

Thèse

Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites

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
Jérôme Vilfayeau

Soutenue le 13 mars 2014 devant la Commission d'examen

Jury

G. Hivet	Maître de conférences, HDR (Université d'Orléans)	Rapporteur
L. Schacher	Professeur (Université de Haute-Alsace)	Rapporteur
P. Boisse	Professeur (INSA Lyon)	Directeur
F. Boussu	Maître de Conférences (ENSAIT)	Co-encadrant
D. Crepin	Maître de Conférences (ENSAIT)	Co-encadrant
D. Soulat	Professeur (ENSAIT)	Examinateur
E. Vidal Sallé	Professeur (INSA Lyon)	Examinatrice
G. Périé	(Snecma, Safran)	Examinateur
K. Thorat Pierre	(Cedrem)	Invitée

LaMCoS - UMR CNRS 5514 - INSA de Lyon
20, avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex (FRANCE)

**INSA Direction de la Recherche - Ecoles Doctorales –
Quinquennal 2011-2015**

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	CHIMIE DE LYON http://www.edchimie-lyon.fr Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 ^e etage 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 60.97 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
EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES- SANTÉ http://www.ediss-lyon.fr Sec : Insa : M. LAGARDE	Mme Emmanuelle CANET-SOULAS INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 avenue Jean Capelle INSA de Lyon 696621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax : 04 72 68 49 16 Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES http://infomaths.univ-lyon1.fr Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 ^e etage infomaths@univ-lyon1.fr	Mme Sylvie CALABRETTO LIRIS – INSA de Lyon Bat Blaise Pascal 7 avenue Jean Capelle 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 43. 80. 46 Fax 04 72 43 16 87 Sylvie.calabretto@insa-lyon.fr
Matériaux	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
MEGA	MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE http://mega.universite-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

Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites

Résumé

L'industrie aéronautique doit faire face aux nouvelles exigences environnementales, tout particulièrement concernant la réduction de la consommation des énergies fossiles. L'utilisation de matériaux composites plus léger permet de répondre en partie à cette attente. Pour limiter les coûts lors de la fabrication et du développement des composites à renforts tissés 3D, il est nécessaire d'utiliser des outils de simulation performants. En particulier, les outils existants, qui discrétisent à une échelle mésoscopique l'architecture des tissus 3D, ne tiennent pas compte de l'influence du procédé de fabrication sur la constitution de la structure textile. Si des outils numériques dédiés à la modélisation du procédé de tressage et de tricotage sont disponibles, il n'en est rien concernant le tissage. Cette étude avait donc pour but de s'intéresser plus particulièrement à la simulation du procédé de tissage pour pouvoir obtenir une structure de tissu sèche déformée numériquement.

La production de différentes architectures de tissu en verre E dans notre laboratoire nous a permis d'observer les différents éléments en contact avec le fil ou le tissu sur la machine à tisser, par le biais de l'utilisation d'une caméra rapide par exemple.

Le développement d'un modèle numérique par éléments finis reproduisant le procédé de tissage a été réalisé. Une loi de comportement isotrope transverse fut utilisée pour modéliser les fils de verre. Des premières simulations numériques encourageantes pour la fabrication d'un tissu d'armure toile et d'un tissu d'armure croisé 2-2 sont présentées et comparées avec les tissus réels produits correspondants.

Mots-Clés : Modélisation numérique, tissage 3D, renforts textiles, matériaux composites.

Numerical modelling of the weaving process for textile composite

Abstract

The aeronautical industry faces new challenges regarding the reduction of fossil fuel consumption. One way to address this issue is to use lighter composite materials. The ability to predict the geometry and the mechanical properties of the unit cell is necessary in order to develop 3D reinforcements in composite materials for these aeronautical applications. There is a difficulty to get realistic geometries for these unit cells due to the complexity of their architecture. Currently, existing tools which model 3D fabrics at a meso scale don't take into account manufacturing process influence on the shape modification of the textile structure. There is already some numerical tools that can model the braiding or knitting process, but none have been developed for weaving so far. Consequently, this study deals with the numerical simulation of the weaving process to obtain a deformed dry fabric structure.

During the weaving process of E-glass fabrics, achieved in our laboratory, it has been observed that large deformations led to the modification of transverse section of meshes, or local density changes, that can modify the fabrics mechanical resistance.

For this reason, a numerical tool of the weaving process, based on finite element modelling, has been developed to predict these major deformations and their influences on the final textile structure. The correlation between numerical results and fabrics produced with glass fibres has been achieved for plain weave and 2-2 twill.

Keywords: Textile composites, woven reinforcements, numerical modelling, 3D weaving process, composite materials.

Remerciements

Je tiens en premier lieu à exprimer ma reconnaissance envers l'ANR qui a financé mon travail de thèse à travers le projet de recherche NUMTISS (Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites) dans le cadre du programme de recherche ANR-09-MAPR-0018. Je remercie par ailleurs tous les membres et partenaires du projet NUMTISS pour leur accompagnement dans ce projet. J'adresse mes remerciements en particulier à Mickaël LEQUIN et Karine THORAL PIERRE du CEDREM pour l'aide et l'expertise qu'ils m'ont apportés concernant l'utilisation du logiciel de modélisation, et aussi pour le développement des modèles numériques. Je remercie bien sûr la société ALTAIR pour les différents stages que j'ai pu effectuer dans ses locaux, ainsi que pour la mise à disposition d'un outil logiciel performant.

Je remercie Vladan KONCAR, directeur du laboratoire GEMTEX, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire.

Je tiens à adresser toute ma gratitude à Philippe BOISSE, Professeur des Universités à l'INSA de Lyon, d'avoir accepté d'être le directeur de ma thèse, et de m'avoir soutenu et encouragé dans les moments difficiles durant ces années de thèse.

Je souhaite aussi remercier François BOUSSU, Maître de conférences à l'ENSAIT, de m'avoir choisi et fait confiance pour ce travail de recherche, et de m'avoir encadré et soutenu tout au long de ces trois années de thèse.

Je tiens à remercier également David CREPIN, Maître de conférences à l'ENSAIT et encadrant de ma thèse, pour ses conseils et son exigence tout au long de la thèse.

Je remercie aussi Damien SOULAT, Professeur des Universités à l'ENSAIT, pour son soutien et ses encouragements, ainsi que pour l'aide et l'expertise qu'il a su m'apporter en ce qui concerne la modélisation par éléments finis, au cours des deux dernières années de ma thèse.

J'adresse mes remerciements à Laurence SCHACHER, Professeur des Universités à l'UHA (Université de Haute-Alsace) de Mulhouse, et Gilles HIVET, Maître de conférences à l'Université d'Orléans, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de mon travail de thèse.

J'exprime mes remerciements à l'ensemble de la « weaving team » historique de la T003. Je remercie en particulier Frédéric VEYET, Marie LEFEBVRE et Benjamin PROVOST pour tous les conseils avisés qu'ils ont su m'apporter concernant le tissage, et en dehors du tissage. Je remercie également Cuong HA-MINH qui m'a accompagné lors de mes premiers pas dans l'utilisation du logiciel de modélisation par éléments finis.

Je remercie également les techniciens du tissage : Nicolas DUMONT pour son expertise de tisserand hors pair, et Tomasz KROMOSKA pour avoir été pugnace durant la phase de production des tissus.

Merci à l'ensemble du personnel de l'ENSAIT, enseignant/chercheurs, ex-thésards, thésards, ingénieurs, techniciens et administratifs pour le cadre de travail agréable. Je remercie en particulier Nicolas TRIFIGNY, mon voisin de bureau véliplanchiste et partenaire dans le

cadre du projet NUMTISS, pour sa bonne humeur perpétuelle et son sang-froid à toute épreuve.

Je remercie mes camarades doctorants ou post-doctorants avec qui j'ai pu passer ces trois années plaisantes à l'ENSAIT : Boris, Nizar, Adrienne, Jonas, Ahmad, Jean-Vincent, Maxime, Constance et les autres...

Je voudrai remercier aussi tous mes proches, ma famille et mes amis qui ont su m'apporter du soutien dans tous les moments difficiles que j'ai pu traverser au cours de cette thèse. J'aimerais remercier en particulier : Vanessa, Fern, Julie, Lea, Yacin, Pierre, Jérôme, Maxime et tous ceux que j'aurais pu oublier.

Et enfin pour finir, je voudrai adresser une pensée très particulière à une personne exceptionnelle, une étoile filante, mon frère Benoît.

Table des matières

REMERCIEMENTS	7
TABLE DES MATIÈRES	9
INTRODUCTION GÉNÉRALE	13
CHAPITRE 1 : LES RENFORTS FIBREUX DANS LES MATÉRIAUX COMPOSITES	19
1. LES RENFORTS FIBREUX DANS LES MATÉRIAUX COMPOSITES	20
1.1. DÉFINITION D'UN MATÉRIAU COMPOSITE	20
1.2. LES MATRICES.....	21
1.3. AVANTAGE DES MATÉRIAUX COMPOSITES À RENFORTS FIBREUX	21
1.4. LES DIFFÉRENTS TYPES DE FIBRES DE VERRE	22
1.5. LES RENFORTS	24
1.5.1. LES RENFORTS TISSÉS : TISSUS 2D	26
1.5.2. LES RENFORTS TISSÉS : TISSUS 3D	27
1.6. LES PROCÉDÉS DE MISE EN ŒUVRE	28
CHAPITRE 2 : TISSAGE DES RENFORTS DE COMPOSITES	31
2. TISSAGE DES RENFORTS DE COMPOSITES	32
2.1. TISSAGE RENFORTS 2D	32
2.1.1. PRINCIPE DE BASE DE LA FORMATION D'UN TISSU	32
2.1.2. ÉTAPES DU TISSAGE	34
2.1.3. TORSION DES FILS DE VERRE	35
2.1.4. OURDISSAGE DES FILS DE CHAÎNE	37
2.1.5. RENTRAGE DES FILS	38
2.1.6. INSERTION DE LA TRAME SUR LA MACHINE À TISSER.....	39
2.1.7. MOUVEMENT DU PEIGNE	40
2.2. TISSAGE DES RENFORTS 3D	41
2.2.1. INCONVÉNIENTS DU TISSAGE 3D (INTERLOCK).....	44
CHAPITRE 3 : COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES RENFORTS FIBREUX À DIFFÉRENTES ÉCHELLES	45

3. COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES RENFORTS FIBREUX À DIFFÉRENTES ÉCHELLES ...	46
3.1. COMPORTEMENT MACROSCOPIQUE (ÉCHELLE TISSU).....	46
3.1.1. TRACTION BIAXIALE	47
3.1.2. CISAILLEMENT PLAN	48
3.1.3. FLEXION	51
3.1.4. COMPORTEMENT EN COMPACTION	52
3.2. COMPORTEMENT MÉSOSCOPIQUE (ÉCHELLE MÈCHE).....	53
3.2.1. COMPACTION DU FIL DANS LE PLAN TRANSVERSE	54
3.2.2. COMPORTEMENT DU FIL EN TENSION.....	55
3.2.3. CISAILLEMENTS DU FIL.....	56
3.2.4. COMPORTEMENT DU FIL EN FLEXION	57
3.3. COMPORTEMENT MICROSCOPIQUE.....	57
3.4. HYPOTHÈSE D'ISOTROPIE TRANSVERSE POUR LE COMPORTEMENT D'UN FIL	59
CHAPITRE 4 : MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES RENFORTS FIBREUX.....	61
4. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES RENFORTS FIBREUX	62
4.1. MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE DES STRUCTURES TISSÉES	62
4.2. BILAN SUR LA CRÉATION DES MODÈLES GÉOMÉTRIQUES	66
4.3. MODÉLISATION DE PROCÉDÉS TEXTILES.....	66
4.3.1. MODÉLISATIONS EXISTANTES DES PROCÉDÉS DE TRESSAGE ET DE TRICOTAGE	67
4.3.2. MODÉLISATION DU PROCÉDÉ DE TISSAGE	69
4.4. CONCLUSION - APPORT POUR LE PROJET NUMTISS.....	70
CHAPITRE 5 : PRODUCTIONS ET OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES.....	73
5. PRODUCTIONS ET OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES	74
5.1. INVENTAIRE DES PIÈCES CONSTITUTIVES DE LA MACHINE À TISSER AUTOMATIQUE EN CONTACT AVEC LE FIL OU LE TISSU	75
5.2. VISUALISATION DE L'INFLUENCE DES ÉLÉMENTS DE LA MACHINE À TISSER SUR LE FIL/TISSU (CAMÉRA RAPIDE +TRACKING).....	80
5.3. PARAMÈTRES DE LA PRODUCTION DES TISSUS EN FIBRE VERRE	84
5.3.1. SPÉCIFICATIONS DES TISSUS RETENUS	84
5.3.2. SPÉCIFICATIONS DU TISSAGE CHOISIS	84
5.3.3. CYCLE DE TISSAGE SUR LA MACHINE À TISSER DORNIER	85
5.3.4. FILS À BASE DE MULTI-FILAMENTS DE VERRE UTILISÉS	86
5.3.5. POURQUOI RETORDRE LE FIL ?.....	87
5.3.6. TENSIONS SUR LA MACHINE À TISSER DORNIER.....	89
5.4. TISSAGE DES ARCHITECTURES EN FILS DE VERRE E 300 Tex/900 Tex	89
5.4.1. ARCHITECTURES 2D - ET FILS DE VERRE E DE TITRAGE 300Tex/900 Tex	89

5.4.2.	ARCHITECTURES 3D - ET FILS DE VERRE E DE TITRAGE 300 TEX/900 TEX.....	93
5.5.	OBSERVATIONS MICROSCOPIQUES.....	99
5.5.1.	RÉSINAGE DU FIL EN VERRE E DE TITRAGE 300 TEX EN TENSION SUR LA MACHINE À TISSER	100
5.5.2.	RÉSINAGE DES TISSUS EN VERRE 2D ET 3D	102
5.5.3.	OBSERVATION DES TOMOGRAPHIES DES TISSUS EN VERRE E RÉALISÉES AU LAMCoS.....	105
5.6.	CONCLUSION DU CHAPITRE 5	113
CHAPITRE 6 : SIMULATION NUMÉRIQUE DU PROCÉDÉ DE TISSAGE		115
6.	SIMULATION NUMÉRIQUE DU PROCÉDÉ DE TISSAGE POUR NUMTISS.....	116
6.1.	LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU PROCÉDÉ DE TISSAGE DANS LA CHAÎNE NUMÉRIQUE NUMTISS.....	116
6.2.	MISE EN DONNÉES DU MODÈLE NUMÉRIQUE	118
6.2.1.	UTILISATION DE <i>RADIOSS</i> EXPLICITE	118
6.2.2.	MODÉLISATION DU FIL	118
6.2.3.	CHOIX DU MAILLAGE POUR LE FIL	120
6.2.4.	MODÉLISATION DU PEIGNE, DES LISSES ET DE LA FAUSSE-LISIÈRE	120
6.2.5.	CINÉMATIQUE CHOISIE PAR RAPPORT AU CYCLE DE TISSAGE SUR LA MACHINE À TISSER DORNIER.....	122
6.2.6.	RESTRICTIONS CHOISIES (RÉGLAGE DU MODÈLE NUMÉRIQUE)	123
6.3.	COMPARAISON ENTRE LES ÉCHANTILLONS PRODUITS ET SIMULÉS.....	127
6.3.1.	TISSUS À BASE DE FILS DE 300 TEX	128
6.4.	OUTIL D'AUTOMATISATION DU TISSAGE DÉVELOPPÉ PAR LE CEDREM.....	132
6.5.	CONCLUSION DU CHAPITRE 6	134
CONCLUSION GÉNÉRALE		135
PERSPECTIVES.....		136
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :		137

Introduction générale

Les travaux de recherche associés à cette thèse de doctorat, d'une durée de trois ans, ont été réalisés dans le cadre du projet NUMTISS (Programme MATetPRO édition 2009), de l'ANR (Agence Nationale de Recherche) intégrant six partenaires (dont trois industriels et trois laboratoires de recherche) sur une durée totale de quatre ans. Les différents partenaires du projet NUMTISS et leurs rôles respectifs, représentés en Figure 0-1, sont :

- le GEMTEX (Laboratoire de recherche de GENie et Matériaux TEXTiles) de l'ENSAIT engagé dans deux travaux de recherche, l'un portant sur la conception/réalisation de fils capteurs à intégrer sur machine à tisser pour caractérisation dynamique et l'autre, sur la modélisation de la cinématique du procédé de tissage pour identifier les paramètres influents sur la géométrie résiduelle de la structure tissée ;
- le LAMCOS (Laboratoire de Mécaniques des Contacts et des Structures) de l'INSA de Lyon, qui a développé une loi de comportement plus réaliste pour les renforts fibreux tissés ;
- le TPCIM (Laboratoire de Technologie des Polymères et Composites & Ingénierie Mécanique) de l'école des Mines de Douai (ENSMD) a été en charge de modéliser le flux d'écoulement de résine dans le renfort tissé ;
- les sociétés HERAKLES à Bordeaux et SNECMA à Villaroche du groupe SAFRAN ont permis de définir les spécificités des tissus 2D et 3D et les besoins en modélisation tout au long du projet NUMTISS ;
- la société TRP-CHARVET à Armentières a mis à disposition ces moyens de production de textiles techniques afin d'aider à l'identification et à la compréhension des phénomènes lors du tissage à l'échelle industrielle ;
- la société CEDREM, spécialisée dans la modélisation de phénomènes rapides, a été impliquée dans la réalisation de l'interfaçage entre les modèles numériques développés par chaque laboratoire permettant une intégration de la chaîne numérique du projet NUMTISS.

Fort de ces complémentarités entre les différents partenaires, le projet NUMTISS s'inscrit dans un contexte de développement de l'usage des matériaux composites et d'une meilleure connaissance de leurs propriétés mécaniques, par le biais du développement de la chaîne de simulation de toutes les étapes du procédé de fabrication.

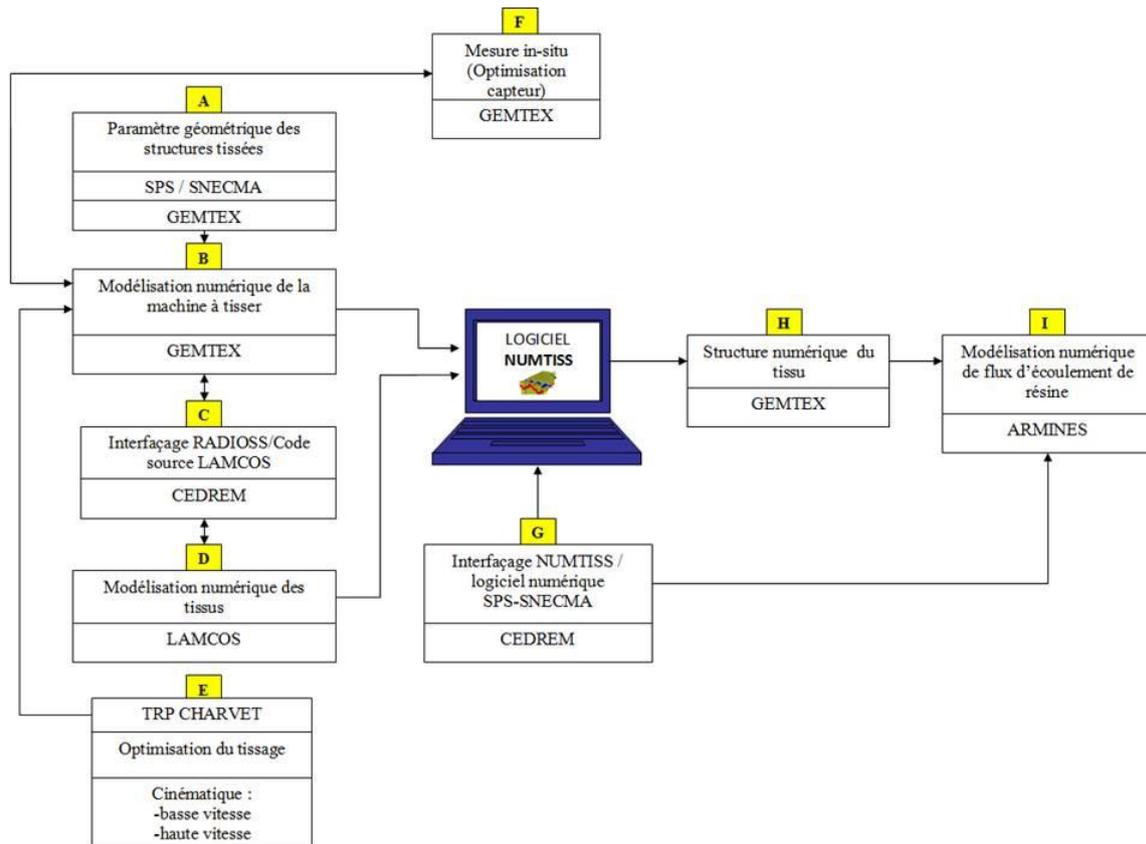


Figure 0-1. Organigramme de la répartition des tâches dans le cadre du projet NUMTISS

Les matériaux composites connaissent une utilisation grandissante dans de nombreux domaines d'application aussi variés que l'automobile, l'aéronautique, les accessoires de sport, etc. Cela est dû au fait que ces matériaux sont trois à quatre fois plus légers que les alliages d'aluminium, à résistance équivalente (pour un coût environ cinq fois supérieur) [1]. Parmi ces domaines d'application, l'aéronautique reste le plus important consommateur de matériaux composites. En effet, en raison du contexte économique et environnemental (raréfaction des énergies fossiles, etc.), l'allègement des structures devient un des points les plus importants dans la construction d'un avion dans le but de diminuer la consommation de carburant. Cet allègement des structures passe, entre autre, par l'utilisation de pièces en matériaux composites. Les avionneurs ont d'ailleurs déjà pris en compte ces nouvelles problématiques, comme le prouve l'utilisation croissante des composites qui est passé de 10 % dans les années 70, à 25 % sur l'A380 et même plus de 50 % sur le B787 et le futur A 350 XWB [2]. Principalement utilisés sur la voilure et le fuselage, les composites parviennent même, depuis peu, à conquérir une nouvelle partie de l'avion : les moteurs. Plus exactement la « soufflante », l'hélice chargée de faire entrer l'air dans le moteur. Les aubes de la soufflante sont réalisées en titane, un matériau léger mais suffisamment solide pour résister aux ingestions d'oiseaux, mais sont remplacées sur certains modèles par des composites à base de renforts 3D tissés [3], [4], avec un liage dans l'épaisseur des couches.

Les renforts fibreux sont l'un des constituants essentiels d'un matériau composite. Ces renforts contribuent directement aux propriétés physiques et mécaniques du matériau composite. Ces renforts fibreux peuvent être utilisés sous différentes formes. On peut

distinguer l'échelle de la fibre (échelle microscopique), du fil (échelle mésoscopique) jusqu'aux préformes (échelle macroscopique) : tissées, tricotées, tressées, etc. Les modélisations de ces procédés de fabrication aux différentes échelles sont complexes et variés et nécessitent des savoir-faire spécifiques à chaque étape pour s'assurer de la qualité du produit tout au long du processus de fabrication, mais également de maîtriser les étapes mises en œuvre afin de garantir les propriétés physico chimiques et thermomécaniques du produit final. Ces savoir-faire reposent sur des connaissances sur le choix des matières premières, sur leur conditionnement, et sur les étapes de transformation du matériau fibreux pour obtenir une préforme optimale au sens des propriétés recherchées. Dans le cadre de nos travaux les préformes étudiées sont élaborées par tissage, et les propriétés visées sont essentiellement mécaniques, ces renforts devant être utilisés dans le cadre de pièces structurales.

Le processus concerné est par conséquent le procédé de tissage et la démarche s'est décomposée selon les étapes suivantes. En premier lieu une phase de compréhension a été menée, couplée à de l'observation et de la mesure lors du procédé de tissage, y compris en production industrielle. Dans un second temps, des phases de production de renforts tissés, à base de fibres techniques utilisées dans les applications visées, ont été conduites et dont l'objectif était la maîtrise de tous les paramètres mis en jeu (caractéristiques des fils en entrée matière, paramètres du procédé, propriétés des préformes tissées) ainsi que la fourniture d'échantillons aux partenaires du projet. Ces deux étapes (observation et production) ont permis d'analyser expérimentalement le textile tissé d'un point de vue comportement mécanique ; c'est-à-dire au sens de la compréhension des sollicitations mises en jeu, ainsi que de l'étude des phénomènes d'interaction ayant lieu aux différentes échelles lors du procédé de tissage. Afin d'y associer une finalité d'optimisation du procédé de tissage, mais également des propriétés visées des préformes, l'idée de coupler à ces phases expérimentales une étape de modélisation est à l'origine du programme ANR support de ces travaux. La simulation numérique, notamment des procédés de fabrication des pièces composites [5] (procédé RTM, emboutissage, imprégnation de résine par injection ou infusion) étant désormais entrée dans les phases de conception des pièces au même titre que la validation de leur dimensionnement et de leur tenue au cahier des charges [6].

Concernant les travaux de simulation associés au renfort fibreux sec, tous les modèles numériques partent de représentations idéalisées de ces préformes, au sens de leurs géométries, de leurs entrelacements (orientation des fils) mais également et surtout de leurs états mécaniques considérés comme parfaits [7], [8]. Or de nombreuses études ont montré que les préformes issues du procédé de tissage avaient des spécificités propres que ce soient en termes de géométries des mèches (sections transverses, orientations, etc.) ou de leurs caractéristiques mécaniques. La simulation du procédé de tissage a par conséquent une nécessité à l'échelle macroscopique afin, de prendre en compte, numériquement, cette étape de tissage dans l'élaboration de la préforme, mais également pour optimiser les paramètres du procédé. A l'échelle mésoscopique (fil) la simulation du procédé permet de prendre en compte les interactions et d'anticiper sur les zones de dégradations (frottement excessif, compression transverse). Par conséquent, associées aux étapes expérimentales, le développement d'un modèle de simulation du procédé de tissage s'est inscrit comme un objectif de ces travaux. Cette démarche est innovante car autant dans la littérature existent des

travaux de simulation des procédés de tressage et de tricotage [9], [10], autant, peu de travaux concernent le procédé de tissage.

Dans cette démarche de modélisation un certain nombre de verrous, scientifiques et techniques, doivent être levés. Ces travaux se sont donc inscrits en étroite collaboration avec les partenaires du programme afin de disposer des multiples connaissances du consortium.

Ainsi, d'un point de vue technique, la modélisation du procédé de tissage doit reproduire de façon exacte et précise la dynamique des mouvements de la machine à tisser en corrélation avec les contraintes mécaniques soumises à la structure tissée. Cet axe de recherche a pu être réalisé grâce à la société TRP-Charvet qui nous a permis de filmer en caméra rapide, dans ses locaux, la machine à tisser lors de phase industrielle. La portabilité des développements numériques n'a pu être réalisée qu'avec le support de la société CEDREM en vue du développement d'une suite numérique comprenant le tissage mais également les conditions d'imprégnations réalisées par le partenaire des Mines de Douai [11]. D'un point de vue scientifique, la modélisation du comportement des milieux fibreux fait l'objet de nombreux travaux dans la littérature [12]–[16]. Le choix des lois de comportement s'est opéré par conséquent en deux phases : d'une part l'utilisation de loi de comportement, dite standard, dans le cadre de ce travail pour la simulation du procédé de tissage ; et d'autre part, le développement de modèles de comportement plus en adéquation avec la physique des renforts tissés réalisés par l'INSA de Lyon [13], [17], [18]. La compréhension et la détection des endommagements lors du procédé ayant fait l'objet de développement de fils capteurs, dans le cadre de l'autre thèse positionnée au Gemtex [19].

Par conséquent le projet NUMTISS s'est positionné sur une approche nouvelle, et peu abordée par la communauté scientifique internationale : la modélisation du procédé de fabrication d'une structure tissée à base de fils composés de multiples filaments.

Les travaux développés dans le cadre de cette thèse sont décrits dans ce manuscrit qui se décomposera en six chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation d'un état de l'art non exhaustif sur les matériaux composites. Dans la première partie de ce chapitre, les deux types de matrices pouvant être rencontrés dans l'élaboration d'un matériau composite à renfort fibreux sont présentés. Ensuite, les différents types de fibres de verre existant sont détaillés. Puis, les différents types de renfort fibreux pouvant être rencontrés dans un matériau composite sont énumérés. Enfin, une présentation sommaire des différents procédés de mise en œuvre est effectuée.

Dans le second chapitre, les principes de base du tissage armuré (2D et 3D) sont présentés. Les différentes étapes intervenant dans un processus de tissage (du fil au tissu final) sont détaillées.

L'étude bibliographique du comportement mécanique des renforts fibreux à différentes échelles est effectuée dans le troisième chapitre. Les différents mécanismes de déformation

intervenant à ces trois échelles (macroscopique, mésoscopique, et microscopique) sont présentés, ainsi que les essais expérimentaux permettant de les caractériser.

Un état de l'art des différents modèles ou outils numériques existant, utilisés pour représenter des renforts fibreux, notamment tissés, est présenté. Les modèles géométriques de représentation des renforts fibreux sont abordés dans un premier temps. Les modèles numériques prenant en compte le procédé et les déformations que celui-ci peut engendrer sur le fil, et donc la structure tissée finale, sont décrits dans un deuxième temps.

Le cinquième chapitre est consacré aux productions de tissus effectuées dans le cadre du projet NUMTISS, ainsi qu'aux différentes observations et analyses expérimentales effectuées sur le fil ou le tissu.

Enfin, dans le dernier chapitre est présenté tout d'abord la chaîne numérique NUMTISS ainsi que l'interfaçage de cette chaîne - réalisé par le CEDREM, et la place de la simulation du procédé de tissage dans la chaîne numérique. Ensuite, la mise en donnée du modèle numérique de simulation du procédé de tissage sera détaillée. Enfin, la dernière partie de ce chapitre permettra de mettre en parallèle les observations expérimentales et les résultats numériques obtenus pour un tissu d'armure toile et un d'armure croisé 2-2.

Chapitre 1 : les renforts fibreux dans les matériaux composites

Ce premier chapitre est une introduction à la conception des matériaux composites, avec notamment les renforts fibreux qui les constituent. Suite à une présentation générale des matériaux composites, les différents types de matrices seront détaillés ainsi que les différents types de renforts fibreux existant. L'avantage des matériaux composites à renforts fibreux sera présenté. On s'intéressera uniquement au matériau verre (pour les renforts fibreux), qui a été utilisé dans cette étude. Enfin, les procédés de mise en œuvre pouvant être utilisés pour concevoir les composites seront détaillés. Enfin, les procédés de mise en œuvre pouvant être utilisés pour concevoir les composites seront détaillés, avec une attention particulière accordée au procédé d'infusion.

Sommaire du chapitre

1. LES RENFORTS FIBREUX DANS LES MATÉRIAUX COMPOSITES	20
1.1. DÉFINITION D'UN MATÉRIAU COMPOSITE	20
1.2. LES MATRICES.....	21
1.3. AVANTAGE DES MATÉRIAUX COMPOSITES À RENFORTS FIBREUX	21
1.4. LES DIFFÉRENTS TYPES DE FIBRES DE VERRE	22
1.5. LES RENFORTS	24
1.5.1. LES RENFORTS TISSÉS : TISSUS 2D	26
1.5.2. LES RENFORTS TISSÉS : TISSUS 3D	27
1.6. LES PROCÉDÉS DE MISE EN ŒUVRE	28

1. Les renforts fibreux dans les matériaux composites

Ces travaux portent sur le procédé de tissage et sa modélisation pour l'élaboration de préformes tissées utilisées comme renforts de composites. Cette section, après un rappel succinct de la définition d'un matériau composite et de ses résines, se focalisera sur le renfort, constituant essentiel des matériaux composites utilisés dans le secteur des transports, c'est-à-dire pour des pièces fortement sollicitées. Nous détaillerons le procédé d'élaboration à l'échelle des fibres, et plus spécifiquement à l'échelle des fibres de verre utilisées dans le cadre de cette étude.

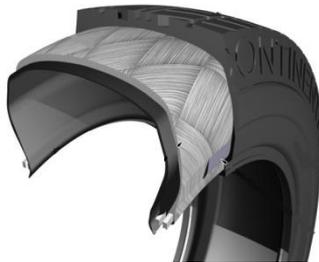
1.1. Définition d'un matériau composite

Les matériaux composites sont, par définition, des matériaux constitués d'au moins deux composants non miscibles. L'objectif de leur assemblage est de donner au produit final des propriétés qu'un seul constituant ne possède pas, mais également, par les choix spécifiques de ces constituants, de les adapter à des cahiers des charges spécifiques, et franchir ainsi plusieurs obstacles technologiques. Les matériaux composites sont courants : ils sont, soit d'origine naturelle (association de terre et fibres végétales), soit issus de produits synthétiques (le caoutchouc armé, le composite fibreux). Les principaux constituants du composite sont le renfort et sa matrice [5].

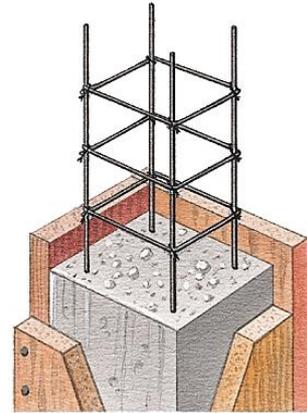
L'invention des matériaux composites n'est pas récente puisque depuis très longtemps le torchis constitué de fibres végétales liées entre elles par de la terre a été utilisé comme matériau de construction (Figure 1-1. (a)). Il a aujourd'hui laissé la place aux bétons (ciment renforcé par des particules de silice) et aux bétons armés (béton renforcé par une structure métallique) pour la construction de bâtiments (Figure 1-1. (b)), il existe également des bétons de chanvre constitués de chènevotte (partie centrale de la tige de chanvre) et de chaux [20]. Dans le domaine de l'automobile, les pneumatiques sont des structures composites complexes constitués de caoutchouc renforcé par des tissus et des câbles (Figure 1-1. (c)). Le sport est également un domaine où les matériaux composites sont très présents, mais dans le cadre de ces travaux c'est pour le domaine de l'aéronautique que les composites qui nous intéressent sont utilisés.



a. Torchis [21]



b. Structure pneumatique [22]



c. Béton armé [23]

Figure 1-1. Différents matériaux composites courant.

1.2. Les matrices

Les matrices ont pour principal but d'assurer la cohésion des renforts au sein de la structure et de faciliter la transmission des efforts mécaniques aux renforts. Elles permettent de protéger le renfort vis-à-vis des conditions environnementales et de donner la forme souhaitée au produit réalisé. Parmi les matrices actuellement utilisées, les matrices organiques sont les plus répandues à l'échelle industrielle. Les autres matrices, telles que les matrices céramiques et les matrices métalliques, sont utilisées pour des applications spécifiques quand les contraintes de température ou d'hygrométrie sont sévères. Dans le cadre du projet NUMTISS, nous nous sommes intéressés uniquement aux composites à matrice organique (CMO). Les matrices CMO peuvent être divisées en deux catégories différentes : les polymères thermodurcissables et les polymères thermoplastiques.

Les polymères thermodurcissables sont composés de chaînes réticulées ou tridimensionnelles. Ils sont infusibles, insolubles et leurs transformations sont irréversibles. La faible viscosité des résines thermodurcissables les rend plus compatibles avec les procédés de mise en œuvre nécessitant un écoulement de résine au travers du renfort fibreux. En effet, la viscosité de la matrice doit être inférieure à certaines valeurs pour que la mise en œuvre de celle-ci soit envisageable dans un renfort fibreux. Cette valeur de viscosité dynamique dépend du procédé de mise en œuvre (par exemple, pour le procédé RTM, elle est environ de 0,1 à 1 Pa.s [24]).

Les polymères thermoplastiques sont composés de chaînes linéaires, monodimensionnelles, ramifiées ou bidimensionnelles. Ils sont fusibles et solubles. Ces résines nécessitent un chauffage pour atteindre un état suffisamment pâteux et les rendre aptes à la mise en œuvre.

1.3. Avantage des matériaux composites à renforts fibreux

De nos jours, les matériaux composites à renforts fibreux sont de plus en plus utilisés. Le choix des matériaux constitutifs ainsi que le mode d'assemblage des différents composants

leurs permettent de répondre à de nombreuses spécifications. Parmi les propriétés majeures qu'ils offrent on peut noter :

- leurs bonnes caractéristiques spécifiques (caractéristiques par unité de masse) permettant un gain de poids ; leur bonne ténacité (ou résistance aux dommages) offrant une grande sûreté aux structures ;
- la possibilité de réalisation de formes complexes, permettant l'intégration de plusieurs fonctions. Là où une pièce équivalente en métal nécessiterait de nombreuses opérations d'usinage et/ou d'assemblage, une partie de ces opérations peut être évitée avec les matériaux composites ;
- leurs qualités d'amortissement des vibrations permettant, entre autres, la réduction des nuisances sonores ;
- leur bonne résistance à la fatigue permettant la création de structures durables ;
- l'absence d'assujettissement à la corrosion, contrairement aux matériaux métalliques.

Une des principales idées directrices lors de l'élaboration d'un matériau composite est la diminution de la masse. On recherche alors des constituants ayant des propriétés mécaniques élevées pour une masse volumique faible, soit des propriétés spécifiques les plus élevées possibles. Lorsque l'on considère les matériaux usuels élaborés sous forme massive, on constate que l'acier, les alliages d'aluminium, le bois ou le verre ont des modules d'élasticité spécifiques comparables [5]. Par contre, lorsque l'on compare leurs contraintes spécifiques à la rupture, on constate que celle du verre est nettement supérieure à celles des autres matériaux cités [5]. Il peut donc être intéressant d'utiliser le verre en complément d'un autre matériau pour élaborer un composite, le verre ne pouvant être utilisé seul du fait de sa fragilité. De plus, les contraintes à rupture spécifiques mesurées expérimentalement se révèlent plus faibles que celles déterminées théoriquement [5]. Cette différence provient des nombreux défauts présents dans les matériaux lors des différentes étapes de leur élaboration à l'échelle industrielle. Il est par conséquent nécessaire de maîtriser l'ensemble de ces étapes.

1.4. Les différents types de fibres de verre

Les fils étudiés dans le cadre du projet NUMTISS, sont exclusivement constitués de filaments de verre.

Selon l'usage qui est fait du fil, plusieurs types de compositions peuvent être utilisés comme matière première. Les différentes compositions du verre, couramment utilisées pour fabriquer des filaments de verre destinés à des applications structurelles, sont décrites dans le Tableau 1-1.

	Verre type E	Verre type C	Verre type AR
SiO ₂	53-55 %	60-65 %	61%
Al ₂ O ₃	14-15 %	3,5- 6 %	
CaO	17-23 %	14%	5%
MgO	1,00%	3%	
Na ₂ O ₃	0,80%	10%	17%
B ₂ O ₃	0-8 %	5%	
Fe ₂ O ₃	0,30%	0,5 %	0,3 %
TiO ₂	0,5 %		
ZrO ₂			10%

Tableau 1-1. Composition des principaux filaments en verre utilisés dans les renforts.

La composition de type E (pour Electrique) est la composition la plus utilisée pour tous les matériaux composites à matrices organiques. La composition de type C (pour résistance Chimique) est généralement utilisée dans des applications nécessitant une bonne résistance à la corrosion. La composition de type AR (pour Alkali Résistant) résiste, grâce à la présence de ZrO₂ (oxyde de zirconium), aux attaques d'hydroxyde de calcium (chaux), ce qui permet notamment de renforcer des bétons. Il existe aussi des compositions de type R, H, S et S₂, qui sont des verres à hautes performances mécaniques (hautes teneurs en silice et en alumine, sans bore, ni alcalin).

La composition choisie est chauffée à environ 1500°C, puis filée à grande vitesse pour former les filaments. Ce procédé permet d'obtenir des fils silionnes (appelées également stratifils ou rovings) composées de fibres continues (par opposition aux fils verrannes composées de fibres discontinues voluminisées) présentant de très bonnes caractéristiques mécaniques. Ces filaments, dont le diamètre nominal est généralement compris entre 5 et 24 microns, sont alors assemblés en fils : chaque fil comporte entre 1000 (1k) et 12000 (12k) filaments. Des organes mécaniques d'assemblage permettent d'introduire une éventuelle torsion au fil, ainsi qu'un additif appelé ensimage permettant d'assurer la bonne cohésion des fibres ou filaments au sein du fil, de limiter l'abrasion et l'endommagement des fibres au cours du tissage, et d'améliorer la tenue mécanique des interfaces fibres/matrices dans le composite final. La Figure 1-2 illustre le procédé de fabrication des filaments par filage. Dans ce procédé, le diamètre du filament obtenu dépend principalement de la géométrie et de la taille des tétons de la filière, de la vitesse de filage et de la vitesse de refroidissement.

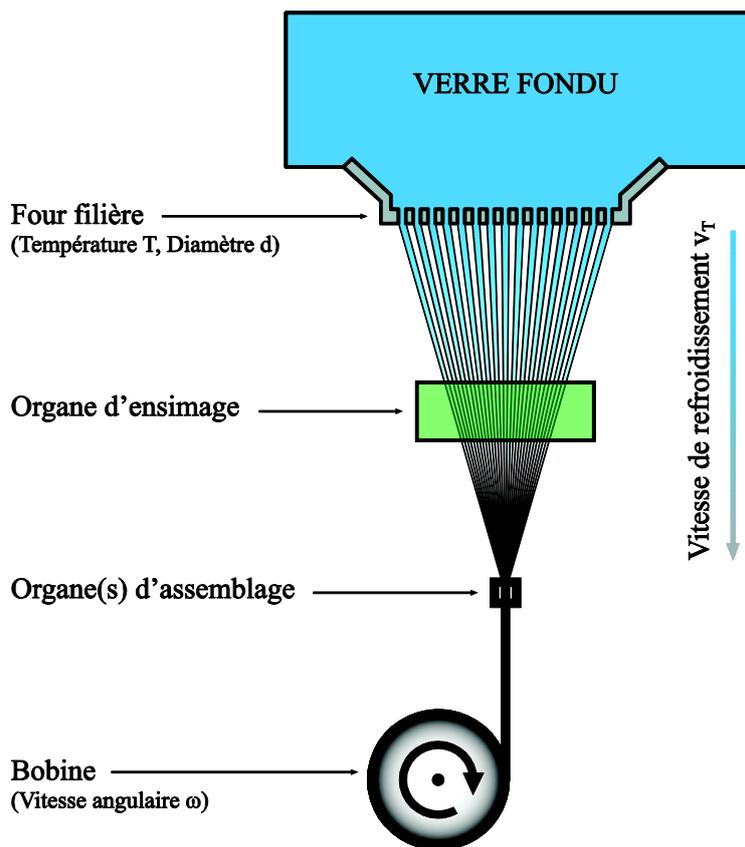


Figure 1-2. Procédé de filage et d'assemblage des multi-filaments de verre [25].

1.5. Les renforts

Toute structure fibreuse peut être utilisée en tant que renfort dans un matériau composite. Les renforts assurent la résistance et la ténacité du matériau composite. Suivant leur géométrie, les structures fibreuses peuvent être classées en deux familles : préformes élaborées à partir de fibres discontinues ou à partir de fibres continues.

Les fibres discontinues, de quelques centimètres de long au maximum, sont essentiellement utilisées dans les applications non structurales. Souvent, leur ajout a pour objectif d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la matrice, l'orientation très variée des fibres rend le comportement de la pièce obtenue plutôt isotrope.

Les fibres continues ou filaments sont utilisées pour des applications structurales. Si leur diamètre est très petit, de l'ordre de quelques micromètres, leur longueur est de quelques mètres à quelques kilomètres. Pour le matériau composite fabriqué avec des fibres continues, la direction des fibres est la direction privilégiée de la pièce obtenue.

La présente étude concerne les matériaux composites à base de renforts à fibres continues utilisés pour la fabrication de pièces structurales dans le secteur de l'aéronautique. Il est par conséquent nécessaire à l'échelle des préformes de maîtriser à la fois les orientations mais aussi les densités. Ces deux caractéristiques permettront d'obtenir des pièces satisfaisant les

cahiers des charges. Par conséquent, nous ne considérerons pas dans les architectures potentielles de renfort, les non-tissés qui présentent une orientation aléatoire des fibres.

Les fibres continues sont juxtaposées parfois retordus ou superposées pour créer des paquets, appelés des multi-filaments (mèches).

Plusieurs types d'agencement de fils peuvent être rencontrés :

- *Les renforts unidirectionnels - Non-Crimp Fabric (NCF)*

Ces renforts offrent la possibilité de profiter au maximum de la rigidité des fibres, car les fils, n'étant pas entrelacés, ne sont pas ondulés. Par contre, pour obtenir des préformes bidirectionnelles à partir de ces nappes, il est nécessaire d'empiler plusieurs couches aux directions souhaitées [5], [26]. N'ayant pas de lien, ils ne disposent pas de rigidités de cisaillement plan et leur mise en forme est complexe. Pour leur conférer une déformabilité en cisaillement, il peut être ajouté un point de liage sous forme de renforcement entre les plis, et ainsi obtenir des « Non-Crimp Fabrics » [26].

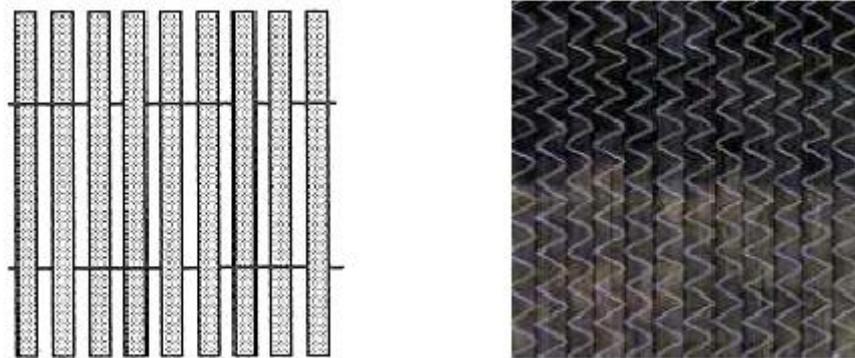


Figure 1-3. Renfort NCF.

- *Les renforts textiles 2Ds*

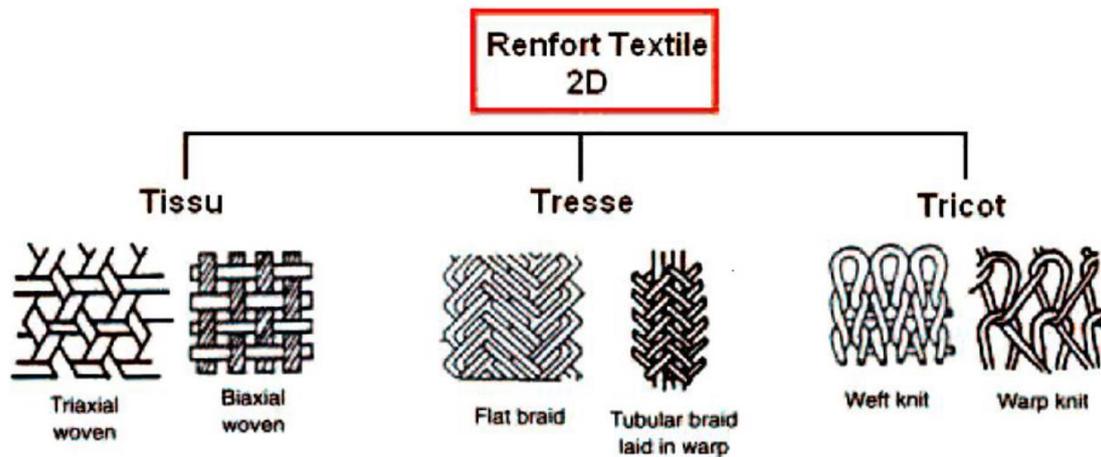


Figure 1-4. Classification des principales structures textiles 2D [27].

Dans les composites, on retrouve en premier lieu les technologies de tissage et de tressage et dans une moindre mesure les tricots (Figure 1-4).

Les tricots sont obtenus en réalisant des boucles (mailles) à partir d'un fil, qui passent l'une dans l'autre. Par cette structure spécifique de boucles, ces architectures disposent d'une très grande déformabilité et peuvent par conséquent être utilisées pour réaliser des formes complexes, mais leur rigidité n'est alors pas très importante.

Les tresses se réalisent grâce à l'entrelacement de plusieurs fils. Elles peuvent être élaborées dans un plan telle la tresse (ou natte) à trois fils utilisée de manière commune pour les coiffures, ou de manière à former une structure tubulaire autour d'un mandrin ou d'une âme comme dans le cas de l'élaboration de cordages.

Les structures tissées sont les plus répandues et les plus utilisées dans le domaine des composites. L'ensemble des fils étant contenu dans le plan, ces structures présentent d'intéressantes propriétés mécaniques lorsqu'elles sont soumises à des efforts de traction.

1.5.1. Les renforts tissés : Tissus 2D

Les tissus bidimensionnels sont réalisés avec des métiers à tisser par l'entrelacement de fils de chaîne et de fils de trame. En fonction du mode d'entrelacement, on obtiendra ce qu'on appelle communément une armure, qui peut se classer généralement en trois catégories (Figure 1-5) [28] :

- Toile ou taffetas : chaque fil de trame passe successivement au dessus puis en dessous d'un fil de chaîne. Le fort entrelacement des fils donne à la toile une importante rigidité et une faible déformabilité.
- Sergé $m \times n$: chaque fil de trame passe successivement au dessus de m puis en dessous de n fils de chaîne. Les points de liage (c'est-à-dire les croisements où les fils de trame passent en dessous d'un fil de chaîne) successifs forment une diagonale. La

variation des paramètres m et n permet d'obtenir des tissus avec des rigidités en cisaillement variable.

- Satin de n de décochement m : chaque fil de trame passe au dessus de $(n - 1)$ puis sous un fil de chaîne. Les points de liage consécutifs ne forment pas de diagonale et leur position est définie par le décochement m . Cette armure est très souple et facilement déformable en cisaillement.

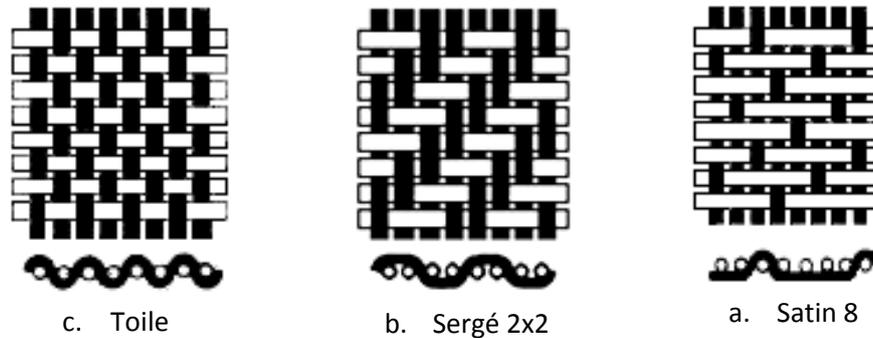


Figure 1-5. Les trois armures fondamentales du tissage [171].

Le comportement d'un tissé dépend fortement de ses constituants et de la manière dont ceux-ci ont été élaborés. Dès lors, on peut le caractériser par :

- Le type de fil (matériau, diamètre des fibres,...) ;
- L'armure ;
- La densité de fil (en fil/cm) pour chaque réseau ;
- L'embuvage qui caractérise l'ondulation des fils et s'exprime en pourcentage (Figure 1-6) [29].

$$\text{Embuvage} = \frac{\text{Longueur du fil} - \text{Longueur du tissu}}{\text{Longueur du tissu}} \times 100$$

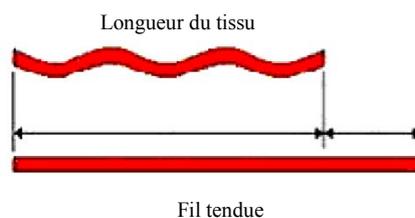


Figure 1-6. Définition de l'embuvage [29].

1.5.2. Les renforts tissés : Tissus 3D

Afin de supporter des efforts plus importants, il est généralement nécessaire d'utiliser plusieurs plis de renforts de façon à consolider la structure fibreuse. Ces différents plis peuvent être assemblés entre eux afin de renforcer leur cohésion par divers moyens mécaniques tels que le piquage ou la couture.

Cependant, outre les gains en flexibilité que peuvent présenter certains renforts une fois cousus, ces techniques d'assemblage présentent l'inconvénient de dégrader les propriétés mécaniques de la structure en endommageant une partie des fibres [30].

Afin d'éviter ces problèmes dus à l'assemblage, il semble intéressant de produire un renfort fibreux présentant directement l'épaisseur et l'orientation des fils souhaitées. Les renforts 3D apparaissent alors comme une solution innovante à fort potentiel [3], [31]–[36].

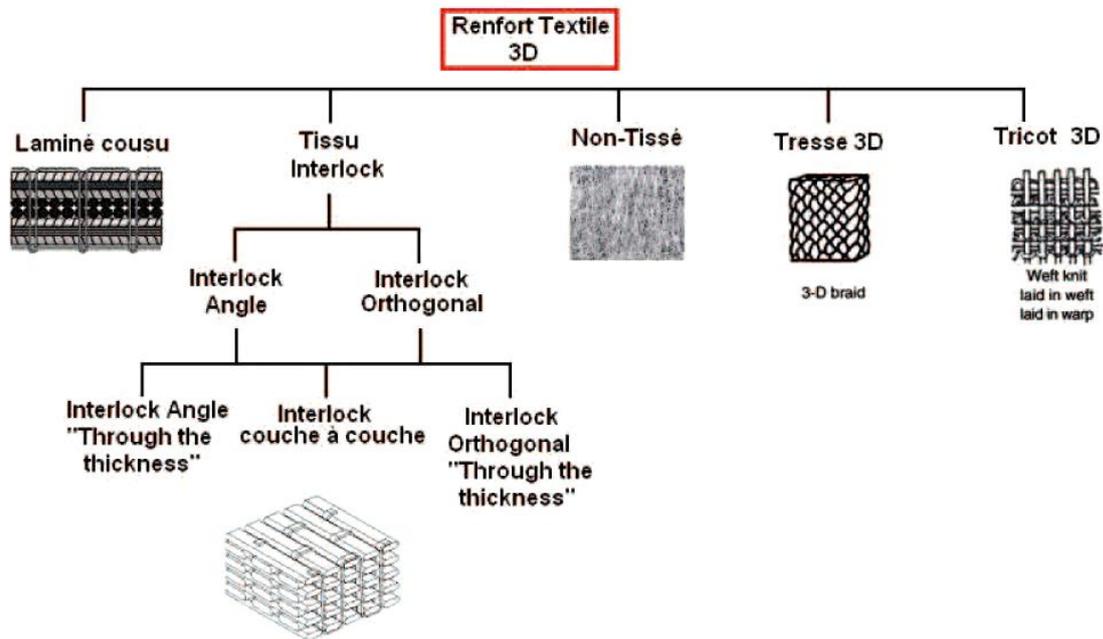


Figure 1-7. Classification des différentes structures textiles 3D [27].

1.6. Les procédés de mise en œuvre

Dans le cadre du projet NUMTISS, la modélisation et l'expérimentation de la mise en œuvre des composites – dernière étape de la chaîne numérique – a été réalisée par notre partenaire de l'école des Mines de Douai (Figure 1-8 (a)). Il existe différents types de procédés de mise en œuvre des matériaux composites à partir de renforts tissés (bidimensionnels ou tridimensionnels) qui se différencient en fonction de la nature des constituants (renfort et matrice). D'une manière générale, la mise en œuvre des composites à matrices organiques s'effectue par moulage [5], [37] en deux grandes étapes qui sont : la disposition du tissu et de la matrice dans un moule ; la solidification de la matrice.

On distingue deux catégories de procédés (Figure 1-9) :

- Les procédés manuels : moulage au contact, moulage sous vide, l'infusion, les pré-imprégnés (autoclave), etc ;
- Les procédés mécanisés : Resin Transfer Moulding, l'enroulement filamentaire, pultrusion, etc.

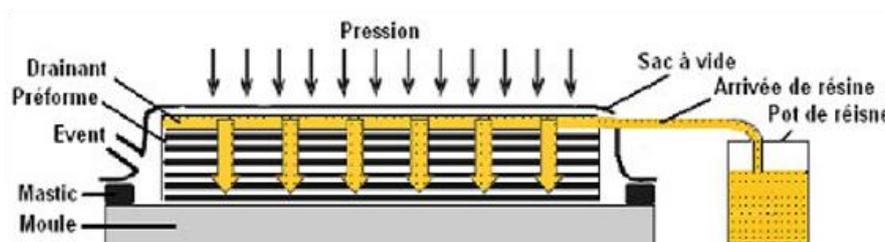
D'une manière générale, les procédés comme le moulage au contact et le moulage par projection ne sont pas utilisés pour des applications de haute technologie, du fait de leur rendement limité, de l'incertitude et de la mauvaise qualité des pièces finales.

Dans ces différents procédés on peut distinguer les *pré-imprégnés*, qui est un procédé où l'élément de base est un assemblage de nappes composées du renfort et de la matrice. Ainsi, les deux composants sont manipulés en même temps pour l'obtention de la pièce finale. Dans le cas des renforts pré-imprégnés à matrice thermoplastique on obtient la possibilité de mouvement relatif des fibres et donc de déformation du renfort en chauffant préalablement le renfort (rigide à température ambiante), à une température supérieure à celle de fusion de la résine. Pour les pré-imprégnés à matrice thermodurcissable, la matrice n'est a priori pas solide, son état est visqueux, car la résine n'a pas encore été polymérisée.

On distingue aussi les procédés LCM (Liquid Composites Moulding) tels que : RTM (Resin Transfer Moulding) [38]–[40], VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding), LRI (Liquid Resin Infusion) [6], etc. Dans ces procédés LCM on peut distinguer deux grandes familles suivant le type d'infiltration de la résine : soit infiltration par injection (type RTM), soit infiltration par infusion (type LRI). La nature du front d'écoulement dans les procédés peut être longitudinale, transversale ou une combinaison des deux [41]. Par exemple, le procédé LRI (Figure 1-8), qui est le procédé étudié par l'école des Mines de Douai dans le cadre du projet NUMTISS, possède un front d'écoulement qui est une combinaison des deux (transversale et longitudinale).



(a)



(b)

Figure 1-8. (a) Suivi expérimental de l'évolution de l'épaisseur et de la pression au cours d'un procédé d'infusion[11] ; (b) principe du procédé LRI [6].

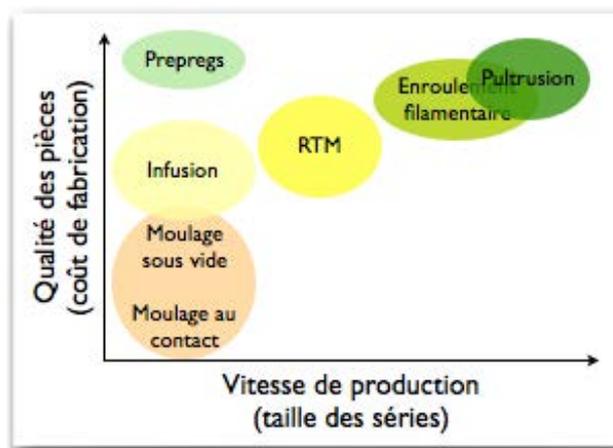


Figure 1-9. Récapitulatif des principaux procédés de mise en forme des composites à fibres longues et matrices thermodurcissables [42].

Chapitre 2 : Tissage des renforts de composites

Dans ce chapitre, les différentes étapes du tissage des renforts fibreux 2D et 3D (interlock) utilisés dans les composites seront détaillées. L'influence sur le comportement du fil des ces différentes étapes (retordage du fil, ourdissage, rentrage, etc.) sera présentée. Enfin, les inconvénients du tissage des tissus de type interlock seront discutés.

Sommaire du chapitre

2. TISSAGE DES RENFORTS DE COMPOSITES	32
2.1. TISSAGE RENFORTS 2D	32
2.1.1. PRINCIPE DE BASE DE LA FORMATION D'UN TISSU	32
2.1.2. ETAPES DU TISSAGE	34
2.1.3. TORSION DES FILS DE VERRE	35
2.1.4. OURDISSAGE DES FILS DE CHAINE	37
2.1.5. RENTRAGE DES FILS	38
2.1.6. INSERTION DE LA TRAME SUR LA MACHINE À TISSER.....	39
2.1.7. MOUVEMENT DU PEIGNE	40
2.2. TISSAGE DES RENFORTS 3D	41
2.2.1. INCONVÉNIENTS DU TISSAGE 3D (INTERLOCK).....	44

2. Tissage des renforts de composites

Comme précisé en introduction, notre étude est dédiée à l'élaboration par le tissage de renforts de matériaux composites. La compréhension du procédé est un préalable essentiel aux mesures réalisées ainsi qu'aux étapes de production qui seront décrites dans les chapitres suivants. Dans cette démarche les différentes étapes du processus doivent être explicitées en vue de la simulation du procédé, autre objectif de ces travaux de thèse.

Ce chapitre est ainsi consacré aux principes de l'élaboration d'un tissu. Il s'appuie sur les nombreuses études expérimentales et numériques réalisées au Gemtex [27], [43]–[46] et sur les moyens disponibles dans ce laboratoire.

Le procédé de tissage est défini par l'entrelacement de fils parallèles disposés dans le sens de la longueur (la chaîne) et de fils perpendiculaires disposés en largeur (la trame) [47].

Norme AFNOR NF G 00-001 : Etoffe formée par l'entrecroisement généralement perpendiculaire de deux ensembles de fils : cet entrecroisement est réalisé au cours du tissage sur machine à tisser [48].

2.1. Tissage renforts 2D

2.1.1. Principe de base de la formation d'un tissu

La majorité des différents types de tissu sont formés dans une zone située entre un ensemble de fils de chaîne (sens machine) disposés parallèlement entre eux sur une ensouple avec une tension constante et un rouleau d'appel entraînant le tissu. Deux opérations principales sont réalisées dans cette zone : une opération de sélection des fils de chaîne et une opération d'insertion de la trame. La façon dont le motif d'entrecroisement des fils se répète dans la structure définit « l'armure ». Les propriétés mécaniques du tissu dépendent en grande partie de cette armure.

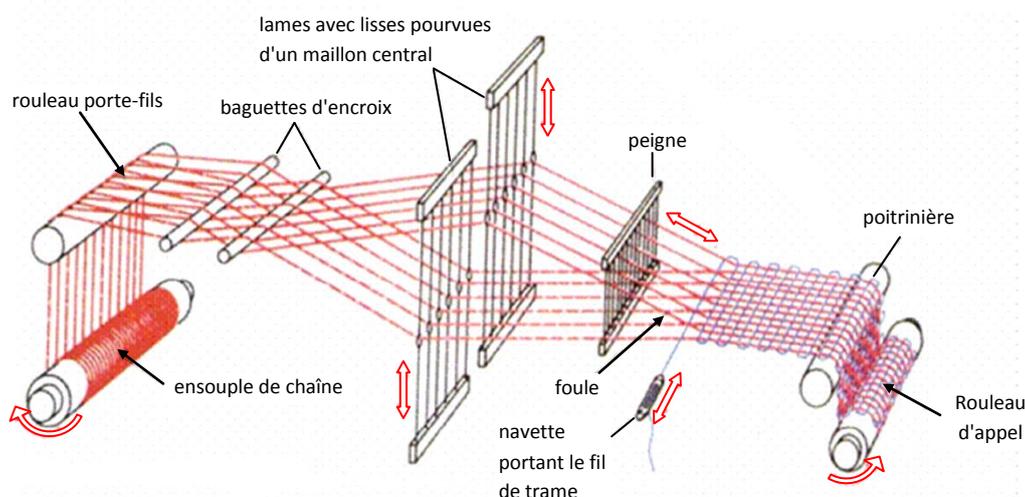


Figure 2-1. Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un métier à tisser [49].

Les différentes étapes de la formation du tissu se succèdent dans l'ordre d'apparition des figures suivantes et généralement en un tour d'arbre moteur.

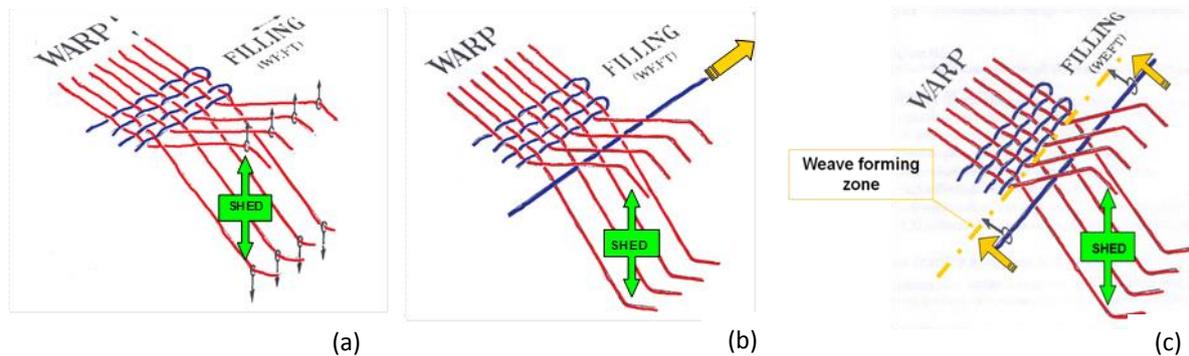


Figure 2-2. Etapes de la formation d'un tissu ; (a) ouverture de la foule ; (b) insertion du fil de trame ; (d) tassage du fil de trame.

Le tissage de deux fils orthogonaux, respectivement la chaîne et la trame, se réalise dans une zone précise du métier où la foule va s'ouvrir. Le fil de trame va être inséré puis le peigne va se rabattre sur la ligne de formation du tissu.

La cinématique de la zone de formation du tissu (Figure 2-2) peut être décrite par ces trois grandes étapes :

Étape 1 : Sélection de chaque lisse impliquant un mouvement des fils de chaîne dans deux positions (haut et bas) (Figure 2-2 (b)). L'angle obtenu entre ces deux nappes de fils de chaîne (supérieures et inférieures) donne la valeur de la foule.

Étape 2 : Insertion du fil de trame à l'intérieur de la foule par l'intermédiaire d'un vecteur propre au métier (Figure 2-2 (c)).

Étape 3 : Tassage du fil de trame contre le tissu déjà formé (point de façure), grâce à l'action du peigne (Figure 2-2 (d)). Le point de façure représente l'intersection des nappes de fils de chaîne au niveau de la formation du tissu.

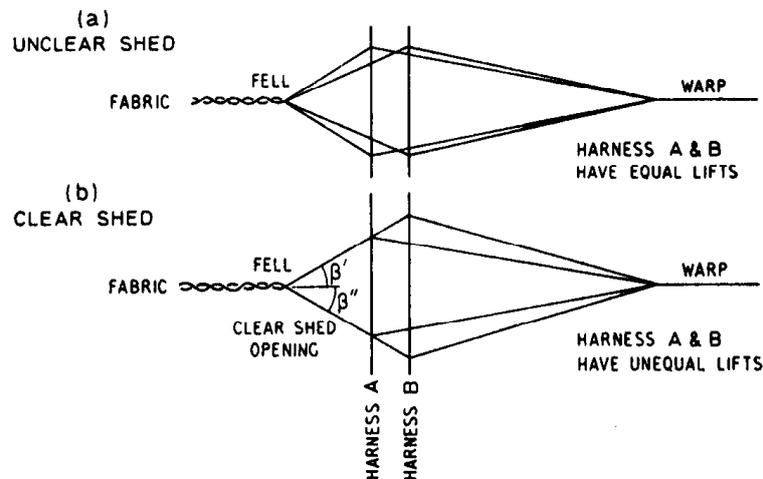


Figure 2-3. Représentation d'une foule rectiligne et d'une foule oblique.

Deux types de foules peuvent être obtenues : une foule rectiligne et une foule oblique (cf. Figure 2-3).

La foule rectiligne est caractérisée par une course constante de l'évolution des fils de chaîne introduits dans les lisses. La foule oblique est caractérisée par une course variable de l'évolution des fils de chaîne introduits dans les lisses [50]. Dans le cadre de notre étude et de la production qui a été effectuée, une foule oblique a été privilégiée pour permettre une meilleure insertion des duites, notamment pour les tissus multicouches.

La prise en compte des trois étapes principales inscrites dans le cycle d'ouverture de la foule pendant le tissage permet d'avoir une vision plus large des différents éléments en mouvement ou en contact avec les fils de chaîne et trame. L'outil de simulation proposé aura pour but de reproduire ces principales étapes de production dans le but de simuler le comportement complet des fils de chaîne et trame pendant le tissage.

2.1.2. Etapes du tissage

Selon le circuit de fabrication utilisé (échantillonnage, petite et moyenne série, grande série), et la technique de tissage utilisée (armuré ou jacquard), les différentes étapes qui participent à la production d'un tissu sont différentes. Dans le cadre du projet NUMTISS, seuls des échantillons de tissu ont été produits, sur une machine à tisser (marque DORNIER) équipée de cadres (tissage armuré) à insertion automatique de trames par lances bilatérales montées sur corps rigides.

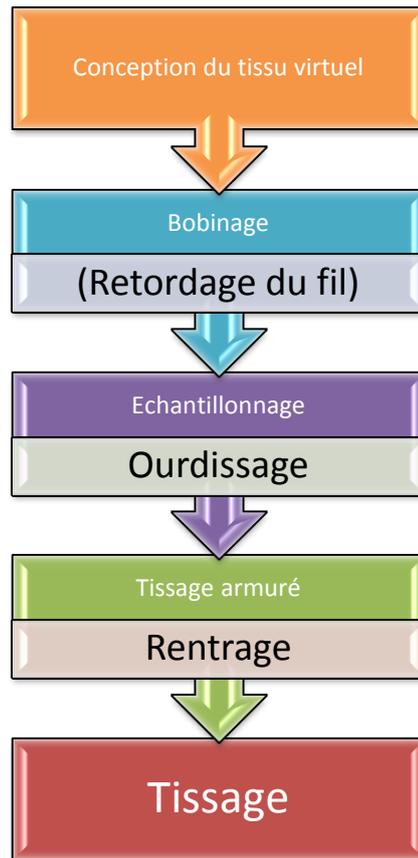


Figure 2-4. Etapes de réalisation du tissu à l'Ensait dans le cadre du projet NUMTISS.

2.1.3. Torsion des fils de verre

Les rovings de verre (multi-filaments non retordus) sont réceptionnés en bobine et retordus par la suite à 25 tours/m. Au cours de précédentes études internes au laboratoire, il a été observé que l'application d'une torsion apportait une cohésion supplémentaire au fil et empêchait la formation importante de fibrilles durant le tissage [44]. Ces fibrilles empêchent d'avoir une ouverture de foule correcte lors de l'insertion du fil de trame, ce qui rend cette opération difficile et très dégradante pour les fils de chaîne, pouvant aller jusqu'à la casse de ces derniers. De plus, une mauvaise ouverture de foule peut impliquer des erreurs de tissage rendant la structure inutilisable et géométriquement non conforme. Aussi, nous nous sommes assurés avant la production des tissus que la torsion appliquée sur nos fils n'endommagerait pas leurs propriétés.

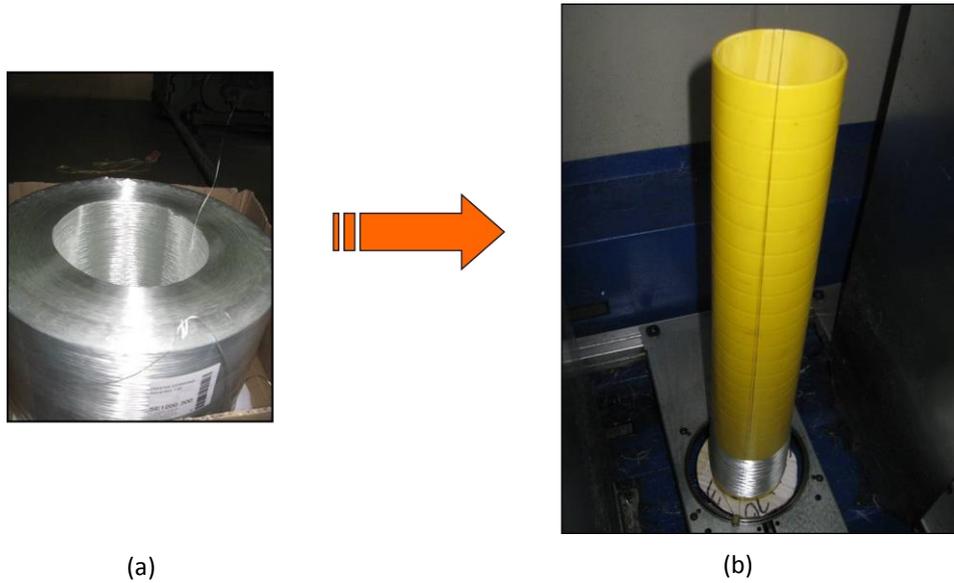


Figure 2-5. (a) Bobine de roving de verre E ; (b) Cops de fil retordu à 25 t/m sur machine Twistec.

L'application d'une torsion a également une influence sur les caractéristiques mécaniques de fil de para-aramide (Figure 2-6 ci-dessous [44]) et sur des rovings de lin (Figure 2-7 ci-dessous, [51]). Il a été observé aussi que l'ajout d'une légère torsion au multi-filament de verre, comprise entre 10 et 30 tours/m, pouvait améliorer ses propriétés mécaniques [52].

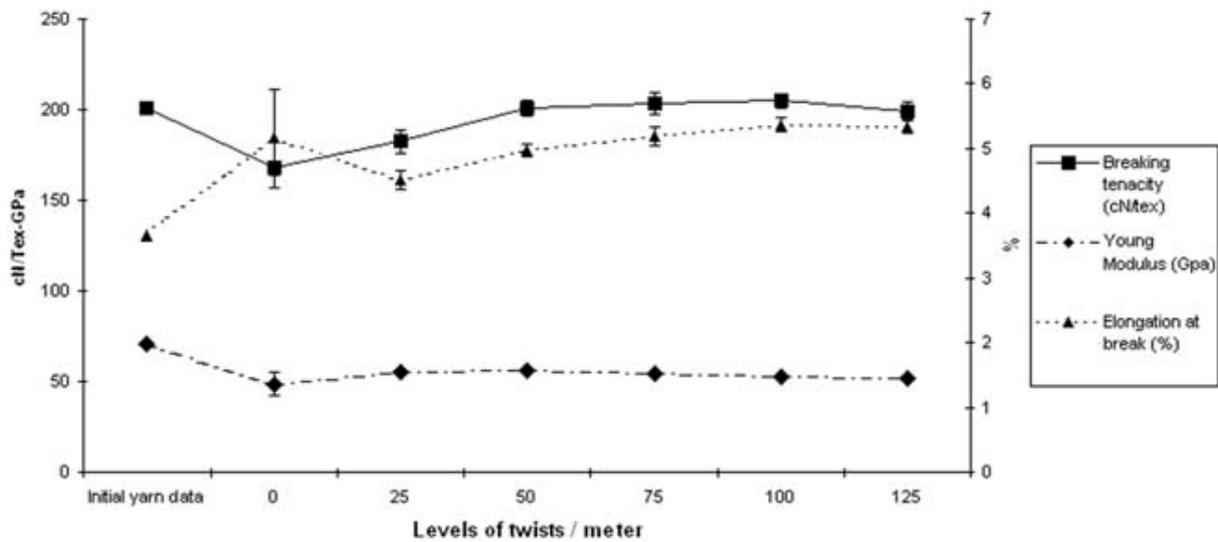


Figure 2-6. Caractéristiques mécaniques d'un fil de para-aramide.

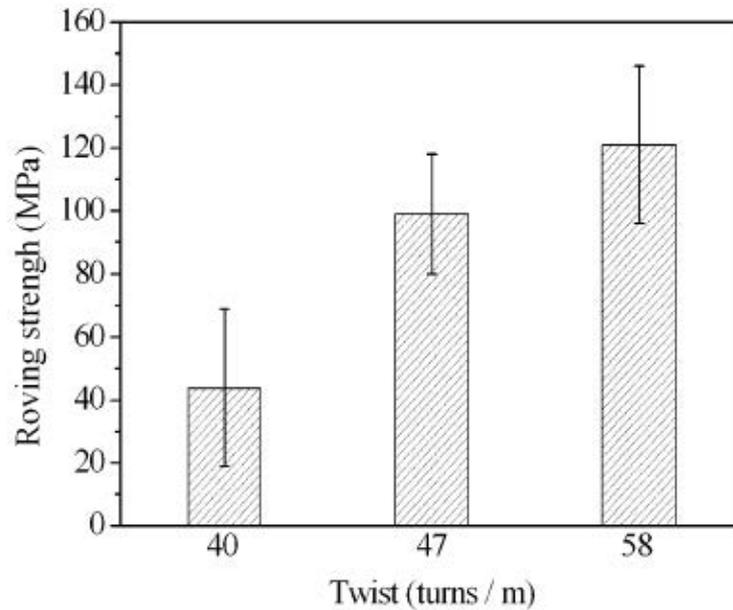


Figure 2-7. Rigidité du roving (testé en tension) représentée comme une fonction de la torsion pour les fils de lin (570 Tex), montrant la rigidité à sec en fonction de la torsion du fil.

2.1.4. Ourdissage des fils de chaîne

Dans le cas de notre étude, étant donné les faibles quantités de tissu à produire, un ourdissage de type échantillonnage a été réalisé. L'ourdissage d'échantillonnage permet d'enrouler successivement les fils de chaîne les uns à la suite des autres sur le tambour de l'ourdissoir en suivant la formule d'ourdissage. Puis, une fois l'ensemble des fils de chaîne enroulés, une opération de dressage permet de transférer les fils de chaîne du tambour à l'ensouple.



Figure 2-8. (a) Ourdissage d'échantillonnage du fil de verre E ; (b) croisure des fils de chaîne ; (c) dressage des fils de verre du tambour à l'ensouple ; (d) ensouple de fils de chaîne montée sur la machine à tisser.

2.1.5. Rentrage des fils

Le rentrage est l'opération qui consiste à passer les fils de chaîne dans des lisses suivant un ordre déterminé à l'avance et choisi lors de la conception du tissu. Sa représentation schématique spécifie l'ordre dans lequel les fils de chaîne doivent être rentrés dans les œillets des lisses montées sur les cadres. Dans le cadre de notre projet, seuls le rentrage suivi (pour les tissus 2D) et le rentrage sauté (pour les tissus 3D) ont été utilisés (Figure 2-9). Le rentrage suivi est le rentrage le plus basique, il consiste à rentrer successivement les fils de chaîne dans l'ordre des cadres. Le nombre de fils de chaîne contenus dans le rapport en largeur de l'armure est forcément égal au nombre de cadres. Tandis que le rentrage sauté est un rentrage pour

lequel l'ordre des lisses ne correspond plus à l'ordre des fils de chaîne. Il y a un "saut" entre chaque rentrée de fil de chaîne. Il s'agit d'un rentrage employé dans le cas de tissus avec des densités en fils de chaînes entraînant un maximum de contact entre les fils. Dans le cas de notre projet, le fait d'utiliser un rentrage sauté, pour le tissage interlock 3D, a permis d'effectuer un seul rentrage pour les trois armures interlock à produire.

cadres



Figure 2-9. (a) Rentrage suivi ; (b) Rentrage sauté.

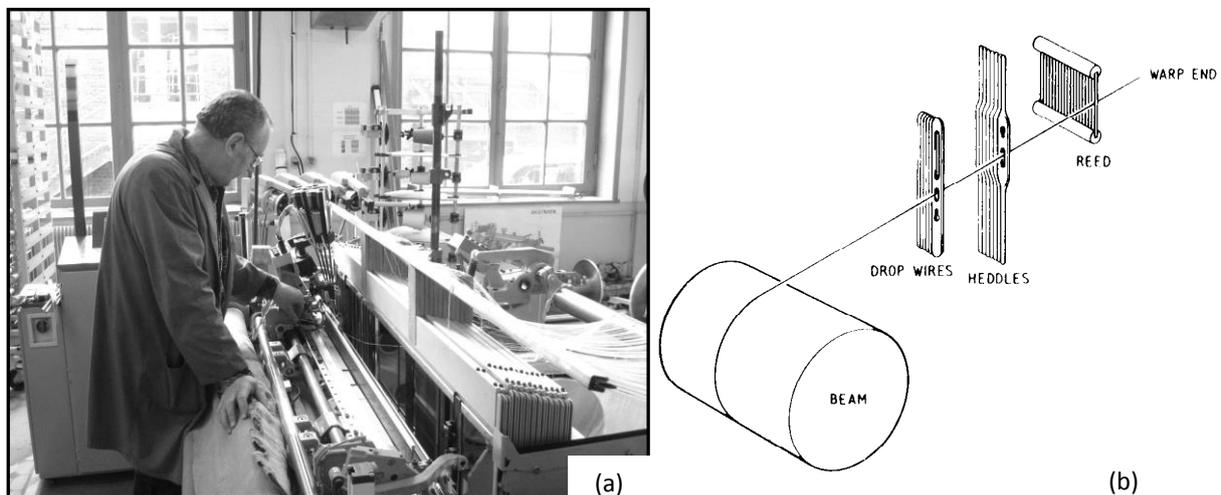


Figure 2-10. (a) Rentrage et piquage simultanés des fils de verre chaîne respectivement dans les lisses et le peigne ; (b) Eléments intervenants sur le fil de chaîne entre l'ensouple et le tissu.

Le fil de chaîne (warp end) enroulé sur une ensouple (beam) porte un capteur permettant de détecter une casse, dit lamelle casse-chaîne (drop wires), puis passe dans l'œillet de la lisse (heddles) et s'intercale dans une broche du peigne (reed) de la machine à tisser (Figure 2-10 (b)).

2.1.6. Insertion de la trame sur la machine à tisser

Différentes technologies permettent d'assurer l'insertion de la trame (par l'intermédiaire d'un élément solide ou fluide, par inertie). Dans le cas de la machine à tisser utilisée pour nos travaux de recherche, il s'agit d'un système d'insertion de la trame à lances par transfert positif au centre, qui est constitué de deux pinces "donneuses" (Figure 2-11).

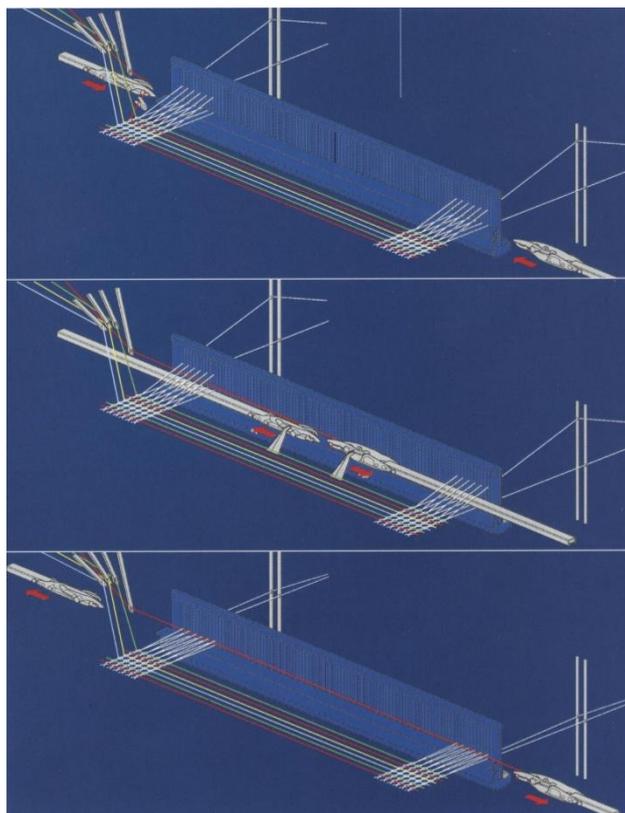


Figure 2-11. Système d'insertion de la trame par transfert positif au centre spécifique à Dornier [53].

2.1.7. Mouvement du peigne

Par son mouvement alternatif de rotation, entre deux passages de duites, le peigne assure le tassement de la duite au niveau du point de façure et assure une bonne cohésion du tissu final. Dans le cas du tissage, on peut soit tasser le fil de trame en foule ouverte (open shed) (Figure 2-12) ou en foule fermée. Sur la machine à tisser du laboratoire, le tassage s'effectue en foule ouverte, c'est-à-dire juste avant le croisement des nappes de fils de chaîne.

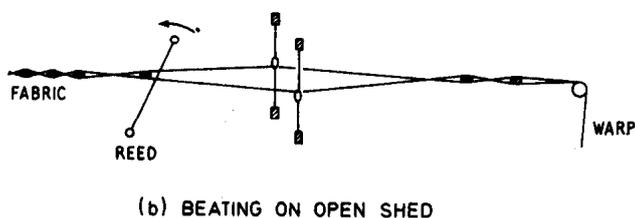


Figure 2-12. Tassement de la duite en foule ouverte.

2.2. Tissage des renforts 3D

Suite aux inconvénients observés dans les tissus 2D, les structures tissées 3D connaissent un fort développement [54]–[57] et prédominent souvent pour les applications composites de renforcement. L'assemblage des fibres dans les tissus 3D permet d'avoir une meilleure résistance au délaminage et offre une bonne résistance à l'impact [58], [59].

La structure fibreuse des tissés 3D consiste en l'assemblage de fils de chaîne et de trame dans le plan mais aussi dans l'épaisseur de la structure. Plusieurs arrangements de fils peuvent être réalisés et permettent d'obtenir une grande quantité de structures 3D [60]. Les structures tissées 3D sont communément appelées « angle Interlock » ou « Interlock », selon Tong, Mouritz & Bannister [33].

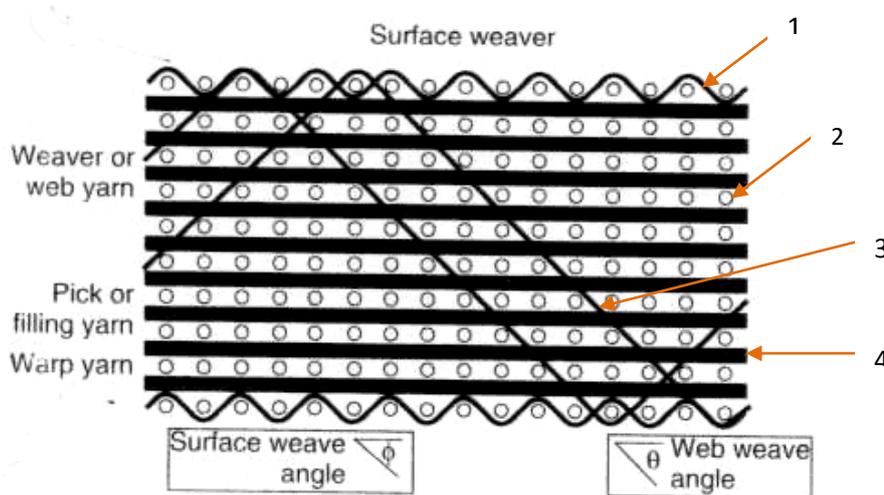


Figure 2-13. Illustration d'un tissu 3D.

1- *Surface weave – fils de surface* : ces fils sont intégrés dans une structure lorsque celle-ci requiert une surface et un backing assez lisse. Ces fils n'ont pas une grande influence sur les propriétés mécaniques du tissu, ils ont plutôt un rôle « esthétique ».

2- *Fill yarn – fils de trame* : ces fils sont perpendiculaires aux fils de chaîne arrivant de la machine à tisser. Ces fils n'ont pas beaucoup d'ondulations par rapport aux fils de chaîne. Ces fils apportent les propriétés mécaniques transversales aux tissus.

3- *Weavers ou web yarns – fils de chaîne* : ces fils correspondent exclusivement aux fils de chaîne placés dans la direction de la machine à tisser. Ils subissent des ondulations dues au fait qu'ils travaillent dans l'épaisseur du tissu.

4- *Stuffers yarns – fils de renfort* : ces fils sont également des fils de chaîne, car placés dans la direction de la machine à tisser. Ils sont peu ondulés et apportent une résistance et une dureté dans le sens longitudinal.

Les tissus interlocks 3D sont fabriqués sur des machines à tisser dont les mouvements principaux restent les mêmes, auxquelles des modifications sont apportées pour permettre le tissage sur plusieurs couches. En effet, contrairement au tissage 2D, nous avons besoin ici de

plusieurs alimentations de fils de chaîne (plusieurs ensouples) qui correspondent d'une manière générale au nombre d'évolutions de ces fils dans la structure 3D. Dans le cas du tissage interlock réalisé au sein du laboratoire GEMTEX, une deuxième ensouple a été rajoutée sur la machine à tisser automatique en plus de l'ensouple habituelle, étant donné que l'on avait deux évolutions différentes de fils de chaîne en termes de consommation – une pour le fil de liage et une pour le fil de renfort – dans les architectures produites.

Le principe de tissage est ensuite similaire, nous retrouvons le mouvement des cadres qui entraîne l'ouverture de la foule et qui permet l'insertion du fil de trame dans les différents plans de la structure (cf. Figure 2-14).

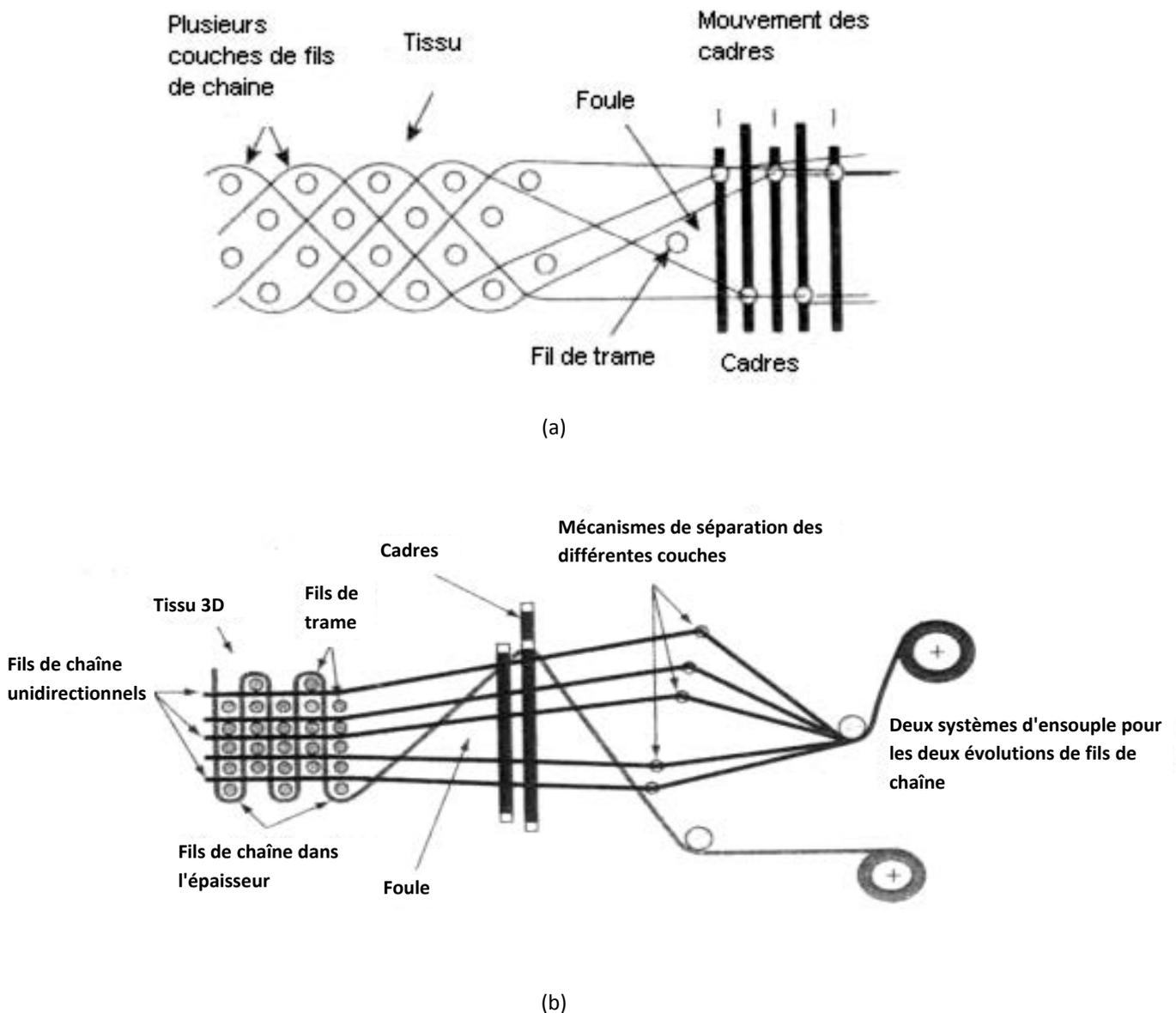


Figure 2-14. Principe du tissage interlock 3D : (a) Interlock diagonal ; (b) Interlock orthogonal.

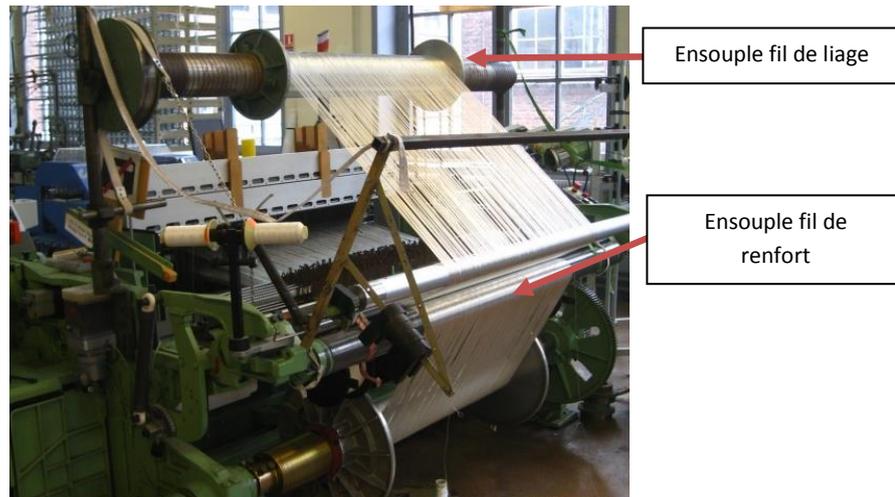


Figure 2-15. Modification machine à tisser pour le tissage interlock.

Le nombre de paramètres définissant ces renforts rend possible la conception d'une grande variété de tissus 3D différents. Plusieurs familles de tissus 3D interlocks peuvent être distinguées, la classification la plus courante étant celle de Hu *et al.* reprise par Ansar [57], qui classe les interlocks en quatre groupes en fonction de l'évolution du fil de liage au travers de l'ensemble de la structure ainsi qu'en fonction de l'angle que forme ce dernier avec les fils de renforts longitudinaux.

	Through the Thickness	layer to layer
Angle Interlock		
Orthogonal Interlock		
Legend :		

Figure 2-16. Les quatre principales architectures interlocks classées selon leurs évolutions et leurs angles [57].

Les 4 principales architectures interlocks sont :

- Through the thickness/Angle interlock (interlock diagonal),
- Through the thickness/Orthogonal interlock (interlock orthogonal),
- Layer to layer/Angle interlock (interlock couche à couche),
- Layer to layer/Orthogonal interlock.

2.2.1. Inconvénients du tissage 3D (interlock)

La structure d'un composite à base de renforts 3D est principalement déterminée par l'état des fils durant le procédé de tissage. Durant le tissage d'un interlock 3D, une des difficultés rencontrées est que les multi-filaments présents dans les directions x , y et z sont endommagés (x et y sont les directions du plan du tissu et la direction orthogonale en z indique l'épaisseur du tissu), causant inévitablement des pertes de propriétés mécaniques dans le tissu. Les principaux types d'endommagements sont l'abrasion des fibres, leurs casses, la distorsion des fils dans le plan et dans l'épaisseur, ainsi que les fissures des résines. Les endommagements des fibres sont courants au cours d'un tissage 3D et sont difficilement évitables [33], [61].

Par ailleurs, on constate une perte de propriétés mécaniques des fibres, ces pertes dépendent de beaucoup de paramètres comme le diamètre des fils, le type d'architecture 3D ou encore l'ouverture de la foule. Ils dépendent également aussi du type de fil utilisé. En complément de l'abrasion et de la casse des fils, les fils sont distordus et frisés pendant le tissage 3D. Les fils qui traversent dans l'épaisseur un tissu interlock (selon la direction z) peuvent présenter des ondulations à l'endroit où le fil de chaîne de liage (celui qui lie dans l'épaisseur suivant la direction z) croise les fils présents dans le plan du tissu (des directions x et y).

Chapitre 3 : Comportement mécanique des renforts fibreux à différentes échelles

Les renforts tissés, constitués de fils eux-mêmes constitués de fibres, sont de nature multi-échelles. Les phénomènes mis en jeu sont différents en fonction de l'échelle à laquelle ils sont observés. Les essais permettant de caractériser le comportement mécanique aux trois échelles du tissu (macroscopique, mésoscopique et microscopique) seront détaillés. Finalement, la loi isotrope transverse utilisée dans les modèles éléments finis du chapitre 6 sera présentée.

Sommaire du chapitre

3. COMPOTEMENT MÉCANIQUE DES RENFORTS FIBREUX À DIFFÉRENTES ÉCHELLES ...	46
3.1. COMPOTEMENT MACROSCOPIQUE (ÉCHELLE TISSU).....	46
3.1.1. TRACTION BIAXIALE	47
3.1.2. CISAILLEMENT PLAN	48
3.1.2.1. Essais type "Picture frame"	50
3.1.2.2. Essais type "Bias test"	51
3.1.3. FLEXION	51
3.1.4. COMPOTEMENT EN COMPACTION	52
3.2. COMPOTEMENT MÉSCOPIQUE (ÉCHELLE MÈCHE).....	53
3.2.1. COMPACTION DU FIL DANS LE PLAN TRANSVERSE	54
3.2.2. COMPOTEMENT DU FIL EN TENSION.....	55
3.2.3. CISAILLEMENTS DU FIL.....	56
3.2.4. COMPOTEMENT DU FIL EN FLEXION	57
3.3. COMPOTEMENT MICROSCOPIQUE.....	57
3.4. HYPOTHÈSE D'ISOTROPIE TRANSVERSE POUR LE COMPOTEMENT D'UN FIL	59

3. Comportement mécanique des renforts fibreux à différentes échelles

La description du renfort fibreux met en évidence trois échelles (Figure 3-1) qui le caractérisent : l'échelle macroscopique (échelle du tissu), l'échelle mésoscopique (échelle du fil) et l'échelle microscopique (échelle du filament ou de la fibre).

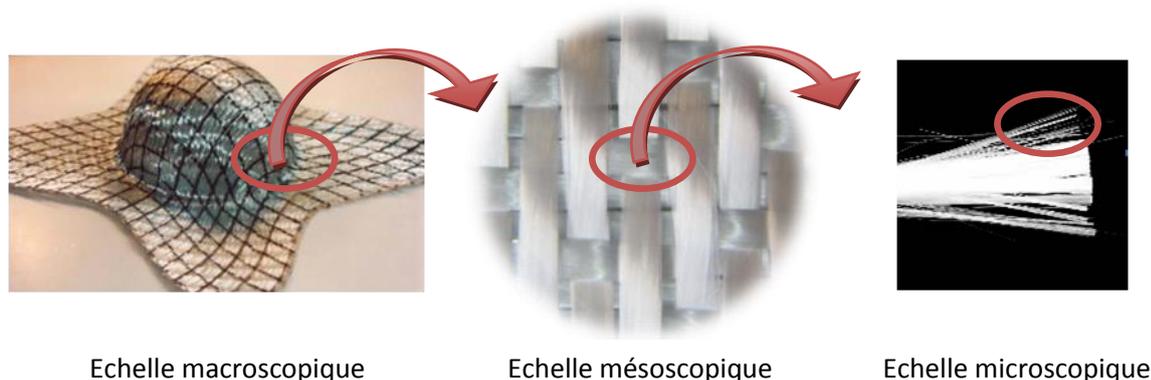


Figure 3-1. Les trois échelles caractéristiques de l'étude des renforts tissés (photo échelle macroscopique[76]).

Le comportement mécanique à l'échelle macroscopique du renfort est fortement lié à celui des deux échelles inférieures. À l'échelle microscopique, les fibres (ou filaments) possèdent une rigidité longitudinale en tension très importante ; par contre, les autres rigidités telles que la rigidité en compression et la rigidité en flexion sont très faibles. Les fils constitués de filaments héritent donc aussi de ces propriétés. Le tissu obtenu par tissage des fils possède aussi une rigidité très élevée dans la direction des fils, mais le tissage apporte au tissu une non-linéarité à l'échelle macroscopique. Celle-ci est due au changement d'ondulation du fil lors des extensions du renfort.

On s'intéresse par la suite aux différents modes de déformation du renfort fibreux connus, ainsi qu'aux moyens d'essais permettant de les caractériser. Les résultats de ces types d'essais sont utilisés pour évaluer les résultats de simulation numérique, dans le cadre d'approche utilisant des modèles hypo-élastiques [70], [71], [97] ou hyper-élastiques [17], [18], [68] par exemple.

3.1. Comportement macroscopique (échelle tissu)

Le comportement macroscopique, soit à l'échelle des tissus, fait l'objet de nombreux travaux dans la littérature. D'un point de vue expérimental en s'appuyant sur les différents modes de déformations, qui seront détaillés dans ce paragraphe, avec des travaux d'identification et de caractérisation du comportement ; mais également d'un point de vue de l'élaboration de modèles de comportement avec, souvent, comme finalité l'intégration et l'utilisation de ces lois dans des logiciels de simulation numérique. Concernant ces modèles, à cette échelle du

tissu et sur des approches continues, on peut citer les travaux portant sur les modèles non-orthogonaux [62]–[67], les modèles hyper-élastiques [17], [18], [68], [69] et également les modèles hypo-élastiques [13], [70]–[72].

3.1.1. Traction biaxiale

Les essais de tension biaxiale sont nécessaires pour mettre en évidence l'interaction entre les réseaux de fil dans un renfort fibreux [16], [73]–[76]. Des bancs d'essais spécifiques sont utilisés pour effectuer ces essais. Il consiste à tendre un tissu en croix suivant les directions des fils (Figure 3-2). On mesure les efforts et la déformation des mèches. Dans le cas général, les deux réseaux sont tendus et l'on définit le coefficient k comme le rapport des déformations du tissu dans les directions chaîne et trame de l'échantillon testé. Le coefficient k peut alors être défini par la relation suivante (ou son inverse) :

$$k = \frac{\varepsilon \text{ chaîne}}{\varepsilon \text{ trame}} \quad (4.1)$$

Les résultats des essais (Figure 3-3) montrent la présence d'une rigidification progressive suivie d'une linéarité du comportement. La non-linéarité de début de chargement s'explique par des phénomènes ayant lieu à des échelles inférieures, comme les variations d'ondulation de fil. En effet, les fils présents dans un tissu possèdent une ondulation naturelle, de part le tissage qui engendre un entrecroisement des fils dans deux directions perpendiculaires (Figure 3-4).

Les résultats obtenus permettent aussi de constater que la variation du rapport de déformation dans l'une ou l'autre des directions affecte de manière significative le comportement du tissu. Cela est dû au fait que les fils sont écrasés au niveau des intersections entre les chaînes et les trames, lorsque soit les trames ou les chaînes sont tendues. Chaque direction a une influence sur l'autre direction.

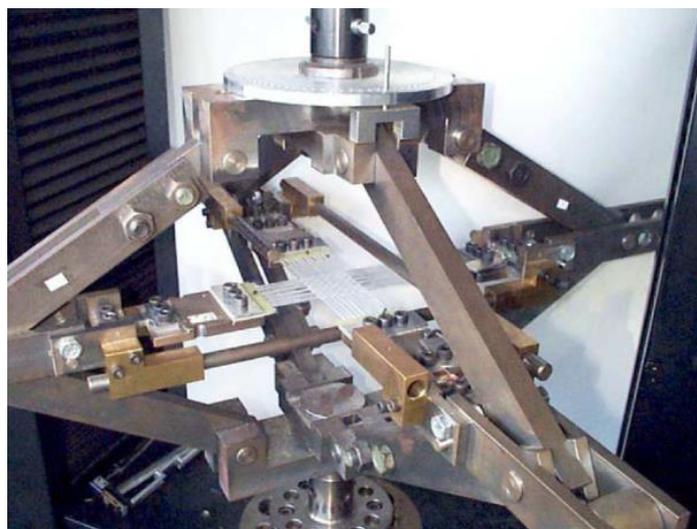


Figure 3-2. Dispositif de traction biaxiale [76].

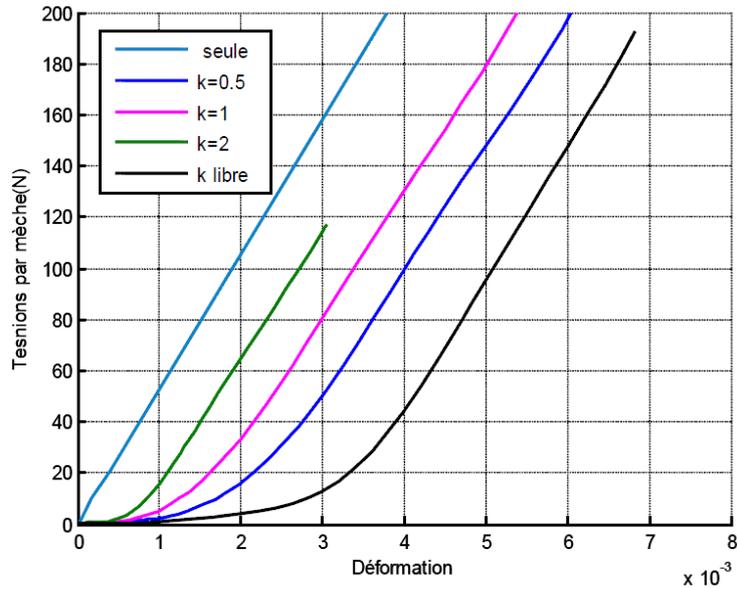


Figure 3-3. Résultats des essais de tension biaxiale pour différents taux de variation $k = \text{déformation dans le sens chaîne/la déformation dans le sens trame}$ [76].

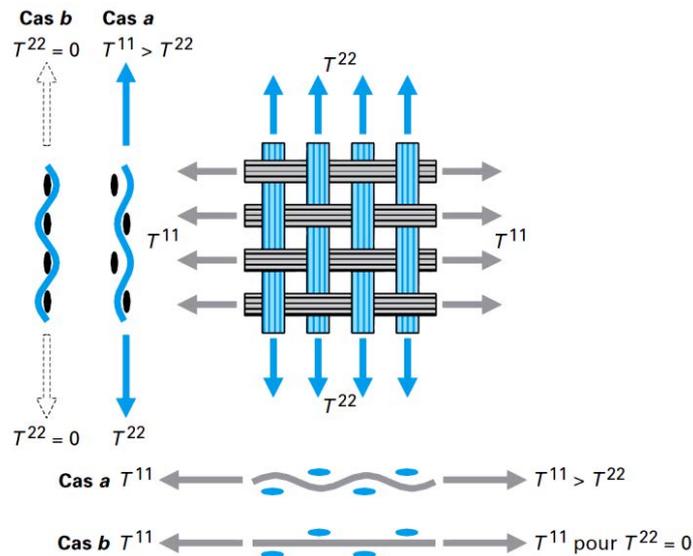


Figure 3-4. Variations d'ondulation des fils expliquant la non-linéarité des courbes de traction biaxiale [77].

3.1.2. Cisaillement plan

La technique du tissage offre la possibilité aux fils de tourner les uns par rapport aux autres dans le plan du renfort (tissu). Avec cet essai on cherche à caractériser le module de cisaillement dans le plan du tissu. Les fils sont rigides et donc très peu déformables dans la direction des filaments. En considérant l'hypothèse de non glissement entre les réseaux de fils chaîne et trame faite [78], il est possible de considérer dans un premier temps le renfort comme un treillis de barres articulées à leurs extrémités (Figure 3-5 (a)).

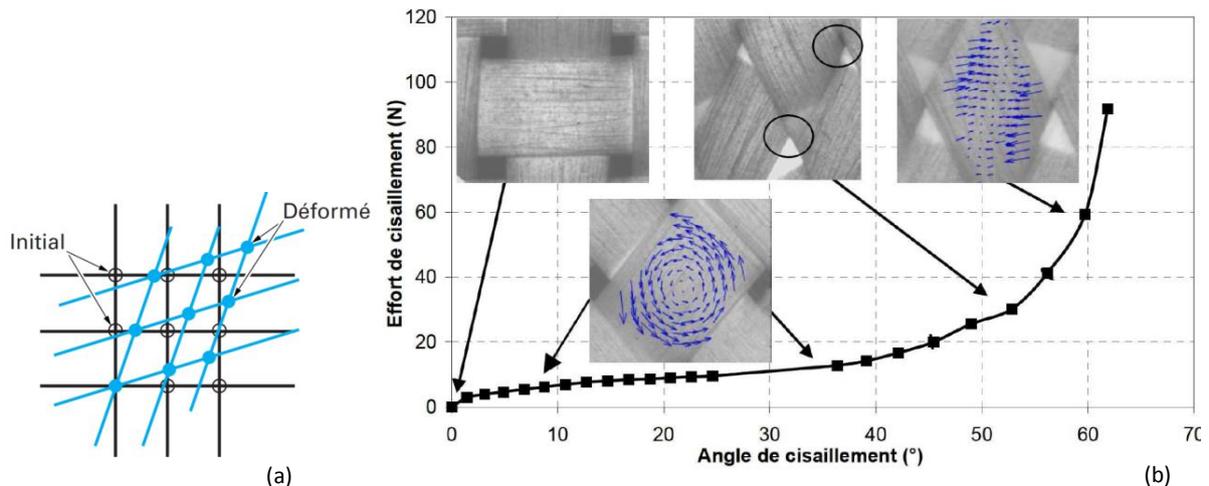


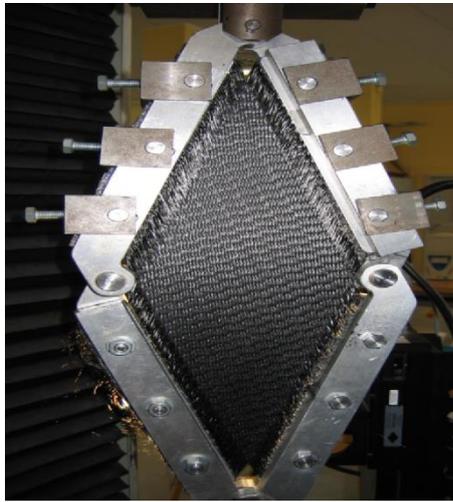
Figure 3-5. (a) Cisaillement d'un renfort tissé dans son plan [77] ; (b) Courbe de cisaillement et phénomènes mésoscopiques ayant lieu lors du cisaillement d'une toile en verre [79].

Si l'on s'intéresse à la courbe d'effort de cisaillement en fonction de l'angle de cisaillement (rotations relatives entre les deux réseaux de fils), on peut distinguer trois zones. Pour des angles de cisaillement faibles (inférieurs à 40° , Figure 3-5), on peut voir que les fils tournent les uns par rapport aux autres. L'effort à fournir est alors très faible puisqu'il s'agit seulement de s'opposer aux frottements entre fils, l'effort normal étant faible, et au changement d'ondulation par flexion des fils. Les filaments ont également la possibilité de glisser les uns sur les autres dans la direction transverse afin de se conformer à la cinématique imposée. A partir d'un angle généralement compris entre 40° et 50° , les fils vont progressivement entrer en contact latéralement. Ils vont alors commencer à se compacter transversalement, entraînant une forte croissance de l'effort de cisaillement, jusqu'à atteindre un angle de blocage. L'énergie nécessaire pour continuer à compacter les mèches transversalement étant alors supérieure à l'énergie nécessaire à la flexion du renfort, des plissements vont apparaître. Dans la littérature, [80]–[84], ce comportement en cisaillement plan est largement étudié car prédominant pour caractériser la déformabilité des renforts, lors des essais de mise en forme [85], [86]. Le critère limite de formabilité, relativement à ce comportement, est associé à l'angle de blocage, au-delà duquel des plis et défauts peuvent survenir. Certains auteurs utilisent cette notion pour désigner l'angle pour lequel les mèches entrent en contact latéral, c'est-à-dire au début de la transition entre la première et la seconde pente de la courbe présentée Figure 3-5 (b), tandis que d'autres situent cet angle à la fin de la transition. En utilisant cette dernière définition, l'angle de blocage correspond à peu de chose près à l'angle d'apparition des plissements, puisque la forte augmentation de la rigidité en cisaillement conduit le renfort à flamber. On voit donc que la notion d'angle de blocage, plutôt que désignant une valeur précise, désigne une plage d'angles de transition entre deux rigidités (et donc deux comportements) d'un renfort en cisaillement.

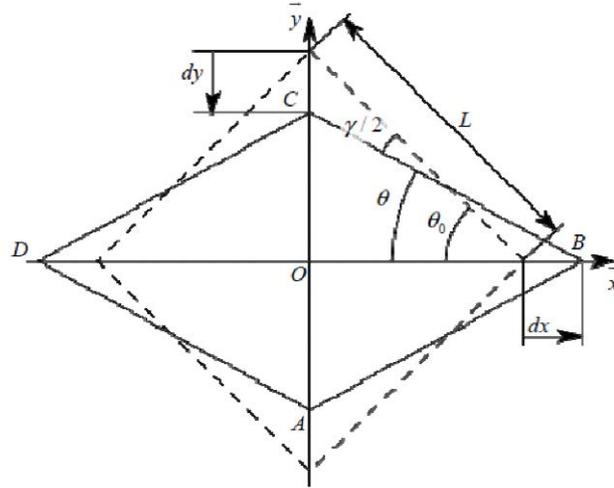
Du fait de la grande rigidité des mèches dans leur direction longitudinale ne permettant pas de grandes déformations, le cisaillement plan est avec la flexion un mécanisme de déformation privilégié des renforts tissés. Ils permettent en effet aux tissus de prendre des formes variées et complexes. Afin de maîtriser au mieux leurs mises en œuvre, il est nécessaire de caractériser le plus précisément possible le comportement en cisaillement des renforts. Deux

essais sont principalement effectués pour caractériser les tissus techniques : le test de cadre ("picture frame test") [79], [87] et le test de traction de biais ("bias extension test") [87], [36].

3.1.2.1. Essais type "Picture frame"



(a)



(b)

Figure 3-6. Essais type "picture frame".

Le « Picture frame » est un test permettant d'imposer une cinématique de cisaillement pur à un tissu. L'éprouvette est placée dans un cadre qui est articulé à ses quatre coins, dont deux coins opposés sont placés dans la machine de traction. L'éprouvette se présente sous la forme d'une croix qui est de la même dimension que le cadre et qui est maintenue par l'intermédiaire de talons obtenus par collage de plaques d'aluminium. L'angle de cisaillement est lié au déplacement imposé au cadre par une simple relation géométrique. La cinématique du cisaillement est schématisée sur la (Figure 3-6 (b)). L'angle de cisaillement est défini par la relation suivante :

$$\gamma = \theta_0 - 2\theta = \frac{\pi}{2} - 2\theta \quad (4.2)$$

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{2}L + d}{2 \times L} \quad (4.3)$$

Avec θ l'angle du cadre et L la largeur du cadre, comme indiqué sur la Figure 3-6 (b).

L'angle de cisaillement γ est pris à zéro à l'état initial lorsque les fils de chaîne et trame sont perpendiculaires. À partir du déplacement relatif des mors de la machine de traction, on peut piloter la déformation en cisaillement du renfort. La force nécessaire pour déformer l'installation doit être mesurée précisément, pour pouvoir déterminer ensuite la force de cisaillement F_c .

$$F_c = \frac{F}{2 \cos \theta} = \frac{F'' - F'}{2 \cos \theta} \quad (4.4)$$

Avec F qui est la charge nette. Pour éliminer les erreurs liées au poids et à l'inertie de l'installation, la charge nette F est obtenue par la différence entre la charge à vide de

l'appareillage F' et la valeur F'' mesurée quand le tissu est en train d'être déformé dans le cadre [84].

3.1.2.2. Essais type "Bias test"

Les « bias tests » sont une alternative permettant de caractériser le comportement en cisaillement d'un échantillon de tissu de forme rectangulaire. Ils consistent à imposer une elongation à une éprouvette dans la direction de biais (direction qui fait un angle de 45° avec la direction initiale des fils, Figure 3-7). Tous les fils ont au moins une extrémité de libre. La cinématique induite permet de créer un cisaillement dans la partie centrale de l'éprouvette. La déformation est mesurée par des moyens optiques. L'essai de traction de biais est plus simple à mettre en œuvre que le précédent.

En considérant l'hypothèse de non-glissement des mèches, on peut déduire la relation suivante entre l'angle de cisaillement dans la zone centrale et le déplacement d des mors de la machine de traction :

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{D+d}{D\sqrt{2}}\right) \quad (4.5)$$

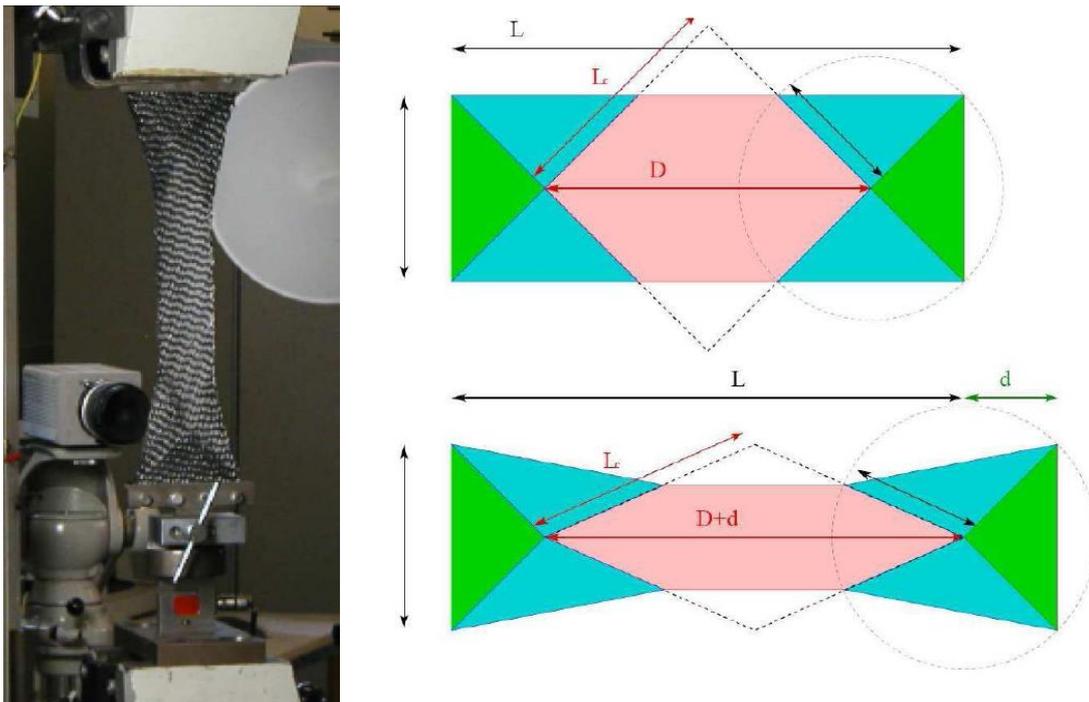


Figure 3-7. Essais de type "Bias test"[3].

3.1.3. Flexion

L'intérêt de la communauté scientifique pour le comportement en flexion des tissus techniques est assez récent, contrairement à celui des textiles d'habillement qui est étudié depuis de nombreuses années. Elle a souvent été négligée dans les recherches précédentes [14]. Pourtant cette rigidité joue un rôle important dans la formation des plissements lors de la mise en forme [88]. La détermination de cette rigidité consiste à définir la relation entre la courbure et

le moment fléchissant. Les essais de flexion habituellement utilisés pour les matériaux continus, tels que les essais de flexion trois points ou quatre points, ne peuvent pas être utilisés en raison de la faible rigidité de flexion du tissu.

Des outils spécifiques ont déjà été développés, par exemple le testeur KES-FB, qui mesure le couple sur un échantillon de tissu plié [89]. Cet appareil qui a été conçu pour les tissus d'habillement, n'est pas vraiment adapté aux renforts de composites (verre, carbone, etc.) qui ont des raideurs en flexion plus importantes que celles des tissus pour l'habillement testés habituellement avec cet appareil.

Un dispositif d'essai de flexion basé sur le test cantilever est représenté sur la Figure 3-8 [90]. L'échantillon est positionné sur des lattes qui sont successivement rétractées pendant l'essai, ce qui provoque l'augmentation progressive de la longueur de surplomb de l'échantillon, entraînant le pliement de celui-ci sous son propre poids. Le test complet est une succession des tests en quasi statique pour différents cas de charge. Un appareil photo numérique enregistre les différentes formes de l'échantillon plié pour chaque pas d'avancement. De ces mesures, on peut en ressortir une relation entre la courbure et le moment fléchissant. L'introduction de cette composante a permis de montrer de meilleures corrélations notamment dans le plissement [91].

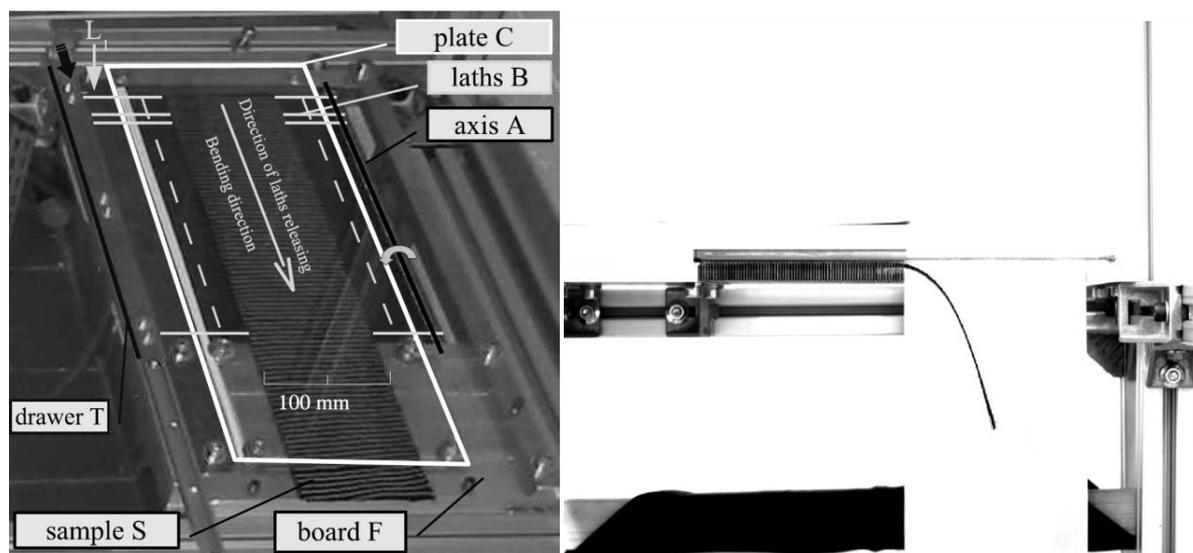


Figure 3-8. Essai de flexion basé sur le test cantilever [90].

3.1.4. Comportement en compaction

Le comportement en compaction des renforts secs est étudié, car lors des procédés de fabrication de type LCM, la résine imprègne une préforme de renforts fibreux qui est soumise à un phénomène de compaction transverse permettant d'optimiser le taux de fibres. Le taux de compaction transverse des renforts est une propriété importante lors de ces procédés de fabrication. Les essais de compression [92]–[94], comme celui décrit (Figure 3-9. (a)) [95], consistent à appliquer un effort de compaction à une ou plusieurs couches de renforts et mesurer la variation de fraction volumique de fibre (Figure 3-9. (b)). De nombreux paramètres

influent sur le comportement en compaction, comme par exemple le cisaillement ou non du renfort. Il y a aussi l'orientation des différentes couches, qui influe sur le nesting.

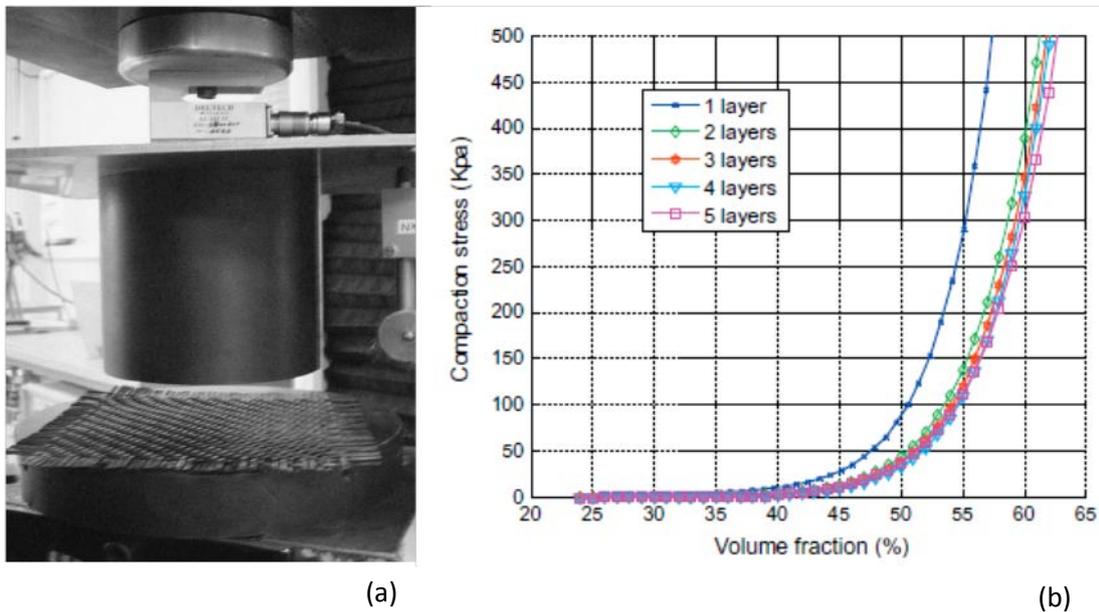


Figure 3-9. (a) Test de compression ; (b) effort de compaction vs. fraction volumique pour une à cinq couches parallèles (expérimental) [95].

3.2. Comportement mésoscopique (échelle mèche)

A l'échelle mésoscopique on étudie le comportement du fil seul, mais les mécanismes de déformation du fil sont guidés d'une part par les interactions entre les fibres constituant le fil (soit l'échelle inférieure) ; et d'autre part, par les interactions entre les fils dans une structure tissée. Concernant la description géométrique de cette échelle, la tomographie aux rayons X est l'un des seuls dispositifs permettant d'observer de manière précise ces mécanismes microscopiques. Cette technique est déjà utilisée pour l'analyse du comportement des renforts tissés à l'échelle mésoscopique [96], [97], [98]. Malgré des difficultés d'observation, plusieurs phénomènes ont pu être mis en évidence à l'aide d'essais simples sur le fil.

L'analyse de ces phénomènes physiques à cette échelle débouche dans les travaux actuels sur le descriptif le plus parfait du fil. Ces travaux sont essentiels lorsqu'on veut paramétrer des logiciels dits géométriques (Texgen, WiseTex) [8], [99] qui permettent de décrire au mieux, dans la structure des préformes, les fils les constituant (Figure 3-10). Ces aspects seront détaillés dans le chapitre 5.

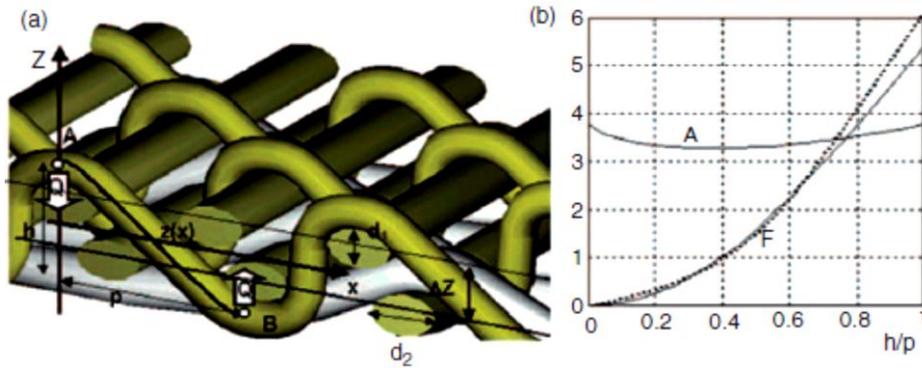


Figure 3-10. Paramétrage de l'ondulation dans un tissu : (a) schéma, (b) modèle [100].

Pour un grand nombre de travaux, la description de ces géométries de préformes, en 3D-volumiques, ont pour objectif de calculer le comportement mécanique équivalent à l'échelle des cellules élémentaires. Dans le cadre de ces travaux, l'objectif est de décrire le comportement à l'échelle du fil, sachant que les mécanismes de déformation seront issus des sollicitations ayant lieu lors du procédé de tissage.

3.2.1. Compaction du fil dans le plan transverse

On appelle compaction le changement d'aire dans le plan transverse du fil, c'est-à-dire dans le plan perpendiculaire à la direction des filaments. Lorsque le fil est compacté, les filaments se rapprochent et les vides se combent. La Figure 3-11 illustre ce mode de déformation, dans le cas d'un tissu soumis à une sollicitation de tension équibiaxiale.

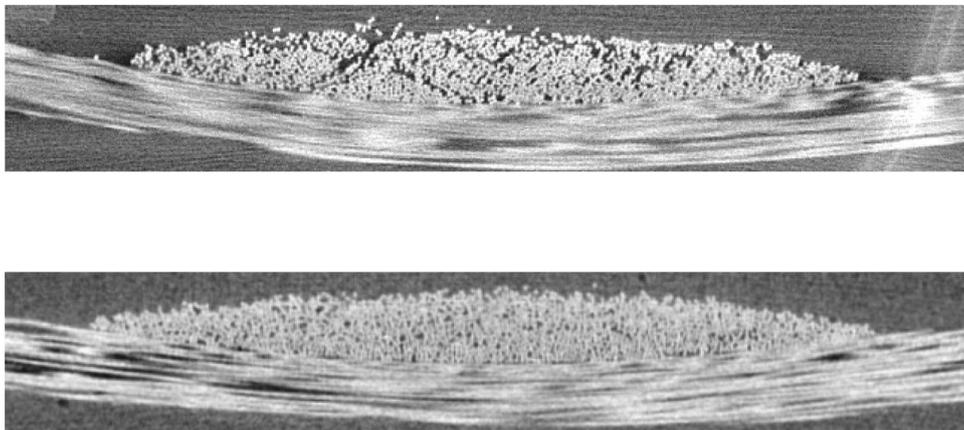


Figure 3-11. Vue en coupe (par tomographie X) du plan transverse du fil ; (a) tissu au repos ; (b) Tissu sous tension biaxiale [71].

La compaction d'un fil se déroule en plusieurs étapes : les fibres commencent par se réorganiser de façon à combler les vides, avec généralement l'apparition de flexions de fibres qui confèrent à ce mode de déformation son comportement élastique. Un blocage est ensuite progressivement atteint et la rigidité de compaction du fil tend vers la rigidité de compaction du matériau constituant les fibres. Ce comportement en compaction est délicat à caractériser expérimentalement, car la mise en place d'essais de compaction pure sur un fil sorti du tissu est difficilement réalisable. Dans les études précédentes décrivant le comportement du fil à l'échelle mésoscopique, le comportement en compaction du fil est généralement identifié par une méthode inverse à partir d'un essai à l'échelle macroscopique [101]–[103], [71].

La compaction est l'un des modes de déformation privilégié du fil, et elle intervient dans la plupart des sollicitations auxquelles le tissu risque d'être soumis. Directement liée à cette compaction, la densité de fibres au sein du fil a une influence considérable sur la perméabilité locale du fil, et donc sur l'étape d'injection lors de la mise en œuvre du composite. L'identification du comportement en compaction est donc importante lorsque l'objectif est de calculer la perméabilité locale du renfort [104].

3.2.2. Comportement du fil en tension

Les fils étudiés sont constitués d'un grand nombre de filaments. Lorsqu'un fil est tendu, tous les filaments ne se tendent pas en même temps. Cette tension progressive des filaments au sein du fil induit une non-linéarité du comportement du fil en début de tension (Figure 3-12). Cette non-linéarité dépend du matériau, ainsi que du procédé de fabrication du fil. On constate qu'elle est bien moins accentuée pour un fil de carbone que pour un fil de verre.

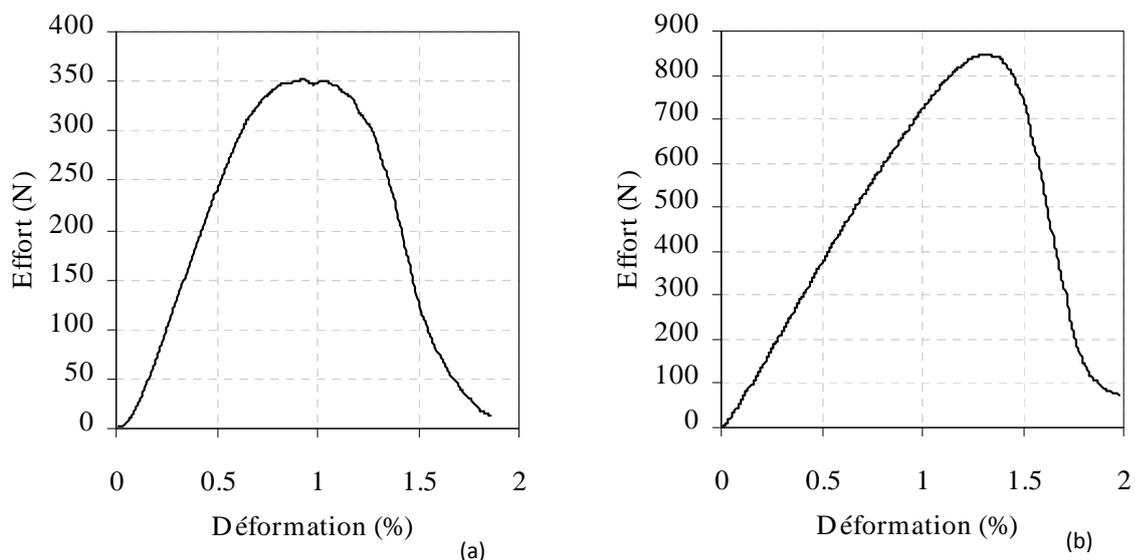


Figure 3-12. Comportement en tension de fils : (a) de verre ; (b) de carbone [172].

Si on considère un fil, la notion de contrainte n'est pas évidente. En effet, comme on peut le voir Figure 3-11, le fil étant constituée de filaments, il n'y a pas de continuité de la matière en

son sein. Or ce sont les filaments qui prennent en charge les efforts. La variation des espaces entre les filaments, indépendante du diamètre de ces derniers, entraîne une variation de la section apparente du fil alors que la somme des sections des filaments reste relativement constante. De ce fait, la notion de contrainte est discutable quand on se réfère à un fil, et à la place de module d'élasticité on parle de rigidité, définie comme étant le rapport de l'effort sur la déformation.

3.2.3. Cisaillements du fil

Deux modes de cisaillement existent dans le fil : la distorsion, i.e. le cisaillement dans le plan transverse du fil ; et le cisaillement transverse, i.e. dans la direction des filaments. De même que pour la compaction, l'identification directe de ces modes de déformation est difficilement réalisable.

- *Distorsion du fil dans le plan transverse :*

La distorsion correspond au changement de forme du fil dans le plan transverse, c'est-à-dire à sa déformation sans compaction. Au cours d'une telle transformation, les filaments se réarrangent en glissant les uns par rapport aux autres pour s'adapter à la déformation. A l'échelle microscopique des flexions de filaments peuvent apparaître si ces derniers ne sont pas parfaitement alignés. Lorsque le fil n'est pas compacté, les interactions entre les différents filaments sont faibles ; et donc, les filaments sont plus faciles à réarranger. Alors que lorsque le fil est compacté, les nombreuses interactions entre les filaments rigidifient ce comportement en distorsion. Il semblerait donc qu'il y ait un couplage entre ces deux modes de déformation, mais dont la caractérisation expérimentale reste difficile.

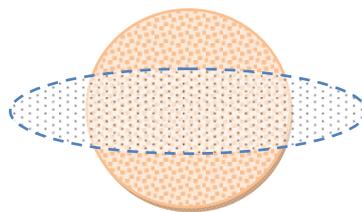


Figure 3-13. Distorsion du fil (filaments orthogonaux au plan du dessin)

- *Cisaillement transverse du fil :*

Le cisaillement transverse est un mode de cisaillement dans la direction des filaments : les filaments glissent les uns par rapport aux autres dans la direction de leur alignement. La Figure 3-14 illustre ce mode de déformation. La présence d'ensimage sur le fil, créant une cohésion entre les filaments à l'échelle microscopique, apporte à ce mode de déformation une raideur et une élasticité. De même que la distorsion, le cisaillement transverse est

certainement rigidifié lorsque la densité de filaments est élevée (i.e. lorsque le fil est compacté).



Figure 3-14. Cisaillement transverse du fil.

3.2.4. Comportement du fil en flexion

Les filaments constituant les fils ayant un diamètre de quelques micromètres, ceux-ci sont très flexibles. Assemblés pour former un fil, cette importante flexibilité se retrouve à l'échelle de la mèche. Elle permet d'ailleurs de faciliter le tissage des renforts. Les tissus techniques possèdent la plupart du temps une faible rigidité de flexion, ce qui favorise leur mise en forme. Elle est parfois considérée nulle dans certaines études [105].

Une raideur en cisaillement transverse peut parfois être attribuée au fil, causée par le frottement inter filaments et de la présence d'ensimage. Lorsque la cohésion des filaments au sein du fil est trop forte, cette raideur devient souvent trop élevée pour que le cisaillement transverse se propage jusqu'aux extrémités du fil testé, ce qui provoque le flambement latéral du fil (Figure 3-15).

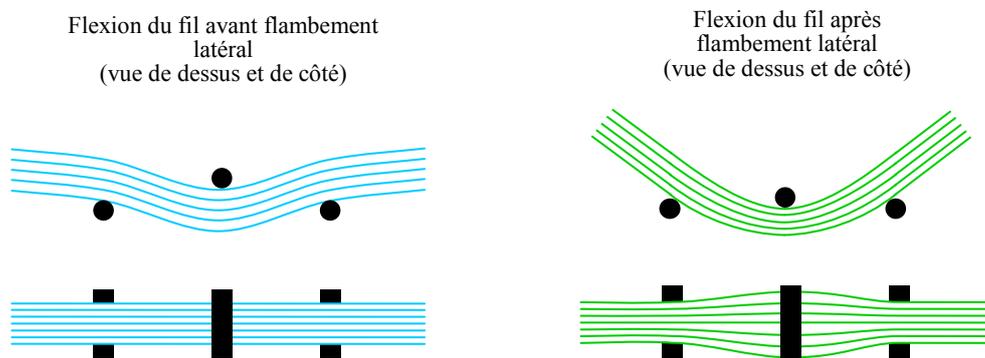


Figure 3-15. Phénomène de flambage intervenant dans la flexion d'un fil de renfort tissé [68].

3.3. Comportement microscopique

L'approche à l'échelle microscopique exige d'identifier quelques paramètres, comme les caractéristiques mécaniques des filaments et la description géométrique de l'armure tissée. Cette approche permet de déterminer notamment la configuration initiale et de caractériser l'état mécanique du tissu à l'échelle de la fibre lorsque celui-ci est soumis à différents chargements.

Les simulations réalisées pour des petites armures de tissu (toile et croisé 2-2) possèdent comme données d'entrée du modèle, les caractéristiques mécaniques et rhéologiques des

filaments, qui sont sous forme d'expression simple et relativement facile à déterminer [106], [107]. La difficulté de l'approche à l'échelle microscopique, même si le matériau constitutif des filaments est considéré comme continu, réside dans la gestion du nombre très élevé de contacts entre les filaments. Un schéma de calcul élément fini implicite a été utilisé dans le cadre des travaux de D. Durville, ce qui fait qu'on peut difficilement représenter le tissu final en simulant le procédé de tissage dans le cadre de cette approche. Le placement des différents fils chaîne et trame s'obtient en les interpénétrant initialement, et en leurs appliquant d'une part, différentes directions de contact normal permettant d'obtenir l'armure voulue, puis d'autre part en ajustant l'écart entre les particules des différents éléments de contact (Figure 3-16) [107], [108]. Les résultats obtenus à cette échelle pour les tricots, les tresses et les tissus sont très intéressants [106], [109], [110], [23]. Toutefois, en raison des capacités de calcul actuellement disponibles, le nombre de filaments constituant chaque fil (80 filaments par section pour les modèles de D. Durville, au lieu de plusieurs milliers), ainsi que la taille des armures tissées constituent des facteurs limitants pour ces modèles.

Il existe aussi, à l'échelle microscopique, des modèles de tissu interlock (couche à couche, diagonale) générés en utilisant une approche de relaxation statique [110], liée à une analyse par élément numérique [24].

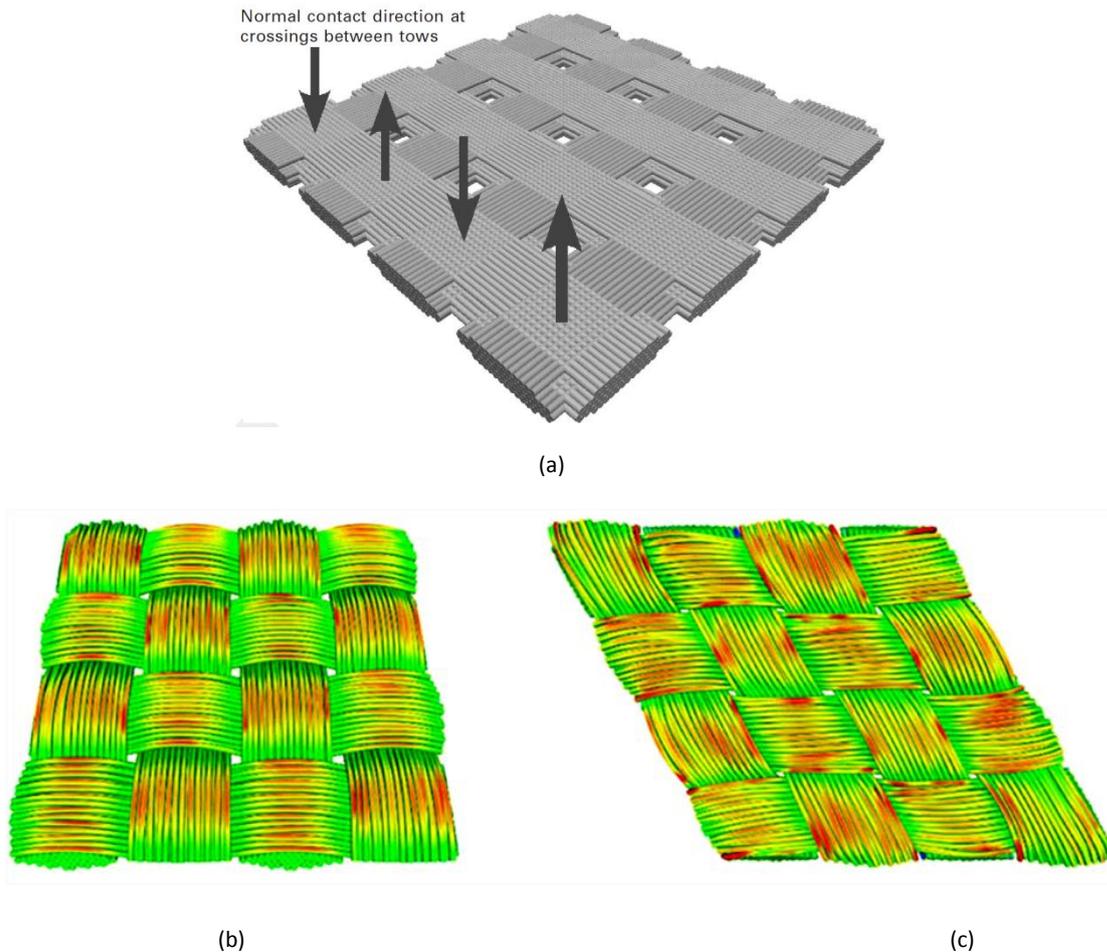


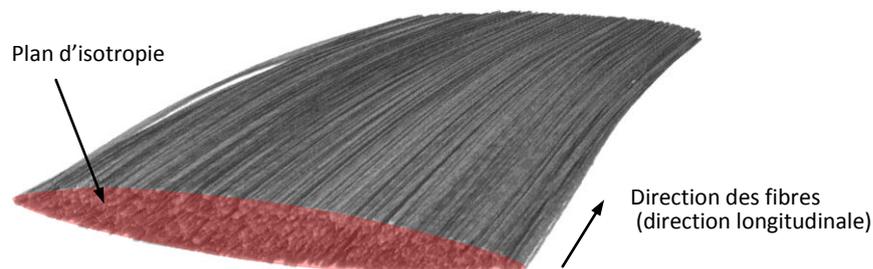
Figure 3-16. Simulation à l'échelle microscopique du cisaillement d'un taffetas : (a) configuration initiale avec les directions de contact normal pour obtenir un tissu toile ; (b) état après tissage ; (c) état après cisaillement.

3.4. Hypothèse d'isotropie transverse pour le comportement d'un fil

Un fil à base de multi-filament est un assemblage où les filaments sont orientés approximativement dans la même direction (Figure 3-17, [112]). On considère que cet assemblage est suffisamment compact pour que les filaments ne puissent pas se déplacer de manière indépendante. L'hypothèse susdite permet d'envisager le matériau "fil à base de multi-filament" comme un matériau continu. Dans les travaux de Latil *et al.* [98], des observations précises de la déformation microscopique ainsi que des mouvements des fibres au sein d'un fil ont pu être effectuées lors d'essais mécaniques réalisés à l'intérieur d'un micro-tomographe à rayons X ; ces observations ont confirmé la validité d'une approche continue. Le matériau homogénéisé correspondant présente alors une direction privilégiée, celle du fil. La distribution des fibres dans une section du fil déformé a aussi été analysée par micro-tomographie à rayons X [97] ; ce qui a permis de conclure que cette distribution est

isotrope pour les fils étudiés dans ce manuscrit. Notons que certains matériaux dont la structure est plus complexe ne satisfont pas toujours cette hypothèse [114]. Le matériau homogénéisé du multi-filament sera donc supposé *isotrope transverse*, dans le cadre de cette étude.

Un matériau *isotrope transverse* est un matériau orthotrope qui possède en plus une symétrie de révolution autour d'un axe, en l'occurrence l'axe longitudinal du fil dans le cadre de notre étude. Un matériau isotrope transverse est caractérisé par cinq constantes élastiques indépendantes si la base est connue. Le plan d'isotropie (plan transverse) est perpendiculaire à la direction longitudinale du fil. (cf. Figure 3-17).



**Figure 3-17. Isotropie transverse du multifilament d'un renfort tissé.
Image obtenue par tomographie X [112].**

Chapitre 4 : Modélisation numérique des renforts fibreux

Dans ce chapitre, une synthèse des différentes approches existantes permettant de modéliser numériquement les renforts fibreux, présents dans les matériaux composites, est présentée. Tout d'abord, les outils existants comme TexGen ou WiseTex privilégiant une représentation géométrique de la structure fibreuse (tissée, tricotée, etc.) à l'échelle mésoscopique, sont décrits. Puis, un état de l'art concernant les travaux de modélisation des procédés de tressage et de tricotage, et aussi de tissage, est présenté.

Sommaire du chapitre

4. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES RENFORTS FIBREUX	62
4.1. MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE DES STRUCTURES TISSÉES	62
4.2. BILAN SUR LA CRÉATION DES MODÈLES GÉOMÉTRIQUES	66
4.3. MODÉLISATION DE PROCÉDÉS TEXTILES	66
4.3.1. MODÉLISATIONS EXISTANTES DES PROCÉDÉS DE TRESSAGE ET DE TRICOTAGE	67
4.3.2. MODÉLISATION DU PROCÉDÉ DE TISSAGE	69
4.4. CONCLUSION - APPORT POUR LE PROJET NUMTISS.....	70

4. Modélisation numérique des renforts fibreux

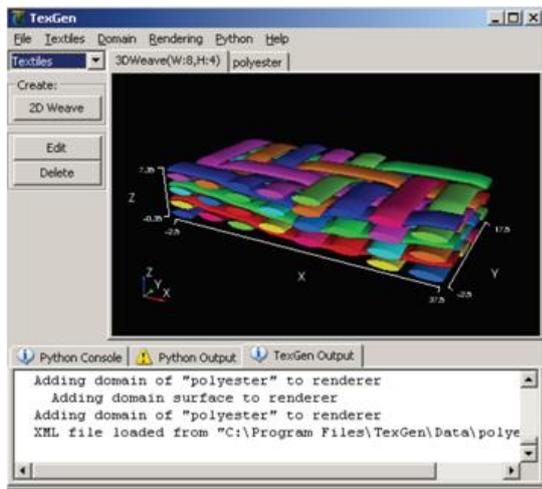
Les matériaux composites intégrant des renforts fibreux 3D sont pour la plupart uniquement dédiés à des applications hautes performances. Ce qui oblige de maîtriser les procédés de fabrication dans le but d'assurer des performances optimales à la pièce finale. Actuellement, les recherches se fondent sur la prise en considération des paramètres de fabrication pour avoir une meilleure connaissance du matériau composite final. Concernant les renforts fibreux, étant donné la multitude d'architectures pouvant être créées, le développement d'outils numériques peut permettre de réduire les coûts de conception et de réalisation.

L'outil numérique développé dans le cadre du consortium NUMTISS a pour but de connaître le comportement d'un tissu avant son tissage. L'observation du tissu en terme d'entrecroisement de fils de chaîne et trame se fait dans une première approche à l'échelle mésoscopique.

4.1. Modélisation géométrique des structures tissées

A l'échelle mésoscopique, les outils de modélisation géométrique utilisés peuvent être assimilés à des logiciels de CAO de tissus [7], [32], [115]–[117]. Ils permettent de choisir les principales caractéristiques du tissu comme la taille des fils, l'embuvage ou le type d'armures.

Dans TexGen, les trajectoires des fils sont définies par des splines qui passent par des groupes de nœuds (Figure 4-1). Dans la version 3 de TexGen, l'utilisation des arcs circulaires pour le lissage des trajectoires est remplacée par des interpolations de Bézier et des splines cubiques, afin de s'adapter le mieux possible aux positions arbitraires des points. La géométrie est indépendante des propriétés des fils dans TexGen, et il est supposé aussi que la section du fil reste constante dans le tissu (circulaire, elliptique, lenticulaire, etc.). Il y a deux méthodes pour créer un tissu avec TexGen. La première consiste à utiliser l'interface graphique du logiciel, et à rentrer des paramètres tels que : le nombre de fils dans une armure, l'épaisseur du tissu, la largeur de la section et la distance entre les fils. Cette méthode limite le contrôle de l'utilisateur, et des problèmes d'interpénétration des fils peuvent se produire pour les architectures complexes. La deuxième méthode donne à l'utilisateur un contrôle illimité sur la définition du modèle (trajectoire des fils, etc.) via l'utilisation du langage Python; ce qui permet d'éviter les erreurs géométriques causant des interpénétrations. Sherburn *et al.* ont proposé un outil qui génère des modèles de tissu dans TexGen, et qui est compatible avec un logiciel de modélisation par éléments finis [8], [115], [118], [119]. Cependant, cette méthode utilise une procédure où l'architecture est projetée sur un seul plan et n'est, par conséquent, pas applicable pour les architectures qui ont des fils avec une ondulation en dehors du plan, comme pour les tissus interlock 3D.



(a)



(b)

Figure 4-1. TexGen : (a) interface du logiciel [8] ; (b) Tissu interlock orthogonal réalisé avec le logiciel [116].

L'outil logiciel WiseTex développé par Lomov *et al.* permet d'associer les propriétés des fibres à des modèles analytiques. Dans le modèle élastique [120], les données d'entrée pour construire un tissu sont l'armure, la densité des fils (chaîne et trame), et les propriétés des fils (géométrie, comportement en compression, flexion, et traction du fil; ainsi que la teneur en fibre dans le fil). Le préprocesseur de WiseTex utilise le principe de minimisation de l'énergie de flexion pour calculer la trajectoire des mèches et la forme des sections transverse [32], [99]. Dans WiseTex, la forme de la section transverse est considérée comme constante, bien que ses dimensions soient autorisées à varier (Figure 4-2).

Dans le modèle de type Peirce [9], [120], [121], deux hypothèses sont prises en compte : la première hypothèse est que la section des fils des trames est supposée avoir une certaine forme (circulaire, elliptique,...) dans les zones d'entrecroisement avec les fils de chaîne ; la deuxième hypothèse est que les fils de chaîne soient droits hors des zones de contact avec les fils de trame (Figure 4-3). La résistance en flexion des fils est négligée dans ce modèle.

TechText CAD et Weave Engineer développés par TexEng Software Ltd. sont similaires à WiseTex dans la méthode de modélisation. Bien que limité au tissu 2D, TechText CAD a pour but de transférer les travaux académiques portant sur le comportement mécanique des structures textiles, dans un outil CAO destiné directement aux besoins industriels [8]. Le logiciel Weave Engineer développé aussi par TexEng permet de concevoir et de développer des structures textiles plus complexes, comme des structures tissées interlock 3D (Figure 4-4). Les propriétés mécaniques du tissu ne sont pas prises en compte dans ce logiciel [122].

La société ScotCad Textiles, qui fournit depuis 1982 des logiciels CAO à destination des designers textiles, a développé plus récemment un nouveau produit baptisé ScotWeave Technical Weaver dont le but est de modéliser géométriquement des textiles techniques (interlock orthogonal) à l'échelle mésoscopique. La forme de la section du fil ainsi que l'armure peuvent être spécifiées, mais il n'existe a priori pas encore d'algorithme permettant de calculer les propriétés mécaniques des fils.

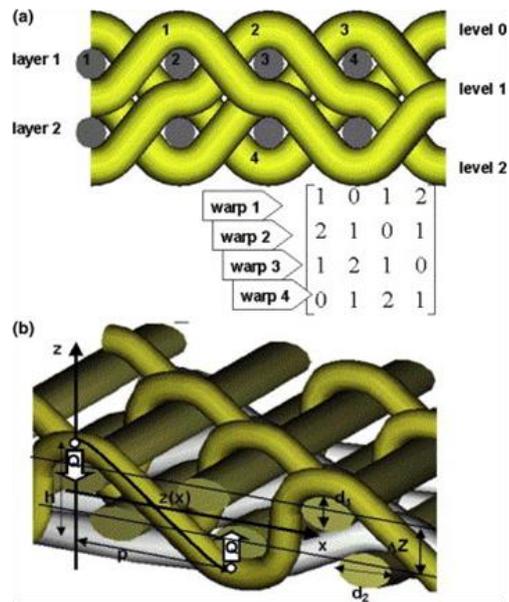


Figure 4-2. Exemple de structure tissée intégrée dans WiseTex : (a) Codage de l'armure tissée ; (b) description des trajectoires des fils [7].

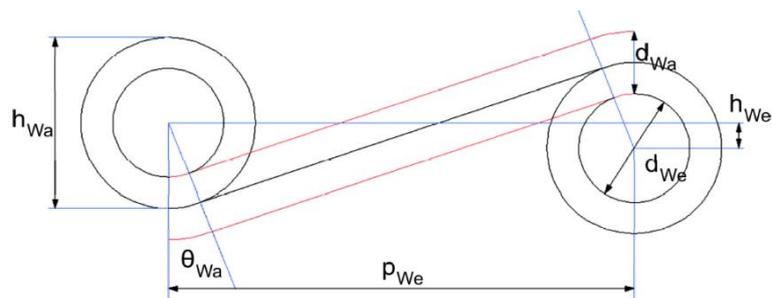


Figure 4-3. Modèle de type Peirce[120].

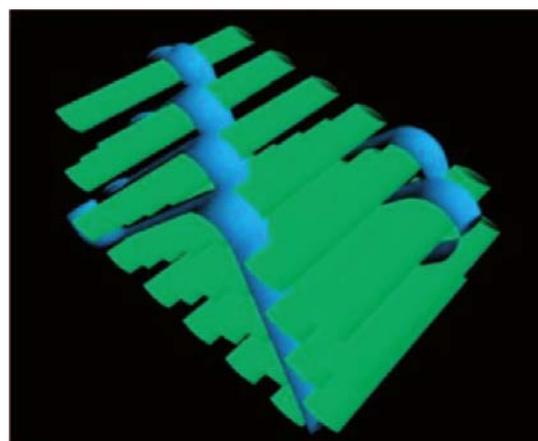


Figure 4-4. Interlock diagonal 5 couches modélisé avec "Weave Engineer" de TexEng [123].

Des travaux récents [73], [87], [124]–[127] ont eu pour objectif de s'affranchir de ces problèmes en générant des modèles géométriques de motifs tissés cohérents géométriquement. Hivet *et al.* (2005) [124] ont développé un programme, limité au niveau des tissus 2D, écrit en Fortran (tout récemment une première approche pour les tissus 3D interlock a été réalisée [128]). Le principe de base de ce programme est similaire à TexGen car les propriétés mécaniques des fibres ne sont pas prises en compte dans cette méthode. La trajectoire des fils est reconstruite dans le modèle à partir des coordonnées mesurées en différents points de contrôle. Le changement de forme de la section transverse du fil lorsqu'il évolue dans le tissu, est donc pris en compte. Le programme calcule les caractéristiques géométriques des différentes sections transverses seulement aux points de contrôle (Figure 4-5 (c)). Les points de contrôle sont choisis en fonction des contacts d'entrelacements et d'entrecroisements des fils chaînes et trame, qui provoquent des modifications importantes de la section. Les sections des mèches sont circonscrites dans un rectangle ayant des dimensions constantes, cette simplification permet de créer facilement les sections dans le modèle (Figure 4-5 (a)). Le modèle du fil est donc obtenu en faisant une interpolation entre les différentes sections obtenues en des points de contrôle privilégiés, qui suivent une trajectoire imposée.

Cependant, les outils proposés dans le cadre de ces travaux ne sont pas toujours industriellement exploitables en l'état.

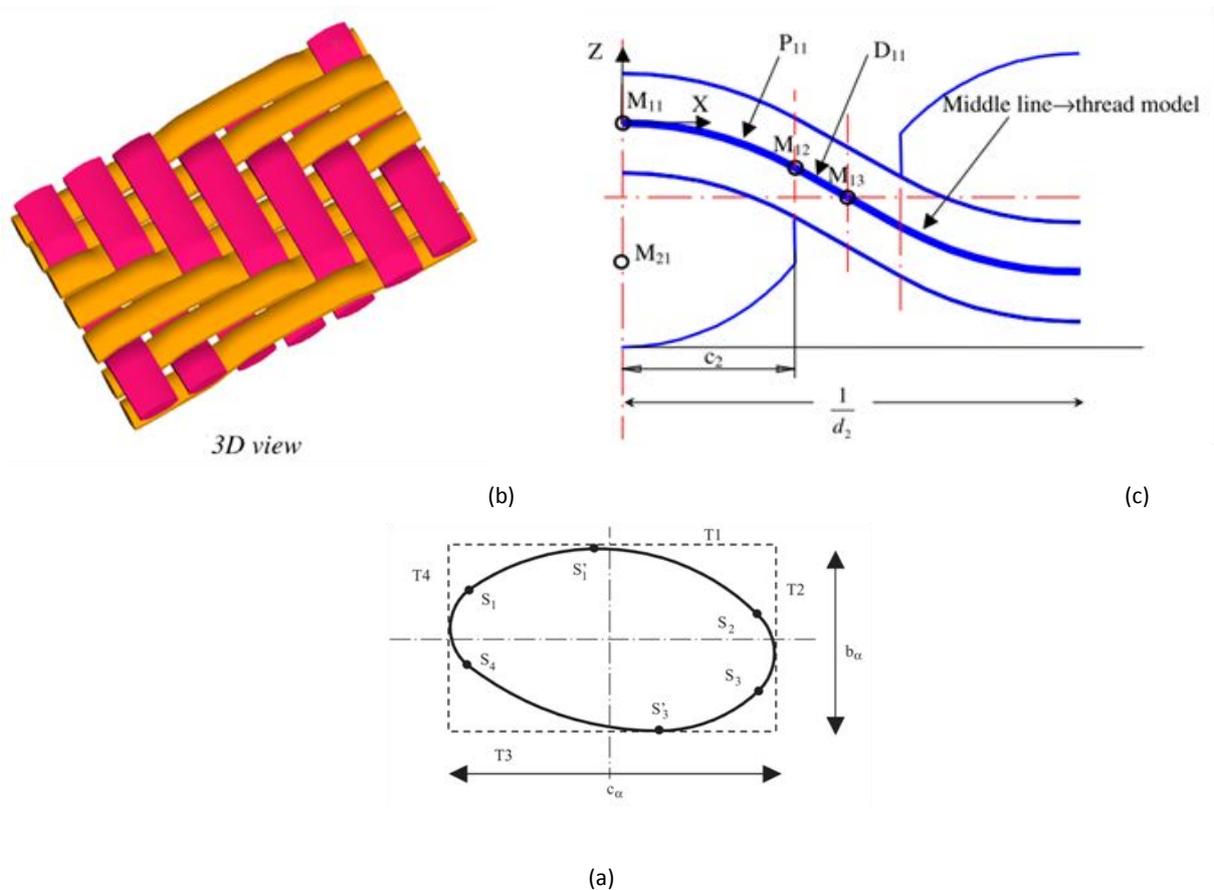


Figure 4-5. (a) Rectangle qui circonscrit les sections des mèches ; (b) Modèle géométrique d'un sergé 4x3 ; (c) Modèle en treillis de la moitié d'un fil pour une cellule élémentaire de tissu toile dans la direction chaîne [16].

4.2. Bilan sur la création des modèles géométriques

L'utilisation des modèles géométriques présentés précédemment, en vue de calculs de prédiction du comportement, est parfois délicate. Dans ces modèles, la reconstruction géométrique est réalisée a posteriori en représentant directement ce qui est obtenu dans la préforme, mais ces approches nécessitent la connaissance « réelle » de l'état de la préforme en sortie de procédé [129]. Bien que les auteurs essayent d'améliorer de plus en plus les courbes paramétriques qui décrivent la trajectoire de la section des fils ; l'évolution de cette section – qui n'est pas constante [130] – dans le tissu, n'est que rarement prise en compte dans les logiciels de CAO de tissage. En effet, la forme de la section du fil dépend fortement de l'interaction entre la trame et la chaîne. Or, comme la plupart du temps, cette variation de section n'est pas prise en compte par les logiciels de CAO de tissage, des vides parasites ou des interpénétrations des deux réseaux de fils, essentiellement pour les structures tissées de type interlock (Figure 4-6), rendent les modèles ainsi obtenus impropres à la réalisation de calculs par éléments finis. Il apparaît donc judicieux de représenter numériquement le procédé de fabrication d'une étoffe textile, pour pouvoir obtenir une représentation fidèle de la structure.

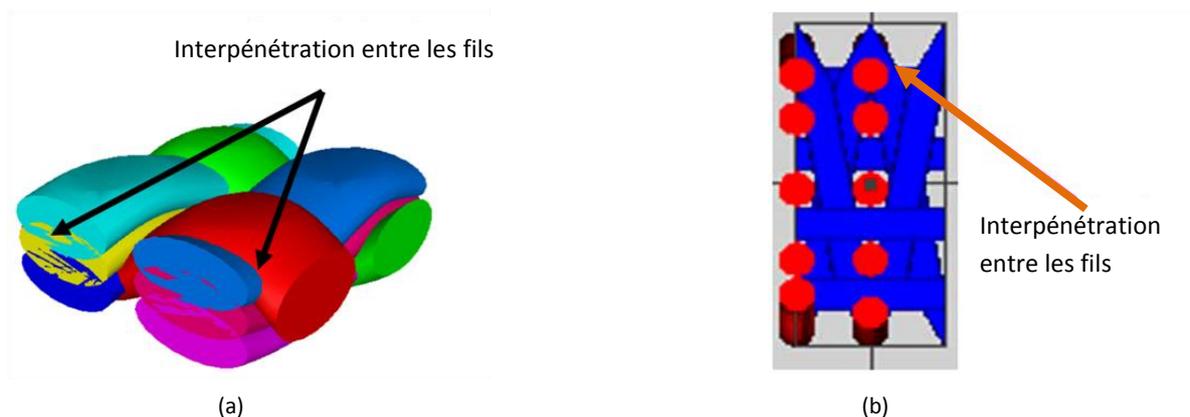


Figure 4-6. (a) Un modèle géométrique d'un tissu 3D orthogonal de trois couches sur TexGen ; (b) un modèle géométrique d'un tissu 3D orthogonal de cinq couches sur WiseTex (coupe chaîne) [174].

4.3. Modélisation de procédés textiles

Les procédés d'obtention de structures textiles présentés dans ce chapitre sont nombreux et permettent à partir d'une même technologie de réaliser diverses architectures de renforts. Il est donc important de développer des outils d'aide à la conception de renforts textiles qui prennent en compte la technologie d'obtention de ces renforts. Pour réaliser de tels outils deux grandes approches sont utilisées. Une première famille d'approche, qualifiée de modélisation paramétrique, qui se base uniquement sur les aspects cinématiques [10], [109], [131], [132], et permet de caractériser l'influence d'un certain nombre de paramètres procédés sur les paramètres clés de l'architecture. La seconde famille plus riche en information, basée sur des

approches par éléments finis et qui prend en compte les conséquences du procédé sur le comportement du matériau fibreux [133], [134]. Dans le cadre de ces travaux on se positionne sur la seconde famille. On décrit dans cette section les approches existantes concernant la simulation des procédés de tressage et de tricotage, ainsi que les quelques travaux existants concernant la simulation du tissage.

4.3.1. Modélisations existantes des procédés de tressage et de tricotage

Des travaux ont déjà été réalisés ces dernières années concernant la modélisation du procédé de tressage, à l'échelle mésoscopique par Pickett *et al.* [10], [131]. Pour Pickett *et al.*, la simulation du procédé de tressage 3D, ainsi que l'analyse mécanique par éléments finis qui en découle, ont été réalisées à l'aide du code explicite commercial PAM-CSM. Le schéma explicite est préféré dans cette approche au traditionnel schéma implicite, car il permet de mieux représenter les grandes déformations géométriques ayant lieu au cours du tressage. Les contacts entre les fils (entrelacement) et les éléments mécaniques de la tresseuse sont aussi représentés ; ce qui est un avantage dans l'analyse du comportement mécanique lorsqu'on veut modéliser l'endommagement des composites. Les fils axiaux (stationary threads) sont modélisés avec des éléments poutre et les fils de tressage (braiding threads) avec des éléments barres d'une longueur de 2 mm (Figure 4-7. (a)). Ce qui permet, en plus d'obtenir un pas de temps raisonnable (1.6 μ sec), d'assurer un maillage assez fin pour représenter tous les détails de la tresse. Tous les nœuds au centre de la tresse sont contraints de se déplacer verticalement avec une vitesse d'avance constante. Le même type de déplacement est imposé au mandrin, représenté avec des éléments coques (Figure 4-7. (b)). A la circonférence du modèle, chaque fil est attaché à un élément de ressort qui s'étire avec une force constante, égale à la pré-tension de la bobine. Les extrémités des bobines sont soit fixées pour les fils axiaux, soit animées d'un déplacement sinusoïdal. A partir du tressage réalisé, des éléments solides sont générés pour former le fil, en maillant les éléments barres à section circulaire.

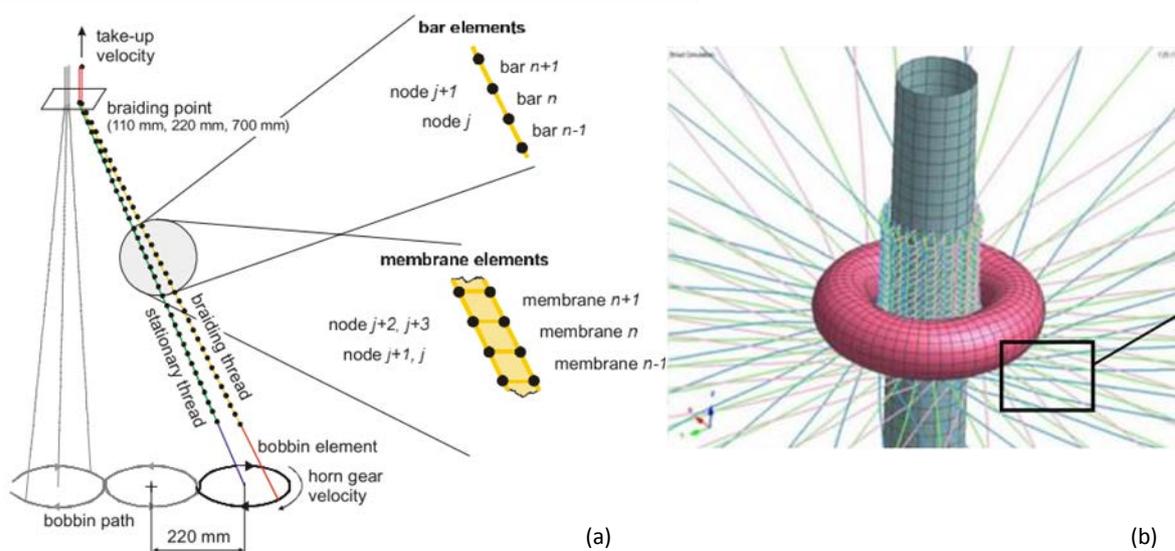


Figure 4-7. Modélisation du procédé de tressage pour l'obtention d'un renfort : (a) principe de la modélisation ; (b) illustration pour une tresse.

Un modèle éléments finis utilisant un schéma explicite dynamique (PAMCRASH™) a été développé par Bhattacharyya et al. pour le procédé de tricotage [9], [109]. Dans le cadre de cette simulation seule une cellule élémentaire de tricot (côte 1 x 1) a été considérée. Le nombre d'aiguilles utilisées dans la simulation était limité à cinq. Chacune des cinq aiguilles de tricotage était animée d'une cinématique de type liaison pivot qui simulait le mouvement des aiguilles, permettant ainsi de produire une étoffe tricotée. L'ouverture et la fermeture du clapet de l'aiguille étaient aussi associées au mouvement cinématique de celle-ci. Chaque filament dans le fil de verre est représenté par un ensemble d'éléments poutres circulaires élastiques linéaires connectés par des inter-efforts de flexion, de traction et de torsion. Afin de réduire le temps de calcul, seuls 20 filaments ont été modélisés (le multi-filaments réel en compte 120). L'alimentation du fil par friction, étape difficile à mesurer physiquement, a été estimée et ajustée en fonction de la qualité visuelle du tissu final. Pour calculer les contacts entre les filaments de verre et les différents éléments de la machine à tricoter, des algorithmes qui définissent la raideur de contact (calculée en moyennant les modules de traction de deux matériaux en contact) entre deux matériaux (filament - filament, aiguille - filament), ont été implémentés dans le code de calcul. En utilisant le type de contact auto-impactant, les contacts entre les filaments individuels, les filaments et la machine à tricoter, ainsi que les filaments rentrant en contact avec eux-mêmes peuvent être pris en compte. En ce qui concerne les données d'entrée du modèle, l'auteur a notifié que les paramètres non physiques comme le facteur d'échelle du pas de temps (*Time Step Scale Factor*, TSSF), ainsi que l'accélérateur de recherche des contacts (*Contact Search Accelerator*, CSA), jouent aussi un rôle important dans la simulation afin de garantir une bonne stabilité numérique et des temps de calcul raisonnables.

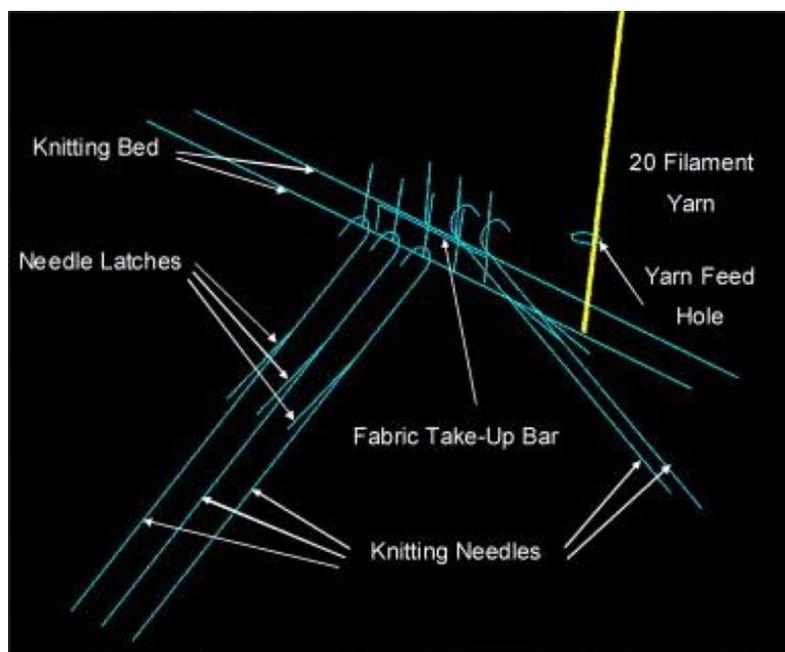


Figure 4-8. Etat initial de la simulation du tricotage [109].

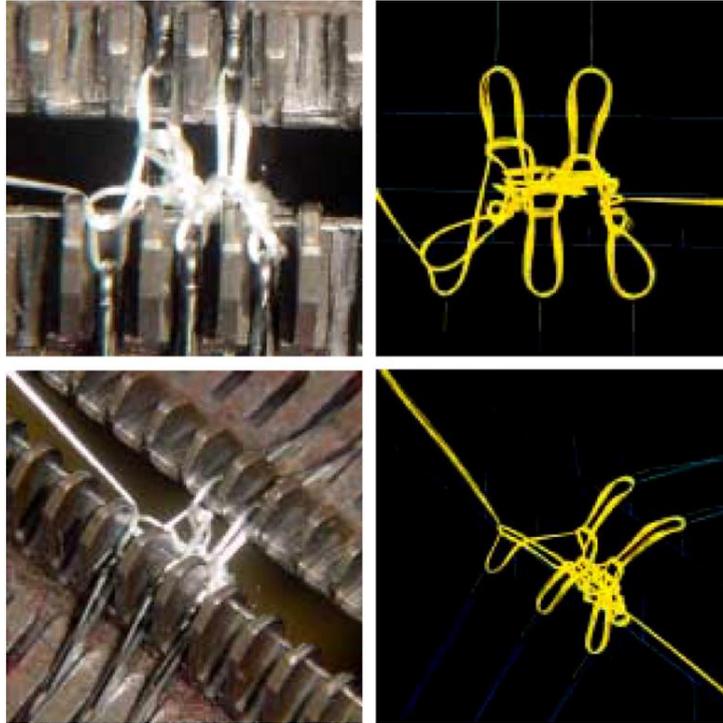


Figure 4-9. Comparaison géométrique entre la formation d'une côte 1x1 simulée et réelle [109].

4.3.2. Modélisation du procédé de tissage

Des premières approches ont été faites dans la simulation du procédé de tissage à l'échelle microscopique avec des fils de type para-aramide pour des applications liées à la balistique [110], [111], [132], [135]. Zhou *et al.* ont réalisé une première simulation du procédé de tissage à l'aide d'un algorithme numérique en quasi-statique où les fils étaient représentés par des chaînes d'éléments barres [111]. Ils ont réalisé une simulation du procédé de tissage pas à pas (ouverture de foule, positionnement de la trame dans la foule, fermeture de la foule), en prenant en compte une tension identique pour les fils de chaîne et trame (1 Newton). Dans cette approche, les surfaces de fils sont considérées comme lisses avec un coefficient de frottement nul. L'utilisation d'éléments barre ne permet cependant pas la représentation de la déformation transverse du fil qui a lieu au cours du tissage. Pour avoir une meilleure déformation de la section transverse circulaire du fil, l'auteur a choisi de le représenter avec 19 filaments dans la section (Figure 4-11) [111]. Etant donné le nombre très important de filaments (plusieurs milliers parfois) contenu dans un fil, cette approche semble assez limitée. En utilisant une technique généralisée qui peut s'appliquer à un tissu quelconque, Sihn *et al.* (2005) ont créé un volume qui recouvre les chaînes de Zhou *et al.* (2004).

Finckh *et al.* [132] ont simulé le procédé de tissage par une méthode éléments finis explicite. Cette approche, qui donne une bonne représentation de l'ondulation des fils de chaîne et trame dans les entrecroisements, prend en compte le comportement en compression et les déplacements locaux ayant lieu dans le fil pendant le tissage (Figure 4-10). Les lisses sont représentées par des anneaux dans lesquelles passent les fils de chaîne. Dans cette étude, comme dans celle de Zhou *et al.*, aucune corrélation précise n'a été effectuée avec des tissus

réels, et très peu d'informations sont données sur les temps de calcul. L'auteur s'est contenté de présenter une démarche possible dans la simulation du procédé de tissage, ainsi que les avantages qu'une telle démarche pouvait avoir, c'est-à-dire l'obtention d'un modèle numérique de tissu, a priori, plus précis et plus réaliste.

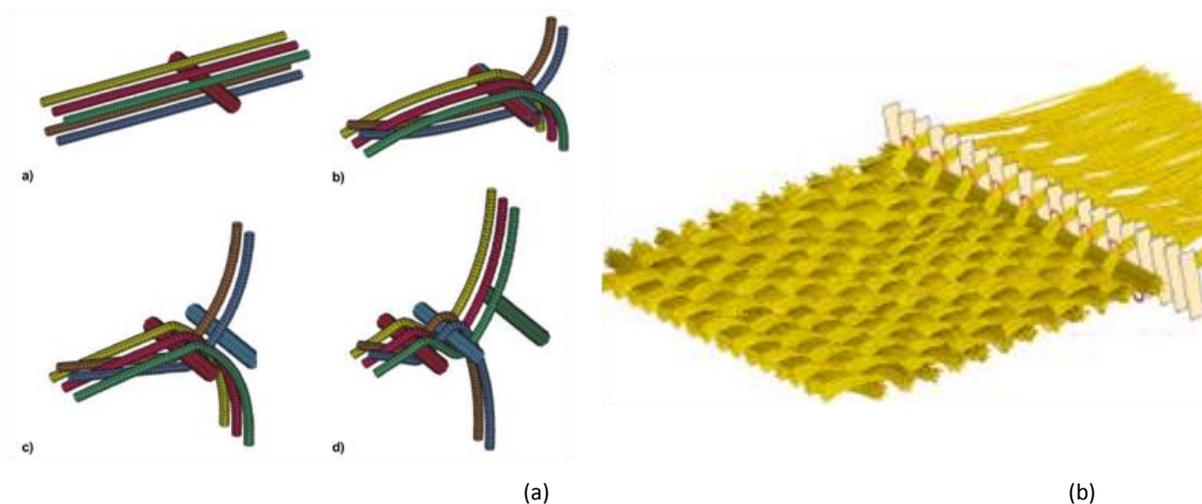


Figure 4-10. (a) Simulation du procédé de tissage avec un fil de polyester ; (b) Simulation du tissage d'une toile en aramide [132].

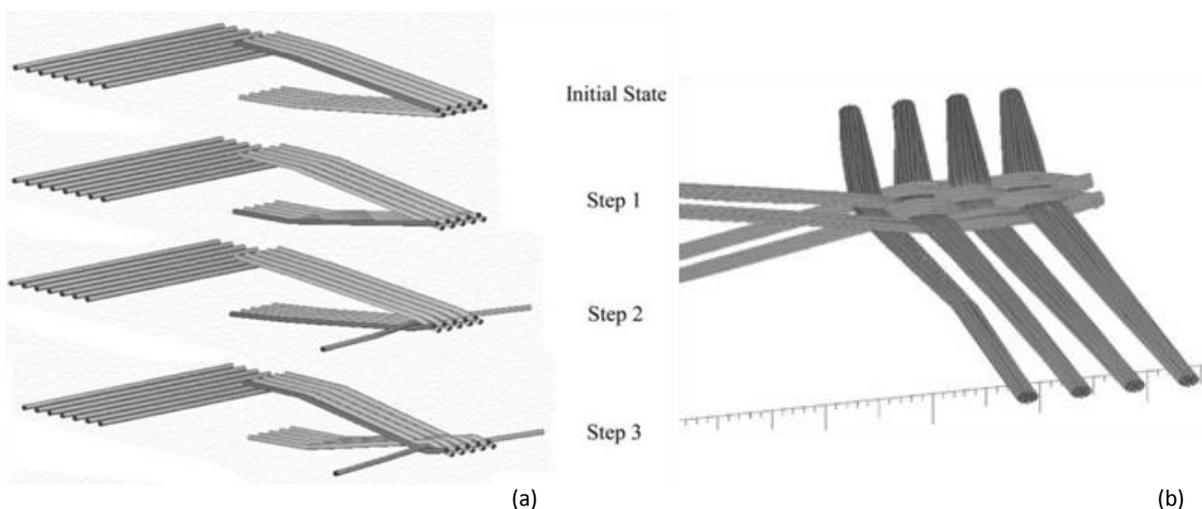


Figure 4-11. (a) Simulation pas à pas du procédé de tissage 2D ; (b) Tissu 2D généré avec plusieurs chaînes d'éléments numériques pour représenter un fil [111].

4.4. Conclusion - apport pour le projet NUMTISS

Considérant les deux approches présentées précédemment, les auteurs sont obligés de descendre à l'échelle microscopique dans leurs modélisations pour avoir une bonne déformation de la section transverse du fil. Des chaînes d'éléments barres ou poutres, selon les

approches, étaient utilisées pour représenter les filaments constituant les fils dans ces modèles. Un des apports du projet NUMTISS, dans l'obtention de la préforme sèche par la modélisation du procédé de tissage, est que l'on peut rester à l'échelle mésoscopique dans nos simulations grâce à l'utilisation d'éléments finis 3D volumiques ; éléments qui nous ont permis d'avoir une bonne représentation de la déformation dans la section transverse du fil.

Chapitre 5 : Productions et observations expérimentales

Dans ce chapitre, un inventaire des pièces mécaniques de la machine à tisser en contact avec le fil ou le tissu sera détaillé. Ensuite, les différentes armures de tissus produites et étudiées dans le cadre du projet NUMTISS seront présentées. L'observation du fil en tension sur la machine à tisser sera présentée. Enfin, les différents tissus produits à l'ENSAIT seront observés. Les tissus observés ont soit été auparavant résinés, soit tomographiés au laboratoire du LaMCoS.

Sommaire du chapitre

5. PRODUCTIONS ET OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES	74
5.1. INVENTAIRE DES PIÈCES CONSTITUTIVES DE LA MACHINE À TISSER AUTOMATIQUE EN CONTACT AVEC LE FIL OU LE TISSU	75
5.2. VISUALISATION DE L'INFLUENCE DES ÉLÉMENTS DE LA MACHINE À TISSER SUR LE FIL/TISSU (CAMÉRA RAPIDE +TRACKING)	80
5.3. PARAMÈTRES DE LA PRODUCTION DES TISSUS EN FIBRE VERRE	84
5.3.1. SPÉCIFICATIONS DES TISSUS RETENUS	84
5.3.2. SPÉCIFICATIONS DU TISSAGE CHOISIS	84
5.3.3. CYCLE DE TISSAGE SUR LA MACHINE À TISSER DORNIER	85
5.3.4. FILS À BASE DE MULTI-FILAMENTS DE VERRE UTILISÉS	86
5.3.5. POURQUOI RETORDRE LE FIL ?	87
5.3.6. TENSIONS SUR LA MACHINE À TISSER DORNIER	89
5.4. TISSAGE DES ARCHITECTURES EN FILS DE VERRE E 300 Tex/900 Tex	89
5.4.1. ARCHITECTURES 2D - ET FILS DE VERRE E DE TITRAGE 300Tex/900 Tex	89
5.4.2. ARCHITECTURES 3D - ET FILS DE VERRE E DE TITRAGE 300 Tex/900 Tex	93
5.5. OBSERVATIONS MICROSCOPIQUES	99
5.5.1. RÉSINAGE DU FIL EN VERRE E DE TITRAGE 300 TEX EN TENSION SUR LA MACHINE À TISSER	100
5.5.2. RÉSINAGE DES TISSUS EN VERRE 2D ET 3D	102
5.5.3. OBSERVATION DES TOMOGRAPHIES DES TISSUS EN VERRE E RÉALISÉES AU LAMCOS	105
5.5.4. TOMOGRAPHIES DES ARCHITECTURES 3D - FILS EN VERRE E DE TITRAGE 900 TEX	109
5.6. CONCLUSION DU CHAPITRE 5	113

5. Productions et observations expérimentales

Dans le cadre du projet NUMTISS, une production de tissus en verre E, 2D et 3D a été réalisée au sein de l'atelier de tissage du Gemtex (Figure 5-1). Les différentes productions ont été effectuées avec deux types de *roving* différents (fil à base de multi-filaments non retordus) de verre E et de titrage 300 Tex du fabricant Owens Corning® [136], et le 900 Tex du fabricant PPG [137]. Le roving de verre livré en bobine a été retordu à 25 tours/m pour pouvoir faciliter le tissage à une vitesse de 100 coups/min.

Les différents tissus produits ont été distribués aux différents partenaires du projet NUMTISS (INSA et EMD), dans le but d'effectuer des essais expérimentaux sur les tissus. Charlotte FLORIMOND (doctorante au LaMCoS sur le projet Numtiss) [138], [139] a effectué des essais de traction, de compression ainsi que de cisaillement plan ("Bias extension test") sur les échantillons de tissus produits. Galyna GONCHAROVA (doctorante à l'école de Mines de Douai) [11], [140] quant à elle, s'est servie des échantillons pour effectuer un suivi expérimental du procédé d'infusion de la résine. Le tissage du verre a aussi permis à Nicolas TRIFIGNY (doctorant au GEMTEX sur le projet NUMTISS) [19], [141], [142] de tester ses capteurs fils en chaîne sur la machine à tisser au cours d'une production à vitesse réelle. La réalisation de l'étape de tissage au sein du laboratoire GEMTEX nous a permis d'appréhender les difficultés que l'on pouvait rencontrer au cours de cette étape de fabrication et plus particulièrement en utilisant un fil technique comme le verre. En effet, il nous a ainsi été possible d'observer les cinématiques des différents éléments mécaniques, qui interviennent dans la formation du tissu sur une machine à tisser industrielle. Des coupes transverses effectuées sur les tissus produits – suite au résinage ou à la micro-tomographie de l'échantillon – ont permis d'analyser et d'observer les structures produites. Ce chapitre est dédié à l'ensemble de cette démarche expérimentale. Des mesures réalisées dans ce chapitre serviront dans le Chapitre 7 à corrélérer les modèles numériques développés.



Figure 5-1. Production de tissus en verre à l'atelier tissage de l'ENSAIT, sur une machine à tisser Dornier.

5.1. Inventaire des pièces constitutives de la machine à tisser automatique en contact avec le fil ou le tissu

Dans le chapitre 2, nous avons rappelé les principes et étapes du procédé de tissage. Dans ce paragraphe, nous nous concentrons sur un inventaire des différents éléments de la machine à tisser Dornier[®] en contact avec le fil ou le tissu (Figure 5-2), pour connaître tous les éléments qui pouvaient avoir une influence sur le comportement mécanique et l'endommagement du fil. Cet inventaire est également essentiel dans l'objectif de la modélisation numérique du procédé.

D'une manière générale, comme le montre la Figure 5-2, les fils de chaîne sont déroulés par l'ensouple et sont positionnés horizontalement par le porte-fil pour constituer le plan du tissu – on peut régler en hauteur le porte-fil pour modifier l'ouverture de la foule (cf. chapitre 3). Puis, les fils de chaîne passent par les lamelles casse-chaîne, les lisses (Figure 5-2 et Figure 5-3 (b)) et au travers des broches du peigne. Les lamelles casse-chaîne ont été enlevées dans le cadre des productions de tissus 2D pour éviter d'endommager les fils de verre, mais ont été rajoutées pour le tissage des interlocks, car ça permettait d'apporter une légère tension supplémentaire sur les fils de chaîne, et donc une meilleure ouverture de foule.

La nappe des fils de chaîne est également en contact avec la semelle ou piste, élément qui est fixé sur le peigne et qui sert notamment à guider la lance mécanique. Cette pièce peut générer des frottements importants lors du tassage de la duite par le peigne. Pour faciliter le tissage des fils à base de multi-filaments de verre, on a changé le revêtement de la semelle

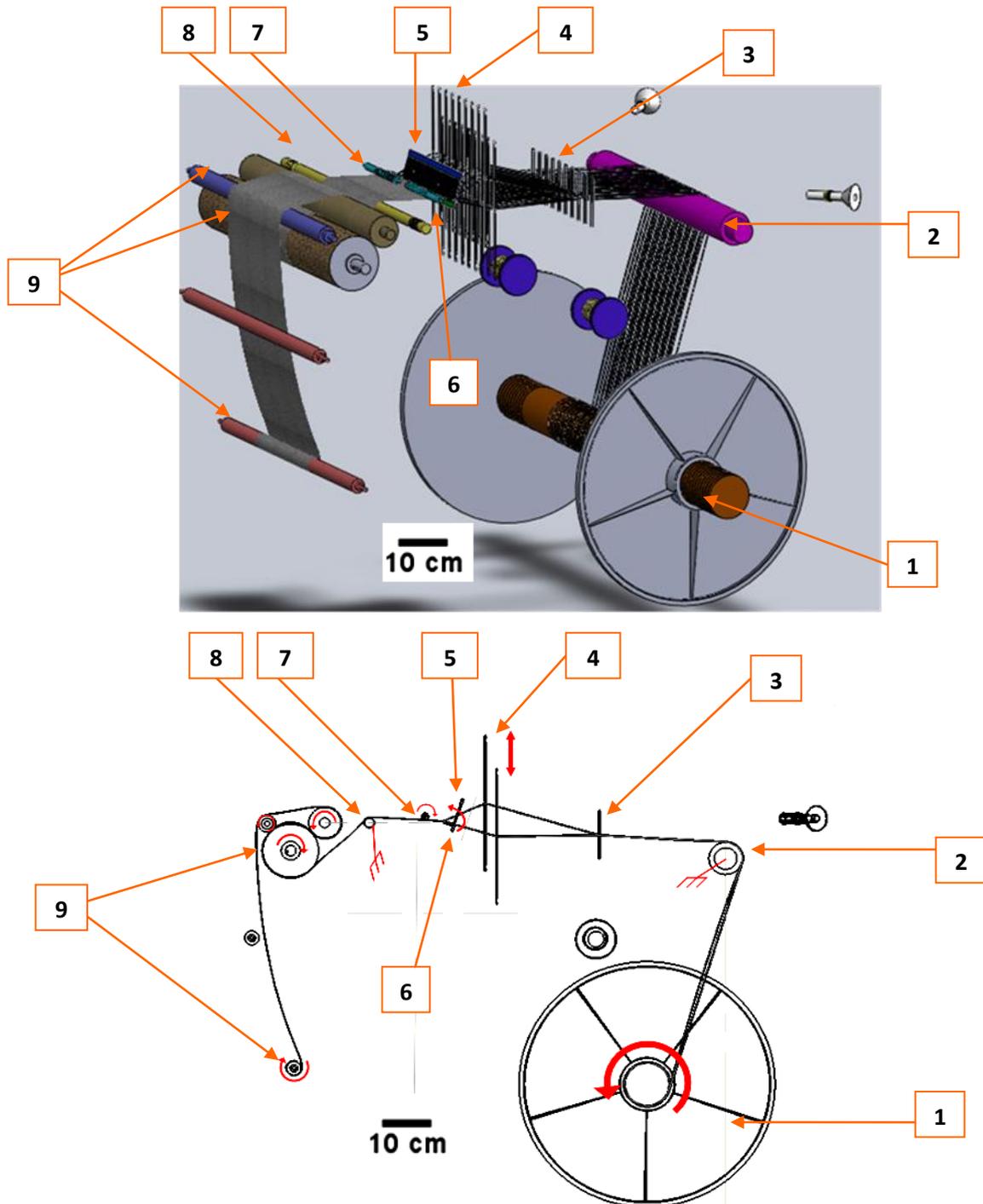
habituellement en feutre vert par un revêtement en Teflon[®] non abrasif permettant de réduire ainsi le coefficient de frottement du fil sur cette semelle (Figure 5-3 (c)).

Par la suite, le tissu formé passe par plusieurs rouleaux d'appels, et par un palpeur de tension du tissu qui permet d'ajuster la vitesse de déroulement de l'ensouple en fonction de la tension de la nappe de tissu que l'on désire en sortie (Figure 5-3 (d) et (e)). Sur une machine à tisser industrielle, des templets (Figure 5-2) sont ajoutés sur les côtés pour limiter le retrait du tissu après sa formation. Dans le cadre de notre production effectuée au Gemtex, nous n'avons pas utilisé de templets car la laize (largeur du tissu) choisie était assez faible (un mètre).

D'autres organes de la machine à tisser qui ne sont pas représentés sur la Figure 5-2 ont une influence sur les bords du tissu (Figure 5-5) :

- la fausse-lisière (bobinot et appareil de fausse lisière) qui sert à maintenir le fil de trame lors du tassage de la duite.
- le pas-de-gaze (bobine, presse-fil et lisses pas-de-gaze) qui sert à maintenir les fils de chaîne situés aux extrémités du tissu.
- la lisière qui sert à maintenir le bord du tissu.

Il existe également des éléments mécaniques servant à acheminer le fil de trame de la bobine jusqu'à la foule (pré-délivrage du fil), qui sont en contact avec le fil de trame (Figure 5-4). Ces éléments qui peuvent être endommageants pour le fil de trame (création de fibrilles, Figure 5-4 (e)), et générer des pertes de propriétés mécaniques, n'ont pas été pris en compte dans la modélisation numérique pour des raisons de taille de modèle.



1. **Ensouple** (barre d'ensouple & flasques) animée d'un mouvement de rotation.
2. **Porte-fil** qui n'est pas animé d'un mouvement de rotation, mais est lié à la machine à tisser à l'aide d'un ressort de rappel qui sert à corriger la tension des fils de chaîne.
3. **Lamelles casse-chaînes** qui sont positionnées sur chaque fil de chaîne
4. **Lisses** qui sont animées d'un mouvement de translation verticale permettant l'ouverture et la fermeture de la foule.
5. **Peigne** qui est animé d'un mouvement de rotation.
6. **Semelle** qui est fixée sur le peigne. Sert à guider la lance mécanique.
7. **Templets** qui servent à corriger le retrait du tissu
8. **Palpeur de tension de chaîne** (avec capteur de tension de chaîne pour mesurer la tension du tissu)
9. **Rouleaux d'appel** qui servent à l'enroulement du tissu formé.

Figure 5-2. Énumération des éléments en contact avec le fil ou le tissu sur la machine à tisser Dornier (modèle HTVS 4/S).

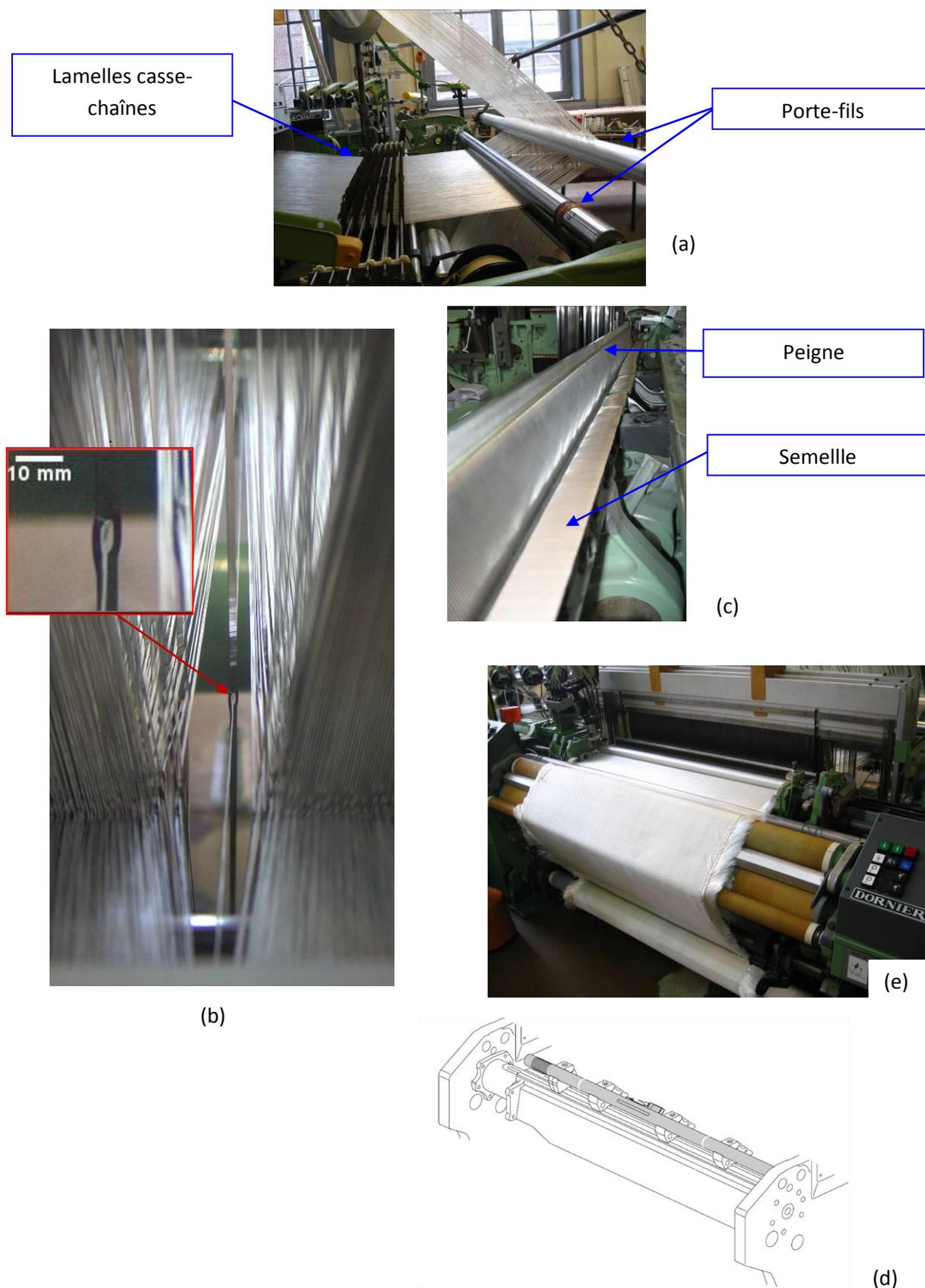


Figure 5-3. Éléments de la machine à tisser Dornier en contact avec les fils de chaîne : (a) porte-fils et lamelles casse-chaînes ; (b) lisses ; (c) peigne et semelle ; (d) palpeur de tension de chaîne [173] ; (e) rouleaux d'appel.

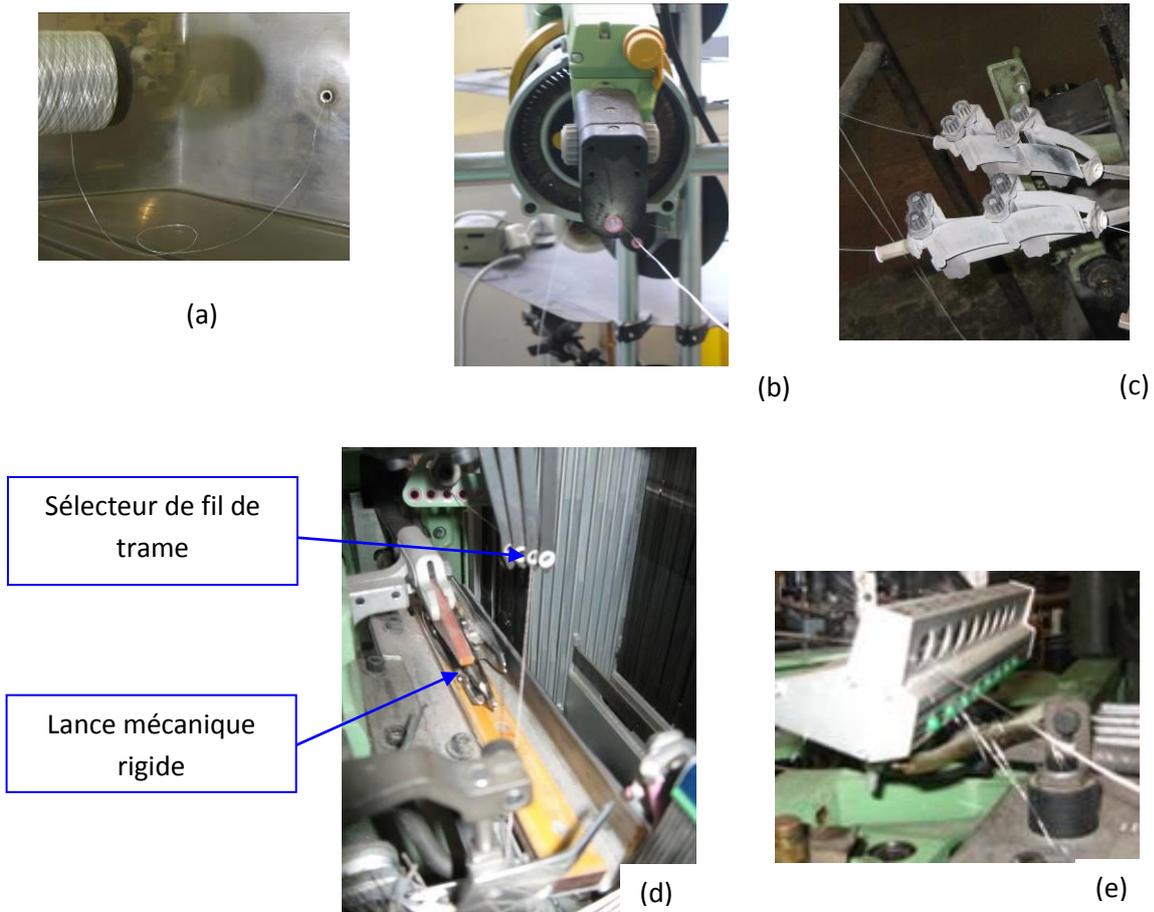


Figure 5-4. Éléments servant au pré-délivrage du fil de trame sur la machine à tisser Dornier : (a) œillet de tension ; (b) pré-délivreur ; (c) frein de fil ; (d) sélection et préhension du fil de trame ; (e) fibrilles à la sortie d'un œillet.

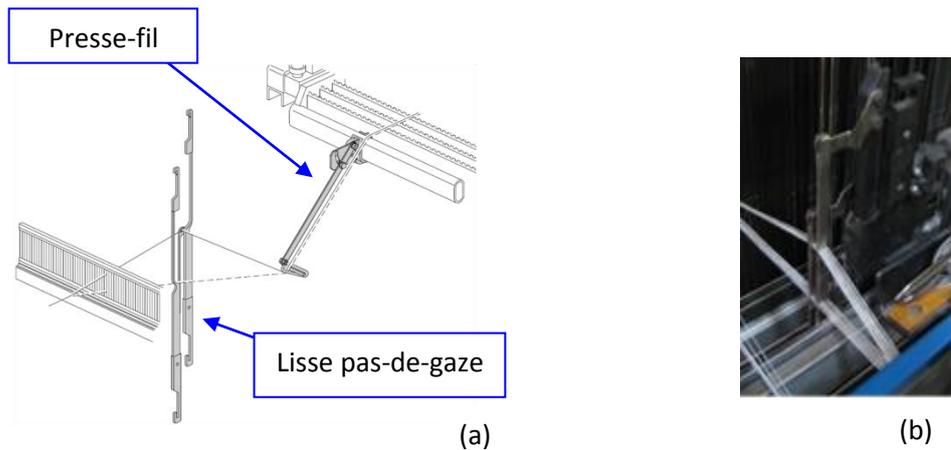


Figure 5-5. Éléments aidant aux maintiens des bords du tissu : (a) Système pas-de-gaze [173] ; (b) Système fausse-lisière.

5.2. Visualisation de l'influence des éléments de la machine à tisser sur le fil/tissu (Caméra rapide +tracking)

Plusieurs séquences de vidéo rapide (trente-deux en totalité) ont été réalisées chez notre partenaire tisseur du projet NUMTISS, *TRP-Charvet*, au mois de mai 2011. Les vidéos ont été prises sur une machine à tisser Dornier, à l'aide d'une caméra rapide *Photron*[®] *APX* ayant une résolution maximale de 1024 x 1024 pixels à 2000 images/s (Figure 5-6 (a)). Le tissu produit est de type toile avec des multi-filaments de 1100 dTex en PES (Densité de fils : 10,5 fils/cm en chaîne et 10 fils/cm en trame). Un dispositif d'éclairage adapté a été utilisé pour pouvoir filmer dans de bonnes conditions les différentes cinématiques du tissage. Les vidéos rapides ont été réalisées pour des vitesses de production de 350 coups/min et 450 coups/min.

Le post-traitement du suivi vidéo a été réalisé à l'aide du logiciel TEMA, qui permet notamment d'obtenir des trackings automatiques lorsque le repère est bien défini sur les différentes images de la vidéo. Les résultats de la vidéo rapide ont permis de révéler les différents mécanismes de déformation ayant lieu au cours du tissage.

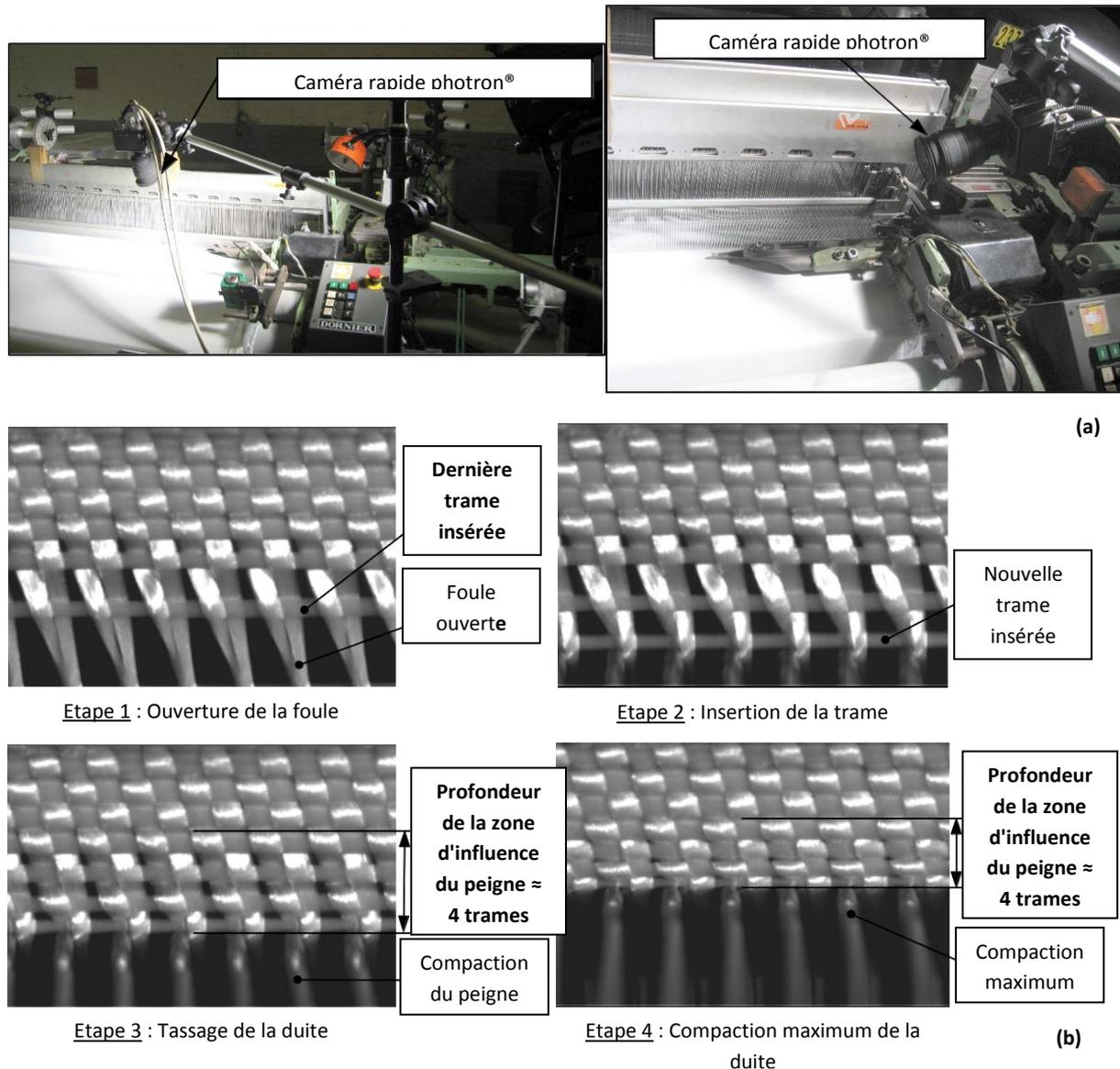


Figure 5-6. (a) Photos de la mise en place de la caméra ultra-rapide sur la machine à tisser Dornier ; (b) série d'images prises avec la vidéo rapide dans la zone de tassage de la duite.

Les images de la Figure 5-6 (b) représentent (en vue de dessus) le suivi des différentes étapes ayant lieu lors du tassage (compaction) de la duite ; ces images révèlent que la zone d'influence du peigne lors du tassage s'étend sur environ quatre trames. Le tracking des images (Figure 5-6 (b)) issues de la vidéo rapide permettent d'observer un pic périodique (vers le bas, en bleu) sur la courbe, selon la direction Y (Figure 5-8), qui correspond à la déformation et au déplacement de la trame quand elle est tassée par le peigne. Le tracking effectué sur le déplacement des lisses (Figure 5-7 (b)) révèle quant à lui que les lisses sont soumises à des vibrations importantes durant le procédé de tissage. Les oscillations sur la courbe en rouge, selon la direction X (Figure 5-9), montrent que l'œillet de la lisse n'est pas vraiment stable horizontalement, pendant le tissage ; ce qui peut endommager le fil. La courbe en bleu de la Figure 5-9 traduit le déplacement vertical de la lisse ; une légère encoche vers le bas, visible sur la partie supérieure de la courbe, correspond à l'arrivée en butée des cadres. La partie inférieure de cette courbe a été représentée par interpolation numérique, car la cible sortait du cadre de l'image lors de la descente de la lisse (Figure 5-7 (b)). L'analyse du

tracking issu des vidéos rapides permet de déceler et de comprendre les différents mouvements mécaniques de la machine à tisser qui peuvent engendrer des contraintes et des déformations sur le fil ou le tissu au cours du procédé de tissage. D'autres trackings, qui ne sont pas présentés ici, ont été également réalisés au niveau des différents éléments qui servent à l'acheminement et à l'insertion du fil de trame.

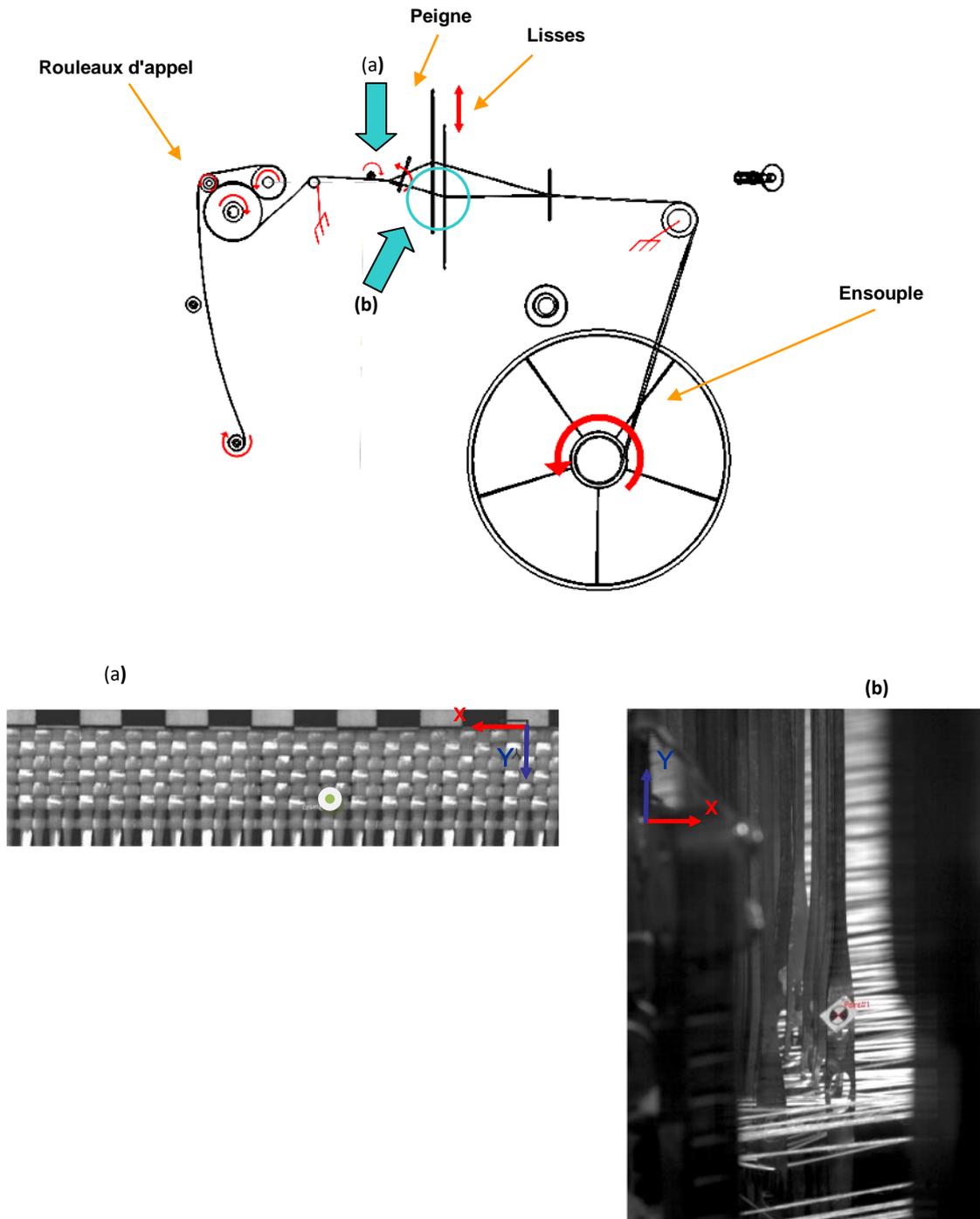


Figure 5-7. Images prises avec la caméra ultra-rapide : (a) vue de dessus de la zone d'entrelacement des fils chaîne et trame ; (b) Vue de côté du déplacement vertical des lisses.

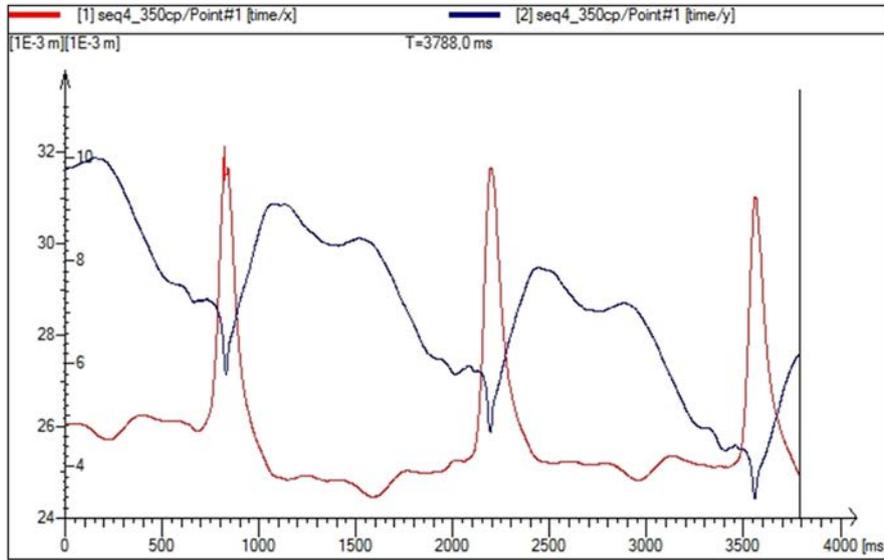


Figure 5-8. Tracking du point vert (cible) de la Figure 5-7 (a) dans les directions (x, y).

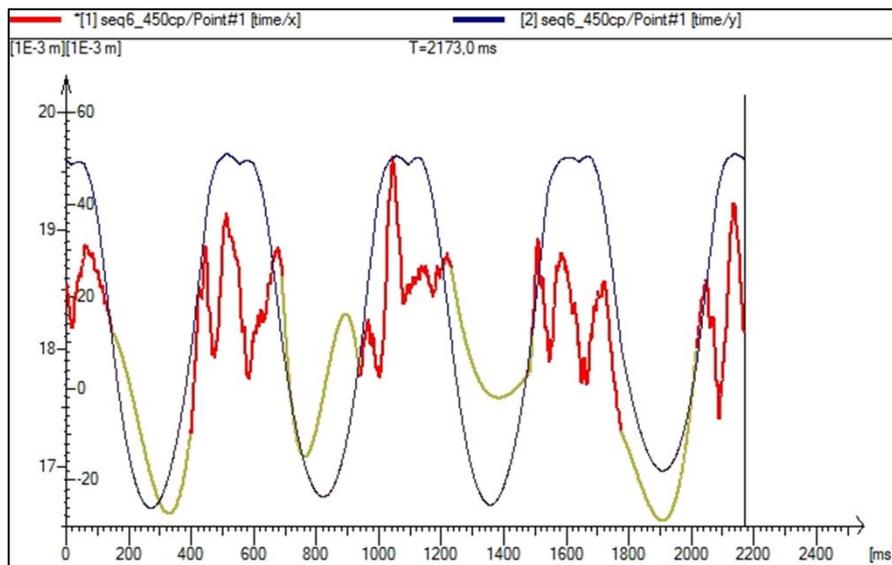


Figure 5-9. Tracking de la cible située sur la lisse de la Figure 5-7 (b).

5.3. Paramètres de la production des tissus en fibre verre

5.3.1. Spécifications des tissus retenus

Les différentes productions réalisées ont été orientées par les spécifications liées au cahier des charges des partenaires HERAKLES et SNECMA (Groupe SAFRAN) du projet NUMTISS. On récapitule dans le Tableau 5-1 l'ensemble des structures tissées produites.

Type	Armure	Densité
2D	Toile	7 fils/cm (300 Tex)
		4 fils/cm (900 Tex)
	Croisé 2-2	7 fils/cm (300 Tex)
		4 fils/cm (900 Tex)
	Satin 8	7 fils/cm (300 Tex)
		4 fils/cm (900 Tex)
3D (4 Couches)	Toile	28 fils/cm (300 Tex)
		16 fils/cm (900 Tex)
	Croisé 2-2	28 fils/cm (300 Tex)
		16 fils/cm (900 Tex)
	Satin 8	28 fils/cm (300 Tex)
		16 fils/cm (900 Tex)

Orthogonal }
Incliné (45°) →

Tableau 5-1. Tableau récapitulatif des structures tissées produites par l'Ensait dans le cadre de NUMTISS.

5.3.2. Spécifications du tissage choisis

Les peignes de 7 broches/cm (300 Tex) et de 4 broches/cm (900 Tex, Figure 5-10) ont été utilisés pour ces productions. Pour le tissage 2D, il y avait un fil par broche, et pour le tissage 3D, 4 fils par broche (Figure 5-19).

Le tissage des tissus 2D s'est effectué sur huit cadres et celui des interlocks sur treize cadres - onze cadres pour l'armure, (cf. section 5.4.2.2), et deux cadres pour la formation du pas-de-gaze. On répertorie dans le Tableau 2, ces paramètres propres au procédé de tissage.

La hauteur de la foule est de 70 mm pour les tissus 2D et 100 mm pour les tissus 3D. Le technicien règle une hauteur de foule plus grande pour les tissus interlocks ; vu que la densité en chaîne est plus importante, la nappe des fils de chaîne est donc plus épaisse. Il est probable que si la hauteur de la foule est plus importante, ceci engendrera une compression transverse plus importante des fils de trame insérés.

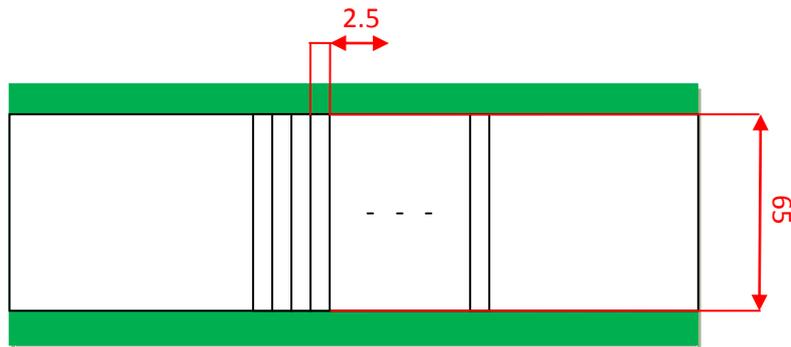


Figure 5-10. Géométrie du peigne avec 4 broches/cm (unité mm).

Production	Nbre de fils en chaîne	Nbre de cadres	Nbre de broches / cm	Nbre de fils par broche
300 Tex / 2D	700	8	7	1
900 Tex / 2D	400	8	4	1
300 Tex / 3D	2800	11	7	4
900 Tex / 3D	1600	11	4	4

Tableau 5-2. Paramètres utilisés lors du tissage du verre E.

5.3.3. Cycle de tissage sur la machine à tisser Dornier

Le choix d'une vitesse de tissage assez faible de 100 coups/min a été retenu dans le cadre de la production des tissus en verre pour le projet NUMTISS, pour éviter ainsi une détérioration et une casse des fils trop importante lors de la production, qui auraient provoquées des arrêts machines répétitifs. Les simulations numériques réalisées (Chapitre 6) sont inspirées en partie du cycle de tissage réel ayant lieu sur la machine à tisser Dornier (Figure 5-11 et Figure 5-12). En fonction de cette vitesse choisie (100 coups/min), on représente sur la Figure 5-11 l'ensemble d'un cycle de tissage en prenant en compte les différents angles d'ouverture de foule, l'insertion de la trame et le coup de peigne en fonction de l'angle de l'arbre moteur. Sur la Figure 5-12, l'évolution des angles d'ouverture de foule est précisée sur deux cycles. Le coup de peigne a lieu à cheval sur deux cycles lorsque la foule fait un angle de 18°.

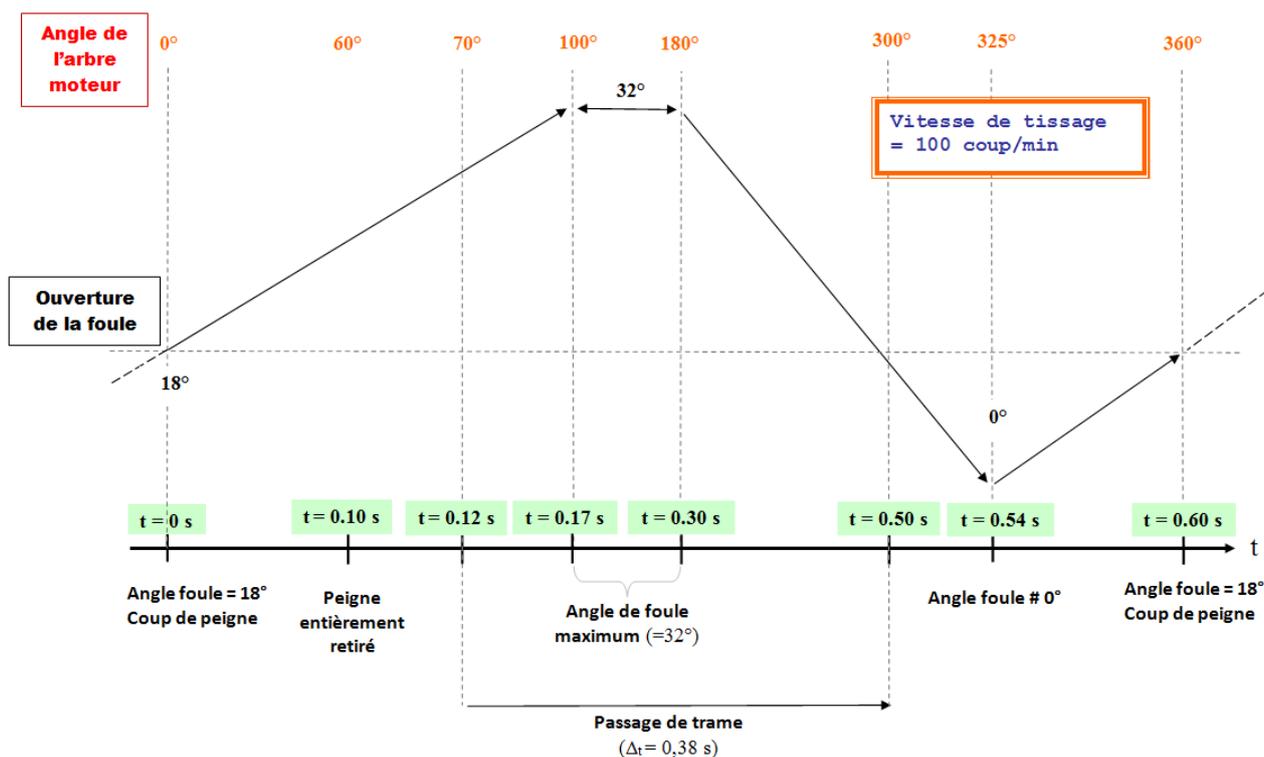


Figure 5-11. Un cycle de tissage sur la machine à tisser Dornier.

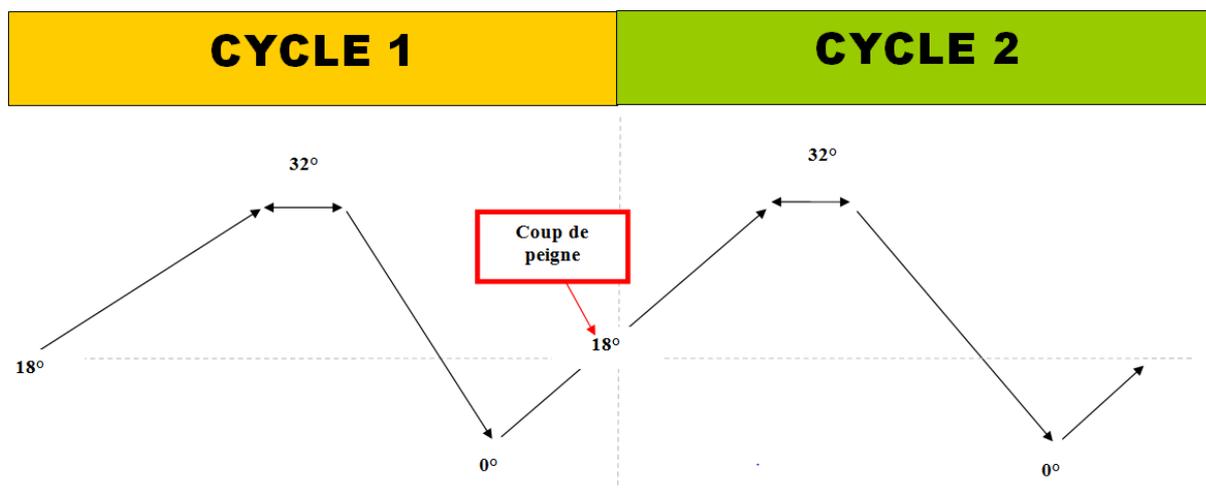


Figure 5-12. Évolution de la foule sur deux cycles de tissage.

5.3.4. Fils à base de multi-filaments de verre utilisés

Les fils de verre utilisés en production sont des multi-filaments non retordus, dits « roving », de verre E. Les filaments de verre E (54% de silice et 14% d'alumine, en masse) sont les plus communs car ils sont les moins coûteux, tout en gardant d'assez bonnes propriétés mécaniques (cf. Chapitre 1.4). Le diamètre des filaments est généralement compris entre 10 et 20 μm .

Dans le cadre de la production des livrables NUMTISS, deux tailles de roving ont été utilisées (Tableau 5-3) :

- le 300 Tex produit par Owens Corning (SE 1200, OCV) [136] ;
- le 900 Tex produit par PPG (Hybon 2001) [137].

	300 Tex	900 Tex
Diamètre du fil (mm)	0.6	1
Diamètre du filament (μm)	16	15
Nombre de filaments par fil	600	2000

Tableau 5-3. Données techniques des fils utilisés pour la production des étoffes tissées en verre [136], [137].

Pour faciliter le tissage et améliorer la cohésion du roving (sans torsion), les fabricants ajoutent une couche d'ensimage, en silane par exemple (0.55% pour PPG) à leurs filaments. L'ensimage permet d'améliorer la manipulation du fil, la production du tissu, ainsi que l'imprégnation de la résine ultérieure. Pour nos besoins de tissage nous avons aussi retordu les fils à 25 tr/m, afin de leur donner une meilleure cohésion et une légère élasticité.

5.3.5. Pourquoi retordre le fil ?

Comme décrit précédemment (en section 5.3.4 et dans le chapitre 2.1.3), les fils de verre utilisés, de type roving, sont formés d'un ensemble de filaments relativement alignés les uns par rapport aux autres, sans torsion initiale. Pour les besoins du tissage, en particulier sur la machine à tisser Dornier (modèle HTVS 4/S), il est nécessaire d'ajouter un minimum de torsion aux fils. Cela contribue à diminuer les casses de filaments dues à l'abrasion (fibrille, cf. Chapitre 2) [43], [44], [51], [143], et aussi à donner une légère élasticité au fil pour compenser les différences de tension en sortie d'ensouple notamment.

Cette différence d'élasticité se retrouve sur les courbes d'effort en fonction de l'allongement, présentées sur la Figure 5-13 (a) et (b), obtenues par une série de tests de rupture à l'allongement sur deux groupes de fils de verre (10 échantillons sans torsion et 10 échantillons avec une torsion de 25 tr/m). Sur la Figure 5-13 (a), qui correspond au roving non retordu, on peut voir que le comportement des fils à l'allongement est directement linéaire. Les écarts entre les différents fils testés sont faibles. Sur la Figure 5-13 (b), en revanche, on remarque que les fils retordus produisent un comportement sensiblement différent. Dans la zone de 0 à 0.5% (voir 1%) de déformation, on note un comportement non-linéaire des fils. Ce comportement est plus ou moins marqué selon les différents fils testés et, on peut supposer que cela s'explique par une valeur de torsion légèrement différente d'un fil à l'autre, du fait de

la mise en place manuelle dans les mors. Passé cette zone, le comportement est de nouveau linéaire et l'allongement à la rupture est sensiblement identique à celui des rovings non retordus, autour de 2,5% de déformation.

La zone de comportement non-linéaire du fil correspond à un réalignement des fibres et à une mise en tension progressive de chacune d'elles au sein du fil. Les déformations que subit le fil dans cette zone ne sont pas réversibles. Pour les fils non retordus, tous les filaments travaillent simultanément à partir d'une faible valeur de pré-charge.

Notons qu'un fil retordu garde sa torsion tout au long des différentes étapes du procédé de tissage, jusque dans le tissu.

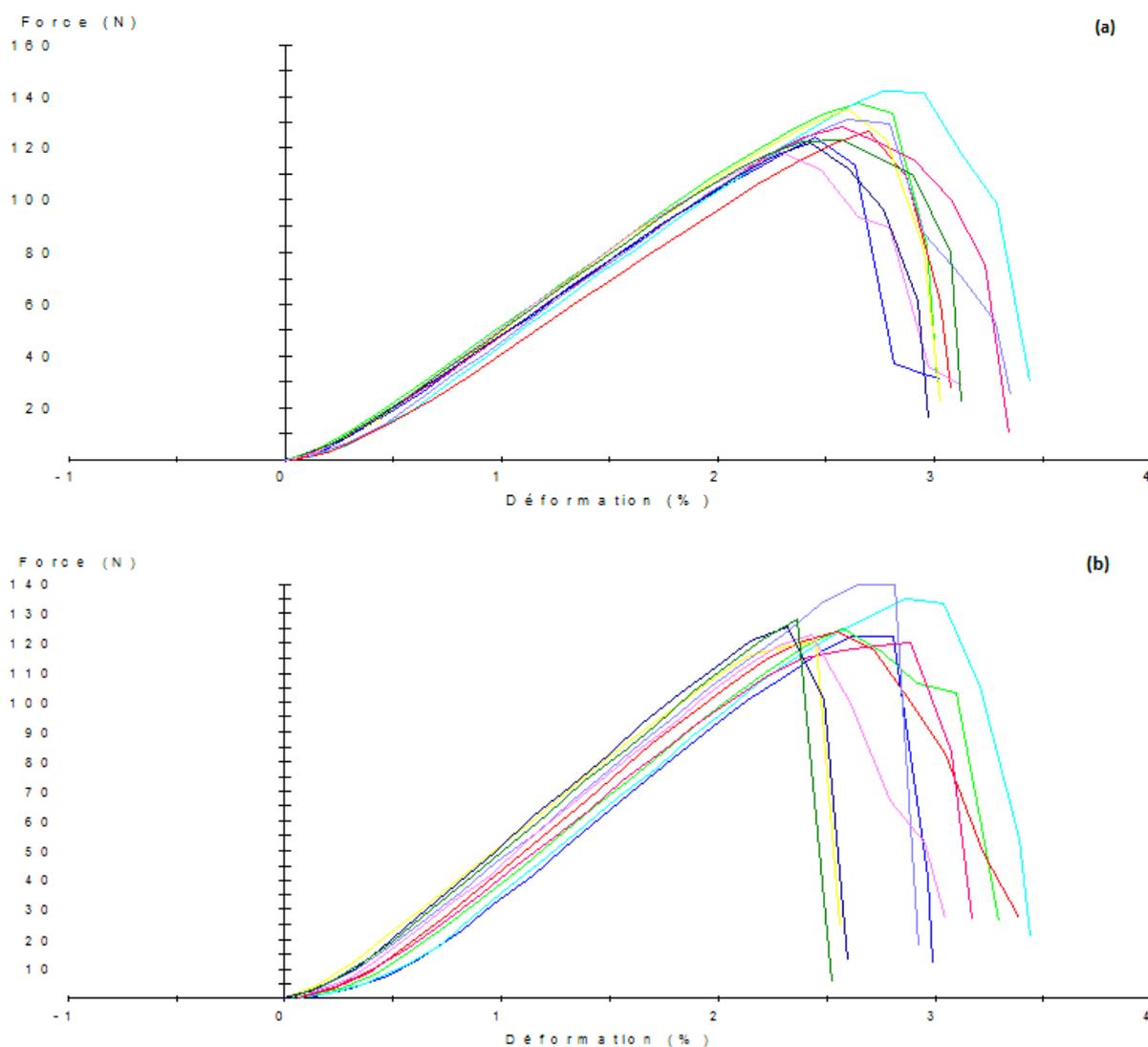


Figure 5-13. Test d'allongement à la rupture pour deux groupes de rovings de verre de 300 Tex (retordus et non retordus), avec la force en fonction de l'allongement relatif : (a) rovings non retordus. (b) rovings retordus à 25 tr/m.

Types de rovings	Non retordus		Retordus	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Force à rupture (N)	121,9	9,3	103,5	10,6
Déformation à rupture (%)	3,50%	0,37%	3,21%	0,45%
Module de rigidité longitudinale (N / mm ²)	4896	236	4902*	181
*Calculé après 1.5 % de déformation (partie linéaire de la courbe)				

Tableau 5-4. Résumé de tests d'allongement à la rupture sur les rovings de 300 Tex (non retordus et retordus à 25 tr/m).

5.3.6. Tensions sur la machine à tisser Dornier

La machine à tisser Dornier règle automatiquement la tension de la nappe de fils de chaîne, en faisant varier la vitesse de rotation de l'ensouple, et donc de déroulement des fils de chaîne ; ceci en fonction du duitage choisi en entrée, et de la valeur de tension mesurée par le palpeur de tension de chaîne (cf. section 5.1). Les tensions des fils de chaîne et trame mesurées manuellement sur la machine à tisser sont énumérées dans le Tableau 5-5.

Tension du fil		
	300 Tex	900 Tex
TR	100 cN	200 cN
CH	200 cN	200 cN

Tableau 5-5. Valeurs de tension du fil relevées sur la machine à tisser industrielle.

5.4. Tissage des architectures en fils de verre E 300 Tex/900 Tex

5.4.1. Architectures 2D - et fils de verre E de titrage 300Tex/900 Tex

Les trois architectures 2D produites en verre (toile, croisé 2x2, satin de 8) sont présentées Figure 5-14, Figure 5-15, et Figure 5-16.

5.4.1.1. *Armure Toile - et fils en verre E de titrage 300 Tex/900 Tex*

La toile est l'armure la plus simple et la plus utilisée, elle est caractérisée par la disposition inverse des fils pairs et des fils impairs : chaque fil de chaîne passe alternativement au dessus et en dessous de chaque fil de trame (Figure 5-14).

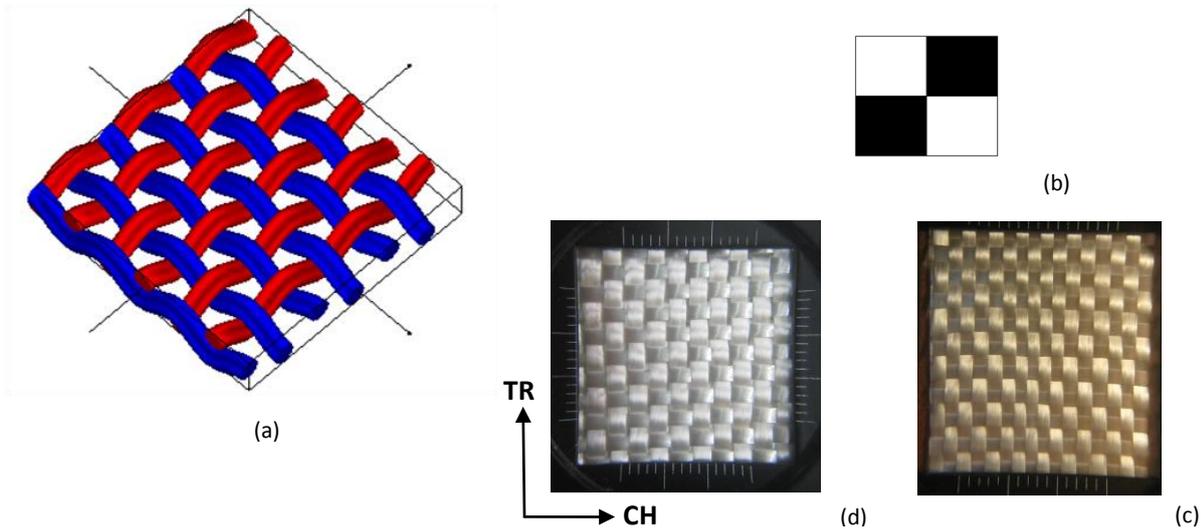


Figure 5-14. (a) Représentation de l'armure toile sous le logiciel Wisetex ; (b) armure toile ; toile produit à base de fils en verre E de titrage : (c) 300 Tex et (d) 900 Tex.

5.4.1.2. *Armure Croisé 2-2 - et fils en verre E de titrage 300 Tex/900 Tex*

La dénomination des croisés se fait par la grandeur des flottés chaînes d'endroit et d'envers. C'est ainsi que l'on nomme croisé 2-2 (appelé aussi casimir), l'armure dont les raccords sont de 4 fils de chaîne et de 4 duites avec un flotté de 2 chaînes d'endroit suivi d'un flotté chaîne de 2 d'envers (Figure 5-15).

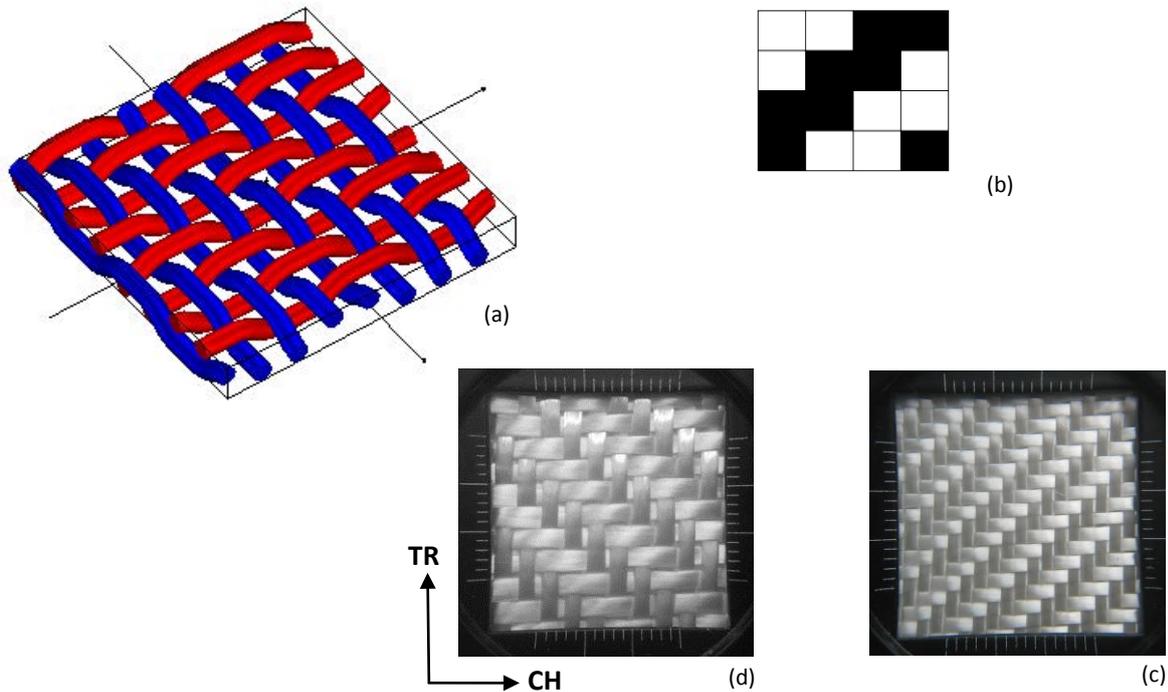


Figure 5-15. (a) Représentation de l'armure croisé 2-2 sous le logiciel WiseTex ; (b) armure croisé 2-2 ; (c) croisé 2-2 produit à base de fil en verre E de titrage : (c) 300 Tex et (d) 900 Tex.

5.4.1.3. Armure Satin 8 - et fils en verre E de titrage 300 Tex/900 Tex

Le satin est un tissu uni dans lequel, grâce à la dissémination des points de liage, on évite tout effet accentué de diagonale. Comme le sergé, il n'a qu'un point de liage sur chaque fil et sur chaque duite du rapport d'armure Figure 5-16.

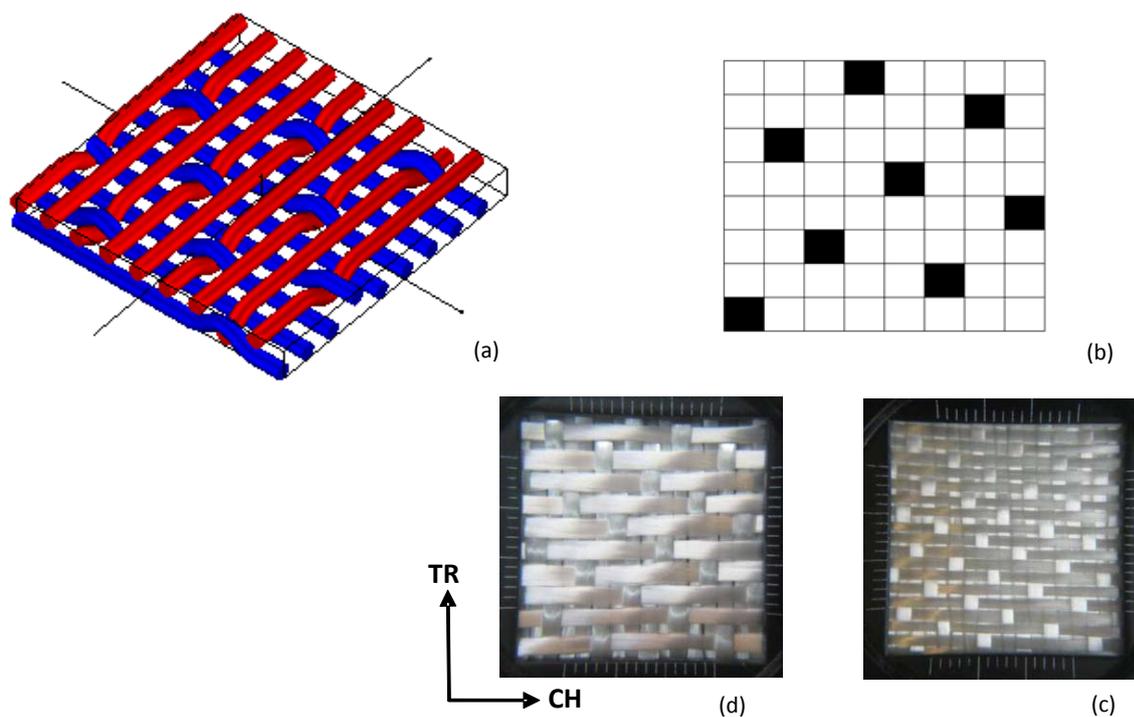


Figure 5-16. (a) Représentation de l'armure satin 8 effet trame décochement de 5 avec le logiciel Wisetex ; (b) armure satin 8. ; satin 8 produit à base de fils en verre E de titrage : (c) 300 Tex et (d) 900 Tex.

5.4.1.4. Comparaison des architectures 2D

Le Tableau 5-6 détaille les différentes caractéristiques des tissus réalisés ; on peut y constater que pour le fil de 300 Tex les armures ont une masse surfacique quasi-équivalente (environ 400 g/m²). Le satin 8 en 900 Tex a une masse surfacique qui est supérieure de 140 g/m² par rapport aux autres armures en 900 Tex (toile et croisé 2-2) car le duitage était de 6 fils/cm pour le satin 8 au lieu de 4 fils/cm pour les deux autres armures (Tableau 5-6 et Figure 5-16 (d)). On constate logiquement dans le Tableau 5-6 que le retrait des fils de trame est plus faible que l'embuvage des fils de chaîne, vu que les fils de chaîne (liage) sont toujours plus ondulés que les fils de trame dans un tissu. Durant le procédé de tissage des architectures 2D, les fils avaient une tension proche de 200 cN (Tableau 5-5). Il y avait un peu plus de frottements entre les fils dans le cas du tissage avec les fils de 300 Tex, dus à la densité de fils plus importante pour celui-ci.

	Toile		Croisé 2-2		Satin 8	
	300 Tex	900 Tex	300 Tex	900 Tex	300 Tex	900 Tex
Masse surfacique (g/m ²)	407	720	413	725	404	862
Retrait TR (%)	1.1	0.8	0.5	1.1	0.4	2
Embuvage CH (%)	1.3	1.2	0.6	1.8	0.6	2.7

Tableau 5-6. Caractéristiques des tissus 2D en verre E.

5.4.2. Architectures 3D - et fils de verre E de titrage 300 Tex/900 Tex

Les différents tissus interlocks produits dans le cadre de NUMTISS sont présentés dans cette section. Ces interlocks étaient constitués de quatre couches de fils de trame.

5.4.2.1. Difficultés du tissage rencontrées pour des structures interlocks chaines

Au cours de la production des interlocks en verre E de titrage 300 Tex, des casses de filaments qui ont engendrées des casses de fils de chaîne sont survenues. Ce problème est dû certainement à la finesse du fil, et donc à une densité de fils plus importante, notamment en chaîne ou l'embrochage (nombre de fils/broche) était plus important pour le tissage des tissus interlock. Plus de frottements a été constaté, lors du changement d'armure notamment, car les fils se détendaient légèrement, provoquant ainsi des casses de filaments lorsque le peigne reculait. Les pinces des lances mécaniques – qui inséraient le fil de trame – engendraient également du frottement et de l'endommagement des filaments, à cause d'une foule insuffisamment éclaircie comme le montre la Figure 5-18. Ces apparitions de fibrilles étaient aussi dues aux problèmes de tension rencontrés sur la deuxième ensouple (fil de liage, cf. chapitre 2.2). Le réglage d'une ouverture de foule optimale – c'est-à-dire le réglage de la hauteur adéquate des cadres –, ainsi que l'ajout d'un système de tension (cf. Chapitre 2) sur la deuxième ensouple ont permis de diminuer ces apparitions de fibrilles. Par ailleurs, l'apport d'ensimage anti-électrostatique (*Statikil*, composé d'isopropanol et d'hexane entre autres) sur les fils de chaîne dans la zone de formation du tissu – entre les lisses et le point de façure – a permis de diminuer les endommagements dus aux frottements. Enfin, une barre (cylindre en aluminium, équivalent d'un temple toute laize) a été ajoutée au niveau du point de façure (Figure 5-17) pour restreindre l'oscillation verticale du tissu déjà formé, et donc de la foule. Cette oscillation est due aux phénomènes de tension ayant lieu lors du tissage du tissu interlock en 300 Tex. L'oscillation verticale du tissu empêchait une bonne insertion des lances rigides dans la foule, provoquant aussi les casses de fils visibles sur la Figure 5-18.

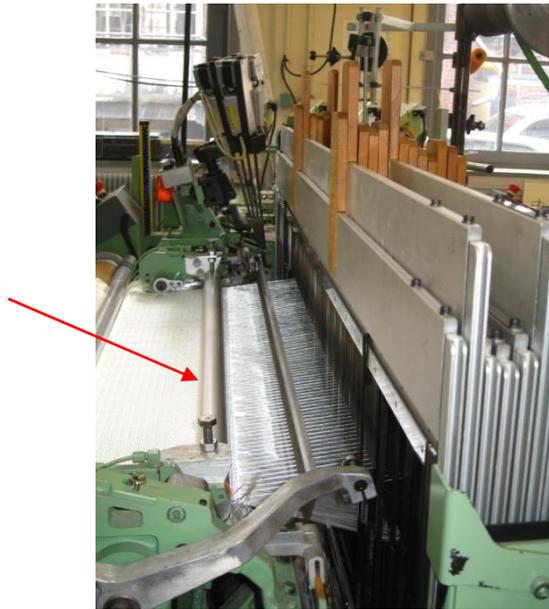


Figure 5-17. Ajout d'une barre pour bloquer le déplacement vertical de la foule.

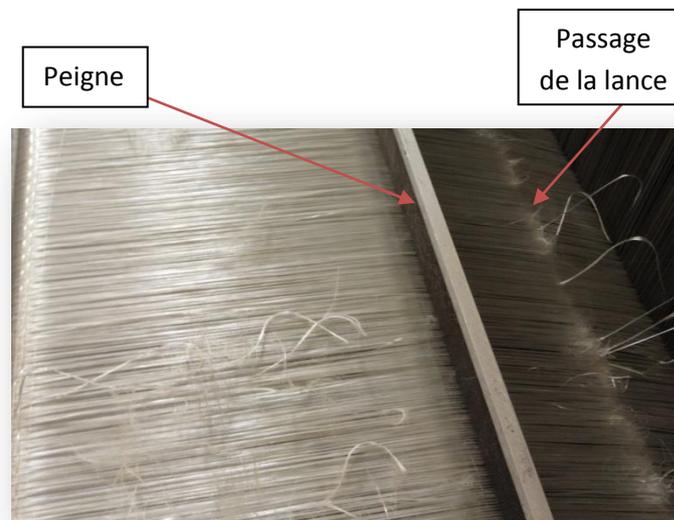


Figure 5-18. Casses des filaments lors de la production des tissus interlocks en fils de verre E de titrage 300 Tex.

Il a été constaté que l'effort à rupture des multi-filaments de verre diminue entre la bobine et le tissu 3D final ; cette modification des caractéristiques est due en partie au procédé de tissage en lui-même comme vu précédemment, mais également à la trajectoire des fils situés à l'intérieur du tissu (ondulation et déformation du fil de liage principalement) [144], [145].

5.4.2.2. Carte de rentrage des fils de chaîne pour la production des tissus interlocks

Le rentrage choisi (sur onze cadres) a permis de n'effectuer qu'un seul rentrage pour la production des trois architectures interlocks (cf. Figure 5-19). Le rentrage sauté, utilisé pour les huit premiers cadres, a permis aussi de limiter les frottements des fils chaîne de liage entre eux.

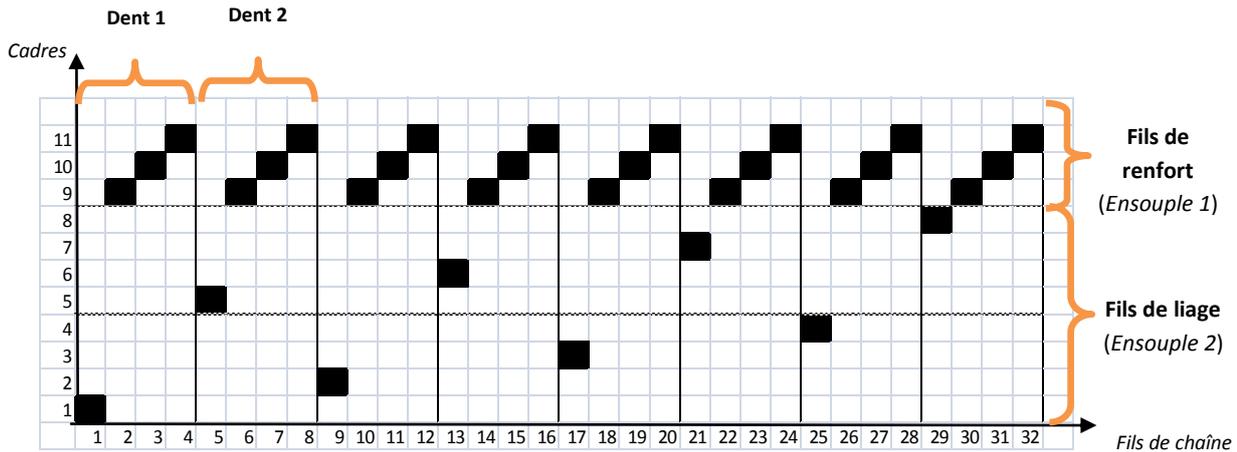


Figure 5-19. Carte de rentrage pour la production des tissus interlocks

5.4.2.3. Interlock orthogonal liage toile - fils de verre E de titrage 300 Tex/900 Tex

Sur la Figure 5-20 (b), les fils de chaîne (en bleu sur la figure) participent au liage (deux fils) et au renfort (six fils) de la structure tissée 3D, et les fils de trame (en rouge sur la figure) contribuent à définir le nombre de couches du tissu interlock 3D (quatre couches en l'occurrence), et donc son épaisseur. Cette structure est un tissu multicouche de type interlock. L'évolution de chaque fil de chaîne est représentée pour visualiser les différents liaages entre les couches du tissu, et selon un motif élémentaire représentatif de conception – composé ici de 8 fils de trame et de 8 fils de chaîne – pour la mise en fabrication sur la machine à tisser.

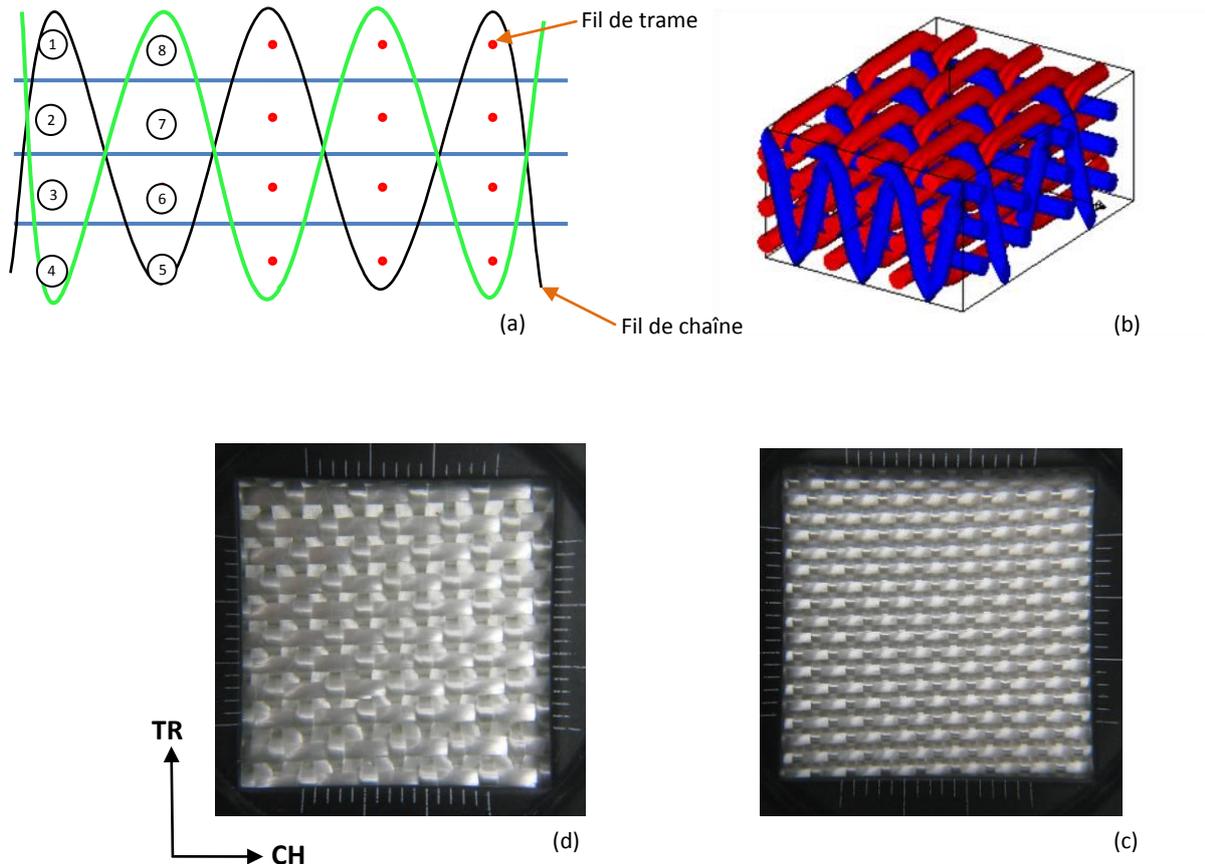


Figure 5-20. (a) Schéma de l'armure du 3D orthogonal liage toile (coupe chaîne) ; (b) vue 3D du tissu interlock orthogonal liage toile (*WiseTex*) ; interlock orthogonal liage toile produit à base de fils en verre E de titrage : (c) 300 Tex et (d) 900 Tex.

5.4.2.4. *Interlock orthogonal liage croisé 2-2 – fils de verre E de titrage 300 Tex/900 Tex*

Cet interlock orthogonal à quatre couches possède un motif élémentaire constitué de seize fils de trame et seize fils de chaîne (quatre fils de liage et douze fils de renfort, Figure 5-21). Ce sont les fils de renfort (longitudinaux) qui apportent majoritairement les propriétés mécaniques au tissu. Les fils de chaîne traversant l'épaisseur de la structure présentent un liage "croisé 2-2" en surface de celle-ci.

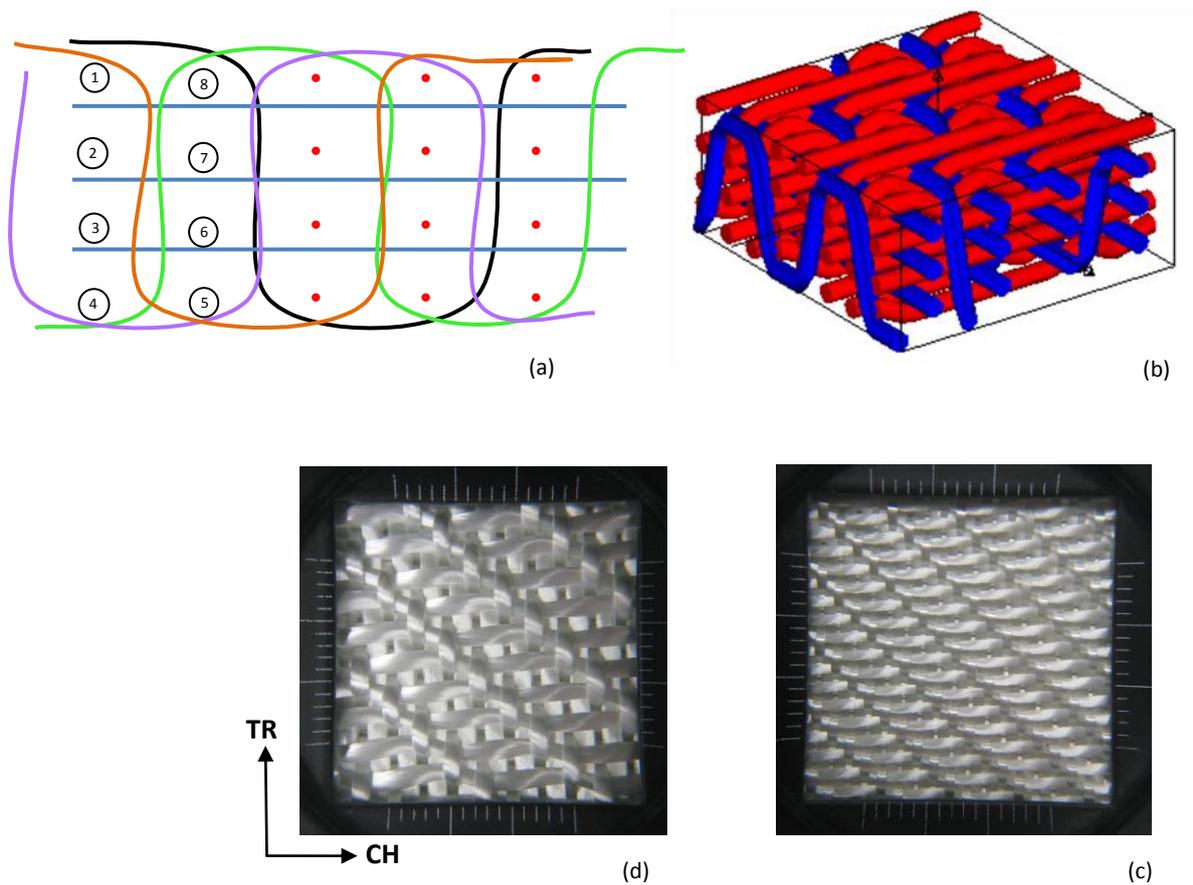


Figure 5-21. (a) Schéma de l'armure du 3D orthogonal liage croisé 2-2 (coupe chaîne) ; (b) vue 3D du tissu interlock correspondant (*WiseTex*) ; interlock orthogonal liage croisé 2-2 produit à base de fils en verre E de titrage : (c) 300 Tex et (d) 900 Tex.

5.4.2.5. *Interlock diagonal liage satin 8 - fils de verre E de titrage 300 Tex/900 Tex*

L'interlock diagonal (Through-the-Thickness) possède 8 fils de chaîne qui traversent toute l'épaisseur de la structure, et 24 fils de renfort. Ce type d'armure peut présenter l'inconvénient d'avoir beaucoup d'ondulations et de croisements au niveau de ses fils de chaîne pouvant alors causer des dégradations de fils [43]. Les Figure 5-22 (c) et (d) montrent la présence d'un effet barrure (espace) entre 2 trames sur les tissus produits, dû à l'ordre d'insertion des trames choisi, c'est-à-dire en "U" ; une insertion en "N" aurait peut-être permis d'éviter cet effet.

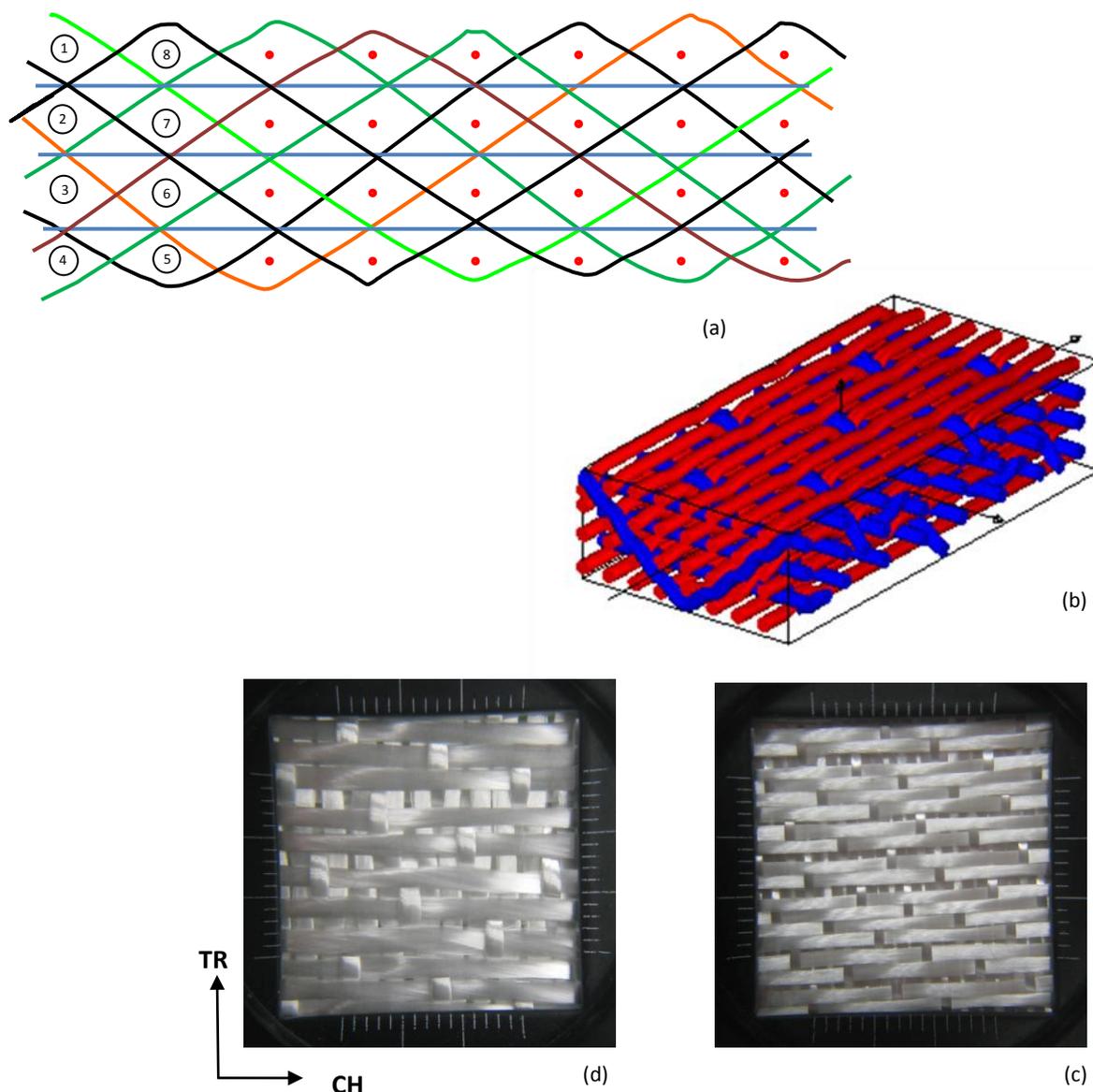


Figure 5-22. (a) Schéma de l'armure du 3D diagonal liage Satin 8 (coupe chaîne) ; (b) vue 3D du tissu interlock correspondant (*WiseTex*) ; interlock orthogonal liage satin 8 produit à base de fil en verre E de titrage : (c) 300 Tex et (d) 900 Tex.

5.4.2.6. Comparaison des architectures 3D

Les différents tissus interlock 3D produits ont une masse surfacique d'environ 1700 g/m² et 3000 g/m² respectivement pour les architectures en fils de verre E de titrage 300 Tex et 900 Tex (Tableau 5-7). On remarque que plus l'architecture a un liage dans l'épaisseur orthogonal serré (liage toile) plus la structure est compacte (peu épaisse, Tableau 5-7). Les épaisseurs ont été mesurées sur les images tomographiques (cf. section 5.5.3.2) et les images en coupe de tissus résinés (cf. section 5.5.2), à l'aide du logiciel *ImageJ*.

	Interlock liage toile		Interlock liage croisé 2-2		Interlock liage satin 8	
	300 Tex	900 Tex	300 Tex	900 Tex	300 Tex	900 Tex
Masse surfacique (g/m ²)	1732	2722	1762	3060	1657	3090
Épaisseur (mm)	1.5	3.1	1.7	4	2.4	4.3

Tableau 5-7. Caractéristiques des tissus interlock produits.

	Tissus produits	300 Tex	900 Tex
2D	Toile	3 m ²	4 m ²
	Croisé 2-2	3 m ²	4 m ²
	Satin 8	3 m ²	4 m ²
3D	Toile	3 m ²	5 m ²
	Croisé 2-2	3 m ²	5 m ²
	Satin 8	3 m ²	5 m ²

Tableau 5-8. Bilan récapitulatif des productions réalisées (quantité de tissu).

5.5. Observations microscopiques

De nombreuses études portent sur la définition, aux échelles microscopiques et mésoscopiques, de la géométrie des fils. Pour leurs trajectoires dans les renforts en fonction des architectures considérées (tissés, NCF, interlock 3D, tressés,...), mais également pour l'analyse des sections transverses de ces fils afin de quantifier la compaction lorsque ces renforts sont sollicités. Ces analyses font l'objet de très nombreux travaux, grâce à l'émergence d'outils de visualisation de plus en plus précis (micro-CT, tomographie, etc...) qui permettent des acquisitions à des échelles différentes en fonction de l'objectif visé. Citons dans ces travaux, les études relatives au comportement du fil seul [146]–[149], de celles utilisant ces outils de visualisation pour la modélisation de cellules élémentaires de renforts en vue de calculer le comportement mécanique, entre autre par éléments finis [57], [130], [150], [151]. Mais également les travaux dédiés à la modélisation des renforts en vue d'étudier leur déformabilité lors des procédés de fabrication [96]–[98], [100], [152]–[154]. Dans toutes ces études, les visualisations des renforts sont conduites sur des renforts déjà élaborés par tissage.

La compréhension des phénomènes dans les fils lors des procédés d'élaboration des renforts, dans notre cas par tissage, n'est que peu décrite dans la littérature. C'est l'objectif de ce paragraphe, où l'analyse des fils pendant le procédé de tissage, puis l'analyse des tissus après tissage (2D et 3D) vont être présentées. Certains échantillons ont été analysés après résinage à l'Ensait et d'autres ont été analysés grâce aux tomographies des tissus en verre fournis par le laboratoire du LaMCoS.

5.5.1. Résinage du fil en verre E de titrage 300 Tex en tension sur la machine à tisser

Mode opératoire :

Injection de la résine – auto-polymérisante à froid (Cristal LAMPLAN) à base de résine époxy, composée d'un liquide et d'un durcisseur – à l'aide d'une seringue dans les moules (tuyau en PTFE). Les extrémités des tuyaux étaient calfeutrées avec du joint Gutta.

Réticulation : 24 h à température ambiante ($T=25^{\circ}\text{C}$).

Il faut noter que le montage pouvait probablement changer légèrement la tension du fil.

Les fils de verre E ont été résinés lorsqu'ils étaient en tension sur la machine à tisser dans la zone entre les lisses et le peigne, et dans la zone entre les lisses et les lamelles casse-chaînes (Figure 5-24). Ceci nous a permis d'observer la section transverse « la plus exacte » que peut avoir un fil de chaîne sur la machine à tisser, avant d'être dans le tissu. La section initiale du roving de verre, constitué de multi-filaments est, en sortie de bobine, quasi-rectangulaire comme le montre la Figure 5-23 (b). Ce roving a été retordu à 25 tours/m dans le but de réduire les endommagements qui apparaissent au cours du tissage, dus aux différents frottements auxquels est soumis le fil. La section observée, dans la zone de mesure, est circulaire (Figure 5-23 (a)). La section du fil observée a servi par la suite de référence pour mailler la section du fil dans le modèle numérique.

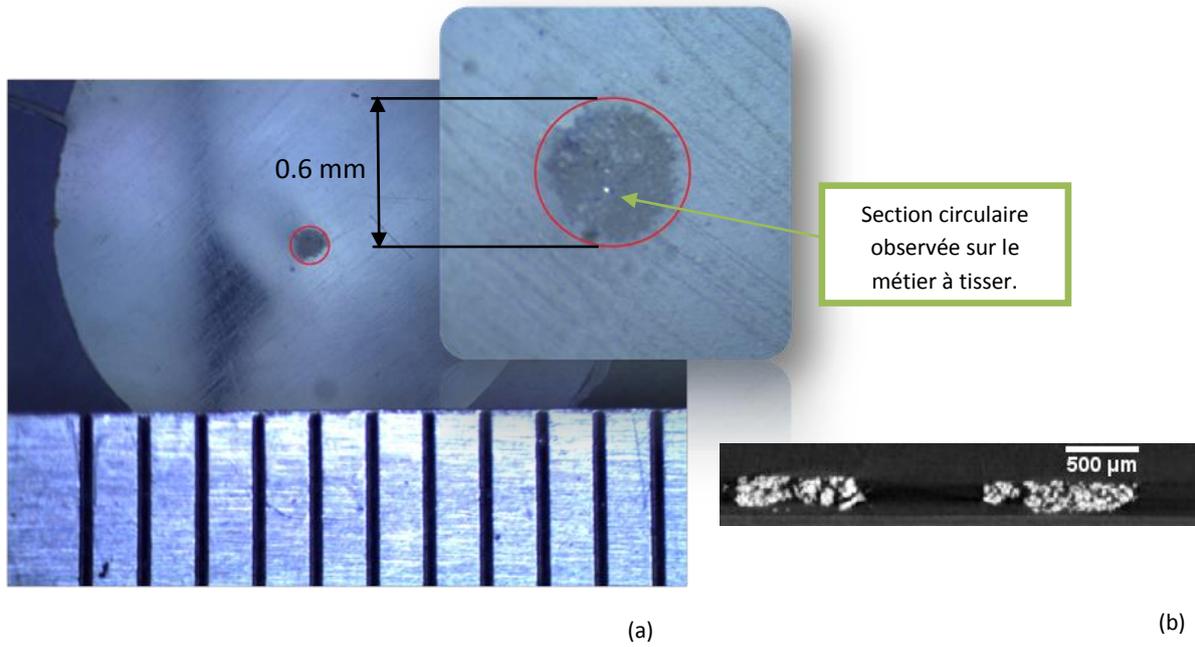


Figure 5-23. (a) Coupe d'un fil de chaîne retordu et résiné, en tension sur le métier à tisser ; (b) section du fil (roving) de verre non retordu (en sortie de bobine).

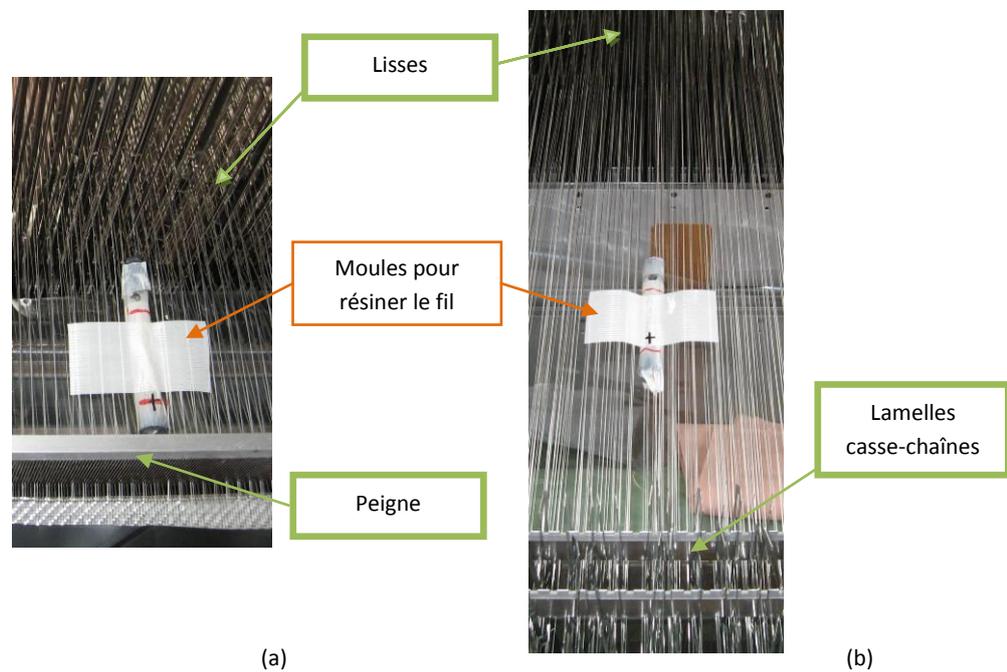


Figure 5-24. Résinage du fil de chaîne en verre E de titrage 300 Tex en tension sur la machine à tisser : (a) zone entre les lisses et le peigne ; (b) zone entre les lamelles casse-chaînes et les lisses.

5.5.2. Résinage des tissus en verre 2D et 3D

Pour observer des échantillons de tissus, il est souvent difficile de réaliser des coupes sur les renforts secs, l'ajout d'une résine est souvent une solution retenue pour figer la structure fibreuse, et ainsi pour pouvoir l'observer. L'inconvénient de cette méthode est que l'on n'est pas toujours certain que l'ajout de résine ne perturbe pas la géométrie du renfort.

Les architectures tissées 2D et 3D en fils de verre E produites ont été résinées ; ce qui nous a permis de pouvoir effectuer des coupes dans le tissu à différents endroits, et donc d'en observer les différentes sections transverses du fil (Figure 5-25, Figure 5-26, Figure 5-27, exemples pour les interlocks à base de fils en verre E de titrage 300 Tex). Pour les architectures 2D, les coupes qui ont été effectuées à différents endroits du tissu (milieu fil, entre deux fils) sont présentées dans le chapitre suivant.

Mode opératoire du résinage des tissus :

Utilisation d'une résine autopolymérisante à froid (Cristal LAMPLAN) à base de résine époxy, composée d'un liquide et d'un durcisseur.

Réticulation : 24 h à température ambiante ($T=25^{\circ}\text{C}$).



(a)



(b)

Figure 5-25. Tissu interlock liage toile en fil de verre E de titrage 300 Tex résiné : (a) coupe dans le sens trame ; (b) coupe dans le sens chaîne.

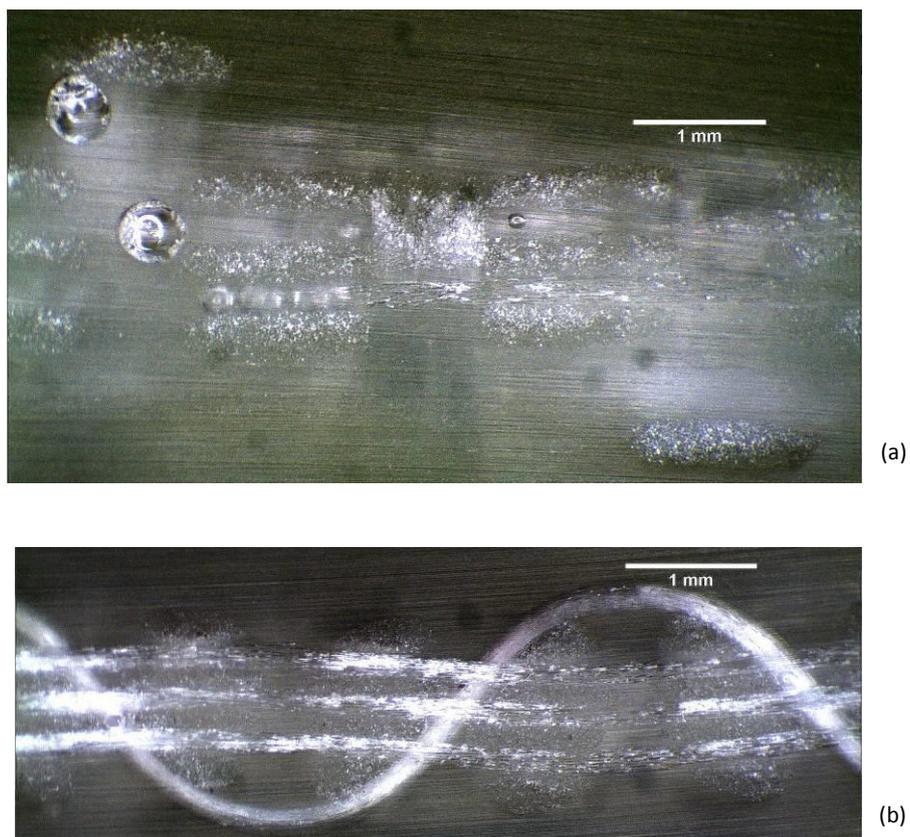


Figure 5-26. Tissu interlock liage croisé 2-2 en fil de verre E de titrage 300 Tex résiné : (a) coupe dans le sens trame ; (b) coupe dans le sens chaîne.

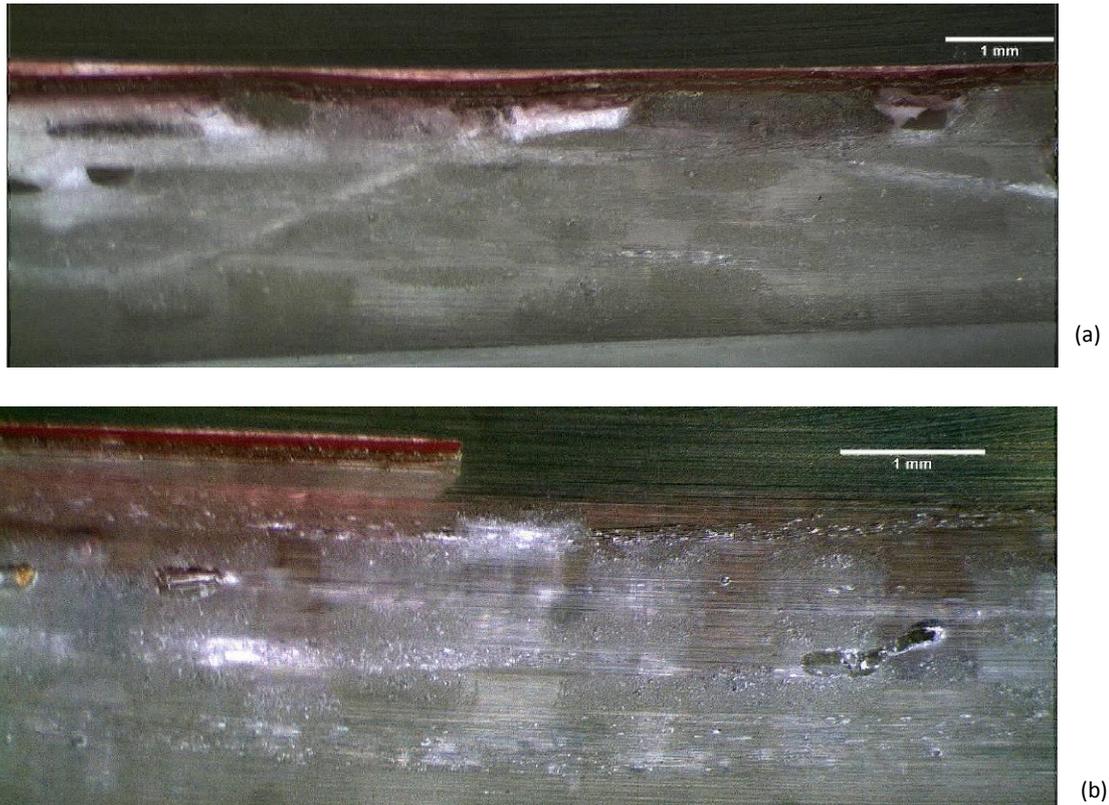


Figure 5-27. Tissu interlock liage satin 8 en fil de verre E de titrage 300 Tex résiné : (a) coupe dans le sens trame ; (b) coupe dans le sens chaîne.

Nous pouvons supposer, sur la base des observations des Figure 5-25 (a), Figure 5-26 (a), et Figure 5-27 (a), que l'ensemble des fils de chaîne présente une section plutôt rectangulaire aux niveaux des bords. Cette forme de section est probablement due aux contacts entre les colonnes de fils. L'observation des sections de fils de trame sur les Figure 5-25(b), Figure 5-26 (b), Figure 5-27 (b) montre que les fils, selon leur placement, ne possèdent pas une même géométrie de section. Par exemple, on peut observer sur la Figure 5-25(b) que les sections de fil de trame situées sur les couches externes sont en forme de demi-lune ; contrairement à celles situées dans les couches internes du tissu qui ont une forme quasi-rectangulaire.

5.5.3. Observation des tomographies des tissus en verre E réalisées au LaMCoS

La tomographie par absorption de rayons X est une technique non destructive qui permet la reconstruction d'images en coupe ou en 3D d'un objet massif. Le principe se base sur les propriétés d'atténuation des rayons X par la matière et sur l'enregistrement du rayonnement transmis à travers l'objet, principe de la radiographie. La radiographie effectuée par rayons X à chaque position angulaire d'un objet en rotation permet la reconstruction volumique – via des méthodes mathématiques – de ce même objet, à partir d'un grand nombre de mesures. L'avantage de cette méthode d'observation est qu'on n'a pas besoin de toucher l'échantillon pour pouvoir l'observer à cœur. Les coupes transverses issues des tomographies des

architectures 2D (300 Tex et 900 Tex), et les architectures 3D (900 Tex) sont présentées dans cette section.

5.5.3.1. Tomographies des architectures 2D

5.5.3.1.1. Fils en verre E de titrage 300 Tex

Les figures ci-dessous (Figure 5-28, Figure 5-29 & Figure 5-30) révèlent que la section initiale du fil qui était circulaire avant d'être dans le tissu (cf. section 5.5.1), devient quasi-elliptique voir rectangulaire (pour le satin 8) dans le tissu formé. Ceci peut s'expliquer par la présence des forces de contact au niveau des entrelacements entre chaîne et trame qui viennent en partie comprimer la section transverse du fil.

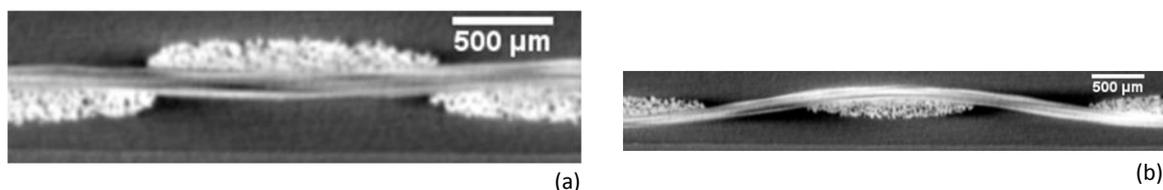


Figure 5-28. Vues en coupe du tissu toile avec des fils en verre E de titrage 300 Tex, obtenues par tomographie X au laboratoire du LaMCoS : (a) coupe chaîne ; (b) coupe trame.

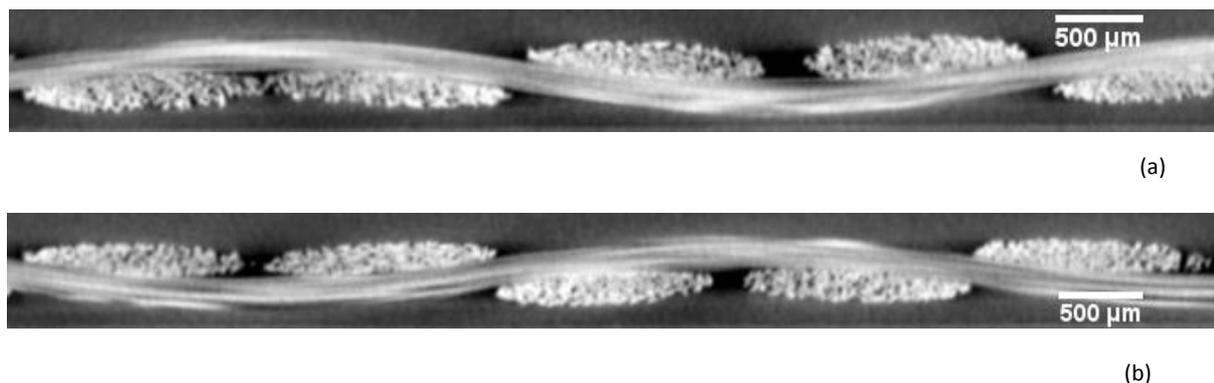


Figure 5-29. Vues en coupe du tissu croisé 2-2 avec des fils en verre E de titrage 300 Tex, obtenues par tomographie X au laboratoire du LaMCoS : (a) coupe chaîne ; (b) coupe trame.

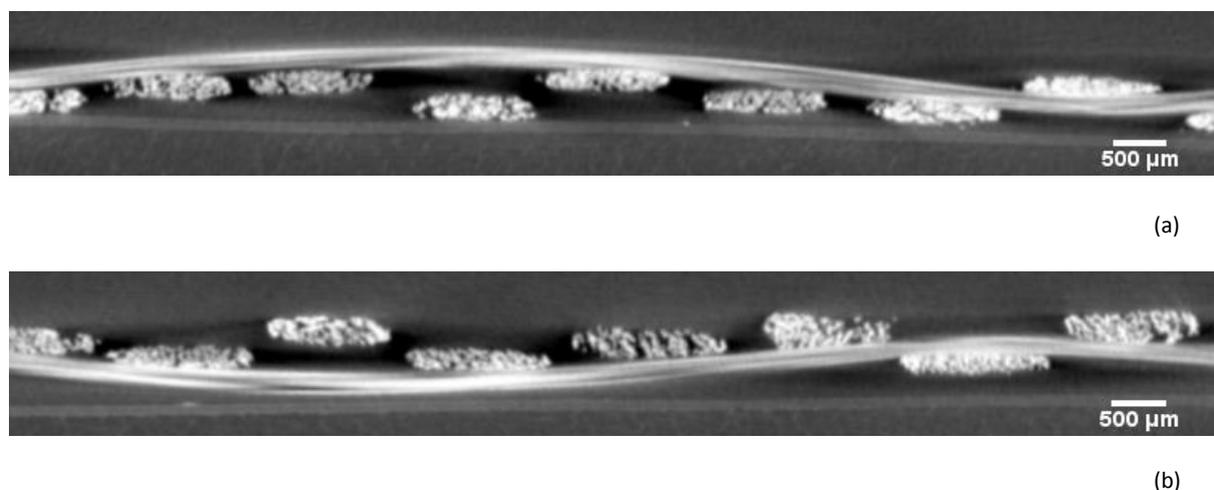


Figure 5-30. Vues en coupe du tissu satin 8 avec des fils en verre E de titrage 300 Tex, obtenues par tomographie X au laboratoire du LaMCoS : (a) coupe chaîne ; (b) coupe trame.

5.5.3.1.2. *Fils de verre E de titrage 900 Tex*

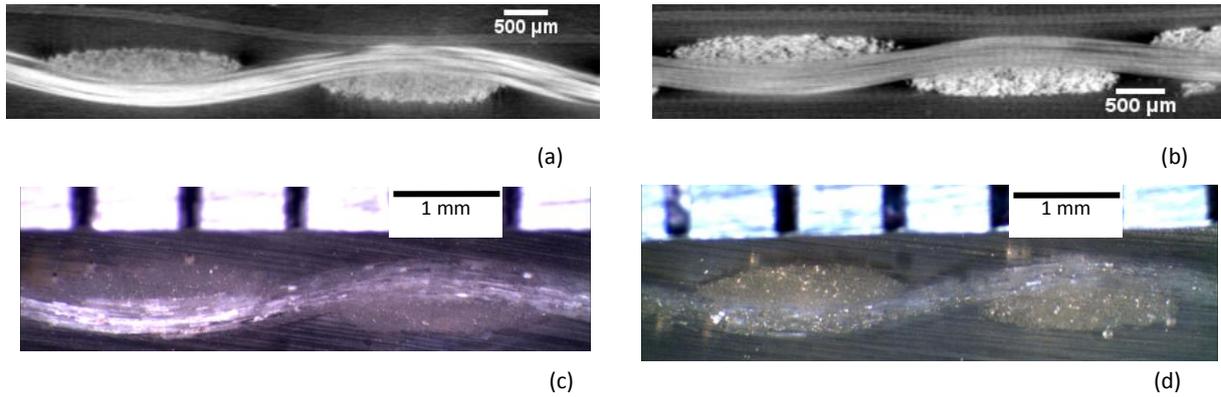


Figure 5-31. Vues en coupe du tissu toile avec des fils de titrage 900 Tex en verre E, obtenues par tomographie X au laboratoire du LaMCoS : (a) coupe chaîne ; (b) coupe trame ; obtenues par résinage des tissus : (c) coupe chaîne ; (d) coupe trame.

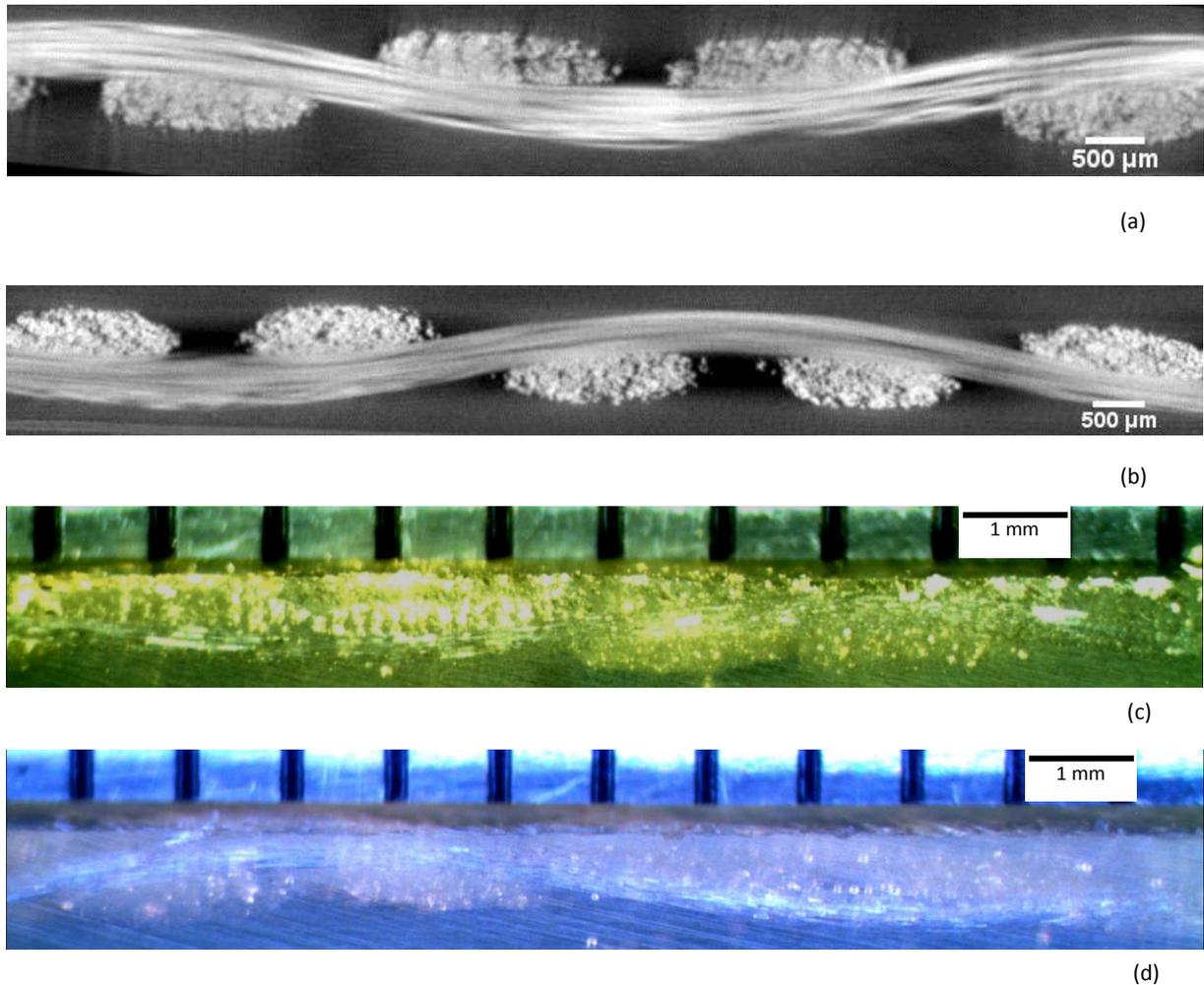


Figure 5-32. Vues en coupe du tissu croisé 2-2 avec des fils de titrage 900 Tex en verre E, obtenues par tomographie X au laboratoire du LAMCOS : (a) coupe chaîne ; (b) coupe trame ; obtenues par résinage des tissus : (c) coupe chaîne ; (d) coupe trame.

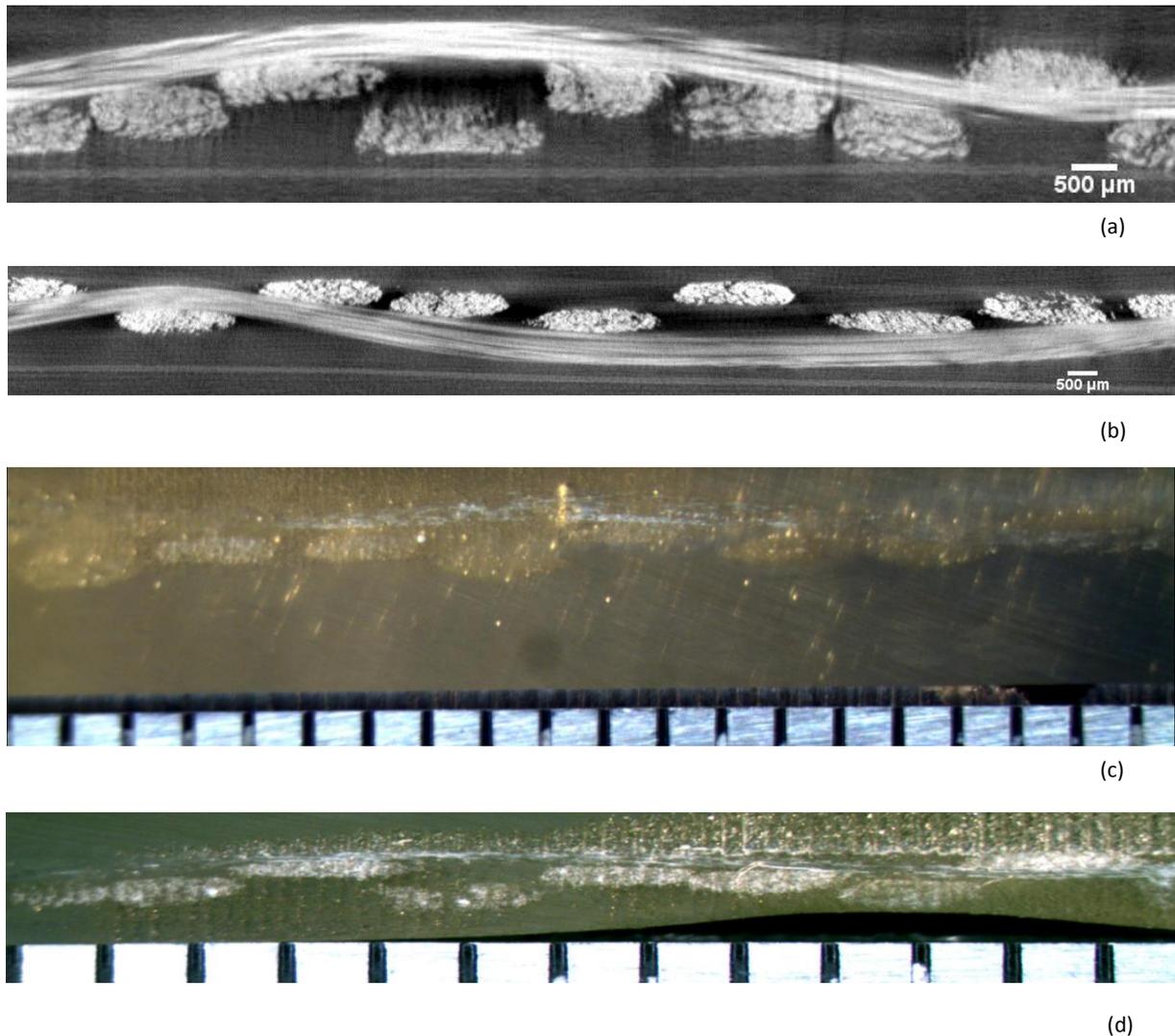


Figure 5-33. Vues en coupe du tissu satin 8 avec des fils de titrage 900 Tex en verre E, obtenues par tomographie X au laboratoire du LaMCoS : (a) coupe chaîne ; (b) coupe trame ; obtenues par résinage des tissus : (c) coupe chaîne ; (d) coupe trame.

On observe des légères différences dans les formes de section entre les tissus tomographiés et les tissus résinés. On peut observer sur la Figure 5-31 que la forme des sections est légèrement plus épaisse (plus arrondie) pour les tissus résinés que pour les tissus tomographiés. Ceci est probablement lié aux effets microscopiques de la viscosité qui ont lieu lorsqu'on ajoute la résine dans le tissu. Les Figure 5-32 et Figure 5-33 révèlent que les images des tissus en verre E résinés sont parfois difficiles à exploiter – difficulté d'obtenir une image nette et contrastée.

5.5.3.2. Tomographies des architectures 3D - fils en verre E de titrage 900 Tex

5.5.3.2.1. Interlock orthogonal liage toile

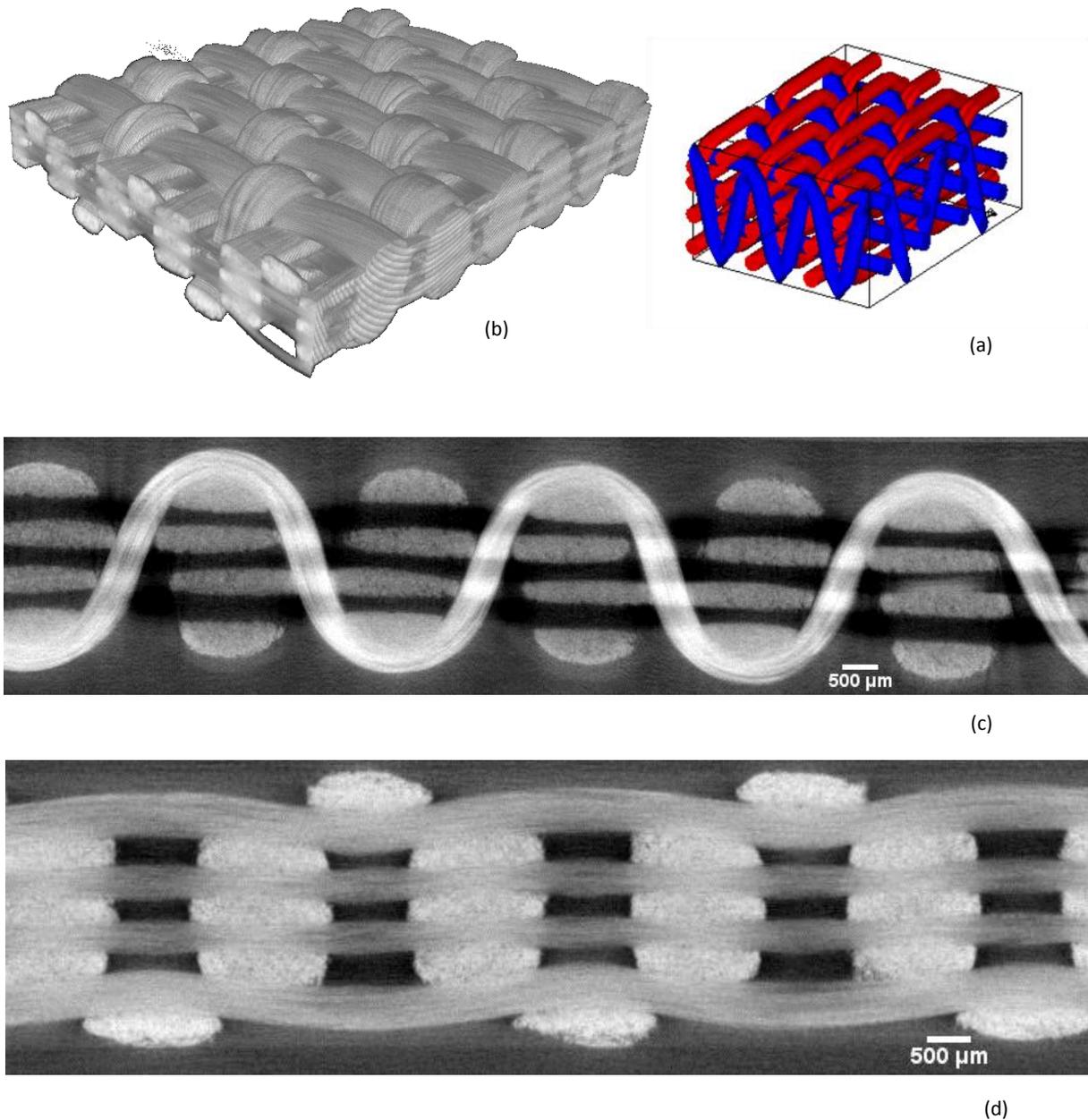


Figure 5-34. Tissu interlock liage toile produit à l'ENSAIT composé de fils en verre E de titrage 900 Tex :
 (a) schéma WiseTex du tissu ; images du tissu réel obtenues par tomographie X au laboratoire du LaMCoS : (b) vue ISO, (c) vue en coupe dans le sens chaîne, (d) vue en coupe dans le sens trame.

La Figure 5-34 montre que l'interlock à liage toile présente des sections de fils de chaîne, se trouvant au niveau des surfaces extérieures, ayant une forme elliptique ; alors que les fils présents dans l'épaisseur du renfort présentent une section quasi-rectangulaire, due aux contacts générés par l'encastrement des fils de renfort au milieu de la structure. En effet, les

Les fils de chaîne ont un placement dans l'espace qui est constant, puisque ces fils sont répartis régulièrement dans les broches du peigne de la machine à tisser. Les colonnes de fils de chaîne sont donc contraintes dans le sens trame, et une tension est appliquée sur ces fils lors du tissage dans la direction de l'épaisseur.

5.5.3.2.2. *Interlock orthogonal liage croisé 2-2*

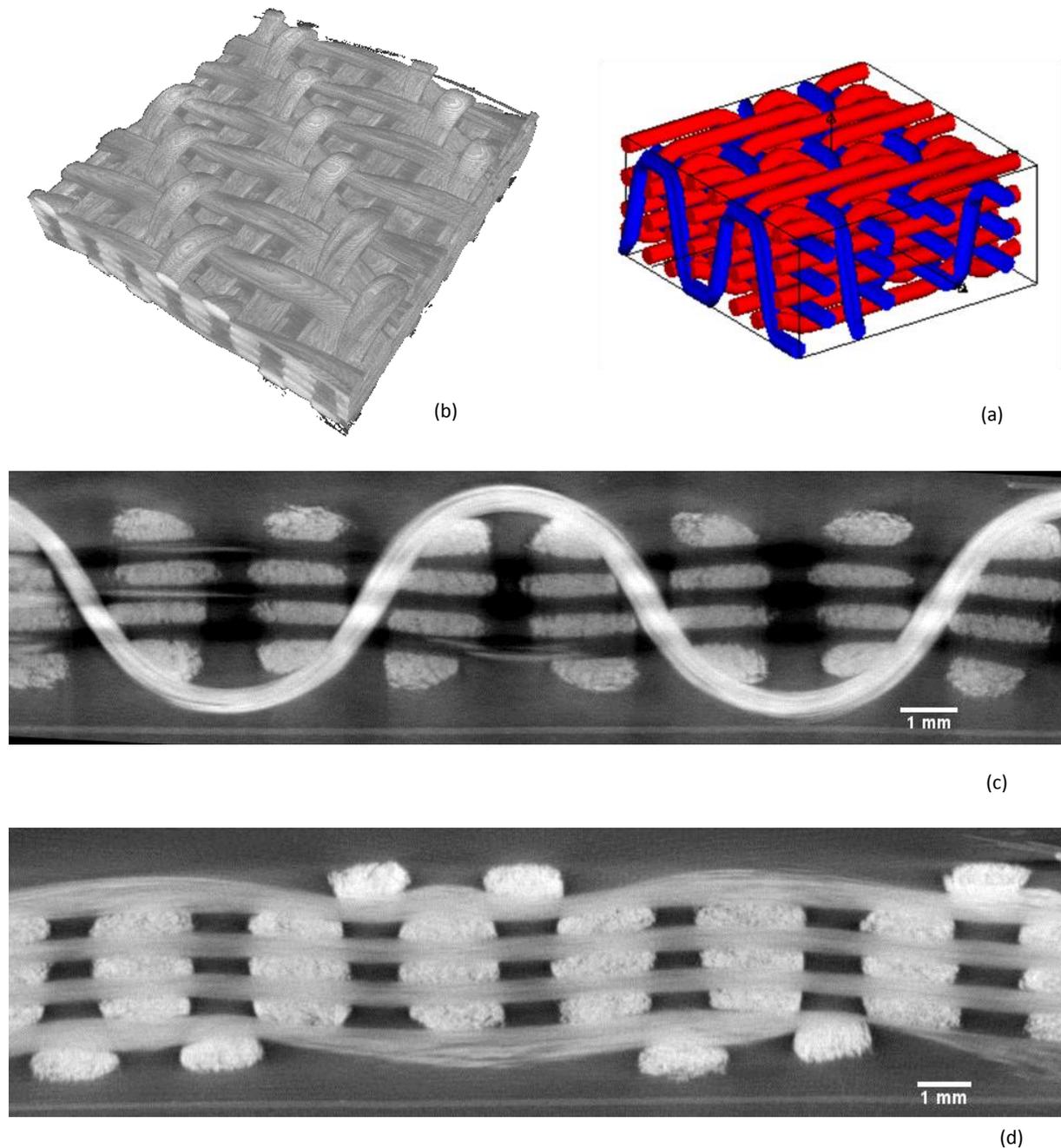


Figure 5-35. Tissu interlock liage croisé 2-2 produit à l'ENSAIT composé de fils en verre E de titrage 900 Tex : (a) schéma WiseTex du tissu ; images du tissu réel obtenues par tomographie X au laboratoire du LaMCoS : (b) vue ISO, (c) vue en coupe dans le sens chaîne, (d) vue en coupe dans le sens trame.

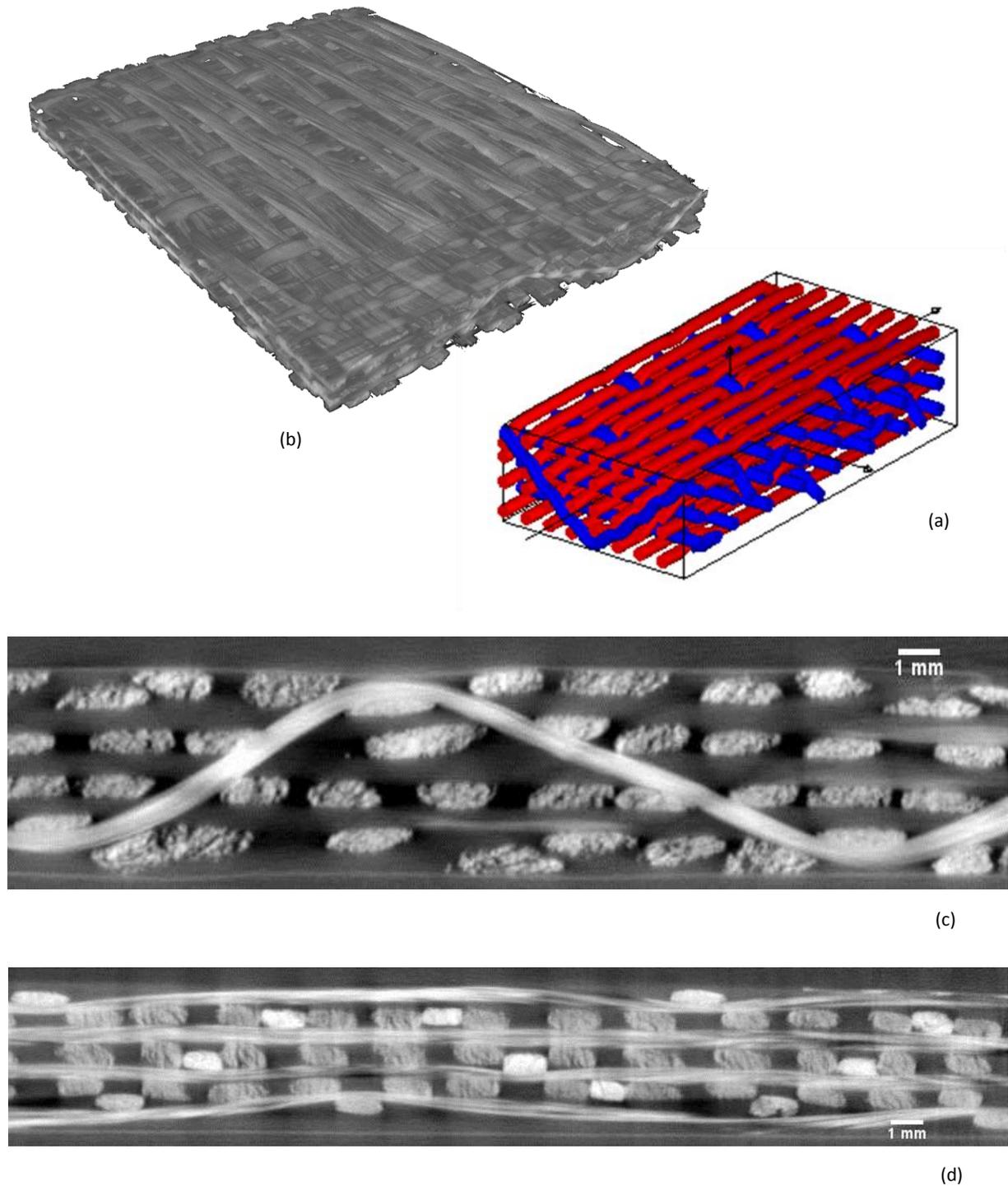


Figure 5-36. Tissu interlock liage satin 8 produit à l'ENSAIT composé de fils en verre E de titrage 900 Tex : (a) schéma WiseTex du tissu ; images du tissu réel obtenues par tomographie X au laboratoire du LaMCoS : (b) vue ISO, (c) vue en coupe dans le sens chaîne, (d) vue en coupe dans le sens trame.

On peut observer sur la Figure 5-36 que le rayon de courbure du fil de liage, lié à son ondulation dans l'épaisseur, est beaucoup plus important pour l'interlock diagonal (ci-dessous) que pour les interlocks orthogonaux (cf. Figure 5-34 et Figure 5-35).

5.5.3.3.1. Analyse des images tomographiques des tissus interlocks

Les Figure 5-34, Figure 5-35 et Figure 5-36 soulignent la complexité des structures tissées interlock, caractérisée notamment par des géométries non triviales. Les sections transverses des fils de chaîne et trame ont des géométries différentes selon l'endroit où ils se trouvent dans la structure. Par ailleurs, on observe que les fils de trame superposés ne restent généralement pas dans le même plan, ou encore qu'un même fil peut avoir une forme de section différente selon sa situation dans le renfort (Figure 5-37). Les sections peuvent être elliptiques, très aplaties ou encore rectangulaires. La géométrie des sections de fil de trame dans un tissu interlock, présentée dans les sections précédentes, est très fortement influencée par l'évolution des fils de chaîne en contact avec eux. Les fils de trame sont insérés avec une légère tension lors du tissage, puis n'en subissent plus lorsqu'ils sont complètement relâchés lors de la fermeture de la foule. Ils ont donc plus de possibilité de se déformer, puisque selon leur placement dans la structure, ils seront en contact avec plus ou moins de fils de chaîne ayant des évolutions différentes, ce qui leur confèrent leur forme atypique (Figure 5-34 (c), Figure 5-35(c) & Figure 5-36 (c)).

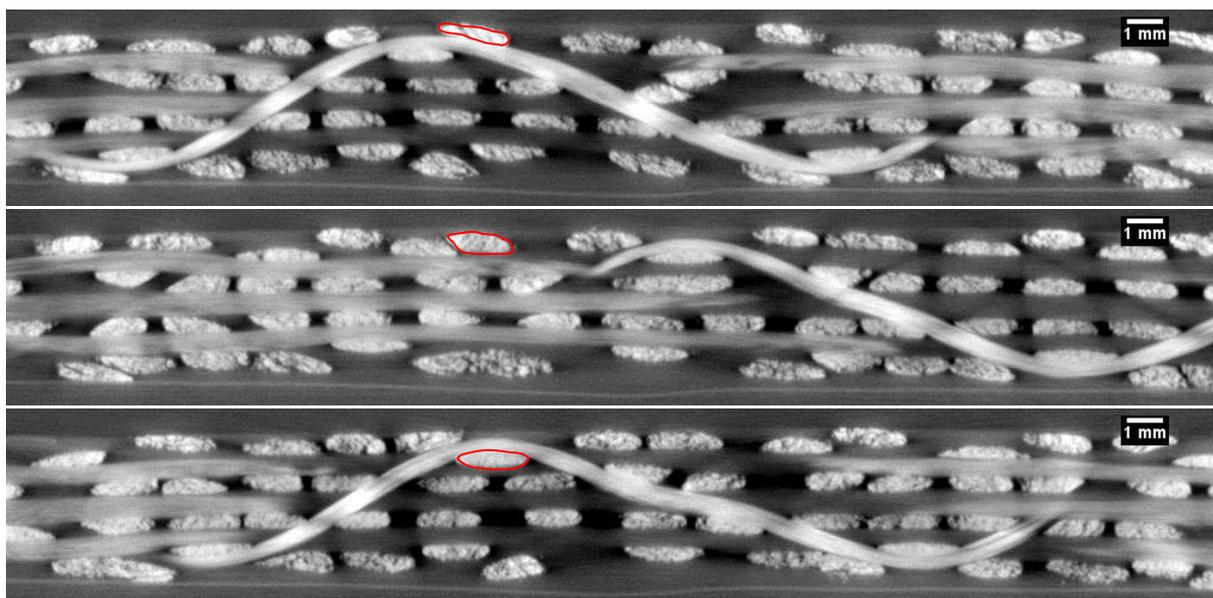


Figure 5-37. Trois Coupes dans des plans successifs de chaîne (interlock diagonal liage satin 8)

La Figure 5-38 permet de comprendre pourquoi l'ensemble des fils de trame présente des géométries si particulières, ceci grâce à la représentation sur la même photo des trois types d'évolution des fils de chaîne – trajectoire quasi-sinusoïdale – d'un motif élémentaire.

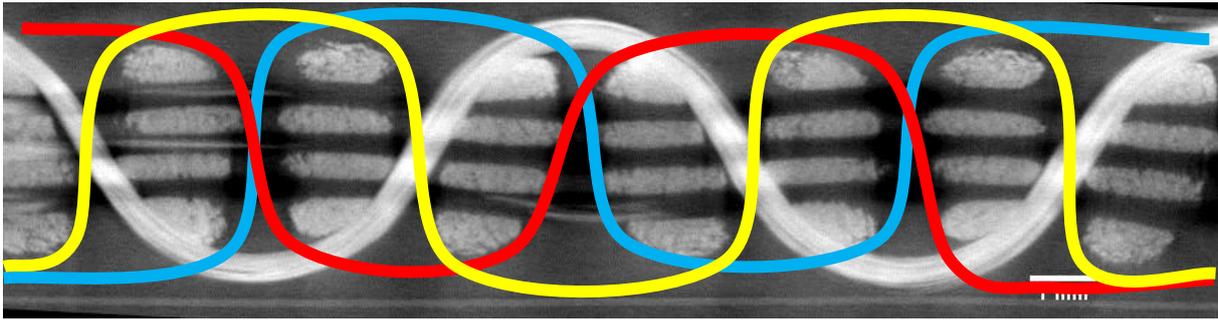


Figure 5-38. Vue en coupe chaîne d'un motif élémentaire de la structure tissée interlock à liage croisé 2-2. avec les quatre types d'évolution des fils de chaîne.

On remarque sur les tomographies des Figure 5-34 (c), Figure 5-35(c) et Figure 5-36 (c) que plus le rayon de courbure du fil de liage chaîne est élevé, plus la forme des sections des fils de trame semble aléatoire. Le tissu interlock diagonal (Figure 5-36 (c)) est celui qui possède des fils de liage ayant le rayon de courbure le plus important. C'est aussi le tissu interlock qui possède les formes de sections de fil de trame les plus aléatoires ; ce qui s'explique peut-être par le fait que les fils de trame sont moins bien maintenus dans l'épaisseur comparé aux deux autres architectures orthogonales (Figure 5-35 (c) et Figure 5-36 (c)).

5.6. Conclusion du chapitre 5

L'observation du procédé de tissage effectué à l'Ensait a permis de mieux appréhender les paramètres à prendre en compte pour la simulation numérique du tissage. Les observations effectuées sur les renforts déformés et sur le fil en tension sur la machine à tisser vont permettre d'alimenter et d'optimiser les simulations abordées au chapitre suivant.

En outre, la comparaison des modèles géométriques de tissus (ici *WiseTex*) avec les micro-tomographies a permis de souligner les limites de ces outils numériques pour la représentation géométrique des tissus 3D (Figure 5-34, Figure 5-35, & Figure 5-36).

Chapitre 6 : Simulation numérique du procédé de tissage

Dans ce chapitre, la modélisation numérique du procédé de tissage au sein de la chaîne numérique NUMTISS est présentée. Dans une première partie on rappelle cette chaîne numérique et les différentes contributions des partenaires. Puis la mise en données de la simulation numérique, réalisée au sein du logiciel Radioss [155], est détaillée. Enfin, la confrontation entre les échantillons réalisés et ceux obtenus à l'aide de la simulation numérique est analysée.

Sommaire du chapitre

6.	SIMULATION NUMÉRIQUE DU PROCÉDÉ DE TISSAGE POUR NUMTISS.....	116
6.1.	LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU PROCÉDÉ DE TISSAGE DANS LA CHAÎNE NUMÉRIQUE NUMTISS.....	116
6.2.	MISE EN DONNÉES DU MODÈLE NUMÉRIQUE	118
6.2.1.	UTILISATION DE <i>RADIOSS</i> EXPLICITE.....	118
6.2.2.	MODÉLISATION DU FIL	118
6.2.3.	CHOIX DU MAILLAGE POUR LE FIL	120
6.2.4.	MODÉLISATION DU PEIGNE, DES LISSES ET DE LA FAUSSE-LISIÈRE	120
6.2.5.	CINÉMATIQUE CHOISIE PAR RAPPORT AU CYCLE DE TISSAGE SUR LA MACHINE À TISSER DORNIER.....	122
6.2.6.	RESTRICTIONS CHOISIES (RÉGLAGE DU MODÈLE NUMÉRIQUE)	123
6.3.	COMPARAISON ENTRE LES ÉCHANTILLONS PRODUITS ET SIMULÉS.....	127
6.3.1.	TISSUS À BASE DE FILS DE 300 TEX.....	128
6.3.1.1.	Simulation d'un tissu d'armure 2D Toile	128
6.3.1.2.	Simulation d'un tissu d'armure croisé 2-2.....	130
6.4.	OUTIL D'AUTOMATISATION DU TISSAGE DÉVELOPPÉ PAR LE CEDREM.....	132
6.5.	CONCLUSION DU CHAPITRE 6	134

6. Simulation numérique du procédé de tissage pour NUMTISS

La contribution de l'ENSAIT dans la chaîne numérique pour le projet NUMTISS, consiste à obtenir la géométrie finale de la structure tissée en reproduisant numériquement la cinématique des principaux éléments de la machine à tisser, qui interviennent dans la formation du tissu. Le choix s'est opéré de travailler dans une approche par éléments finis, avec prise en compte du comportement mécanique des renforts, contrairement aux approches purement cinématiques, et dans un contexte d'un solveur en dynamique explicite. Ces schémas de résolution ayant montrés leurs efficacités lors de la simulation de procédés de fabrication, problèmes dynamiques [15], [86], [109], [131], [156]–[160], très fortement non-linéaires, avec prise en compte du contact. Notons que dans notre cas, la modélisation des fils s'effectue à l'aide d'éléments 3D-volumiques.

6.1. La modélisation numérique du procédé de tissage dans la chaîne numérique NUMTISS

Cette chaîne numérique, représentée Figure 6-1, est répartie de façon complémentaire entre les différents partenaires du projet. Cette répartition des tâches a permis d'identifier les paramètres influant sur la géométrie du renfort fibreux au sein de la structure composite.

L'ENSAIT est en charge de la modélisation numérique de la cinématique du cycle de tissage, associée au mouvement des principaux éléments de la machine à tisser formant le tissu. Suite à l'analyse des images issues de vidéos rapides réalisées chez le partenaire industriel et montrant une zone d'influence du tissage du peigne sur environ 4 fils de trame, il a été décidé de considérer, pour le modèle, un ensemble constitué au minimum de quatre fils de chaîne et de trame.

Dans cette chaîne numérique NUMTISS, le modèle développé par l'ENSAIT dans l'environnement du logiciel *Radioss*[®] doit fournir des informations, en termes de coordonnées des nœuds et de connectivités des éléments, décrivant la structure tissée numériquement, en tant que données d'entrée au modèle éléments finis du LaMCos. Le LaMCoS développe des lois de comportement spécifiques au milieu fibreux (par le biais de loi matériau UMAT dans le logiciel *Abaqus*[®]) permettant de calculer la déformabilité de cette structure tissée, sous les sollicitations classiques. Cette structure déformée est transférée, en termes de coordonnées de nœuds et de connectivités entre les éléments, à l'Ecole des Mines de Douai (cf. Figure 6-2), dont le rôle est de calculer les quantités associées (profil de déformation après remplissage, hauteur en fonction du temps d'infusion, profils de pression, temps de remplissage, etc.) au procédé d'imprégnation de la structure tissée pour obtenir la pièce composite finale. Pour cette tâche, l'Ecole des Mines de Douai utilise le logiciel *Comsol* associé au logiciel *Matlab*.

Associé à ces développements numériques propres à la chaîne numérique NUMTISS, le LaMCos a associé de la caractérisation expérimentale du comportement, à l'échelle du fil à base de filament en verre. A cette échelle, cette identification a concerné le comportement en

traction dans le sens des fibres, le comportement en flexion sur la longueur d'un fil et le comportement en cisaillement transverse. Une étude réalisée sur un banc de test spécifique a permis également de mesurer le frottement entre fils positionnés dans différentes directions, pour identifier les valeurs du coefficient de frottement de Coulomb, et ainsi renseigner la loi de comportement global du renfort fibreux.

L'EMD a développé un modèle analytique et numérique du procédé d'infusion adapté aux structures tissées 2D. Ce modèle permet d'apporter des précisions sur les déformations occasionnées sur la géométrie finale du renfort fibreux au sein de la structure composite. Un modèle continu a permis de relier : la vitesse d'écoulement fluide au changement de pression exercée sur le renforcement fibreux, et la modification résultante de l'épaisseur de la préforme fibreuse obtenue au cours du processus d'imprégnation et observé à l'échelle macroscopique. Des mesures expérimentales ont été réalisées sur les différents tissus du projet pour mesurer la progression de l'écoulement fluide, la redistribution de la pression et la déformation au travers de l'épaisseur durant l'infusion de la résine.

Cette démarche est appliquée à la modélisation des structures tissées 2D dans un premier temps.

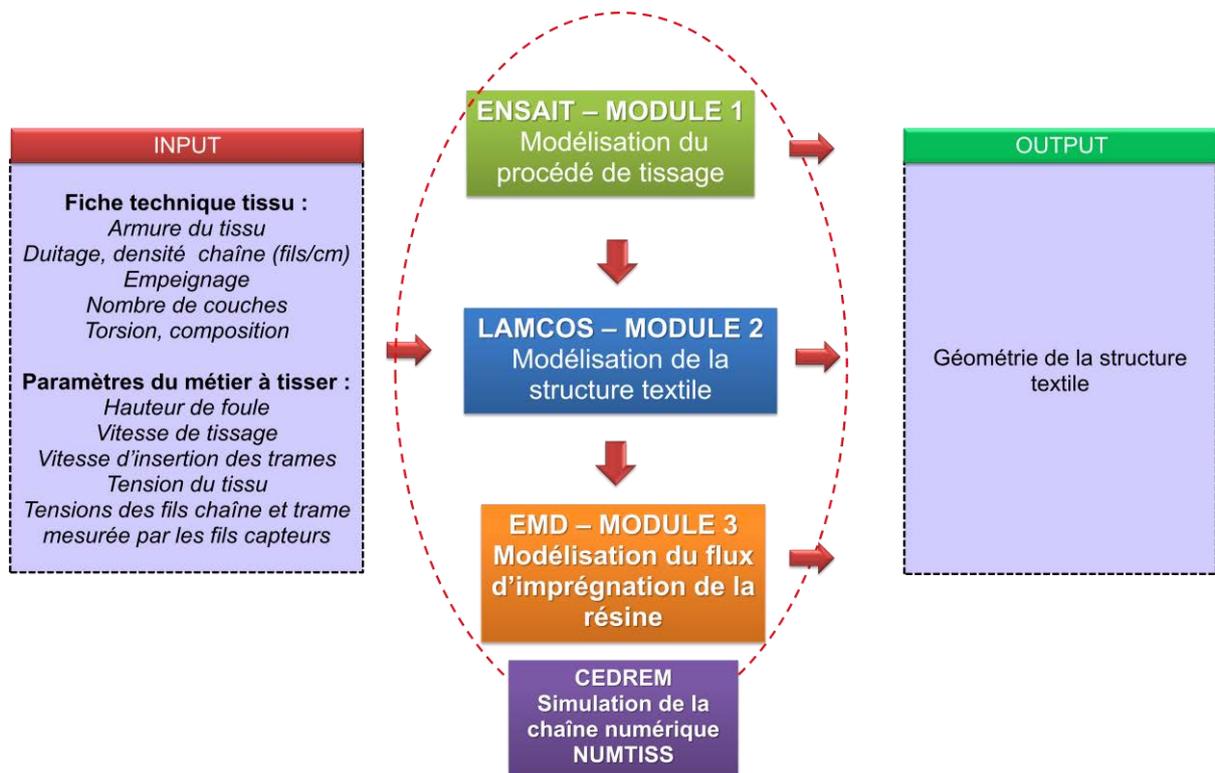


Figure 6-1. Organisation des actions de modélisation et simulation de la chaîne numérique NUMTISS.

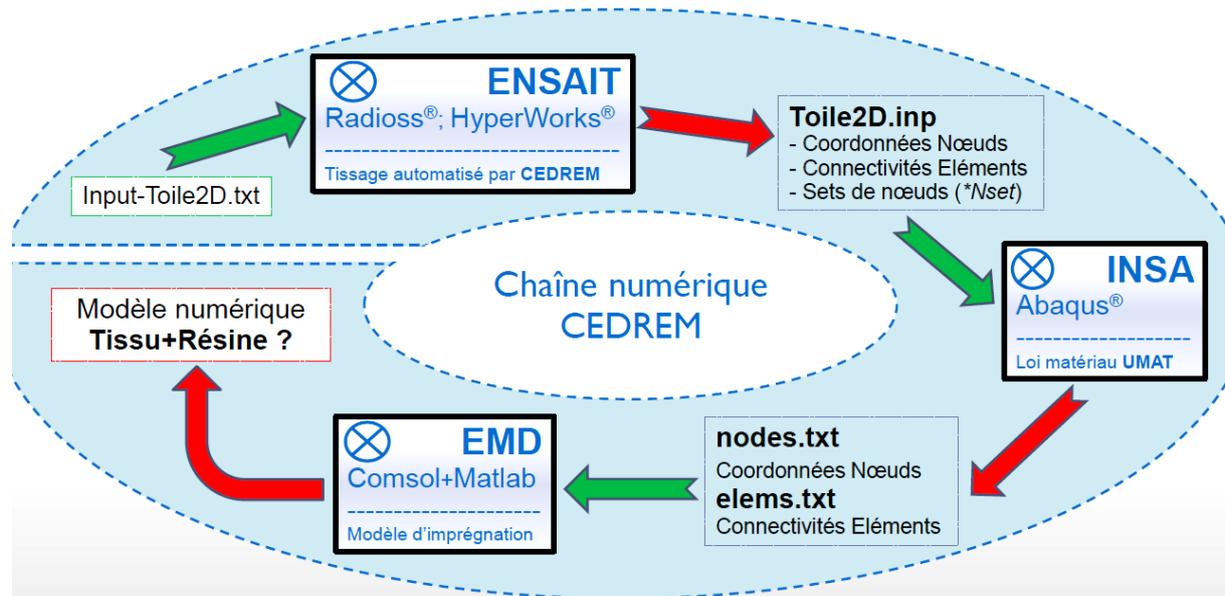


Figure 6-2. Chaîne numérique "ENSAIT-INSA-EMD".

6.2. Mise en données du modèle numérique

6.2.1. Utilisation de *Radioss* explicite

Les simulations des procédés de fabrication et de mise en forme des renforts fibreux (problèmes dynamiques, non linéaires, avec contact) sont la plupart du temps menées grâce à un code de calcul explicite, l'emportant ainsi par rapport aux méthodes implicites dans ce domaine [161], [162]. Bien que la stabilité des schémas explicites soit conditionnée au pas de temps [3], [68], [163], le traitement de l'ensemble des non-linéarités et du contact est plus simple. Comme l'un des objectifs souhaités de l'outil numérique est de reproduire l'entrecroisement des fils lors du procédé de tissage ; les simulations seront conduites avec le solveur explicite du logiciel élément fini *Radioss* [155].

6.2.2. Modélisation du fil

Les simulations réalisées se sont focalisées sur des tissus à base de fils en verre E de titrage de 300 Tex ($\rho = 2.6 \text{ g/cm}^3$) retordus à 25 tours /m. Bien que les fils soient constitués d'un nombre important de filaments en contact, contrairement à d'autres approches [107], [108], [164], [165], nous n'avons pas modélisé au sein de cette section l'ensemble de ces filaments, à l'instar d'autres auteurs [56], [119], [166], [167]. Par conséquent nous avons considéré une section continue du fil. Comme montré dans la section 5.5.1 du chapitre précédent, la section transverse du fil situé à mi-chemin entre les lisses et le peigne est globalement de forme circulaire (diamètre moyen de 0.6 mm). Concernant la loi de comportement du matériau, dans cette modélisation 3D-volumique, le choix s'est porté sur une loi de comportement isotrope transverse [56], [119], [166]–[168].

Ci-dessous la loi de comportement orthotrope utilisée :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

Avec E_{11} , E_{22} , E_{33} , ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , G_{12} , G_{13} et G_{23} qui sont respectivement les modules de Young, les coefficients de Poisson et le module de cisaillement du matériau constituant le fil.

ε_{ij} et σ_{ij} représentent les solutions des champs de contrainte et de déformation à l'intérieur des fils.

Etant donné que le fil est isotrope transverse, on obtient donc par simplification :

$$E_{22} = E_{33}, \nu_{12} = \nu_{13}, G_{12} \approx G_{13}$$

Les propriétés élastiques utilisées pour le fil sont résumées dans le Tableau 6-1 ci-dessous, avec le repère matériau associé qui est celui de la Figure 6-3. Une partie de ces valeurs (E_{11} , ν_{12} et ν_{13}) sont issues de la littérature [97], [169]. La valeur de ν_{23} a été prise à zéro dans un premier temps, puis a été affinée par la suite dans le but d'augmenter la déformation transverse du fil, et de recoller le plus possible avec la section du fil réel. Pareillement, les modules de Young transverses E_{22} et E_{33} ont été affinés (diminués) pour pouvoir augmenter la déformation transverse du fil. Comme abordé dans une section ultérieure, un tel choix a mené à des résultats assez satisfaisants pour les échantillons tissés.

E11 (MPa)	E22,E33 (MPa)	G23, G31 (MPa)	G12 (MPa)	ν_{12}, ν_{13}	ν_{23}
52500 [97]	0.6	250	200	0 [169]	0.99

Tableau 6-1. Paramètres élastiques de la loi de comportement isotrope transverse.

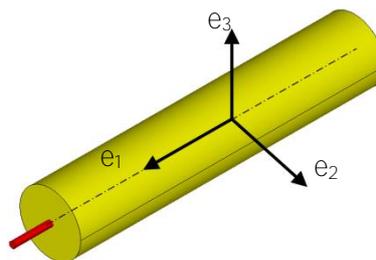


Figure 6-3. Repère matériau lié aux fils.

6.2.3. Choix du maillage pour le fil

Des éléments hexaédriques 8 nœuds ont été choisis pour le maillage des fils; ce qui facilite le suivi des contacts. Un bon compromis entre le temps CPU et une description géométrique représentative de l'écrasement des sections transverses, lors de l'entrelacement entre les chaînes et les trames, a été obtenu en maillant les sections transverses avec 16 éléments.

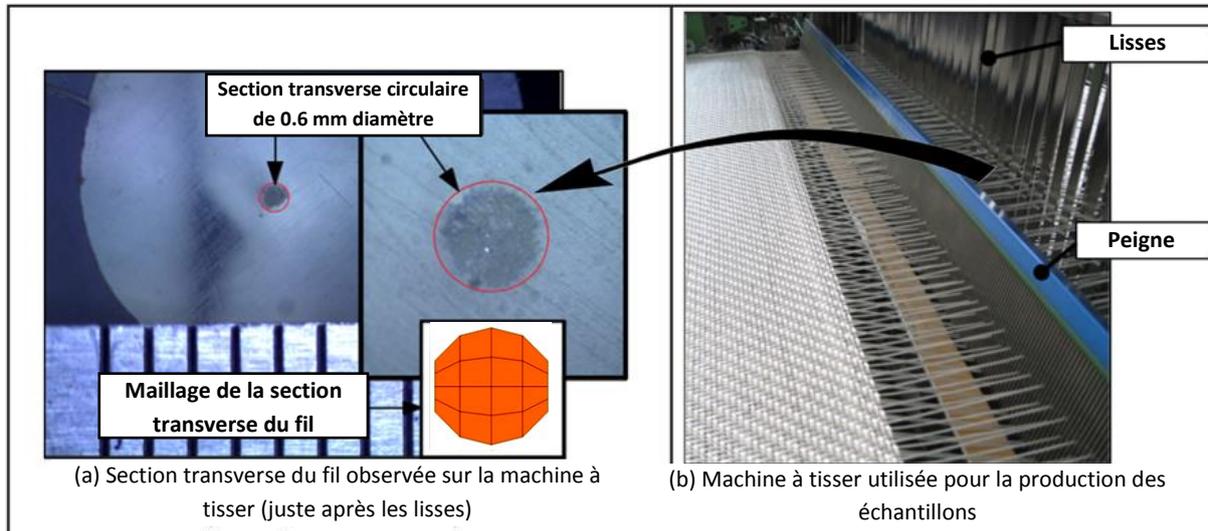


Figure 6-4. (a) Section transversale du fil réel et maillé.

- *Loi de contact et de frottement*

Les interfaces de contact choisies pour la simulation étaient de type maître-esclave. Pour la simulation du tassage par le peigne, on considère que la surface du peigne est maître et que les nœuds du fil de trame sont esclaves. Les contacts entre les fils étaient des contacts entre des corps déformables. Le frottement entre les fils a été représenté grâce à une loi de Coulomb avec un coefficient de 0.3 [170], alors que le contact entre le peigne (élément mécanique de la machine à tisser) et le fil de trame a été représenté avec un coefficient de frottement de 0.1.

6.2.4. Modélisation du peigne, des lisses et de la fausse-lisière

Le peigne a été modélisé par une surface maillée avec 8 éléments quadrilatéraux sur deux rangées (dans le cas du modèle de la Figure 6-5), avec des propriétés en acier.

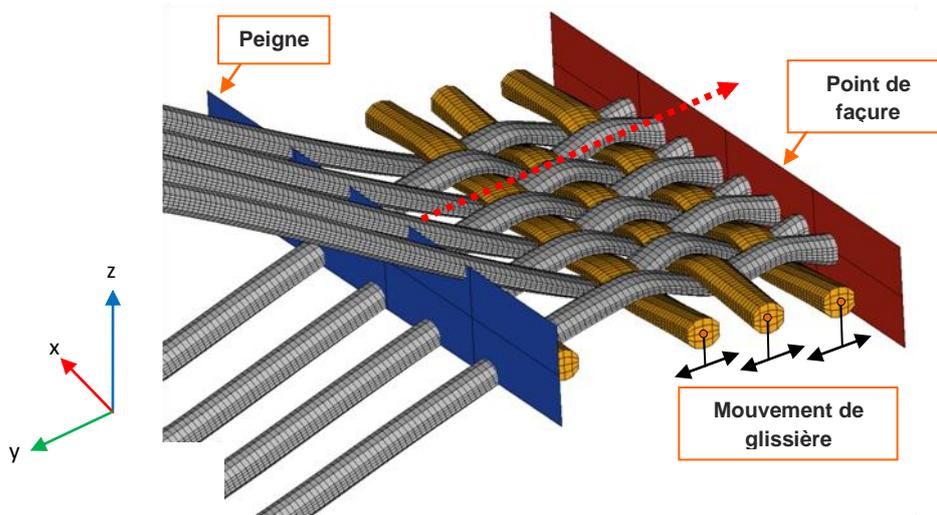


Figure 6-5. Configuration de la zone d'entrelacement des fils de chaîne et trame.

Un déplacement horizontal périodique (selon y , Figure 6-5) est imposé aux nœuds des éléments du peigne pour reproduire le tassage de la duite. De plus, une observation de l'insertion du fil de trame menée avec une caméra rapide (Figure 5-6) révèle que la zone d'influence du peigne, lors du tassage, s'étend sur seulement quatre fils de trame. Au-delà de cette zone, le fil n'est pas affecté. Un choix convenable consiste à modéliser le point de façure (Figure 6-5) par une plaque rigide fixée sur les fils de chaîne, et qui arrête la première trame insérée lorsque le peigne tasse celle-ci. Ainsi, la simulation du procédé de tissage est supposée se stabiliser au bout de quelques insertions de fils de trame, ce qui sera montré ultérieurement.

Les lisses ne sont pas modélisées en tant qu'éléments mécaniques indépendants, mais l'étoffe finale est obtenue en imposant la séquence de déplacement vertical des lisses sur des ensembles de nœuds situés sur les fils de chaîne (Figure 6-6). La hauteur de la foule dans le modèle numérique était de 10 mm, au lieu de 70 mm sur la machine à tisser réelle. La hauteur de la foule a été volontairement diminuée dans le modèle numérique, car sinon il aurait fallu une longueur de fils de chaîne trop importante pour pouvoir garder un angle de foule raisonnable.

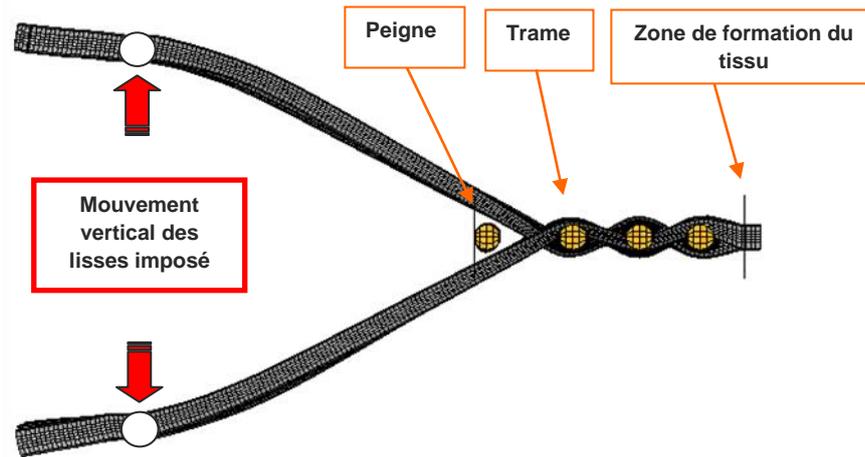


Figure 6-6. Configuration cinématique pour produire un tissu 2D toile.

- *Conditions limites*

L'action de la fausse-lisière qui sert à maintenir le fil de trame quand il est tassé par le peigne, ainsi que les fils de chaîne utilisés en liage de type "pas-de-gaze" qui sert à consolider les bords du tissu (cf. section 5.1), ont été simulés en contraignant les nœuds des extrémités des fils de trame à un mouvement de type glissière, colinéaire au déplacement du peigne (Figure 6-5).

6.2.5. Cinématique choisie par rapport au cycle de tissage sur la machine à tisser Dornier

Le cycle de tissage sur la machine à tisser Dornier est décrit dans le chapitre précédent (section 5.3.3). La cinématique du procédé de tissage dans la simulation numérique est inspirée de celle existant sur la machine à tisser industrielle Dornier[®] (cf. section 5.1). Le cycle de tissage typique qui dure $T_c = 600$ ms, pour une vitesse angulaire d'arbre moteur de 100 tr/min (i.e. 100 coups de peigne par minute) est présenté à la Figure 6-7. Comme on a choisi de ne pas prendre en compte les vitesses de déformation dans la loi de comportement du fil, les essais numériques n'ont pas montré de changements importants de la géométrie finale résultante des tissus lorsque la durée du cycle chute à 1.5 ms. Cette astuce a permis de diminuer considérablement le temps de calcul. Par exemple, le temps de calcul est descendu à environ 24 heures (avec 16 CPUs à 2.7 GHz) pour modéliser la production du tissu constitué de huit fils de chaîne et de quatre fils de trame, alors qu'il est d'environ un mois lorsqu'on simule le tissage à la vitesse réelle de la machine à tisser. Ce point spécifique sera traité dans la section 6.2.6.

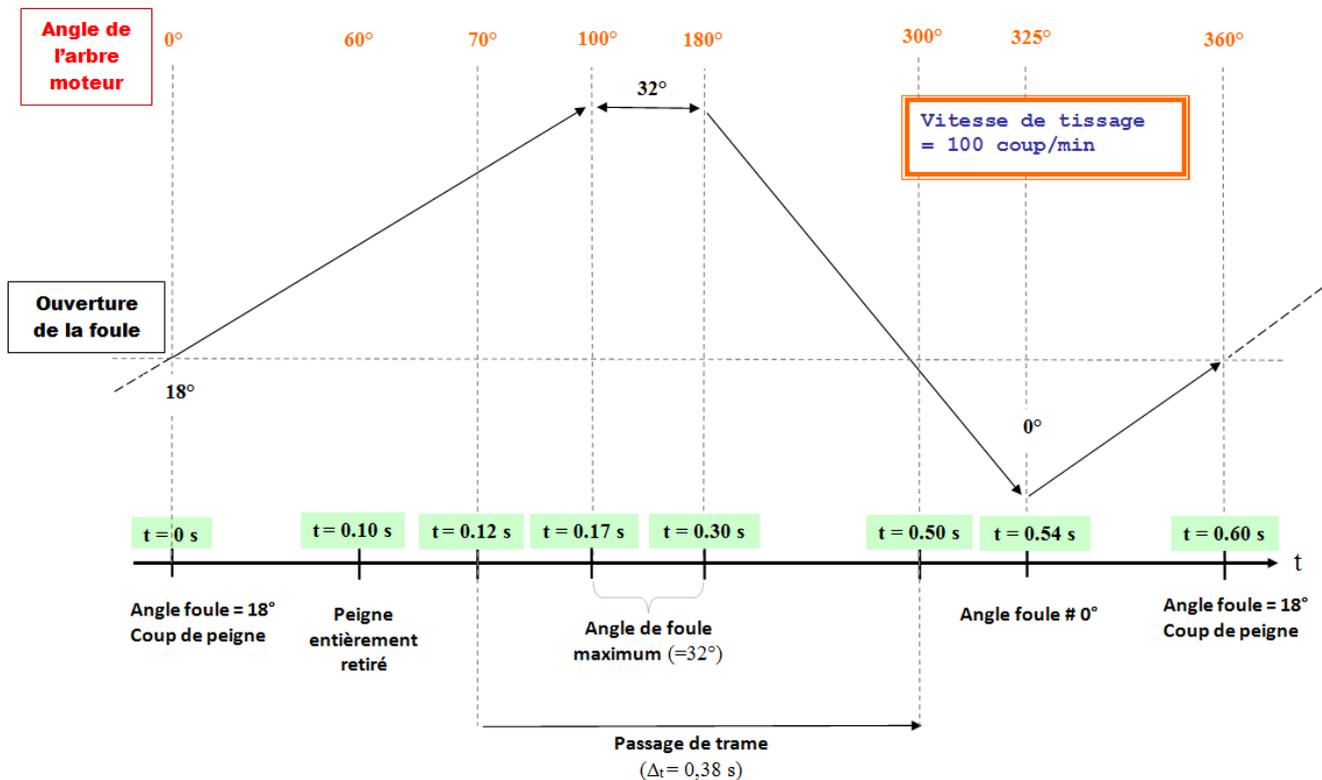


Figure 6-7. Un cycle de tissage sur la machine à tisser Dornier®.

6.2.6. Restrictions choisies (réglage du modèle numérique)

Dans cette section, les tests numériques préliminaires permettant d'affiner la simulation sont présentés.

- *Effet du temps de cycle.*

Dans ces premiers tests, un entrelacement des fils élémentaires impliquant trois fils de chaînes et un fil de trame (Figure 6-8 (a)) a été simulé pour différentes durées de cycle, à savoir : $T_c = 600$ ms (la durée du cycle sur la machine à tisser, cf. section 6.2.5), $T_c = 60$ ms et $T_c = 1.5$ ms. Plusieurs plans de coupe réalisés sur l'échantillon de tissu simulé – orthogonaux aux directions chaîne et trame (Figure 6-8 (b)) – révèlent qu'il n'y a aucun changement dans les contextures. Ces résultats s'expliquent par la loi de comportement du fil choisi – qui ne dépend pas des vitesses de déformation – et de la faible masse volumique des fils générant de très faibles quantités d'accélération. Quand T_c descend en-dessous de 10 ms, les fils se trouvent soumis à un phénomène vibratoire excessif qui peut être facilement atténué – sous réserve que $T_c \geq 1.5$ ms – par l'utilisation d'un filtre passe-bas. Le fait de diminuer la durée du cycle à 1.5 ms permet de réduire les temps de calcul CPU de manière considérable, et rend possible l'étude d'échantillons plus grands malgré le temps de calcul plus important exigé en schéma explicite. Par comparaison, lorsqu'une semaine de calcul est requise pour reproduire

l'entrelacement des fils de chaîne et trame selon un liage de type toile, il faut seulement trois heures pour reproduire ce même entrelacement à vitesse accélérée.

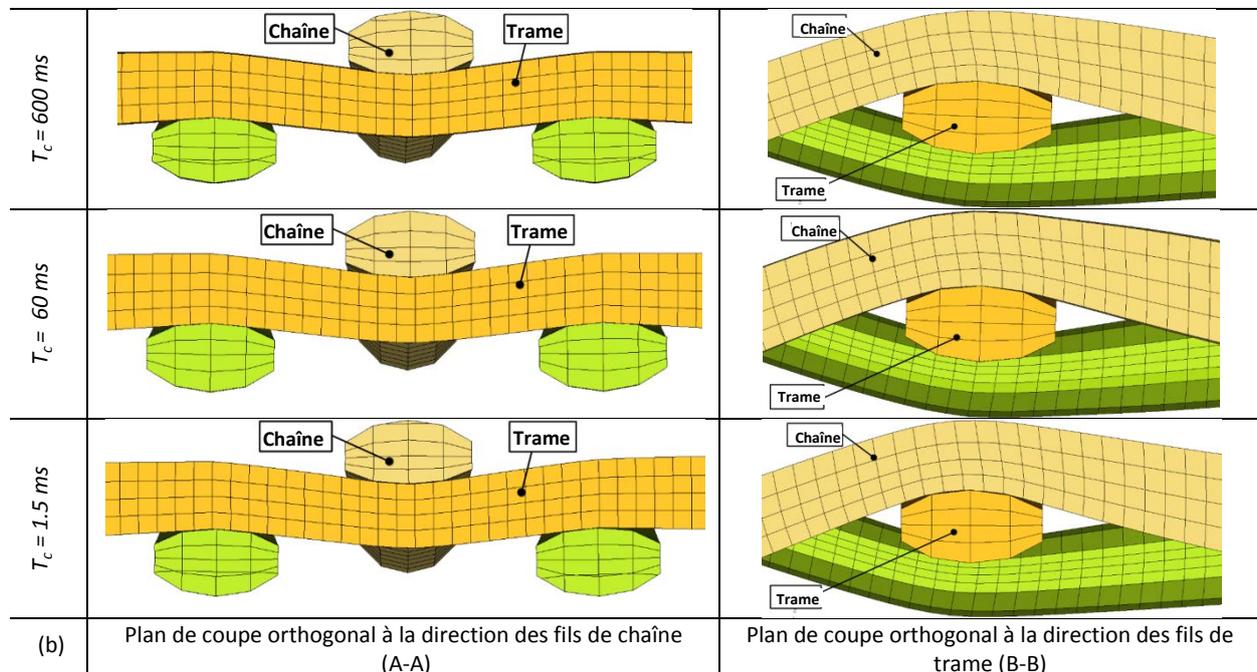
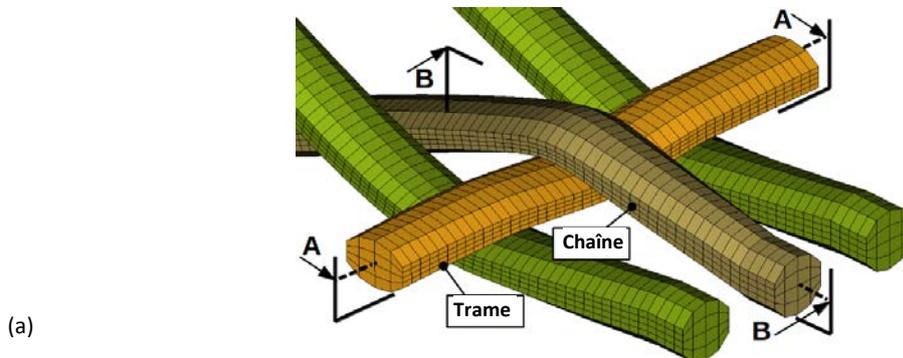


Figure 6-8. Effet de la durée du cycle de tissage : (a) entrelacement élémentaire utilisé pour les tests ; (b) contexture inchangé pour différentes vitesses de tissage.

- *Choix de la taille du VER et stabilisation du procédé de tissage*

Dans cette section, un échantillon de tissu comportant un nombre suffisant de fils de chaîne et de trame est identifié. Cet échantillon représentatif est désigné comme un Volume Élémentaire Représentatif (VER) du tissu en cours de formation. Les résultats suivants ont été conduits sur un tissu en armure toile composée de huit fils de chaîne et huit fils de trame.

En raison des propriétés périodiques du tissu le long du peigne (plus précisément suivant la direction des fils de trame, Figure 6-4 (b)), un nombre de fils de chaîne formant au moins une période d'armure peut être choisi. Le plan de coupe réalisé le long d'un fil de trame à la Figure 6-9 (a), souligne, près de la section transverse située aux extrémités du fil de trame – ce qui

correspond à la lisière du tissu (modélisée par une liaison glissière) – une couche limite impliquant deux fils de chaîne (rebut). Au-delà de cette limite, la forme du fil de trame reste inchangée. En d'autres termes, on doit ajouter aux extrémités des fils de trame des "lisières" (rebutées), comprenant deux fils de chaîne.

Etant donné qu'une plaque rigide a été substituée au point de façade dans la direction chaîne (Figure 6-5), il est donc nécessaire d'ajouter une valeur seuil d'insertion des trames au-delà de laquelle le tissu reste inchangé. Sur la Figure 6-9, une couche limite impliquant deux fils de trame semble être une estimation suffisante, les deux premiers fils de trame insérés seront donc rebutés.

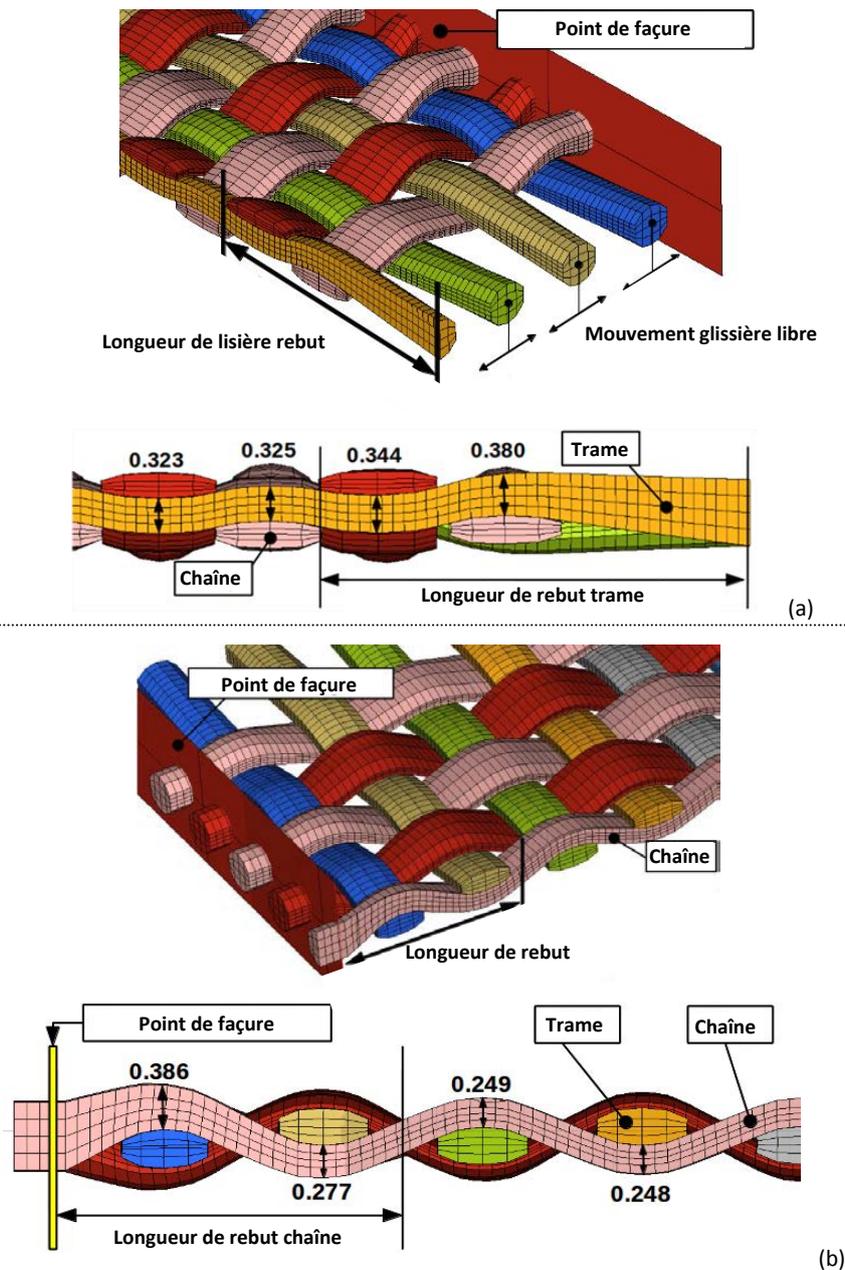


Figure 6-9. Les rebuts de fils (longueur en mm) : (a) rebut trame ; (b) rebut chaîne.

- *Ajustement des valeurs des caractéristiques matériaux*

Prélevés sur la machine à tisser (juste après les lisses), les sections transverses des fils sont quasi-circulaires (section 5.5, Figure 5-23). Une fois que le procédé de tissage est achevé, on observe sur la coupe de la Figure 6-10 (b) que la section transverse du fil est dans l'ensemble quasi-elliptique. Les premières simulations, menées sur un tissu d'armure toile avec les paramètres élastiques isotropes transverses pris dans la littérature [97], [169] (Figure 6-10 (e)), ont montré un étalement insuffisant du matériau le long de l'axe principal de l'ellipse de la section transverse du fil simulé (i. e. la direction qui est orthogonale aux forces d'écrasement des fils, Figure 6-10(a)), comparé à la valeur moyenne obtenue d'après les plans de coupe effectués sur plusieurs échantillons résinés (Figure 6-10 (b)). Dans une base orthonormée (e_1, e_2, e_3) liée à un fil (Figure 6-10 (d)) – avec e_1 dirigé le long du fil, et (e_2, e_3) situés dans le plan transverse du fil – de nombreux essais numériques ont souligné qu'un simple ajustement de la valeur du coefficient de poisson ν_{23} ($-\nu_{23} = \frac{\text{petites déformations selon } e_3}{\text{petites déformations selon } e_2}$), avec $\nu_{23} = 0.9$, est suffisant pour être en adéquation avec les propriétés intrinsèques du fil provoquant l'étalement du multi-filament comme représenté Figure 6-10 (c) (pour des raisons physiques, ν_{23} ne peut pas dépasser la valeur 1).

Il faut noter que la comparaison entre les sections transverses des échantillons résinés et celles obtenues par la simulation doit être prise avec du recul, vu que les éléments hexaédriques choisis conduisent inévitablement à des ellipses tronquées.

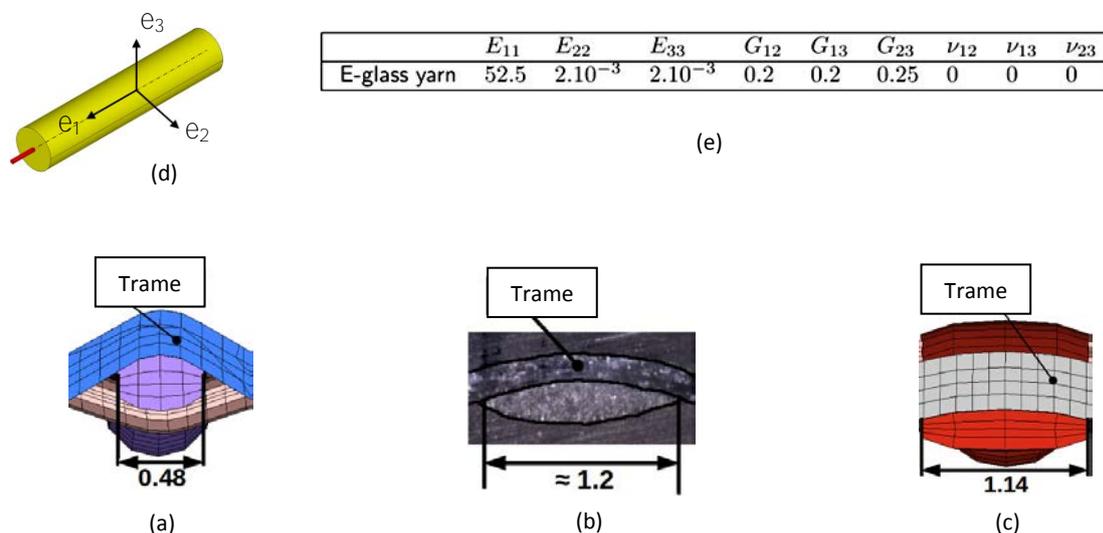


Figure 6-10. Effet du coefficient de poisson ν_{23} sur l'écrasement du fil (longueur en mm) : (a) plan de coupe orthogonal à la direction du fil de chaîne, (b) échantillon de fil résiné (valeur moyenne), (c) plan de coupe orthogonal à la direction du fil de chaîne avec $\nu_{23} = 0.9$; (d) repère matériau lié aux fils ; (e) paramètres élastiques de la loi de comportement isotrope transverse (unité de pression : GPa).

6.3. Comparaison entre les échantillons produits et simulés

Les captures d'écran de la Figure 6-11 donnent une vue d'ensemble de quelques étapes clés de la production correspondant à la simulation de l'insertion d'une nouvelle trame – à comparer avec les images de la vidéo rapide (Figure 5-6). Ces étapes incluent : l'ouverture de la foule (Figure 6-11 (b)) qui maintient fermement la dernière trame insérée contre le tissu, le peigne qui tasse et compacte le fil de trame additionnel contre le point de façure (Figure 6-11 (c)), et le mouvement inversé des lisses (Figure 6-11 (d)) assurant le maintien de la nouvelle trame insérée (procédure de tissage dit en foule ouverte). Dans le but de gagner davantage de temps de calcul, l'insertion du fil de trame qui engendre de grands mouvements de corps rigides (et nécessite ce faisant un nombre considérable de pas de temps) n'a pas été modélisée. Une astuce efficace, représentée sur la Figure 6-11 (a), consiste à mettre en place le nombre désiré de couples "fil de trame/peigne" au début de la simulation, avant tout déplacement. Chaque peigne peut entrer en collision avec son fil de trame associé. Ensuite, le séquençage du mouvement de peigne est activé de telle sorte à imiter le phénomène de compaction du peigne sur la machine à tisser.

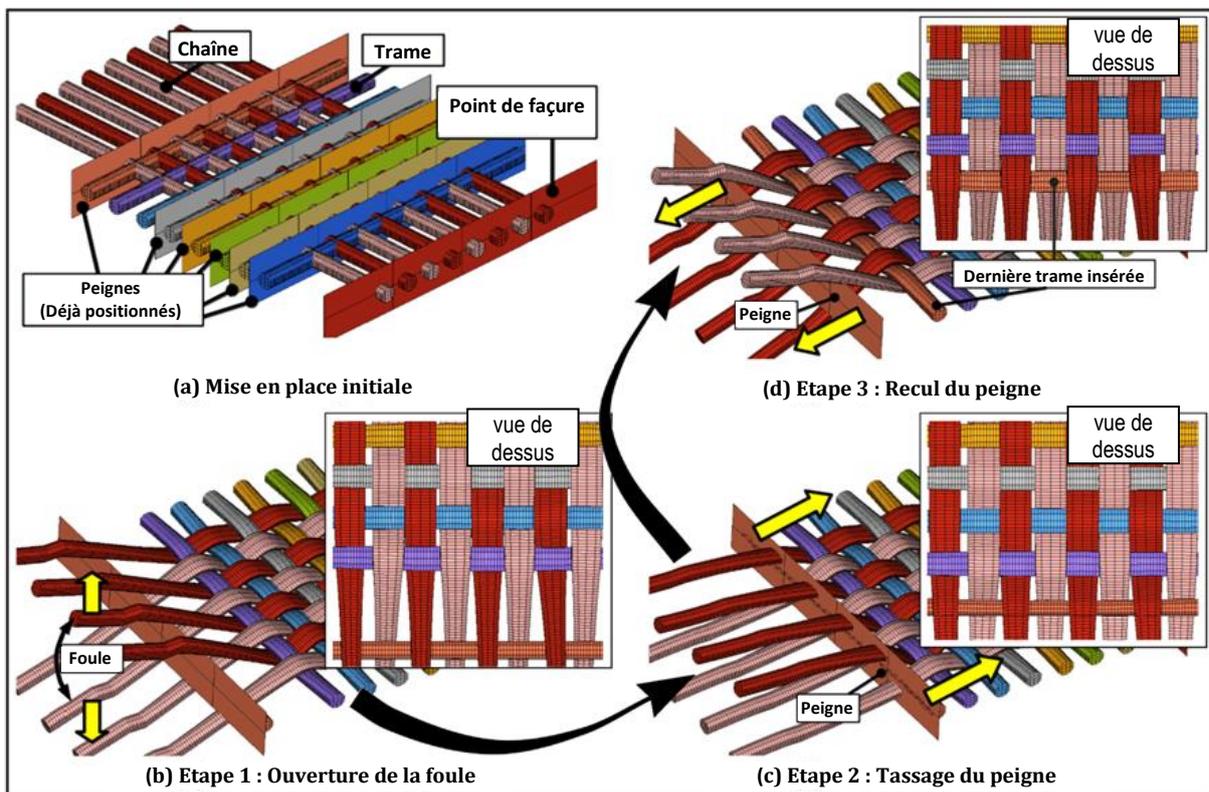


Figure 6-11. Etapes clés de la production simulées.

La section suivante est dédiée à la comparaison entre les échantillons de tissus simulés et ceux produits dans notre atelier du tissage, avec la machine à tisser Dornier[®] décrite dans le chapitre précédent.

6.3.1. Tissus à base de fils de 300 Tex

6.3.1.1. Simulation d'un tissu d'armure 2D Toile

Assez loin des couches limites – c'est-à-dire des rebuts aux lisières du tissu –, la Figure 6-12 (a) représente un VER (volume élémentaire représentatif) d'une structure toile tissée numériquement, à l'aide de l'outil de modélisation présenté précédemment. Cet échantillon a été transmis au partenaire LaMCoS comme configuration de référence dans un calcul d'homogénéisation afin d'y insérer la loi de comportement développée spécifiquement.

Les résultats de la Figure 6-12 (c) et de la Figure 6-13 mettent en valeur la cohérence géométrique entre les résultats du VER numérique obtenus et les échantillons produits résinés à travers des critères simples de comparaison incluant la forme de la section transversale globale, l'ondulation du fil et le rétrécissement lié à la densité du tissu. Plus exactement, la Figure 6-12 (c) synthétise les mesures effectuées selon trois plans de coupe du VER de tissu ; orthogonaux à la direction chaîne du fil : les plans de coupe A-A et C-C (Figure 6-12 (b)) passent à travers l'axe des fils de trame, et le plan de coupe B-B est situé à mi-chemin entre ces deux derniers. Moyennant les écarts de mesures sur les échantillons résinés et les hypothèses propres à la modélisation (sections elliptiques tronquées par les arêtes des éléments), la corrélation semble en bon accord pour ces échantillons 2D toile. On peut noter, en lien avec les restrictions mentionnées précédemment, que l'erreur relative mesurée pour les sections transversales selon le plus grand axe (respectivement le plus petit) de l'ellipse ne dépasse pas 6% (respectivement 13%). Une description géométrique aussi précise des sections transversales du fil de chaîne conduit à une représentation fidèle de l'ondulation pour le fil de trame, sans pénétration du fil. La Figure 6-13 souligne une comparaison similaire réalisée sur trois plans de coupe orthogonaux à la direction trame. En raison de la bonne mise au point du séquençage du déplacement du peigne ; une bonne densité des fils de trame, c'est-à-dire la distance entre deux axes de fils de trame consécutifs, de l'échantillon numérique est obtenue. Dans cette direction, une précision moindre de la géométrie de la section transversale est observée, et peut être en partie attribuée à un manque de tension dans les fils de chaîne conduisant à un effort d'écrasement transverse insuffisant.

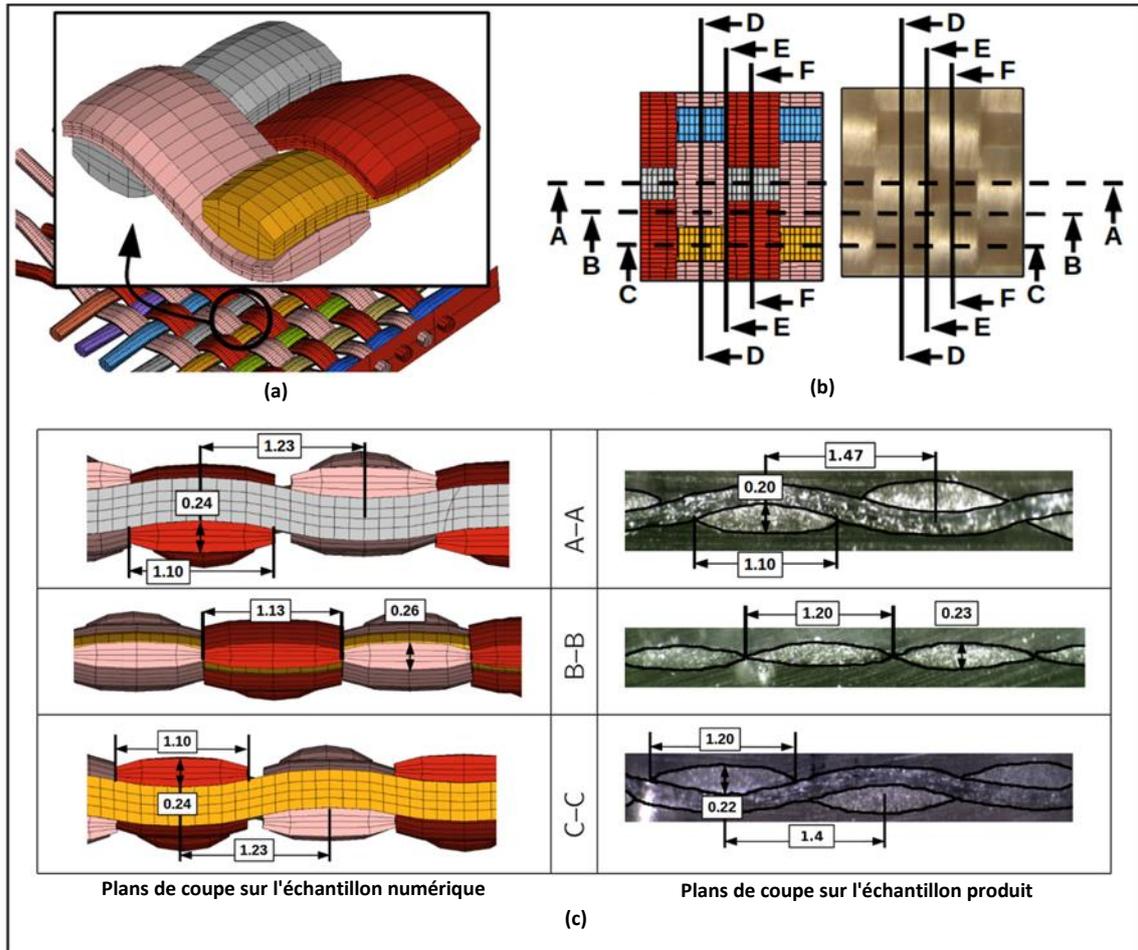


Figure 6-12. Comparaison entre les échantillons de tissu toile (1/2) : (a) VER du tissu toile, (b) plans de coupe du VER, (c) plans de coupe orthogonaux à la direction chaîne (longueur en mm).

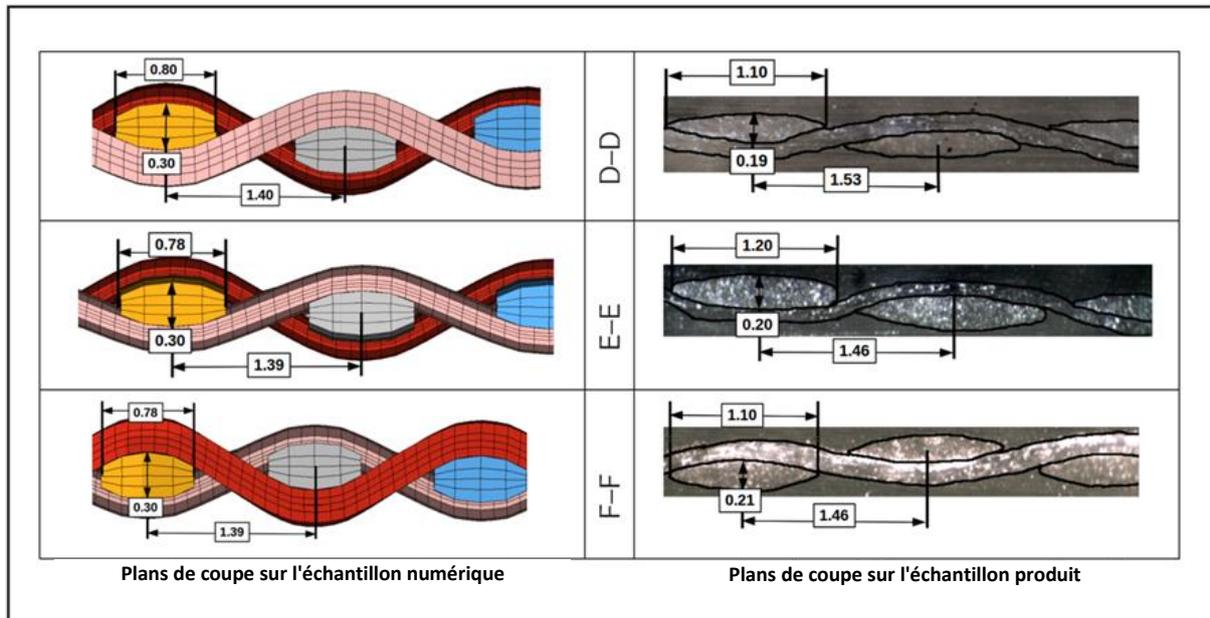


Figure 6-13. Comparaison entre les échantillons de tissu toile (2/2) ; plans de coupe orthogonaux à la direction trame (longueur en mm).

6.3.1.2. Simulation d'un tissu d'armure croisé 2-2

Assez loin des couches limites – c'est-à-dire des rebuts aux lisières du tissu –, la Figure 6-14(a) représente un VER du tissu d'armure croisé 2-2 tissé numériquement, à l'aide de l'outil de modélisation présenté précédemment.

Les résultats de la Figure 6-14 (c) et de la Figure 6-15 mettent en valeur une moins bonne cohérence géométrique entre les résultats du VER numérique obtenus et les échantillons produits résinés que pour le tissu d'armure toile, lorsqu'on compare les formes des sections transverses et l'ondulation du fil. Plus exactement, la Figure 6-14(c) synthétise les mesures effectuées sur trois plans de coupe du VER de tissu, orthogonaux à la direction chaîne du fil : les plans de coupe A-A et C-C (Figure 6-14(b)) passent à travers l'axe des fils de trame, et le plan de coupe B-B est situé à mi-chemin entre ces deux derniers.

On peut noter, suite aux restrictions mentionnées précédemment, que l'erreur relative mesurée pour les sections transverses selon le plus grand axe (resp. le plus petit) de l'ellipse dépasse 40% (resp. 100%). Cette différence de résultats dans la simulation numérique du tissu d'armure croisé 2-2 par rapport à celle du tissu d'armure toile, s'explique par l'écart qu'il y a entre la densité des fils de chaîne initiale dans le modèle numérique, et celle présente dans le tissu réel, entre les deux architectures. Les résultats numériques pour le tissu d'armure toile avaient une densité de fil de chaîne initiale supérieure à ce qu'elle doit être en réalité, c'est-à-dire une distance entre deux centres de fils de chaîne consécutifs de 1.2 mm au lieu de 1.4 mm (Figure 6-12 (c)) ; tandis que pour le tissu croisé 2-2 la densité des fils de chaîne initiale dans le modèle numérique est identique à celle sur le tissu réel résiné – environ 1.4 mm de distance entre deux centres de fils de chaîne consécutifs (Figure 6-14 (c)). Comme les fils de chaîne étaient positionnés plus proche dans le modèle du tissu d'armure toile, il y avait donc plus de contacts dans l'entrelacement entre les fils de chaîne et de trame ; ce qui a certainement favorisé un meilleur écrasement des sections transverses des fils.

La Figure 6-15 souligne une comparaison similaire réalisée sur trois plans de coupe orthogonaux à la direction des fils de trame. En raison de la bonne mise au point du séquençage du déplacement du peigne, une bonne densité en fils de trame dans l'échantillon numérique est obtenue. Dans cette direction, une diminution dans la précision de la géométrie de la section transverse est observée comme pour le tissu d'armure toile, et peut être en partie attribuée à un manque de tension dans les fils de chaîne menant à une insuffisance de la compression transverse sur le fil.

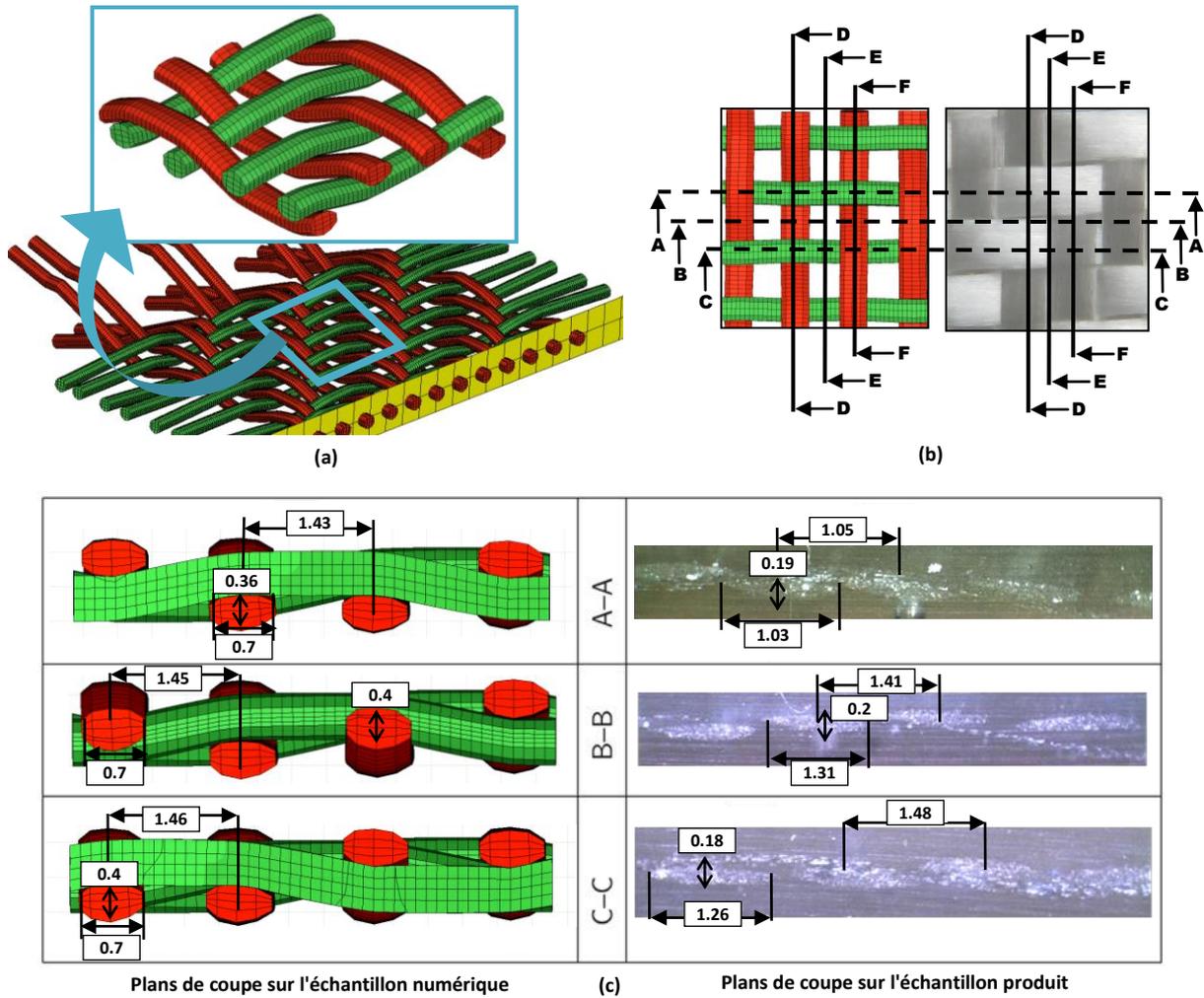


Figure 6-14. Comparaison entre les échantillons de tissu Croisé 2-2 (1/2) : (a) VER du tissu croisé 2-2, (b) plans de coupe du VER, (c) plans de coupe orthogonaux à la direction chaîne (longueur en mm).

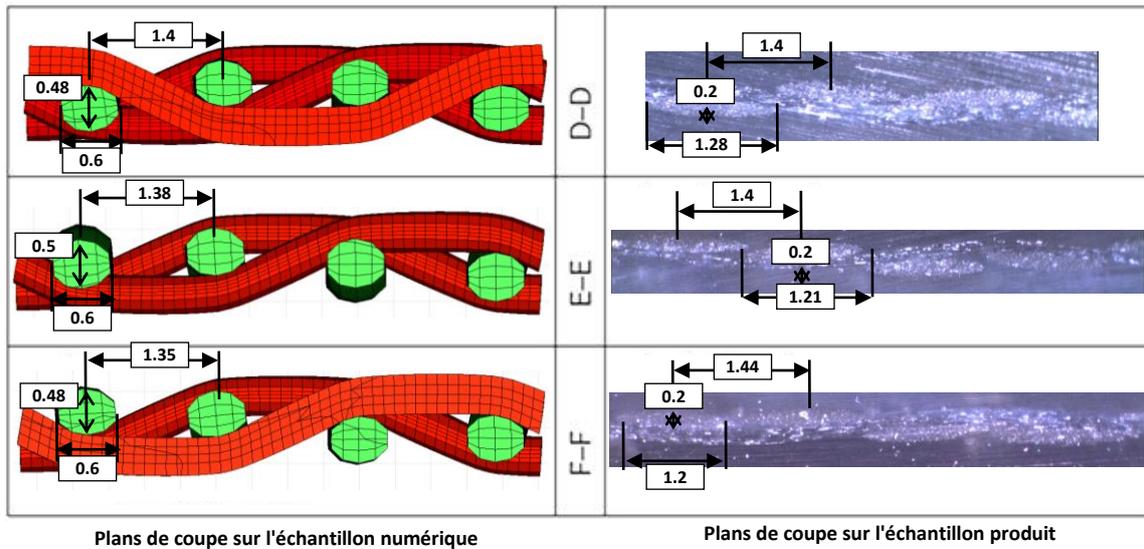


Figure 6-15. Comparaison entre les échantillons de tissu croisé 2-2 (2/2) ; plans de coupe orthogonaux à la direction trame (longueur en mm).

6.4. Outil d'automatisation du tissage développé par le CEDREM

Associé à ces développements numériques multi-partenaire, le CEDREM est en charge de l'intégration de cette chaîne numérique permettant d'une part d'automatiser la mise en données des paramètres d'entrée fournis par l'utilisateur en début de chaîne (propres au tissage, fichier "Input", Figure 6-1 & Figure 6-16), mais également d'automatiser les passages de données entre les « blocs de simulation » développés par chacun des partenaires. Notons dans cette automatisation l'intégration d'une boucle automatique d'ajout des trames qui a été programmée de telle manière à être universelle pour tout type d'architecture (Figure 6-17 & Figure 6-18). Étant donné que l'avancée du tissu en sortie de machine à tisser n'est pas modélisée, l'outil automatique permet d'avoir une foule constante (par le biais d'un angle constant) en diminuant progressivement la hauteur de déplacement des nœuds de fils de chaîne (Figure 6-18).

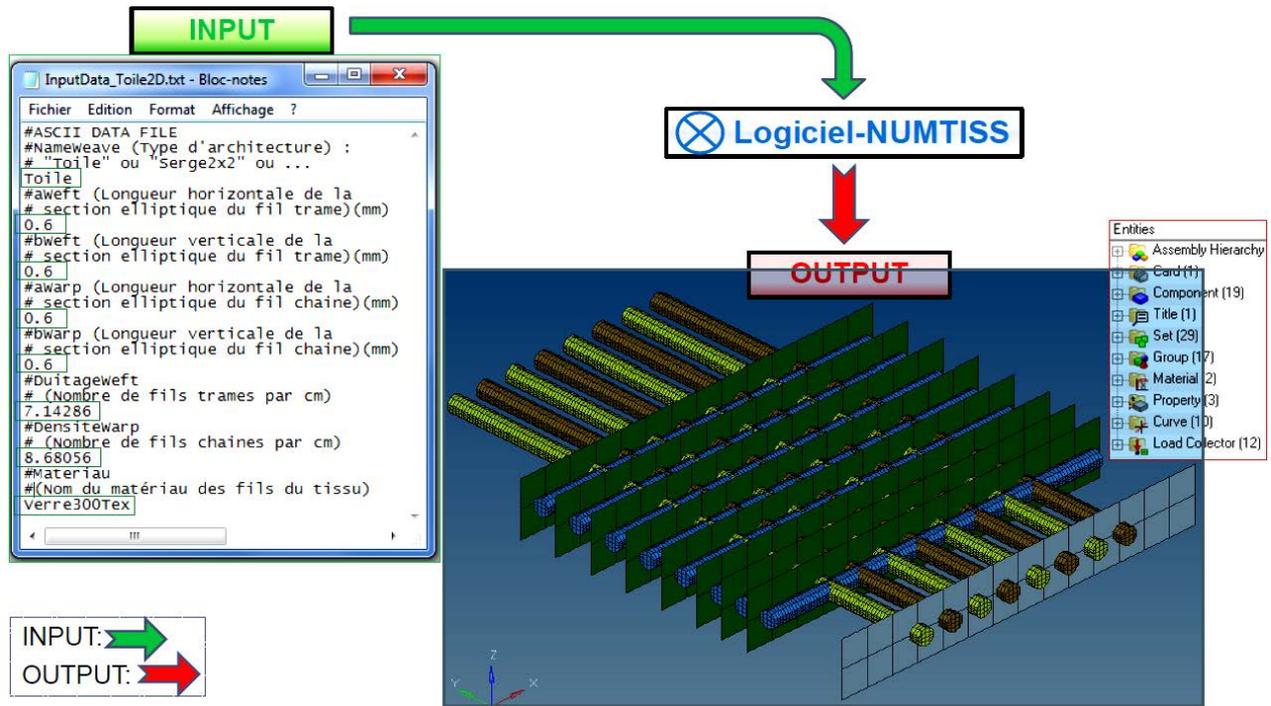


Figure 6-16. Outil d'automatisation du tissage développé par le CEDREM.

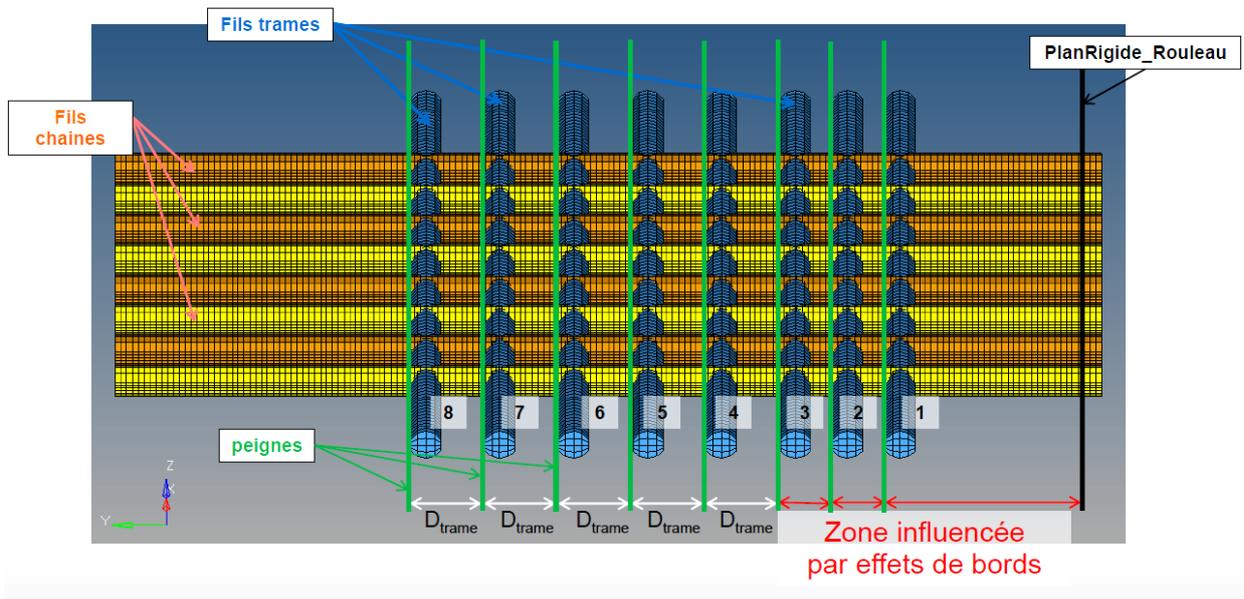


Figure 6-17. Position des fils de trame

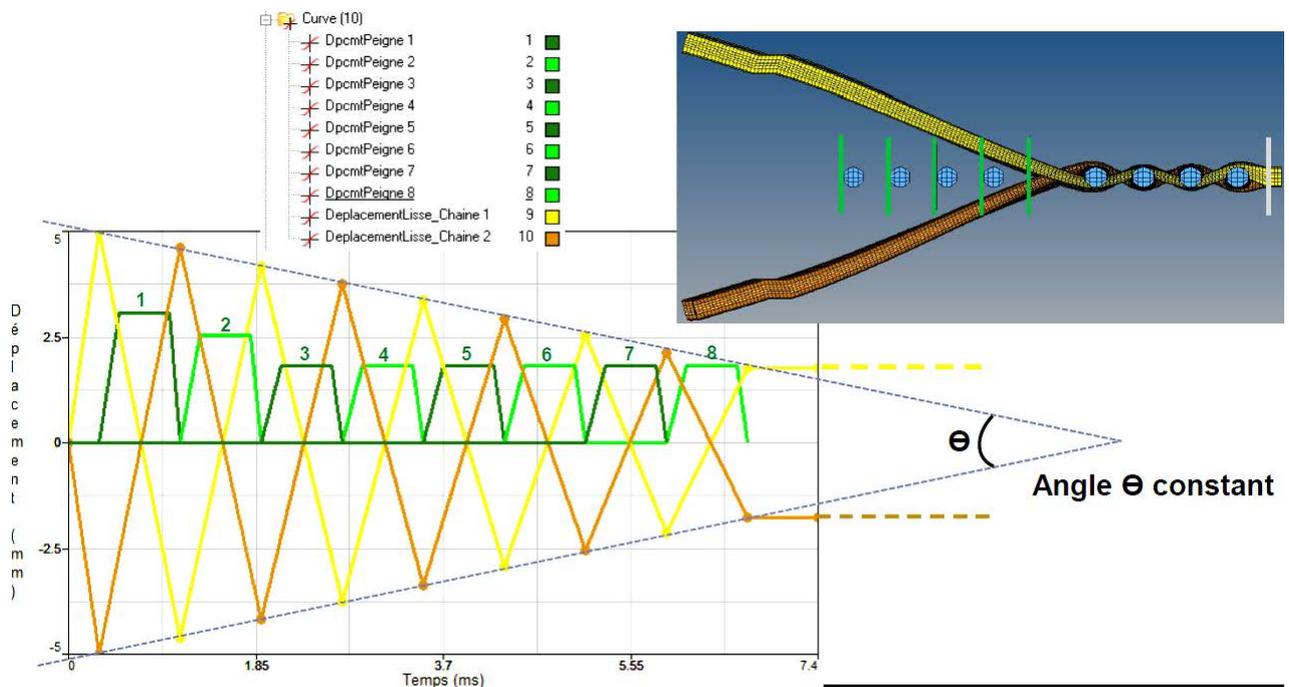


Figure 6-18. Descriptif des fonctions (déplacements imposés) dans l'outil d'automatisation de la simulation du CEDREM.

6.5. Conclusion du chapitre 6

Fondées sur les solveurs explicites en éléments finis, des simulations numériques ayant pour but de reproduire la cinématique du procédé de tissage d'une machine à tisser industrielle ont été proposées. Les caractéristiques géométriques principales des tissus produits sur la machine à tisser virtuelle sont en accord avec leurs équivalents produits sur la machine à tisser réelle pour les paramètres de tissu suivants: armure Toile, densité chaîne et trame de 7 fils/cm, fils de chaîne et trame EC16-300 Z25. En ce qui concerne la simulation des étapes principales de production d'un tissu, la représentation du flotté des fils, de la forme des sections transverses pour le tissu d'armure toile et des zones de contact entre les fils de trame et les fils de chaîne a été obtenue avec une précision qui doit encore être améliorée.

La simulation pour les tissus 3D interlock (plus complexe) serait intéressante à observer avec cet outil numérique. Toutefois, il reste à résoudre les problèmes de contact entre les fils pour optimiser la déformation dans la section transverse des fils. Il serait intéressant aussi d'ajouter de la tension dans les fils de chaîne pour améliorer la déformation des sections transverses.

Une analyse plus complète de l'influence des paramètres du tissu (l'armure, la densité des fils, le titrage des fils) sur les simulations et le résultat obtenu, pour une même matière de fil, serait intéressante à faire. De même, l'analyse de l'influence des paramètres machine à iso-architecture tissée (même armure, même densité et même fils) tels que la hauteur de la foule et la vitesse d'insertion du fil de trame (par exemple) serait intéressante à montrer.

Conclusion générale

Cette thèse de doctorat a été menée dans le cadre du projet multipartenaire NUMTISS dont le but est d'aboutir à un outil de simulation numérique (chaîne numérique) qui puisse faciliter et améliorer la conception, et le développement de structures tissées monocouches et multicouches interlock 3D, utilisées comme renfort fibreux dans les matériaux composites. Dans ce projet qui était divisé selon quatre axes de recherches principaux, notre travail a porté plus précisément sur le développement de la simulation du procédé de tissage. Une observation des phénomènes ayant lieu au cours du tissage et qui pouvaient engendrer des détériorations sur le fil à base de multi-filaments de verre a aussi été effectuée.

Dans le cadre du projet NUMTISS, différentes productions de tissus en verre E ont été réalisées au sein de l'atelier du tissage du GEMTEX sur la machine à tisser automatique à une vitesse de tissage de 100 coups/min. Ces productions ont été effectuées avec deux titrages de fil de verre E différent : le 300 Tex et le 900 Tex, et nous ont permis d'observer et d'analyser les problématiques ayant lieu au cours du tissage. Les architectures produites dans le cadre de ce projet étaient les suivantes : la toile, le croisé 2-2, le satin 8 (pour les architectures 2D), et l'interlock orthogonal à liage d'armure toile, l'interlock orthogonal à liage d'armure croisé 2-2 et l'interlock diagonal à liage d'armure satin 8 (pour les architectures 3D). Sur le plan expérimental, un inventaire des éléments mécaniques de la machine à tisser *Dornier* en contact avec le fil ou le tissu a été réalisé. Par ailleurs, dans le but de comprendre les différents mécanismes de déformation et d'endommagement sur le fil qui interviennent au cours du tissage, des vidéos rapides furent réalisées à différents endroits stratégiques de la machine à tisser. Une de ces vidéos (prise en vue de dessus au niveau du point de façade) a permis par exemple de mettre en évidence qu'il y avait une zone de déformation se propageant sur les quatre premières trames, lorsque le coup de peigne – servant à tasser la duite – a lieu. Les fils à base de multi-filaments retordus ont été résinés lorsqu'ils étaient en tension sur le métier à tisser. L'observation de ces sections résinées a révélé que le fil avait une section circulaire lorsqu'il était sur la machine à tisser. Cette forme de section a par la suite été choisie pour le maillage de la section du fil dans nos simulations numériques. Certains des tissus produits ont été résinés pour pouvoir effectuer des coupes et d'en observer les différentes sections de fil. Certains tissus produits ont aussi été analysés grâce à des tomographies réalisées au LaMCoS. Les observations effectuées sur les renforts déformés et sur le fil en tension sur la machine à tisser ont permis d'alimenter et d'optimiser les simulations du procédé de tissage.

La contribution de cette thèse dans la chaîne numérique du projet NUMTISS, consistait à obtenir la géométrie finale de la structure tissée sèche en reproduisant numériquement la cinématique des principaux éléments de la machine à tisser, qui interviennent notamment dans la formation du tissu. Pour ce faire, on a choisit de travailler avec une approche par éléments finis avec prise en compte du comportement mécanique des renforts. Comme il s'agissait d'un problème de dynamique, non linéaire et avec contacts, le solveur *RadioSS* en explicite a donc

été privilégié dans le cadre des simulations numériques effectuées au cours de cette thèse. La modélisation des fils s'est effectuée à l'aide d'éléments 3D-volumiques. La loi de comportement matériau du verre utilisée pour le fil dans les modèles était isotrope transverse. Comme la loi de comportement choisie ne dépendait pas des vitesses de déformation, le choix a été fait d'accélérer numériquement le tissage, dans le but de retomber dans des temps de calcul assez raisonnables. Les simulations présentées dans la thèse ont été réalisées pour le tissu d'armure toile et le tissu d'armure croisé 2-2. Les simulations ont été comparées avec les tissus réels résinés, mais elles doivent encore être optimisées pour pouvoir offrir une meilleure corrélation.

Cette thèse aura permis de contribuer à une nouvelle approche dans la simulation des renforts fibreux de tissu, en prenant en compte l'influence du procédé de tissage sur l'obtention de la géométrie finale.

Perspectives

Les simulations pour les tissus 3D interlock (plus complexes) seraient intéressantes à observer avec cet outil numérique. Des premières simulations d'interlock en verre E ont été mises en données au cours de cette thèse (avec notamment l'aide du CEDREM), mais des problèmes d'interfaces de contact entre les fils ont empêché le calcul de converger.

Pour optimiser la déformation dans la section transverse des fils. Il serait intéressant aussi d'ajouter de la tension dans les fils de chaîne pour améliorer la déformation des sections transverses.

Une analyse plus complète de l'influence des paramètres du tissu (l'armure, la densité des fils, le titrage des fils) sur les simulations et le résultat obtenu, pour une même matière de fil, serait intéressante à faire. De même, l'analyse de l'influence des paramètres machine à iso-architecture tissée (même armure, même densité et même fils) tels que la hauteur de la foule et la vitesse d'insertion du fil de trame (par exemple) serait intéressante à montrer.

Des simulations avaient été réalisées au début de cette thèse avec des fils ayant une section initiale quasi-elliptique, et dans lesquelles la loi de comportement d'un fil d'aramide avait été incorporée. Des modèles de tissu interlock avaient pu être obtenus avec cette section de fil et cette loi matériau. Le développement de ces modèles pourrait encore être poursuivi pour des applications dans la balistique par exemple.

Références bibliographiques :

- [1] **J. Cinquin**, “Les composites en aérospatiale,” vol. 33, no. 0. Techniques de l’Ingénieur, 2002.
- [2] **L. Gendre**, “Matériaux composites et structures composites (Document airbus),” *ENS Cachan*, 2011. [en ligne]. Disponible sur : http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=165. [Consulté le 01-Oct-2013].
- [3] **E. De Luycker**, “Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks,” LaMCoS , Lyon : INSA de Lyon, Thèse de doctorat, 2009.
- [4] **B. Bourgeois**, “Hors-série : Spécial aviation 2013,” *Science & Vie*, p. 115, 2013.
- [5] **J.-M. Berthelot**, *Matériaux composites - Comportement mécanique et analyse des structures*, 3ème éd. P. 1999, p. 642 p.
- [6] **P. Wang, J. Molimard, S. Drapier, A. Vautrin, and P. Henrat**, “Suivi du procédé de la fabrication Liquid Resin Infusion (LRI) sur simulateur industriel par capteurs distribués,” in *Comptes Rendus des JNC 16*, 2009, vol. 1.
- [7] **I. Verpoest and S. Lomov**, “Virtual textile composites software : Integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 65, no. 15–16, pp. 2563–2574, Dec. 2005.
- [8] **M. Sherburn**, “Geometric and Mechanical Modelling of Textiles,” *Thesis*, no. July, 2007.
- [9] **M. Duhovic**, “Deformation characteristics of knitted fabric composites,” The University of Auckland, New Zealand, 2004.
- [10] **A. K. Pickett, J. Sirtautas, and A. Erber**, “Braiding Simulation and Prediction of Mechanical Properties,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 16, no. 6, pp. 345–364, Sep. 2009.
- [11] **G. Goncharova, M. Deleglise, S. Comas-Cardona, and C. Binetruy**, “Model development and verification of the vacuum infusion process for composite manufacturing,” in *11th International Conference on Flow Processing in Composite Materials (FPCM 11)*, 2012.
- [12] **P. Badel, E. Vidal-Sallé, and P. Boisse**, “Large deformation analysis of fibrous materials using rate constitutive equations,” *Comput. Struct.*, vol. 86, no. 11–12, pp. 1164–1175, Jun. 2008.

- [13] **P. Boisse, Y. Aimène, A. Dogui, S. Dridi, S. Gatouillat, N. Hamila, M. Aurangzeb Khan, T. Mabrouki, F. Morestin, and E. Vidal-Sallé**, “Hypoelastic, hyperelastic, discrete and semi-discrete approaches for textile composite reinforcement forming,” *Int. J. Mater. Form.*, vol. 3, no. S2, pp. 1229–1240, Dec. 2009.
- [14] **E. Syerko, S. Comas-Cardona, and C. Binetruy**, “Models of mechanical properties/behavior of dry fibrous materials at various scales in bending and tension: A review,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 1365–1388, Aug. 2012.
- [15] **P. Boisse, J. L. Daniel, G. Hivet, and D. Soulat**, “A simplified explicit approach for simulations of fibre fabric deformation during manufacturing preforms for R.T.M. process,” *Int. J. Form. Process.*, vol. 3, no. 3–4, pp. 331–353, 2000.
- [16] **G. Hivet and P. Boisse**, “Consistent mesoscopic mechanical behaviour model for woven composite reinforcements in biaxial tension,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 39, no. 2, pp. 345–361, Mar. 2008.
- [17] **Y. Aimene, E. Vidal-Salle, B. Hagege, F. Sidoroff, and P. Boisse**, “A Hyperelastic Approach for Composite Reinforcement Large Deformation Analysis,” *J. Compos. Mater.*, vol. 44, no. 1, pp. 5–26, Sep. 2009.
- [18] **A. Charmetant, J. G. Orliac, E. Vidal-Sallé, and P. Boisse**, “Hyperelastic model for large deformation analyses of 3D interlock composite preforms,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 72, no. 12, pp. 1352–1360, Jul. 2012.
- [19] **N. Trifigny, F. M. Kelly, C. Cochrane, F. Boussu, D. Soulat, and V. Koncar**, “In-situ measurements of strain and stress of e-glass warp yarn during the weaving of 3d warp interlock fabric using innovative sensors,” in *TexComp-11 Conference*, 2013, pp. 3–11.
- [20] “La Pierre Verte.” [en ligne]. Disponible sur : <http://www.pierreverte.com/>. [Consulté le 24-Jul-2013].
- [21] “Habitat.” [en ligne]. Disponible sur : <http://www.cree-ma-maison.com/>. [Consulté le 24-Jul-2013].
- [22] “Automobile.” [en ligne]. Disponible sur : <http://www.carbibles.com/>. [Consulté le 24-Jul-2013].
- [23] “Bâtiment,” *Larousse*. [en ligne]. Disponible sur : http://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Armature_en_fer_de_béton_armé/1002823. [Consulté le 24-Jul-2013].
- [24] **R. Fournier**, “optimisation et modelisation du procede r.t.m.” Thèse de doctorat. Mines de Paris, 2003.
- [25] **A. Berthereau and E. Dallies**, “Fibres de verre de renforcement,” *Techniques de l’Ingénieur*, 2013. .

- [26] **J. Giraud**, “Mise en forme de pièces composites pour hélicoptères : caractérisation et simulation de renforts NCF,” Rapport de stage de Master, Master MEGA, Lyon : INSA de Lyon, 2010.
- [27] **B. Provost**, “Etude et réalisation d’une solution composite à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule,” thèse, Université de Valenciennes, 2013.
- [28] **G. Hivet**, “Modélisation mésoscopique pour le comportement bi-axial et la mise en forme des renforts de composites tissés,” Thèse de doctorat LMSP, Orléans : Université d’Orléans, 2003, 146 p.
- [29] **S. Clark and P. Wary**, “Méthode de conception d’un tissage composite 3D - Modélisation par éléments finis. Rapport de projet de fin d’étude.,” Lyon, INSA de Lyon, 2004, 33 p.
- [30] **A. P. Mouritz, K. H. Leong, and I. Herszberg**, “A review of the effect of stitching on the in plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 28, no. 12, pp. 979–991, 1997.
- [31] **A. P. Mouritz**, “Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 30, no. 12, pp. 1445–1461, 1999.
- [32] **S. V. Lomov, A. V. Gusakov, G. Huysmans, A. Prodromou, and I. Verpoest**, “Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 11, pp. 2083–2095, Aug. 2000.
- [33] **L. Tong, A. P. Mouritz, and M. K. Bannister**, *3D fibre reinforced polymer composites*, Elsevier, 2002.
- [34] **Y. Duan, M. Keefe, E. D. Wetzel, T. A. Bogetti, B. Powers, J. E. Kirkwood, and K. M. Kirkwood**, “Effects of friction on the ballistic performance of a high-strength fabric structure,” *Engineering*, vol. 49, 2005.
- [35] **D. Bigaud, L. Dreano, and P. Hamelin**, “Models of interactions between process, microstructure and mechanical properties of composite materials - a study of the interlock layer-to-layer braiding technique,” *Compos. Struct.*, vol. 67, no. 1, pp. 99–114, 2005.
- [36] **S. V. Lomov, P. Boisse, E. Deluycker, F. Morestin, K. Vanclooster, D. Vandepitte, I. Verpoest, and A. Willems**, “Full-field strain measurements in textile deformability studies,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 8, pp. 1232–1244, Aug. 2008.
- [37] **D. Gay**, *Matériaux composites*, 4ème éd. Paris, 1997, p. 672 p.
- [38] **K. D. Potter**, “History of the resin transfer moulding for aerospace applications,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 30, pp. 757–765, 1999.
- [39] **R. S. Parnas**, *Liquid Composite Molding*, Hanser Gar. 2000.

- [40] **C. D. Rudd and A. C. Long**, *Liquid Molding Technologies*, Woodhead P. 1997.
- [41] **N. Q. Thanh**, “Analyse expérimentale et numérique de la compaction des renforts fibreux . Application pour la perméabilité .,” Insa de Lyon, 2011.
- [42] **F. Daghia and L. Gendre**, “Sciences de l’ingénieur.” [en ligne]. Disponible sur : http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=169. [Consulté le 13-Aug-2013].
- [43] **M. Lefebvre**, *Résistance à l ’ impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés Application au blindage de véhicules*. Thèse, Université de Valenciennes, 2011.
- [44] **M. Lefebvre, F. Boussu, and D. C** “Influence of high-performance yarns degradation inside three-dimensional warp interlock fabric,” *J. Ind. Text.*, vol. 42, no. 4, pp. 475–488, Apr. 2013.
- [45] **C. Ha-Minh, T. Kanit, F. Boussu, and A. Imad**, “Numerical multi-scale modeling for textile woven fabric against ballistic impact,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 50, no. 7, pp. 2172–2184, May 2011.
- [46] **S. Nauman, P. Lapeyronnie, I. Cristian, F. Boussu, and V. Koncar**, “Online Measurement of Structural Deformations in Composites,” *IEEE Sens. J.*, 2010.
- [47] **D. Jacomet**, *le Textile-Habillement une industrie de pointe*, Economica. 1987.
- [48] *AFNOR, Tome 1, Dictionnaire des termes normalisés NF G 00-001*. 1988.
- [49] “Métier à tisser, http://hanen-jedda.franceserv.com/chapter4/ch4_p1.htm, s. d.”
- [50] **Sabit Adanur**, *Handbook of weaving*, Sulzer. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2001.
- [51] **S. Goutianos, T. Peijs, B. Nystrom, and M. Skrifvars**, “Development of Flax Fibre based Textile Reinforcements for Composite Applications,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 13, no. 4, pp. 199–215, Jun. 2006.
- [52] **A. J. Rajwin, V. R. Giridev, and M. Renukadevi**, “Effect of yarn twist on mechanical properties of glass fibre reinforced composite rods,” *Indian J. Fibre Text. Res.*, vol. 37, no. December, pp. 343–346, 2012.
- [53] “Documentation Dornier Type PS,” 2007.
- [54] **P. Lapeyronnie, P. Le Grogneq, C. Binétruy, and F. Boussu**, “Homogenization of the elastic behavior of a layer-to-layer angle-interlock composite,” *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 11, pp. 2795–2807, Oct. 2011.
- [55] **S. Buchanan, A. Grigorash, E. Archer, A. McIlhagger, J. Quinn, and G. Stewart**, “Analytical elastic stiffness model for 3D woven orthogonal interlock composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 11, pp. 1597–1604, Oct. 2010.

- [56] **Y. Mahadik and S. R. Hallett**, “Finite element modelling of tow geometry in 3D woven fabrics,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 9, pp. 1192–1200, Sep. 2010.
- [57] **M. Ansar, W. Xinwei, and Z. Chouwei**, “Modeling strategies of 3D woven composites: A review,” *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 8, pp. 1947–1963, Jul. 2011.
- [58] **Y. Tanzawa, N. Watanabe, and T. Ishikawa**, “Interlaminar fracture toughness of 3-D orthogonal interlocked fabric composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 59, no. 8, pp. 1261–1270, Jun. 1999.
- [59] **J. N. Baucom and M. A. Zikry**, “Evolution of Failure Mechanisms in 2D and 3D Woven Composite Systems Under Quasi-static Perforation,” *J. Compos. Mater.*, vol. 37, no. 18, pp. 1651–1674, 2003.
- [60] **J. HU**, *3D fibrous assemblies, properties applications and modelling of three dimensional textile structures*, WP . 2008.
- [61] **N. Gokarneshan and R. Alagirusamy**, “Weaving of 3D fabrics: A critical appreciation of the developments,” *Text. Prog.*, vol. 41, no. 1, pp. 1–58, 2009.
- [62] **X. Peng and F. Ding**, “Validation of a non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics via hemispherical stamping simulation,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 4, pp. 400–407, Apr. 2011.
- [63] **X. Peng and J. Cao**, “A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 36, no. 6, pp. 859–874, Jun. 2005.
- [64] **X. Peng and Z. U. Rehman**, “Textile composite double dome stamping simulation using a non-orthogonal constitutive model,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, no. 8, pp. 1075–1081, May 2011.
- [65] **W. R. Yu, F. Pourboghrat, K. Chung, M. Zampaloni, and T. J. Kang**, “Non-orthogonal constitutive equation for woven fabric reinforced thermoplastic composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 8, pp. 1095–1105, Aug. 2002.
- [66] **W.-R. Yu, P. Harrison, and A. Long**, “Finite element forming simulation for non-crimp fabrics using a non-orthogonal constitutive equation,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 36, no. 8, pp. 1079–1093, Aug. 2005.
- [67] **P. Xue, X. Peng, and J. Cao**, “A non-orthogonal constitutive model for characterizing woven composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 2, pp. 183–193, Feb. 2003.
- [68] **A. Charmetant**, “Approches hyperélastiques pour la modélisation du comportement mécanique de préformes tissées de composites,” Thèse, Insa de Lyon, 2011.

- [69] **P. Badel, E. Vidal-Sallé, and P. Boisse**, “Large deformation analysis of fibrous materials using rate constitutive equations,” *Comput. Struct.*, vol. 86, no. 11–12, pp. 1164–1175, Jun. 2008.
- [70] **M. a. Khan, T. Mabrouki, E. Vidal-Sallé, and P. Boisse**, “Numerical and experimental analyses of woven composite reinforcement forming using a hypoelastic behaviour. Application to the double dome benchmark,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 2, pp. 378–388, Jan. 2010.
- [71] **P. Badel**, “Analyse mésoscopique du comportement mécanique des renforts tissés de composites utilisant la tomographie aux rayons X,” INSA de Lyon. Thèse de doctorat, 2008.
- [72] **S. Gatouillat, a. Bareggi, E. Vidal-Sallé, and P. Boisse**, “Meso modelling for composite preform shaping – Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 54, pp. 135–144, Nov. 2013.
- [73] **A. Willems, S. V. Lomov, I. Verpoest, and D. Vandepitte**, “Optical strain fields in shear and tensile testing of textile reinforcements,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 3–4, pp. 807–819, Mar. 2008.
- [74] **K. Buet-Gautier and P. Boisse**, “Experimental analysis and modeling of biaxial mechanical behavior of woven composite reinforcements,” *Exp. Mech.*, vol. 41, no. 3, pp. 260–269, Sep. 2001.
- [75] **B. Bridgens, P. Gosling, G.-T. Jou, and X.-Y. Hsu**, “Inter-laboratory comparison of biaxial tests for architectural textiles,” *J. Text. Inst.*, vol. 103, no. 7, pp. 706–718, 2012.
- [76] **K. Buet**, “Analyse et simulation du comportement mécanique des renforts composites tissés,” Thèse, Université d’Orléans, 1998.
- [77] **P. Boisse**, “Mise en forme des renforts fibreux de composites,” *Tech. l’Ingénieur*, pp. 1–10, 2004.
- [78] **P. Boisse, M. Borr, K. Buet, and A. Cherouat**, “Finite element simulations of textile composite forming including the biaxial fabric behaviour,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 453–464, 1997.
- [79] **F. Dumont**, “Contribution à l’expérimentation et à la modélisation du comportement mécanique de renforts de composites fibreux.” Thèse de doctorat, Paris, Université Paris 6, 2003.
- [80] **G. B. McGuinness and C. M. O Bradaigh**, “Characterisation of thermoplastic composite melts in rhombus-shear: the picture-frame experiment,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 29A, pp. 115–132, 1998.

- [81] **G. Lebrun, M. N. Bureau, and J. Denault**, “Evaluation of bias-extension and picture-frame test methods for the measurement of intraply shear properties of PP/glass commingled fabrics,” *Compos. Struct.*, vol. 61, no. 4, pp. 341–352, Sep. 2003.
- [82] **S. H. Chang, M. P. F. Sutcliffe, and S. B. Sharma**, “Microscopic investigation of tow geometry changes in a woven prepreg material during draping and consolidation,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 10–11, pp. 1701–1707, Aug. 2004.
- [83] **J. Wang, J. R. Page, and R. Paton**, “Experimental investigation of the draping properties of reinforcement fabrics,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 58, pp. 229–231, 1998.
- [84] **J. Launay, G. Hivet, A. V. Duong, and P. Boisse**, “Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 2, pp. 506–515, Feb. 2008.
- [85] **T. Gereke, O. Döbrich, M. Hübner, and C. Cherif**, “Experimental and computational composite textile reinforcement forming: A review,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 46, pp. 1–10, Mar. 2013.
- [86] **N. Hamila and P. Boisse**, “Locking in simulation of composite reinforcement deformations. Analysis and treatment,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. Volume 53, pp. 109–117, 2013.
- [87] **J. Cao, R. Akkerman, P. Boisse, J. Chen, H. Cheng, E. Degraaf, J. Gorczyca, P. Harrison, G. Hivet, and J. Launay**, “Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 6, pp. 1037–1053, Jun. 2008.
- [88] **N. Hamila and P. Boisse**, “A Meso–Macro Three Node Finite Element for Draping of Textile Composite Preforms,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 14, no. 4, pp. 235–250, Nov. 2007.
- [89] **S. Kawabata**, *The standardisation and analysis of hand evaluation*, 2nd ed. Osaka: Textile Machinery Society of Japan, 1980, p. 97.
- [90] **E. Bilbao, D. Soulat, G. Hivet, and A. Gasser**, “Experimental Study of Bending Behaviour of Reinforcements,” *Exp. Mech.*, vol. 50, no. 3, pp. 333–351, Mar. 2009.
- [91] **P. Boisse, N. Hamila, E. Vidal-Sallé, and F. Dumont**, “Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, no. 5, pp. 683–692, Mar. 2011.
- [92] **F. Robitaille and R. Gauvin**, “Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. I: Review of experimental results,” *Polym. Compos.*, vol. 19, no. 2, pp. 198–216, 1998.

- [93] **A.-P. Kelly**, “A viscoelastic model for the compaction of fibrous materials,” *J. Text. Inst.*, vol. 102, no. 8, pp. 689–699, 2011.
- [94] **A.-P. Kelly**, “Transverse compression properties of composite reinforcements,” in *Composite reinforcements for optimum performance*, P. Boisse, Ed. Lyon: Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2011, pp. 333–360.
- [95] **Q. T. Nguyen, E. Vidal-Sallé, P. Boisse, C. H. Park, a. Saouab, J. Bréard, and G. Hivet**, “Mesoscopic scale analyses of textile composite reinforcement compaction,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 44, no. 1, pp. 231–241, Jan. 2013.
- [96] **F. Desplentere, S. V. Lomov, D. L. Woerdeman, I. Verpoest, M. Wevers, and a. Bogdanovich**, “Micro-CT characterization of variability in 3D textile architecture,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 65, no. 13, pp. 1920–1930, Oct. 2005.
- [97] **P. Badel, E. Vidal-Sallé, E. Maire, and P. Boisse**, “Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 12, pp. 2433–2440, Sep. 2008.
- [98] **P. Latil, L. Orgéas, C. Geindreau, P. J. J. Dumont, and S. Rolland du Roscoat**, “Towards the 3D in situ characterisation of deformation micro-mechanisms within a compressed bundle of fibres,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, no. 4, pp. 480–488, Feb. 2011.
- [99] **S. V Lomov, I. Verpoest, K. U. Leuven, and K. Arenberg**, “Wisetex – virtual textile reinforcement software,” pp. 1–15, 2004.
- [100] **S. Lomov, G. Perie, D. Ivanov, I. Verpoest, and D. Marsal**, “Modeling three-dimensional fabrics and three-dimensional reinforced composites: challenges and solutions,” *Text. Res. J.*, vol. 81, no. 1, pp. 28–41, Nov. 2010.
- [101] **A. Gasser, P. Boisse, and S. Hanklar**, “Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements. 3D simulations versus biaxial tests,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 17, no. 1, pp. 7–20, Jan. 2000.
- [102] **B. Hagege**, “Simulation du comportement mécanique des milieux fibreux en grandes transformations : Application aux renforts tricotés,” Thèse de doctorat LMSP, Ensam de Paris, 2004.
- [103] **P. Potluri and T. V. Sagar**, “Compaction modelling of textile preforms for composite structures,” *Compos. Struct.*, vol. 86, no. 1–3, pp. 177–185, Nov. 2008.
- [104] **X. Chen**, “Modelling the structures and properties of woven fabrics,” in *Modelling and predicting textile behaviour*, Woodhead P., X. Chen, Ed. 2010, pp. 144–179.
- [105] **N. Hamila and P. Boisse**, “Simulations of textile composite reinforcement draping using a new semi-discrete three node finite element,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 39, no. 6, pp. 999–1010, Sep. 2008.

- [106] **D. Durville**, “Simulation of the mechanical behaviour of woven fabrics at the scale of fibers,” *Int. J. Mater. Form.*, vol. 3, no. Supplément 2, pp. 1241–1251, 2010.
- [107] **D. Durville**, “Microscopic approaches for understanding the mechanical behaviour of reinforcement in composites,” in *Composite reinforcements for optimum performance*, Woodhead p., P. Boisse, Ed. Ecole Centrale Paris/CNRS UMR 8579, France, 2011, pp. 459–485.
- [108] **Y. Wielhorski, D. Durville, and L. Marcin**, “Finite element simulation of 3d interlock fabrics,” in *composites week @ leuven and texcomp-11 conference. 16-20 september 2013, leuven*, 2013.
- [109] **M. Duhovic and D. Bhattacharyya**, “Simulating the deformation mechanisms of knitted fabric composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 11, pp. 1897–1915, Nov. 2006.
- [110] **Y. Miao, E. Zhou, Y. Wang, and B. a. Cheeseman**, “Mechanics of textile composites : Micro-geometry,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 7–8, pp. 1671–1678, Jun. 2008.
- [111] **G. Zhou**, “Multi-chain digital element analysis in textile mechanics,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 2, pp. 239–244, Feb. 2004.
- [112] **A. Charmetant, E. Vidal-Sallé, and P. Boisse**, “Hyperelastic modelling for mesoscopic analyses of composite reinforcements,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, no. 14, pp. 1623–1631, Sep. 2011.
- [114] **V. Koissin, D. S. Ivanov, S. V Lomov, and I. Verpoest**, “Fibre distribution inside yarns of textile composite : geometrical and FE modelling,” in *Texcomp 8*, 2006, pp. 1–6.
- [115] **F. Robitaille, a. C. Long, I. a. Jones, and C. D. Rudd**, “Automatically generated geometric descriptions of textile and composite unit cells,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 4, pp. 303–312, Apr. 2003.
- [116] “TexGen.” [en ligne]. Disponible sur : http://texgen.sourceforge.net/index.php/Main_Page. [Consulté le 12-Sep-2013].
- [117] “WiseTex.” [en ligne]. Disponible sur: <http://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Composites/software/wisetex>. [Consulté le 12-Sep-2013].
- [118] **M. Sherburn, A. Long, A. Jones, J. Crookston, and L. Brown**, “Prediction of textile geometry using an energy minimization approach,” *J. Ind. Text.*, vol. 41, no. 4, pp. 345–369, Nov. 2011.
- [119] **H. Lin, X. Zeng, M. Sherburn, a. C. Long, and M. J. Clifford**, “Automated geometric modelling of textile structures,” *Text. Res. J.*, vol. 82, no. 16, pp. 1689–1702, May 2012.

- [120] **S. Lomov, I. Verpoest, and F. Robitaille**, “Manufacturing and internal geometry of textiles,” in *Design and manufacture of textile composites*, A. C. Long, Ed. Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England, 2005, pp. 1–61.
- [121] **J. W. S. Hearle**, *Structural mechanics of fibers, yarns and fabrics*, Vol.1 ed. USA : John Wiley and Son, 1969.
- [122] “Logiciel Weave Engineer -TexEng.” [en ligne]. Disponible sur : <http://softwaresolutions.fibre2fashion.com/company/texeng/productDetail.aspx?refno=3932>. [Consulté le : 16-Sep-2013].
- [123] **B. Zahid and X. Chen**, “Properties of 5-layer angle-interlock Kevlar-based composite structure manufactured from vacuum bagging,” *J. Compos. Mater.*, Oct. 2012.
- [124] **G. Hivet and P. Boisse**, “Consistent 3D geometrical model of fabric elementary cell. Application to a meshing preprocessor for 3D finite element analysis,” *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 42, no. 1, pp. 25–49, Oct. 2005.
- [125] **G. Hivet, A. Wendling, B. Laine, and P. Boisse**, “Modeling strategies for fabrics unit cell geometry - application to permeability simulations . fabrics modelling,” in *Int J Mater Form*, 2010, vol. 3, pp. 727–730.
- [126] **J. Hofstee and F. van Keulen**, “3-D geometric modeling of a draped woven fabric,” *Compos. Struct.*, vol. 54, no. 2–3, pp. 179–195, Nov. 2001.
- [127] **P. Vandeurzen, J. Ivens, and I. Verpoest**, “A three-dimensional of woven-fabric micromechanical analysis composites: I. geometric analysis,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 56, pp. 1303–1315, 1996.
- [128] **A. Wendling, G. Hivet, E. Vidal-Sallé, J. L. Daniel, and P. Boisse**, “Consistent meshing preprocessor for interlock and 3D fabrics,” *Compos. week @ Leuven Texcomp-11 conf. 16-20 sept. 2013, leuven*, 2013.
- [129] **J.-V. Risicato**, “Optimisation de l’architecture des fils dans une structure textile 3D pour le renforcement de pièces composites,” Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2012.
- [130] **S. Nehme, A. Hallal, F. Fardoun, R. Younes, B. Hagege, Z. Aboura, M. Benzeggagh, and F. H. Chehade**, “Numerical/analytical methods to evaluate the mechanical behavior of interlock composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 45, no. 16, pp. 1699–1716, Feb. 2011.
- [131] **M. Schneider, A. K. . Pickett, and B. Wulfhorst**, “A new rotary braiding machine and cae procedures to produce efficient 3D-Braided textiles for composites,” in *International SAMPE symposium*, 2000.

- [132] **H. Finckh**, “Numerische Simulation der mechanischen Eigenschaften textiler Flächengebilde - Gewebeherstellung,” in *LS-DYNA Anwenderforum*, 2004, pp. 1–15.
- [133] **J.-V. Risicato and X. Legrand**, “Fast Modelling Tool for New 3D Textile Reinforcement for Composite,” in *TEXCOMP 10, Recent advances in textile composites*, 2010.
- [134] **J.-V. Risicato, X. Legrand, D. Soulat, and V. Koncar**, “Innovative geometrical pre-mesh modelling strategy for 3D fibre preform manufacturing,” *J. Ind. Text.*, Jul. 2013.
- [135] **Y. Wang, Y. Miao, D. Swenson, B. A. Cheeseman, C. Yen, and B. Lamattina**, “International Journal of Impact Engineering Digital element approach for simulating impact and penetration of textiles,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 37, no. 5, pp. 552–560, 2010.
- [136] “Customer acceptance standards - SE 1200 SINGLE END ROVING (Type 30) for Knitting, Weaving and Filament Winding applications Europe,” OCV Reinforcements (OWENS CORNING) 2011.
- [137] “Direct Roving Fiber Glass - HYBON 2001 - 900 Tex, PPG Fiber Glass.”
- [138] **C. Florimond**, “Contributions à la modélisation mécanique du comportement de mèches de renforts tissés à l’aide d’un schéma éléments finis implicite,” Thèse de doctorat. Insa de Lyon, 2013.
- [139] **C. Florimond, J. Vilfayeau, E. Vidal-sallé, and P. Boisse**, “Effet of weaving on composite reinforcement preform performances,” in *Composites week @ Leuven and Texcomp-11 conference. 16-20 september 2013, Leuven*, 2013.
- [140] **G. Goncharova**, “Modelling of the liquid resin infusion process for composites manufacturing using a reduced experimental characterization of mechanical and flow properties of fabrics,” Université de Lille 1 - Sciences et Technologies, 2012.
- [141] **N. Trifigny**, “Mesure in-situ et connaissance des phénomènes mécaniques au sein d’une structure tissée multicouches,” Thèse de doctorat, Université des sciences et technologie de Lille 1, 2013.
- [142] **N. Trifigny, F. M. Kelly, C. Cochrane, F. Boussu, V. Koncar, and D. Soulat**, “PEDOT:PSS-based piezo-resistive sensors applied to reinforcement glass fibres for in situ measurement during the composite material weaving process.,” *Sensors (Basel)*, vol. 13, no. 8, pp. 10749–64, Jan. 2013.
- [143] **D. U. Shah, P. J. Schubel, P. Licence, and M. J. Clifford**, “Hydroxyethylcellulose surface treatment of natural fibres: the new ‘twist’ in yarn preparation and optimization for composites applicability,” *J. Mater. Sci.*, vol. 47, no. 6, pp. 2700–2711, Nov. 2011.

- [144] **L. Lee, S. Rudov-Clark, A. P. Mouritz, M. K. Bannister, and I. Herszberg**, “Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites,” *Compos. Struct.*, vol. 57, pp. 405–413, 2002.
- [145] **B. Lee, K. H. Leong, and I. Herszberg**, “Effect of Weaving on the Tensile Properties of Carbon Fibre Tows and Woven Composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 20, no. 8, pp. 652–670, May 2001.
- [146] **R. B. Turan and A. Okur**, “Variation of the yarn cross-section in fabric,” *Text. Res. J.*, vol. 82, no. 7, pp. 719–724, Feb. 2012.
- [147] **B. Ozgen and H. Gong**, “Modelling of yarn flattening in woven fabrics,” *Text. Res. J.*, vol. 81, no. 15, pp. 1523–1531, May 2011.
- [148] **R. H. Gong, B. Ozgen, and M. Soleimani**, “Modeling of Yarn Cross-Section in Plain Woven Fabric,” *Text. Res. J.*, vol. 79, no. 11, pp. 1014–1020, Jun. 2009.
- [149] **B. Ozgen and H. Gong**, “Yarn geometry in woven fabrics,” *Text. Res. J.*, vol. 81, no. 7, pp. 738–745, Nov. 2011.
- [150] **F. Stig and S. Hallström**, “A modelling framework for composites containing 3D reinforcement,” *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 9, pp. 2895–2901, Sep. 2012.
- [151] **A. Hallal, R. Younes, and F. Fardoun**, “Review and comparative study of analytical modeling for the elastic properties of textile composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 50, pp. 22–31, Jul. 2013.
- [152] **S. Lomov, D. Ivanov, I. Verpoest, M. Zako, T. Kurashiki, H. Nakai, and S. Hirosawa**, “Meso-FE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 9, pp. 1870–1891, Jul. 2007.
- [153] **F. Loix, P. Badel, L. Orgéas, C. Geindreau, and P. Boisse**, “Woven fabric permeability: From textile deformation to fluid flow mesoscale simulations,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 7–8, pp. 1624–1630, Jun. 2008.
- [154] **J. Viguié, P. Latil, L. Orgéas, P. J. J. Dumont, S. Rolland du Roscoat, J.-F. Bloch, C. Marulier, and O. Guiraud**, “Finding fibres and their contacts within 3D images of disordered fibrous media,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 89, pp. 202–210, Dec. 2013.
- [155] “Radioss theory manual 11.0,” 2011.
- [156] **A. K. Pickett**, “Review of Finite Element Simulation Methods Applied to Manufacturing and Failure Prediction in Composites Structures,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 9, pp. 43–58, 2002.
- [157] **E. Vidal-Sallé, Q. T. Nguyen, A. Charmetant, J. Bréard, E. Maire, and P. Boisse**, “Use of numerical simulation of woven reinforcement forming at mesoscale: Influence of transversecompression on the global response,” *Int. J. Mater. Form.*, vol. 3, no. S1, pp. 699–702, Jun. 2010.

- [158] **B. Zouari, J. L. Daniel, and P. Boisse**, “A woven reinforcement forming simulation method. Influence of the shear stiffness,” *Comput. Struct.*, vol. 84, no. 5–6, pp. 351–363, 2006.
- [159] **A. K. Pickett, A. Erber, T. Von Reden, and K. Drechsler**, “Comparison of analytical and finite element simulation of 2D braiding,” *Plast. Rubber Compos.*, vol. 38, no. 9–10, pp. 387–395, 2009.
- [160] **P. Boisse**, “Meso-macro approach for composites forming simulation,” *J. Mater. Sci.*, vol. 41, no. 20, pp. 6591–6598, Sep. 2006.
- [161] **P. Boisse, N. Hamila, F. Helenon, B. Hagege, and J. Cao**, “Different approaches for woven composite reinforcement forming simulation,” *Int. J. Mater. Form.*, vol. 1, no. 1, pp. 21–29, Mar. 2008.
- [162] **T. J. Grilo, R. A. F. Valente, and R. J. A. Sousa**, “Assessment on the performance of distinct stress integration algorithms for complex non-quadratic anisotropic yield criteria,” *Int. J. Mater. Form.*, Jan. 2013.
- [163] **N. Hamila**, “Simulation de la mise en forme des renforts composites mono et multi plis,” Thèse de doctorat de Lyon, 2007.
- [164] **D. Durville**, “Modelling of individual fibers,” in *Finite element simulation of textile materials at mesoscopic scale*, 2007, no. September, pp. 26–28.
- [165] **L. Russcher, E. Lamers, C. Dufour, F. Boussu, P. Wang, and D. Soulat**, “Modelling the microstructure of multilayer woven fabrics,” in *13th AUTEX World Textile Conference*, 2013, pp. 3–8.
- [166] **F. Stig and S. Hallström**, “Spatial modelling of 3D-woven textiles,” *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 5, pp. 1495–1502, Apr. 2012.
- [167] **B. El Said, S. Green, and S. R. Hallett**, “Kinematic modelling of 3D Woven Fabric Deformation for structural scale features,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 57, pp. 95–107, Nov. 2013.
- [168] **H. Lin, R. Ramgulam, H. Arshad, M. J. Clifford, P. Potluri, and A. C. Long**, “Multi-scale integrated modelling for high performance flexible materials,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 65, pp. 276–286, 2012.
- [169] **R. Tavana, S. S. Najar, M. T. Abadi, and M. Sedighi**, “Meso/macro-scale finite element model for forming process of woven fabric reinforcements,” *J. Compos. Mater.*, no. July, Jul. 2012.
- [170] **F. Charlotte and R. Hossein**, “Identification of fibre degradation due to friction during the weaving process,” *Key Eng. Mater.*, vol. 554–557, pp. 416–422, 2013.
- [171] “Armure tissage.” [en ligne]. Disponible sur : <http://www.swannetoscar.com/univers-des-chemises-swann-et-oscar/chemises->

swann-et-oscar-tissages-fils-tirage-double-retors-coton-120s-140s_ikD294.htm.
[Consulté le 07/08/13].

- [172] **F. Dumont, G. Hivet, R. Rotinat, J. Launay, P. Boisse, and P. Vacher**, “Mesures de champs pour des essais de cisaillement sur des renforts tissés,” *Mécanique Ind.*, vol. 4, pp. 627–635, 2003.
- [173] “Catalogue pièces de rechange pour Dornier HTVS 4/S.” Lindauer Dornier gesellschaft MBH, p. 504, 2009.
- [174] **C. Ha-Minh**, “Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale , numérique et analytique,” Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2011.

FOLIO ADMINISTRATIF

THÈSE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

NOM : VILFAYEAU

DATE de SOUTENANCE : 13 mars 2014

Prénoms : Jérôme

TITRE : Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites

NATURE :

Doctorat Numéro d'ordre : 2014-ISAL-0026

École doctorale :

MEGA

Spécialité :

Mécanique - Génie Mécanique - Génie Civil

RÉSUMÉ :

L'industrie aéronautique doit faire face aux nouvelles exigences environnementales, en matière de réduction de la consommation des énergies fossiles. L'utilisation de matériaux composites plus léger permet de répondre en partie à cette attente. Pour limiter les coûts lors de la fabrication et du développement des composites à renforts tissés 3D, il est nécessaire d'utiliser des outils de simulation performants. En particulier, les outils existants qui discrétisent à une échelle mésoscopique, l'architecture des tissus 3D, ne tiennent pas compte de l'influence du procédé de fabrication sur la constitution de la structure textile. Si des outils numériques dédiés à la modélisation du procédé de tressage et de tricotage sont disponibles, il n'en est rien concernant le tissage. Cette étude avait donc pour but de s'intéresser plus particulièrement à la simulation du procédé de tissage pour pouvoir obtenir une structure de tissu sèche déformée.

La production de différentes architectures de tissu en verre E dans notre laboratoire nous a permis d'observer les différents éléments en contact avec le fil ou le tissu sur la machine à tisser, par le biais de l'utilisation d'une caméra rapide par exemple.

Le développement d'un modèle numérique par éléments finis reproduisant le procédé de tissage a été réalisé. Une loi de comportement isotrope transverse fut utilisée pour modéliser les fils de verre. Des premières simulations numériques encourageantes pour la fabrication d'un tissu toile et d'un tissu croisé 2-2 sont présentées, et comparées avec les tissus réels produits correspondants.

MOTS-CLÉS

Modélisation numérique, tissage 3D, renforts textiles, matériaux composites.

Laboratoire(s) de recherche :

Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides
UMR CNRS 5514 - INSA de Lyon
20, avenue Albert Einstein
69621 Villeurbanne Cedex FRANCE

Directeur de thèse : Monsieur le Professeur Philippe BOISSE

Président du jury :

Composition du jury :

Madame le professeur Laurence SCHACHER
Monsieur le maître des conférences Gilles HIVET (HDR)
Monsieur le maître des conférences David CREPIN
Monsieur le maître des conférences François BOUSSU
Madame le professeur Emmanuelle VIDAL SALLE
Monsieur le professeur Damien SOULAT
Monsieur Guillaume PERIE
Mme Karine THORAL PIERRE