche droite avec des masses volumiques différentes jusqu'à une déformation finale de 1%. La masse volumique réelle est de $2{,}54.10^{-9}$tonnes.mm^{-3}. Le « mass scaling » maximal (et donc la masse volumique maximale) peut être déterminé en comparant les énergies cinétique et de déformation. Le Tableau5.1 compare les résultats obtenus et les temps de calculs pour différentes masses volumiques.

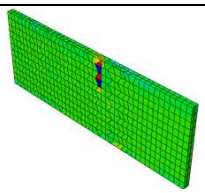
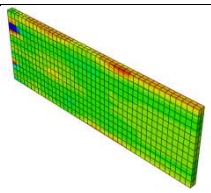
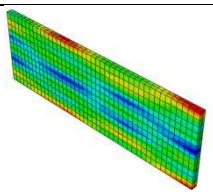
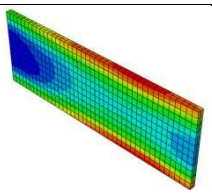
Masse volumique (tonnes.mm^{-3})	$2{,}54.10^{-9}$	$2{,}54.10^{-7}$	$2{,}54.10^{-5}$	$2{,}54.10^{-3}$
Déformée				
Energie cinétique < 10% énergie de déformation ?	Oui	oui	oui	non
Distorsions d'éléments	Oui	non	non	non
σ_{11} (MPa)	NA	2 454	2 524	2 542
Temps de calcul	Arrêt au 17ème incrément sur 50 (8min)	2min36	18s	4s

Tableau5.1. Résultats de calcul en fonction du mass scaling appliqué

Comme attendu, les résultats du Tableau5.1 montrent que l'ajout de « mass scaling » permet à la fois de faire converger les calculs mais aussi de stabiliser les résultats tout en diminuant le temps de calcul. En outre, la masse volumique peut être nettement augmentée sans influence sur l'exactitude des résultats obtenus (3% maximum d'écart entre les valeurs). En effet, pour le cas considéré, le critère sur les énergies commence à ne plus être respecté à partir d'une masse volumique multipliée par 10^6 et le non-respect de ce critère ne concerne que le début du calcul.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.1.4 Ajout d'un facteur d'amortissement

Une des possibilités contribuant à l'optimisation des calculs est d'agir sur la matrice d'amortissement $[C]$, particulièrement pour des modèles à faible énergie de déformation, pour lesquels le « mass scaling » ne sera pas forcément applicable à cause du non-respect de la condition sur les énergies. Dans Abaqus®, l'amortissement est de type Rayleigh et est défini par deux facteurs, donnés dans l'équation (129) :

- α est le facteur d'amortissement proportionnel à la masse. Il introduit des efforts d'amortissement causés par la vitesse absolue du modèle et simule l'idée d'un modèle évoluant dans un fluide visqueux.
- β est le facteur d'amortissement proportionnel à la rigidité. Il est interprété comme définissant un amortissement de matériau visqueux créant une contrainte d'amortissement supplémentaire proportionnelle à la déformation totale. Malheureusement, ce facteur n'est pas utilisable avec une routine utilisateur définissant le matériau s'il n'y est pas programmé.

L'ajout d'un facteur d'amortissement provoque dans les deux cas une diminution du pas de temps et donc une augmentation du temps de calcul. Différents essais sur la mèche seule permettent de déterminer une première approximation des valeurs des paramètres du schéma explicite qui sont ensuite intégrés aux calculs sur renforts, en favorisant dans un premier temps le « mass scaling » de manière à augmenter l'efficacité des simulations. Les énergies sont alors comparées pour déterminer la valeur maximale acceptable de « mass scaling ». Ensuite, le paramètre α est ajusté pour stabiliser les calculs. Les mêmes tests sont effectués pour les essais de compaction ainsi que pour les deux autres renforts (G986® et G1151®), pour obtenir dans chaque cas les valeurs à intégrer aux simulations, qui sont alors validées ou ajustées après une première simulation sur renforts.

Finalement, pour les calculs sur mèches, un compromis entre les différents paramètres doit être trouvé. Dans le cas de la traction, il est choisi d'imposer une amplitude de vitesse de type « smooth » avec une vitesse maximale de 20mm.s^{-1}, d'utiliser un « mass scaling » en imposant une masse volumique de 2.54^{e}-5 (X 10 000) et un « damping » (amortissement) de 10. La même démarche est effectuée pour les autres sollicitations.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.2 Etude du contact

La dernière source d'amélioration des simulations concerne la définition de lois de contact applicables aux renforts tissés. Initialement, les contacts étaient effectués en mettant toutes les mèches en contact les unes avec les autres et toutes les mèches en contact avec les outils pour la compaction ("general contact"). Cette méthode simple permet de réaliser une mise en données des calculs relativement rapide sur des renforts simples (2D par exemple) mais les temps de calcul associés sont relativement longs. L'objectif poursuivi d'optimiser les temps de calcul implique donc une modification de cette stratégie, c'est-à-dire :

- Limiter au juste nécessaire les surfaces de contact ;
- Assurer une mise en données rapide et automatique de la mise en place des contacts ;
- Appliquer les bons paramètres de contact (frottement) pour chaque cas.

Pour ce faire, les paires de surfaces en contact ont été définies en fonction des paramètres géométriques des mèches, tel qu'expliqué au chapitre 3. Il est alors possible d'imposer une loi de contact spécifique et notamment différente entre mèches d'un même réseau, entre mèches de réseaux différents et entre mèches et outils, se rapprochant ainsi de la réalité du renfort.

5.2.1 Définition du contact pour les calculs en dynamique explicite

Six paramètres de contact sont à spécifier pour les calculs en dynamique explicite à l'aide d'Abaqus® :

- L'algorithme de contact. Deux algorithmes sont possibles : "general contact" ou "contact pair". Comme cela a été expliqué dans la section précédente, la définition d'un algorithme "general contact" est plus simple mais cette méthode prend toutes les surfaces en contact et ne permet pas de définir uniquement les surfaces susceptibles d'entrer en contact. Le choix de l'algorithme se portera donc ici sur un algorithme de "contact pair".
- Les surfaces impliquées dans le contact.
- Les propriétés des surfaces en contact, qui définissent le mode d'interactions mécaniques et thermiques gouvernant le comportement des surfaces en contact.
- Les propriétés mécaniques du contact. Dans la simulation mécanique du contact, les interactions entre deux corps en contact sont définies en imposant les propriétés du contact à l'interaction, de type pression, amortissement, frottement…
- La formulation du contact, qui peut être cinématique ou par pénalisation. Ce point sera développé en 5.2.2.
- Des paramètres supplémentaires optionnels de type « contact controls ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Dans cette étude, le souhait de maitriser chaque contact impose d'utiliser un algorithme de type "contact pair". La suite décrira donc la formulation du contact dans le cas de cet algorithme uniquement.

5.2.2 Formulation du contact pair

La formulation du contact pair dans Abaqus/explicit® doit absolument inclure en premier lieu la méthode de contrainte (cinématique ou par pénalisation), puis la pondération des surfaces en contact (simple ou double maître/esclave) et finalement la formulation de glissement (« finite sliding » ou « small sliding »).

5.2.2.1 Méthode de contrainte

Par défaut, Abaqus/explicit® utilise un algorithme de prédiction/correction de contact cinématique. Il est aussi possible d'imposer un algorithme par pénalisation. Chacun de ses algorithmes présente des avantages et des inconvénients et sont applicables à des situations différentes. C'est pourquoi, leur fonctionnement est expliqué ci-après afin de définir dans quels cas les utiliser.

5.2.2.1.1 Contact de type cinématique

5.2.2.1.1.1 Algorithme du contact cinématique

La définition du contact de type cinématique (Figure5.3) est basée sur un algorithme de prédiction/correction et a la particularité de ne pas influencer le pas de temps. Dans le cas d'un contact pur maître/esclave, la démarche est la suivante : à chaque incrément, il y a prédiction de la configuration du modèle sans considérer les conditions de contact ; les nœuds esclaves sont alors déterminés dans la configuration de prédiction qui pénètre la surface maîtresse. La profondeur de pénétration des nœuds esclaves dans la surface maîtresse et la force nécessaire opposée à la pénétration sont alors calculées pendant l'incrément de temps. Il y a alors deux possibilités suivant que la surface maîtresse est formée par des éléments ou est une surface analytique rigide :

- dans le premier cas (surface maîtresse formée par des éléments), les efforts de résistance des nœuds esclaves sont distribués à tous les nœuds de la surface maîtresse. Le poids de chaque nœud esclave en contact est distribué et ajouté à leur propre poids pour déterminer le poids total des interfaces de contact. A partir de ces données et pour chaque nœud de la surface maîtresse, l'accélération de correction est calculée, ainsi que l'accélération de correction pour les nœuds esclaves, en utilisant la prédiction de pénétration pour chaque

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

nœud, l'incrément de temps et l'accélération de correction pour les nœuds de la surface maîtresse. Cette accélération de correction permet d'obtenir la configuration adéquate, dans laquelle les contraintes de contact sont alors appliquées.

- Dans le second cas (surface maîtresse est une surface analytique rigide), les efforts de résistance de chaque nœud esclave sont appliqués comme un effort généralisé sur le corps rigide associé. Le poids de chaque nœud esclave en contact est alors ajouté au corps rigide pour déterminer le poids total des interfaces en contact. Ces données (efforts généralisés et poids ajoutés) sont ensuite utilisées pour le calcul de l'accélération de correction pour la surface maîtresse. Enfin, l'accélération de correction pour les nœuds esclaves est déterminée par le mouvement corrigé de la surface maîtresse.

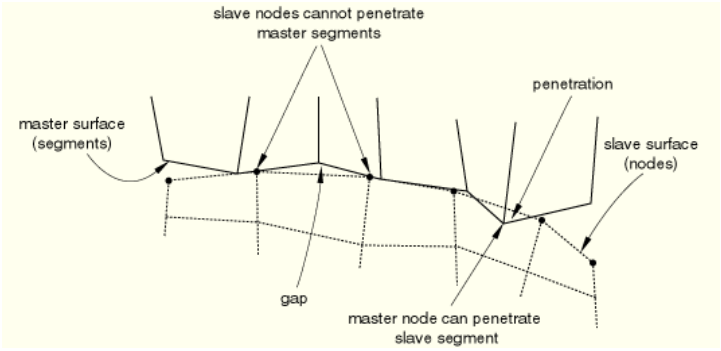
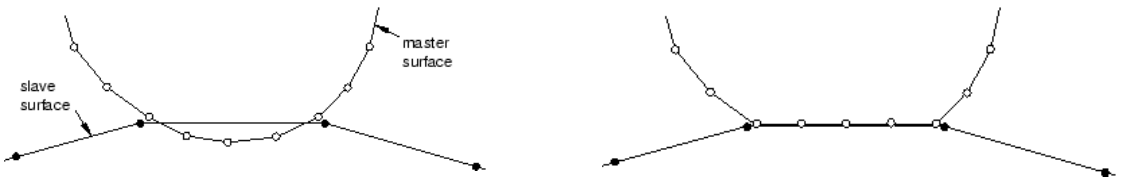


Figure5.3. Contact cinématique (simple maître/esclave)

Dans le cas d'un contact double maître/esclave (Figure5.4), l'accélération de correction est une combinaison linéaire des corrections des cas de contact simple maître/esclave, avec une partie des corrections calculée en considérant une surface comme étant maîtresse et l'autre partie calculée en considérant la même surface comme étant esclave. Les deux valeurs obtenues sont ensuite pondérées, la configuration par défaut étant la même pondération pour les deux corrections. Dans chaque cas, il est possible de minimiser la pénétration des nœuds dans la surface opposée en utilisant un maillage suffisamment raffiné. Cependant, cela n'impose aucunement une condition de non pénétration.



(a) contact simple maître/esclave (b) contact double maître/esclave

Figure5.4. Contact cinématique simple et double maître/esclave

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.2.2.1.1.2 Restrictions sur les surfaces impliquées dans le contact cinématique

Les surfaces impliquées dans les contacts doivent correspondre à l'algorithme utilisé. Certaines restrictions sont à prendre en considération. Dans le cas d'un contact cinématique, les restrictions sont les suivantes :

- les surfaces rigides doivent être maîtresses,
- les surfaces esclaves doivent appartenir à un solide déformable,
- les surfaces définies par des nœuds doivent toujours être esclaves,
- la normale à la surface maîtresse doit être dirigée vers la surface esclave, ce qui permet d'assurer qu'il n'y a ni vides ni pénétrations.

L'inconvénient du contact cinématique est qu'il ne permet pas d'ajouter des conditions autres (périodicité, équations…) dans la direction du contact. Si ces conditions sont définies malgré tout, elles ne seront pas respectées ou empêcheront le démarrage du calcul.

5.2.2.1.2 Contact par pénalisation

5.2.2.1.2.1 Algorithme du contact par pénalisation

L'algorithme de contact par pénalisation présente l'avantage de prendre en compte plus de types de contact que le contact cinématique mais les contraintes de contact sont moins strictes et des pénétrations des surfaces en contact peuvent survenir. Par contre, ce contact permet d'ajouter des conditions aux limites dans la direction du contact mais s'il y a conflit, c'est cette fois la condition de contact qui ne sera pas respectée. En outre, cet algorithme introduit des rigidités supplémentaires qui peuvent influencer le pas de temps. Contrairement au contact cinématique, l'algorithme du contact simple maître/esclave par pénalité prend en compte la configuration réelle, dans laquelle les pénétrations des nœuds esclaves sont recherchées. Un effort, fonction de la distance de pénétration et s'opposant à la pénétration des nœuds esclaves, est alors appliqué. De même, un effort égal et opposé est appliqué sur la surface maîtresse au point de pénétration. Il y a alors deux possibilités suivant que la surface maîtresse est formée par des éléments ou est une surface analytique rigide :

- Si la surface maîtresse est formée par des faces d'éléments, l'effort de contact est distribué aux nœuds des faces maitresses pénétrées ;
- Si la surface maitresse est analytique rigide, l'effort est appliqué sous forme de forces et moments sur le corps rigide associé.

Dans les deux cas, il n'existe aucune résistance à la pénétration des nœuds maîtres dans la surface esclave. La solution pour éviter au maximum les pénétrations est de raffiner le maillage de la surface

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

esclave. Dans le cas d'un contact double maître/esclave par pénalisation, l'effort de contact est la moyenne pondérée des efforts de contact des cas simple maitre/esclave.

5.2.2.1.2.2 Restrictions sur les surfaces impliquées dans le contact par pénalité

Cet algorithme présente peu de restrictions sur les surfaces impliquées dans le contact ; il n'en existe aucune pour le contact entre deux surfaces rigides mais n'est pas possible si ces deux surfaces sont analytiques rigides. De même que pour le contact cinématique, les surfaces définies par des nœuds doivent être esclaves et dans tous les cas, la normale à la surface maîtresse doit être dirigée vers la surface esclave. En outre, cet algorithme présente l'avantage de renforcer les contraintes en cas de contact avec un corps rigide ou de renforcer le frottement par adhérence.

La pénétration peut influencer significativement la solution en contraintes. Il est possible de maitriser (réduire) la tolérance de pénétration dans le cas du contact par pénalisation en augmentant la rigidité du contact par l'utilisation un facteur multiplicatif de la valeur de la rigidité par défaut. Cependant, le pas de temps est modifié sur la base de la rigidité maximale à l'interface. Donc, si le facteur est élevé, il y a augmentation forte du temps de calcul due à la réduction de l'incrément de temps nécessaire pour maintenir la stabilité numérique et inversement. L'influence sur le pas de temps est donnée en Tableau5.2.

Penalty scale factor	Lower bound to ratio of the time increment with contact divided by the time increment without contact
1.0	0.96
10.0	0.34
100.0	0.13
1000.0	0.04
10000.0	0.013

Tableau5.2. Influence du facteur de pénalité sur le pas de temps

5.2.2.1.3 Pondération des surfaces en contact

Dans les deux cas d'algorithmes utilisés pour la formulation du « contact pair », le contact peut être défini comme simple ou double maître/esclave. Les restrictions imposées par les calculs dans Abaqus/explicit® permettent de définir dans quelles situations le contact est cinématique ou par pénalisation, simple ou double maître/esclave. Les situations par défaut sont les suivantes :

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

- utilisation du contact simple maître/esclave cinématique si le contact implique une surface rigide ou s'il y a contact entre une surface créée avec des faces d'éléments et une surface créée avec des nœuds ;
- utilisation du contact double maître/esclave cinématique si le contact implique une surface en contact avec elle-même ou s'il y a contact entre deux surfaces déformables avec une même densité de maillage ;
- utilisation du contact simple maître/esclave par pénalisation si le contact implique une surface analytique rigide ;
- utilisation du contact double maître/esclave par pénalisation si le contact implique une surface en contact avec elle-même ou s'il y a contact entre deux surfaces déformables créées avec des faces d'éléments.

Ces recommandations par défaut peuvent être modifiées afin de mieux correspondre à la situation du calcul, en gardant toutefois à l'esprit certaines exigences. En effet, dans tous les cas, l'utilisation d'un contact double maître/esclave permet un calcul plus précis mais plus long. De plus, s'il existe une différence de densité entre les maillages des deux corps en contact, le moins dense sera préférablement esclave de manière à limiter les perturbations. En outre, il est possible d'utiliser la pondération pour réduire les temps de calcul si elle est utilisée dans le cas d'un contact par pénalisation ou pour renforcer les contraintes de contact. Cette pondération, utilisée dans le cas de contact double maître/esclave, permet de réduire les pénétrations à proximité des nœuds du maillage le plus grossier. Les facteurs de pondération f possibles sont les suivants :

- f=1 : dans ce cas la première surface impliquée dans le contact est maîtresse et la seconde est esclave ;
- f=0 : dans ce cas la première surface impliquée dans le contact est esclave et la seconde est maîtresse ;
- f=0.5 correspond à un contact double maître/esclave "classique", chaque surface ayant le même poids. Il s'agit de la valeur par défaut utilisée dans tous les contacts double maître/esclave ;
- $0<f<1$ et $f\neq0.5$ correspond à un contact double maître esclave, chaque surface ayant des poids différents. Cette pondération est très utilisée si un contact double maître/esclave est souhaité alors que les densités de maillage sont différentes.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.2.3 Formulation du glissement

Trois approches sont possibles pour la formulation du glissement dans Abaqus/explicit® :

- l'approche « finite sliding » est le cas le plus général, qui permet de prendre en compte des mouvements arbitraires des deux surfaces en contact. Il s'agit du cas défini par défaut si aucune formulation de glissement n'est spécifiée ;
- l'approche « small sliding », pour laquelle les corps impliqués dans le contact peuvent faire de grands mouvements mais les glissements entre les deux surfaces sont faibles ;
- l'approche « infinitesimal sliding », plus rarement utilisée, qui impose un mouvement relatif des surfaces et un mouvement global des corps en contact très faible.

5.2.3.1 Formulation « finite sliding »

Cette formulation est la plus utilisée dans les codes de calcul ; elle permet d'avoir un glissement et une rotation arbitraires des surfaces en contact et est donc utilisée dans les cas de grandes déformations et rotations. De plus, elle inclut les effets dus aux non linéarités géométriques.

5.2.3.2 Formulation « small sliding »

Souvent, la formulation « finite sliding » n'est pas nécessaire, même en cas de non linéarités géométriques. Dans ces cas-là, une formulation « small sliding » peut être suffisante ; cette formulation, comme la formulation « finite sliding », suppose que les surfaces peuvent subir arbitrairement de grandes rotations mais que le nœud esclave va interagir avec le même domaine local de la surface maîtresse pendant toute la durée de l'analyse. Cette formulation est donc utilisée lorsque les nœuds esclaves doivent glisser de moins de la longueur d'un élément. Par contre, cette formulation ne peut être utilisée pour le « contact pair » par pénalisation.

5.2.3.3 Formulation « infinitesimal sliding »

Cette formulation revient à choisir une formulation de type « small sliding » en ajoutant une formulation en petits mouvements. Elle permet donc des mouvements relatifs des surfaces et des mouvements absolus du modèle très faibles et ignore les non linéarités géométriques. De même que la formulation « small sliding », la formulation « infinitesimal sliding » ne peut être utilisée dans le cas d'un algorithme de contact par pénalisation. Le choix entre ces trois formulations est effectué en fonction de la configuration du calcul (type de renfort, cas de sollicitation…), comme expliqué dans le paragraphe 5.2.4.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.2.4 Application aux renforts

Cette partie reprend les concepts décrits dans la partie précédente en les appliquant au cas particulier des mèches de renforts tissés. Dans ce cas, les surfaces de contact sont définies par des faces d'éléments, comme décrit au chapitre 3. Quatre cas de contact sont à distinguer :

- les contacts entre mèches d'un même réseau,
- les contacts entre mèches de réseaux différents,
- les contacts entre mèches et outils dans le cas des calculs en compaction,
- les contacts entre deux plis de renforts pour les calculs en multicouche.

5.2.4.1 Contacts entre mèches d'un même réseau

Dans tous les cas de renforts, il s'agit d'un contact entre deux solides déformables, impliquant un algorithme de contact de type cinématique. De manière générale et plus particulièrement pour les trois renforts de l'étude, les mèches d'un même réseau présentent une densité de maillage comparable. Les pénétrations de nœuds de la surface d'une mèche dans la mèche opposée sont alors équivalentes quelle que soit la mèche considérée. Le contact est donc de type double maître/esclave "classique", c'est-à-dire avec un facteur de pondération de 0.5 de manière à réduire les interpénétrations des nœuds dans les surfaces des différentes mèches. Dans ce cas, de grandes déformations et grands déplacements existent entre les deux mèches. La formulation du contact est donc de type « finite sliding ». Les propriétés mécaniques du contact sont de type frottement ; il y a donc définition d'une condition d'interaction en frottement avec indication du coefficient de frottement, déterminé grâce aux essais résumés au chapitre 4.

5.2.4.2 Contacts entre mèches de réseaux différents

Pour les renforts G986® et G1151®, les observations sont les mêmes que pour les contacts entre mèches d'un même réseau : il s'agit d'un contact entre deux solides déformables, de densités de maillage équivalentes. La formulation du contact dépend du calcul ; dans les trois cas de sollicitations considérés (traction, compression et cisaillement) et pour les trois renforts de l'étude, le contact entre mèches de réseaux différents est de type cinématique. Pour le G986® et le G1151® les densités de maillage sont équivalentes ; le contact est donc défini comme double maître/esclave. En outre, les déformations et déplacements sont suffisamment importants pour utiliser une formulation de glissement de type « finite sliding ». De même que précédemment, une condition d'interaction en frottement des surfaces est définie.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Dans le cas du taffetas de verre, la définition du contact est quelque peu différente. En effet, les mèches des deux réseaux présentent d'une part, des densités de maillages différentes, liées à des tailles de mèches différentes et d'autre part, les mèches des deux réseaux sont collées. Il faut donc pouvoir retranscrire ces conditions dans la formulation du contact. Les deux solides étant déformables, le contact est encore une fois de type cinématique. Par contre, un contact double maître/esclave "classique" (f=0.5) engendre des interpénétrations des nœuds des deux réseaux. A l'inverse, si un contact simple maître/esclave est considéré, les mèches ayant la plus faible densité de maillage, c'est-à-dire les mèches de chaîne devront être maîtresses, avec éventuellement une pondération. Enfin l'aspect collé des mèches est traduit par la définition d'interaction de type adhérence (option « ROUGH » d'Abaqus), avec une formulation de type « small sliding ».

5.2.4.3 Contacts entre mèches et outils

Dans le cas de calculs en compaction, les outils sont modélisés par des surfaces rigides. Il n'existe pas de conditions aux limites ou de périodicité dans le sens du contact. Il est donc possible d'utiliser dans ce cas un algorithme de contact cinématique. Le contact est alors de type simple maître/esclave, la surface rigide étant maîtresse et la formulation du contact est de type « finite sliding », de manière à retranscrire le phénomène de glissement lié à la désondulation des mèches sous compaction. De même que précédemment, il y a définition des conditions d'interaction de type frottement avec détermination du coefficient de frottement grâce aux essais de frottement tissu/métal.

5.2.4.4 Contacts entre deux plis de renforts

Dans ce cas, il faut distinguer les calculs en multicouche avec et sans nesting. Dans les cas sans nesting, il est procédé de même que pour les mèches d'un même réseau, c'est-à-dire un contact de type double maître/esclave cinématique. S'il y a nesting entre les couches, les mèches avec des densités de maillage différentes sont en contact (cas du taffetas de verre). Dans ce cas le contact sera de type cinématique double maître/esclave mais avec pondération. La formulation en glissement dans les deux cas est de type « finite sliding ». De même que précédemment, les conditions d'interaction sont définies par frottement avec des valeurs des coefficients de frottement obtenues par les essais.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.3 Simulations sur une mèche

5.3.1 Traction

Des essais de traction simple (Figure5.5) sont effectués sur la mèche droite de verre constitutive du taffetas Chomarat de manière à valider la loi de comportement et la démarche d'optimisation des calculs. Les simulations de traction ont déjà été détaillées dans la partie 5.1. Les résultats sont obtenus en 16s et la déformation maximale dans le sens de la traction tend vers 10%, ce qui est bien sûr nettement supérieur aux valeurs réelles de rupture mais permet de montrer la stabilité du calcul. Ces résultats sont alors comparés aux essais expérimentaux (Figure5.6). La Figure5.6 montre qu'à la fois la courbe numérique et la courbe issue du calcul de la loi de comportement permettent de représenter la pente de l'essai de traction. Il peut être également constaté que les paramètres du schéma explicite identifiés au paragraphe 5.1 permettent d'obtenir un calcul très rapide avec une faible dégradation de la précision. Même au dernier incrément, l'écart entre les valeurs extrêmes sur les déformations est négligeable (0.05%, Figure5.5), les contraintes présentant quant à elles une variation maximale de l'ordre de 5% seulement (Figure5.6).

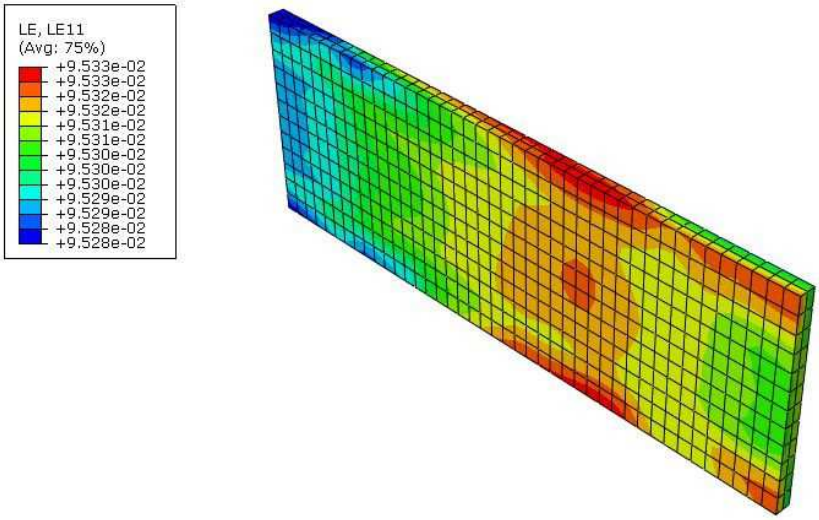


Figure5.5. Traction sur mèche droite

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

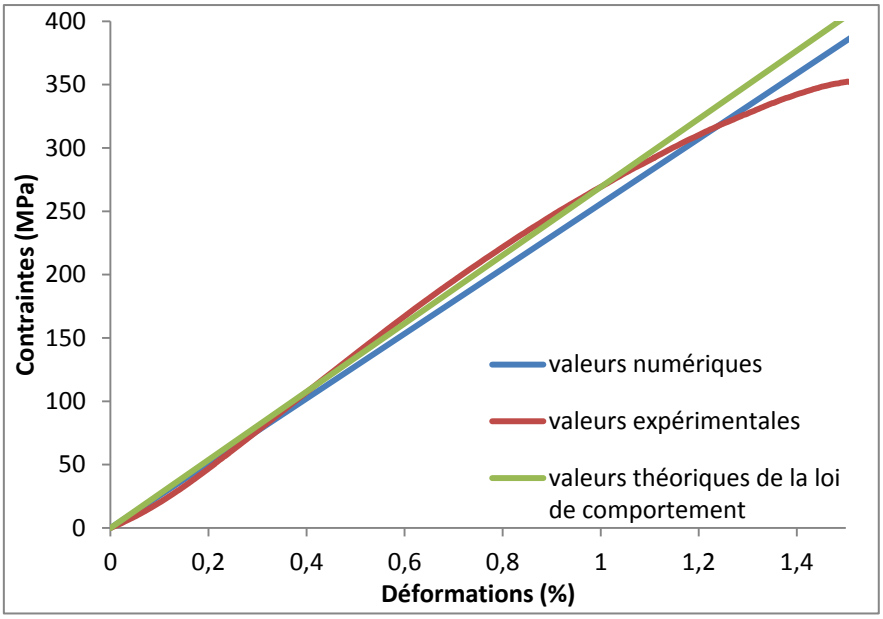


Figure5.6. Comparaison des courbes expérimentales, théoriques et numériques pour un essai de traction sur mèche droite

5.3.2 Compaction

Les essais de compaction sur mèche droite se font en trois temps (donc en trois « step »). Dans un premier temps, la fraction volumique de fibres et donc la rigidité sont très faibles. Il faut donc imposer une vitesse faible, linéairement croissante ainsi qu'un « mass scaling » faible ou nul de manière à respecter le critère sur les énergies et éviter de perturber les résultats. La rigidité augmente ensuite, entrainant une augmentation de l'énergie de déformation. Il est alors possible d'introduire du « mass scaling » et d'augmenter la vitesse, avec un profil de type « smooth », de manière à limiter le temps de calcul. Dans une dernière étape, la rigidité croit très rapidement ; un « mass scaling » important est alors imposé et la vitesse est diminuée progressivement pour assurer la convergence du calcul. Les valeurs imposées sont présentées en Tableau5.3.

Profil de vitesse		Step 1		Step 2			Step 3	
		linéaire		smooth			linéaire	
vitesse	Temps (s)	0	0.001	0	0.1	0.7	0	1.2
	Amplitude (mm/s)	0	0.001	0.001	0.1	0.1	0.1	0
Mass scaling		0		100			100	

Tableau5.3. Paramètres du calcul de compaction sur mèche droite

Pour ce calcul, les outils sont modélisés par des surfaces analytiques rigides en contact de type cinématique avec la mèche. Le coefficient de frottement entre mèche et outils est de 0.39. Les essais s'effectuent jusqu'à une déformation maximale de 65% et les résultats sont présentés en Figure5.7 et Figure5.8. Les paramètres définis précédemment permettent de faire converger les calculs sans

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

distorsion d'éléments. Les valeurs sont validées par comparaison des énergies cinétique et de déformation. La courbe en Figure5.7 présente les contraintes dans la direction 3 en fonction de la fraction volumique de fibres pour les résultats numériques, expérimentaux et obtenus par le calcul théorique de la loi de comportement (recalage). Ce calcul présente d'excellents résultats : la compaction maximale atteinte est de l'ordre de 65% avec une bonne homogénéité (Figure5.8(a) et (b)) des résultats (moins de 0.5% d'écart sur les valeurs). Par contre le temps de calcul est d'environ 12 heures ce qui est élevé pour une seule mèche.

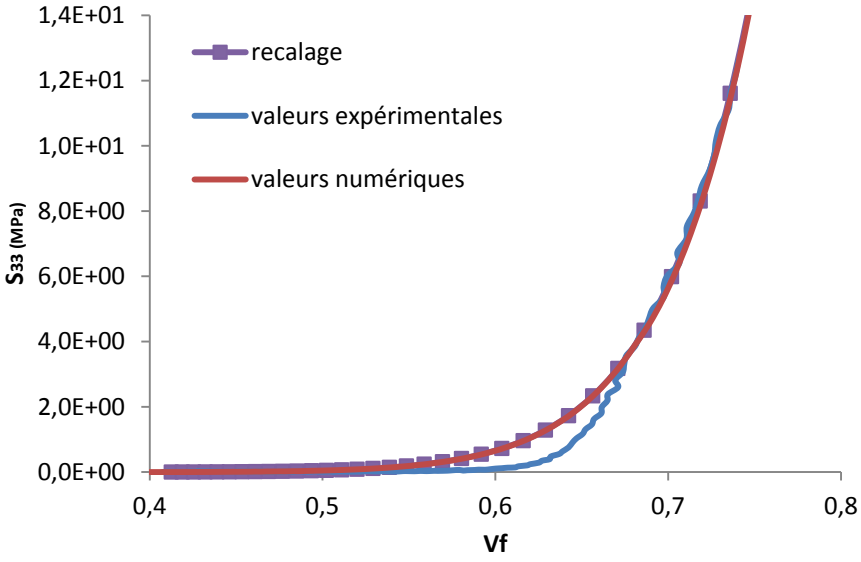
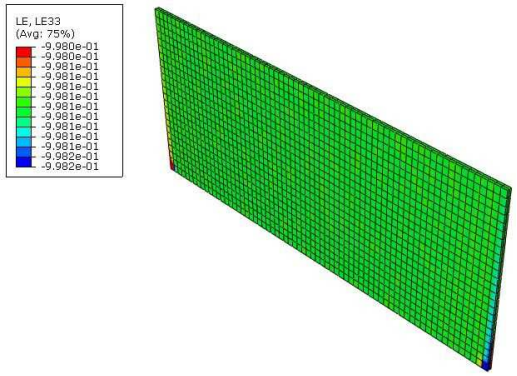


Figure5.7. Comparaison des résultats numériques, expérimentaux et obtenus par recalage pour un essai de compaction sur mèche droite

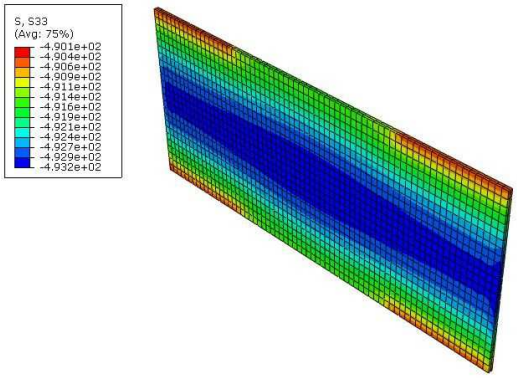
Cependant, le temps de calcul peut être diminué en imposant un « mass scaling » de 100 au premier « step », permettant de réduire le temps de calcul à 1h mais avec une moins bonne homogénéité des résultats ((Figure5.8(c) et (d))). Les résultats de ces deux simulations sont comparés en Figure5.8. Dans les deux cas, la répartition des déformations est homogène (moins de 1% d'écart sur les valeurs) ; la différence est plus notable sur les contraintes. En effet, il est constaté une variation des contraintes de l'ordre de 1% dans le premier cas (sans « mass scaling ») et de 20% dans le second cas. Cependant, la valeur des contraintes est correcte sur les bords de la mèche et la différence sur la valeur moyenne est inférieure à 10%. Cette solution semble être un bon compromis si une grande précision dans la répartition locale des contraintes n'est pas nécessaire, par exemple pour un modèle où la géométrie déformée ou des valeurs globales de loi de comportement seraient recherchées. Ces résultats montrent qu'il est désormais possible d'adapter le temps de calcul et la qualité des résultats au cas considéré. En effet, pour une simulation sur une maille élémentaire nécessitant des résultats plus précis, le choix se portera sur un calcul de même type que celui sans « mass scaling », prenant certes plus de temps, mais assurant une meilleure homogénéité et précision des valeurs. Pour une

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

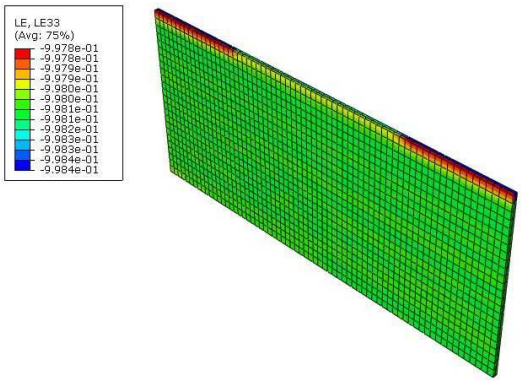
simulation sur un modèle plus grand (plusieurs cellules élémentaires voire partie de renfort), le choix pourrait plutôt se porter sur un calcul plus court avec des résultats plus grossiers en terme de répartition.



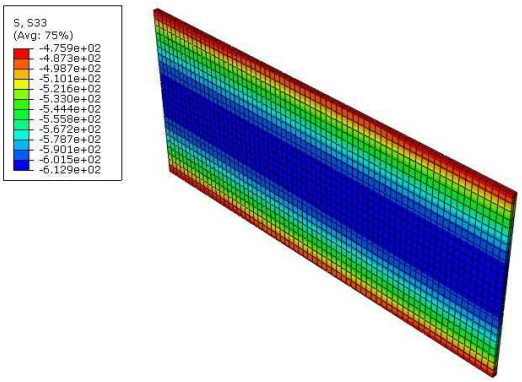
(a) Répartition des déformations dans le cas sans mass scaling au step 1



(b) Répartition des contraintes dans le cas sans mass scaling au step 1



(c) Répartition des déformations dans le cas avec mass scaling au step 1



(d) Répartition des contraintes dans le cas avec mass scaling au step 1

Figure5.8. Comparaison de la répartition des contraintes et des déformations dans les cas de simulation avec et sans mass scaling au premier step

5.4 Simulations de mailles élémentaires de renforts fibreux

Les chapitres précédents permettent maintenant de disposer de tous les éléments nécessaires à la mise en œuvre de simulations sur cellule élémentaire : une géométrie cohérente maillée, une loi et des paramètres de comportement identifiés ou approchés, des paramètres du schéma explicite adaptés au type de sollicitation. La mise en place de tous ces outils ayant occupée une grande partie du temps alloué à ce travail, il n'a pas été possible de mettre en œuvre beaucoup de simulations. D'autant que, bien qu'accélérées, ces simulations restent longues. De plus, comme cela a été expliqué au chapitre 4, il n'était pas non plus raisonnable de réaliser des essais expérimentaux pour

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

identifier tous les paramètres des lois de comportement des mèches considérées ici. Cette partie présente donc des résultats préliminaires obtenus grâce à cette stratégie pour les trois renforts décrits dans ce document, chacun d'eux étant soumis à un des trois modes de déformations principaux apparaissant lors de la mise en forme. Les trois calculs présentés ci-après ont ainsi pour but de valider la chaine de simulation créée et de démontrer son potentiel. Les résultats pourraient être affinés grâce à des campagnes d'essais expérimentaux et numériques plus approfondies.

Pour l'ensemble des calculs ci-dessous et conformément à la stratégie mise en place, la géométrie maillée et la mise en données du calcul sont issues des outils développés aux chapitres 2 et 3. Les paramètres de comportement utilisés sont ceux définis au chapitre 4 et les paramètres du schéma explicite sont inspirés de ceux identifiés au paragraphe 5.3.

5.4.1 Compaction sur le taffetas Chomarat

Lors de la mise en œuvre des renforts fibreux par le procédé RTM, les couches de renforts sont compactées afin d'atteindre le taux de fibres recherché dans le composite. La compaction est donc un mode de sollicitation essentiel pour la modélisation et la compréhension du procédé RTM. La motivation principale de cette étude est de créer des outils permettant de fournir une géométrie déformée compactée du taffetas Chomarat dans le cadre du projet LCM-TP. Dans cette partie, les résultats associés à la compaction d'une cellule élémentaire de taffetas Chomarat sont présentés (Figure5.9, Figure5.10). Outre la géométrie déformée (Figure5.9), une comparaison avec la courbe expérimentale de compaction identifiée au chapitre 4 est donnée (Figure5.10).

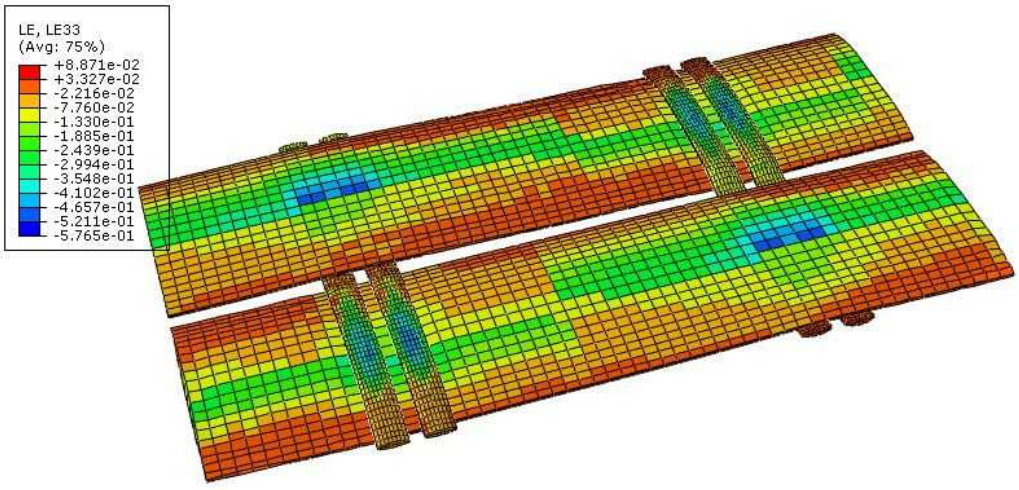


Figure5.9. Géométrie déformée d'une maille élémentaire de taffetas Chomarat après 41% de compaction

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

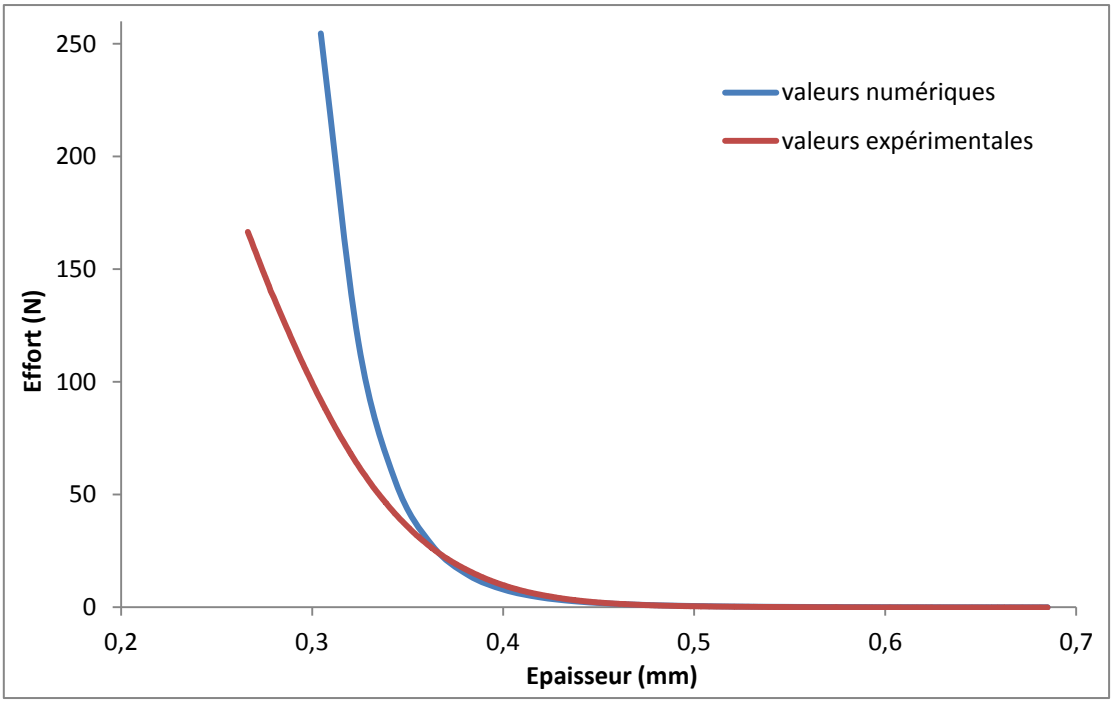


Figure5.10. Courbe de compaction du taffetas Chomarat : comparaison numérique/expérimental

Les résultats montrent une bonne corrélation entre expérience et simulation, qui pourrait encore être améliorée grâce à une meilleure connaissance des paramètres matériaux de la « petite mèche » (mèche de trame), qui sont pour le moment issus de l'extrapolation de ceux de la « grande mèche » (mèche de chaine). En outre, l'essai de compaction expérimental a été réalisé sur un morceau de renfort composé de 5 mèches de chaine et 24 mèches de trame, soit l'équivalent de 15 cellules l'élémentaires avec une forte variabilité entre les paramètres de ces cellules (Figure5.11). Les outils développés, permettraient également de prendre en compte la variabilité observée sur le renfort, la maille élémentaire présentée ici étant issue de valeurs moyennes. Le temps a manqué pour réaliser d'avantage de simulations (variabilité, multi-couche). Ceux-ci constituent une perspective intéressante pour la suite de ce travail.

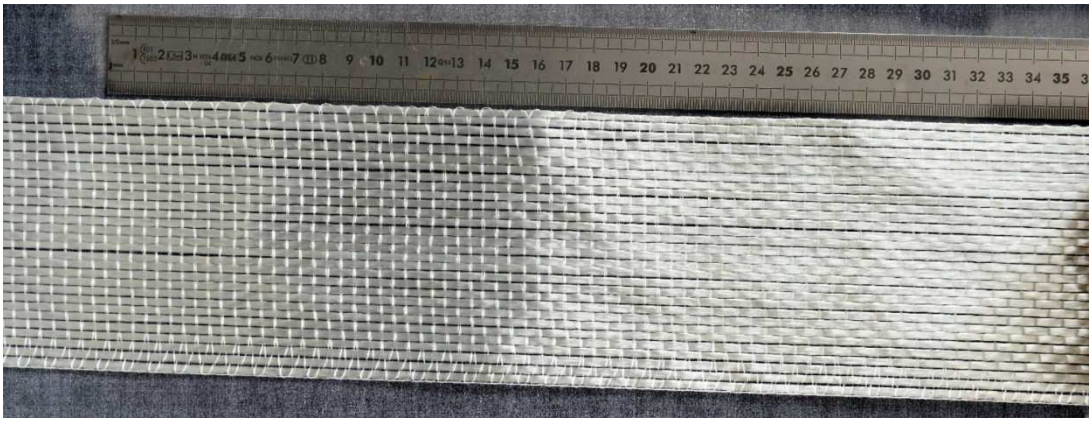


Figure5.11. Renfort de taffetas Chomarat. Variabilité des cellules élémentaires

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.4.2 Cisaillement sur le G986®

Actuellement, la volonté d'augmenter l'emploi des composites dans les structures conduit à la réalisation de pièces de plus en plus complexes, intégrant toujours plus de fonctions. La mise en forme des renforts sur des géométries non-développables est donc un enjeu majeur. Dans ce cas, le mode principal de sollicitation du renfort est le cisaillement. En effet, la « formabilité » d'un renfort, c'est-à-dire sa capacité à épouser une forme gauche, dépend, pour une grande part, de sa capacité à se cisailler. Ainsi, dans cette partie, les résultats associés au cisaillement d'une cellule élémentaire de sergé G986® sont présentés (Figure5.12, Figure5.13). Outre la géométrie déformée (Figure5.12), une comparaison avec la courbe expérimentale de cisaillement issue de [BAD08a] est donnée (Figure5.13).

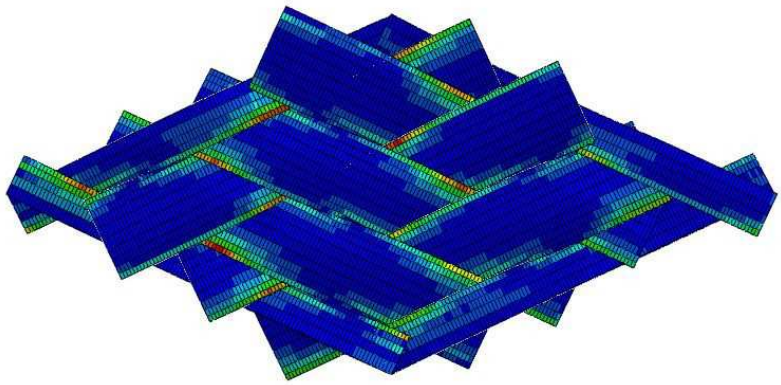


Figure5.12. Géométrie déformée d'une maille élémentaire de sergé G986® après 50° de cisaillement

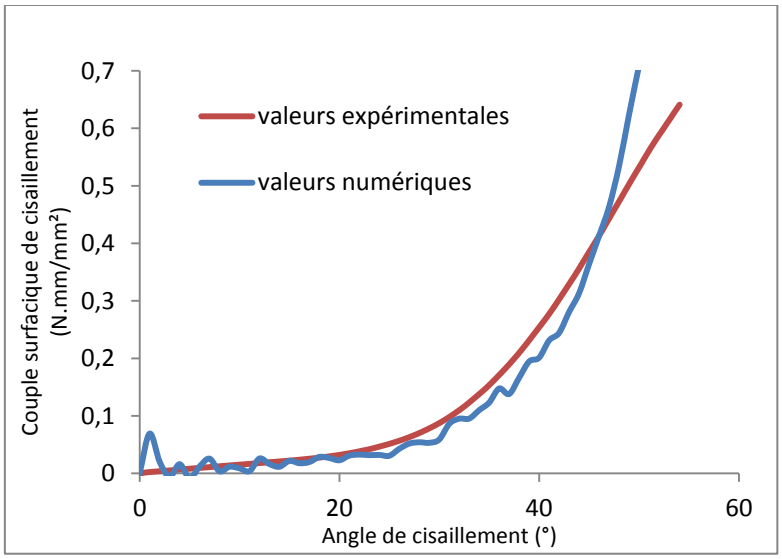


Figure5.13. Courbe de cisaillement du sergé G986® : comparaison numérique/expérimental

Les résultats obtenus, s'ils ne sont pas parfaits comme attendu et expliqué en introduction de cette partie sont tout à fait encourageants. Si une meilleure identification de tous les paramètres matériaux de la mèche (expérimentale) permettrait sans aucun doute d'aboutir à des résultats plus

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

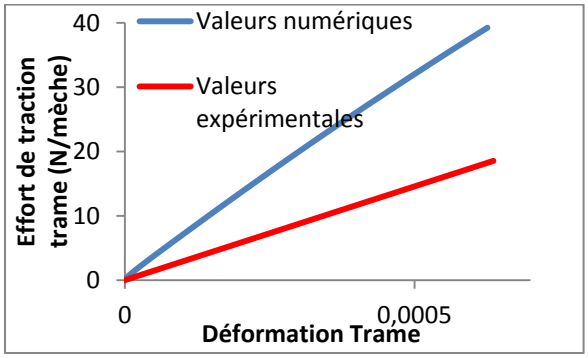
précis, les calculs permettent d'atteindre le « blocage » en cisaillement et la courbe de comportement obtenue montre une cohérence intéressante avec la courbe expérimentale. Cela permet de montrer qu'une estimation des propriétés de la mèche à partir de celles de la fibre et de la structure de la mèche permet d'aboutir à une bonne estimation du comportement en cisaillement. En outre, les paramètres du schéma explicite choisis ici pour optimiser les temps de calcul conduisent à de petites instabilités en début de courbe, mais qui restent dans ce cas parfaitement acceptables. Ces instabilités pourraient être atténuées en modifiant les paramètres du schéma explicite, au détriment du temps de calcul.

5.4.3 Traction biaxiale sur le G1151®

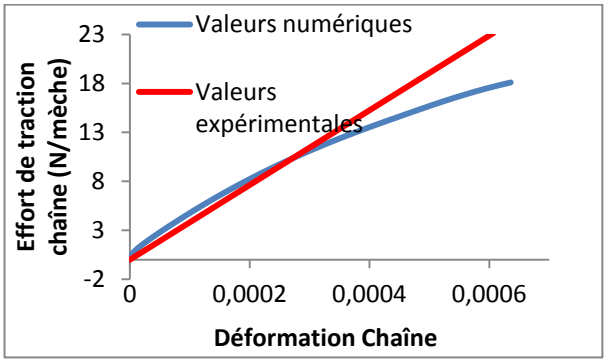
Le dernier mode de déformation étudié est la traction biaxiale. La performance des renforts fibreux est en effet fortement liée à leur rigidité en traction dans la direction des mèches. Le mode de traction biaxiale est par conséquent celui qui met en jeu la plus grande énergie de déformation ; il est donc essentiel de bien modéliser le comportement associé. Les outils se sont montrés capables de modéliser avec une bonne précision la géométrie maillée d'une cellule élémentaire de G1151®. Afin de valider la chaîne de calcul complète sur ce type de renforts, une simulation de traction équi-biaxiale sur l'interlock G1151® est présentée dans cette partie. La géométrie déformée ainsi qu'une comparaison expérience/simulation sont présentées Figure5.14 et Figure5.15.

Figure5.14. Géométrie déformée d'une maille élémentaire de G1151® sous traction équi-biaxiale

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(a) Tension et déformation trame



(b) Tension et déformation chaîne

Figure5.15. Courbes de traction équi-biaxiale du G1151® : comparaison numérique/expérimental

La conclusion est la même que pour le cas précédent : les résultats obtenus ne sont pas parfaits, comme attendu, mais sont tout à fait encourageants. Ici encore, une meilleure identification (expérimentale) de tous les paramètres matériaux de la mèche permettrait sans aucun doute d'aboutir à des résultats plus précis. Malgré tout, les courbes de comportement obtenues montrent une cohérence intéressante avec les courbes expérimentales. Cela permet ainsi de montrer qu'une estimation des propriétés de la mèche à partir de celles de la fibre et de la structure de la mèche permet d'aboutir à une estimation correcte du comportement en traction.

Ce qui semble réellement intéressant dans ce cas est la capacité du modèle à reproduire la forme des courbes de comportement obtenues expérimentalement, qui est pourtant assez différente de celle attendue. En effet, malgré les différences notables d'architecture dans les deux directions, l'ondulation des mèches de chaîne n'introduit pas de réelle non linéarité dans le comportement équi-biaxial et les efforts obtenus sur les mèches de trame sont proches de ceux obtenus sur les mèches de chaîne. Il serait maintenant intéressant de mener des calculs sur tous les rapports de déformations pour reconstruire le réseau complet de courbes de traction biaxiale et les surfaces de comportement. Ce dernier cas est particulièrement intéressant car il est très long et difficile d'obtenir expérimentalement une surface de comportement complète. En effet, si une meilleure approche des paramètres matériaux de la mèche permet d'affiner un peu les résultats et si la capacité des simulations à reproduire le comportement du G1151® sur les autres rapports de déformations se confirme, l'identification de la loi de comportement biaxiale par des essais virtuels à l'échelle mésoscopique sera une véritable alternative à l'approche expérimentale.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

5.5 Conclusion

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ce dernier chapitre. Dans un premier temps, des stratégies d'amélioration des paramètres du schéma explicite, basées sur des simulations sur mèche seule ont été proposées. En complément d'une bonne gestion du contact elles permettent d'améliorer les performances du calcul mais aussi et surtout d'adapter le temps de calcul et la qualité des résultats au cas considéré. Ensuite, la capacité de la chaîne d'outils créée à réaliser des simulations sur des mailles élémentaires de tout type dans les principaux modes de déformations mis en jeu lors de la mise en forme a été démontrée et illustrée. Le peu de temps restant pour mener à bien ces simulations n'a pas permis d'obtenir des résultats plus précis, mais les valeurs obtenues sont malgré tout cohérentes et très prometteuses, d'autant plus que les comportements de mèche ont été pour la plupart déduits de ceux des fibres et de la structure de la mèche. Les outils étant en place, il faut maintenant les utiliser et les améliorer pour atteindre le niveau de précision requis. Mais au-delà des imprécisions obtenues, le plus intéressant dans la démarche de calcul proposée est sans aucun doute qu'elle ouvre la porte à des « essais virtuels » prédictifs qui peuvent alors se présenter comme une véritable alternative aux essais expérimentaux.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ces travaux de thèse concernent la mise en place d'une stratégie permettant la mise en œuvre de composites à renforts tissés et matrice thermoplastique. Ils s'inscrivent dans le cadre du projet LCM-TP déposé par l'institut Carnot I@L. Ces travaux ont fait l'objet de deux thèses : la première, soutenue en novembre 2011 par Ghislain Van Den Broek d'Obrenan, traite de l'injection de résine thermoplastique au cours du procédé RTM. La seconde, faisant l'objet de ce manuscrit, traite de la première étape du procédé, c'est-à-dire du préformage de renforts tissés.

L'objectif de ce travail était de définir une stratégie et des outils efficaces permettant d'aboutir à la simulation à l'échelle mésoscopique (c'est-à-dire celle de la mèche) des déformations de renforts secs en cours de préformage. Parmi les nombreuses applications de ces simulations, la géométrie déformée du renfort après formage est en effet un élément clé pour l'étape d'injection et le comportement de la pièce finale. Pour atteindre cet objectif, plusieurs étapes ont été considérées, permettant, à partir des caractéristiques géométriques du renfort considéré et des caractéristiques mécaniques des fibres constituant les mèches de ce renfort, d'aboutir à la déformation sous diverses sollicitations.

Afin de mener à bien des calculs à l'échelle mésoscopique, la première étape est de disposer de la géométrie du renfort à l'état non déformé. Cette étape est cruciale puisque préalable à toute démarche de calcul. Elle est également difficile, notamment pour les mailles complexes (interlocks, 3D), car les mèches une fois tissées dans le renfort sont de formes gauches et la gestion des nombreux contacts demeure encore aujourd'hui un challenge. En outre, la perspective de mener des études paramétriques ou de sensibilité nécessite une procédure rapide et fiable.

La principale difficulté de cette modélisation géométrique est d'obtenir une bonne description des zones de contact (surfaciques) entre les mèches qui jouent un rôle clé dans le comportement mécanique. Pour atteindre ce premier objectif une stratégie de modélisation CAO 3D automatisée et cohérente de mailles élémentaires 2D et interlocks a été définie et programmée. Si elle est basée sur un concept et un outil existant au laboratoire PRISME [HIV05] pour les mailles classiques de renfort 2D, la généralisation aux mailles interlock a conduit à la réécriture complète du modèle. Grâce au développement de cet outil, la création de la géométrie se fait sans intervention de l'utilisateur après la définition des paramètres géométriques de la maille élémentaire. Il permet la modélisation de géométries complexes (interlocks), directement exploitables pour les calculs, avec prise en compte et

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

traitement de l'ensemble des contacts existants entre les mèches de la cellule élémentaire (longitudinaux, transverses, latéraux), en seulement quelques dizaines de minutes. Ce modeleur est aujourd'hui rassemblé dans un pack de routines Scilab® et VBA sous Excel®, appelé GeoFab. Les géométries obtenues sur les mailles élémentaires étudiées dans ce document, notamment celle de G1151®, montrent une très bonne comparaison avec les images de tomographie. GeoFab permet ainsi de répondre à l'objectif fixé : obtenir rapidement et automatiquement des cellules élémentaires cohérentes, traitant toutes les zones de contact. Bien sûr le modeleur peut encore être amélioré, pour se rapprocher encore d'avantage de la réalité d'une part, mais aussi en terme d'automatisation d'autre part. En effet, la mise en données reste une étape encore assez délicate et lourde notamment lorsqu'il existe un grand nombre de mèches. De plus la difficulté de représenter une mèche hétérogène par un solide continu peut conduire à des formes peu réalistes localement, ce qui conduit à rectifier la mise en données. Ainsi des outils d'assistance à la mise en données seraient utiles, voire même une lecture directe sur des images de tomographie. Des travaux sur ce thème sont d'ailleurs en cours au LaMCoS (thèse CIFRE de Naïm Naouar en cours en collaboration avec SNECMA).

La géométrie du renfort maintenant disponible, la seconde étape consiste à créer un maillage 3D hexaédrique cohérent et automatique de ces géométries. En effet, les simulations à l'échelle mésoscopique réalisées au LaMCoS [BAD08a, NGU11] exploitent un maillage héxahédrique (C3D8R). Dans ce cas encore, la difficulté provient des formes gauches des mèches qui empêchent toute procédure de maillage automatique standard. Une méthodologie de maillage automatisée a donc été développée et codée dans des routines python. L'outil créé permet de générer automatiquement le maillage de tous types de renforts à partir de la géométrie CAO 3D créée dans GeoFab, des paramètres géométriques de la maille et des paramètres du maillage souhaités par l'utilisateur. Outre l'étape de maillage, la mise en données des calculs de mailles élémentaires comporte de nombreuses étapes qui s'avèrent très consommatrices de temps, notamment lorsque le nombre de mèches devient grand. Ainsi l'optimisation de la stratégie de calcul a conduit à mettre en place d'autres routines python permettant d'automatiser également ces étapes. L'outil développé permet en effet de créer les fichiers contenant les paramètres nécessaires à la mise en place des calculs : coordonnées des nœuds, tables de connectivité des éléments, réorientation automatique des éléments dans les directions matérielles, groupes de nœuds pour les conditions aux limites et définition des paires de surfaces en contact (ce qui serait très pénible à faire manuellement). Ce dernier point permet, en effet, de réduire significativement la taille des zones en contact. L'ensemble de ces outils a conduit à un gain de temps (de plusieurs jours à quelques heures) lors de la mise en place des calculs. Quelques améliorations peuvent néanmoins encore être apportées, notamment au niveau de la création des surfaces de contact entre mèches. En effet, la création de ces surfaces est

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

basée sur la localisation des sections précédant et suivant le contact. Actuellement, la routine de localisation des surfaces fonctionne parfaitement pour les renforts 2D mais, pour les renforts denses, contenant plusieurs mèches par zone il peut encore y avoir confusion entre deux mèches superposées, nécessitant une intervention de l'utilisateur. Cette adaptation ne pose néanmoins aucun problème de fond et sera réalisée dans un avenir proche. De plus, de même que pour l'étape de modélisation, la mise en données des paramètres de maillage pourrait être améliorée par la mise en place d'outils d'assistance ou d'une interface graphique plus conviviale. Enfin, il serait possible de pousser encore un peu plus l'automatisation de la mise en place des calculs en générant directement tous les fichiers nécessaires à chaque cas de sollicitation.

Si le fait de disposer d'une géométrie maillée représentative est un préalable au calcul, l'autre point clé pour la mise en œuvre des calculs est la loi de comportement du solide homogène équivalent à la mèche de fibres. En effet, la modélisation d'une mèche structurellement hétérogène par un matériau continu homogène nécessite la création d'une loi de comportement spécifique permettant de retranscrire le plus fidèlement possible le comportement d'un enchevêtrement de fibres. Ce point reste aussi aujourd'hui un challenge comme le montre les travaux importants et récents sur lesquels cette étude s'est appuyée [LAT11, TOL98] Ainsi, la troisième étape de cette chaine de calculs concerne la mise en place de la loi de comportement. A partir d'une loi de comportement hypoélastique intégrée dans une routine utilisateur VUMAT Abaqus® créée par P. Badel [BAD08a], une nouvelle approche a été proposée. Directement basée sur les formes de lois expérimentales reconnues dans la littérature, son originalité est, en outre, qu'elle permet à la fois de stabiliser les calculs et d'être identifiée uniquement par des essais sur les mèches seules sans recours à une étape d'identification inverse par des essais sur le renfort. Ce point est essentiel car il permet d'entrevoir des analyses complètement prédictives, y compris sur des renforts non-existants comme cela sera détaillé dans le dernier paragraphe de cette conclusion. Au niveau des perspectives, un point reste malgré tout à améliorer : l'identification du coefficient de Poisson du matériau homogène équivalent. Un essai spécifique a été conçu et mis en place pour répondre à ce besoin. Si les résultats sont prometteurs, ils sont encore loin d'être complètement satisfaisants et une amélioration du protocole couplée à une campagne d'essais plus riche serait nécessaire. Enfin, il a été observé que les déformations transverses en compaction peuvent conduire à certaines instabilités numériques qui, bien que modestes et ne perturbant pas significativement les résultats, sont à résoudre.

Enfin, les performances des simulations ont été améliorées par la mise en place de procédures et de critères d'analyse sur une mèche seule, grâce à la prise en compte et à la maitrise des paramètres des calculs explicites adaptés à chaque cas de simulation, mais aussi à une meilleure gestion des contacts. Aujourd'hui, si les temps de calculs restent tout de même importants, il est possible de réaliser des simulations sur renforts complexes en seulement quelques heures. Si, bien sûr, il est

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

encore possible d'espérer améliorer l'efficacité des calculs et les temps de calculs associés, l'accroissement de l'efficacité de la chaîne de modélisation/calcul permet d'ouvrir la voie vers des simulations de mailles complexes ou d'un nombre important de mailles élémentaires pour prendre en compte la variabilité de la géométrie dans les renforts par exemple.

Le temps nécessaire à la mise en place de ces outils n'a pas permis de réaliser un grand nombre de simulations et les résultats présentés sont d'avantage des résultats préliminaires. S'ils sont loin d'être parfaits, ils sont néanmoins très prometteurs, car les lois de comportement obtenues sur les modes principaux de déformations mis en jeu dans la mise en forme des renforts fibreux (compaction, cisaillement, traction) permettent d'approcher de façon satisfaisante le comportement réel du renfort, même lorsque seules des données purement bibliographique sur le comportement des fibres et la constitution des mèches sont utilisées (Traction biaxiale sur G1151®).

Au final cette étude a permis de mettre en place une série d'outils et de méthodologies dont le champ d'applications est très vaste. S'il n'était pas envisageable de les mener à bien dans le cadre de cette thèse, il semble intéressant de montrer comment ces outils peuvent être exploités dans l'avenir. Le dernier paragraphe de ce document y est consacré.

L'automatisation de la stratégie utilisée et la diminution des temps de calculs qui y est associée permet d'envisager des simulations sur des cellules élémentaires plus grandes (interlocks, 3D) mais aussi sur beaucoup plus d'une cellule élémentaire. S'il ne semble pas encore raisonnable d'envisager des simulations de mise en forme de pièces industrielles, ce dernier point ouvre la voie, à moyen terme, à des simulations de mise en forme à l'échelle mésoscopique sur une partie de renfort. Pour ce faire, il est aussi possible d'envisager une automatisation complète du processus, c'est-à-dire une seule étape de mise en données avec toutes les informations nécessaires aux calculs (paramètres géométriques, mécaniques, de maillage et cas de sollicitation) ne nécessitant plus aucune intervention de l'utilisateur jusqu'à l'obtention des résultats finaux des calculs.

Un autre point important est la mise en place de la loi de comportement ; il est désormais possible d'obtenir le comportement du renfort à partir du comportement de la mèche sortie de bobine et du matériau constitutif des fibres (compaction sur taffetas Chomarat). Si les résultats ne sont pas encore aussi précis que ceux obtenus par une identification inverse, cette stratégie est prometteuse et il n'est donc plus nécessaire de réaliser des essais sur un renfort existant. Plusieurs applications sont alors possibles :

- l'obtention des lois de comportement de la cellule élémentaire par des essais virtuels de simulation à l'échelle mésoscopique, afin d'alimenter les codes de calcul à l'échelle macroscopique. C'est un enjeu d'autant plus important que les essais expérimentaux sur les renforts fibreux sont toujours longs, difficiles à réaliser et soumis à nombre de dispersions ;

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

- l'analyse paramétrique et de sensibilité qui permettra de tenir compte de la variabilité dans les renforts mais aussi de quantifier son influence sur les propriétés mécaniques.

Enfin, il est possible d'obtenir une excellente estimation des paramètres matériaux en traction à partir du comportement de la fibre et de la composition de la mèche (roving de verre ici, nombre de fibres, masse linéique) par une approche de type Weibull. En compaction, les paramètres identifiés expérimentalement sont également très proches des valeurs théoriques fournies pour un roving de verre ([TOL98], chapitre 4) et les calculs menés sur le G1151® se sont appuyés sur ces valeurs bibliographiques. Si le coefficient de Poisson pose encore quelques problèmes, il semble donc tout à fait envisageable d'obtenir une bonne estimation du comportement de la mèche et donc du renfort (voir paragraphe précédent) uniquement à partir des propriétés de la fibre et de sa constitution. Cela permet d'étudier le comportement et la déformation de renforts composés de mèches non existantes et, ainsi, d'analyser l'influence de la constitution de la mèche sur les propriétés mécaniques ou la perméabilité du renfort par exemple. Cette perspective est d'autant plus prometteuse que, bien que le modèle CAO développé puisse être utilisé pour créer des géométries approchées cohérentes de renforts par une estimation de l'ondulation, des approches se développent par exemple au LaMCoS dans le cadre du projet NumTiss (Thèse de Charlotte Florimond en cours) sur la simulation du procédé de tissage. Cela devrait permettre d'avoir, à moyen terme, une bien meilleure définition de la géométrie d'un renfort non existant. Le développement de la simulation des procédés de tissage, couplé aux outils présentés ici, permet alors d'envisager la création de renforts fibreux « à la demande ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

BIBLIOGRAPHIE

[ADA98] Adanur S. and Liao T., 3D modeling of textile composite preforms. Composites Part B: Engineering, 1998, vol. 29, n°6, pp. 787-793.

[AIM09] Aimène Y., Vidal-Sallé E., Hagège B., Sidoroff F., Boisse P., A hyperelastic approach for composite reinforcement large deformation analysis. Journal of Composite Materials, 2009.

[ALL09] Allaoui S., Hivet G., Billoet J.L., Experimental analysis of the contact between layers of dry fabrics. Int J Mater Form, 2009, vol. 2, n°1.

[ALL12] Allaoui S., Hivet G., Wendling A., Ouagne P., Soulat D., Influence of the dry woven fabrics meso-structure on fabric/fabric contact behavior. Journal of Composite Materials, 2012, vol. 46, n°6.

[BAD08a] Badel P., Analyse mésoscopique du comportement mécanique des renforts tissés de composites utilisant la tomographie aux rayons X. Thèse LaMCoS. Lyon : INSA de Lyon, 2008, 149 p.

[BAD08b] Badel P. et al., Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale. Composites Science and Technology, 2008, vol. 68, n°12 : pp. 2433-2440.

[BAD08c] Badel P., Vidal-Sallé E., Boisse P., Large deformation analysis of fibrous materials using rate constitutive equations. Computers & Structures, 2008, vol 86 n°11-12 : pp. 1164-1175.

[BAD09] Badel P. et al., Rate constitutive equations for computational analyses of textile composite reinforcement mechanical behaviour during forming. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, vol. 40, n°8, pp. 997-1007.

[BEL12] Bel S. et al., Finite element model for NCF composite reinforcement preforming: Importance of inter-ply sliding. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012(0).

[BEN07] Ben Boubaker B., Haussy B., Ganghoffer J.F., Discrete models of woven structures. Macroscopic approach. Composites Part B: Engineering, 2007, vol. 38, n°4, pp. 498-505.

[BER05] Berthelot J.M., Matériaux composites - Comportement mécanique et analyse des structures. 4ème éd. 2005, 645p.

[BIC97] Bickerton S., Advani S.G., Experimental investigation and flow visualization of the resin-transfer mold-filling process in a non-planar geometry. Composites Science and Technology, 1997, vol. 57, n°1, pp. 23-33.

[BIN04] Binetruy C., Physique du moulage des composites avancés : aspects théoriques. Techniques de l'ingénieur, 2004. AM 3 718.

[BOI01] Boisse P., Buet-Gautier K., Experimental Analysis and Modeling of Biaxial Mechanical Behavior of Woven Composite Reinforcements. Experimental Mechanics, 2001, vol. 41.

[BOI04] Boisse P., Mise en forme des renforts fibreux. Techniques de l'ingénieur, 2004. AM 3734, 10 p.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

[BOI05] Boisse P., Gasser A., Hagege B., Billoet J.L, Analysis of the mechanical behavior of woven fibrous material using virtual tests at the unit cell level. Journal of materials science, 2005, vol. 40, pp. 5955-5962.

[BOI06] Boisse P., Zouari B., Daniel J.L., Importance of in-plane shear rigidity in finite element analyses of woven fabric composite preforming. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, vol. 37, n°12, pp. 2201-2212.

[BOR03] Borouchaki H., Cherouat A., Drapage géométrique des compositesGeometrical draping of composite fabrics. Comptes Rendus Mecanique, 2003, vol. 331, n°6, pp. 437-442.

[BUE98] BUET-GAUTIER K., Analyse et simulation du comportement mécanique des renforts composites tissés. Thèse LMSP. Université d'Orléans, 1998, 129 p.

[BUN07] Buntain, M.J. and S. Bickerton, Modeling forces generated within rigid liquid composite molding tools. Part A: Experimental study. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, vol. 38, n°7, pp. 1729-1741.

[CAI92] Cai Z., Gutowski T., The 3-D Deformation Behavior of a Lubricated Fiber Bundle. Journal of Composite Materials, 1992.

[CAR06] Caramaro L., Textiles à usage technique. Techniques de l'ingénieur, 2006, AM 5-119, 8 p.

[CHA11] Adrien C., Approches hyperélastiques pour la modélisation du comportement mécanique de préformes tissées de composites. Thèse LaMCoS. Lyon : INSA de Lyon, 2011, 146 p.

[CHE06] Chen Z.-R., Ye L., Kruckenberg T., A micromechanical compaction model for woven fabric preforms. Part I: Single layer. Composites Science and Technology, 2006, vol. 66, n°16, pp. 3254-3262.

[CHE99] Chen B. and Chou T.-W., Compaction of woven-fabric preforms in liquid composite molding processes: single-layer deformation. Composites Science and Technology, 1999, vol. 59, n°10, pp. 1519-1526.

[CHI84] Chi Z., Chou T.W., Shen G., Determination of single fibre strength distribution from fibre bundle testings. Journal of materials science, 1984, vol. 19, pp. 3319-3324.

[COU08] Couegnat G., Approche multiéchelle du comportement mécanique de matériaux composites à renfort tissé. Thèse université Bordeaux 1, 2008, 163 p.

[DAL08] Dallies E., Berthereau A., Fibres de verre de renforcement. Techniques de l'ingénieur, 2008, AM 5132, 19p.

[DEB08] De Bilbao E., Analyse et identification du comportement en flexion des renforts fibreux de composites. Thèse université d'Orléans, 2008, 129 p.

[DEC11] De Carvalho N.V., Pinho S.T., Robinson P., Reducing the domain in the mechanical analysis of periodic structures, with application to woven composites. Composites Science and Technology, 2011, vol. 71, n°7, pp. 969-979.

[DEL09] De Luycker E. et al., Simulation of 3D interlock composite preforming. Composite Structures, 2009, vol. 88, n°4, pp. 615-623.

[DUP06] Dupupet G., Fibres de carbone. Techniques de l'ingénieur, 2006, AM 5134, 15 p.

[DUR05] DURVILLE D., Numerical simulation of entangled materials mechanical properties. Journal of materials science, 2005, vol. 40, pp. 6941-5943.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

[DUR07] Durville D., Prise en compte du contact-frottement au sein d'une assemblée à grand nombre de fibres pour l'identification des propriétés mécaniques de structures textiles. Huitième colloque national en Calcul des structures, Giens, 2007.

[DUR10] Durville D., Simulation of the mechanical behaviour of woven fabrics at the scale of fibers. International journal of material forming, 2010, vol. 3, pp. 1241-1251.

[DUR12] Durville D., Simulation du comportement mécanique de renforts textiles à l'échelle des fibres et de leurs interactions, GDR Week 2012, Lyon.

[DUR98] Durville D., Modélisation du comportement mécanique de câbles métalliques. Revue européenne des éléments finis, 1998, vol. 7, pp. 9-22.

[GAS00] Gasser A., Boisse P., Hanklar S., Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements. 3D simulations versus biaxial tests. Computational Materials Science, 2000, vol. 17, n°1, pp. 7-20.

[GAT10] GATOUILLAT S., Approche mésoscopique pour la mise en forme des renforts tissés de composites. Thèse LaMCoS, Lyon : INSA Lyon, 2010.

[GAY03] Gay D., Composite materials - design and applications. 2003, 523p.

[GHO07a] Ghoreishi S.R. et al., Analytical modeling of synthetic fiber ropes subjected to axial loads. Part I: A new continuum model for multilayered fibrous structures. International Journal of Solids and Structures, 2007, vol. 44, n°9, pp. 2924-2942.

[GHO07b] Ghoreishi S.R. et al., Analytical modeling of synthetic fiber ropes. Part II: A linear elastic model for 1 + 6 fibrous structures. International Journal of Solids and Structures, 2007, vol. 44, n°9, pp. 2943-2960.

[GOD10] Godet B., Grenier E.., Modélisation CAO 3D de renforts de composites tissés, Rapport de projet 4A MCS (Polytech'Orléans), 2010.

[HAG04] Hagege B., Simulation du comportement mécanique des milieux fibreux en grandes transformations : application aux renforts tricotés. Thèse ENSAM 2004, 264 p.

[HAM07] Boisse P., Hamila N., A Meso–Macro Three Node Finite Element for Draping of Textile Composite Preforms. Applied composite materials, 2007, vol. 14, pp. 235-250.

[HIV03] Hivet G., Modélisation mésoscopique pour le comportement bi-axial et la mise en forme des renforts de composites tissés. Thèse LMSP, Université d'Orléans, 2003, 146p.

[HIV05] Hivet, G. and 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, 2005, vol. 42, n°1, pp. 25-49.

[HIV08] Hivet, G. and Boisse P., Consistent mesoscopic mechanical behaviour model for woven composite reinforcements in biaxial tension. Composites Part B: Engineering, 2008, vol. 39, n°2, pp. 345-361.

[HIV11] Hivet G., Allaoui S., Cam B.T., Ouagne P., Soulat D., Design and potentiallity of an apparatus for measuring yarn/yarn and dry fabric/dry fabric friction. Exper Mech, 2011.

[HIV11b] Hivet G., Duong A.V., A contribution to the analyses of the intrinsic shear behavior of fabrics, Journal of composite materials, 2011, vol. 45, n°6, pp. 695-716.

[HOF01] Hofstee J., Van Keulen F., 3-D geometric modeling of a draped woven fabric. Composite Structures, 2001, vol. 54, pp. 179-195.

[HOS86] Hoskin B.C., Baker A.A., Composite Materials for aircraft structures. New York : American Institute of Aeronautics and astronautics, 1986.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

[IAR09] Iarve E.V. et al., Independent mesh method-based prediction of local and volume average fields in textile composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, vol. 40, n°12, pp. 1880-1890.

[JIA99] Jiang W.G., Yao M.S., Walton J.M., A concise finite element model for simple straight wire rope strand. International Journal of Mechanical Sciences, 1999, vol. 41, n°2, pp. 143-161.

[KAW73a] Kawabata S., Masako N., Kawai H., The finite deformation theory of plain-weave fabrics. Part II : the uniaxial-deformation theory. Journal of the textile institute, 1973, vol. 64, pp. 47-61.

[KAW73b] Kawabata S., Masako N., Kawai H., The finite deformation theory of plain-weave fabrics. Part I : the biaxial-deformation theory. Journal of the textile institute, 1973, vol. 64, pp. 21-46.

[KHA10] Khan M.A. et al., Numerical and experimental analyses of woven composite reinforcement forming using a hypoelastic behaviour. Application to the double dome benchmark. Journal of Materials Processing Technology, 2010, vol. 210, n°2, pp. 378-388.

[KUH99] Kuhn J., Charalambides P., Modeling of plain weave fabric composite geometry. Journal of Composite Materials, 1999, vol. 33, pp. 188-220.

[KRU08] Kruckenberg T., Ye L., PATON R., Static and vibration compaction and microstructure analysis on plain-woven textile fabrics. Composites Part A, 2008, vol. 39, pp. 488-502.

[LAT11] Latil, P. et al., Towards the 3D in situ characterisation of deformation micro-mechanisms within a compressed bundle of fibres. Composites Science and Technology, 2011, vol. 71, n°4, pp. 480-488.

[LI10] Li Z., Sun B., Gu B., FEM simulation of 3D angle-interlock woven composite under ballistic impact from unit cell approach. Computational Materials Science, 2010, vol. 49, n°1, pp. 171-183.

[LIN05] Lin Y., Ye L., Zhongqing S., Guang M., Functionalized composite structures for new generation aiframes : a review. Composites Science and Technology, 2005, vol. 65, pp. 1436-1446.

[LIU05] Liu X.H., Sze K.Y., A new skeletal model for fabric drapes. Int J Mech Mater Des, 2005, vol. 2, pp. 225-243.

[LOM00] Lomov S.V. et al., Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites. Composites Science and Technology, 2000, vol. 60, n°11, pp. 2083-2095.

[LOM05] Lomov S.V. et al., Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms. Part 3: Biaxial tension, picture frame and compression tests of the preforms. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, vol. 36, n°9, pp. 1188-1206.

[LOM06] Lomov S.V. and Verpoest I., Model of shear of woven fabric and parametric description of shear resistance of glass woven reinforcements. Composites Science and Technology, 2006, vol. 66, n°7-8, pp. 919-933.

[LOM07] Lomov S.V. et al., Meso-FE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms. Composites Science and Technology, 2007, vol. 67, n°9, pp. 1870-1891.

[LUY09] De Luycker E., Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlock. Thèse LaMCoS, Lyon : INSA Lyon, 2009, 148 p.

[NAU11] Saad N., Geometrical modelling and characterization of 3D warp interlock composites and their on-line structural health monitoring using flexible textile sensors. Thèse Université des Sciences et Technologies, Lille1, 2011, 164p.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

[NAW00] Nawrocki A. and Labrosse M., A finite element model for simple straight wire rope strands. Computers & Structures, 2000, vol. 77, n°4, pp. 345-359.

[NEM03] Nemoz G., Textures textiles tridimensionnelles. Techniques de l'ingénieur, AM 5 122, 2003, 14 p.

[NGU11] Nguyen Q.T., Analyse expérimentale et numérique de la compaction des renforts fibreux. Application pour la perméabilité. Thèse LaMCoS, Lyon : INSA de Lyon, 2011.

[PEA95] Pearce N. and Summerscales J., The compressibility of a reinforcement fabric. Composites Manufacturing, 1995, vol. 6, pp. 15-21.

[PEN05] Peng X.Q. and Cao J., A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, vol. 36, n°6, pp. 859-874.

[POT08] Potluri P. and Sagar T.V., Compaction modelling of textile preforms for composite structures. Composite Structures, 2008, vol. 86, n°1-3, pp. 177-185.

[POT12] Potter E. et al., Mesh generation and geometrical modelling of 3D woven composites with variable tow cross-sections. Computational Materials Science, 2012, vol. 51, n°1, pp. 103-111.

[POT99] Potter K.D., The early history of the resin transfer moulding process for aerospace applications. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999, vol. 30, n°5, pp. 619-621.

[REZ04] Ghoreishi R., Cartraud P., Messager T., Davies P., Modélisation du comportement de câbles synthétiques. Journées AUM/AFM 2004.

[ROB00] Robitaille F., Clayton B., Long A., Souter B., Rudd C., Geometric modelling of industrial preforms : Warp-knitted and multiple layer textiles. Journal of Materials : Design and Applications, 2000, vol. 214, pp. 71-90.

[ROB03] Robitaille F. et al., Automatically generated geometric descriptions of textile and composite unit cells. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2003, vol. 34, n°4, pp. 303-312.

[ROB98] Robitaille F., Gauvin R., Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing I: review of experimental results. POLYMER COMPOSITES, 1998, vol. 19, n°2, pp. 198-216.

[ROB99] Robitaille F., Clayton B., Long A., Souter B., Rudd C., geometric modelling of industrial preforms : Woven and braided textiles. Journal of Materials : Design and Applications, 1999, vol. 213, pp. 69-84.

[ROU11] Rouleau S., Bernard J., Modélisation CAO 3D automatisée de renforts de composites tissés interlocks et 3D, Rapport de projet 5A MCS (Polytech'Orléans), 2011.

[SAN06] Vaz Dos Santos A., Simulation du comportement mécanique d'une maille élémentaire de renfort de composite tissé. Rapport de stage ingénieur CNAM, 2006.

[SAU99] Saunders R.A., Lekakou C., Bader M.G. Compression in the processing of polymer composites 1. A mechanical and microstructural study for different glass fabrics and resin. 1999, Composites science and technology, vol. 59, pp. 983-993.

[SCH00] Schonberg W.P., Protecting spacecraft against orbital impact damage using composite materials. Composite part A : Applied Science Manufacturing, 2000, vol. 31, n°8, pp. 869-878.

[SHE07a] Sherburn M., Geometric modelling of textiles (texgen). 2007.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

[SHE07b] Sherburn M., Geometric and mechanical modelling of textiles. 2007, university of nottingham.

[SIM96] SIMACEK P., K.V.M., Notes on the modeling of preform compaction: I-micromechanics at the fiber bundel level. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1996, vol. 15, pp. 86-122.

[TEL12] Telmar A., Etude de déformabilité de tresse en cours de préformage pour la fabrication de composite par le procédé RTM, Thèse Université d'Orléans. 2012, 179 p.

[TEN07] Ten Thije R.H.W., Akkerman R., Huétink J., Large deformation simulation of anisotropic material using an updated Lagrangian finite element method. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007,vol. 196, n°33-34, pp. 3141-3150.

[TOL98] Toll S., Packing Mechanics of Fiber Reinforcements. polymer engineering and science, 1998, vol. 38, pp. 1337-1350.

[TSA00] Tsai K.H., Chiu C.H., Wu T.H., Fatigue behavior of 3D multi-layer angle interlock woven composite plates. Composites Science and Technology, 2000, vol. 60, n°2, pp. 241-248.

[TEX] Sherburn M. TexGen. University of Nottingham. Disponible sur :

http://texgen.sourceforge.net/index.php/Main_Page (consulté le 01.05.2013)

[VAN09] Vanclooster K., Lomov S.V., Verpoest I., Experimental validation of forming simulations of fabric reinforced polymers using an unsymmetrical mould configuration. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, vol. 40, n°4, pp. 530-539.

[VAN11] Van den Broek d'Obrenan G., Adaptation du procédé RTM à la mise en oeuvre de matériaux composites à matrice thermoplastique. Thès IMP, Lyon : INSA Lyon, 2011.

[VER05] Verpoest I. and Lomov S.V., Virtual textile composites software WiseTex: Integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis. Composites Science and Technology, 2005, vol. 65, n°15-16, pp. 2563-2574.

[WIN97] Windhorst G.B., Carbon-carbon composites: a summary of recent developments and applications. Material and Design, 1197, vol. 18, n°1, pp. 11-15.

[ZAK03] Zako M., Uetsuji Y., Kurashiki T., Finite element analysis of damaged woven fabric composite materials. Composites Science and Technology, 2003, vol. 63, n°3-4, pp. 507-516.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

ANNEXES

Annexe 1. Eléments de mise en données de G1151®. Exemple de la première mèche de chaîne

MISE EN DONNEES DES RENFORTS TISSES

Gestion des interférences	*Auto/Manuel*	*Repart*	*Ratio ecrasement/interférence*	*Tolérance*
	Auto	*0.5*	*0.5*	*0.01*
Maille	*hmini maille*	*0*	*hmaxi maille*	1.2
	Scale :	*10*	*Surepaisseur Complémentaire*	*0.2*
Paramètres	*Epsilon*	*0.05*		

T1	6	x	6
Elementary cell structure			
Number of weft zones		Number of warp zones	
13		6	
nesting weft (0<n1<1)		nesting warp (0<n2<1)	
0		0	

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

T2	16	x	6		
Number of yarn per zone					
Weft Zone Number	Number of yarns	zone Y coordinate	Warp Zone Number	Number of yarns	zone X coordinate
1	2	1.82	1	1	0.66
2	1	2.15	2	1	1.97
3	1	4.82	3	1	3.28
4	1	5.28	4	1	4.59
5	2	7.98	5	1	6.01
6	1	8.67	6	1	7.38
7	1	11.45	NA		
8	1	12.09	NA		
9	1	15.03	NA		
10	1	15.35	NA		
11	1	15.16	NA		
12	1	18.13	NA		
13	1	19	NA		

T3	4	x
Number of contact with transverse yarns/Type of extremities		
WARP	N° Warp Yarns	11
	Nc	8

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

T3BIS	12
CONTACT TABLE	
	WARP YARN NUMBER
WEFT YARN NUMBER	11
	12
	31
	51
	61
	71
	91
	111
	131

T5	22
Abscissa of the trajectory control points	
	WARP YARN NUMBER
Point Number	11
1	0.45
2	0.81;{0.26;1.71;0.11;0.11}
3	2.63;{0.26;1.71;0.11;0.11}
4	3.68;{0.28;1.6;0.11;0.11}
5	5.12;{0.28;1.6;0.11;0.11}
6	8.77;{0.28;1.48;0.11;0.11}
7	9.23;{0.28;1.48;0.11;0.11}
8	7.48;{0.28;1.3;0.11;0.09}
9	8.44;{0.28;1.3;0.11;0.09}
10	10.29;{0.3;1.94;0.11;0.11}
11	12.41;{0.3;1.94;0.11;0.11}
12	14.01;{0.26;1.76;0.11;0.11}
13	15.25;{0.26;1.60;0.11;0.11}
14	15.5;{0.26;1.56;0.12;0.12}
15	16.71;{0.26;1.25;0.12;0.12}
16	19;{0.3;1.42;0.11;0.11}
17	20.06;{0.3;1.42;0.11;0.11}
18	20.72

T7	12
height of the undulations for parabolas with horizontal tangent/coordinates (x;z) of a point	
	WARP YARN NUMBER
	11
h 1	1.56
h 2	[-0.0015]
h 3	[0.0015]
h 4	[-0.0015]
h 5	0.2
h 6	[0.0015]
h 7	[-0.0015]
h 8	[-0.0015]

T9	9
Default parameters of the Control sections	
	WARP YARN NUMBER
	11
Thickness (t)	0.28
Width (w)	1.76
Flat flange (fd)	0.11
Flat flange (fg)	0.11
Section Offset (delta)	0

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Annexe 2. Résultats du calcul de trajectoire pour la première mèche de chaîne de G1151

numéro de section	coordonnées du centre des sections			épaisseur des sections	largeur des sections	hauteur des bords des section		coordonnées du sommet des paraboles de contact			Coordonnées des extrêmités de la parabole de contact						paramètre p de la parabole de contact
	X_{cs}	Y_{cs}	Z_{cs}					X_S	Y_S	Z_S	X_E	Y_E	Z_E	X_F	Y_F	Z_F	pS1
1	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00
2	0.00E+00	8.10E+00	2.63E+01	3.68E+01	5.12E+01	7.98E+01	8.44E+01	8.77E+01	9.23E+01	1.03E+02	1.24E+02	1.40E+02	1.55E+02	1.70E+02	1.90E+02	2.01E+02	1.56E+02
3	1.32E+01	1.43E+01	1.41E+01	1.26E+01	1.06E+01	6.82E+00	6.26E+00	5.91E+00	5.34E+00	3.83E+00	3.57E+00	5.45E+00	7.07E+00	8.74E+00	1.11E+01	1.24E+01	7.23E+00
4	1.48E+01	-1.50E-02	-1.50E-02	2.00E-02	3.00E+00	2.00E-02	-1.50E-02	-1.50E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	6.60E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
9	1.67E+01	2.80E+02	1.03E+02	7.36E+01	1.15E+02	2.92E+02	-7.51E+00	8.25E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
10	1.48E+01	-4.65E+00	5.26E+00	6.67E+00	3.00E+00	1.44E+01	-1.50E+00	4.89E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
11	-7.39E-03	2.92E-04	2.86E-03	-3.81E-03	6.14E-03	-3.88E-04	3.26E-04	5.38E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
12	2.80E+00	2.80E+00	2.80E+00	3.40E+00	3.40E+00	2.80E+00	2.80E+00	2.80E+00	2.80E+00	3.00E+00	3.00E+00	2.60E+00	2.60E+00	2.20E+00	3.40E+00	3.40E+00	2.20E+00
13	1.76E+01	1.71E+01	1.71E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.48E+01	1.48E+01	1.48E+01	1.48E+01	1.94E+01	1.94E+01	1.76E+01	1.76E+01	1.76E+01	1.42E+01	1.42E+01	1.76E+01
14	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.20E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.20E+00
15	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.20E+00	1.50E+00	1.50E+00	1.20E+00

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Annexe 3. Algorithme de fermeture des sections en fonction des différents cas

Plusieurs cas sont à considérer et correspondent à la Figure2.11 :

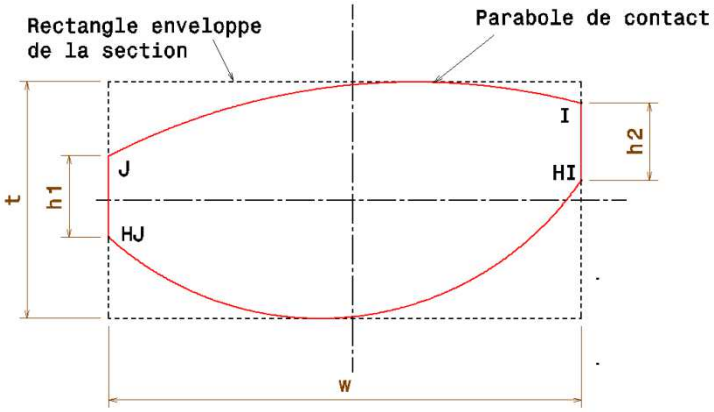
- si les extrémités du contact sont sur les bords de la mèche : la parabole de contact décrit alors toute la surface de contact (Figure2.11(a)). Aucune courbe n'est à ajouter ;
- si l'un des points extrémités au moins n'est pas sur le bord de la mèche :
    - Soient :
        - EI1 le point décalé d'une demi-longueur de segment (h2 sur la Figure2.11(c)) par rapport au plan médian horizontal de la section ;
        - EI2 est à l'intersection de la tangente à la parabole de contact et du bord de la mèche (Figure2.11(f)) ;
        - EI3 est le point décalé du vingtième de l'épaisseur par rapport au point EI2 (Figure2.11(f))
        - EI4 est le point d'intersection entre le prolongement de la parabole de contact et le bord de la mèche (Figure2.11(c))

    - le raisonnement est le suivant (traité du côté du point I à titre d'exemple, le raisonnement étant le même de l'autre côté) :
        - si $\frac{2|y_I - y_O|}{w_{\alpha i}} > k_{sx}$ (I proche du bord), la parabole de contact est prolongée jusqu'en EI4 (Figure2.11(b)) ; le segment latéral [EI4 HI4], puis la parabole libre (HJ-HI4) sont tracés (Figure2.11(b)) ;
        - si $\frac{2|y_I - y_O|}{w_{\alpha i}} < k_{sx}$ (I loin du bord), une conique doit être ajoutée pour fermer la section jusqu'au bord correspondant :
            - Si $\left|z_{E_{I2}}\right| > \left|z_{EI_1}\right|$, alors une parabole tangente à celle de contact reliant I à EI1 est tracée (Figure2.11(c)), le segment latéral [EI1 HI1], puis la parabole libre (HJ-HI1) sont tracés (Figure2.11(c)).
            - Si $\left|z_{EI_2}\right| \leq \left|z_{EI_1}\right|$, il n'est pas possible de tracer une parabole tangente de la courbure souhaitée et reliant les points I et EI1. Il y a alors plusieurs possibilités :
                - si $\frac{t_{\alpha ie} - 2\left(z_O - z_{EI_2} - h_2/2\right)}{t_{\alpha ie}} < k_{sz}$, alors :

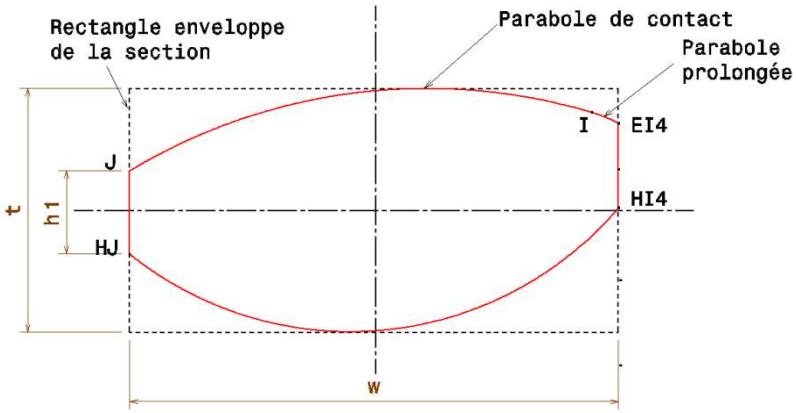
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

- soit le point EI2 dépasse la surface libre de la mèche (Figure2.11(d)), la section ne peut être fermée et la mise en données doit être revue ;
- soit le point EI2 est trop proche de la surface libre, il faut rectifier la largeur du plat (h2 sur la Figure2.11(d)) pour pouvoir placer le point HI2 et fermer le contour par une droite tangente (Figure2.11(e)). La longueur du plat est alors calculée pour que la distance minimale définie par k_{sz} soit respectée (Figure2.11(e)). Le nouveau segment latéral [EI2 HI2], puis la parabole libre (HJ-HI2) sont tracés (Figure2.11(e)).

- si $\frac{t_{aie}-2(z_O-z_{EI_3}-h_2/2)}{t_{aie}} > k_{sz}$ le contour peut être fermé sur le point EI3 (Figure2.11(f)). Le segment latéral [EI3 HI3], puis la parabole libre (HJ-HI3) sont tracés (Figure2.11(f)).
- Sinon le contour est fermé sur le point EI2 comme sur la Figure2.11(e).

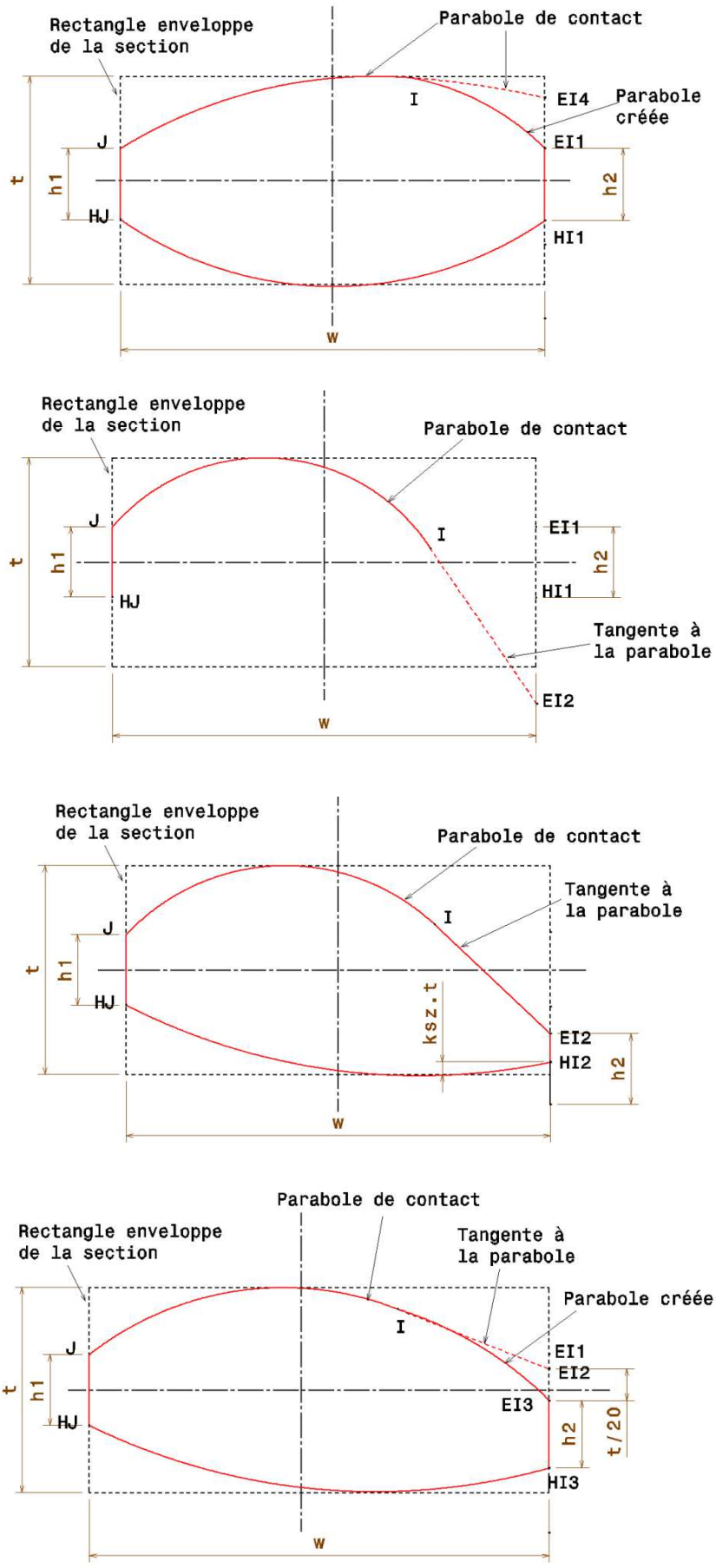


(a) Les extrémités du contact sont sur les bords de la section



(b) I est proche du bord, la parabole de contact est prolongée

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés



(c) I est loin du bord, une parabole tangente à celle de contact jusqu'au point EI1 est tracée

(d) La tangente à la parabole coupe le bord trop bas, la section ne peut être fermée. La mise en données doit être revue

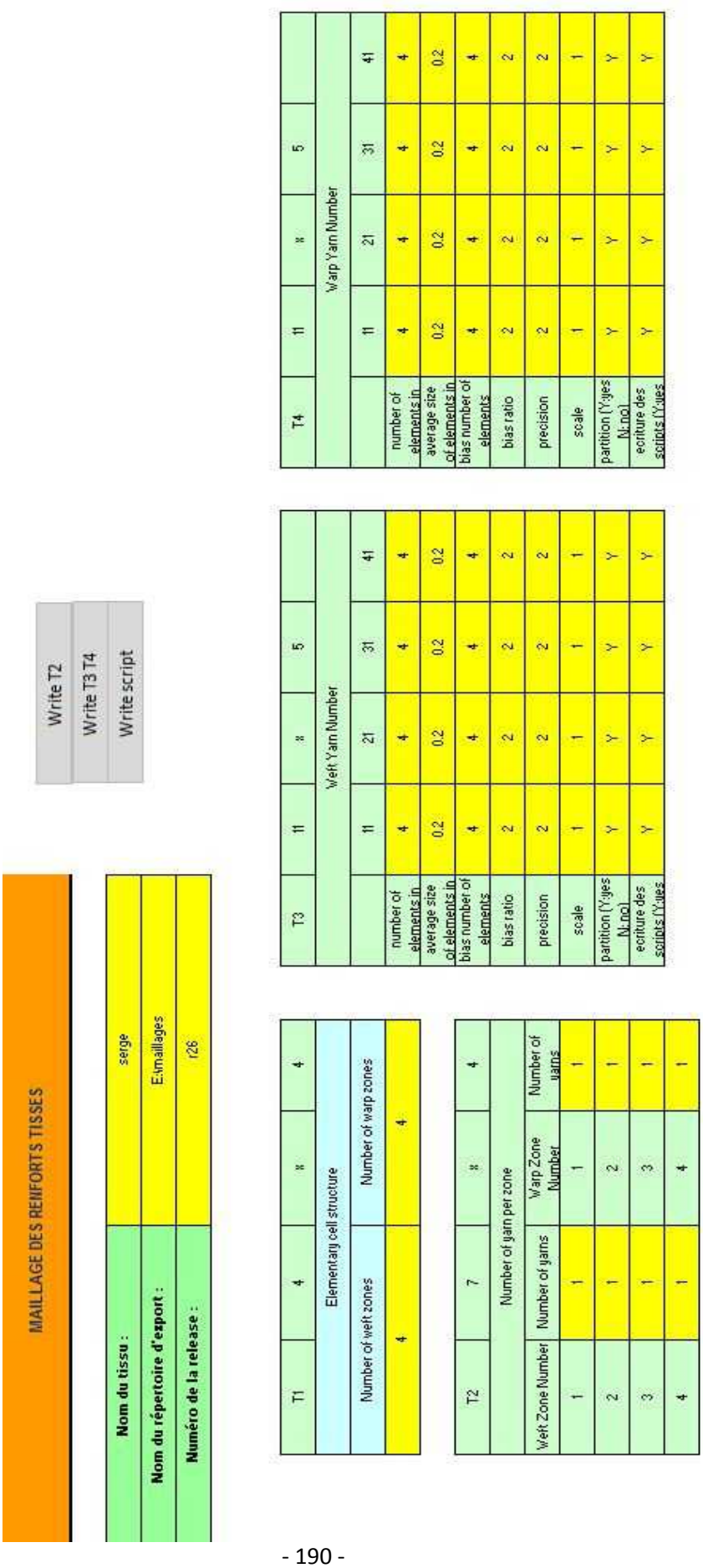
(e) Le point EI2 est proche de la surface libre, la longueur du segment latéral [EI2 EH2]est réduite pour respecter la distance minimale ksz.t

(f) La section est fermée grâce au point EI3 décalé de t/20 par rapport à EI2

Figure2.11. Fermeture de la section en fonction des différent cas

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Annexe 4. Exemple de mise en données de maillage pour un sergé 2x2



Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : WENDLING **DATE DE SOUTENANCE :** 4 septembre 2013

Prénom : Audrey

TITRE : Simulation à l'échelle mésoscopique de la mise en forme de renforts de composite tissés

NATURE : Doctorat **Numéro d'ordre :** 2013 ISAL 0079

Ecole doctorale : MEGA (Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique)

Spécialité : Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil

RESUME :

De nos jours, l'intégration de pièces composites dans les produits intéresse de plus en plus les industriels, particulièrement dans le domaine des transports. En effet, ces matériaux présentent de nombreux avantages, notamment celui de permettre une diminution de la masse des pièces lorsqu'ils sont correctement exploités. Pour concevoir ces pièces, plusieurs procédés peuvent être utilisés, parmi lesquels le RTM (Resin Transfer Molding), qui consiste en la mise en forme d'un renfort sec (préformage) avant une étape d'injection de résine. Cette étude concerne la première étape du procédé RTM, celle de préformage. L'objectif est de mettre en œuvre une stratégie efficace conduisant à la simulation par éléments finis de la mise en forme des renforts à l'échelle mésoscopique. A cette échelle, le renfort fibreux est modélisé par un enchevêtrement de mèches supposées homogènes. Plusieurs étapes sont alors nécessaires et donc étudiées ici pour atteindre cet objectif. La première consiste à créer un modèle géométrique 3D le plus réaliste possible des cellules élémentaires des renforts considérés. Elle est réalisée grâce à la mise en œuvre d'une stratégie itérative basée sur deux propriétés : d'une part, la cohérence, qui permet d'assurer une bonne description du contact entre les mèches, c'est-à-dire, que le modèle ne contient ni vides ni interpénétrations au niveau de la zone de contact ; d'autre part, la variation de la forme des sections de la mèche le long de sa trajectoire qui permet de coller au mieux à la géométrie évolutive des mèches dans le renfort. Grâce à ce modèle et à une définition libre par l'utilisateur de l'architecture tissée, un modèle représentatif de tout type de renfort (2D, interlock) peut être obtenu. La seconde étape consiste à créer un maillage hexaédrique 3D cohérant de ces cellules élémentaires, basé sur la géométrie obtenue à la première étape. L'outil de maillage créé permet de mailler automatiquement tout type de mèche, quelles que soient sa trajectoire et la forme de ses sections. La troisième étape à franchir consiste, à partir du comportement mécanique du matériau constitutif des fibres et de la structure de la mèche, à mettre en place une loi de comportement du matériau homogène équivalent à un matériau fibreux. Basé sur les récents développements expérimentaux et numériques en matière de loi de comportement de structures fibreuses, un nouveau modèle de comportement est présenté et implémenté. Enfin, une étude des différents paramètres intervenant dans les calculs en dynamique explicite est réalisée. Ces deux derniers points permettent à la fois de faire converger rapidement les calculs et de se rapprocher de la réalité de la déformation des renforts. L'ensemble de la chaîne de modélisation/simulation des renforts fibreux à l'échelle mésoscopique ainsi créé est validé par comparaison d'essais numériques et expérimentaux de renforts sous sollicitations simples.

MOTS-CLES : renforts tissés, composites, mise en forme, modélisation mésoscopique, simulation

Laboratoire (s) de recherche :

LaMCoS (Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures) _ CNRS UMR 5259

Directeur de thèse: Emmanuelle VIDAL-SALLE

Président de jury : Christophe BINETRUY

Composition du jury :

Emmanuelle VIDAL-SALLE, Gilles HIVET, Philippe BOISSE, Joël BREARD, Laurent ORGEAS, Christophe BINETRUY

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2013ISAL0079/these.pdf
© [A. Wendling], [2013], INSA de Lyon, tous droits réservés