

Titre: Étude numérique et expérimentale de la mise en forme de renforts fibreux et application à la préparation de préformes
Title: fibreous and application to the preparation of preforms

Auteur: Yannick Banaszak
Author:

Date: 2007

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Banaszak, Y. (2007). Étude numérique et expérimentale de la mise en forme de renforts fibreux et application à la préparation de préformes [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/7956/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7956/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: François Trochu
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ETUDE NUMÉRIQUE ET EXPÉIMENTALE DE LA MISE EN FORME DE
RENFORTS FIBREUX ET APPLICATION À LA PRÉPARATION DE PRÉFORMES

YANNICK BANASZAK
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

JANVIER 2007



Library and
Archives Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-29211-2

Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-29211-2

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

**
Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ETUDE NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE DE LA MISE EN FORME DE
RENFORTS FIBREUX ET APPLICATION À LA PRÉPARATION DE PRÉFORMES

présenté par : BANASZAK Yannick.

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., président

M. TROCHU François, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. SOUKANE Sofiane, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord le directeur de recherche, le professeur François Trochu, pour m'avoir donné l'opportunité de travailler au sein de son équipe, pour m'avoir encouragé tout le long de cette expérience et pour m'avoir transmis de l'énergie afin d'accomplir ce projet. J'apprécie beaucoup sa disponibilité, sa motivation et son envie de me former afin de relever des défis.

Je tiens à remercier également l'équipe du « moule en bois » pour sa bonne humeur et sa convivialité.

Je remercie également chacun des étudiants de la Chaire sur les composites à Haute Performance (CCHP) qui m'ont accompagné et encouragé pendant mes études, ainsi qu'au technicien du laboratoire, M. Christian Charles Martel, pour ses conseils pratiques.

Mes remerciements vont également au Centre de recherche en plasturgie et composites (CREPEC) de l'École Polytechnique pour son soutien financier. Enfin, je tiens à remercier le professeur Marek Balazinski pour avoir accepté d'être président du jury et le Dr. Sofiane Soukane pour avoir accepté d'être membre du jury.

RÉSUMÉ

L'industrie des matériaux composites est en pleine expansion et utilise massivement les renforts en fibre de verre (tissus et mats), principalement en raison de leur coût réduit. La volonté de réaliser des pièces composites à géométrie complexe impose l'utilisation de moyens de découpe automatisés, ce afin de garantir rapidité et reproductibilité au procédé. Pour cela, le recours à des outils numériques de simulation de drapage permet théoriquement d'obtenir le patron 2D du morceau de tissu à découper, mais aussi les déformations engendrées par la mise en place du tissu sur le moule de préformage. Ces déformations ont un impact certain sur les propriétés mécaniques et physiques de la pièce finale. L'objet de ce mémoire de maîtrise est donc de recenser dans un premier temps les logiciels commerciaux capables de simuler la mise en forme de renfort fibreux, réaliser des études numériques de drapage, étudier la stabilité numérique d'un logiciel commercial, mettre en place une chaîne de fabrication de préforme et présenter la validation expérimentale de ces simulations. La validation expérimentale des données numériques s'effectuera d'abord par l'obtention d'une préforme dite « *net-shape* » (qui épouse correctement la surface d'un moule à préforme), ensuite par le développement d'une procédure expérimentale de mesure des angles de cisaillement apparaissant lors de la mise en place du tissu sur le moule. Ces mesures permettront de valider ou non les différentes options de drapage proposées par le logiciel de simulation utilisé. Toute la démarche sera illustrée par la préparation d'une préforme pour une pièce composite (toit d'automobile à échelle réduite).

ABSTRACT

The industry of composite materials is in full expansion and uses massively glass fibre reinforcements (fabrics and mat), mainly because of their low cost. The fabrication of composite parts of complex geometry imposes the use of automated cutting, means in order to guarantee speed and repeatability. For that, the use of numerical tools to simulate draping theoretically allows obtaining the 2D pattern of the fabric to be cut, but also the deformations generated by the installation of fabric on the performing mould. These deformations have an impact on the mechanical properties of the final part. The object of this report is thus to present the experimental validation of these simulations, obtain net-shape performs, then develop an experimental procedure to measure the shear angles that appear during the draping process. These measurements will make it possible to validate the various draping options of the simulation software.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES SYMBOLES.....	xix
LISTE DES ANNEXES	xxi
1. CHAPITRE 1 : REVUE DES MÉTHODES	3
1.1. Introduction	3
1.2. Panorama des techniques existantes.....	4
1.2.1. Les renforts fibreux	5
1.2.2. Tissus toile	5
1.2.3. Mats à fibres coupées	6
1.2.4. Mats de fibres continues.....	6
1.2.5. Agents liants.....	6
1.2.6. Réalisation de préformes par pulvérisation.....	7
1.2.7. Drapage à la main.....	10
1.2.8. Drapage robotisé	11
1.2.9. Placement sous membrane	11
1.2.10. Thermoformage.....	12

1.3.	Procédés de fabrication des composites.....	12
1.3.1.	Procédés LCM.....	13
1.3.2.	Procédé RTM	13
1.3.3.	Procédés d'infusion.....	14
1.3.4.	Procédés de laminage manuel en autoclave	14
1.4.	Influence du drapage sur l'épaisseur des tissus.....	16
1.5.	Influence du drapage sur la perméabilité des tissus	17
1.6.	Influence du drapage sur les propriétés mécaniques des tissus.....	20
1.7.	Méthodes de mise en forme numérique	22
1.7.1.	Approche géométrique	22
1.7.2.	Approche mécanique.....	25
1.8.	Conclusion	28
2.	CHAPITRE 2 : ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA MISE EN FORME	29
2.1.	Introduction générale et rappel de quelques définitions mathématiques	29
2.1.1.	Introduction générale	29
2.1.2.	Surface réglée.....	29
2.1.3.	Surface développable	30
2.1.4.	Surface non développable	30
2.1.5.	Ligne géodésique	31
2.2.	Différentes méthodes de drapage offertes par le logiciel <i>Patran Laminate Modeler</i>	32
2.2.1.	Introduction.....	32
2.2.2.	Algorithme de drapage	33
2.2.3.	Paramètres de drapage.....	34
2.2.4.	Mécanismes du drapage	36
2.2.5.	Modèles de drapage globaux.....	38

2.2.6.	Option géodésique.....	40
2.2.7.	Option planaire.....	41
2.2.8.	Option énergétique	42
2.2.9.	Option maximum	43
2.2.10.	Possibilités de l'algorithme de drapage de <i>Patran Laminate Modeler</i>	43
2.3.	Etude de l'influence du maillage sur la stabilité du drapage avec le logiciel <i>Patran Laminate Modeler</i>	44
2.3.1.	Introduction.....	44
2.3.2.	Étude de l'influence du maillage.....	45
2.4.	Influence des paramètres de mise en forme sur la simulation du drapage.....	49
2.4.1.	Motivation.....	49
2.4.2.	Méthodologie	49
2.4.3.	Variation du point d'application	50
2.4.4.	Variation de la direction d'application.....	51
2.4.5.	Résultats de l'étude de l'influence des paramètres de mise en forme.....	53
2.4.6.	Conclusion sur le point d'application	57
2.4.7.	Conclusion sur la direction d'application	57
2.5.	Discussion sur le logiciel et résumé des analyses de stabilité.....	58
2.5.1.	Résumé des analyses de stabilité	58
2.5.2.	Discussion	58
2.5.3.	Diagramme d'une analyse de préformage avec <i>Patran Laminate Modeler</i>	
	59	
2.6.	Drapage d'une pièce réelle.....	61
2.6.1.	Présentation du moule PF3	61
2.6.2.	Paramètre du matériau.....	61
2.6.3.	Drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement.....	62
2.6.4.	Direction et point d'application	62
2.6.5.	Drapage géodésique	67

2.7. Conclusion sur les simulations numériques de drapage.....	72
3. CHAPITRE 3 : MISE EN PLACE D'UNE CHAÎNE DE FABRICATION	74
3.1. Présentation générale	74
3.1.1. Introduction.....	74
3.2. Machines de découpe	74
3.2.1. Introduction.....	74
3.2.2. Comparaisons des offres commerciales retenues.....	75
3.2.3. Complément sur la machine de découpe de Lectra.....	78
3.2.4. Conclusion sur le choix de la machine de découpe à commande numérique.....	80
3.3. Exportation des données de drapage (méthode inverse)	81
3.3.1. Exportation des données numériques.....	81
3.3.2. Exportation des données de fabrication	84
3.4. Passage de <i>Patran Laminate Modeler</i> à la machine de découpe	84
3.5. Fabrication d'un moule à préforme pour le moule PF3	85
3.6. La chaîne de fabrication des préformes	86
3.7. Conclusion	88
4. CHAPITRE 4 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA MISE EN FORME	89
4.1. Introduction et objectifs	89
4.2. Découpe des tissus et essais de drapabilité	90
4.2.1. Matériel utilisé	90
4.2.2. Mise à plat des patrons 2D	93
4.2.3. Paramètres de coupe.....	93
4.2.4. Résultats et discussion	94
4.2.5. Découpe de mats de verre	94

4.2.6.	Découpe de tissus de verre bidirectionnels	96
4.2.7.	Conclusions et recommandations.....	99
4.3.	Étude du drapage de tissus bidirectionnels	99
4.3.1.	Principe de mesure expérimentale des angles de cisaillement.....	100
4.3.2.	Procédure expérimentale.....	100
4.3.3.	Passage en trois dimensions	105
4.3.4.	Calcul des angles de déformation	114
4.3.5.	Résultats et discussion	120
4.3.6.	Drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement.....	120
4.3.7.	Drapage par lignes géodésiques	124
4.3.8.	Conclusions et recommandations.....	127
CONCLUSION.....	128	
RÉFÉRENCES.....	129	
ANNEXES.....	131	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Les 9 combinaisons de l'algorithme de drapage	44
Tableau 2-2 : Comparaison des déformations maximales pour différents maillages d'une surface à double courbure	47
Tableau 2-3 : Présentation des variations étudiées du point d'application.....	51
Tableau 2-4 : Calcul des composantes cartésiennes du vecteur de la direction d'application pour différentes valeurs de θ et ϕ	53
Tableau 2-5 : Étude des déformations en cisaillement en fonction des variations de différents paramètres de drapage sans axes principaux	54
Tableau 2-6 : Étude des déformations en cisaillement en fonction des variations de différents paramètres de drapage avec axes principaux géodésiques	55
Tableau 2-7 : Étude des déformations en cisaillement en fonction des variations de différents paramètres de drapage avec axes principaux planaires	56
Tableau 2-8 : Tableau récapitulatif des analyses de préformage sous <i>Patran Laminate Modeler</i>	58
Tableau 2-9 : Choix du point d'application.....	62
Tableau 2-10 : Analyse de convergence du maillage.....	65
Tableau 2-11 : Écarts des déformations pour le moule PF3 en fonction du point d'application	66
Tableau 2-12 : Choix du point d'application.....	68
Tableau 2-13 : Analyse de convergence des données du maillage	69
Tableau 2-14 : Écarts des déformations pour l'empilement à la main du moule PF3 en fonction de la direction d'application	72
Tableau 3-1: Tableau comparatif des machines de découpe.....	76
Tableau A-1 : Tableau comparatif des logiciels	132
Tableau A-2: Modèles de matériau sous PAM-FORM	158
Tableau A-3: Définition des paramètres de simulation pour différents processus de mise en forme sous PAM-FORM.....	159

Tableau E-1 : Répartition des informations en fonction du numéro de la couche du fichier DXF	186
Tableau F-1 : Liste des résines utilisées pour la fabrication du moule à préformes PF3	198
Tableau H-1 : Exemple de décodage des bitmaps sous <i>Matlab</i>	206
Tableau I-1 : Etalonnage de la mesure des angles	211

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Armure de tissus toiles bidirectionnels	5
Figure 1-2 : Mat à fibres aléatoires et continues.....	6
Figure 1-3 : Pulvérisation de l'agent liant	10
Figure 1-4 : Drapage robotisé	11
Figure 1-5 : Le procédé de thermoformage.....	12
Figure 1-6 : Schéma de principe du procédé RTM.....	13
Figure 1-7 : Principe du procédé VARI.....	14
Figure 1-8 : Photographie d'un autoclave.....	15
Figure 1-9 : Variation d'aire lors d'un cisaillement du tissu	16
Figure 1-10 : Perméabilités majeures planes (K_x) et mineures planes (K_y) de couches unidirectionnelles et bidirectionnelles. L'ellipse indique le front d'écoulement de la résine.....	18
Figure 1-11 : Cisaillement d'un pli de tissu bidirectionnel	20
Figure 1-12 : Décomposition des tissus selon 2 directions principales.	21
Figure 1-13: Déformation en cisaillement d'un tissu.....	23
Figure 1-14: Approche géométrique du drapage.	24
Figure 1-15 : Erreurs de l'approche géométrique sur les surfaces courbes.	24
Figure 1-16: Système linéaire masse-ressort.	25
Figure 1-17 : Itération de Newton.....	27
Figure 2-1 : Exemples de surfaces réglées.....	31
Figure 2-2 : Diagramme fonctionnel de <i>Patran Laminate Modeler</i>	33
Figure 2-3 : Définition de la contrainte de cisaillement d'une cellule de tissu.	34
Figure 2-4: Définitions des paramètres de drapage de <i>Patran Laminate Modeler</i>	35
Figure 2-5 : Exemple de formage mécanique.	37
Figure 2-6 : Paramètres de simulation de drapage.....	38
Figure 2-7 : Extension du drapage avec axes principaux.....	39
Figure 2-8 : Extension du drapage sans axes principaux.....	40
Figure 2-9 : Option géodésique.....	41

Figure 2-10 : Option planaire.....	42
Figure 2-11 : Option énergétique.....	43
Figure 2-12 : Maillage n°1, 144 éléments.....	46
Figure 2-13 : Exemple de résultats de drapage pour un maillage avec 144 éléments.	48
Figure 2-14 : Schéma de la méthodologie de l'étude sur les paramètres de mise en forme.	50
Figure 2-15 : Visualisation de la direction d'application du drapage.....	52
Figure 2-16 : Repère en coordonnées sphériques.	52
Figure 2-17 : Diagramme d'une analyse de préformage avec <i>Patran Laminate Modeler</i>	60
Figure 2-18: Visualisation du moule PF3.	61
Figure 2-19 : Visualisation des points d'application étudiés.....	63
Figure 2-20 : Exemple de drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement du moule PF3.	64
Figure 2-21 : Visualisation des zones les plus déformées (en jaune) après drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement du moule PF3.	67
Figure 2-22 : Exemple de drapage géodésique sur la base du moule PF3.....	68
Figure 2-23 : Schéma des angles d'Euler appliqué à la direction d'application.	70
Figure 3-1: Machine de découpe Vectra 2500.86.	78
Figure 3-2: Exemple d'échantillons découpés avec la machine Lectra.	79
Figure 3-3 : Visualisation des données d'un drapage de 4 éléments avec <i>Patran Laminate Modeler</i>	82
Figure 3-4: Utilisation du code implémenté dans <i>Patran Laminate Modeler</i> pour exporter les données de drapage vers <i>PAM-RTM</i>	83
Figure 3-5: Exemple d'importation des données de drapage vers <i>PAM-RTM</i>	83
Figure 3-6 : Exemple d'un patron 2D (à gauche) et d'un tissu drapé (à droite) exporté sous format IGES.	84
Figure 3-7: Contre moule (partie mâle) après démoulage avec la cire calibrée.....	85
Figure 3-8 : La chaîne de fabrication des préformes.....	87

Figure 4-1 : Machine de découpe <i>Lectra Vector Auto 2500</i>	91
Figure 4-2 : Schéma directeur de l'étude expérimentale menée.....	92
Figure 4-3 : Mise à plat des patrons avant découpe.....	93
Figure 4-4 : Premier patron 2D du mat positionné sur le moule PF3.	95
Figure 4-5 : Patron 2D « <i>net-shape</i> » d'un mat positionné sur le moule PF3.....	96
Figure 4-6 : Patrons 2D pour les 2 types de drapage numérique.	97
Figure 4-7 : Patron 2D d'un tissu de verre bidirectionnel obtenu avec l'option de drapage manuel de <i>Patran Laminate Modeler</i> positionné sur le moule PF3.	98
Figure 4-8 : Patron 2D d'un tissu de verre bidirectionnel obtenu avec l'option de placement sous membrane de <i>Patran Laminate Modeler</i> placé sur le moule PF3..	98
Figure 4-9 : Tissu quadrillé selon les directions des fibres.....	101
Figure 4-10 : Moule à préforme pour PF3.	102
Figure 4-11 : Objectif de l'étude.....	102
Figure 4-12 : Caméra numérique placée sur son pied.....	103
Figure 4-13 : Visualisation des coordonnées relevées.....	105
Figure 4-14 : Décalage entre l'élévation des points du tissu et celle du moule.	106
Figure 4-15 : Exemple de moule en relief.....	107
Figure 4-16 : Tracé des rayons lumineux virtuels.....	108
Figure 4-17 : Déformation due à la perspective.....	108
Figure 4-18 : Principe de la photographie virtuelle.	110
Figure 4-19 : Visualisation du changement de repère.....	112
Figure 4-20 : Exemple de calage des repères.....	114
Figure 4-21 : Méthode de détermination des quatre voisins.....	116
Figure 4-22 : Limite de validité de l'argument de distance.....	116
Figure 4-23 : Méthode de calcul de l'angle via le produit scalaire.....	117
Figure 4-24 : Calcul de l'angle moyen.	118
Figure 4-25 : Problèmes potentiels de topologie.....	119
Figure 4-26 : Exemple de représentation des angles sous <i>Matlab</i>	120

Figure 4-27 : Drapage du tissu par la méthode du minimum de l'énergie de cisaillement.	121
Figure 4-28 : Mesure expérimentale des angles pour l'algorithme de minimisation de l'énergie de cisaillement.	122
Figure 4-29 : Simulation numérique des angles pour l'algorithme par minimisation de l'énergie de cisaillement.	123
Figure 4-30 : Drapage du tissu par la méthode des lignes géodésiques.	124
Figure 4-31 : Mesure expérimentale des angles pour la méthode par lignes géodésiques.	125
Figure 4-32 : Instabilité de la simulation par la méthode des lignes géodésiques.	126
Figure A-1: Schéma fonctionnel de la solution informatique de Lectra.	136
Figure A-2: Schéma fonctionnel de la solution informatique de MSC Software.	140
Figure A-3: Drapage de différentes pièces sous <i>Patran Laminate Modeler</i> .	142
Figure A-4: Pièce arrière remaillée pour les besoins du drapage.	143
Figure A-5: Exemple d'entrée des propriétés mécaniques	144
Figure A-6 : Paramètres de drapage de <i>Patran Laminate Modeler</i> .	145
Figure A-7: Mise à Plat d'un siège d'auto avec le logiciel <i>3D direct</i> .	146
Figure A-8: Pièce à double courbure sous 3D direct.	147
Figure A-9: Schéma de la solution informatique de Vistagy.	148
Figure A-10: Exemple de tolérance de fabrication.	149
Figure A-11: Exemple d'analyse de tissu sous <i>Catia</i> .	152
Figure A-12: Exemple de mise à plat sous <i>QUIK-FORM</i> .	155
Figure A-13: Paramètres de drapage de <i>QUIK-FORM</i> .	156
Figure A-14: Drapage d'une surface à double courbure (à gauche) et d'un toit de voiture (à droite) sous <i>QUIK-FORM</i> .	156
Figure A-15: Visualisation du cisaillement des fibres (à gauche) et de l'épaisseissement (à droite) pour un pli mis en forme par soufflage sous <i>PAM-FORM</i> .	160
Figure E-1 : Importation du fichier DXF sous <i>Autocad</i> et zoom automatique.	187
Figure E-2 : Visualisation du fichier après la suppression des axes du repère 2D.	188

Figure E-3 : Sélection de la couche sur laquelle doit apparaître l'information.	188
Figure E-4 : Visualisation de l'icône « <i>Layer Properties Manager</i> ».	189
Figure E-5 : Suppression des couches en trop.	189
Figure E-6 : Changement du type de contour.	190
Figure E-7 : Enregistrement du nouveau fichier DXF sous le format R12.	191
Figure E-8 : Configuration de la machine avant découpe.	192
Figure E-9 : Résultat de la première découpe.	193
Figure F-1 Matrice apprêtée pour la fabrication du moule.	195
Figure F-2 : Application du <i>gel coat</i>	195
Figure F-3 : Application d'une couche de tissus sur une couche de résine.	196
Figure F-4 : Ponçage des irrégularités (à gauche), structure de bois fixée au moule (à droite).	197
Figure F-5 : Contre moule après démoulage avec la cire calibrée.	198
Figure G-1 : Pointage des nœuds du quadrillage.	199
Figure G-2 : Enregistrement des coordonnées 2D.	200
Figure H-1 : Image après le traitement graphique.	201
Figure H-2 : Passage en niveaux de gris.	202
Figure H-3 : Outil <i>baguette magique</i>	203
Figure H-4 : Accès à la fonction <i>Contour progressif</i>	203
Figure H-5 : Sélection des intersections.	204
Figure H-6: Conversion en image noir et blanc.	205
Figure H-7 : Conversion en mode bitmap.	205
Figure H-8 : Calcul des coordonnées des points moyens.	208
Figure I-1 : Quadrillage étalonné à 20°.	210
Figure I-2 : Relation entre erreur angulaire et erreur de position.	212
Figure I-3 : Montage de validation de la projection virtuelle.	213
Figure I-4 : Comparaison entre projection virtuelle et photographie.	214

LISTE DES SYMBOLES

a	Taille d'une cellule de tissu
α	Angle entre les fibres
A_n	L'accélération à T_n
e_0	Épaisseur de la préforme avant cisaillement
e_1	Épaisseur de la préforme après cisaillement
E_{11}	Module d'Young longitudinal
E_{22}	Module d'Young transversal
ε_{xx}	Déformation longitudinale
ε_{yy}	Déformation transversale
ε_{xy}	Déformation de cisaillement
G_{12}	Module de cisaillement
k	La rigidité
K	Perméabilité effective
K_x	Perméabilité majeure
K_y	Perméabilité mineure
m	La masse
$m_{renforts}$	Masse cumulée de tous les renforts
n	L'incrément de temps
$n_{renfort}$	Nombre de couche(s) de renfort
$n_{couches appliquées}$	Nombre de couches de résine appliquées
V_f	Fraction volumique de fibres
V_r	Fraction volumique cible de résine dans la préforme
$V_{préforme}$	Volume de la préforme
V_{fo}	Fraction volumique avant cisaillement

V_m	Fraction volumique de la matrice
ν_{12}	Coefficient de Poisson majeur
ν_{21}	Coefficient de Poisson mineur
ν_f	Coefficient de Poisson des fibres
ν_m	Coefficient de Poisson de la matrice
$\rho_{s \text{ renfort}}$	Densité surfacique d'une couche
$\rho_{v \text{ résine}}$	Densité volumique de la résine
σ_{xx}	Contrainte longitudinale
σ_{yy}	Contrainte transversale
σ_{xy}	Contrainte de cisaillement
γ	Angle de cisaillement local
X_n	La position à T_n
θ_0	Angle initial
θ	Angle après déformation

LISTE DES ANNEXES

Annexe A :	Étude comparative de logiciels commerciaux de mise en forme.....	131
Annexe B :	Décryptage d'un fichier <i>.layup</i> de <i>Patran Laminate Modeler</i>	163
Annexe C :	Décryptage d'un fichier <i>.fmd</i> de <i>PAM-RTM</i>.....	168
Annexe D :	Code d'exportation des données de <i>Patran Laminate Modeler</i> vers <i>PAM-RTM</i>.	170
Annexe E :	Transformation du fichier DXF généré par <i>Patran Laminate Modeler</i> afin de le transférer à la machine de découpe <i>LECTRA VECTOR AUTO 2500</i>.....	185
Annexe F :	Fabrication d'un moule à préforme, Polyflex III (PF3).	194
Annexe G :	Méthode manuelle de mesure des coordonnées 2D.....	199
Annexe H :	Méthode semi automatisé de mesure des coordonnées 2D.....	201
Annexe I :	Erreur de mesure.	209
Annexe J :	Spécifications techniques de la caméra numérique.	215
Annexe K :	Utilisation des codes Matlab.....	218
Annexe L :	Codes <i>Matlab</i>.	220
Annexe M :	Code de projection croisée <i>Patran Command Language</i>.	240

INTRODUCTION

L'industrie des matériaux composites est grandissante, l'augmentation des cadences de production est un des grands défis de cette industrie. L'une des principales difficultés réside dans la mise en forme des renforts fibreux et plus particulièrement dans la prédiction numérique des angles des renforts fibreux après mise en forme. La mise en forme ou préformage consiste à réaliser une préforme, il s'agit d'une étape intermédiaire avant l'injection d'une pièce en composite. La préforme mise en place, dans laquelle la résine polymère est injectée, est constituée de renforts comprimés auxquels on confère la forme finale de la pièce en les maintenant par un liant.

En général, il existe deux types de préformage : le préformage par coupe et couture (« *cut-and-sew* »), et le préformage à chaud ou thermoformage.

Le thermoformage est utilisé pour la fabrication rapide de pièces composites. Le renfort le plus utilisé est le mat à fibres continues. Le thermoformage consiste à chauffer un renfort et à le compacter par estampage à l'aide d'une presse et d'un moule ayant la forme de la pièce. Un agent liant thermoplastique recouvre les fibres afin de conserver après refroidissement la nouvelle forme donnée au renfort.

Si des études antérieures réalisées au laboratoire de la Chaire sur les Composites à Haute Performance ont abouti au développement de techniques pour la fabrication de préformes d'épaisseur constante pour des « plaques rectangulaires », il apparaît maintenant nécessaire de mettre au point une procédure pour fabriquer des préformes de géométrie complexe.

Une recherche bibliographique sur les matériaux composites et les outils numériques de la mise en forme est présentée au premier Chapitre. Un logiciel de mise en forme numérique est ensuite utilisé et étudié afin de vérifier sa stabilité et de générer les

résultats de drapage pour un moule au Chapitre 2. Le Chapitre 3 permet de définir les liens entre les différents outils intervenant dans la chaîne de fabrication des préformes. Le dernier Chapitre présente une validation expérimentale des prédictions numériques.

Ce mémoire porte donc sur la découpe des pièces de renforts tissés utilisés pour réaliser des préformes pour un moule expérimental. Connaissant la géométrie 3D de la pièce composite à fabriquer et le type de tissu employé, le logiciel *Patran Laminate Modeler* permet théoriquement d'obtenir le patron de la pièce à découper, c'est-à-dire la forme bidimensionnelle du tissu qui, une fois drapé sur la surface 3D du moule, constituera la préforme fibreuse servant de renfort au composite. Le premier objectif du projet consiste à vérifier expérimentalement à l'aide de la machine de découpe *Lectra Vector Auto 2500* les prédictions de *Patran Laminate Modeler*.

Par ailleurs, le drapage des tissus sur des surfaces de géométrie complexe provoque l'apparition d'un cisaillement entre les fibres du tissu. Ceci a une répercussion sur les propriétés mécaniques des pièces composites produites ainsi que sur le remplissage de la cavité du moule dans le cas d'une fabrication par injection. Des méthodes numériques de prédition du cisaillement existent. Le second objectif du projet consiste à vérifier leur précision de manière expérimentale. Dans la seconde partie du travail une procédure expérimentale sera développée pour mesurer le plus précisément possible les angles de cisaillement qui apparaissent lors du drapage de tissus bidirectionnels sur une surface tridimensionnelle. Les essais sont réalisés sur un moule prototype.

1. CHAPITRE 1 : REVUE DES METHODES

1.1. Introduction

Les matériaux composites sont généralement constitués de fibres de très haute résistance répandues dans une matrice polymérique et présentent des propriétés attractives pour différentes applications telles que dans l'aéronautique, l'automobile, l'industrie sportive, etc. Grâce à la rigidité élevée et le faible poids des composites, ils remplacent de plus en plus les matériaux longtemps utilisés dans l'industrie, comme les métaux et le bois. Des exemples de ces remplacements dans le domaine de l'automobile sont les ressorts à lame et les arbres d'entraînement.

En général, les composites renforcés de fibres sont utilisés pour la fabrication de pièces industrielles à faible et moyenne cadence (moins de 10 000 pièces par année), où le nombre de pièces ne justifie pas le coût très élevé de l'outillage de transformation des métaux. Les inconvénients principaux pour la production à grande échelle des matériaux composites sont notamment le coût élevé des matières premières (par rapport aux métaux), la difficulté de recyclage et l'absence d'une technologie de fabrication appropriée pour les grandes séries.

Il existe plusieurs procédés de fabrication des composites. Certains d'entre eux ont pu être adaptés pour les productions de grandes séries, tels que le « Sheet Moulding Compound » (SMC) ou la pultrusion. Le SMC, utilisé pour fabriquer des pièces de géométrie complexe, consiste à former par étampage à pression élevée (environ 30 bars) un composé de fibres et de résine thermodurcissable. Le coût très élevé de l'outillage ainsi que la difficulté à contrôler l'orientation des fibres ont limité les applications du SMC à la production de pièces non-structurales. La pultrusion, limitée à la fabrication de pièces à section constante, consiste à faire passer des fibres imprégnées de résine dans une filière chauffée où a lieu la polymérisation. Contrairement à ces deux types de

procédés, la fabrication de composites par injection de résine sur renfort fibreux se caractérise pour produire des pièces de géométrie complexe à moindre prix.

Après une brève description des matériaux utilisés et des différents procédés de mise en forme et d'injection pour la fabrication de composites par injection de résine, l'importance de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques et physiques des matériaux composites est rappelée. Pour clôturer, les deux principales méthodes numériques de la mise en forme des renforts fibreux seront décrites.

1.2. Panorama des techniques existantes

La Chaire de recherche sur les Composites à Haute Performance (CCHP) souhaite développer un système d'injection flexible pour les procédés de type LCM, i.e., un procédé d'injection de résines thermodurcissables à travers des renforts fibreux. Ce procédé nécessite l'utilisation de préformes, qui doivent donc être fabriquées au préalable en s'assurant un contrôle précis du taux de fibres ainsi que de l'épaisseur.

Afin de fabriquer des préformes d'épaisseur constante et déterminée, une résine thermodurcissable est vaporisée sur les fibres. Ensuite, la résine polymérisé pendant que le renfort est maintenu comprimé. Ceci permet de fixer les paramètres géométriques des préformes.

Avant de décrire la préparation des préformes, un bref rappel s'impose sur les différents procédés de fabrication des composites.

1.2.1. Les renforts fibreux

Il existe différents types de matériaux pour les renforts fibreux : le verre, le carbone et l'aramide comptent parmi les plus couramment utilisés. Le verre est sans doute le plus répandu en raison de son plus faible prix. Il existe plusieurs types de renforts, à savoir :

- renforts à fibres unidirectionnelles (UD),
- renforts à fibres bidirectionnelles (tissus),
- mats à fibres coupées,
- mats à fibres continues.

1.2.2. Tissus toile

Les tissus à fibres bidirectionnelles sont plus courants que les tissus unidirectionnels (UD). Ils sont réalisés à partir d'un enroulement de mèches (« *rovings* ») et composés d'une chaîne (fils placés dans le sens de la longueur du tissu) et d'une trame (fils placés dans la largeur du tissu). La chaîne et la trame s'entrecroisent alternativement (Voir exemple sur Figure 1-1).

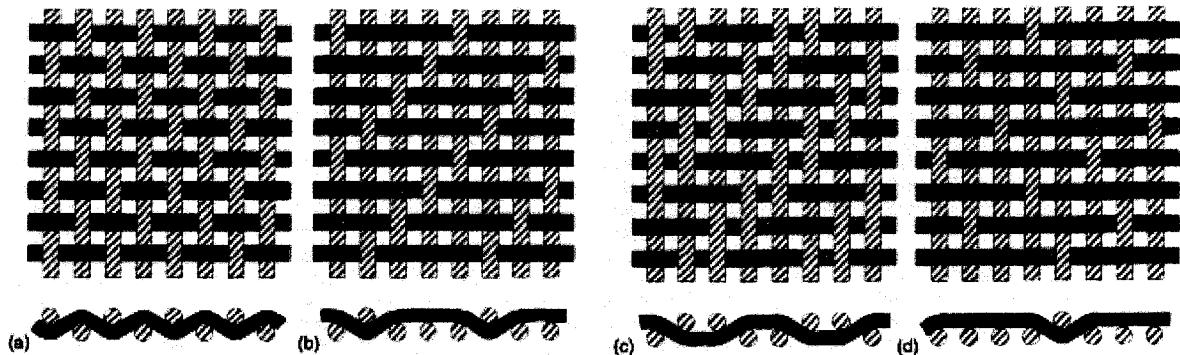


Figure 1-1 : Armure de tissus toiles bidirectionnels

a) armure toile ou taffetas; b) armure tissée 3 x 1; c) armure tissée 2 x 2; d) satin à 5 mailles.

1.2.3. Mats à fibres coupées

Les mats à fibres coupées sont composés de fibres de longueur variant entre 5 et 10 cm. Les fibres sont déposées aléatoirement dans le plan et maintenues en place par un liant. Les composites à mats de fibres coupées ne sont pas aussi résistants que ceux renforcés par des tissus par contre ils présentent des propriétés mécaniques isotropes.

1.2.4. Mats de fibres continues

Les mats de fibres continues sont constitués de long fils disposés de façon aléatoire et agglomérés par un agent liant (voir Figure 1-2). Ce sont des renforts à bas prix, en raison de la facilité de mise en œuvre. La résine peut être injectée rapidement en utilisant ce type de renfort grâce à la porosité élevée de la cavité du moule. Une fraction de fibres V_f de l'ordre de 30 % est couramment utilisée dans les matériaux composites renforcés par des mats de fibres continues en verre.

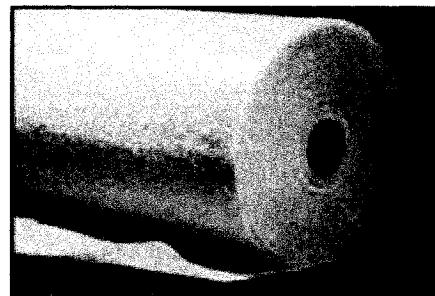


Figure 1-2 : Mat à fibres aléatoires et continues.

1.2.5. Agents liants

Les renforts sont « *préformés* » à l'aide d'agents liants qui permettent de tenir le renfort en place afin qu'il soit robuste et facile à manipuler par la suite. Les deux types d'agents les plus utilisés sont :

- Agents collants (« *tackifiers* ») - Ils sont utilisés dans les procédés de laminage manuel (« *hand lay-up* »). Ce sont en général des résines époxydes.
- Liants thermoplastiques - Ces liants, solides à température ambiante, se ramollissent au chauffage. La proportion de cet agent liant varie en général entre 4 et 8 % du poids des fibres.

1.2.6. Réalisation de préformes par pulvérisation

Le préformage est l'étape de préparation des renforts, qui sont découpés et mis en forme sur la surface du moule avant l'injection de la résine. C'est au cours de cette étape que les paramètres géométriques des renforts sont fixés.

Paramètres de fabrication d'une préforme d'épaisseur constante

Quelle que soit la géométrie de la préforme envisagée, il convient de déterminer certains paramètres, qui constitueront les caractéristiques cibles. Le choix de ces paramètres et les relations algébriques les liants permettront de prédire la quantité de résine à utiliser. Pour faciliter le raisonnement, la géométrie retenue est une plaque rectangulaire d'épaisseur constante. Dans cet exemple, les paramètres à déterminer sont :

- épaisseur cible (e),
- nombre de couche(s) de renfort ($n_{renfort}$),
- masse des couches (mesure),
- fraction volumique de fibres, (V_f),
- fraction volumique cible de résine dans la préforme (V_r),
- nombre de couche(s) d'application de la résine sur chaque couche de renfort ($n_{couches}$),
- densité surfacique de résine par couche d'application ($\rho_{s_{renfort}}$).

La fraction volumique V_f de renfort dans une préforme d'épaisseur constante est définie comme le rapport entre la masse totale des renforts et la masse qu'aurait la préforme si elle était uniquement constituée de verre (matériau constitutif des renforts). Comme on suppose que l'épaisseur est constante, on se place dans le cas d'une plaque de surface unitaire pour trouver que la fraction volumique est :

$$V_f = \frac{n_{renfort} \rho_{s renfort}}{e \rho_{v verre}} \quad (1.1)$$

où $n_{renfort}$ est le nombre de couche(s) de renfort, $\rho_{s renfort}$ la densité surfacique d'une couche, e l'épaisseur de la préforme et $\rho_{v verre}$ la densité volumique du verre pur, soit $2,52 \text{ g/cm}^3$. Néanmoins, comme les valeurs des densités surfaciques des renforts varient souvent dans le cas des mats avec un écart relatif pouvant aller jusqu'à 30%, on préfère utiliser la définition naturelle suivante :

$$V_f = \frac{m_{renforts}}{V_{préforme} \rho_{v verre}} \quad (1.2)$$

où $m_{renforts}$ est la masse cumulée de tous les renforts, et $V_{préforme}$ le volume de la préforme. Ce volume se calcule simplement en effectuant le produit entre l'épaisseur et l'aire de la préforme (plaque rectangulaire). La fraction volumique de résine dans la préforme doit être la plus petite possible, afin de ne pas nuire à l'imprégnation future de la résine qui constituera la matrice du composite. Idéalement elle doit être inférieure à 3%. Cette fraction volumique est déterminée de manière analogue à celle des renforts au moyen de l'équation :

$$V_r = \frac{n_{couches appliquées} \rho_{s résine} A_{préforme}}{V_{préforme} \rho_{v résine}} \quad (1.3)$$

où $\rho_{v résine}$ est la densité volumique de la résine, soit $1,2 \text{ g/cm}^3$ et $n_{couches}$ est le nombre de couches de résine appliquées.

En inversant cette relation on obtient la densité surfacique de résine à appliquer :

$$\rho_{s \text{ résine}} = \frac{V_r e \rho_{v \text{ résine}}}{n_{\text{couches appliquées}}} \quad (1.4)$$

Noter que le rapport entre le volume et l'aire de la préforme est bien l'épaisseur e de celle-ci.

Vaporisation de la résine

L'outil utilisé lors de la vaporisation de la résine sur les fibres est un pot à gravité. Son principe de fonctionnement repose sur l'emploi d'air comprimé qui, s'échappant le long d'une buse d'où sort la résine liquide, vaporise celle-ci dans le milieu ambiant.

Les paramètres qui régissent le débit de la résine vaporisée sont :

- la viscosité de la résine,
- Le diamètre du trou de la buse,
- la pression de l'air.

Des travaux antérieurs (Vincent Dumais, 2005) conseillent l'utilisation d'une pression proche de 40 psi, qui permet de combiner l'obtention de fines gouttelettes tout en conservant un débit de vaporisation contenu. Pour le choix de la buse, la plus petite qui laisse écouler la résine sans appuyer sur le bouton libérant l'air comprimé semble être un bon choix.

Une fois le matériel sélectionné et préparé, il suffit de renverser le pistolet tout en appuyant sur le bouton pour vaporiser la résine. Il est déconseillé de faire cette opération

au dessus des renforts par souci d'uniformité. Ensuite, on balaie la surface à imprégner avec des mouvements constants, à une distance d'environ 10 pouces (voir Figure 1-3).

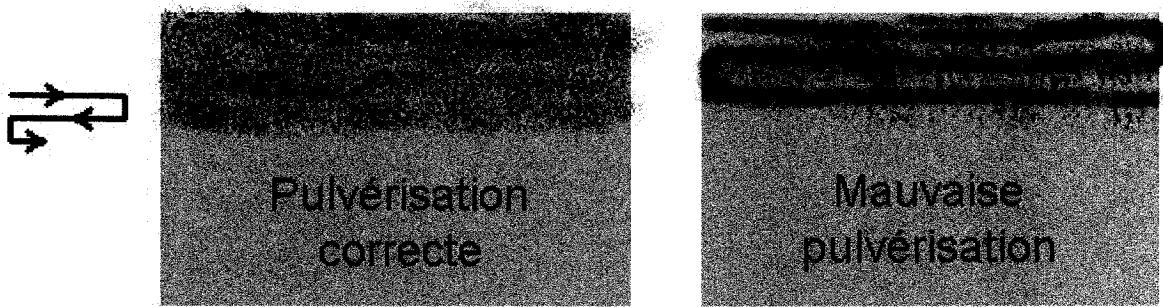


Figure 1-3 : Pulvérisation de l'agent liant.

Le jet de résine est plus concentré au centre qu'à l'extérieur. Ainsi, les passages doivent s'entrecouper pour obtenir un résultat uniforme. Il est aussi conseillé que le premier et dernier passage, de même que les changements de position, s'effectuent à l'extérieur du renfort.

Pour ajuster la vitesse d'avancée du pistolet lors de la vaporisation, il convient d'avoir recours à un procédé itératif. On prend une feuille de papier que l'on pèse, on vaporise la résine à vitesse constante et on pèse à nouveau la feuille. Cette seconde pesée donne la densité surfacique de résine déposée à cette vitesse de déplacement du pistolet. On compare ensuite la densité surfacique obtenue avec celle souhaitée (équation (1.4)) et on réitère l'opération jusqu'à déterminer la vitesse optimale.

1.2.7. Drapage à la main

Le drapage manuel consiste généralement à déposer sur un moule des nappes pré découpées de tissus de fibres sèches. Le type de tissu, l'orientation des fibres, le nombre de plis et le gabarit de découpage sont définis dans le tableau d'étude. Ce tableau contient, pour chaque numéro de couche, le numéro de repère, l'orientation, le

repère géométrique et certaines observations annexes. On peut également utiliser des fibres pré imprégnées sous forme de tissus, unidirectionnels ou croisés, de rubans, voire de mats ou de mèches.

1.2.8. Drapage robotisé

Pour gagner du temps, on fait parfois usage d'un robot à 5 axes. Les découpes sont amenées en position sous le rouleau applicateur, qui applique une pression sur les fibres au cours de son avancée le long du profil du moule (voir Figure 1-4).

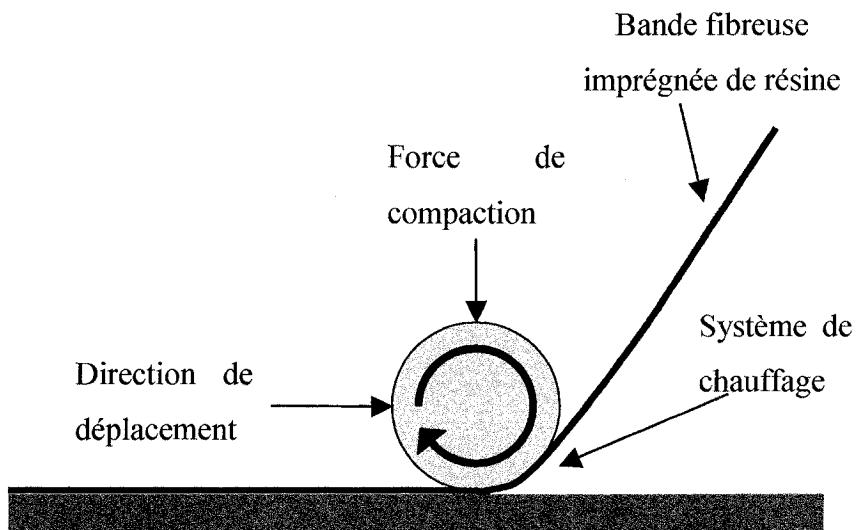


Figure 1-4 : Drapage robotisé.

1.2.9. Placement sous membrane

Une fois les fibres déposées et la pulvérisation de la résine effectuée, on recouvre l'ensemble d'une membrane étanche afin de pouvoir appliquer une pression de vide entre les couches. La préforme est ainsi compactée par la pression atmosphérique régnant au-dessus de la membrane.

1.2.10. Thermoformage

Le thermoformage est une technique qui consiste à prendre un matériau sous forme de feuille (verre, plastique..), à le chauffer pour le ramollir, et à profiter de cette ductilité pour le mettre en forme dans un moule. Le matériau durcit lorsqu'il se refroidit, gardant ainsi la forme.

Une pompe à vide est utilisée afin d'assurer le plaquage de la feuille contre le moule. Cette pompe est utilisée seulement pendant la phase d'emboutissage (voir Figure 1-5).

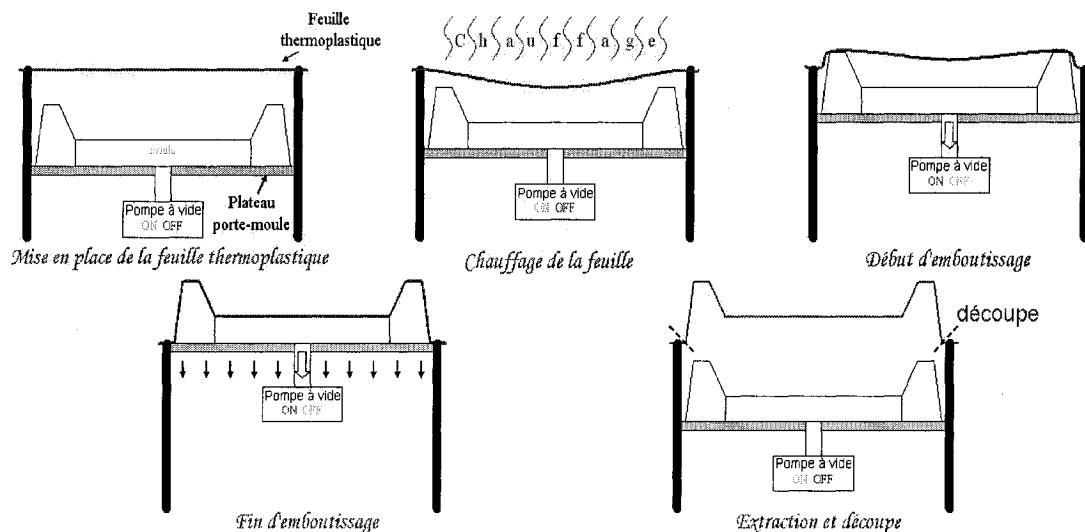


Figure 1-5 : Le procédé de thermoformage.

1.3. Procédés de fabrication des composites

A part la fabrication par laminage manuel, il existe deux grandes familles de procédés de fabrication des composites. La première famille, dite par « injection de résine sur renforts fibreux », nécessite l'utilisation de préformes dans lesquelles la résine va s'infiltre puis durcir par polymérisation. La seconde famille utilise des renforts

préimprégnés de résine. Ces renforts vont être directement mis en forme dans un moule avant cuisson dans un autoclave.

1.3.1. Procédés LCM

L'injection de résine sur renfort fibreux (procédés LCM, pour « *Liquid Composite Moulding* ») désigne un type de procédé de fabrication de matériaux composites dans lequel on place des fibres préformées dans un moule pour renforcer la structure de la pièce à fabriquer, puis on injecte une matrice polymère dans la cavité du moule. Après l'injection de résine, la pièce est durcie avant de procéder au démoulage. Les procédés LCM emploient surtout des résines thermodurcissables de basse viscosité. L'écoulement de la résine à travers un renfort fibreux est gouverné par la loi de Darcy, qui est le modèle général décrivant l'écoulement d'un fluide newtonien en milieux poreux.

1.3.2. Procédé RTM

Le principe du procédé RTM (« *Resin Transfer Moulding* ») ou injection en moule rigide est décrit à la Figure 1-6. A l'intérieur d'un moule rigide on place un renfort préformé (un tissu de fibres de verre par exemple) ; cette opération est appelée drapage dans le cas d'un renfort à fibres longues orientées. Ensuite on procède à l'injection de résine de faible viscosité sous une pression modérée (2 à 4 bars). Une fois cette étape achevée, la polymérisation (encore appelée cuisson) de la plaque a lieu avant le démoulage de la pièce.

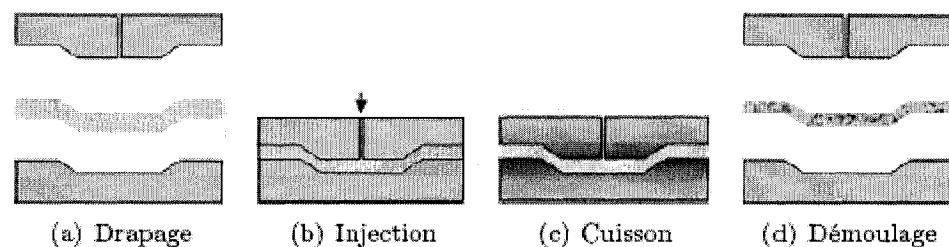


Figure 1-6 : Schéma de principe du procédé RTM.

1.3.3. Procédés d'infusion

Une autre famille de procédés LCM consiste à laisser la résine s'infiltre à travers un renfort fibreux recouvert par une bâche flexible sous laquelle on a fait le vide. Une variante de ces procédés est nommée VARI (« *Vacuum Assisted Resin Intrusion* »), dans laquelle un seul côté du moule est flexible. Les fibres sèches sont placées sur la matrice (ou poinçon) rigide du moule, puis on recouvre la préforme avec une bâche plastique et on applique du vide de façon à ce que la résine injectée puisse imprégner les fibres par infusion (voir Figure 1-7). L'injection est réalisée par gravité à basse pression et la résine pénètre le renfort grâce au gradient de pression qui se fait entre la pression atmosphérique du réservoir de résine et la pression du vide tiré par la pompe.

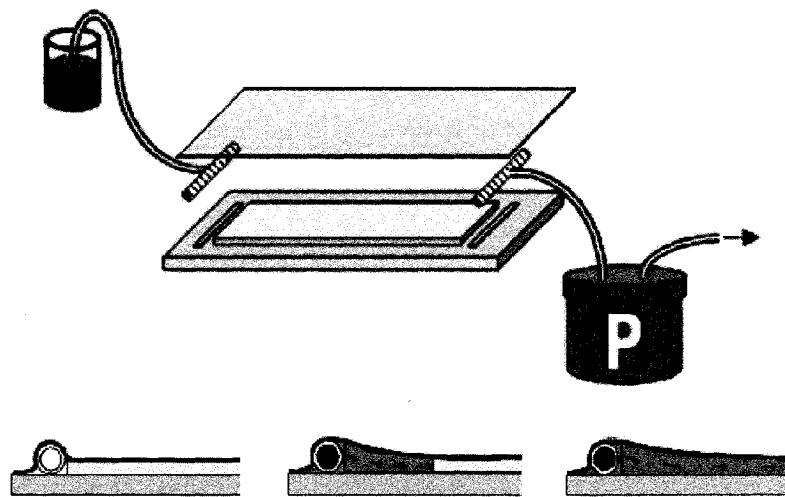


Figure 1-7 : Principe du procédé VARI.

1.3.4. Procédés de laminage manuel en autoclave

Le drapage manuel consiste à déposer sur un moule des nappes prédécoupées de tissus de fibres pré imprégnées, dont la matrice polymère est amenée à polymériser selon un cycle de cuisson bien défini dans un autoclave. On utilise des fibres pré imprégnées sous forme de tissus, continus ou coupés, unidirectionnels ou croisés, de rubans, voire de

mats à fibres. Lorsque tous les plis de rubans ou tissus ont été déposés, l'ensemble est recouvert d'un film démoulant, d'une ou plusieurs feuilles de tissu de verre, de papier ou de métal, perméables afin de laisser la résine polymériser librement.

Il existe plusieurs possibilités afin de chauffer un outillage sous vide. Un chauffage homogène en tous points de la pièce est important afin d'éviter des problèmes de consolidation de la structure. Le système utilisé (étuve, autoclave ou moule autonome) est déterminé en fonction de la dimension des pièces à réaliser. L'étuve est un dispositif qui permet de réaliser des pièces de grandes dimensions. Le système de chauffage doit permettre d'atteindre 250°C. L'autoclave (voir Figure 1-8) est une enceinte chauffée sous pression similaire à une étuve mais l'intérieur est hermétique et permet de monter la pièce en pression, généralement entre 50 et 100 psi. Les pièces composites fabriquées en autoclave sont de meilleure qualité, avec un contrôle plus précis de l'épaisseur et un faible taux de vide.

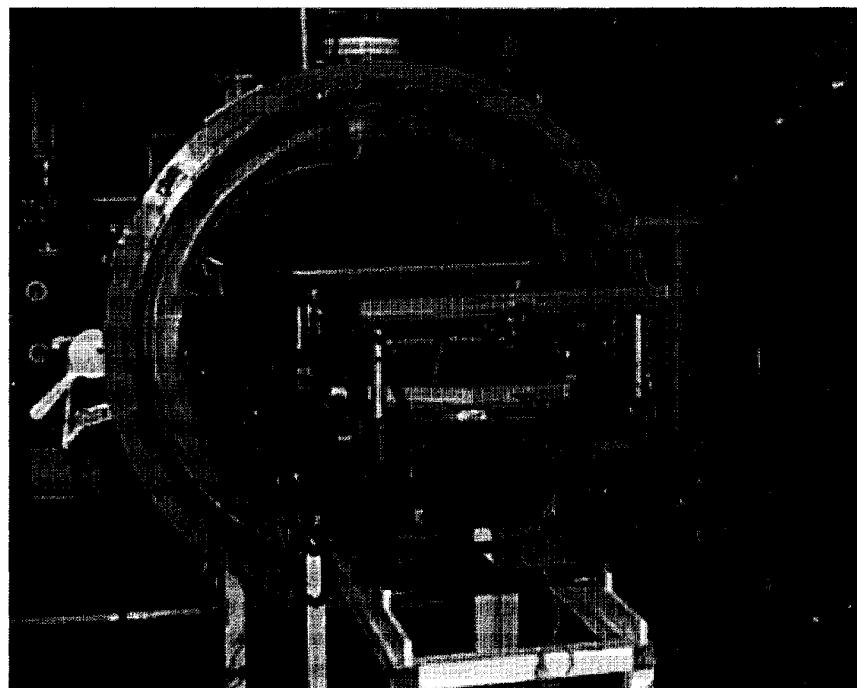


Figure 1-8 : Photographie d'un autoclave.

1.4. Influence du drapage sur l'épaisseur des tissus

Si on considère un rectangle de tissu qui se déforme selon un mouvement de pur cisaillement, les longueurs des côtés de cet élément ne sont pas modifiées (voir Figure 1-9). De même, le volume de fibre reste inchangé, puisqu'il s'agit d'un matériau incompressible.

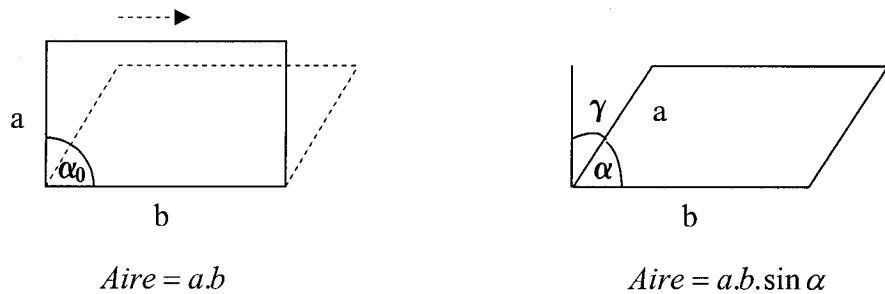


Figure 1-9 : Variation d'aire lors d'un cisaillement du tissu.

Comme le volume de l'élément demeure constant au cours de la transformation, la variation de l'épaisseur e va uniquement résulter de la variation d'aire. On obtient facilement que $V = e_0 * a * b = e_1 * a * b * \sin \alpha$ soit :

$$e_1 = \frac{e_0}{\sin \alpha} = \frac{e_0}{\cos \gamma} \quad (1.5)$$

où V est le volume de la cellule de tissu. Et $\gamma = 90 - \alpha$ est l'angle de cisaillement local. Cette relation indique clairement l'importance d'une connaissance précise des angles de cisaillement après drapage sur une surface courbe. De même en se plaçant au niveau du pli (fibre + résine), l'épaisseur reste inchangée, puisqu'elle dépend uniquement de la cavité du moule pour des procédés de type RTM. On obtient alors facilement que :

$$V_f = \frac{V_{fo}}{\sin \alpha} = \frac{V_{fo}}{\cos \gamma} \quad (1.6)$$

où V_{fo} et V_f sont respectivement les fractions volumiques avant et après cisaillement.

1.5. Influence du drapage sur la perméabilité des tissus

La perméabilité correspond à la capacité d'un matériau poreux à laisser passer un fluide à travers ses pores. Les premiers travaux sur la perméabilité d'un milieu poreux sont attribués à Henry Darcy (1803-1858) qui a défini la constante de proportionnalité K liant la vitesse de filtration au gradient de charge hydraulique en établissant la loi de Darcy en 1856. Dans la dernière décennie, plusieurs chercheurs ont consacré leurs travaux sur la recherche analytique et expérimentale de la perméabilité dans le domaine de l'écoulement de la résine dans un milieu poreux. Bien qu'elle puisse être considérée constante dans le cas isotrope, la perméabilité est un tenseur dans les trois directions principales orthogonales.

Il existe aujourd'hui un grand nombre de modèles mathématiques de perméabilité mais tous ont la forme de l'équation (1.7).

$$K = A \cdot f(V_f) \quad (1.7)$$

où A est une constante qui se détermine expérimentalement. La perméabilité est donc directement liée à la fraction volumique de fibre. L'équation de perméabilité la plus connue et la plus utilisée pour les tissus unidirectionnels est celle de Kozeny-Carman.

Pour recourir à la prédiction du tenseur de perméabilité de tissus bidirectionnels, E. Heardman et al. ont utilisé le principe de superposition de deux couches unidirectionnelles schématisées à la Figure 1-10. Ceci a permis d'obtenir la relation de

l'équation (1.8), liant le tenseur de perméabilité du tissu aux tenseurs de perméabilité des unidirectionnels qui le composent.

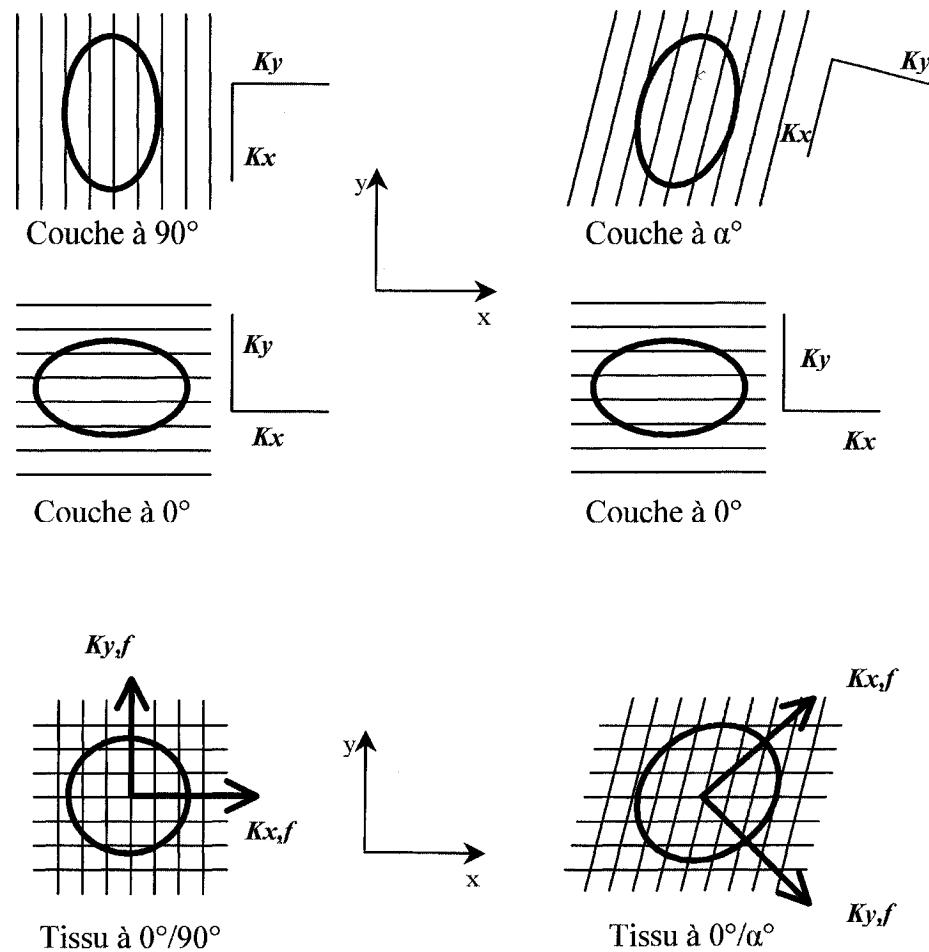


Figure 1-10 : Perméabilités majeures planes (K_x) et mineures planes (K_y) de couches unidirectionnelles et bidirectionnelles. L'ellipse indique le front d'écoulement de la résine.

$$\begin{aligned}
 K_{x,f} &= \frac{1}{2} \cdot (K_{x,L1} + K_{x,L2}) \\
 K_{y,f} &= \frac{1}{2} \cdot (K_{y,L1} + K_{y,L2}) \\
 K_{x,y,f} &= \frac{1}{2} \cdot (K_{x,y,L1} + K_{x,y,L2})
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

où K_{xf} (respectivement K_{yf}) est la perméabilité plane majeure (respectivement mineure) du tissu bidirectionnel, $K_{x,Li}$ (respectivement $K_{y,Li}$) est la perméabilité plane majeure (respectivement mineure) de la couche i . $K_{x,y,f}$ (respectivement $K_{x,y,Li}$) est la troisième composante du tenseur de perméabilité du tissu (respectivement de la couche i).

Notons que les valeurs des perméabilités doivent être suivant les mêmes directions. Un changement de repère doit alors s'effectuer pour obtenir les perméabilités majeures ou mineures de chaque couche suivant une même direction.

Le tenseur de perméabilité d'un tissu unidirectionnel devient après changement de repère le tenseur suivant (équation (1.9)) :

$$\begin{aligned}
 K_{(x,x)} &= K_y \cos^2 \gamma + K_x \sin^2 \gamma \\
 K_{(y,y)} &= K_x \cos^2 \gamma + K_y \sin^2 \gamma \\
 K_{(x,x)(y,y)} &= (K_x - K_y) \sin \gamma \cos \gamma
 \end{aligned} \tag{1.9}$$

où $K_{(x,x)}$, $K_{(y,y)}$ et $K_{(x,x)(y,y)}$ représentent les trois composantes du tenseur d'un unidirectionnel dans un repère tourné d'un angle $\alpha=90-\gamma$ par rapport à la direction des fibres. K_x et K_y , sont les perméabilités majeure et mineure d'un unidirectionnel.

En utilisant les équations (1.8) et (1.9), il est possible d'exprimer le tenseur de perméabilité d'un tissu bidirectionnel cisaillé en son plan d'un angle γ en fonction des perméabilités des deux couches unidirectionnelles obtenues expérimentalement. Ceci donne clairement la relation entre l'angle de cisaillement et la perméabilité d'un tissu bidirectionnel.

1.6. Influence du drapage sur les propriétés mécaniques des tissus

Les changements d'orientation des fibres ainsi que la variation de leur fraction volumique vont induire une distribution inhomogène des propriétés mécaniques de la pièce composite. Dans ce paragraphe, les matrices de rigidité du composite seront évaluées dans le cadre d'une théorie des laminés plats. On veut évaluer les conséquences mécaniques d'un cisaillement tel que décrit à la Figure 1-11.

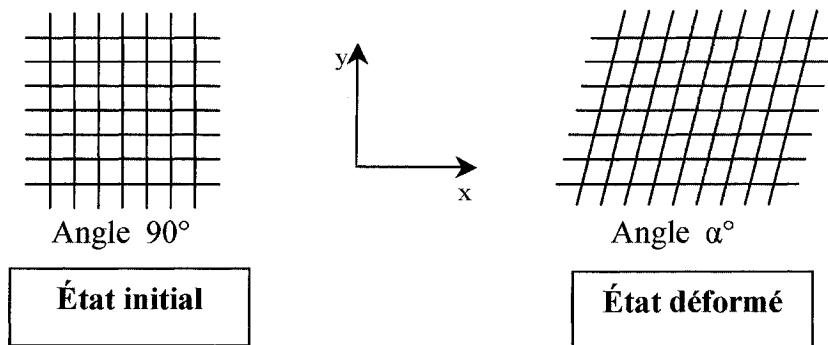


Figure 1-11 : Cisaillement d'un pli de tissu bidirectionnel.

Chaque rectangle de tissu peut être modélisé comme étant la combinaison de 2 couches unidirectionnelles, à 0 et 90° avant déformation, et à 0 et α° après cisaillement d'angle $\gamma = 90 - \alpha$, ceci est visualisable à la Figure 1-12. Chaque couche de tissu unidirectionnel a des propriétés mécaniques suivant les directions principales 1 et 2 (où 1 est la direction des fibres et 2 est la direction perpendiculaire à 1). En remarquant que la fraction volumique de fibres de chaque couche unidirectionnelle varie dans les mêmes proportions que la fraction volumique de fibres totale, on peut évaluer les propriétés élastiques de chaque couche. Ainsi, on obtient les équations suivantes (P.K. Mallick, 1993), valables pour chaque couche unidirectionnelle, où les indices f font référence aux fibres tandis que les indices m font référence à la matrice de résine.

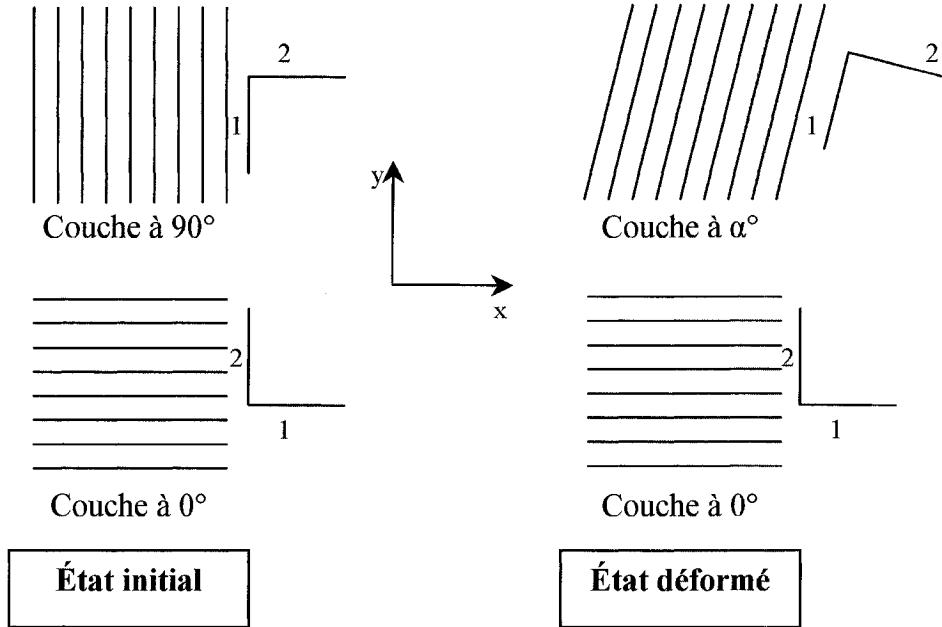


Figure 1-12 : Décomposition des tissus selon 2 directions principales.

$$\left\{
 \begin{array}{ll}
 \text{module d'Young longitudinal} & \text{module d'Young transversal} \\
 E_{11} = E_f V_f + E_m (1 - V_f) & \frac{1}{E_{22}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{(1 - V_f)}{E_m} \text{ soit } E_{22} = \frac{E_f E_m}{E_f (1 - V_f) + E_m V_f} \\
 \text{coefficient de Poisson majeur} & \text{coefficient de Poisson mineur} \\
 v_{12} = v_f V_f + v_m (1 - V_f) & v_{21} = \frac{E_{22}}{E_{11}} v_{12} \\
 \text{module de cisaillement} & \\
 \frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{(1 - V_f)}{G_m} \text{ soit } G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_f (1 - V_f) + G_m V_f} &
 \end{array}
 \right. \quad (1.10)$$

Remarque : nous avons supposé ici que le composite ne contient pas de vide, ce qui s'exprime simplement par la relation : $V_f + V_m = 1$.

1.7. Méthodes de mise en forme numérique

Les simulations numériques de mise en forme sont importantes pour les ingénieurs de conception. En effet, comme il a été montré dans les paragraphes précédents, l'orientation des fibres est directement responsable des propriétés mécaniques et physiques du futur composite. Il a aussi été vu que les techniques de mise en forme actuelles induisaient des déformations au sein du tissu. Nous allons maintenant voir les deux plus grandes familles de mise en forme numérique. Les techniques numériques les plus anciennes et les plus faciles sont les techniques dites géométriques. Aucune connaissance du comportement constitutif du matériau composite n'est exigée. Les seules informations dont on a besoin sont les caractéristiques géométriques du tissu à mettre en forme ainsi que de la géométrie du moule sur lequel on désire mettre en forme le tissu.

Par opposition à ces techniques géométriques, il existe des techniques mécaniques. Les techniques mécaniques utilisent une approche pas à pas du calcul de la solution finale afin de mettre à jour les propriétés matérielles ainsi que la forme du tissu pendant la simulation. Tandis que les approches géométriques donnent une transformation en une étape d'une feuille de tissu dans la forme finale avec une quantité minimum de calculs, les approches mécaniques sont plus riches en détails. Ces deux approches sont ici présentées dans le cas d'un tissu bidirectionnel.

1.7.1. Approche géométrique

L'approche géométrique est basée sur ces trois hypothèses:

- matériel incompressible,
- fibres inextensible,
- pour chaque cellule du tissu, la rotation est libre, sans friction entre les directions de trame et de chaîne. Le tissu se déforme alors en cisaillement pur comme le montre la Figure 1-13. La variation de l'air due au cisaillement du matériau incompressible induit alors une surépaisseur du tissu donc de la préforme.



Figure 1-13: Déformation en cisaillement d'un tissu.

A partir de ces hypothèses, le tenseur de déformation, λ_{ij} , peut être écrit sous la forme suivante:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & 0 \\ \gamma & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\gamma^2)^{-1} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

pour les termes où $i=j$, il s'agit des déformations longitudinales alors que pour les autres termes, il s'agit de déformations en cisaillement ($\gamma = c/a$).

Quand la géométrie à mettre en forme est simple ou facilement définie, comme pour les surfaces hémisphériques ou cylindriques, on peut exprimer la méthode géométrique par les méthodes analytiques, qui donnent la solution exacte. Des formes plus complexes

exigent des solutions numériques. La simulation numérique consiste à tracer les nœuds d'un tissu bidirectionnel sur la surface tout en respectant l'équation (1.11) (i.e. déformation en cisaillement plan uniquement) sans que le tissu n'atteigne son angle de blocage. Dans l'algorithme *fishnet*, généralement utilisé, un nœud (i, j) peut être trouvé comme intersection sur la surface de deux sphères de rayon dX , provenant des nœuds $(i-1, j)$ et $(i, j-1)$ suivant les indications de la Figure 1-14. L'algorithme trouve alors les positions d'une série de nœuds situés sur la surface sur laquelle le tissu est mis en forme. Quelques difficultés sont rencontrées avec ce type d'algorithme pour manipuler les trous et pour localiser les frontières de la surface.

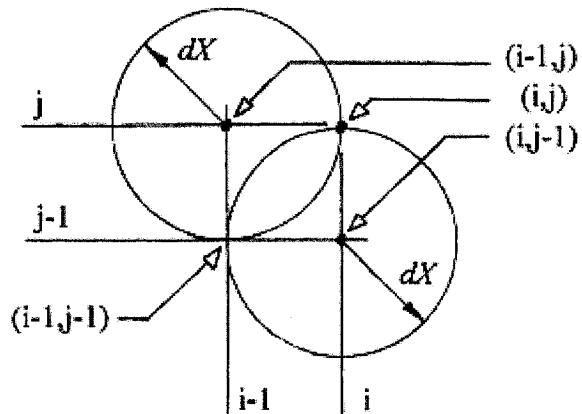


Figure 1-14: Approche géométrique du drapage.

À cause de la courbure de la surface et du principe de l'algorithme, il existe une erreur cumulée pour chaque nouvelle position de nœud comme le montre la Figure 1-15.

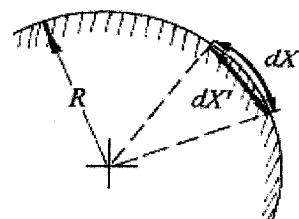


Figure 1-15 : Erreurs de l'approche géométrique sur les surfaces courbes.

Des améliorations peuvent être faites pour corriger la distance entre 2 nœuds à dX' au lieu de dX ou en remplaçant la surface de la sphère par une mosaïque des facettes plates, mais des facettes relativement petites sont exigées pour avoir une bonne exactitude.

1.7.2. Approche mécanique

Dans le cas des tissus secs, des relations mécaniques constitutives sont définis dans l'hypothèse que le matériel est imbibé de matrice (pré-imprégné ou pulvérisé avant mise en forme). Cette hypothèse implique que la feuille se déforme de façon plastique. Des modèles élastoplastiques sont employés pour calculer la déformation de feuille. Les paramètres mécaniques requis pour calculer la déformation des tissus sont le module de Young (E) le long des deux directions des fibres, le module de cisaillement (G) et l'angle de blocage au-dessus duquel des rides apparaissent. Les algorithmes employés par les logiciels de calcul par la méthode des éléments finis travaillent nœud par nœud afin de trouver l'équilibre dynamique pour chaque itération. Deux types différents d'algorithme peuvent alors être mis en application : les algorithmes implicites et explicites. Le principe de l'intégration explicite et implicite d'un système d'une dimension avec un degré de liberté est illustré à l'aide d'un système linéaire masse-ressort (voir Figure 1-16).



Figure 1-16: Système linéaire masse-ressort.

L'équation d'équilibre du ressort est:

$$m.A_n + k.X_n = F(t) \quad (1.12)$$

où n est l'incrément de temps, X_n est la position à T_n et A_n est l'accélération à T_n

Méthode explicite

Dans la méthode explicite, les vitesses nodales sont notées aux temps $T_{n-1/2}$, $T_{n+1/2}$, les déplacements et les accélérations nodaux aux temps T_{n-1} , T_n , T_{n+1} . Au temps T_n le déplacement nodal X_n est connu et l'accélération A_n est calculée à partir des forces internes et externes. La vitesse nodale $V_{n-1/2}$, est connue au temps $T_{n-1/2}$. L'algorithme recherche la vitesse nodale $V_{n+1/2}$ au temps $T_{n+1/2}$ et le déplacement nodal X_{n+1} au temps T_{n+1} . L'application du schéma central de différence finie donne la vitesse nodale au temps $T_{n+1/2}$ et le déplacement nodal au temps T_{n+1} (supposant que le ΔT_n est petit). L'équation (1.13) décrit alors le système numérique à résoudre :

$$\begin{aligned} A_n &= m^{-1}(F_n(t) - k.X_n) \\ A_n &= \frac{V_{\frac{n+1}{2}} - V_{\frac{n-1}{2}}}{(\Delta T_{n-1} + \Delta T_n)/2} \\ V_{\frac{n+1}{2}} &= \frac{X_{n+1} - X_n}{\Delta T_n} \end{aligned} \quad (1.13)$$

Pour des processus complexes (autre que des systèmes 1D) m est une matrice. Si m est diagonale, il est immédiat de calculer l'inverse de cette matrice. Malheureusement, cette méthode est stable uniquement pour de petites valeurs de temps, ΔT_n .

Méthode implicite

L'algorithme implicite est une manière classique de résoudre des problèmes statiques et quasi-statiques non linéaires. Même s'il n'est pas disponible dans les logiciels commerciaux pour simuler la mise en forme, son principe général est présenté ci-dessous. À chaque incrément, le solveur essaye automatiquement de trouver la solution d'un ensemble d'équations non linéaires, en utilisant des itérations linéaires, connues sous le nom d'itérations de Newton.

Itérations de Newton:

$F(u) = F_{ext}$ ($F_{ext} = 0$ dans le cas d'un système masse-ressort)

$$F(u) = F(0) + \delta F/\delta u(0) \cdot \delta u \quad \delta u_1 = K^I(0)(F_{ext} - F(0)) \quad u_1 = \delta u_1$$

$$F(u) = F(u1) + \delta F/\delta u(u1) \cdot \delta u \quad \delta u_2 = K^I(u1)(F_{ext} - F(u1)) \quad u_2 = \delta u_1 + \delta u_2$$

Soit, $u_n = \delta u_1 + \delta u_2 + \dots + \delta u_n$, le déplacement. La convergence est atteinte quand $|\delta u_n|/\text{Max}(|\delta u_i|) < \text{tolérance}$.

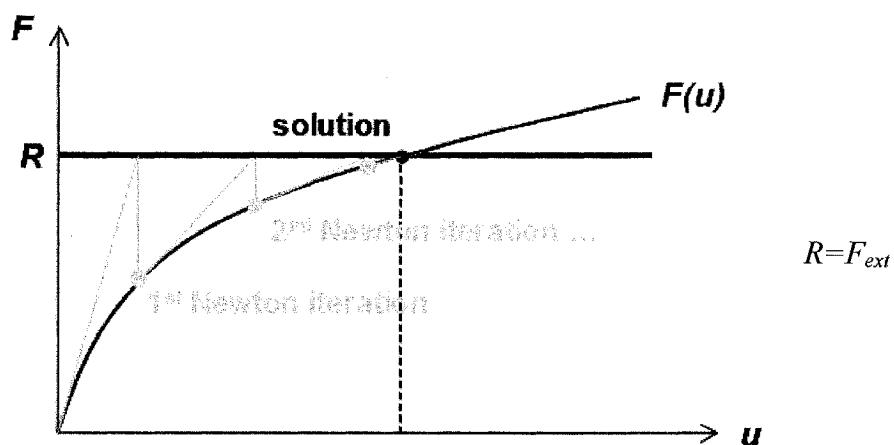


Figure 1-17 : Itération de Newton.

Comparé à l'approche explicite, la méthode implicite exige l'inversion d'une matrice pleine à chaque itération de newton, mais présente moins de problèmes de convergence. Seulement la méthode explicite ne peut fonctionner que pour des pas de temps très petits, on l'utilise généralement pour étudier des tests d'impact.

1.8. Conclusion

Dans ce chapitre, il a été montré combien l'orientation des fibres était importante pour la fabrication des composites. En effet c'est à partir de ces orientations que seront définies les propriétés mécaniques et physiques du composite. Il existe aujourd'hui différentes méthodes de fabrication de composites. Et pour beaucoup d'entre elles, l'investissement matériel est très lourd et ne convient pas pour des productions de séries moyennes. Les méthodes dites RTM (« *Resin Transfert Molding* ») sont plus appropriées pour ce type de production mais nécessitent souvent l'utilisation de préforme afin d'éviter le « *fiber washing* ». De la même façon les techniques de préformage élaborées sont très dispendieuses. La solution simple consiste donc à draper manuellement le tissu sur une surface et à le pulvériser de résine. Il est maintenant intéressant de se concentrer sur les prédictions numériques de l'orientation des fibres si un tel dispositif de drapage est utilisé. En effet, les deux principaux algorithmes de mise en forme de tissu ont été présentés, le prochain chapitre traitera donc de l'aspect numérique de la simulation de drapage appliquée à un logiciel commercial : *Patran Laminate Modeler*. Afin d'effectuer un choix parmi les différents logiciels commerciaux existants, une étude comparée a été réalisée et est présentée en Annexe A.

2. CHAPITRE 2 : ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA MISE EN FORME

2.1. Introduction générale et rappel de quelques définitions mathématiques

2.1.1. Introduction générale

Dans le chapitre précédent, il a été montré combien la prédition de l'orientation des fibres était importante. Un logiciel commercial de simulation de drapage de renforts tissés, *Patran Laminate Modeler*, a été choisi parmi plusieurs autres après avoir réalisé un tableau comparatif (voir Annexe A). Il est maintenant important de définir les limites de ce logiciel en ce qui concerne les simulations de drapage et la mise à plat des renforts tissés. Dans un premier temps, les différentes possibilités offertes par le logiciel commercial *Patran Laminate Modeler* de la société MSC.Software en termes de drapage sont étudiées. Dans un deuxième temps, toutes les possibilités préalablement décrites sont testées en termes de stabilité pour une pièce à double courbure suivant une méthodologie décrite à la section 2.4.2. Un diagramme fonctionnel du logiciel *Patran Laminate Modeler* est également présenté puis la simulation du drapage est appliquée à une pièce réelle afin d'illustrer cette démarche.

2.1.2. Surface réglée

Une *surface réglée* est une surface qui est générée par le déplacement d'une génératrice. Deux courbes directrices peuvent définir une infinité de surfaces réglées par déplacement d'une ligne directrice joignant les deux courbes. La Figure 2-1 illustre quelques exemples de surfaces réglées.

2.1.3. Surface développable

Une *surface développable* est une *surface* dont la *génératrice* est une *parabole*. Le plan tangent à la surface est le même le long d'une génératrice (voir Figure 2-1). Les exemples les plus courants de surfaces développables sont les cylindres. Du point de vue de la fabrication, les surfaces développables sont intéressantes, puisqu'elles peuvent toujours être fabriquées à partir d'un tissu sans créer de cisaillement au sein de son plan. La solution de drapage est alors unique et ne dépend pas des paramètres de drapage, c'est-à-dire des facteurs suivants :

- point d'application (premier point de contact entre le renfort et la surface du moule) ;
- direction d'application (direction suivant laquelle le tissu va être déposé) ;
- mise en place du tissu (représentée par l'option de l'algorithme sous *Patran Laminate Modeler*).

2.1.4. Surface non développable

Une *surface non développable* est caractérisée par une double courbure dans deux directions différentes. Beaucoup de surfaces réelles sont non développables. En effet, bien qu'elles soient plus difficiles à fabriquer que les surfaces planes ou développables, elles donnent plus de rigidité et de force aux structures, ce qui est très recherché dans le domaine des matériaux composites.

Du point de vue de la fabrication, les surfaces non développables ne peuvent pas être formées par un même tissu sans cisaillement. La solution de drapage pour une surface non développable n'est plus unique et dépend fortement du point de démarrage de la simulation, de la direction selon laquelle le drapage est réalisé, ainsi que des propriétés du matériau utilisé. Une fois ces paramètres définis, la solution devient unique.

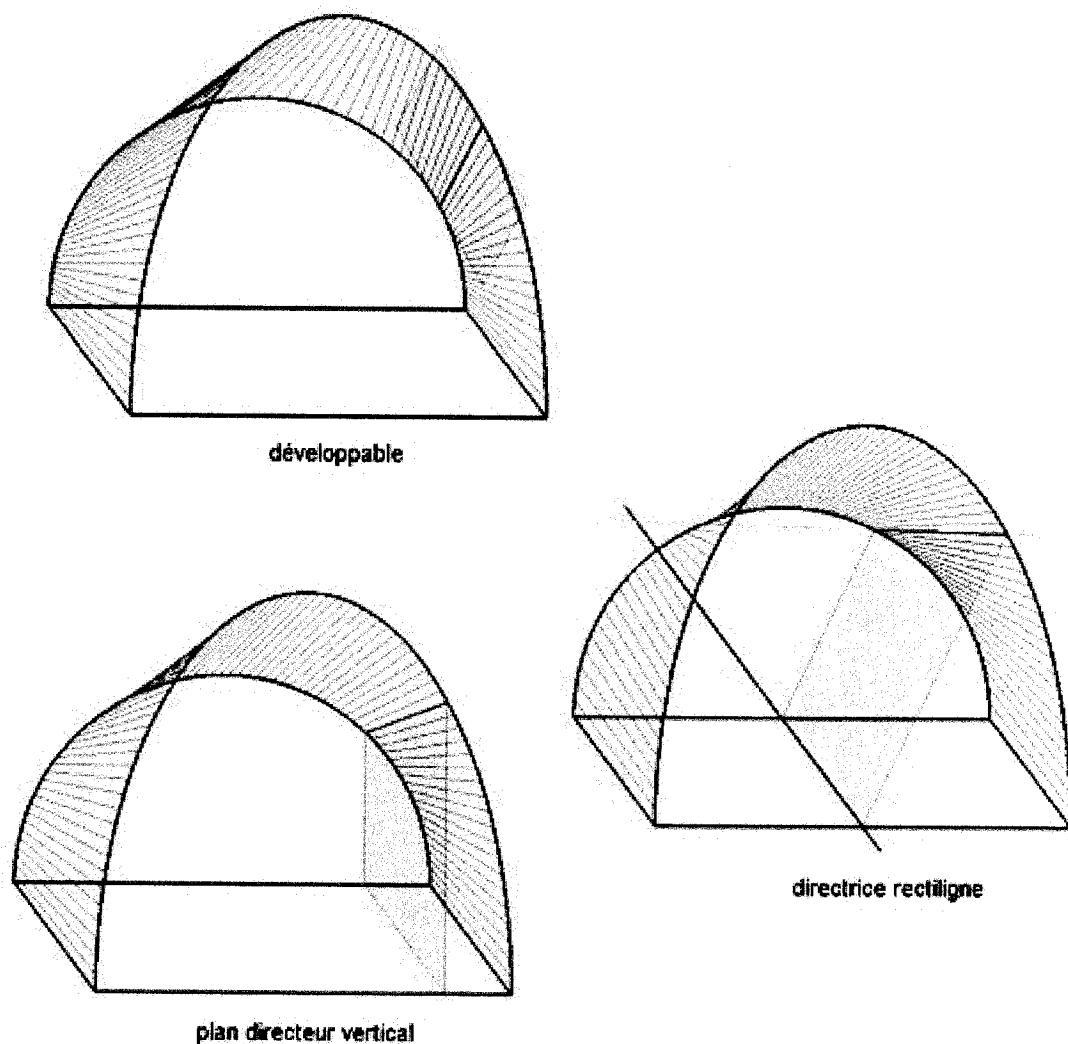


Figure 2-1 : Exemples de surfaces réglées.

2.1.5. Ligne géodésique

Les *lignes géodésiques* sont les courbes tracées sur une surface telles qu'en chaque point la normale principale à la courbe (si elle existe) coïncide avec la normale à la surface. Ces lignes suivent au mieux les courbures de la surface et représentent les trajectoires les plus courtes entre deux points sur la surface.

2.2. Différentes méthodes de drapage offertes par le logiciel *Patran Laminate Modeler*

2.2.1. Introduction

Il est important maintenant de déterminer les capacités de mise en forme du logiciel *Patran Laminate Modeler*. A cette fin, une surface à double courbure (non développable) est créée à l'aide du logiciel *Catia V5* de la société DASSAULT SYSTEMES. Les limites d'utilisation du logiciel sont étudiées dans la suite de ce chapitre.

Les différents paramètres de drapage nécessaires à l'algorithme de *Patran Laminate Modeler* sont résumés à la Figure 2-2. Dans un premier temps, un maillage structuré de la pièce à étudier est requis. Les nœuds du maillage sont ensuite traités par l'algorithme, qui produit une nouvelle distribution géométrique des nœuds. Cette nouvelle distribution reflète la déformation en cisaillement du tissu après avoir été drapé. La seule manière de draper un tissu sur une surface tridimensionnelle complexe est de permettre une déformation en cisaillement entre la trame et la chaîne du tissu. L'algorithme exige comme données d'entrée un certain nombre d'informations de base sur les paramètres du tissu tels que la longueur de la cellule unitaire, l'épaisseur du tissu, l'angle de blocage, ainsi que des paramètres du drapage tels que le point et la direction d'application, la direction de référence et l'angle de référence. Un modèle de drapage doit également être choisi parmi une série de modèles disponibles. L'algorithme permet alors d'obtenir toute une série de résultats tels que l'angle de cisaillement et l'épaisseur maximale du tissu.

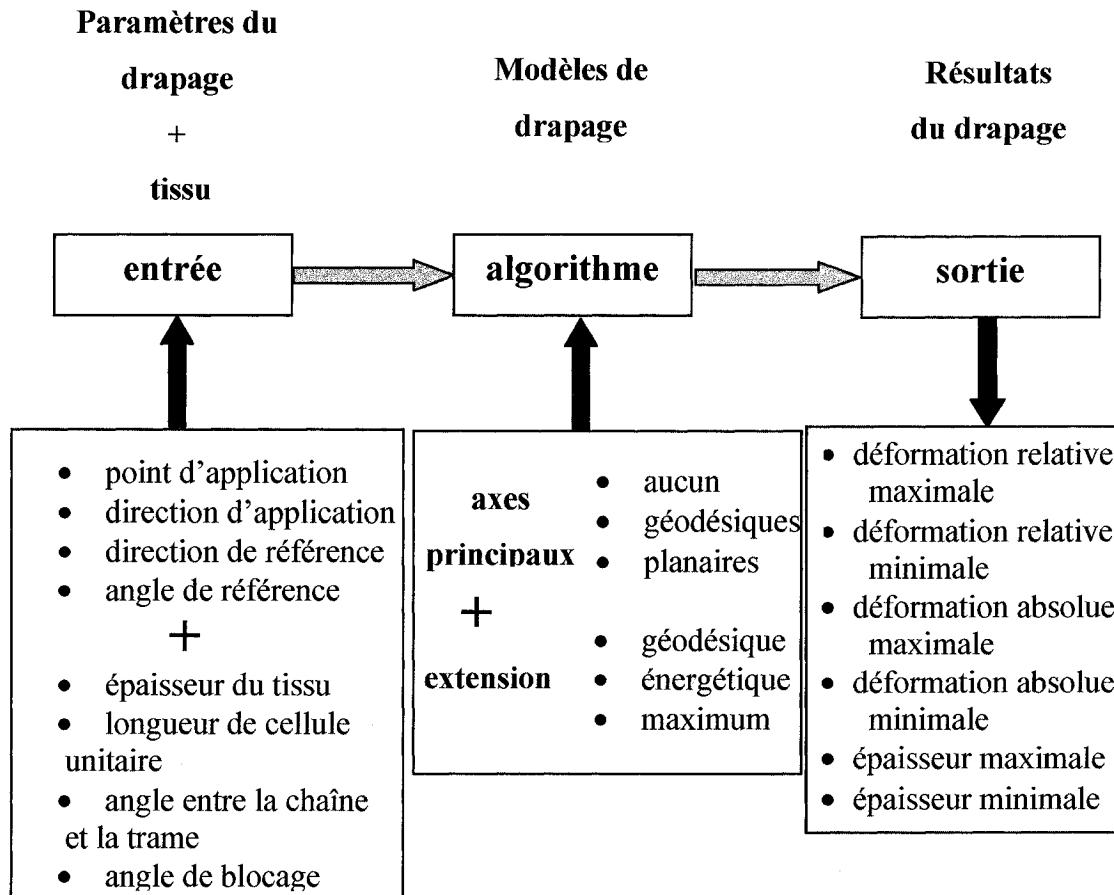


Figure 2-2 : Diagramme fonctionnel de *Patran Laminate Modeler*.

2.2.2. Algorithme de drapage

Patran Laminate Modeler emploie un algorithme de drapage géométrique. Les dimensions d'une cellule de tissu sont définies comme suit :

θ_0 : angle initial entre la trame et la chaîne,

θ : angle après contrainte de cisaillement,

a : longueur unitaire de la cellule.

Chaque intersection entre la trame et de la chaîne du tissu est associée à un nœud dans l'algorithme qui exécute un calcul itératif donnant la nouvelle position de ce nœud sur la surface grâce aux positions de ses trois voisins les plus proches le long des directions de chaîne et de trame de la cellule du tissu. Seules les contraintes de cisaillement sont prises en considération dans ce type d'algorithme. En particulier, on ne permet aucune élongation des fibres. La Figure 2-3 illustre la contrainte de cisaillement de la cellule de tissu après avoir été drapée sur une surface tridimensionnelle

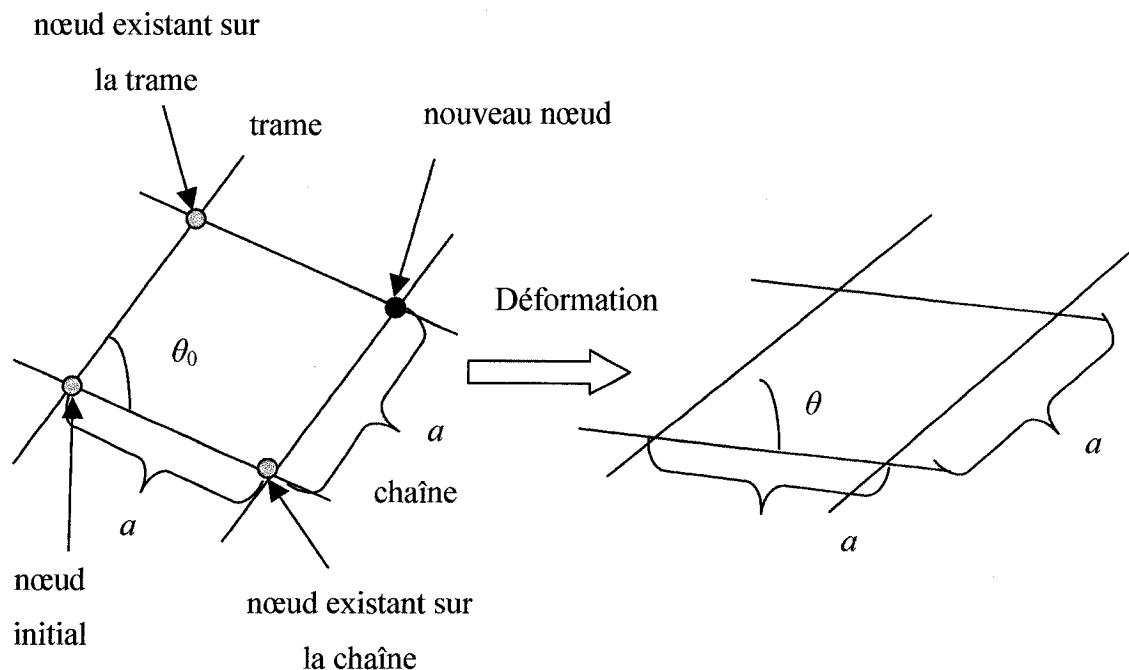


Figure 2-3 : Définition de la contrainte de cisaillement d'une cellule de tissu.

2.2.3. Paramètres de drapage

Les paramètres de drapage de *Patran Laminate Modeler* sont décrits sur la Figure 2-4 :

- **point d'application** (point de départ de l'algorithme);

- **direction d'application** (direction d'application de l'algorithme de drapage);
- **direction de référence** (direction de référence de l'algorithme de drapage);
- **angle de référence** (angle entre la direction de référence et l'orientation initiale de chaîne au point de départ);
- **modèles de drapage** (paramètres additionnels définissant le modèle choisi pour mettre en application l'algorithme de drapage).

Point d'application

C'est le point de départ de la simulation de drapage, il correspond au point de la surface où le pli est d'abord placé puis draper. Si le point d'application n'appartient pas à la surface, il est projeté sur la surface le long de la direction d'application. Il est habituel de démarrer la simulation de drapage au centre de la surface à draper.

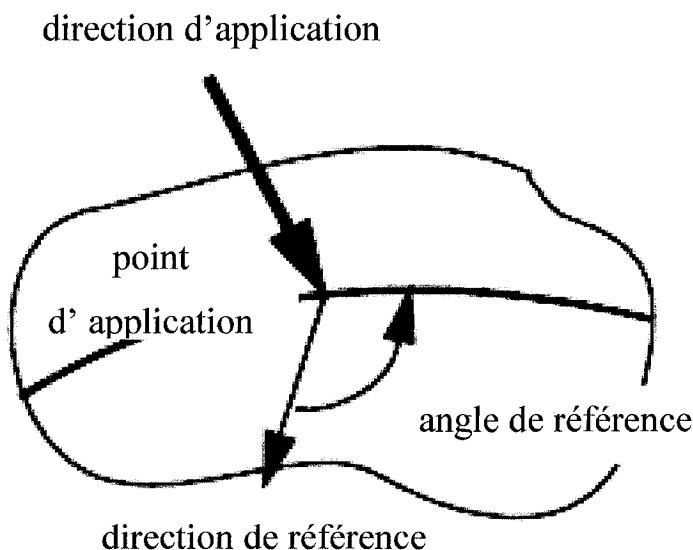


Figure 2-4: Définitions des paramètres de drapage de *Patran Laminate Modeler*.

Direction d'application

La direction d'application est employée pour projeter la direction de référence et le point d'application sur la surface à draper.

Direction de référence

La direction de référence est employée pour indiquer la direction de drapage initiale du tissu. On projette ce vecteur d'entrée sur la surface le long de la direction d'application. La direction de référence définit alors l'axe principal (la chaîne) du tissu au point de départ de la simulation.

Angle de référence

Il est possible de faire pivoter la direction de référence d'un angle défini à l'aide de ce paramètre.

Modèles de drapage

Les modèles de drapage représentent les différentes manières de mettre en application l'algorithme de drapage. Les modèles disponibles seront décrits dans la suite.

2.2.4. Mécanismes du drapage

Patran Laminate Modeler permet de réaliser des drapages de type géométrique. Comme il a été défini dans le premier chapitre, le drapage géométrique consiste à simuler le développement du renfort sur une surface, alors que le formage mécanique concerne la mise en forme mécanique d'un renfort entre un poinçon et une matrice (Figure 2-5). Le formage mécanique est généralement simulé à l'aide de logiciels de calcul structurel utilisant la méthode des éléments finis et tient compte des propriétés mécaniques du

renfort alors que pour la méthode géométrique, ces propriétés n'interviennent pas dans le calcul. Le principe du drapage géométrique consiste à reporter à partir d'un point la longueur d'une cellule de renfort sur une surface à draper en suivant des lignes directrices qui correspondent aux différentes options du logiciel *Patran Laminate Modeler*. Il est possible d'utiliser différentes options de drapage géométrique.

Le premier paramètre à définir pour la simulation se situe à un niveau local : *Patran Laminate Modeler* est capable de simuler le drapage de plis unidirectionnels (*Slide Draping Mechanism*) et de tissus bidirectionnels (*Scissor Draping Mechanism*). Le module *Patran Laminate Modeler* est aussi capable de draper des matériaux isotropes (*Painted*) ou de projeter selon une direction les matériaux orthotropes (*Projection*).

Dans un deuxième temps, l'utilisateur doit spécifier le procédé de drapage en choisissant un modèle de drapage global (*Global Draping Models*). La Figure 2-6 présente les fenêtres d'entrée de données de *Patran Laminate Modeler*.

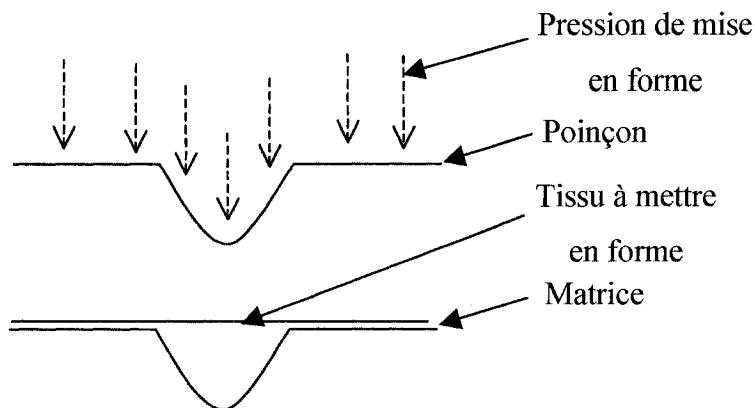


Figure 2-5 : Exemple de formage mécanique.

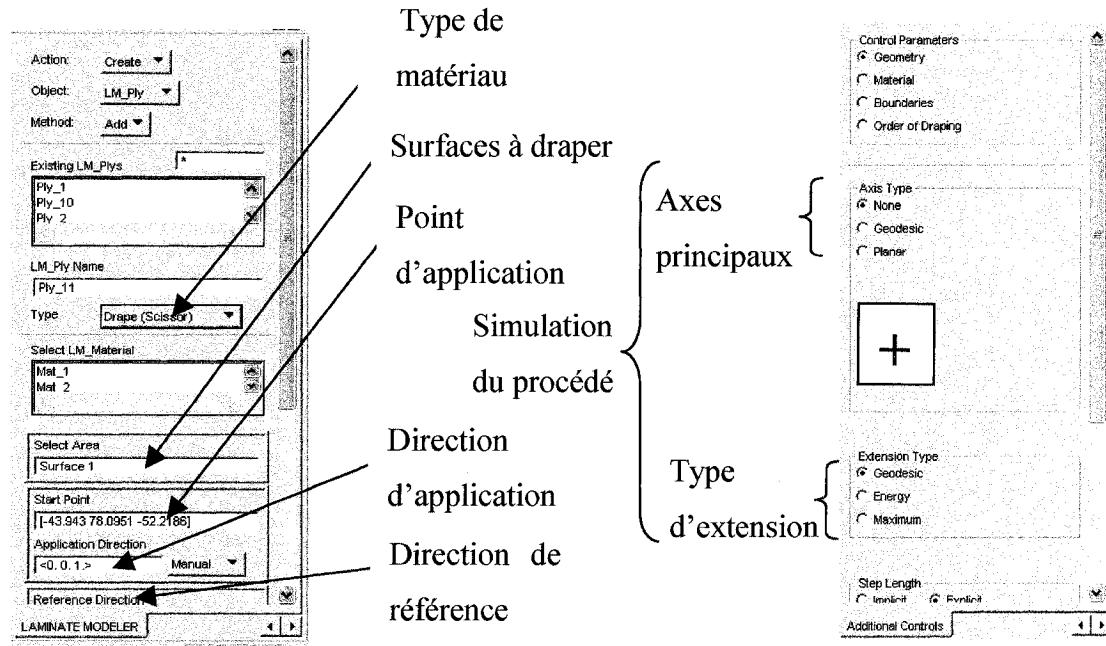


Figure 2-6 : Paramètres de simulation de drapage.

2.2.5. Modèles de drapage globaux

La première étape consiste à choisir la méthode de placement du tissu à draper sur la géométrie. Ceci n'est pas facile, car la solution n'est pas unique pour les surfaces non développables et il existe alors une infinité de possibilités. C'est pourquoi il est très important de connaître les différentes options de simulation possibles afin de pouvoir choisir celle qui correspond au procédé de drapage. Le logiciel *Patran Laminate Modeler* supporte quatre options différentes pour l'algorithme de drapage : géodésique, planaire, énergétique et maximum. Certaines de ces options sont utilisées lors du démarrage de la simulation pour définir les **axes principaux de drapage** (plans de la chaîne et de la trame), et d'autres pour définir **l'extension du drapage**, c'est-à-dire les directions selon lesquelles le tissu est drapé sur le reste de la surface.

Les **axes principaux** peuvent être de type **planaire**, **géodésique** ou **ne pas être utilisés**. Si les axes principaux sont utilisés lors de la simulation, ils permettent de contraindre en premier lieu le pli uniquement dans la région délimitée par ces axes, puis le drapage est étendu au reste de la surface en suivant le type d'extension (voir Figure 2-7). Si aucun axe principal n'est défini, l'extension se fait à partir du point d'application de la simulation dans toutes les directions en utilisant les axes définis par l'extension pour toute la surface (voir Figure 2-8). Du point de vue de la fabrication, les axes principaux permettent de définir des directions principales de drapage.

L'**extension** peut être de type **géodésique**, **énergétique** et **maximum**. Tel qu'il a été déjà mentionné, l'extension permet de définir les axes de drapage dans la région non délimitée par les axes principaux.

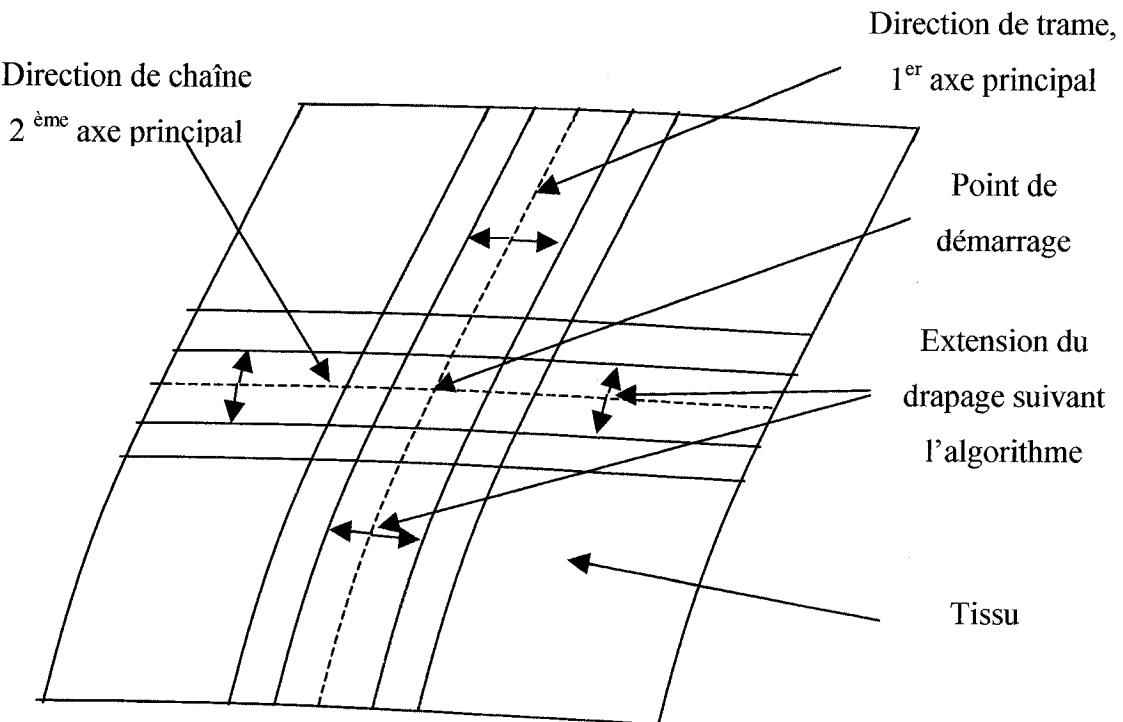


Figure 2-7 : Extension du drapage avec axes principaux.

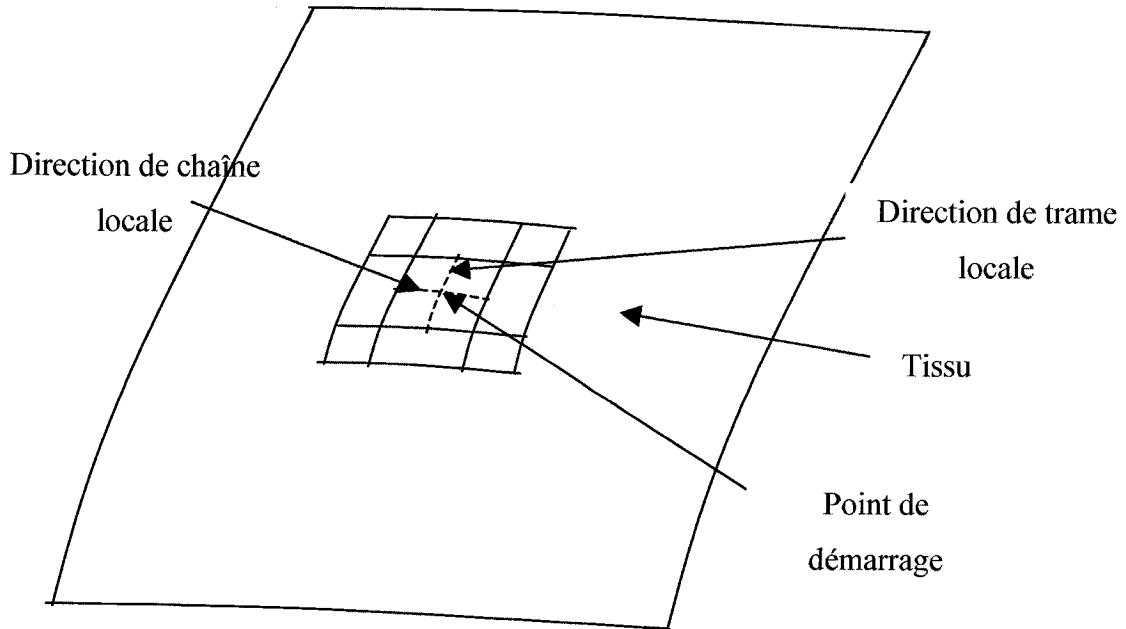


Figure 2-8 : Extension du drapage sans axes principaux.

2.2.6. Option géodésique

Pour l'option géodésique, qui peut être utilisée pour définir les axes principaux ou l'extension, le drapage est réalisé à partir du point d'application le long des *lignes géodésiques* de la surface. Cette option semble être la méthode de drapage la plus naturelle et la plus appropriée pour simuler le positionnement conventionnel des plis d'une pièce composite (empilement manuel). En effet, en utilisant les lignes géodésiques, le drapage suit les lignes « naturelles » de la surface, c'est-à-dire les lignes de courbure de la surface. Notons que les axes géodésiques sont très dépendants du point d'application, notamment dans les zones où le rayon de courbure est important. Ceci pourrait causer des problèmes de stabilité si le choix des axes principaux se fait par la méthode géodésique (voir Figure 2-9).

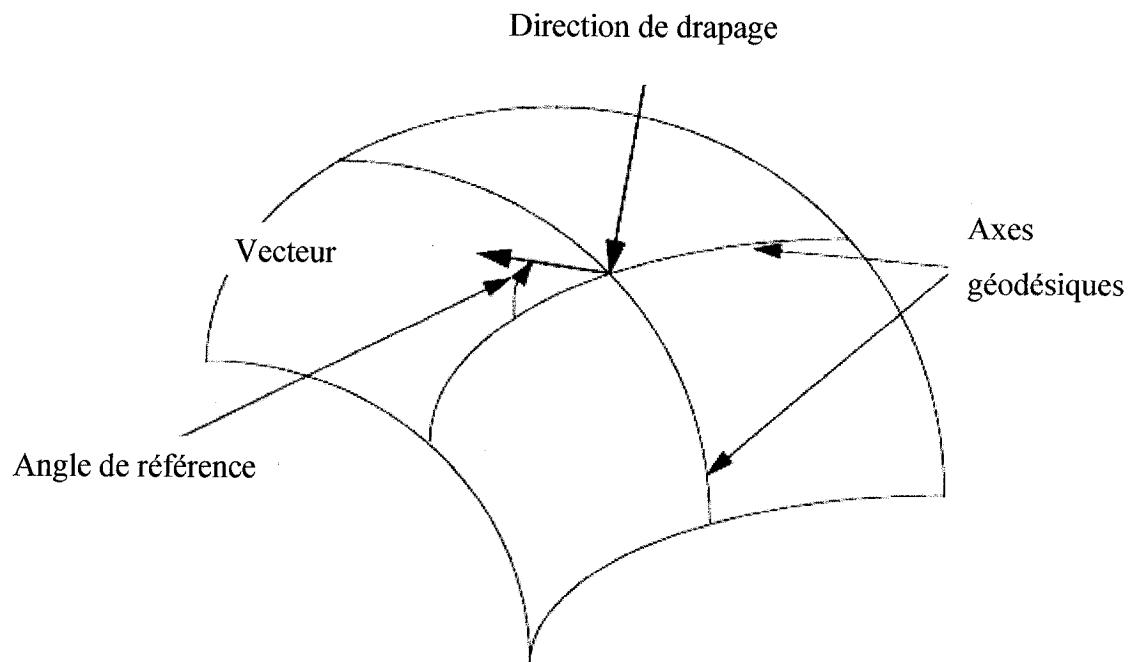


Figure 2-9 : Option géodésique.

2.2.7. Option planaire

L’option planaire sert uniquement à définir les axes principaux. Ceux-ci sont définis par l’intersection des plans qui coupent la surface au niveau de la direction de drapage (voir Figure 2-10). Cette méthode est donc plus facile à mettre en place et semble à priori plus stable. Les axes principaux ne devraient pas varier beaucoup, même si le point d’application change légèrement. Cette approche reflète mieux le côté un peu aléatoire du positionnement du tissu résultant des manipulations de l’opérateur.

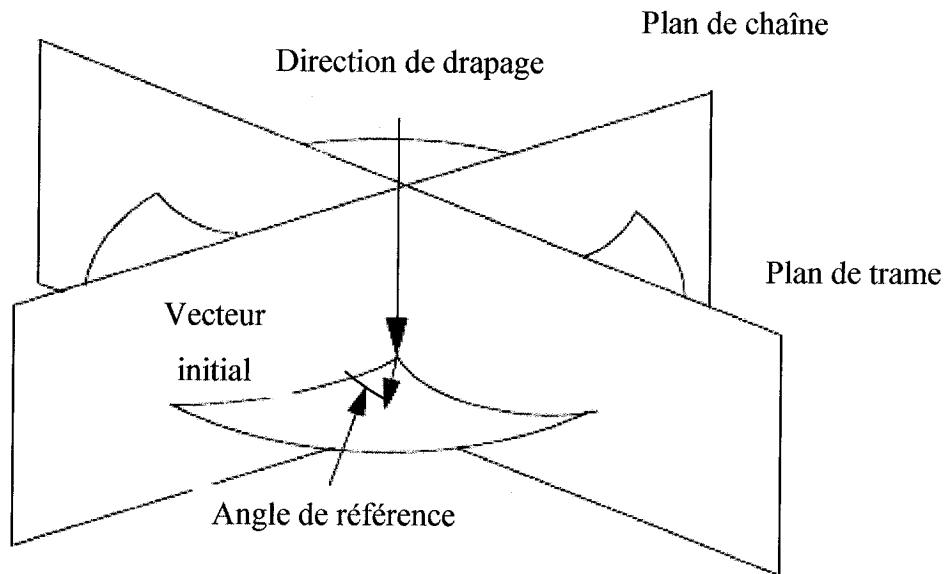


Figure 2-10 : Option planaire.

2.2.8. Option énergétique

L'option énergétique sert uniquement à définir le type d'extension. Le tissu "se développe" à partir du point d'application dans la direction qui minimise l'énergie de cisaillement (voir Figure 2-11). La direction de drapage est ici importante ; c'est à partir de celle-ci qu'est réduite au minimum l'énergie de déformation en cisaillement. Avec cette méthode, le logiciel met l'accent sur la direction d'application plutôt que sur le point d'application. Si cette option est utilisée, il est fortement recommandé de ne pas utiliser d'axes principaux.

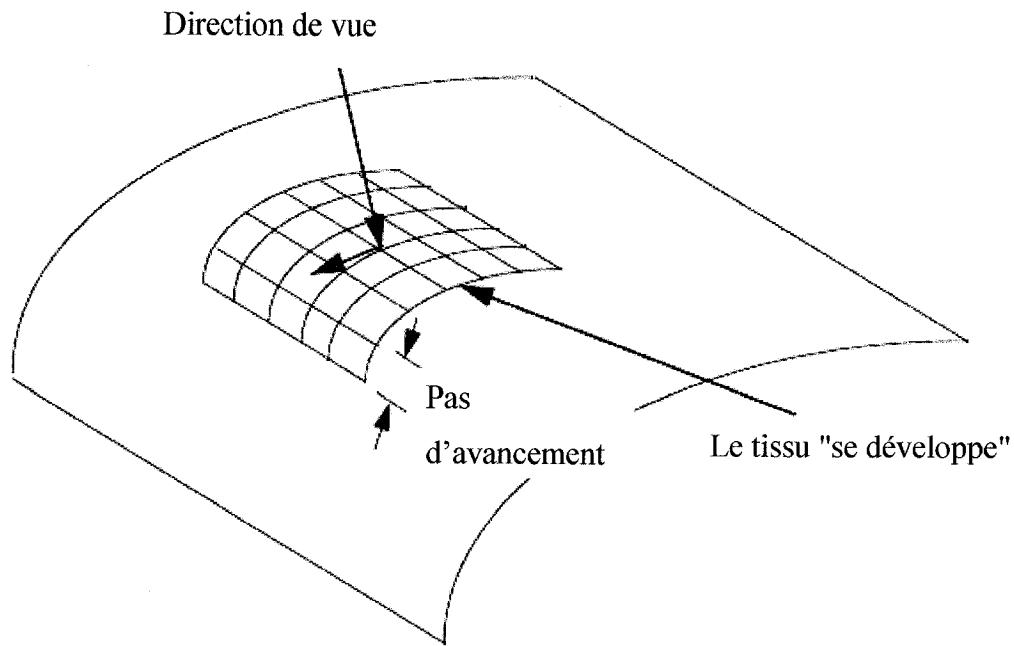


Figure 2-11 : Option énergétique.

2.2.9. Option maximum

L'option maximum sert uniquement à définir le type d'extension. Le critère d'extension consiste à minimiser l'angle de cisaillement.

2.2.10. Possibilités de l'algorithme de drapage de *Patran Laminate Modeler*

A l'aide des 4 options de l'algorithme, il est possible de définir 9 combinaisons pour simuler le drapage. Ces 9 combinaisons sont regroupées dans le Tableau 2-1.

Tableau 2-1 : Les 9 combinaisons de l'algorithme de drapage

Algorithmes	
Axes	Extension
Aucun	Géodésique
Aucun	Energétique
Aucun	Maximum
Géodésique	Géodésique
Géodésique	Energétique
Géodésique	Maximum
Planaire	Géodésique
Planaire	Energétique
Planaire	Maximum

2.3. Etude de l'influence du maillage sur la stabilité du drapage avec le logiciel *Patran Laminate Modeler*

2.3.1. Introduction

Après avoir présenté les différentes possibilités offertes par *Patran Laminate Modeler* en termes de drapage, il est intéressant d'étudier le comportement de chacune de ces approches en fonction du matériau utilisé et des différents paramètres de mise en forme et options de simulation. Les **paramètres de mise en forme ou de drapage** sont le **point d'application** à partir duquel la simulation démarre, la **direction d'application** pour définir les projections des axes sur la surface à draper, l'**axe de référence** pour obtenir une direction de référence globale et l'**option de l'algorithme** choisi parmi les 9 présentées dans le Tableau 2-1. Les **paramètres matériaux** sont la **taille d'une cellule de tissu**, l'**épaisseur du tissu**, l'**angle de tissage** et l'**angle de blocage du tissu** à partir duquel le cisaillement du tissu devient impossible. Un autre paramètre de simulation est le **maillage**, dont l'influence est étudiée dans le paragraphe suivant. Dans cette analyse, tous les paramètres de mise en forme et les paramètres matériaux sont fixés. L'option de l'algorithme est également fixée afin de ne tenir compte que de l'influence du maillage.

2.3.2. Étude de l'influence du maillage

Dans cette partie on étudie l'influence du maillage sur le drapage de la surface à double courbure (non développable) présentée à la Figure 2-12. La surface à double courbure est d'abord maillée, puis drapée. Le tissu utilisé et les paramètres de mise en forme du drapage sont les mêmes tout au long de ce paragraphe.

Paramètres de mise en forme et matériau

Les propriétés du tissu utilisé sont celles d'un tissu de verre bidirectionnel ordinaire. Des valeurs moyennes des paramètres sont utilisées dans les sections 2.3 et 2.4 de ce chapitre :

- Coordonnées du point d'application : [-43.94 78.09 -52.22]
- Direction d'application : l'axe *Z*
- Axe de référence : l'axe *X*
- Épaisseur du tissu : 1 mm
- Taille de la cellule du tissu (longueur trame et chaîne) : 10 mm
- Angle de tissage du tissu entre la direction de trame et de chaîne : 90°
- Angle de blocage : 60°

Aucun axe de drapage n'est défini, l'extension du drapage se fait par la méthode géodésique de Patran Laminate Modeler.

Paramètre du maillage

Les maillages réalisés sont surfaciques. Les mailles sont des quadrangles. Les quatre côtés de la surface possèdent le même nombre d'éléments (voir Figure 2-12).

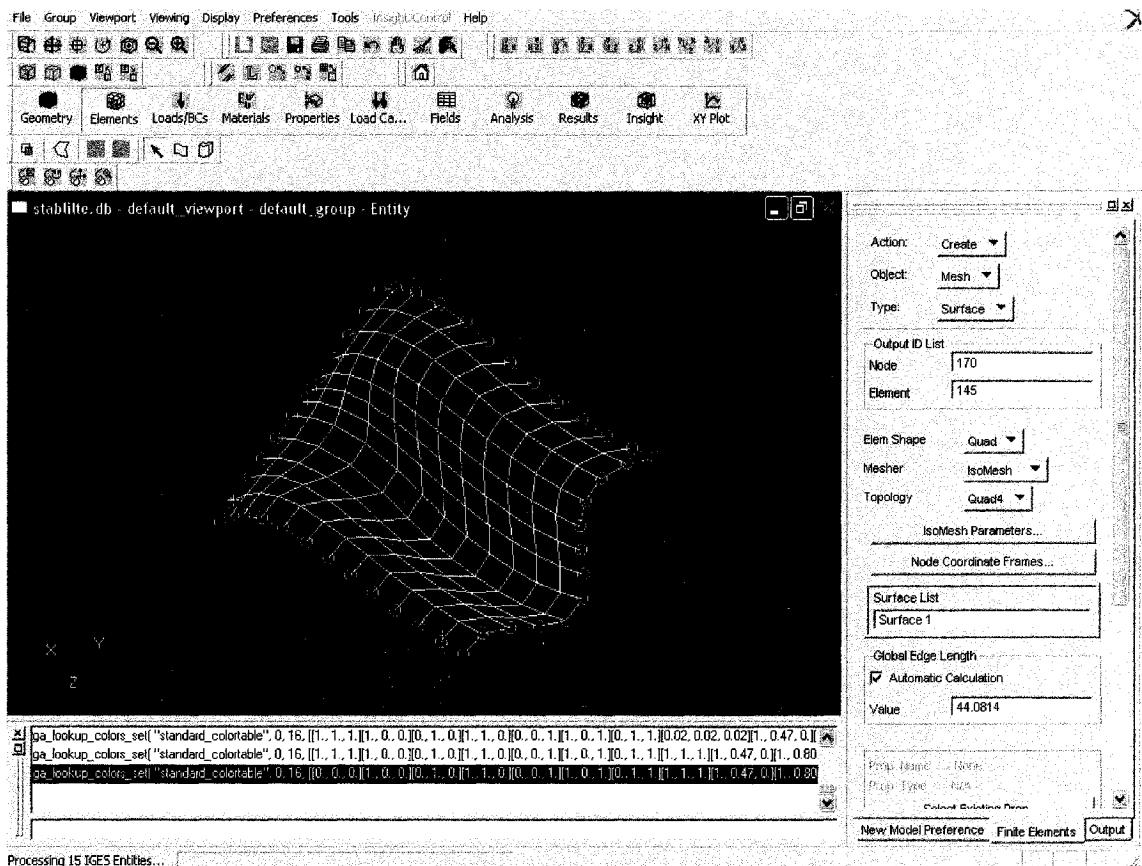


Figure 2-12 : Maillage n°1, 144 éléments.

Résultats et analyses

Le maillage de la pièce (ici la surface à double courbure) intervient clairement dans le processus de drapage de *Patran Laminate Modeler*. Il est possible avec le logiciel de choisir les surfaces ou les éléments pour le drapage. Le fait d'identifier l'aire de la surface à draper par la surface géométrique ou par les éléments n'a par contre aucune influence sur les résultats du drapage si les éléments et les surfaces sont associés. Le drapage se fait sur la surface représentée par les éléments. Plus il y a d'éléments, meilleure est la précision de la surface géométrique et plus les résultats de drapage sont précis. En d'autres termes, en augmentant le nombre d'éléments, la géométrie change.

Les résultats du Tableau 2-2 montrent que la convergence est établie dès le maillage n°2. Dans la suite de cette analyse, le maillage à 576 éléments sera conservé. Les résultats obtenus avec le logiciel pour un maillage à 576 éléments sont les suivants :

- **déformation min : -41.82°,**
- **déformation max : 50.97°,**
- **épaisseur minimale : 0.1 mm,**
- **épaisseur maximale : 0.16 mm.**

La déformation minimale (respectivement maximale) est le minimum (respectivement maximum) de la différence entre l'angle initial entre la chaîne et la trame, soit 90°, et l'angle après déformation. Pour avoir la valeur en pourcentage par rapport à l'angle de blocage, il suffit de diviser le résultat par la valeur de l'angle de blocage et de multiplier par 100. L'épaisseur maximale est définie à partir de l'épaisseur minimale, sur laquelle on ajoute la surépaisseur due à la déformation en cisaillement.

Tableau 2-2 : Comparaison des déformations maximales pour différents maillages d'une surface à double courbure

Maillage	Nombre d'éléments	Résultats du drapage
1	144	Déformation max : 51.01 %
2	576	Déformation max : 84.96 %
3	2304	Déformation max : 85.08 %
4	14400	Déformation max : 82.78 %
5	22500	Déformation max : 82.83 %

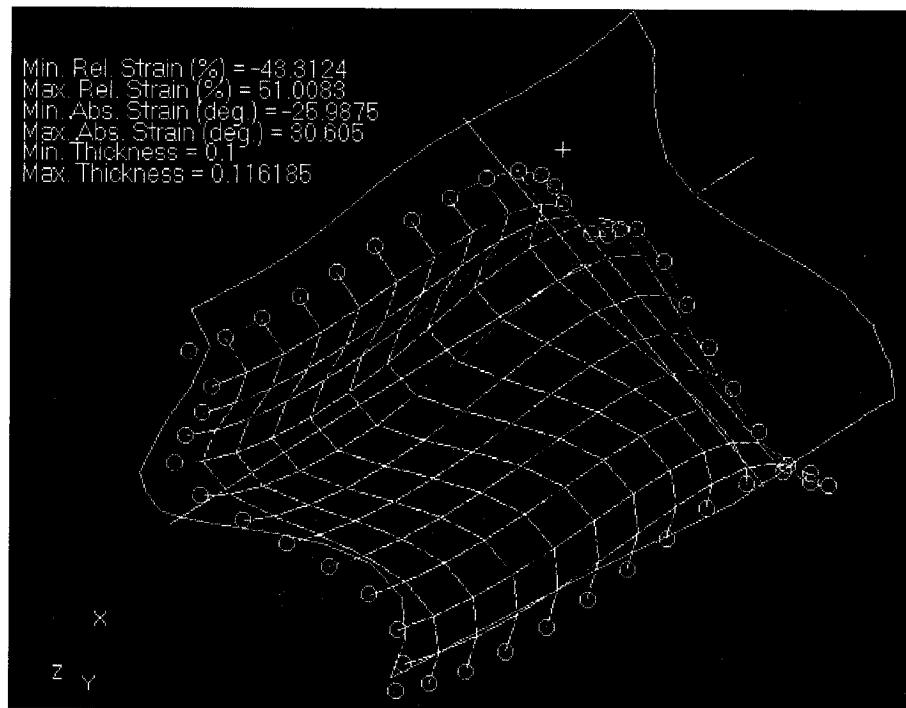


Figure 2-13 : Exemple de résultats de drapage pour un maillage avec 144 éléments.

Extension des résultats

L'étude de la sensibilité du maillage a été réalisée pour une combinaison d'options de simulation bien précise, sans définir d'axes principaux et avec la méthode d'extension géodésique. Le résultat du drapage dépend clairement du maillage; ce résultat peut d'ailleurs être étendu à toutes les options de l'algorithme de drapage (axes principaux et extension).

2.4. Influence des paramètres de mise en forme sur la simulation du drapage

2.4.1. Motivation

Il est important d'étudier la stabilité du logiciel en fonction des paramètres de mise en forme pour un maillage donné. En effet, les résultats de la simulation de drapage ne doivent pas être trop différents si les paramètres de mise en forme varient légèrement. On a vu au à la section précédente que les résultats du drapage convergent avec le maillage. Dans ce paragraphe, l'influence du point et de la direction d'application sont étudiés pour la pièce à double courbure de la Figure 2-12 pour un maillage de 576 éléments.

2.4.2. Méthodologie

Les paramètres de mise en forme utilisés dans toute la section 4 restent les mêmes que ceux présentés à la section 2.3.2 à l'exception du paramètre étudié. Des simulations sont réalisées consécutivement avec ces mêmes paramètres de mise en forme pour toutes les combinaisons de paramètres de l'algorithme programmé dans *Patran Laminate Modeler*. Il existe en tout 9 combinaisons différentes (voir Tableau 2-1) pour simuler le drapage avec ce logiciel. Pour les 9 combinaisons, le paramètre de mise en forme étudié change. Les résultats sont comparés aux valeurs de référence obtenues avec les paramètres de mise en forme initiaux pour chacune des 9 combinaisons de drapage. La méthodologie suivie est résumée à la Figure 2-14.

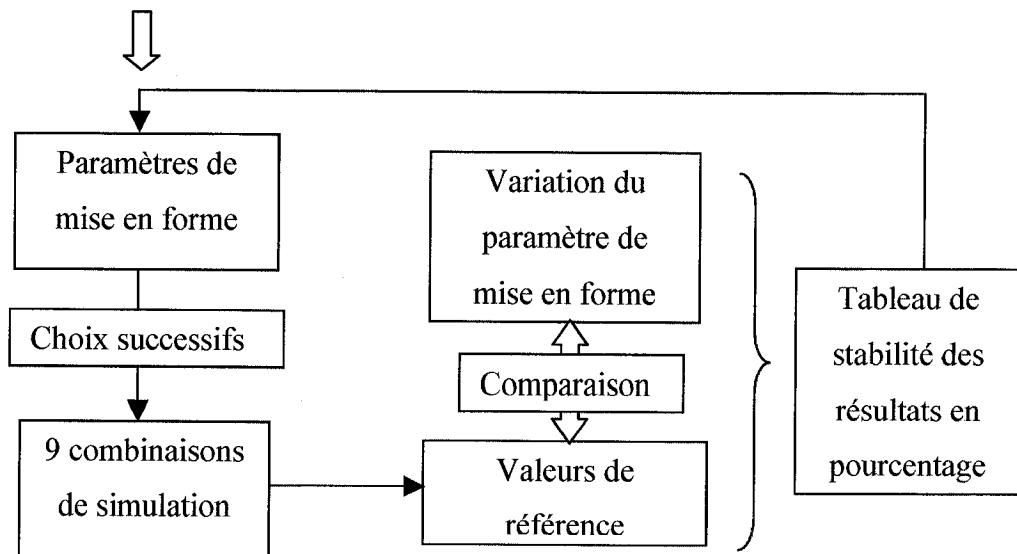


Figure 2-14 : Schéma de la méthodologie de l'étude sur les paramètres de mise en forme.

2.4.3. Variation du point d'application

Les méthodes de mise en forme pour lesquelles le choix du point d'application est important sont les techniques dites « d'empilement manuel ». Dans cette approche, les erreurs résultant des manipulations de l'opérateur doivent être prises en compte. Les résultats de la simulation du drapage doivent rester quasi-identiques, même si le point d'application est légèrement différent. Pour tester la stabilité de ce paramètre de mise en forme avec le logiciel *Patran Laminate Modeler*, le point d'application sera déplacé avec des variations suivant les trois directions indiquées au Tableau 2-3. En faisant varier les coordonnées du point d'application de quelques millimètres suivant les trois coordonnées du repère du logiciel nous allons pouvoir tester la stabilité de ce paramètre pour une surface à double courbure.

Tableau 2-3 : Présentation des variations étudiées du point d'application

Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
-1	0	0
0	1	0
0	0	1
-2	0	0
-2	20	0

2.4.4. Variation de la direction d'application

La direction d'application initiale est l'axe z . Soit θ l'angle de la direction d'application par rapport à l'axe z tel qu'illustré à la Figure 2-15 dans le plan zy et l'angle φ de la Figure 2-16 par rapport à l'axe x dans le plan xy . A l'aide de ces 2 angles, un système de coordonnées sphériques (ρ , θ , φ) est défini. Il est maintenant possible de couvrir l'ensemble de l'espace 3D dans ce nouveau repère. Un vecteur unitaire d'une nouvelle direction d'application peut être alors défini par les composantes suivantes dans le système de coordonnées cartésien :

$$\begin{cases} x = \sin\theta * \cos\varphi \\ y = \sin\theta * \sin\varphi \\ z = \cos\theta \end{cases}$$

où θ et φ deviennent 2 paramètres définissant la nouvelle direction d'application du drapage.

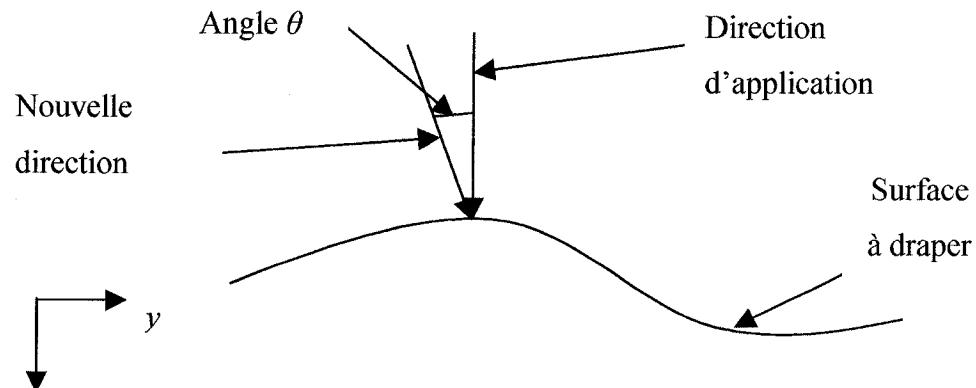


Figure 2-15 : Visualisation de la direction d'application du drapage.

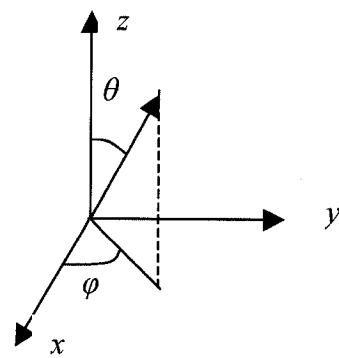


Figure 2-16 : Repère en coordonnées sphériques.

Afin d'étudier la stabilité de la direction d'application, les angles θ et φ prendront successivement les valeurs présentées au Tableau 2-4. Les composantes cartésiennes de la direction d'application utilisée pour effectuer l'étude de stabilité sont également indiquées dans le Tableau 2-4 avec des valeurs de θ comprises entre 2° et 10° et des valeurs de φ comprises entre 0° et 90° .

Tableau 2-4 : Calcul des composantes cartésiennes du vecteur de la direction d'application pour différentes valeurs de θ et φ

θ (°)	φ (°)	Composantes cartésiennes
2	0	$<0.0349, 0, 0.9994>$
2	90	$<0, 0.0349, 0.9994>$
5	0	$<0.0872, 0, 0.9962>$
5	5	$<0.0869, 0.0076, 0.9962>$
5	90	$<0, 0.0872, 0.9962>$
10	0	$<0.1736, 0, 0.9848>$
10	10	$<0.1710, 0.0301, 0.9848>$

2.4.5. Résultats de l'étude de l'influence des paramètres de mise en forme

Tous les résultats sont regroupés sous forme de tableaux (voir ci-dessous). L'écart des déformations minimales (respectivement maximales) est la différence entre la déformation minimale (respectivement maximale) du tissu obtenue avec les paramètres de mise en forme initiaux et celle obtenue en faisant varier le paramètre de mise en forme étudié. Pour obtenir une valeur sous forme de pourcentage, cette différence a été divisée par la valeur de la déformation minimale (respectivement maximale) du tissu obtenue avec les paramètres de mise en forme initiaux.

Tableau 2-5 : Étude des déformations en cisaillement en fonction des variations de différents paramètres de drapage sans axes principaux

Variations des déformations(%)									
Variations du point d'application			Géodésique		Énergétique		Maximum		
$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$	min	max	min	max	min	max	
-1,00	0,00	0,00	0,01	32,84	0,23	1,38	0,18	0,69	
0,00	1,00	0,00	30,4	21,0	1,14	9,81	7,41	1,04	
0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
-2,00	0,00	0,00	6,31	0,00	2,67	0,05	0,51	0,99	
-2,00	20,00	0,00	18,2	0,02	19,4	30,7	0,81	19,1	
Variation de la direction d'application			Géodésique		Énergétique		Maximum		
$\theta(\text{°})$	$\varphi(\text{°})$	min	max	min	max	min	max		
	2,00	0,00	0,00	0,03	0,11	0,11	0,00	0,09	
	2,00	90,00	1,13	21,70	0,25	0,08	0,31	0,05	
	5,00	0,00	0,00	0,04	0,26	0,27	0,00	0,02	
	5,00	5,00	0,67	2,49	0,04	0,22	0,14	0,50	
	5,00	90,00	1,07	36,38	0,65	1,07	0,36	0,38	
	10,00	0,00	0,10	0,09	0,55	0,42	0,00	0,45	
	10,00	10,00	1,19	21,54	0,27	0,62	0,26	0,82	

Tableau 2-6 : Étude des déformations en cisaillement en fonction des variations de différents paramètres de drapage avec axes principaux géodésiques

Variations des déformations(%)								
Variations du point d'application			Géodésique		Énergétique		Maximum	
$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$	min	max	min	max	min	max
-1,00	0,00	0,00	0,01	32,84	0,00	19,78	0,00	13,50
-0,00	1,00	0,00	30,38	21,05	24,80	20,77	24,80	21,36
0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-2,00	0,00	0,00	6,31	0,00	1,99	16,43	1,99	13,10
-2,00	20,00	0,00	18,2	0,02	67,2	56,5	67,2	59,3
Variations de la direction d'application			Géodésique		Énergétique		Maximum	
	$\theta(^{\circ})$	$\varphi(^{\circ})$	min	max	min	max	min	max
	2,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00
	2,00	90,00	1,13	21,70	1,13	13,02	1,13	13,6
	5,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,05	0,00	0,02
	5,00	5,00	0,67	2,49	0,04	0,51	0,03	0,15
	5,00	90,00	1,07	36,38	1,08	20,6	1,08	21,2
	10,00	0,00	0,10	0,09	0,10	0,47	0,10	0,03
	10,00	10,00	1,19	21,54	1,20	19,78	1,20	12,3

Tableau 2-7 : Étude des déformations en cisaillement en fonction des variations de différents paramètres de drapage avec axes principaux planaires

Variations des déformations(%)								
Variations du point d'application			Géodésique		Énergétique		Maximum	
$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\Delta z(\text{mm})$	min	max	min	max	min	max
-1,00	0,00	0,00	0,51	0,20	0,51	0,27	7,44	0,27
0,00	1,00	0,00	0,00	0,76	0,00	0,45	0,80	0,45
0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-2,00	0,00	0,00	1,11	0,42	0,00	0,55	7,07	0,55
-2,00	20,00	0,00	5,31	4,25	1,21	0,06	4,25	0,06
Variations de la direction d'application			Géodésique		Énergétique		Maximum	
	$\theta(\text{°})$	$\phi(\text{°})$	min	max	min	max	min	max
	2,00	0,00	3,07	3,03	3,20	3,32	4,15	3,32
	2,00	90,00	7,39	8,60	7,39	4,60	7,36	4,53
	5,00	0,00	8,84	8,81	8,84	8,41	1,09	8,41
	5,00	5,00	10,5	2,60	10,5	7,09	2,68	7,09
	5,00	90,00	18,6	15,7	18,6	12,0	10,1	12,0
	10,00	0,00	20,1	14,5	20,0	19,6	11,5	19,6
	10,00	10,00	27,4	9,68	26,6	14,5	18,4	14,5

2.4.6. Conclusion sur le point d'application

En changeant la coordonnée suivant la direction d'application (ici l'axe z) du point d'application, les résultats restent identiques. Ceci est vrai si cette coordonnée est toujours située du même côté de la surface à draper, sinon les valeurs s'inversent (le minimum devient le maximum en valeur absolue et inversement). L'explication en est immédiate : si le point d'application n'appartient pas à la surface, c'est sa projection orthogonale sur la surface qui devient le nouveau point d'application.

Si aucun axe de drapage n'est défini, les résultats de drapage avec l'algorithme géodésique ne sont pas stables. L'utilisation de l'algorithme géodésique pour la définition des axes principaux n'est pas recommandée pour ce type de surface (non développable). En effet, tel que dit à la section 2.2.6, les lignes géodésiques dépendent beaucoup de la position du point d'application. Les méthodes de drapage les plus stables pour ce type de surface sont les combinaisons suivantes :

- axes principaux planaires + algorithme géodésique ;
- axes principaux planaires + algorithme énergétique.

2.4.7. Conclusion sur la direction d'application

Les résultats obtenus sur l'analyse de la stabilité du drapage en fonction de la direction d'application ne sont pas très bons. Seulement deux des neuf possibilités de l'algorithme présentent une bonne stabilité (voir Tableau 2-5 (maximum et énergétique)). Deux autres sont totalement instables et inexploitables. Le reste des simulations offre des variations de l'ordre de 10% ce qui reste élevé mais contrôlable. Il sera donc possible par la suite d'utiliser l'une de ces quatre méthodes en sachant que les écarts peuvent atteindre 10%. Il est même fortement recommandé de faire une analyse de stabilité du drapage si l'une de ces méthodes est utilisée afin d'évaluer les erreurs. Comme il a été décrit plus haut, la méthode énergétique doit être utilisée sans axes principaux.

2.5. Discussion sur le logiciel et résumé des analyses de stabilité

2.5.1. Résumé des analyses de stabilité

Les données concernant la stabilité sont regroupées dans le Tableau 2-8 ci-dessous. Certaines des données dans le Tableau 5 comportent une *. Ceci signifie qu'il est fortement recommandé de faire une analyse de stabilité du drapage afin de maîtriser les erreurs.

Tableau 2-8 : Tableau récapitulatif des analyses de préformage sous *Patran Laminate Modeler*

Algorithmes		Stabilité		Utilisable
Axes	Extension	Point d'application	Direction d'application	Drapage
Aucun	Géodésique	Non	Non	Non
Aucun	Energétique	Oui*	Oui	Oui*
Aucun	Maximum	Oui*	Oui	Oui*
Géodésique	Géodésique	Non	Non	Non
Géodésique	Energétique	Non	Non*	Non
Géodésique	Maximum	Non	Non*	Non
Planaire	Géodésique	Oui	Non*	Oui*
Planaire	Energétique	Oui	Non*	Oui*
Planaire	Maximum	Non*	Non*	Non*

2.5.2. Discussion

Le logiciel *Patran Laminate Modeler* permet de simuler différentes méthodes de drapage de renforts tissés. Comme il a été mentionné dans la section 2.2, il existe neuf options de drapage qui peuvent être simulées avec *Patran Laminate Modeler*. Parmi ces neuf options, il existe deux types de drapage possibles, ceux basés sur les lignes naturelles de la surface et ceux faisant appel à des outils de minimisation. Pour simuler au mieux les méthodes basées sur la minimisation, aucun axe principal ne doit être utilisé. Pour ce qui est des méthodes basées sur les lignes géodésiques de la surface, il

est préférable d'utiliser l'algorithme géodésique et des axes principaux pour des raisons de stabilité. Le Tableau 2-8 permet alors de définir les deux meilleures combinaisons pour simuler le drapage avec *Patran Laminate Modeler*, à savoir :

Aucun axe principal + algorithme énergétique pour la minimisation de l'énergie de cisaillement ;

Axes principaux planaires + algorithme géodésique pour l'empilement basé sur les lignes géodésiques de la surface.

La mise en place d'un tissu sur un moule reste une tache particulièrement aléatoire. En effet, le positionnement du tissu par l'opérateur n'est jamais réalisé de la même façon et ne peut pas être effectué suivant une direction trop spécifique. Il est plus facile de définir le point d'application plutôt que la direction d'application. C'est pourquoi, la stabilité par rapport à la direction d'application est plus importante. Dans la suite de ce chapitre, les deux options de drapage les plus stables de *Patran Laminate Modeler* sont conservées. Les directions d'application seront toujours définies perpendiculaires au moule pour simplifier la tache de l'opérateur.

2.5.3. Diagramme d'une analyse de préformage avec *Patran Laminate Modeler*

La Figure 2-17 présente le diagramme fonctionnel d'une analyse de préformage sous *Patran Laminate Modeler*.

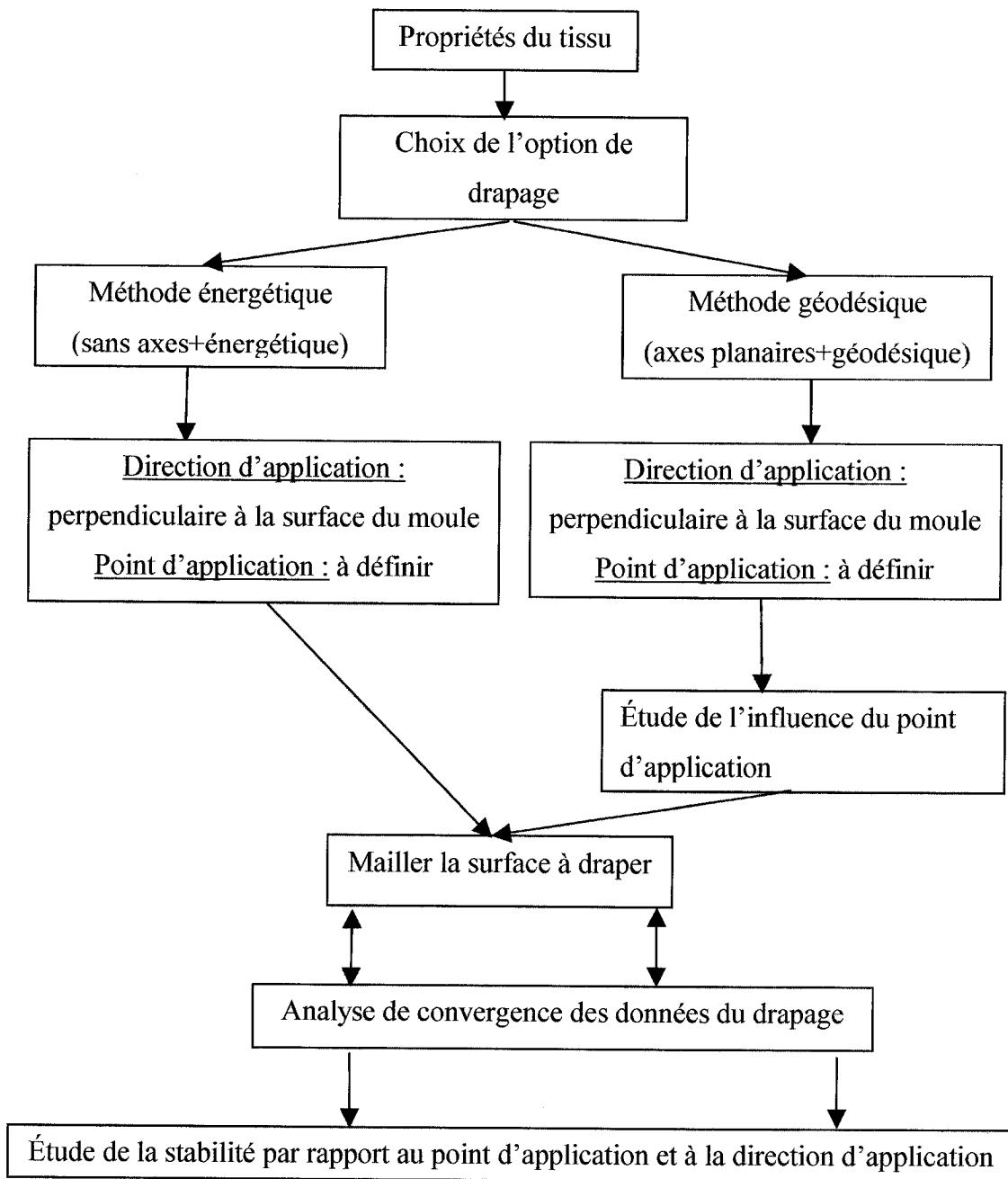


Figure 2-17 : Diagramme d'une analyse de préformage avec *Patran Laminate Modeler*.

2.6. Drapage d'une pièce réelle

2.6.1. Présentation du moule PF3

Le moule PF3 est un moule de laboratoire fabriqué à l'École Polytechnique de Montréal au sein de la Chaire sur les composites à haute performance. Il s'agit d'un moule destiné à la fabrication de composite par injection de résine. La pièce à produire est un prototype de toit de voiture. Une image 3D du moule est présentée à la Figure 2-18.

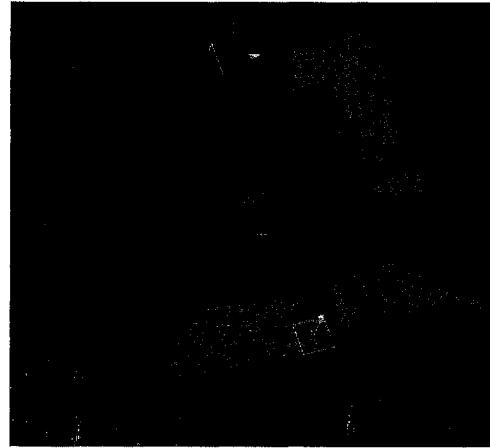


Figure 2-18: Visualisation du moule PF3.

2.6.2. Paramètre du matériau

Le tissu utilisé est un renfort bidirectionnel en fibres de verre ordinaire avec une taille de cellule plus fine que celles des sections précédentes, il s'agit des caractéristiques du tissu référencé 82015 chez JB Martin. Les caractéristiques du tissu sont les suivantes :

- Épaisseur du tissu : 1 mm
- Taille de la cellule élémentaire (longueur trame et chaîne) : 3 mm

- Angle de tissage du tissu entre la direction de trame et de chaîne : 90°
- Angle de blocage : 60°

2.6.3. Drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement

Dans ce paragraphe une simulation de drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement est réalisée. Le diagramme de la Figure 2-17 est utilisé pour cette analyse. La pièce à draper qui sera fabriquée à l'aide du moule PF3 présenté ci-dessus.

2.6.4. Direction et point d'application

La direction d'application doit être perpendiculaire à la surface à draper au niveau du point d'application. Le point d'application doit être défini de façon à ce que la déformation du tissu soit la plus faible possible. Pour des raisons évidentes de symétrie, le point d'application sera situé sur l'axe de symétrie de la pièce à draper. Plusieurs positions du point d'application le long de l'axe de symétrie sont étudiées afin de définir le point d'application optimal. Les résultats sont présentés au Tableau 2-9 pour les 9 points choisis sur l'axe de symétrie alors divisé en huit segments de longueurs égales et représentés à la Figure 2-19.

Tableau 2-9 : Choix du point d'application

Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Déformation minimale ($^\circ$)	-12.38	-11.55	-10.84	-11.02	-11.39	-11.20	-	-	-
Déformation maximale ($^\circ$)	12.32	11.34	10.73	10.97	11.18	11.18	13.09	16.19	16.22

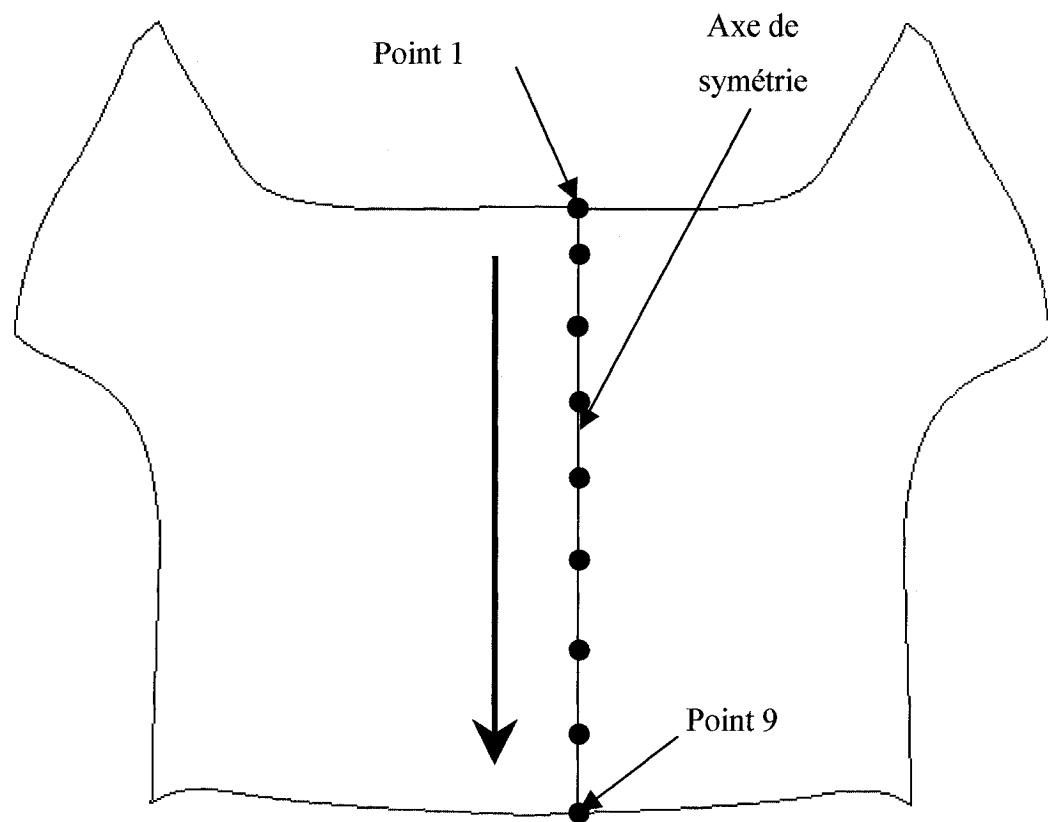


Figure 2-19 : Visualisation des points d'application étudiés.

Le point d'application doit se situer au niveau des points 3 et 4 afin de minimiser les déformations du tissu. Dans la suite, le point d'application aura les coordonnées suivantes [90.9672, 0.0014, 38.09], ce qui correspond à une interpolation linéaire entre les points 3 et 4 de la Figure 2-19 pondérés par les déformations maximales Tableau 2-9.

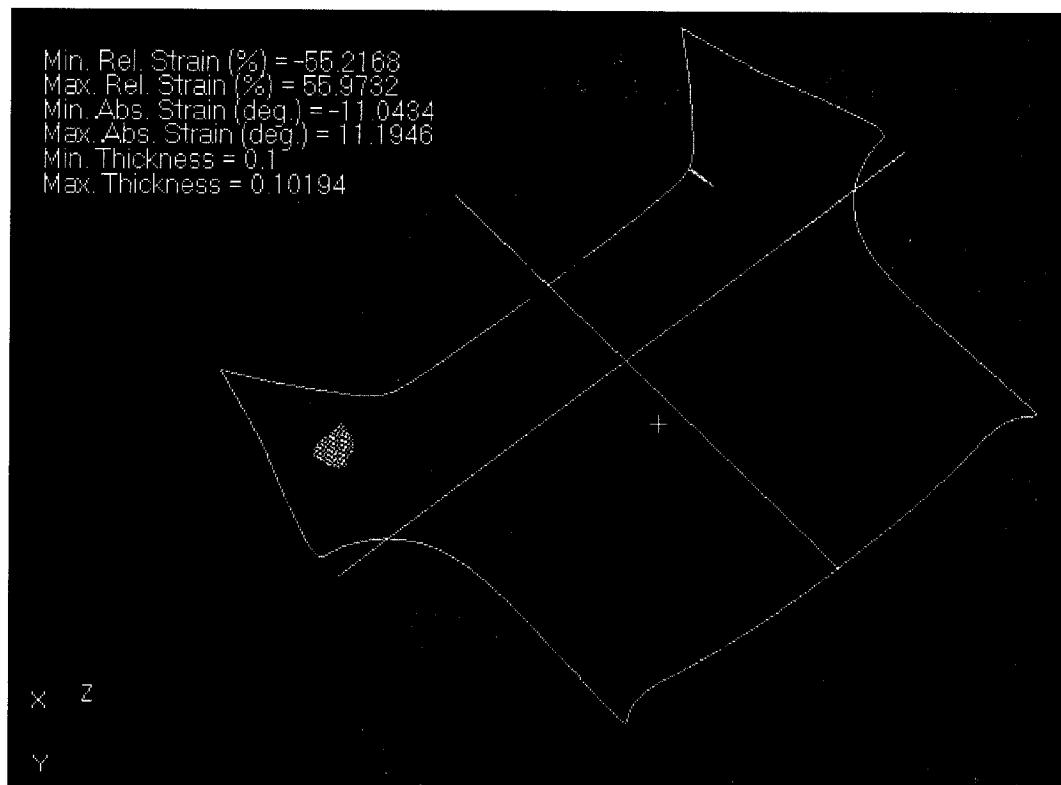


Figure 2-20 : Exemple de drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement du moule PF3.

Convergence des données du maillage

Plusieurs maillages de plus en plus raffinés sont réalisés afin de vérifier la convergence du maillage pour les simulations du drapage.

Tableau 2-10 : Analyse de convergence du maillage

	Maillage 1	Maillage 2	Maillage 3	Maillage 4	Maillage 5
Nombre de nœuds	1765	3823	4863	5345	6089
Nombre d'éléments	1456	3567	4630	5087	5894
Déformation minimale	-8.78°	-9.34°	-10.01°	-10.96°	-10.99 °
Déformation maximale	10.23°	10.11°	10.24°	10.37°	10.35°
Épaisseur minimale	0.1 mm				
Épaisseur maximale	0.102 mm				

Le Tableau 2-10, indique une convergence des données. En effet, les résultats de la simulation sont presque identiques pour les 2 derniers maillages. Il est recommandé d'utiliser un maillage fin afin d'épouser au mieux la surface et d'avoir les données de fabrication les plus réalistes possible. Le maillage n°5 est conservé pour la suite.

Stabilité du point d'application

Comme il a été montré dans les paragraphes précédents, l'étude de la stabilité du point d'application est nécessaire pour cette combinaison de l'algorithme de drapage. A cette fin, la méthodologie présentée à la section 2.4.3 est utilisée.

Tableau 2-11 : Écarts des déformations pour le moule PF3 en fonction du point d'application

Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)	Écart des déformations min/max (%)
-1	0	0	0.46 / -1.12
0	1	0	0.25 / -2.84
5	5	0	1.69 / -3.00
-2	0	0	-0.39 / 0.06
-2	20	0	-4.84 / -4.58

Les résultats du Tableau 2-11 montre que pour cette surface, la combinaison aucun axe + algorithme énergétique est stable par rapport au point d'application.

Stabilité de la direction d'application

Comme il a été démontré à la section 2.4.7, cette combinaison est stable du point de vue de la direction d'application.

Conclusion sur le drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement

Les résultats de simulation sont stables par rapport aux deux paramètres de mise en forme qui déterminent la solution de drapage, soit le point et la direction d'application. Les résultats présentés au Tableau 2-10 montrent une faible déformation du tissu de l'ordre de 11° par rapport à l'angle initial de 90°. En entrant la valeur de 20° comme angle de blocage pour cette simulation, il est possible de visualiser à la Figure 2-21 les zones les plus sollicitées en cisaillement.

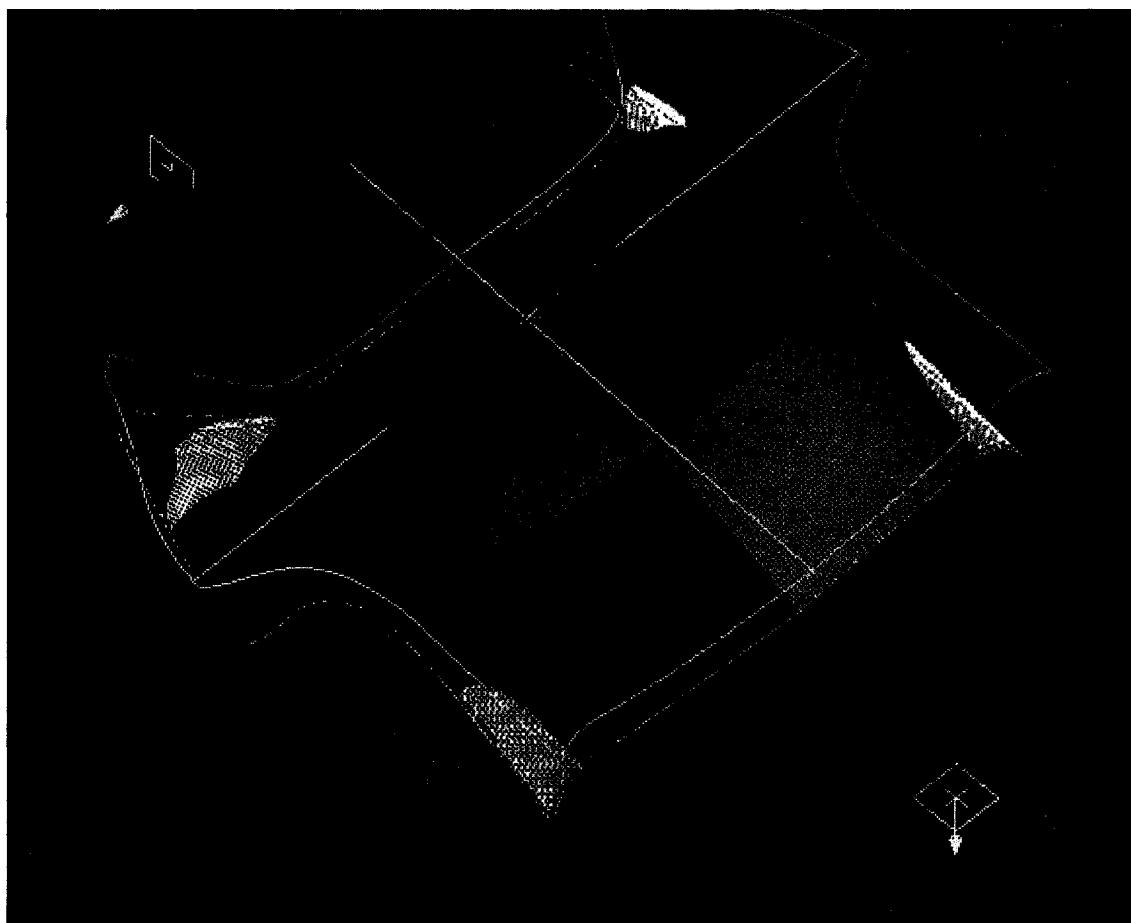


Figure 2-21 : Visualisation des zones les plus déformées (en jaune) après drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement du moule PF3.

2.6.5. Drapage géodésique

Dans ce paragraphe une simulation de drapage géodésique est réalisée. Le diagramme de la Figure 2-17 est utilisé pour cette analyse. La pièce à draper sera fabriquée à l'aide du moule PF3.

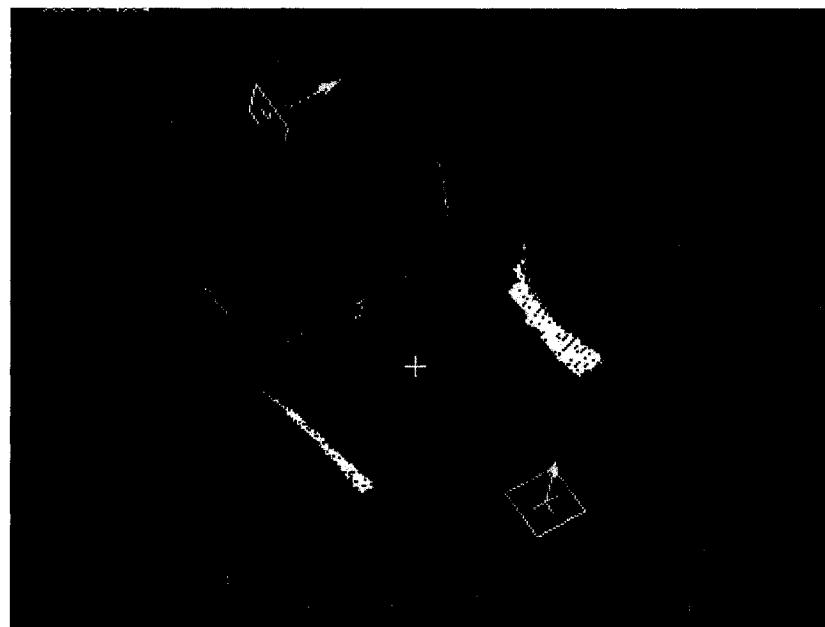


Figure 2-22 : Exemple de drapage géodésique sur la base du moule PF3.

Direction et point d'application

La direction d'application doit être perpendiculaire à la surface à draper au niveau du point d'application. De la même façon que pour le drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement le point d'application doit être défini. Pour cela les points présentés à la Figure 2-19 sont utilisés.

Tableau 2-12 : Choix du point d'application

Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Déformation minimale (°)	-37.87	-51.27	-22.31	-21.41	-24.15	-27.72	-	-	-62.97
Déformation maximale (°)	-37.27	-51.32	-22.33	-21.37	-24.19	-27.87	-	-	-63.00

Le point d'application doit se situer au niveau des points 3 et 4 afin de minimiser les déformations du tissu. Dans la suite, le point d'application aura les coordonnées suivantes [90.9672, 0.0014, 38.09], ce qui correspond au point 4 de la Figure 2-19. Pour chacun de ces points, le drapage est effectué sur la partie femelle du moule.

Convergence des données du maillage

Les résultats obtenus dans cette analyse de convergence sont moins concluants avec ce type de drapage. Le Tableau 2-13 regroupe les résultats. On n'observe pas une réelle convergence, mais des valeurs presque identiques sont obtenues pour tous les maillages. Il est cependant fortement recommandé de conserver un maillage fin dans les analyses afin d'épouser au mieux les surfaces. Par la suite, le maillage 4 sera utilisé.

Tableau 2-13 : Analyse de convergence des données du maillage

	Maillage 1	Maillage 2	Maillage 3	Maillage 4	Maillage 5
Nombre de Nœuds	1765	3823	5864	11579	41070
Nombre d'éléments	1695	3742	5760	11434	40794
Déformation minimale	-21.85°	-21.78°	-21.31°	-22.98°	-23.06°
Déformation maximale	21.83°	21.79°	21.24°	22.76°	22.26°
Épaisseur minimale	0.1 mm				
Épaisseur maximale	0.106 mm				

Stabilité du point d'application

Comme il a été démontré à la section 4, cette combinaison est stable du point de vue du point d'application.

Stabilité de la direction d'application

La stabilité de la direction d'application doit être étudiée pour ce type de combinaison. Dans la section 4, la direction d'application était selon l'axe z , ce qui permettait aisément un changement de direction à l'aide d'un système en coordonnées sphériques. Il est ici un peu plus difficile de déterminer la nouvelle direction d'application. En effet, il est nécessaire de construire un nouveau repère local à partir de la direction d'application actuelle afin de procéder à un changement de repère à l'aide des angles d'Euler (voir Figure 2-23).

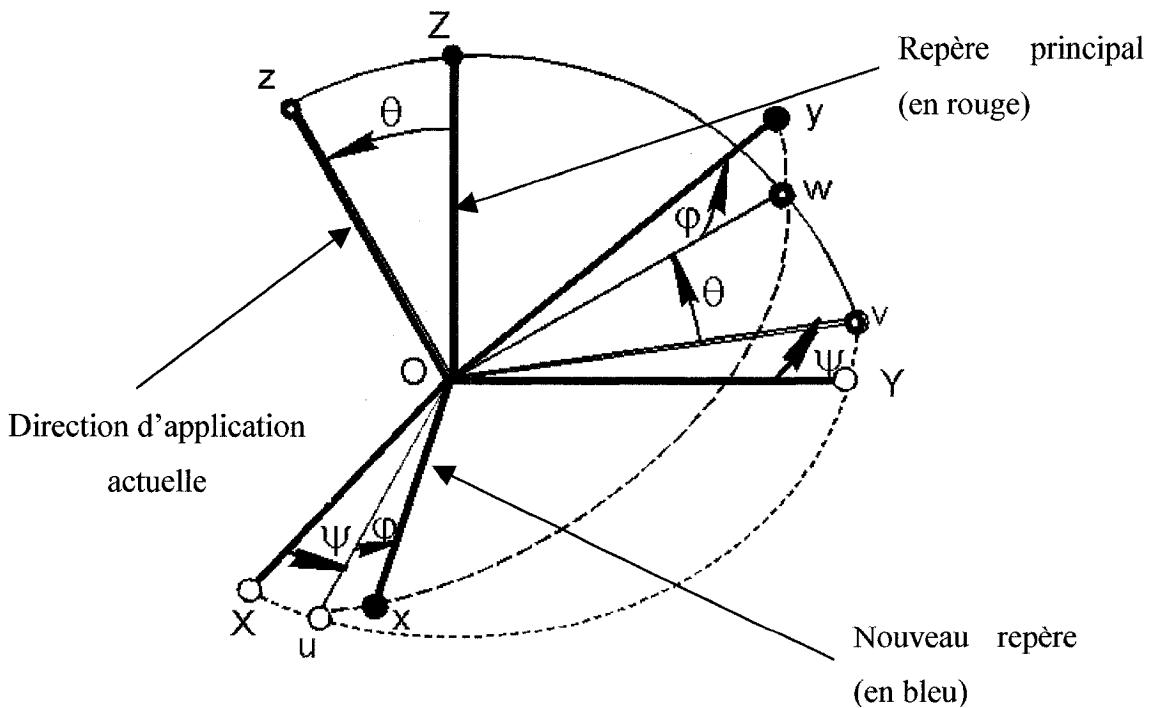


Figure 2-23 : Schéma des angles d'Euler appliqués à la direction d'application.

Une fois les angles d'Euler définis, il est possible de déterminer la nouvelle direction d'application définie dans le nouveau repère par l'intermédiaire des coordonnées

sphériques dans le repère principal. Ceci se fait à l'aide de la matrice de passage du repère principal vers le nouveau repère construit à partir des angles d'Euler. Il existe alors la relation suivante :

$$P' = M^* P$$

où P' est le vecteur de la nouvelle direction d'application dans le nouveau repère, P est le vecteur de la nouvelle direction d'application dans le repère principal et M , la matrice de passage du repère principal vers le nouveau repère. En inversant la relation, il vient :

$$P = M^{1*} P'$$

Dans le repère principal, la direction d'application actuelle a pour coordonnées [-0.0289 -0.00708 1]. Ceci permet d'obtenir les relations suivantes avec les angles d'Euler :

$$\tan \Psi = [y] / [x]$$

$$\cos \theta = [z] / L$$

$$\varphi = 0^\circ$$

où $[x]$, $[y]$ et $[z]$ sont les coordonnées respectifs de la direction d'application actuelle suivant les axes x , y et z . L est le module de la direction d'application actuelle.

Supposons que

$$\Psi = \arctan(-0.00708 / -0.0289) = 0.0$$

$$\theta = \arccos(1 / 1.00) = 0.0$$

$$\varphi = 0^\circ$$

La matrice de passage M devient alors la matrice unité. La direction d'application est sensiblement la même que celle de l'axe z . Même si l'utilisation des angles d'Euler s'avère ici inutile, la procédure est décrite pour des utilisations futures.

Tableau 2-14 : Écarts des déformations pour l'empilement à la main du moule PF3 en fonction de la direction d'application

θ (°)	φ (°)	Écart des déformations min/max (%)
2	0	3.56 / 7,98
2	90	0.02 / 0.48
5	0	15.48 / 19.73
5	5	16.39 / 18.99
5	90	4.77 / 7.71
10	0	35.57 / 41.03
10	10	39.08 / 37.55

Le Tableau 2-14 montre que la simulation de drapage par empilement à la main n'est pas stable par rapport à la direction d'application.

Conclusion sur l'empilement manuel

La simulation de drapage géodésique est possible avec le logiciel *Patran Laminate Modeler*. Les résultats de simulation sont cependant instables par rapport à la direction d'application. Ceci reste une contrainte très importante. En effet, la direction d'application varie d'un opérateur à l'autre pour ce type de mise en forme. L'utilisation de cette option de simulation n'est donc pas recommandée ici.

2.7. Conclusion sur les simulations numériques de drapage

Toutes les possibilités en termes de drapage et préformage du logiciel *Patran Laminate Modeler* de MSC.Software ont été étudiées dans ce chapitre. Deux grandes familles de drapage peuvent être simulées avec ce logiciel, soit l'utilisation de critère énergétique et

le drapage géodésique. La stabilité des simulations numériques est un facteur important notamment pour étudier la fabrication des préformes. L'étude de la stabilité des différentes méthodes de drapage a permis de définir les deux meilleures combinaisons pour l'utilisation de ce logiciel. De plus, en étudiant le drapage d'une vraie pièce, on a pu observer que seule la simulation de drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement présentait une bonne stabilité.

Un diagramme a été mis en place pour les utilisations futures du logiciel. Il serait maintenant intéressant de réaliser ces drapages sur des exemples de fabrication réelle, afin de valider les logiciels utilisés. Les étapes importantes de cette démarche consistent à découper un patron généré par les simulations précédentes et d'effectuer un drapage de ce patron.

3. CHAPITRE 3 : MISE EN PLACE D'UNE CHAÎNE DE FABRICATION

3.1. Présentation générale

3.1.1. Introduction

Dans ce chapitre, la mise en place d'une chaîne de fabrication de préformes est présentée. En effet, il a été montré dans les chapitres précédents combien l'orientation des fibres était importante pour les matériaux composites. Un logiciel de drapage et de mise à plat, *Patran Laminate Modeler* a été choisi. Il serait donc intéressant de tester de manière expérimentale les données obtenues pour la pièce du moule prototype présenté dans le chapitre 2, ceci fera l'objet du prochain chapitre. Afin de pouvoir tester cela, et de rendre la production des préformes automatisée, il est nécessaire de recourir à une chaîne de fabrication et de conception de préforme. Pour cela, une machine de découpe à commande numérique doit être disponible ainsi qu'un moule à préforme. Pour finir, tous les outils logiciels ou matériels intervenant dans cette chaîne de fabrication doivent pouvoir communiquer entre eux facilement. La chaîne de fabrication de préformes sera appliquée au moule PF3 déjà présenté.

3.2. Machines de découpe

3.2.1. Introduction

La machine de découpe recherchée doit permettre de découper des patrons (tissus à plats). L'École Polytechnique a défini comme critères de sélection un appareil capable de découper des pièces bidimensionnelles de deux mètres par deux mètres. De plus, l'appareil devra être capable de découper des tissus généralement employés dans l'industrie du composite (verre, carbone, kevlar). Pour finir, une précision de l'ordre du demi-millimètre doit être retenue pour les découpes. La machine doit être capable de lire

des patrons 2D sous format DXF et doit disposer d'un soutien technique à proximité puisqu'il s'agit d'un établissement universitaire. En fonction de ces données, différentes propositions commerciales ont été étudiées. Avant d'examiner les propositions industrielles, il est important de connaître différentes méthodes de découpe afin d'expliquer pourquoi certaines machines ne sont pas du tout envisageables.

Au vu des machines disponibles sur le marché, il existe quatre grandes catégories de machines de découpe :

- la découpe au laser,
- la découpe par fraise (tête tournante) ou lame vibrante,
- la découpe ultrasonique,
- la découpe sous pression (à l'eau ou au plasma).

La découpe au laser n'est pas possible pour ce genre d'application. En effet, le laser est incapable de découper des tissus de verres, puisque ceux-ci réfléchissent la lumière. Les autres solutions peuvent être envisagées. Notons tout de même que les machines de découpes à lame vibrante sont moins dispendieuses que les autres types de machine.

3.2.2. Comparaisons des offres commerciales retenues

Les différentes sociétés retenues proposant des systèmes de découpes sont les suivantes :

- AGFM
- GERBER
- LECTRA

Pour effectuer la comparaison, le Tableau 3-1 regroupant toutes les différentes caractéristiques des solutions proposées a été préparé.

Tableau 3-1: Tableau comparatif des machines de découpe

modèle	<i>US 15</i>	<i>VectorAuto(2500)-86</i>	<i>GT 3250</i>
Technologie de coupe	3-axes ultrasonique	Lame vibrante, 0-7000 t/min	Lame vibrante
Technologie de maintien des tissus	aspirateur + film plastique	aspirateur + film plastique	aspirateur + film plastique
Découpe	verre, carbone, kevlar, etc.	verre, carbone, kevlar (35 plis compressés), etc.	verre, carbone, kevlar, etc.
Longueur de coupe	3000 mm	2200 mm	2000 mm
Largeur de coupe	1800 mm	2100 mm	1700 mm
Hauteur de coupe	80 mm (compressé)	25 mm (compressé)	32 mm (compressé)
Vitesse de coupe	60 m/min	0-80 m/min	Non disponible
Accélération/décélération de coupe	2.5 m/s ²	7 m/s ²	Non disponible
Précision du positionnement	± 0.50 mm	± 0.1 mm	Non disponible
reproductibilité	± 0.25 mm	± 0.1 mm	Non disponible
Précision	± 1.00 mm		Non disponible
Contrôle de positionnement	enregistrement mémoire	enregistrement mémoire	Non disponible
Format d'importation direct	DXF	DXF	DXF
Outils de coupe	800W, 20kHz, lame carbure (changeable)	2 têtes pour lames changeables (acier, carbure, etc.) et forêt de poinçon	Non disponible
Aspirateur	1700 m ³ /h, 0.4 bar	2.5 m ³ /h, 7 bars	Non disponible

Poids de la machine	6000kg	5900 kg	Non disponible
Puissance de la machine	30 kVa	33 kW + 5.5 kW	575Volt, 60Hz
Prix	214,540 USD	≈ 148,000 USD (incluant logiciels+machine+formation (32 heures) sans souscription annuelle)	≈ 152,320USD (incluant 2 jours de formation)
Logiciels	NS2-PC logiciel de placement (logiciels de coupe et de contrôle): 49,000USD	Logiciel de contrôle de la machine gratuit logiciel de placement + logiciel de mise à plat : gratuit mais formation de 10000 CAN obligatoire	Logiciel de contrôle + logiciel de placement + logiciel de mise à plat: 32,000 USD pour universitaire (incluant 4 jours de formation sur site)
Localisation	Boston, USA	Montréal, Québec	Tolland, USA
Démonstration		démonstration 15-30 Aout 2005	
Références		Formule1 + Boeing+Airbus+Bombar dier aeronautique et recréation	

3.2.3. Complément sur la machine de découpe de Lectra

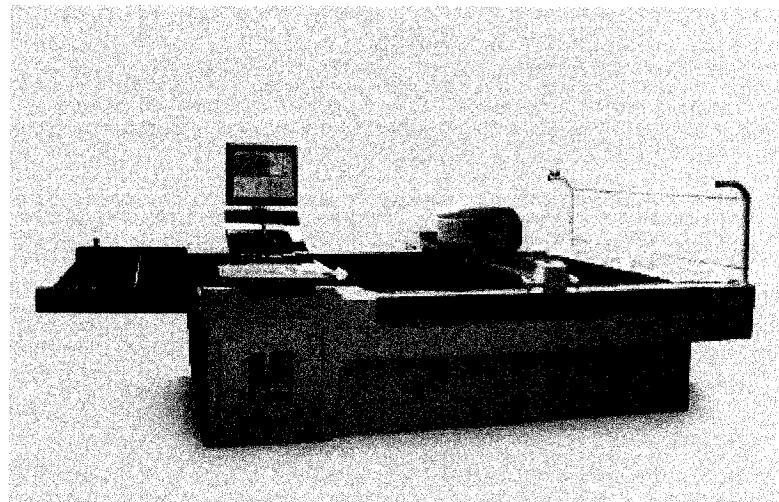


Figure 3-1: Machine de découpe Vectra 2500.86.

La société LECTRA dispose d'un grand savoir faire dans le domaine de la découpe de tissus et particulièrement dans ce que l'on appelle les « tissus techniques » qui représentent aujourd'hui 35% de leur chiffre d'affaire.

La machine de découpe proposée (*VECTRA 2500*) par la société LECTRA est une machine mécanique, utilisant un outil vibrant (jusqu'à 7000 tr/min), dont la fréquence doit être ajustée en fonction du matériau à découper. La tête de découpe dépend bien évidemment du type de matériau à couper. La précision de la découpe est de 0,1 mm pour une épaisseur pouvant aller jusqu'à 25 mm (compressé). Les tissus sont maintenus à l'aide d'un système d'aspiration de 7 bars. Un consommable (film plastique) peut être requis pour une découpe de tissu non étanche. Sur la tête de découpe, quatre familles d'outils de découpes peuvent être installés :

- un galet pour lame vibrante,
- deux têtes pour lame à carbure,
- une tête pour découpe à la lame tirée (pour des tissus fins).

Un système de racleur avec plateau de protection a été développé et breveté par Lectra pour la découpe des tissus pré-imprégnés afin de ne pas recouvrir la lame de résine durant la coupe.

Des tests de découpe (voir Figure 3-2) ont été réalisés lors d'une visite dans les locaux de Lectra Canada, différents tissus très utilisés à Polytechnique ont été testés. La découpe a été concluante, la machine a coupé ces tissus de façon très propre et rapide.



Figure 3-2: Exemple d'échantillons découpés avec la machine Lectra.

Coûts :

CAN \$ 180,396

Ceci correspond à la machine Vectra 2500-86, les logiciels de découpe, formation de 32 heures, la livraison et l'installation sur site. Les taxes ne sont pas incluses ni les frais d'entretien annuels.

CAN \$ 5,690

Entretien annuel pour la machine.

CAN \$ 21,500

Entretien annuel pour la machine avec intervention sur site.

L'évolution logicielle est offerte.

Entretien :

Changement du tapis de découpe :

3024 blocs

CAN \$ 1,5 le bloc

Soit CAN \$ 4536 pour le tapis au complet

3.2.4. Conclusion sur le choix de la machine de découpe à commande numérique

Grace à l'étude comparative de deux machines de découpe à lame vibrante et d'une machine de découpe ultrasonique, il a été possible de choisir la machine de découpe qui correspondait le mieux aux besoins de l'École Polytechnique de Montréal et de la chaire de recherche sur les composites hautes performances. En effet, la machine de découpe proposée par Lectra Canada répond aux critères de découpes et de dimensions de coupe de l'École Polytechnique. De plus, la proximité du service et le prix de la machine la classent en première position par rapport à ses concurrentes. Pour ce qui est des critères de précision, les possibilités offertes par cette machine dépassent largement les besoins de l'École. La compagnie GERBER à été très lente à fournir les informations demandées

quand cela a été possible. La machine *VECTOR AUTO 2500* de Lectra Canada a donc été achetée par l'École Polytechnique de Montréal.

3.3. Exportation des données de drapage (méthode inverse)

Dans ce paragraphe, nous allons définir les différentes passerelles entre les différents outils utilisés pour la création de préforme. En effet, il est important que la communication entre la machine de découpe et le logiciel de mise à plat choisi, *Patran Laminate Modeler* se fasse très bien. De même, il est important que l'exportation des données numériques de *Patran Laminate Modeler* vers le logiciel de simulation d'injection développé à l'École Polytechnique de Montréal, *PAM-RTM* se fasse bien également.

3.3.1. Exportation des données numériques

A partir des données de drapage, il est possible de réaliser différentes études numériques. En effet, en exportant les données du drapage (angle de chaîne, de trame et épaisseur) pour chaque élément du maillage, une analyse structurale par la méthode des éléments finis est possible, de même que des simulations des procédés d'injection sur renforts sont possibles. L'exportation des données de drapage issues de *Patran Laminate Modeler* vers le logiciel de calcul par éléments finis *Patran/Nastran* se fait facilement. L'exportation de ces mêmes données vers le logiciel de simulation d'injection *PAM-RTM* réalisé par l'École Polytechnique de Montréal nécessite la création d'un programme de conversion des données.

Exportation des données de drapage vers *PAM-RTM*

Afin de pouvoir exporter les données de drapage de *Patran Laminate Modeler* vers *PAM-RTM*, il est nécessaire de créer un code de conversion de données. La première étape consiste à décrypter le fichier *.layup* généré par *Patran Laminate Modeler* lors

d'un drapage, pour effectuer ce décryptage, un maillage de 4 éléments est réalisé (voir Figure 3-3). Le décryptage du fichier est présenté en Annexe B.

Une fois le fichier *.layup* décrypté, il faut procéder de la même façon avec un fichier contenant les données de drapage de *PAM-RTM*. Le décryptage du fichier *.fmd* de *PAM-RTM* est présenté en Annexe C, il s'agit d'un fichier type contenant quelques éléments et nœuds. Il est important de noter que les éléments utilisés par *PAM-RTM* pour réaliser des simulations d'injections de résine sont des triangles avec des fonctions d'interpolation du premier ordre. Le code permettra donc de convertir les données de drapage pour des éléments triangles linéaires uniquement. Le code est réalisé en langage *Patran Command Language* (PCL) afin de pouvoir être intégré directement dans *Patran* et est présenté en Annexe D. La Figure 3-4 illustre comment est implémenté le code dans le logiciel *Patran*. La Figure 3-5 présente le drapage de la pièce du moule PF3 exportée sous *PAM-RTM*.

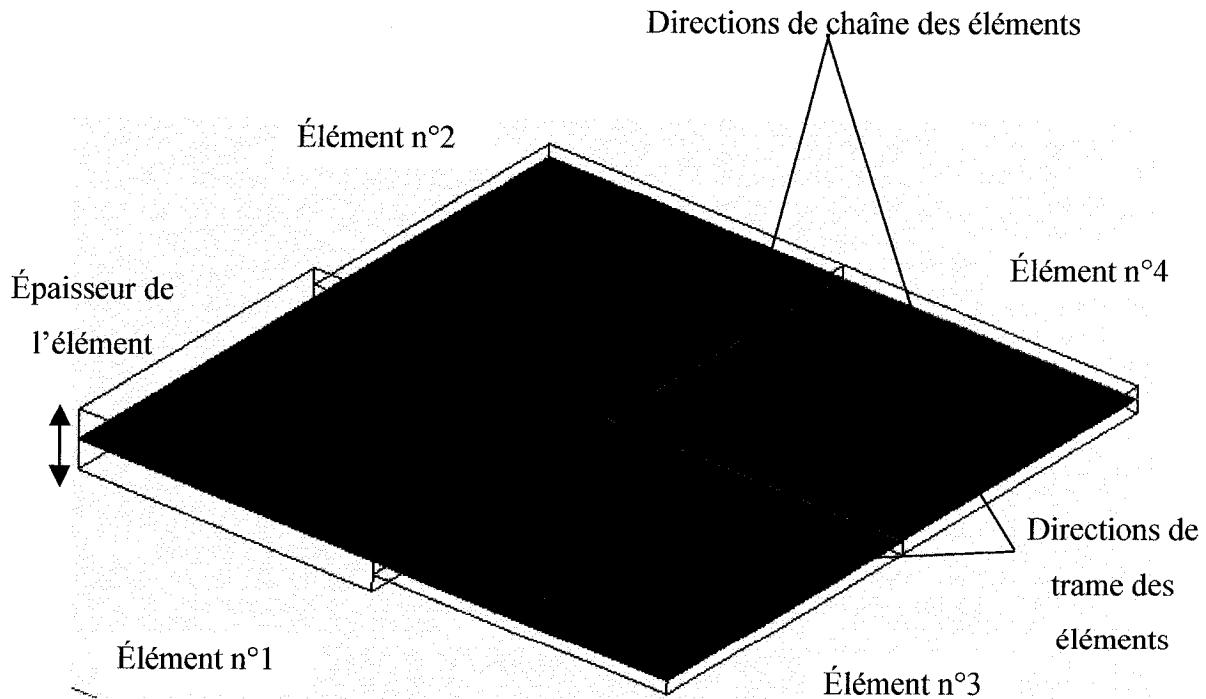


Figure 3-3 : Visualisation des données d'un drapage de 4 éléments avec *Patran Laminate Modeler*.

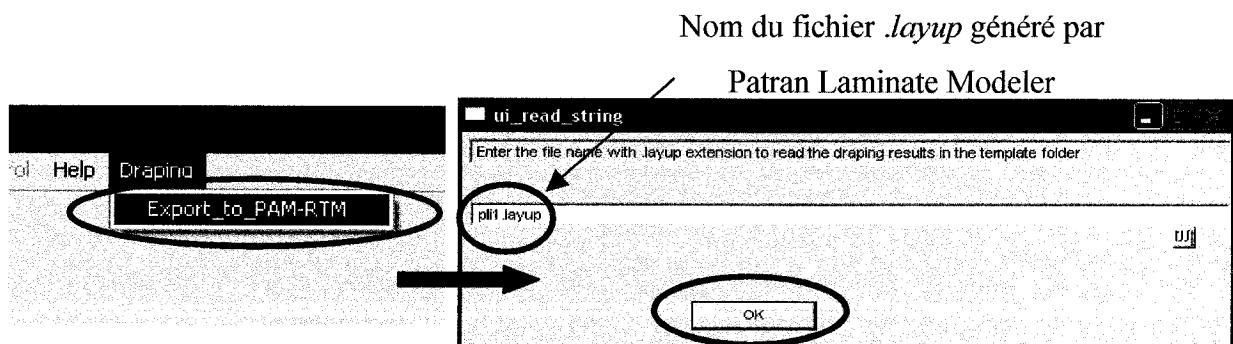


Figure 3-4: Utilisation du code implémenté dans *Patran Laminate Modeler* pour exporter les données de drapage vers *PAM-RTM*.

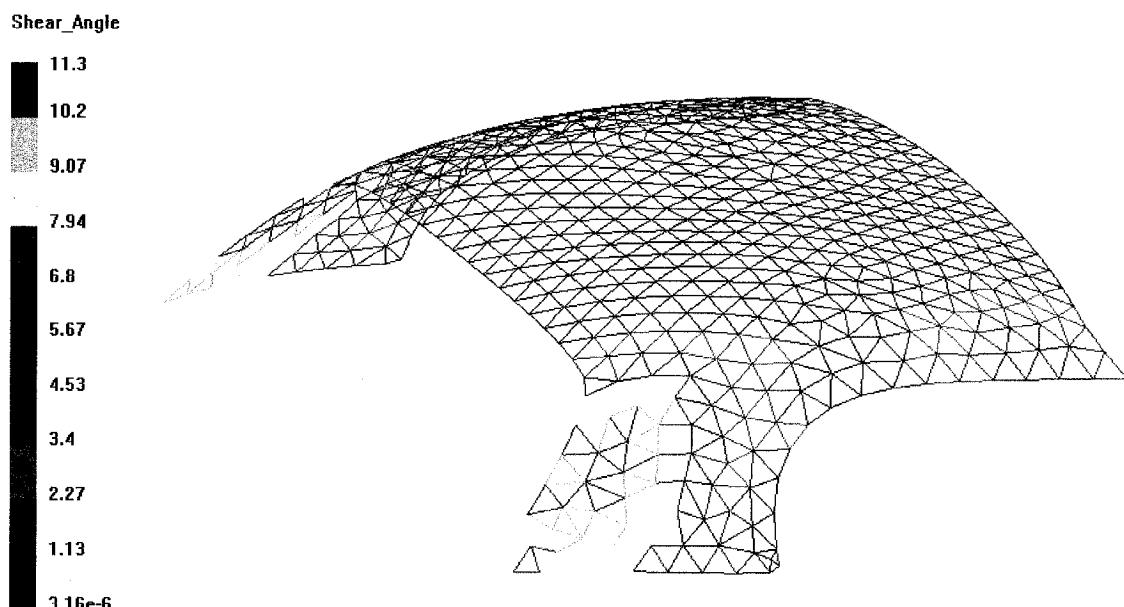


Figure 3-5: Exemple d'importation des données de drapage vers *PAM-RTM*.

3.3.2. Exportation des données de fabrication

Différentes données de fabrication peuvent être exportées à partir de *Patran Laminate Modeler*. La donnée la plus importante reste le patron. C'est en effet à partir de celui-ci que pourra être découpé le tissu sec à l'aide de la machine de découpe Lectra à commande numérique de l'École Polytechnique de Montréal (voir photo de la Figure 3-1). Un exemple d'exportation de patron est présenté à la Figure 3-6. De la même façon, le pli drapé peut être exporté (voir Figure 3-7).

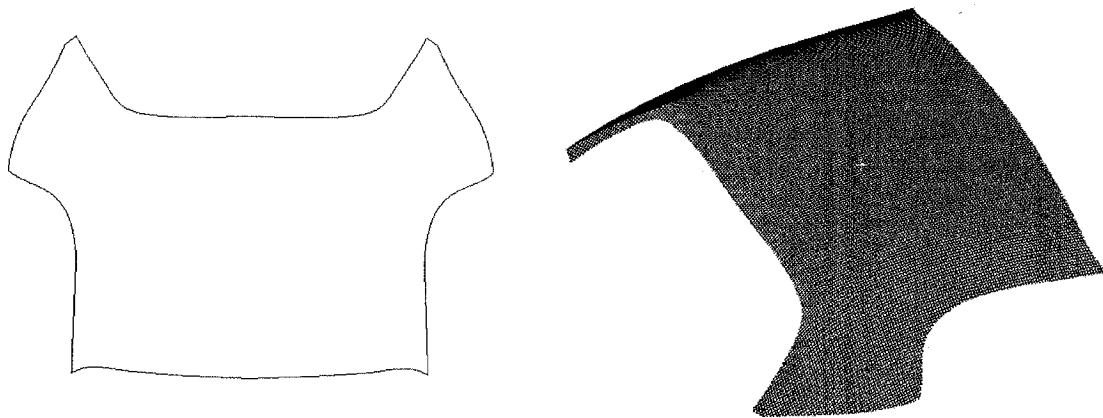


Figure 3-6 : Exemple d'un patron 2D (à gauche) et d'un tissu drapé (à droite) exporté sous format IGES.

3.4. Passage de *Patran Laminate Modeler* à la machine de découpe

L'objectif est ici de permettre une communication rapide et simple entre un logiciel de création de patron 2D et une machine de découpe à commande numérique. Le patron 2D (géométrie) de la pièce à découper est fourni par le module *Patran Laminate Modeler* du logiciel *Patran 2005R2* de la société MSC.SOFTWARE dans un fichier au format DXF. Si ce type de fichier correspond effectivement à ce qui est attendu par la machine de découpe *LECTRA VECTOR AUTO 2500*, les spécifications du fichier généré par *Patran*

ne peuvent malheureusement pas être décodées directement par la machine. Aussi, avant de transmettre le fichier à la machine, il faut lui apporter quelques modifications. Celles-ci peuvent être apportées à l'aide du logiciel de CAO commercial *Autocad 2006*. Toute la procédure de traitement du fichier DXF est présentée en Annexe E.

3.5. Fabrication d'un moule à préforme pour le moule PF3

Un moule à préforme presqu'identique au moule PF3 a été fabriqué pour les besoins de l'étude. La matrice mâle ayant servie à fabriquer le moule mâle PF3 a été de nouveau utilisée pour être laminée afin d'obtenir la partie femelle du moule à préforme. Par la suite, de la cire calibrée a été déposée sur ce moule afin de pouvoir laminer la partie mâle du moule à préforme. Toute la procédure de fabrication ainsi que les matériaux ayant servis pour la fabrication du moule à préforme sont décrits en Annexe F. La Figure 3-7 illustre la partie mâle du moule à préforme PF3.

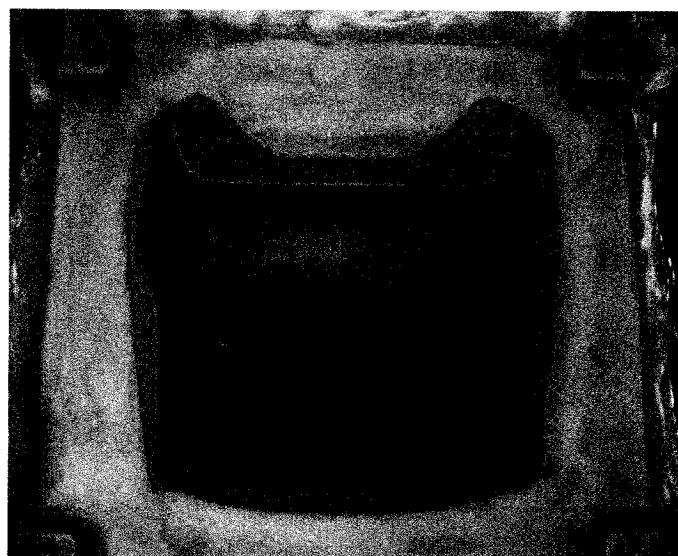


Figure 3-7: Contre moule (partie mâle) après démolage avec la cire calibrée.

3.6. La chaîne de fabrication des préformes

Une fois que l'ensemble des outils numériques, matériels et les liaisons ont été définis, il est possible de mettre en place une chaîne de fabrication de préformes complètes. Cette chaîne de fabrication des préformes est illustrée à la Figure 3-8. C'est sur ce modèle de chaîne de fabrication que seront fabriquées les différentes préformes de la chaise de recherche sur les composites à hautes performances.

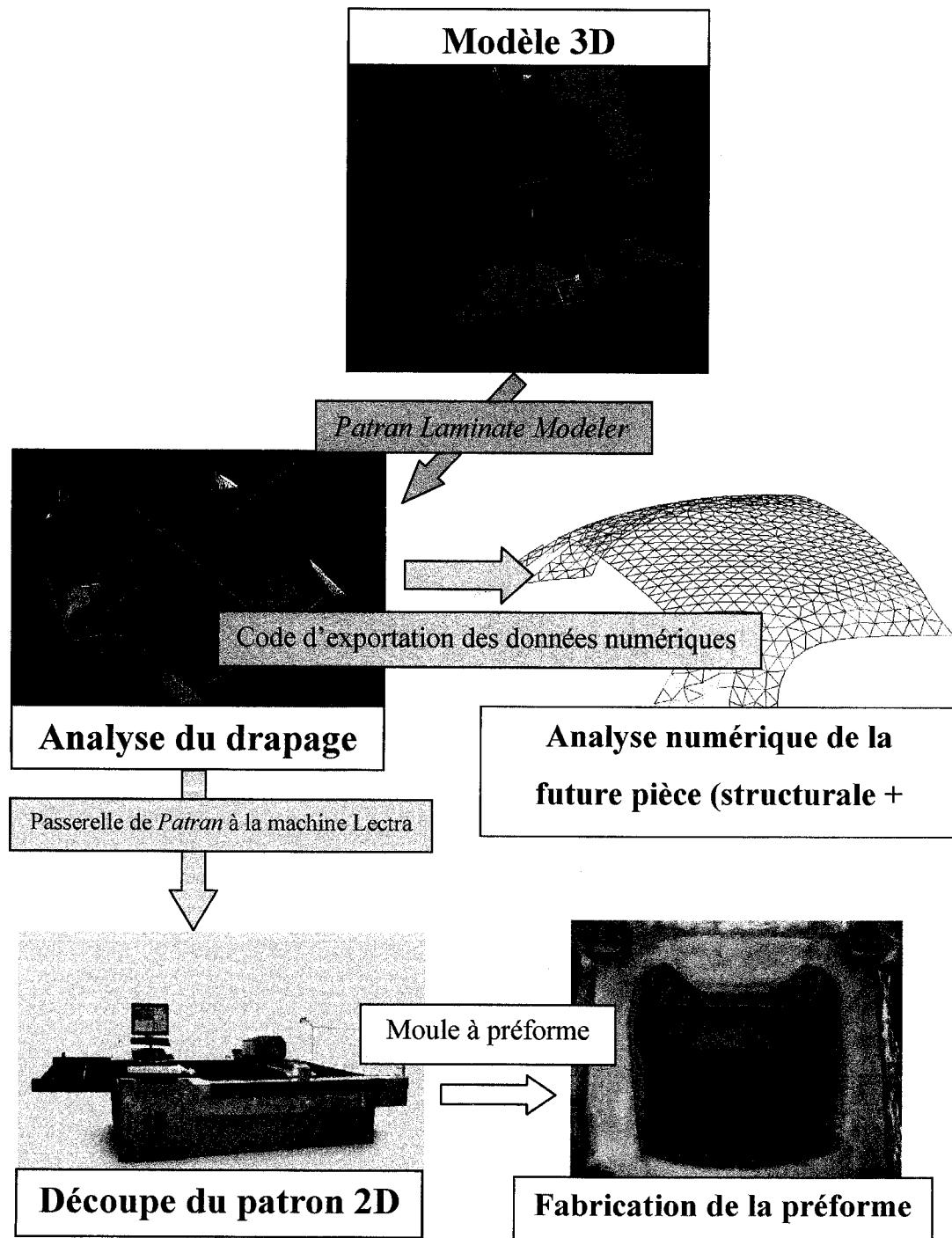


Figure 3-8 : La chaîne de fabrication des préformes.

3.7. Conclusion

Lors des précédant chapitres, des études numériques de drapage ont été réalisés. Des tests de mise à plat de tissu ont également été réalisés. Il était important de pouvoir faire le lien entre les différents composants permettant de réaliser ces études numériques d'une part et ceux permettant de fabriquer la préformes 3D réelle. C'est ce qui a été fait dans ce chapitre. En effet, une machine de découpe à commande numérique a été choisie et achetée pour les besoins du laboratoire. Un moule à préforme a été fabriqué par laminage afin de pouvoir tester la fabrication des préformes. De plus, l'utilisation de différents matériels provenant de différentes compagnies, pour des raisons de performances où de prix induit des problèmes de communication. Des passerelles ont donc étaient réalisées afin de pouvoir jouir pleinement d'une chaîne de fabrication de préforme du modèle CAO 3D à la préforme elle-même. Reste maintenant à vérifier la prédiction des patrons 2D et de l'orientation des fibres pour le moule PF3, c'est ce qui est présenté dans le prochain chapitre.

4. CHAPITRE 4 : ETUDE EXPERIMENTALE DE LA MISE EN FORME

4.1. Introduction et objectifs

Les chapitres précédents ont traité de l'aspect numérique de la mise en forme des tissus bidirectionnels. Il est maintenant important de vérifier la prédiction des données numériques sur une vraie pièce.

La première partie de ce chapitre porte sur la découpe des pièces de renforts tissés utilisés pour réaliser des préformes pour un moule expérimental. Connaissant la géométrie 3D de la pièce composite à fabriquer et le type de tissu employé, le logiciel *Patran Laminate Modeler* a permis dans le chapitre 2 d'obtenir le patron de la pièce à découper, c'est-à-dire la forme bidimensionnelle du tissu qui, une fois drapé sur la surface 3D du moule, constituera la préforme fibreuse servant de renfort au composite. Le premier objectif consiste à vérifier expérimentalement à l'aide de la machine de découpe *Lectra Vector Auto 2500* les prédictions de *Patran Laminate Modeler*.

Par ailleurs, le drapage des tissus sur des surfaces de géométrie complexe provoque l'apparition d'un cisaillement entre les fibres du tissu. Ceci a une répercussion certaine sur les propriétés mécaniques des pièces composites produites ainsi que sur le remplissage de la cavité du moule dans le cas d'une fabrication par injection. Des méthodes numériques de prédiction du cisaillement existent. Le second objectif du projet consiste à vérifier leur précision de manière expérimentale. Dans la seconde partie du travail une procédure expérimentale sera développée pour mesurer le plus précisément possible les angles de cisaillement qui apparaissent lors du drapage de tissus bidirectionnels sur une surface tridimensionnelle. Les essais sont réalisés avec le moule à préforme défini dans le chapitre précédent.

4.2. Découpe des tissus et essais de drapabilité

Avant de pouvoir préformer une pièce composite, la première étape consiste à découper le tissu en fibres de verre. Dans le cas d'une pièce de géométrie simple (plaqué rectangulaire par exemple), on peut se contenter de dessiner le patron au feutre et de découper à l'aide de ciseaux. Par contre, pour une géométrie complexe, le travail ne peut pas être effectué rapidement et de manière répétable sans l'emploi de moyens plus lourds. Le schéma directeur de la méthode utilisée est donné sur la Figure 4-2. La partie droite de ce graphe se rapporte à la découpe des tissus et mats de verre, et aux essais de drapabilité effectués sur le moule à préformes fabriqués pour cette occasion. La description de ce moule est fournie en Annexe F. Les différentes étapes successives sont la génération du patron avec *Patran Laminate Modeler*, la modification du fichier DXF produit avec *Autocad 2006*, la découpe sur la machine *Lectra Vector Auto 2500* et enfin l'essai de drapabilité sur le moule à préformes. La partie gauche du schéma se rapporte à la mesure du cisaillement plan apparaissant dans les tissus bidirectionnels au cours d'un drapage sur moule courbe. Cette méthode permet, à partir d'une photographie numérique, de déduire les angles de cisaillement d'un tissu bidimensionnel mis en place sur un moule courbe. Elle allie l'utilisation des lois de l'optique géométrique, du calcul numérique (*Matlab*) et d'une maquette numérique du moule considéré (*Patran*, seulement le module géométrique, pas le module de drapage). Les résultats expérimentaux sont alors comparés aux prédictions numériques de *Patran Laminate Modeler*. Le contenu de cette méthode est l'objet de ce chapitre.

4.2.1. Matériel utilisé

Deux outils vont être utilisés de manière conjointe afin de permettre la découpe correcte des tissus : il s'agit du logiciel commercial *Patran Laminate Modeler* de la compagnie MSC Software et de la machine de découpe *Lectra Vector Auto 2500* développée par la société française Lectra. On peut observer la machine de découpe sur la photo de la Figure 4-1.

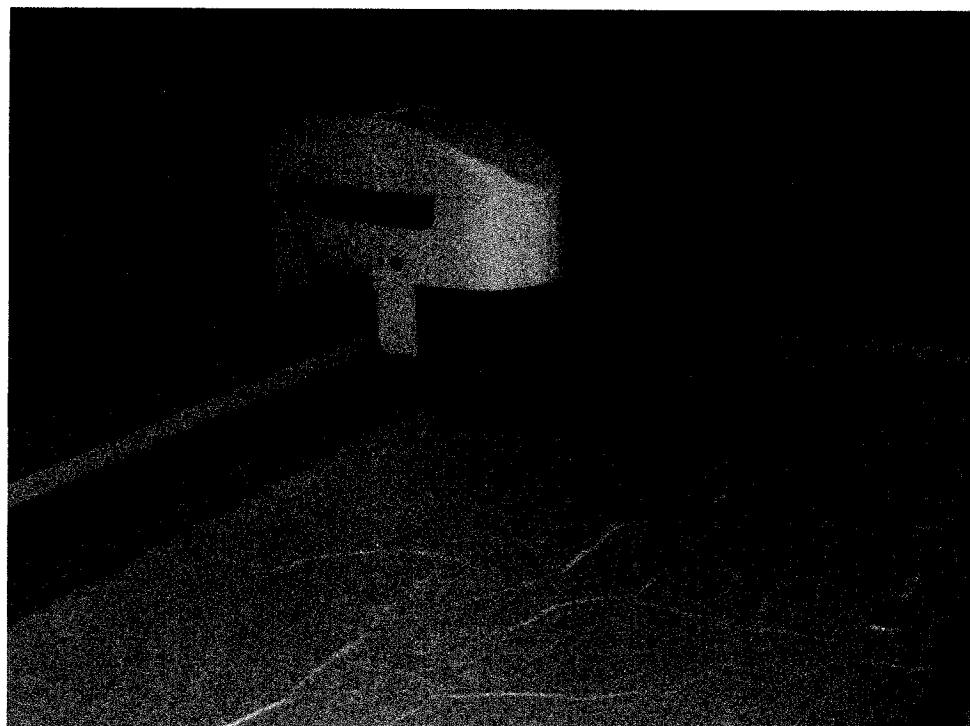


Figure 4-1 : Machine de découpe *Lectra Vector Auto 2500*

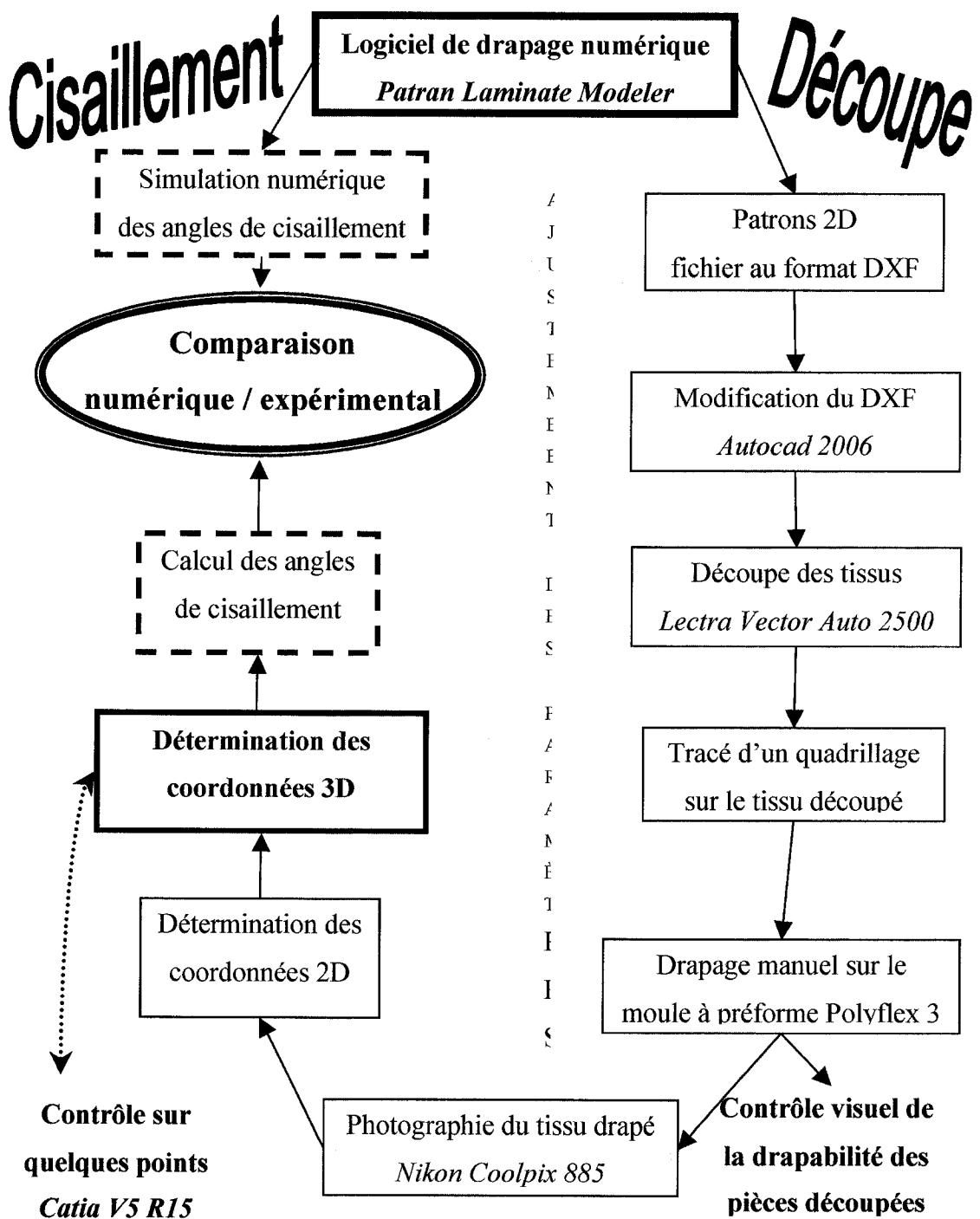


Figure 4-2 : Schéma directeur de l'étude expérimentale menée.

4.2.2. Mise à plat des patrons 2D

Le logiciel commercial *Patran Laminate Modeler* est capable, à partir du modèle 3D du moule et du type de tissu drapé, de générer un patron 2D du morceau de tissu à découper. Cette capacité de **mise à plat** du tissu présente l'avantage de gagner en efficacité pour la production de préformes. Si on prend l'exemple des préformes correspondant au moule PF3, le logiciel est capable de fournir le contour suivant (voir Figure 4-3) par exemple.

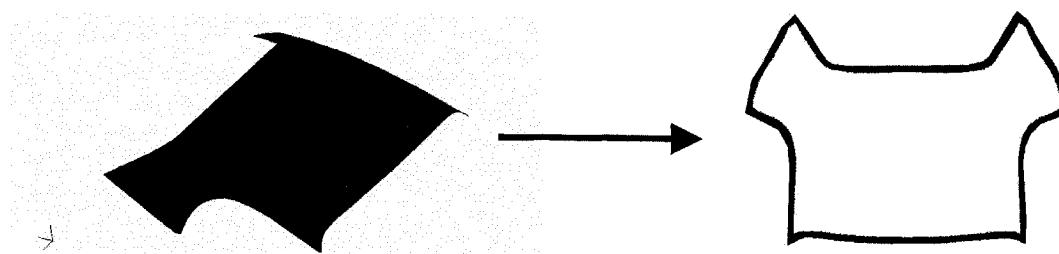


Figure 4-3 : Mise à plat des patrons avant découpe.

L'objectif sera donc ici de valider les formes de patron 2D obtenues avec le logiciel dans le Chapitre 2, et d'observer l'impact des différents paramètres de simulation (point d'application, direction de drapage, taille de la maille choisie, etc) sur la forme proposée pour les deux méthodes les plus stables de l'algorithme de drapage.

4.2.3. Paramètres de coupe

La machine de découpe dispose d'un nombre important de réglages possibles. Cependant seule l'étude d'un petit nombre de ces paramètres est pertinente pour la découpe de tissus de fibres de verre. Les paramètres qui seront étudiés ici sont donc la puissance d'aspiration (la découpe se fait sous vide d'air partiel), la vitesse d'avancée de la tête de découpe, la fréquence de la lame et la vitesse de rotation de la lame aux coins de la pièce.

Pour découper une seule couche de tissu de verre, l'aspiration peut être sollicitée à 50% de sa capacité totale sans perte de qualité. Ce paramètre a peu d'influence ici. Au contraire, la vitesse d'avancée de la tête de coupe doit être limité à 0,8 m / sec sous peine de risquer un glissement du tissu et une découpe manquée. Une fréquence de lame élevée (3000 périodes / min) évite un effilochage trop important des bords de tissu. Enfin, le rayon de courbure de la tête de découpe doit être très réduit au niveau des points anguleux, afin de garantir un suivi correct du tracé prévu. Comme la lame peut tourner à 600° / sec au maximum, il est recommandé de réduire la vitesse de la tête de découpe à 0,3 m / sec (environ 20 m /min) dans les courbes. Tous ces paramètres se règlent via l'interface graphique de commande de la machine et sont expliqués dans la notice fournie par Lectra.

4.2.4. Résultats et discussion

Dans un premier temps, des renforts en fibres de verre aléatoires (mats) doivent être préparés pour injection dans le moule PF3. Il est donc nécessaire de définir le patron 2D du moule PF3 pour ce type de matériau afin de pouvoir injecter des pièces dans ce moule. Dans un deuxième temps, des tissus de verre bidirectionnels doivent être mis en forme pour être également injectés dans le moule PF3.

4.2.5. Découpe de mats de verre

Le matériau utilisé pour les essais est un mat de verre à fibres continues de densité 300 g/m². Le logiciel *Patran Laminate Modeler* ne permet pas de mettre à plat des tissus non déformables comme les mats. En effet, seuls les tissus bidirectionnels, dont la cellule unitaire est carrée, peuvent être modélisés et drapés sur une surface avec *Patran Laminate Modeler*. Afin de modéliser le mat, une taille de cellule importante de la taille de la pièce (400 mm) est définie dans le logiciel *Patran Laminate Modeler* pour simuler le fait que ce type de matériau est indéformable en son plan (cisaillement rendu quasiment impossible par l'enchevêtrement des fibres). Les résultats obtenus sont

mauvais et le patron n'épouse pas du tout la forme du moule, comme le montre la Figure 4-4, et ce quelle que soit l'option de drapage choisie.

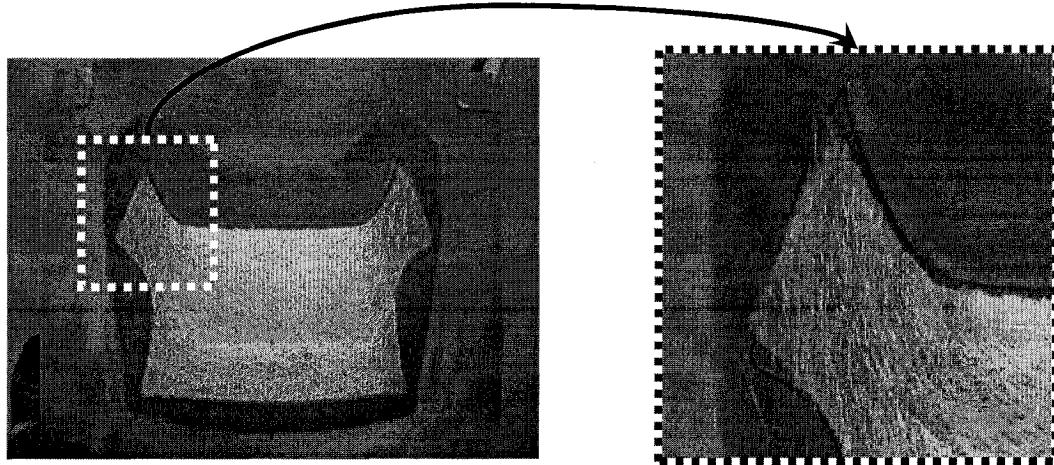


Figure 4-4 : Premier patron 2D du mat positionné sur le moule PF3.

Comme il a été montré dans le Chapitre 2 sur l'étude numérique de la mise en forme, les deux options de l'algorithme de drapage de *Patran Laminate Modeler* les plus stables étaient : la minimisation de l'énergie de cisaillement et l'utilisation des lignes géodésiques. Il a aussi été montré que pour le moule prototype, seule la méthode de minimisation de l'énergie de cisaillement du tissu donnait des résultats stables. Les résultats obtenus par l'utilisation des lignes géodésiques sur la surface ne sont pas stables numériquement par rapport à la direction d'application.

Pour modéliser le mat à l'aide du logiciel *Patran Laminate Modeler* il semble donc plus intéressant d'utiliser l'algorithme de minimisation de l'énergie de cisaillement. En effet, cette méthode est stable et constitue l'option de l'algorithme qui engendre le moins de déformations au sein du matériau. Afin d'améliorer la découpe des patrons 2D avec ce type de matériau, une taille de cellule importante est choisie, ce qui limite le nombre de degrés de liberté au sein du matériau modélisé et donc augmente la rigidité du tissu. La taille de cellule qui donne les meilleurs résultats est 20 mm. La découpe du patron 2D obtenu est présentée à la Figure 4-5.

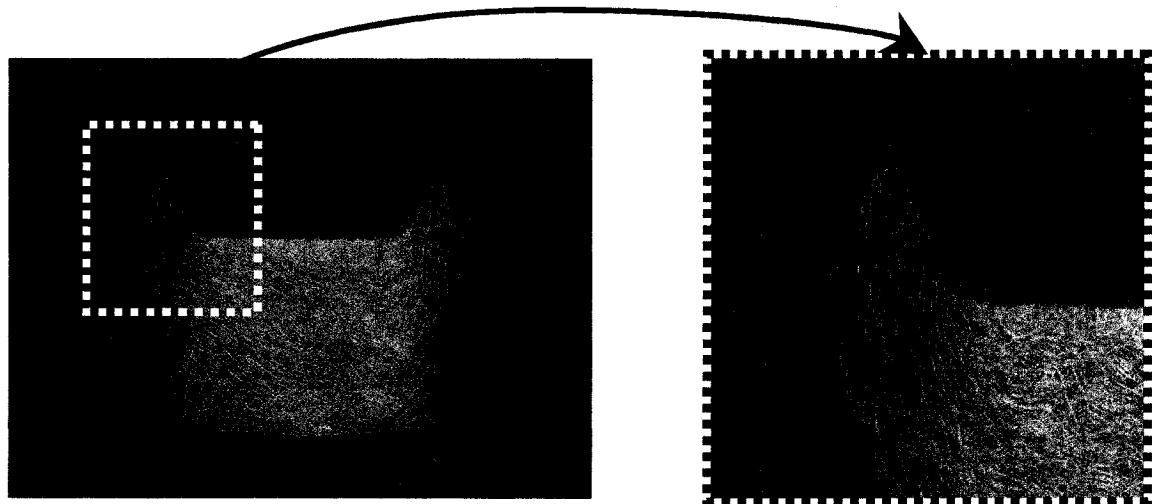


Figure 4-5 : Patron 2D « *net-shape* » d'un mat positionné sur le moule PF3.

4.2.6. Découpe de tissus de verre bidirectionnels

Le matériau utilisé pour les essais est un tissu bidirectionnel 0/90 de densité théorique 104 g/m². Il est référencé 82015 chez JB Martin. Avec les deux méthodes de drapage considérées (méthode géodésique et minimisation de l'énergie de cisaillement) des patrons 2D ont été générés par *Patran Laminate Modeler* pour le type de tissu utilisé, c'est à dire un tissu de verre bidirectionnel balancé dont la taille de la cellule unitaire est de 3 mm. Les patrons 2D ne coïncident pas, et c'est normal puisque les options de drapage diffèrent. On peut facilement l'observer sur la Figure 4-6 où les 2 patrons ont été superposés.

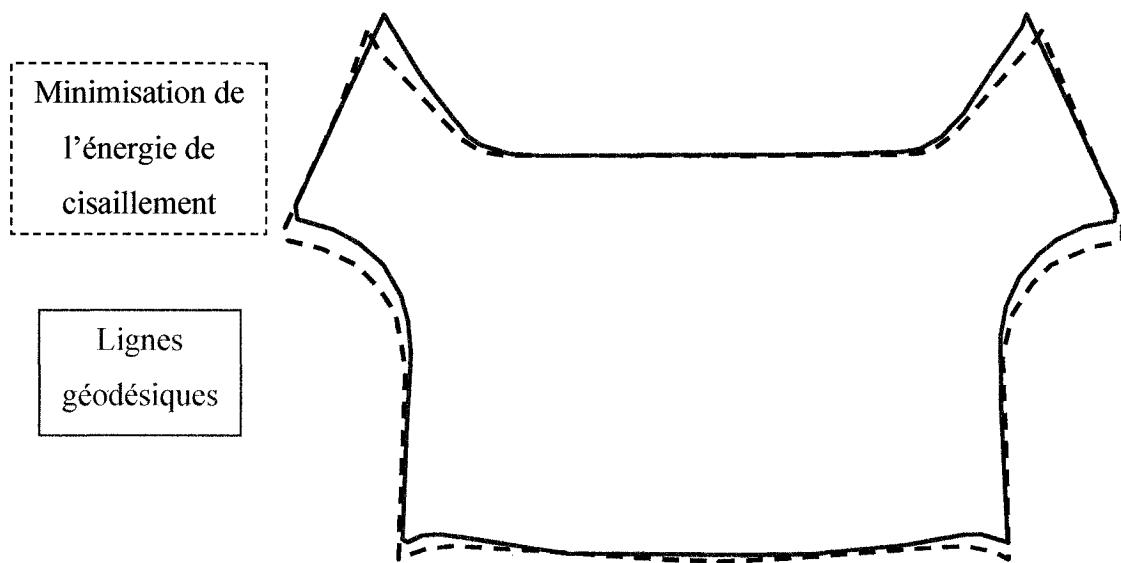


Figure 4-6 : Patrons 2D pour les 2 types de drapage numérique.

Néanmoins, ce type de tissu étant très facilement déformable, il est facile avec les deux méthodes de faire épouser parfaitement le contour de la pièce dans le moule. Les deux découpes drapées sur le moule PF3 sont montrées aux Figure 4-7 et Figure 4-8.

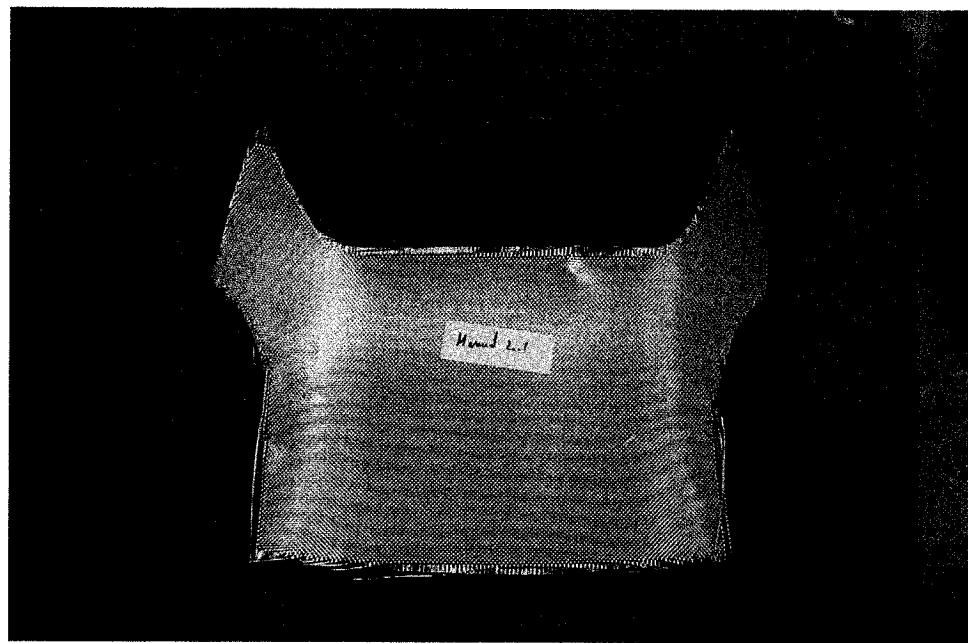


Figure 4-7 : Patron 2D d'un tissu de verre bidirectionnel obtenu avec l'option de drapage manuel de *Patran Laminate Modeler* positionné sur le moule PF3.

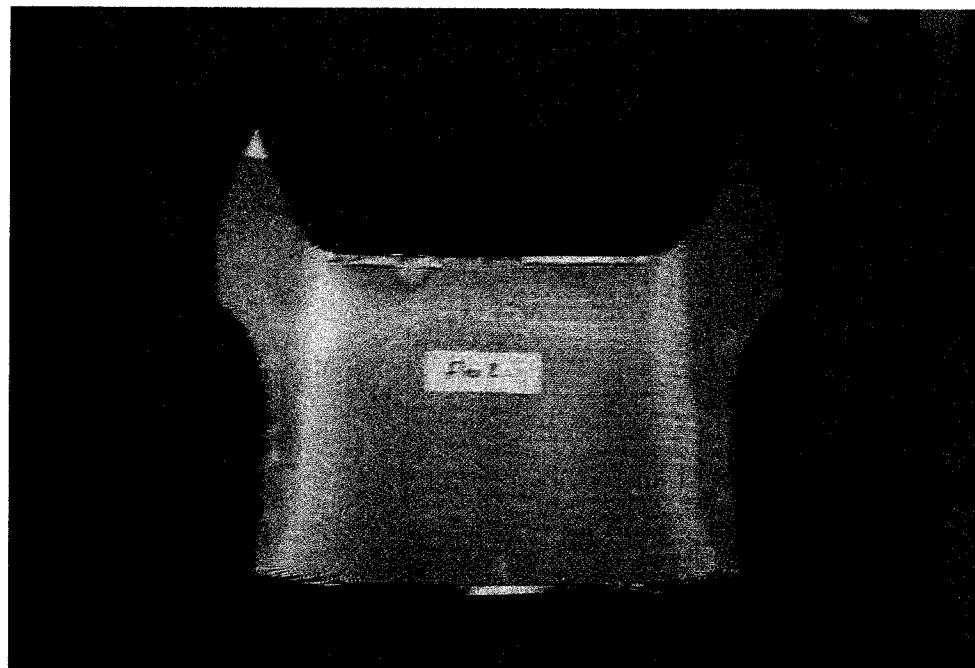


Figure 4-8 : Patron 2D d'un tissu de verre bidirectionnel obtenu avec l'option de placement sous membrane de *Patran Laminate Modeler* placé sur le moule PF3.

4.2.7. Conclusions et recommandations

Le drapage de tissu bidirectionnel sur un moule courbe est aisé du fait de la tr  grande souplesse en cisaillement de ce type de mat  riau. Par contre les mats de verre sont certes facilement déformables en flexion hors du plan, mais tr  peu déformables en cisaillement dans leur plan. Dans ce cas, la méthode de drapage numérique par minimisation de l nergie de cisaillement semble bien adaptée pour obtenir des patrons 2D permettant un drapage correct de ce type de renforts, bien que le résultat soit moins bon qu avec des tissus. Selon l option de drapage numérique sélectionnée, *Patran Laminate Modeler* génère des patrons 2D différents. Si ces patrons permettent toujours de draper correctement les tissus sur le moule puisqu ils sont « souples » en cisaillement, les angles engendrés peuvent modifier considérablement les propriétés mécaniques de la pièce finale. C est pourquoi il est important de mesurer expérimentalement les angles de cisaillement engendrés lors du drapage de chacun de ces deux patrons sur le moule   préformée PF3. C est l objet de la suite de ce chapitre.

4.3. tude du drapage de tissus bidirectionnels

Le drapage de tissus sur des surfaces géométriques variées engendre des problèmes qui n existaient pas lorsqu on se limitait au drapage sur des surfaces planes ou développables. On observe notamment l apparition d angles de cisaillement qui peuvent être importants. Si des simulations numériques ont déjà été effectuées, il apparaît nécessaire de confronter ces résultats avec des données expérimentales de drapage sur des surfaces courbes.

Ainsi, il est nécessaire de prédire les angles de déformation afin d exercer un contrôle précis sur les propriétés mécaniques de la pièce finale. La suite de ce chapitre a donc pour objectif de définir une méthodologie   mettre en œuvre afin de mesurer les angles de cisaillement lors du drapage d un tissu bidirectionnel. Des méthodes numériques de simulation du drapage existent. Il convient donc de vérifier expérimentalement si les

résultats proposés par le logiciel commercial *Patran Laminate Modeler* dans le Chapitre 2 coïncident avec des mesures d'angle réelles.

4.3.1. Principe de mesure expérimentale des angles de cisaillement

L'idée de base est ici de dessiner un quadrillage régulier selon les directions orthogonales des fibres d'un tissu bidirectionnel. Ce tissu est ensuite déposé sur un moule comportant des zones de courbure dans lesquelles on cherche à observer la déformation du quadrillage. Les outils suivants seront utilisés : d'abord une caméra numérique pour prendre une photo à la verticale du moule, le logiciel *Adobe Photoshop Cs* pour traiter l'image obtenue, puis *Matlab* pour calculer les nouvelles coordonnées 2D des points d'intersection du quadrillage. Ces coordonnées 2D sont ensuite exportées vers *Patran* afin d'obtenir la 3^{ème} coordonnée à partir de la connaissance de la géométrie 3D du moule. Ces informations sont ensuite renvoyées à *Matlab* qui peut alors calculer les angles de croisement des fibres à chaque intersection du quadrillage. Chaque étape de cette procédure va maintenant être décrite en détails.

4.3.2. Procédure expérimentale

Le tissu utilisé est un tissu bidirectionnel de taille de cellule 3 mm. Un quadrillage est dessiné sur ce tissu en prenant garde de bien suivre la direction des fibres (voir Figure 4-9). Ce quadrillage est formé de 2 séries de lignes parallèles espacées de 10 mm.

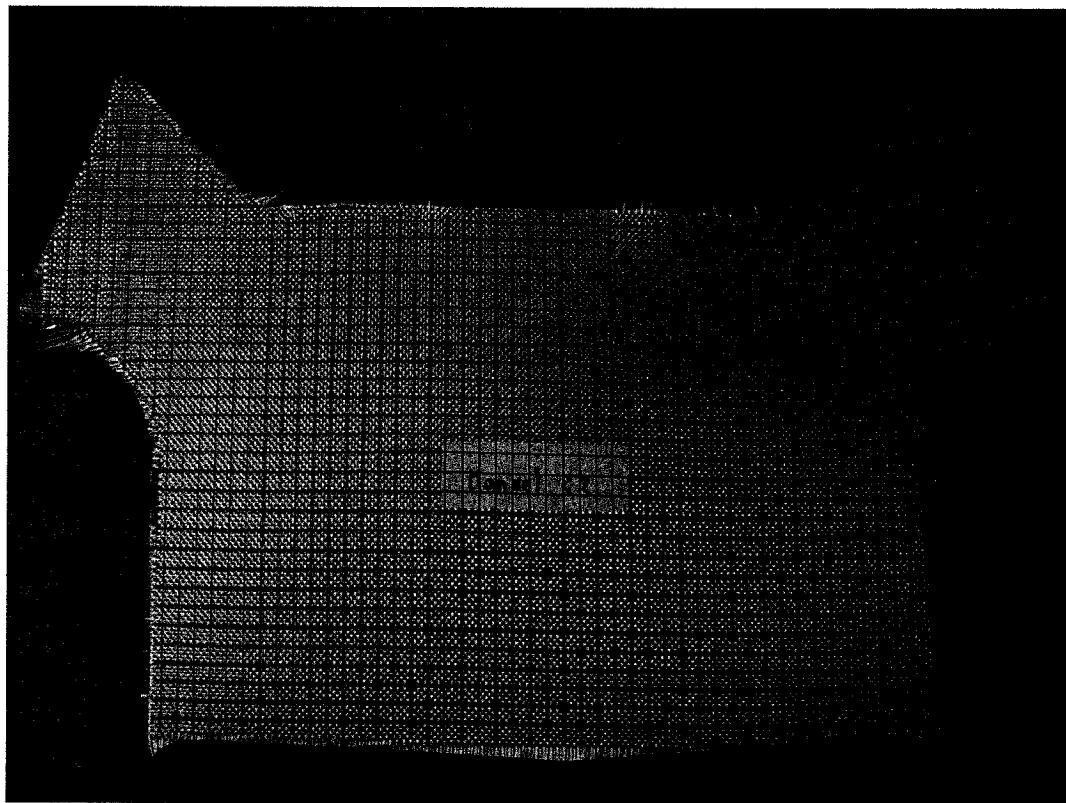


Figure 4-9 : Tissu quadrillé selon les directions des fibres.

Le tissu quadrillé est ensuite placé sur le moule correspondant, puis est ajusté manuellement de manière à ce que son contour suive bien le tracé sur le moule. Ce tracé a été réalisé au feutre à partir d'une pièce étalon fabriquée par compression dans le moule principal. Même si cette pièce n'est pas parfaite, on peut raisonnablement penser que son contour s'approche de la géométrie souhaitée. On peut observer le moule à préforme sur la Figure 4-10. Les points clairs sur la photo correspondent à 3 points situés sur la partie plane du moule (ils sont tous à la même élévation). Ces points, dits « de calage », serviront à faire la transition entre le repère 2D de la photo et le repère 3D de *Patran Laminate Modeler*.

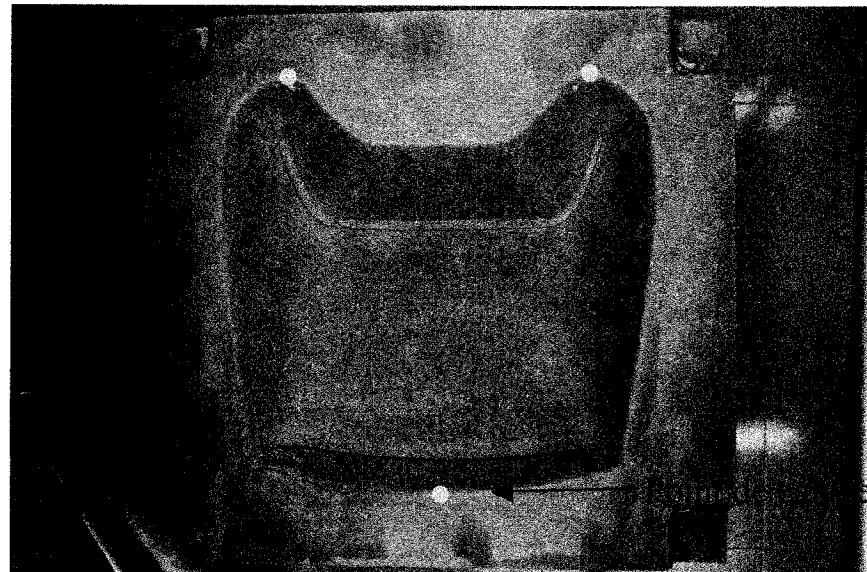


Figure 4-10 : Moule à préforme pour PF3.

Le tissu quadrillé est placé manuellement sur le moule. Il en résulte une déformation du quadrillage. La visualisation de cette déformation permet d'obtenir une information sur l'angle de déformation entre les deux directions principales du tissu (Figure 4-11)

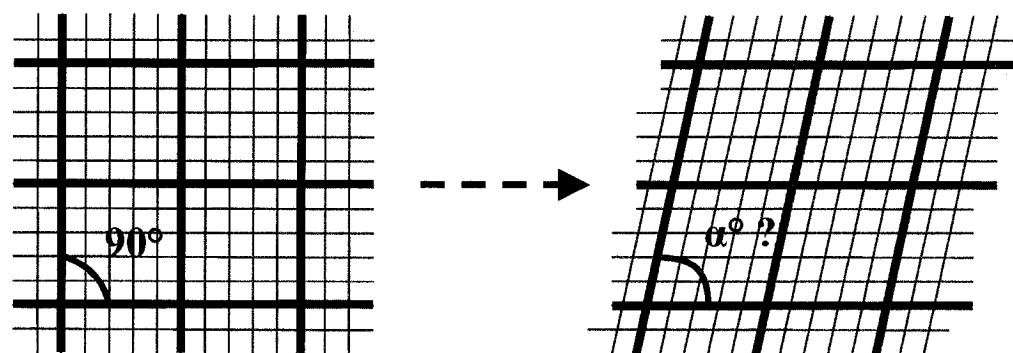


Figure 4-11 : Objectif de l'étude.

Prise de vue

La première étape de la mesure de cette déformation consiste à prendre une photo du tissu après placement sur le moule. La photographie s'effectue à l'aide d'une caméra numérique mise à la verticale au dessus du moule. La caméra est placée sur un trépied, ce qui permet de la positionner correctement et d'assurer la verticalité grâce à un niveau à bulle. On peut observer une partie du montage sur la Figure 4-12. Il faut également mesurer avec précision la distance f entre le plan contenant les points de calage sur le moule et l'objectif de la caméra.

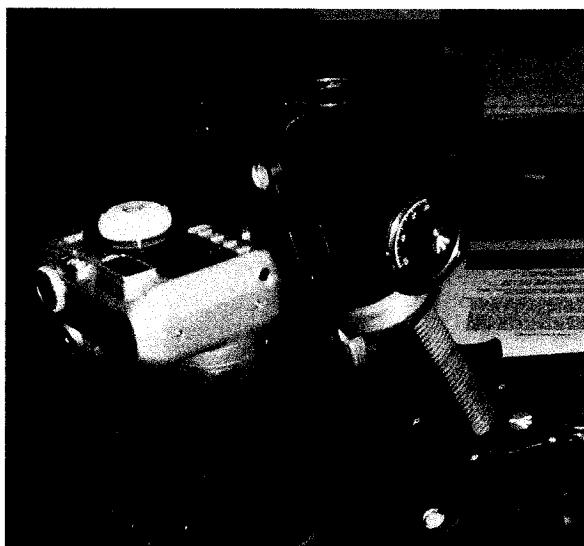


Figure 4-12 : Caméra numérique placée sur son pied.

L'appareil utilisé pour effectuer les clichés est un **Nikon Coolpix 885**. Cet appareil est équipé d'un capteur CCD capable de produire des images de 2048 x 1536 pixels. La qualité de l'image a une grande influence sur la facilité du traitement graphique. Un appareil haute définition permet de gagner en précision de mesure. Les spécifications techniques de l'appareil utilisé sont fournies en annexe. Une fiche technique donne les caractéristiques de la caméra utilisée en Annexe J.

Mesure des coordonnées 2D

A partir de la photographie du quadrillage déformé il faut trouver un moyen permettant de remonter aux coordonnées 3D des points d'intersections. La première étape de ce processus consiste à mesurer les coordonnées de ces points dans le repère 2D de la photographie. Deux méthodes distinctes ont été développées.

Développement des méthodes de mesure

La première approche est manuelle et présente l'avantage de ne nécessiter qu'un seul logiciel, *Matlab*, et surtout d'avoir un meilleur contrôle de l'information relative à la **numérotation** des nœuds du quadrillage. La deuxième méthode se veut plus automatisée, mais nécessite de conjuguer les possibilités offertes par deux logiciels commerciaux, *Adobe Photoshop Cs* pour le traitement de l'image, puis *Matlab* pour le « calcul » des coordonnées des nœuds du quadrillage. Cette deuxième approche présente l'inconvénient de dépendre fortement de la qualité de l'image : en effet le traitement graphique s'effectuera mal et nécessitera finalement un travail manuel de retouche si le contraste change d'un endroit à l'autre de la photographie. Le détail de chacun des deux traitements est décrit en Annexe G et Annexe H. Seuls les résultats sont présentés ici. L'erreur de mesure a été évaluée. Les résultats sont présentés en Annexe I.

Exportation des données

A la sortie du processus, *Matlab* exporte un tableau contenant les coordonnées 2D des intersections du quadrillage. Ces coordonnées sont exprimées en pixels. Les informations sont enregistrées dans un fichier codé en ASCII. Le code *Matlab* relatif à ce travail est donné en Annexe L, fonction *coor*. On peut visualiser le résultat de manière graphique, ce qui permet de contrôler qu'aucun point du quadrillage (Figure 4-13) n'a été oublié. De plus, l'image obtenue étant le résultat d'une photographie, il faut tenir compte de l'**effet de perspective** provoqué par l'utilisation d'un moule

tridimensionnel. Ceci sera pris en compte lors du calage des coordonnées effectué dans la section suivante.

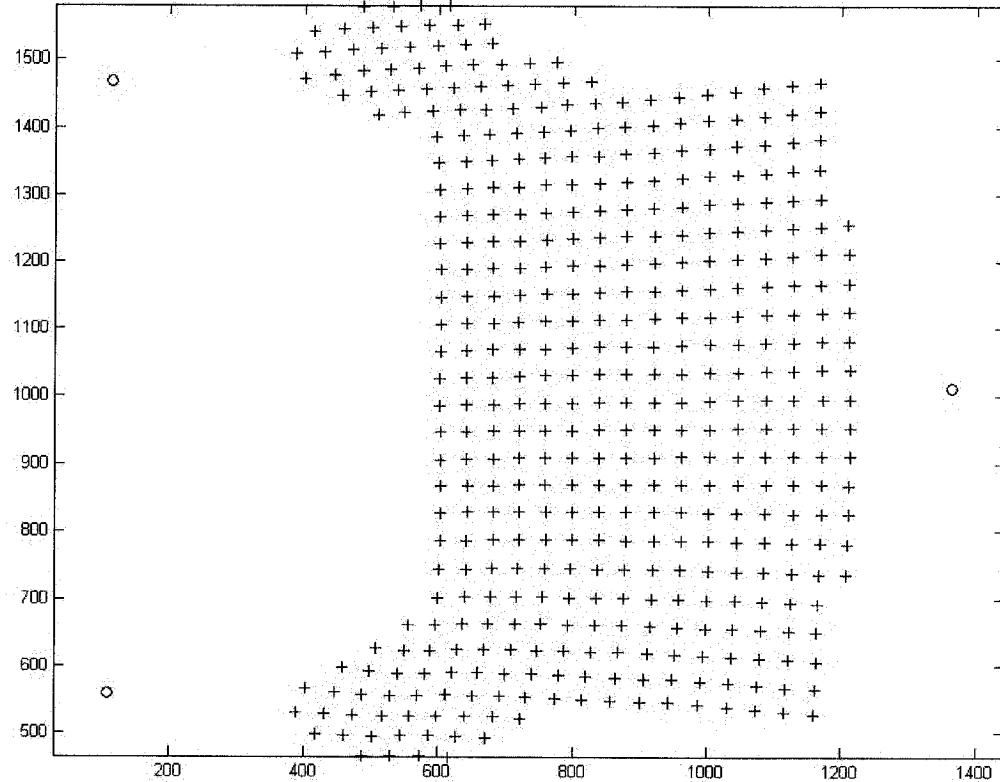


Figure 4-13 : Visualisation des coordonnées relevées.

4.3.3. Passage en trois dimensions

Le calcul d'angles dans l'espace tridimensionnel nous impose de trouver un moyen d'accéder à la coordonnée Z des points d'intersection. Pour cela, on exploite le fait que le tissu se trouve en contact avec le moule et que par conséquent, l'élévation des points d'intersection du quadrillage est la coordonnée Z du point du moule dont les autres coordonnées sont X et Y . En fait il faut augmenter Z d'une certaine valeur δ dont l'ordre de grandeur est l'épaisseur e du tissu e . Cet effet très faible n'aura finalement aucune

influence sur la mesure des angles de déformations puisque seuls les écarts d'élévation comptent. La Figure 4-14 schématise la correction δ due à l'épaisseur du tissu.

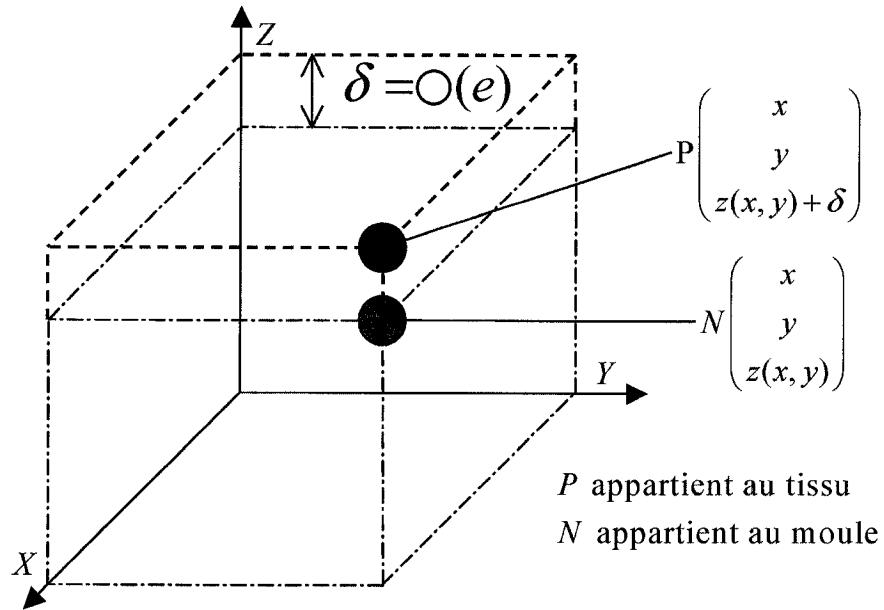


Figure 4-14 : Décalage entre l'élévation des points du tissu et celle du moule.

Principe d'une prise de vue photographique

Schématiquement une caméra numérique est constituée d'une lentille (l'objectif) et d'une plaque CCD qui capte la lumière à travers la lentille. Pour effectuer le calage des coordonnées de la photographie, nous allons simuler sous *Patran* le fonctionnement de la caméra. Si on utilisait comme à la Figure 4-15 un moule transparent résultant de l'extrusion d'un triangle rectangle, on obtiendrait, lors de la projection à travers la lentille, non pas un rectangle, mais un trapèze puisque les points plus proches de l'objectif donneront l'impression d'être plus « à l'extérieur » sur la photographie. Ceci s'explique par les lois de l'optique géométrique qui sont représentées dans le schéma de la Figure 4-16.

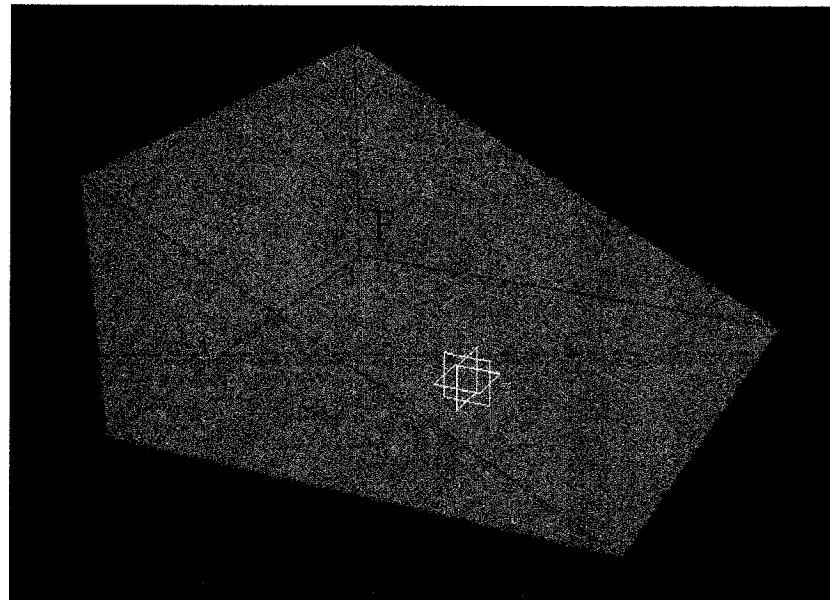


Figure 4-15 : Exemple de moule en relief.

Lorsque les rayons lumineux se croisent au centre de la lentille, ceux qui proviennent des points de la pièce les plus proches de l'objectif vont rencontrer le plan des capteurs CCD plus loin de l'axe de visée. Ainsi deux points du moule situés à la même distance de l'axe de visée peuvent très bien se retrouver à des distances différentes du centre de la photo.

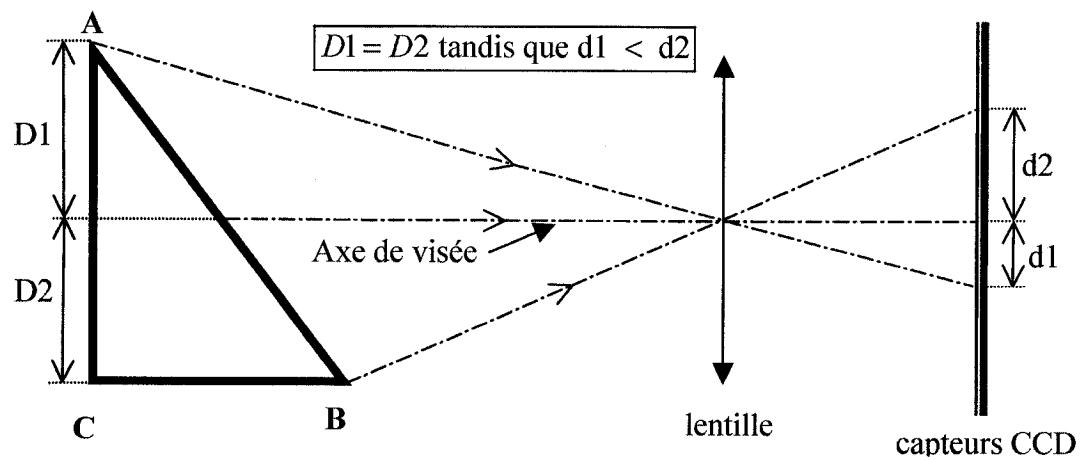


Figure 4-16 : Tracé des rayons lumineux virtuels.

Lorsque que l'on prend un cliché à la verticale de ce moule, on obtient non pas un rectangle qui est la forme de la base du moule (l'extrusion du triangle a formé un rectangle) mais un trapèze. Ceci est visualisé sur la Figure 4-17.

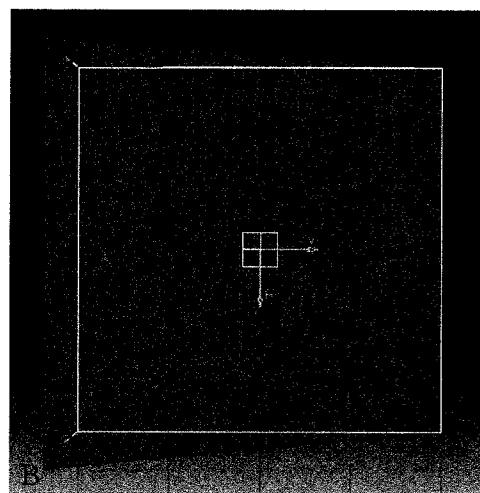


Figure 4-17 : Déformation due à la perspective.

Principe du calage

Pour obtenir les coordonnées réelles des points d'intersection du quadrillage, il faudra donc prendre le chemin inverse des rayons lumineux qui sont venus rencontrer les capteurs CCD. Ce principe est inspiré des méthodes d'interprétation des photographies aériennes (RUELLAN, 1967). Ceci demande de connaître précisément l'élévation à laquelle a été prise la photographie et plus précisément la distance entre le centre de la lentille et le plan contenant les points de calage du moule. Il faut également veiller à ce que l'axe de visée coïncide avec l'axe vertical (niveau à bulle).

Centre de la lentille

La première chose que l'on désire connaître est l'emplacement (coordonnée 3D) du centre de la lentille. Ce point est repéré par ses coordonnées (X, Y, Z) dans la représentation 3D et se trouve au niveau du pixel (1024,768) dans le repère de la photo. Le moyen de repérage retenu pour obtenir les coordonnées (X, Y, Z) du centre est le **repère barycentrique** (à 3 points puisque la photo est un espace affine de dimension 2). Le développement mathématique concernant le repérage barycentrique est fourni en commentaire du code *Matlab* de la fonction ***projection*** (Annexe L). Pour la coordonnée Z , on se contente d'ajouter f (distance focale) à l'élévation du plan contenant les points de calage. Pour les coordonnées X et Y on détermine les coefficients de pondération à appliquer aux 3 points de calage afin que leur barycentre soit au milieu de la photo. Ces **poids** sont déterminés à un coefficient multiplicatif près, et on peut les calculer analytiquement en résolvant un système linéaire simple. Ensuite, connaissant les coordonnées 3D des points de calage, on calcule les coordonnées 3D de leur barycentre en leur appliquant les poids calculés précédemment. On obtient ainsi X et Y dans le repère tridimensionnel. Le code *Matlab* correspondant est documenté en Annexe L (fonction ***projection***)

Photographies virtuelles

Ensuite on utilise *Patran* pour générer l'image des points de calage à travers une prise de vue virtuelle. Schématiquement, cela revient à placer un point au dessus du moule pour représenter le centre de l'objectif (la lentille) et à chercher les intersections entre les droites issues des points de calage et passant par ce centre, et un plan focal imaginaire situé au dessus de la lentille. Le plan focal est orthogonal à la direction verticale. Pour faciliter le travail on le place à une distance qui permet de faire coïncider les échelles de la photo et du plan focal (de manière à ce que les distances entre les points de calage sur la photo et les distances entre ces mêmes points sur le plan focal soient identiques en moyenne). La Figure 4-18 illustre le principe de cette photographie virtuelle effectuée avec le logiciel *Patran* sur la maquette numérique, le code PCL (*Patran Command Language*) est présenté en Annexe M.

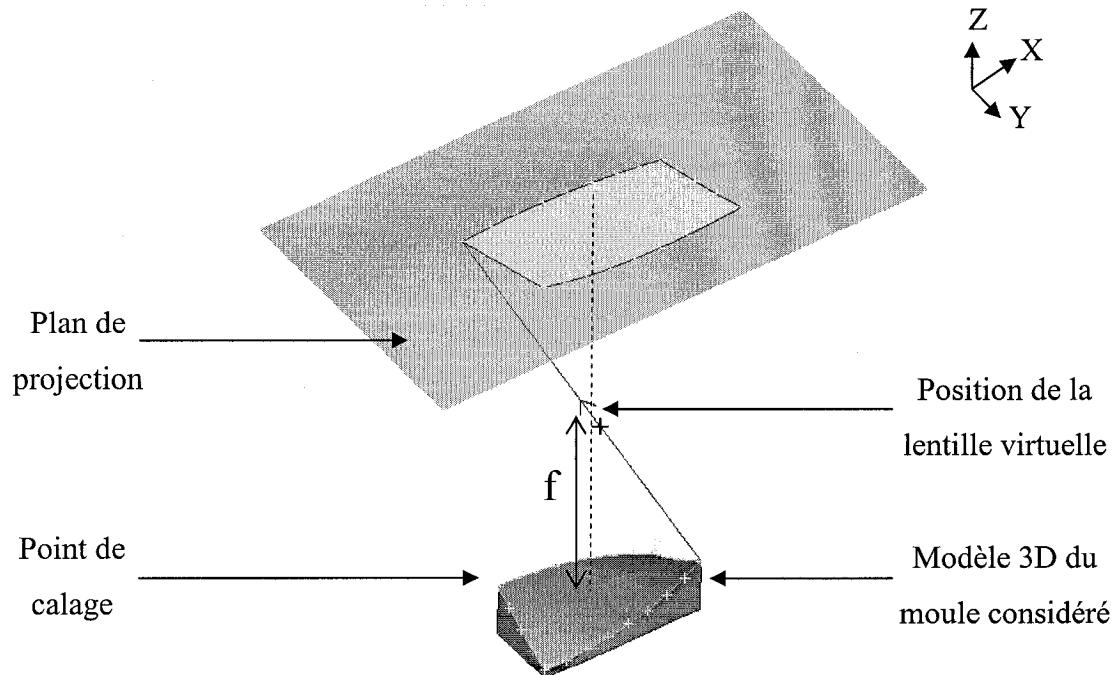


Figure 4-18 : Principe de la photographie virtuelle.

La dernière étape du calage consiste à utiliser la méthode des moindres carrés pour déterminer l'orientation de la caméra lors de la prise de vue. Cette méthode permet

d'effectuer une translation dans le cas où l'origine des coordonnées de la photo serait décalée par rapport à celle du modèle numérique 3D, et une légère rotation dans le cas où l'appareil aurait été tourné de quelques degrés. Le principe de projection des points de calage a été validé expérimentalement à l'aide d'une planche en bois inclinée d'un angle connu. Les résultats sont présentés en annexe.

La méthode des moindres carrés

On note X_i et Y_i les coordonnées du point de calage n°i dans le repère de la photo, et de même x_i et y_i les coordonnées de ce même point mais dans le repère de la projection sur le plan focal virtuel. Si les mesures de coordonnées étaient parfaites, on devrait avoir, pour chacun des points de calage, les relations suivantes :

$$\begin{cases} x_i = X_i \cos \theta - Y_i \sin \theta + C_x \\ y_i = X_i \sin \theta + Y_i \cos \theta + C_y \end{cases} \quad (4.1)$$

où C_x , C_y et θ sont 3 paramètres à déterminer.

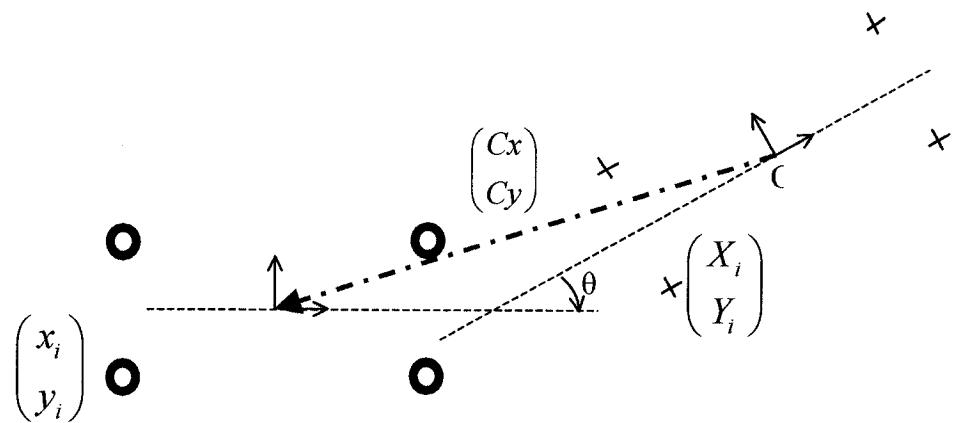


Figure 4-19 : Visualisation du changement de repère.

En réalité on ne pourra jamais trouver 3 paramètres qui conviendront pour tous les points de calage. Aussi va-t-on déterminer numériquement les paramètres qui minimisent la somme des carrés des distances entre points projetés (x_i, y_i) et points déplacés par rotation / translation (x_i^r, y_i^r) . Finalement le triplet (C_x, C_y, θ) est déterminé par la relation :

$$(\theta, C_x, C_y) = \arg \min_{\theta, C_x, C_y} \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^r)^2 + (y_i - y_i^r)^2 \quad (4.2)$$

où le couple $\begin{pmatrix} x_i^r \\ y_i^r \end{pmatrix}$ est évalué de la façon suivante :

$$\begin{cases} x_i^r = X_i \cos \theta - Y_i \sin \theta + C_x \\ y_i^r = X_i \sin \theta + Y_i \cos \theta + C_y \end{cases} \quad (4.3)$$

La fonction réelle positive à minimiser est définie sur le domaine $\mathfrak{R}^2 \times [0, 2\pi]$. Par conséquent, tout minimum local de cette fonction sera atteint en un point qui annule le gradient de la fonction (SHIFRIN, 2005). On peut donc chercher le minimum parmi les solutions du système d'équations (4.4)(4.3).

$$\left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial C_x} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial C_y} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = 0 \right\} \quad (4.4)$$

$$\text{où } \Phi(C_x, C_y, \theta) = \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^r)^2 + (y_i - y_i^r)^2$$

Ce système est doublement non linéaire, d'abord par en raison de la présence des fonctions sinus et cosinus, ensuite par l'apparition de termes croisés lors de la dérivation par rapport à θ . Comme la prise de vue est effectuée avec un angle θ proche de zéro, une version linéarisée de ce système va être utilisée, en écrivant simplement que :

$$\begin{cases} x_i^r \approx X_i - \theta Y_i + C_x \\ y_i^r \approx \theta X_i + Y_i + C_y \end{cases} \quad (4.5)$$

Cet artifice peut paraître inutile puisque le système complet peut être résolu numériquement à l'aide de *Matlab*. Cependant ce système n'admet pas une solution

unique car le triplet cherché se trouve **parmi** les solutions du système. S'il est toujours possible de choisir à la main la bonne solution parmi les quatre possibles, ce travail peut être fastidieux dans le cas d'un grand nombre de mesures. La solution retenue fut de résoudre parallèlement le système complet, qui admet 4 solutions dont celle que l'on cherche, et le système linéarisé, qui n'admet qu'une seule solution, **proche** de la solution cherchée. Il suffit alors de sélectionner automatiquement la solution qui, parmi les 4 solutions du système complet, présente l'angle θ le plus proche de celui de la solution linéarisée. On obtient ainsi le triplet (C_x, C_y, θ) qui minimise la fonction Φ sans approximation. Le code relatif à la méthode des moindres carrés est fourni en Annexe L (fonction **moindre**)

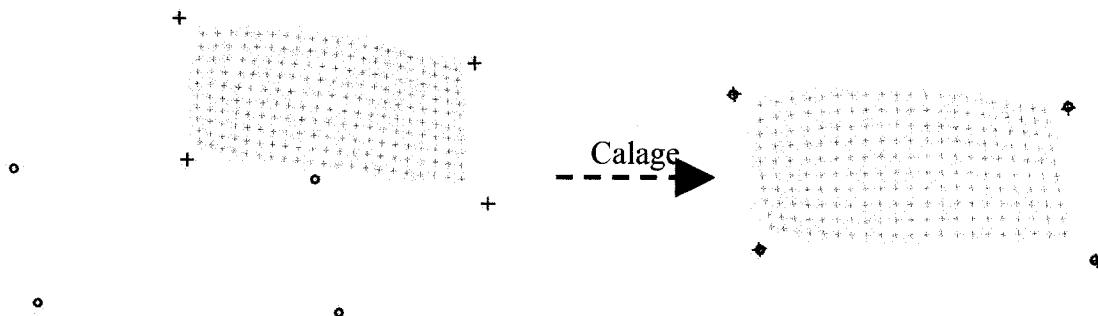


Figure 4-20 : Exemple de calage des repères.

4.3.4. Calcul des angles de déformation

Après avoir obtenu successivement les coordonnées 2D, puis 3D des points d'intersection du quadrillage, nous pouvons maintenant passer au calcul de l'angle local de cisaillement au niveau de chaque intersection. Nous allons de nouveau utiliser le logiciel *Matlab*, en lui fournissant un tableau constitué de 3 vecteurs : les coordonnées X , Y et Z des intersections du quadrillage. Les coordonnées X et Y ont été fournies à

partir de la photo, tandis que l'élévation Z a été évaluée à l'aide de la représentation 3D du moule sous *Patran*.

Principe du calcul

Pour déterminer les angles de drapage, nous allons utiliser la connaissance des coordonnées 3D des intersections du quadrillage pour calculer les angles à l'aide du produit scalaire. En effet, lorsque l'on connaît les coordonnées de trois points dans l'espace, on peut calculer les trois angles du triangle formé de manière analytique en usant uniquement du produit scalaire. En fait, cette méthode permet de remonter au cosinus de l'angle, et il ne reste plus qu'à utiliser la fonction arc cosinus pour obtenir l'angle. Cependant, pour calculer l'angle à une intersection donnée du quadrillage, il faut d'abord connaître ses quatre voisins les plus proches.

Détermination des 4 voisins

Comme le tissu est supposé déformable mais que chaque fibre est supposée inextensible, un critère de distance peut être utilisé ici. Notons d la distance entre deux lignes successives du quadrillage en configuration non déformées. Pour chaque intersection, le code *Matlab* parcourt le tableau contenant les coordonnées des intersections et recherche les points situés à une distance inférieure à $1,2 * d$ de l'intersection analysée. Cela permet de sélectionner les points bleus et pas les autres, qui sont initialement à une distance $\sqrt{2} * d$ du point rouge.

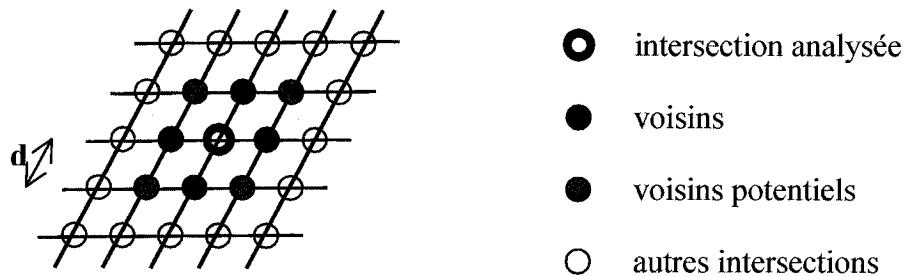


Figure 4-21 : Méthode de détermination des quatre voisins.

Toutefois cette technique de repérage fonctionne tant que l'angle alpha reste proche de 90° . En effet, dès qu'on s'approche de 60° , les voisins potentiels (points en gris clair) se retrouvent approximativement à la même distance de l'intersection analysée que les vrais voisins (points en gris foncé).

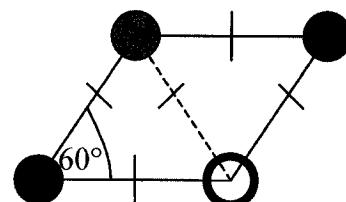
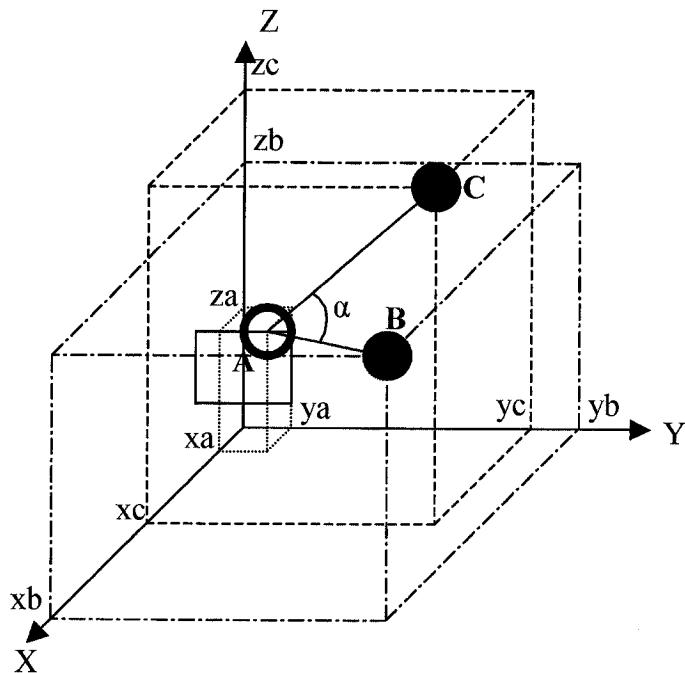


Figure 4-22 : Limite de validité de l'argument de distance.

Une fois que le tableau a été balayé en entier, *Matlab* compte le nombre de voisins de l'intersection courante. S'il en trouve 4, il commence le calcul de l'angle comme expliqué dans la section suivante. Par contre, s'il en trouve un nombre différent de 4 (c'est 3 généralement), il interprète qu'il doit sûrement se trouver sur un bord du dessin et ne calcule pas l'angle. Cette méthode ne permet donc pas de calculer les angles des points se trouvant sur les bords, mais il s'agit d'un nombre de points très limité comparé au nombre de points total.

Calcul de l'angle

Si on considère le triangle ABC dans l'espace 3D, on peut facilement déterminer l'angle au sommet A à partir des coordonnées des points. Pour le détail, consultez la Figure 4-23.



$$\psi = \begin{pmatrix} xb - xa \\ yb - ya \\ zb - za \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} xc - xa \\ yc - ya \\ zc - za \end{pmatrix}$$

$$\psi = \|\overrightarrow{AB}\| \cdot \|\overrightarrow{AC}\| \cdot \cos \alpha$$

d'où

$$\cos \alpha = \frac{\begin{pmatrix} xb - xa \\ yb - ya \\ zb - za \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} xc - xa \\ yc - ya \\ zc - za \end{pmatrix}}{\|\overrightarrow{AB}\| \cdot \|\overrightarrow{AC}\|}$$

[SS3]

Figure 4-23 : Méthode de calcul de l'angle via le produit scalaire.

Ensuite, pour obtenir l'angle proprement dit au point d'intersection, on calcule la moyenne sur les quatre angles qui entourent ce point. Il faut évidemment prendre en compte que les angles voisins sont supplémentaires. Le code de la fonction **angle** est disponible en Annexe L et présente la stratégie adoptées pour calculer les angles à partir de la connaissance des coordonnées 3D des points d'intersection du quadrillage.

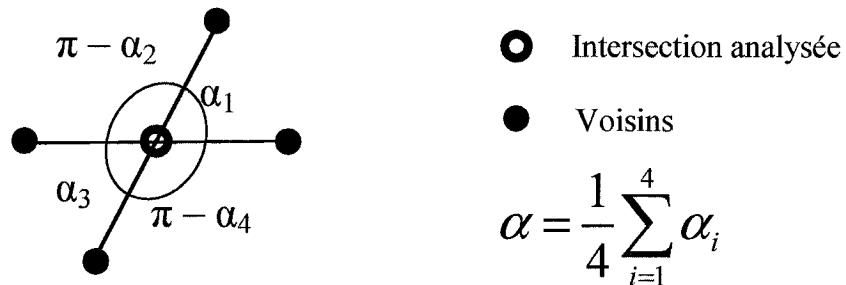


Figure 4-24 : Calcul de l'angle moyen.

Visualisation rapide des résultats

Quelle que soit la géométrie de la pièce il est possible de faire un quadrillage, de placer le tissu sur le moule et de mesurer les angles. Le résultat sera représenté sous forme d'un tableau à 4 colonnes : les 3 premières colonnes contiendront les coordonnées X , Y et Z fournies en entrées, tandis que la 4^{ème} colonne contiendra l'angle alpha calculé.

Cependant, dans le cas d'un moule dont la géométrie a une topologie équivalente à celle d'un rectangle (on peut mailler à l'aide d'un quadrillage régulier dont le contour des points d'intersection internes au moule est un rectangle), on peut visualiser rapidement les angles à l'intérieur de *Matlab*, et ce dans la géométrie déformée à l'aide d'un code de couleurs.

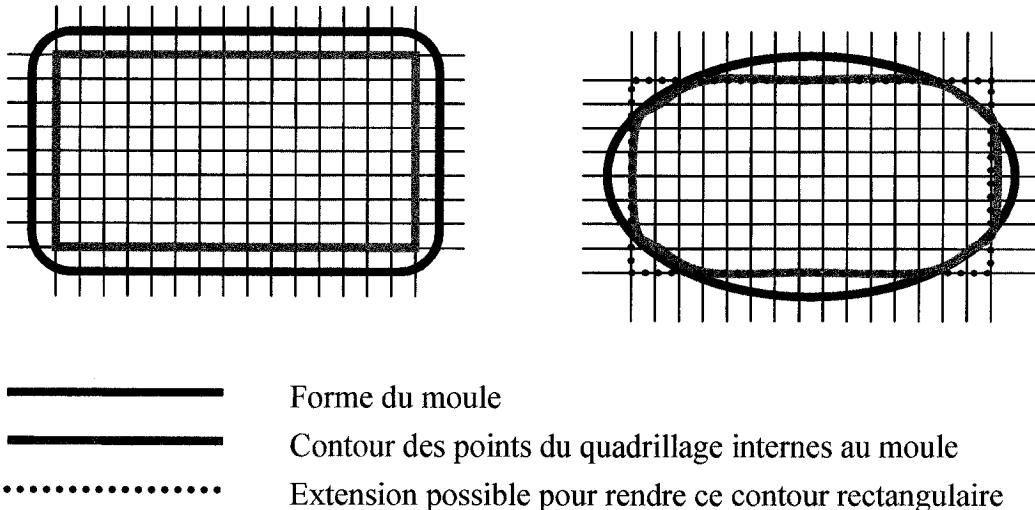


Figure 4-25 : Problèmes potentiels de topologie.

Dans le cas de gauche, *Matlab* sera capable de générer la surface en 3 dimensions et de représenter les angles à l'aide du code de couleur car le contour gris clair constitue un rectangle. Dans le cas de droite, ce n'est pas le cas, car l'ensemble des intersections du quadrillage à l'intérieur du contour du moule ne forme pas un rectangle. Une solution un peu artificielle, mais qui fonctionne, est de rajouter les points qui manquent afin d'atteindre le contour pointillé. On obtient des représentations du type de la Figure 4-26. L'échelle des couleurs est arbitraire et va toujours du bleu (angle minimal) au rouge (angle maximal).

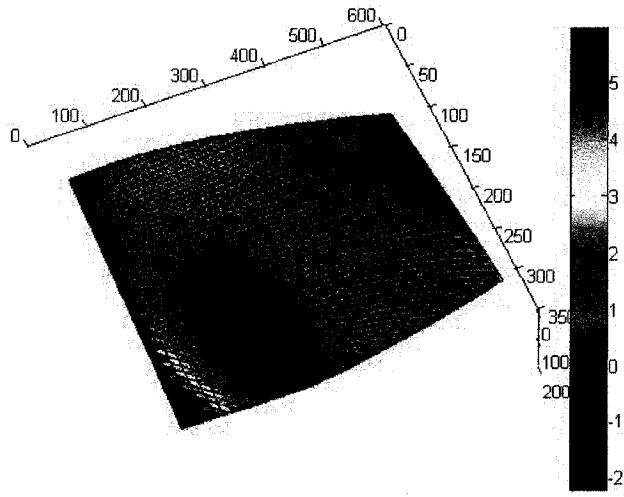


Figure 4-26 : Exemple de représentation des angles sous *Matlab*.

4.3.5. Résultats et discussion

Le logiciel *Patran Laminate Modeler* permet de simuler le drapage d'un renfort tissé sur une surface tridimensionnelle complexe selon différents algorithmes : il est notamment possible de simuler le drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement ou par la méthode des lignes géodésiques. Ces deux méthodes sont apparues comme étant les plus stables par rapport aux différents paramètres de simulation. Il a donc été décidé que l'on allait vérifier les résultats angulaires de ces deux méthodes de manière expérimentale.

4.3.6. Drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement

Cette méthode de simulation, la plus stable de toutes, permet de générer un patron 2D autorisant un drapage sans déformations excessives du tissu. Comme on peut le constater sur la Figure 4-27, le drapage s'effectue en suivant le tracé noir sur le moule à préforme, et les déformations les plus importantes semblent se trouver en haut sur les côtés. C'est ce qu'il faut maintenant vérifier à l'aide de la procédure décrite précédemment.

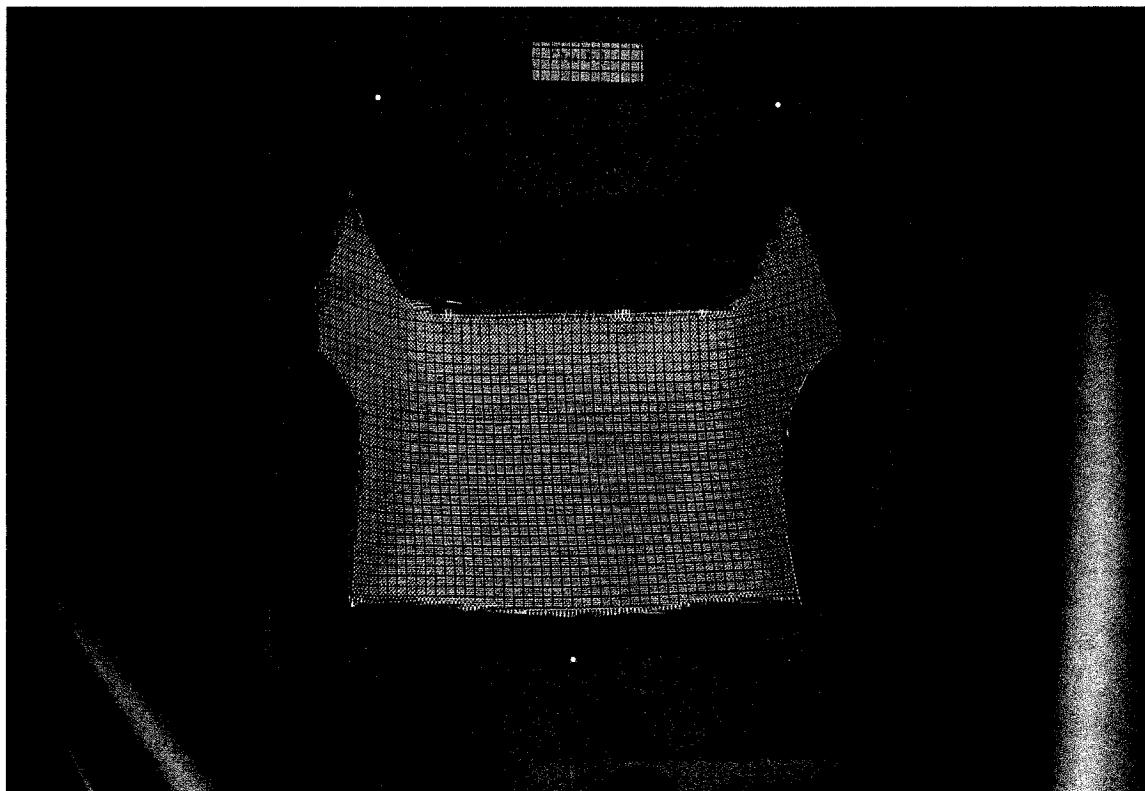


Figure 4-27 : Drapage du tissu par la méthode du minimum de l'énergie de cisaillement.

Cette image a été traitée suivant la méthode décrite et le résultat est visualisable sur la Figure 4-28 (notez que l'image 3D a été retournée afin de permettre une visualisation correcte de la répartition des angles dans la pièce finale dans sa configuration classique). L'angle maximum mesuré est de $10,83^\circ$ tandis que le minimum est à $0,09^\circ$ (on ne considère pas les angles à 0° car ce sont seulement des points où le calcul n'a pas été effectué)

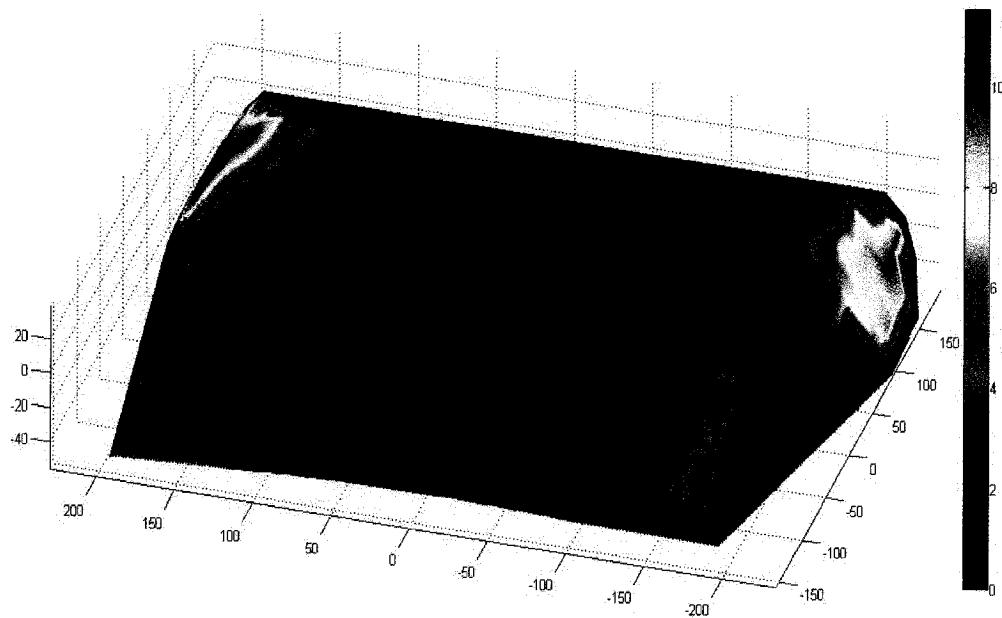


Figure 4-28 : Mesure expérimentale des angles pour l'algorithme de minimisation de l'énergie de cisaillement.

Si l'on compare maintenant cette image avec celle résultant de la simulation numérique de drapage (Figure 4-29) on observe que la répartition des angles est très semblable. L'angle maximum est de 11° tandis que l'angle minimum est cette fois à 0° (sur l'axe de symétrie de la pièce, vers le milieu).

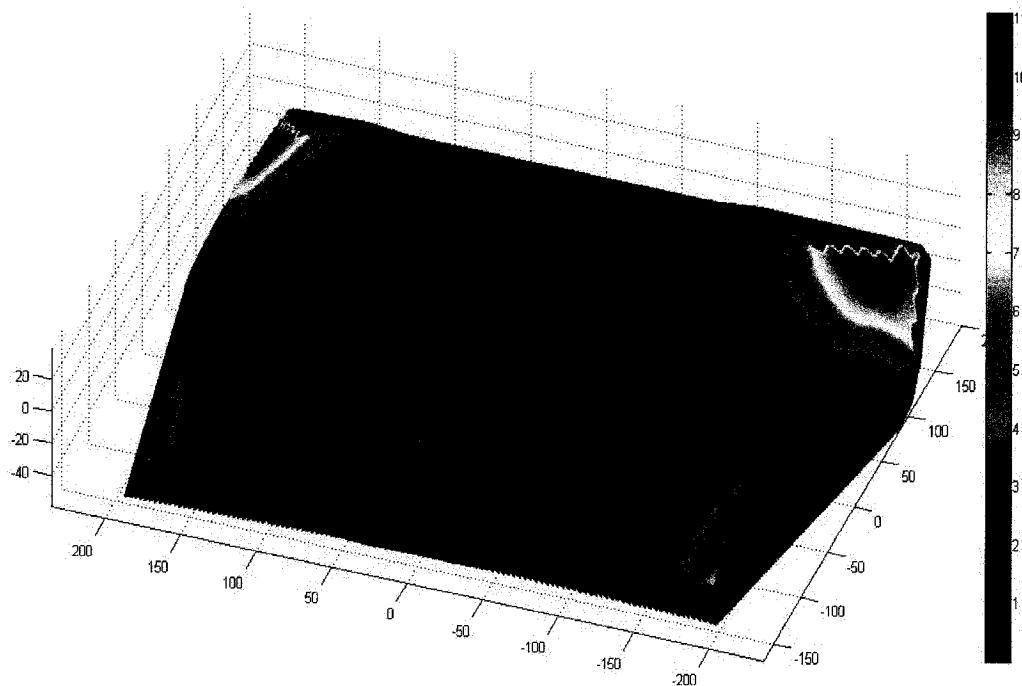


Figure 4-29 : Simulation numérique des angles pour l'algorithme par minimisation de l'énergie de cisaillement.

La comparaison point par point entre simulation et expérience fait apparaître des divergences qui peuvent avoir plusieurs causes : manque de précision de la mesure expérimentale, l'opérateur ne place jamais la découpe de manière idéale, le tissu n'est pas forcément bien modélisé dans la simulation, etc. Cependant, la concordance au niveau des angles maximum et minimum de déformation, ainsi que la forte ressemblance au niveau des profils de déformation, permet de dire que le drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement est simulé correctement par *Patran Laminate Modeler*. De plus, cette méthode présente l'avantage indiscutable d'être « stable » (i.e. assez régulière) sur le plan numérique vis-à-vis des différents paramètres donnés en entrée (voir Chapitre 2). Ceci n'est pas le cas par exemple pour la méthode de drapage suivant les lignes géodésiques, dont l'application est décrite à la section suivante.

4.3.7. Drapage par lignes géodésiques

Cette méthode exploite la manière naturelle de disposer manuellement un tissu sur une surface courbe, à savoir en suivant les lignes géodésiques de la surface. Une géodésique est une courbe sur une surface qui suit la ligne de distance minimale entre 2 points de la surface. Dans notre cas (moule Polyflex 3), l'opérateur qui drape le tissu aura naturellement tendance à le faire à partir du centre, puis à propager une déformation de cisaillement dans le tissu suivant les deux directions principales X et Y en appliquant le tissu sur la surface du moule.

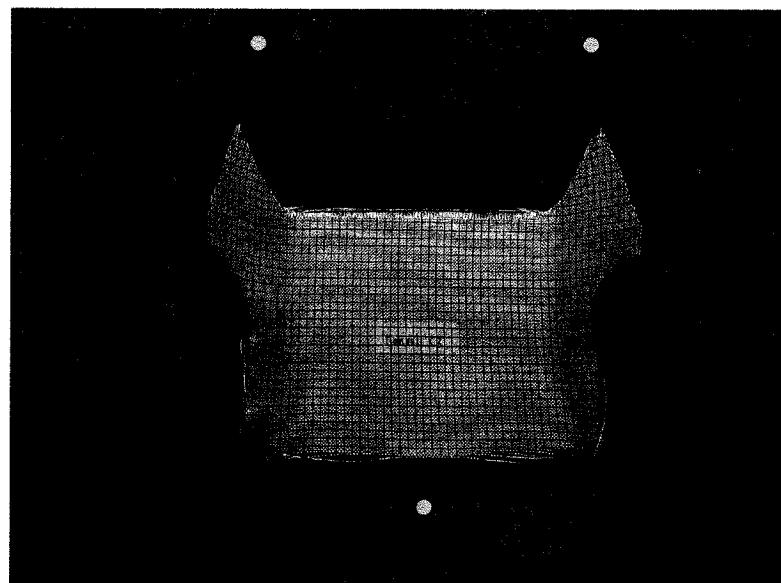


Figure 4-30 : Drapage du tissu par la méthode des lignes géodésiques.

Cette image a été traitée suivant la méthode décrite et le résultat est représenté à la Figure 4-31. L'angle maximum mesuré est de 9° tandis que le minimum est à $0,2^\circ$.

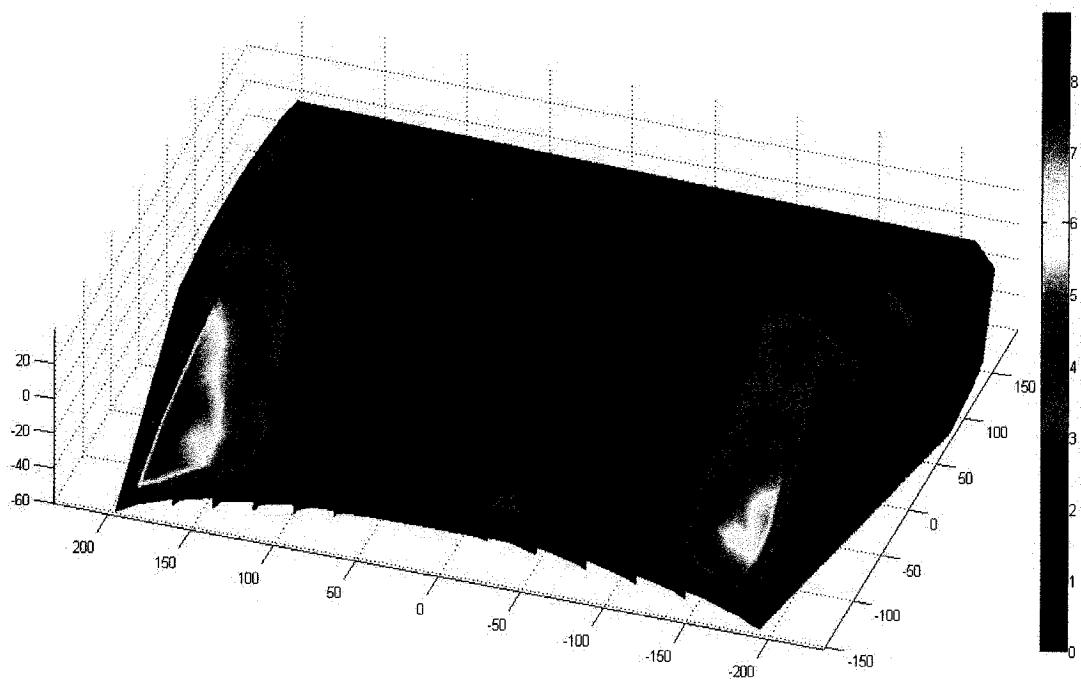


Figure 4-31 : Mesure expérimentale des angles pour la méthode par lignes géodésiques.

Si on compare maintenant à la Figure 4-32 cette image avec celles résultants de la simulation numérique de drapage, on observe qu'en jouant avec la direction d'application, il est possible de trouver une répartition des angles très semblable (simulation n° 1). Cependant, en changeant très peu la direction d'application (la composante X pour respecter tout de même la symétrie de la pièce par rapport au plan Oxz), on obtient des résultats très différents.

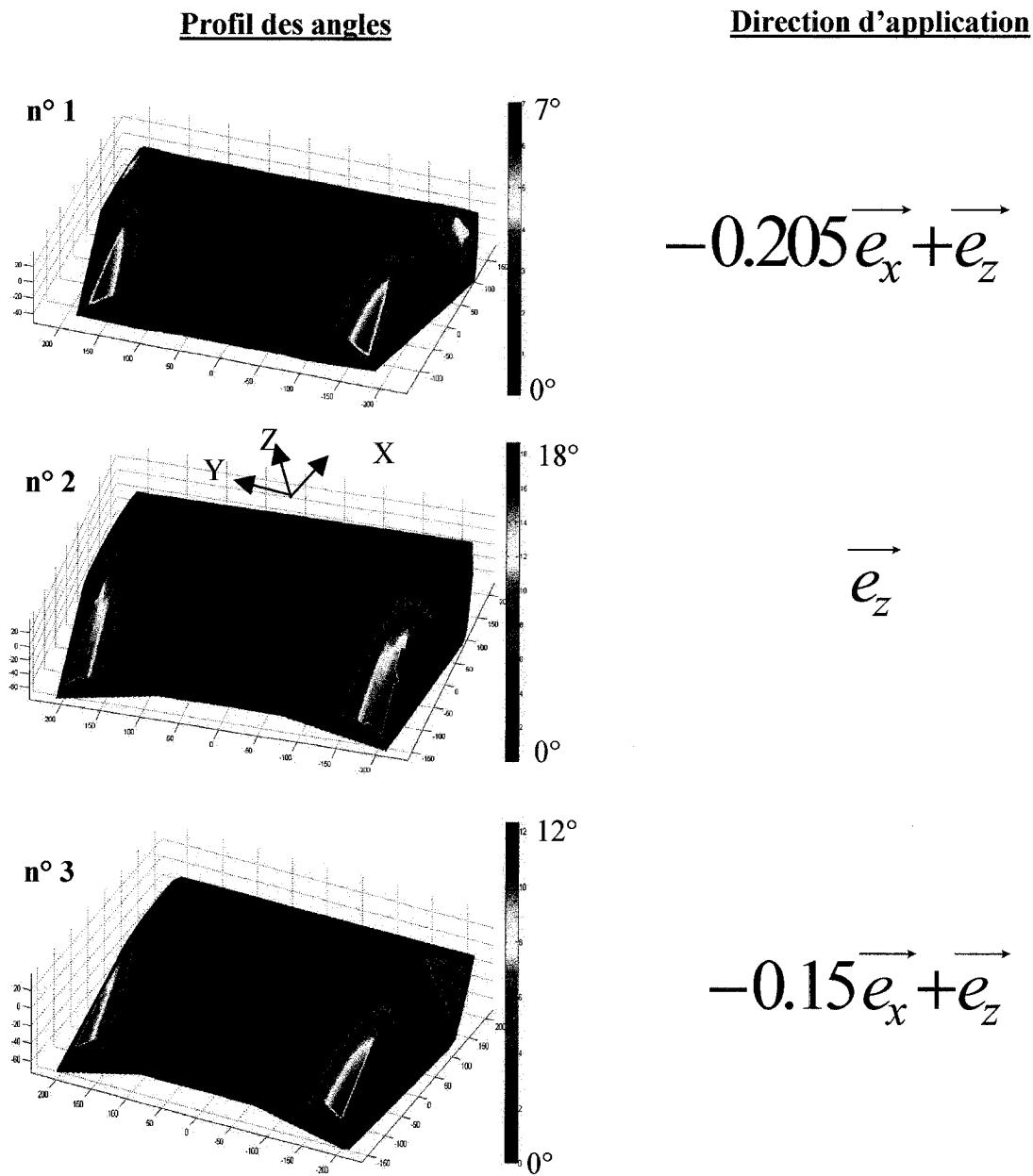


Figure 4-32 : Instabilité de la simulation par la méthode des lignes géodésiques.

Cette méthode permet d'obtenir un profil expérimental avec des angles d'une valeur maximale de 7° . Cependant, la présence de grandes zones à plus de 4° et surtout, l'instabilité de la simulation numérique rendent impossible l'utilisation répétée de cette

méthode pour des pièces variées (il faudrait recourir à chaque fois à l'expérience pour déterminer la direction d'application correcte, ce qui demanderait un temps important). Cette méthode est donc rejetée, au profit de la méthode par minimisation de l'énergie de cisaillement.

4.3.8. Conclusions et recommandations

Certes, la simulation de drapage par minimisation de l'énergie de cisaillement provoque l'apparition d'angles de cisaillement de près de 9° , mais seulement dans des zones limitées. Les mesures expérimentales des angles de cisaillement ont permis de confirmer la prédiction numérique des angles lors du drapage du patron 2D sur le moule à préforme Polyflex 3. Cette méthode, dont la mise en œuvre requiert du temps et des moyens optiques relativement performants, permet de mesurer des angles avec une précision de l'ordre du degré.

Le patron 2D obtenu par la méthode de simulation par placement sous membrane (celle qui minimise l'énergie de cisaillement) permet d'obtenir des découpes « *net-shape* » de manière reproductible dans le cas des tissus bidirectionnels. Ce patron convient aussi aux mats de verre, mais l'absence de déformations dans le plan rend difficile un suivi précis du contour tracé au feutre qui délimite la préforme visée. Certes ce résultat n'est pas parfait, mais il reste acceptable, d'autant que l'on se heurte plus à la limite physique du matériau qu'à la limite numérique du modèle de simulation de drapage. Il reste toutefois à explorer plus précisément les limitations de cette approche dans le cas de pièces de forme plus complexe que l'exemple traité ici.

CONCLUSION

Ce mémoire porte sur l'étude de la prédiction du drapage de tissus bidirectionnels et de mats. Il a en effet été montré combien l'orientation des fibres était importante pour les propriétés des matériaux composites. Plusieurs logiciels prétendent pouvoir prédire l'orientation des fibres après drapage et même la forme en deux dimensions que doit avoir le tissu pour pouvoir être drapé sans avoir à être redécoupé. Parmi ces logiciels, un a été choisi sur des critères bien définis. Une étude numérique sur la stabilité du logiciel choisi a permis d'écartier un certain nombre d'options.

Pour des tissus bidirectionnels 2D légèrement différents, il est possible de leurs donner une même forme finale. Ceci est du aux nombres important de degrés de libertés au sein de ces tissus. Nous avons vu que la différence se situait au niveau de la répartition des angles de cisaillement du tissu. Pour cela, il a été important de mettre en place une méthode reproductible et automatique de mesure des angles via des méthodes optiques approuvées dans d'autres domaines. Par contre pour des tissus presqu'indéformables comme les mats, une légère variation de la forme initiale bidimensionnelle peut nous rendre incapable de donner la forme voulu au tissu à la main.

Les résultats expérimentaux proposés précédents offrent de bonnes perspectives d'avenir à la simulation numérique de drapage à l'aide du logiciel commercial *Patran Laminate Modeler*, notamment via la méthode de simulations par minimisation de l'énergie de cisaillement. Les patrons 2D proposés permettent d'atteindre rapidement une découpe « *net-shape* » sans recourir à trop de retouches manuelles. Ces retouches sont susceptibles d'augmenter le temps de préparation des préformes et donc d'affecter la rentabilité d'une production industrielle.

RÉFÉRENCES

- [1] MSC.Software, *MSC.Laminate Modeler User's Guide*.
- [2] Dassault System, *Catia Composite User's Guide*.
- [3] LECTRA, *DesignConcept3D V2R1 User's Guide*.
- [4] RUELLAN, Francis. *Photogrammétrie et interprétation de photographies stéréoscopiques terrestres et aériennes*. Premier fascicule, initiation : Masson & Cie, 1967. 123 pages.
- [5] GAGNON, France. *L'interprétation des photographies aériennes, méthode et applications*. Centre collégial de développement de matériel didactique, 1999. 210 pages.
- [6] DALY, Timothy. *Encyclopédie de la photographie numérique*. Broquet, 2005. 288 pages.
- [7] SHIFRIN, Theodore. *Multivariable Mathematics*. John Wiley & Sons, 2005. 491 pages.
- [8] ADAMS, Robert. *Calculus of Several Variables*. Addison-Wesley Publishers Limited, 1987. 463 pages.

[9] MALLICK, P.K. Fiber-reinforced Composites : Material, Manufacturing and Design. Marcel Dekker Inc, 1993. 566 pages.

[10] MOHAMMED U. and Al. *Experimental Study and Analysis of the Draping of Woven Fabrics*. Composites : Part A 31 (2000) 1409 – 1420.

[11] TROCHU F. and Al. *Prediction of Fibre Orientation and Net Shape Definition of Complex Composite Parts*. Composites: Part A 27 (1996) 319 – 328.

[12] Teik-Cheng Lim, S.Ramakrishna. *Modelling of composite of sheet forming: a review*. Composites: Part A 33 (2002) 515-537

[13] T P.Potluri, S.Sharma, R.Ramgulam. *Comprehensive drape moulding 3D textile performs*. Composites Part A 32 (2001) 1415-1421

[14] Yasser Gowayed, Jie Wu, Larry Barowski and William Westphall *Mapping of preform architecture for textile reinforced composite products*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 27, Issue 11, 1996, Pages 1023-1032

[15] E.Heardman, C.Lekakou, M.G.Bader. *In-plane permeability of sheared fabrics*. Composites Part A 32 (2001) 933-940

[16] Darcy, H., *Les Fontaines Publiques de Dijon* Anonymous1856. Dalmont.

[17] Scheidegger, A. E. *The physics of flow through porous media*,Toronto; Buffalo N.Y. : University of Toronto Press, 1974.

Annexe A : Étude comparative de logiciels commerciaux de mise en forme

LES OUTILS NUMERIQUES DE LA MISE EN FORME

Introduction

Dans cette annexe sont définis les différentes options numériques commerciales retenues pour la mise à plat et la découpe des tissus. Pour la réalisation de pièces composites, il est essentiel de minimiser les retouches, puisque celles-ci sont très coûteuses en termes de délais et main d'œuvre. Tous les travaux doivent s'effectuer en amont de l'injection finale, c'est pourquoi il est très important de disposer des meilleurs outils possibles en termes de conception informatique, de découpe et de mise en forme. La mise à plat de modèles CAO tridimensionnels constitue une étape très importante, puisqu'à la suite de celle-ci, la préforme va être fabriquée et ajustée (découpe du surplus sur les bords). De plus, la faible déformation des tissus utilisés pour la fabrication des composites nécessite de pouvoir étudier la faisabilité du patron réalisé. En effet, lors de la mise en forme ou du drapage, la tension au sein du tissu ne doit pas être trop élevée. L'étude de la faisabilité doit donc faire partie du logiciel de mise à plat. De même les données de drapage déterminées par le logiciel doivent pouvoir être exportées vers d'autres logiciels d'analyses pour une étude mécanique complète. Plusieurs sociétés sont donc retenues et chacun des logiciels proposé par ces compagnies sera étudié et testé si possible. A la fin de ce chapitre un logiciel sera choisi afin de réaliser les différentes études numériques de mise à plat et de drapabilité des tissus pour l'École Polytechnique de Montréal.

Les différentes sociétés retenues proposant de tels logiciels sont les suivantes :

LECTRA

MSC SOFTWARE

GERBER

VISTAGY

ESI
DASSAULT SYSTEM

Tableau comparatif des différentes solutions logicielles

Tableau A-1 : Tableau comparatif des logiciels

Société	MSC Software	Lectra	Gerber	Dassault Systèmes
Logiciel	Patran Laminate Modeler	DesignConcept3D Expert Pattern Modeling + DiarninoTechTex	Direct 3D	Catia Composite CPE+CPM
Testé	Oui	No, but possibility to used this software on site	Oui	Oui
Importation CAO	ACIS, Parasolid xmt, Catia V4, V5, Euclid 3, IDEAS, Pro/Engineer, Unigraphics, Express Neutral, IGES, MSC Nastran Input, MSC Patran DB, Neutral, Step, STL, VBA	ACIS, Autocad DXF ou DWG v2.5-2002, Catia V4 (option), Catia V5 (option), IGES, Parasolid 7.0-14.1, Solidedge 10 & 11, Solidworks, STEP, AP203/AP214, STL, VDA	IGES	Catia V5, V4, IGES, STEP, DXF, Post script
Importation maillage	Oui	Non	Non	Only meshes created on catia
Librairie matériaux	Tissu et UD	Tissu et UD	Ne s'applique pas	Tissu et UD
Drapage	géométrique	géométrique	géométrique	géométrique
Analyse de productibilité	déformations (max & min) et épaisseur du tissu, analyse purement géométrique	Contraintes, déformations et cisaillement dans le tissu	analyse purement qualitative	déformations (max & min) et épaisseur du tissu, analyse purement géométrique
Mise à plat	Oui	Oui	Oui	Oui
Possibilité de découpe interne	Oui	Non	Oui	Non
Positionnement	Non	Oui	Non	Non
Exportation des patrons 2D	DXF, IGES	OBJ, STL, VRML, Windows Meta file, ACIS, DXF, DWG, IGES, PARASOLID, STEP AP203/AP214, TRI, Bitmap	DXF, IGES	DXF, IGES
Exportation des données de drapage	Yes, possibility to export geometrical data (shear, thickness...) after draping for each ply	Non	Non	yes, but not yet done
Données de fabrication	Non	Non	Non	Oui, poids, coût, dimensions, etc.
Analyse mécaniques avancée	Oui, possibilité d'exporter les données et d'effectuer une analyse structurale	Non	Non	Non
Coût	500 USD/year/license	\$ 1000 pour support téléphonique. 32 heures de formation. \$ 10790 Logiciel gratuit si machine achetée	?	?
Contact	Cassandra Radigan (relation universitaire): cassandra.radigan@mscsoftware.com ; Technic support: mscpatran.support@mscsoftware.com	Harold Boucher (commercial): h.boucher@LECTRA.com ; Didier Jauffred (technicien): d.jauffred@LECTRA.com		?
références		Formule1 + Boeing+Airbus+ Composite Atlantique + Bombardier aéronautique and récréation	Textile	Tous les secteurs

Société	Vistagy	ESI	ESI	Laminate Tools
Logiciel	Fibersim	Pam-Form	Quik-Form	Laminate Tools
Testé	Non	Oui	Oui	Non
Importation CAO	Catia V4, V5, Unigraphics, Pro/Engineer	ACIS, Parasolid xmt, Catia V4, V5, Euclid 3, I-DEAS, Pro/Ingenier, Unigraphics, Express Neutral, IGES, MSC Nastran Input, MSC Patran DB, Neutral, Step, STL, VBA	ACIS, Parasolid xmt, Catia V4, V5, Euclid 3, I-DEAS, Pro/Ingenier, Unigraphics, Express Neutral, IGES, MSC Nastran Input, MSC Patran DB, Neutral, Step, STL, VBA	CAD stereolithography files (.stl)
Importation maillage	Non	Oui	Oui	Oui
Librairie matériaux	Tissu et UD	Tissu et UD	tissu	Tissu et UD
Drapage	géométrique	mécanique	géométrique	géométrique
Analyse de productibilité	déformations (max & min) et épaisseur du tissu, analyse purement géométrique	Contraintes, déformations et cisaillement dans le tissu	angle de cisaillement	déformations (max & min) et épaisseur du tissu, analyse purement géométrique
Mise à plat	Oui	Oui	Non	Oui
Possibilité de découpe interne	Oui	Non	Non	Oui
Positionnement	Non	Non	Non	Non
Exportation des patrons 2D	DXF, IGES	Non	Non	DXF, IGES
Exportation des données de drapage	Yes, possibility to export geometrical data (shear, thickness...) after draping of each ply	Non	Yes, possibility to export geometrical data (shear, thickness...) after draping of each ply	Yes, possibility to export geometrical data (shear, thickness...) after draping of each ply
Données de fabrication	Oui, poids, coût, dimensions, etc.	Non	Non	Non
Analyse mécanique avancée	Oui, possibilité d'exporter les données et d'effectuer une analyse strucurale	Non	Oui, possibilité d'exporter les données et d'effectuer une analyse strucurale	Non
Coût	?	?	?	USD 5700
Contact	Tech: Peter ungaro (peter.ungaro@vistagy.com) Sales: Bob tranfaglia (bob.tranfaglia@vistagy.com)			?
références	Formula 1 + Aeronautics	Aeronautics	Automotive + Aeronautics	Automotive + Aeronautics

Solution informatique offerte par la société Lectra

Généralités

La société Lectra conçoit, produit et distribue des logiciels et des équipements dédiés aux industries du textile, du cuir et des matériaux souples. Cette offre technologique est complétée par un ensemble de services associés et se décline en solutions globales, permettant de concevoir un produit, de le fabriquer et de le distribuer. Lectra a développé une offre technologique (logiciels, équipements de découpe automatisée, interaction logiciels-équipements) et de services intégrés pour répondre aux problèmes actuels de ses clients et aux particularités de chacun de ses marchés.

DesignConcept3D Expert Pattern Modeling

DesignConcept3D Expert Pattern Modeling est la solution de Lectra pour la conception 3D dans les secteurs du transport et des tissus industriels. Ce module contient des outils de conception paramétrique performants pour modéliser des surfaces et des solides. D'autre part, un ensemble d'interfaces industrielles permet d'intégrer facilement *DesignConcept* dans le processus de développement en CAO. Le logiciel permet de dessiner simplement les frontières du patron (lignes de couture ou de découpe) sur le modèle tridimensionnel, puis de le mettre à plat automatiquement pour obtenir sa forme en 2D. Il est également possible de mesurer les déformations, tensions, pressions, cisaillement, les périmètres et les superficies des patrons pour étudier leur faisabilité et évaluer le coût de fabrication. Le logiciel permet d'optimiser la définition des lignes de couture, de choisir les meilleurs matériaux au sein d'une bibliothèque pré définie et d'adapter les patrons ou la forme en fonction du cahier des charges. Afin de faciliter le processus d'optimisation, les patrons plans sont automatiquement mis à jour pour chaque modification apportée à la forme 3D ou aux lignes de couture.

DiaminoTechTex

Ce logiciel d'optimisation des coupes fonctionne en mode interactif ou automatique, pour des tissus unis ou à motifs. ***DiaminoTechTex*** permet un placement simple, rapide et

efficace des patrons sur le rouleau de la machine de découpe pour le calcul de la consommation de matière, le prototypage ou la production.

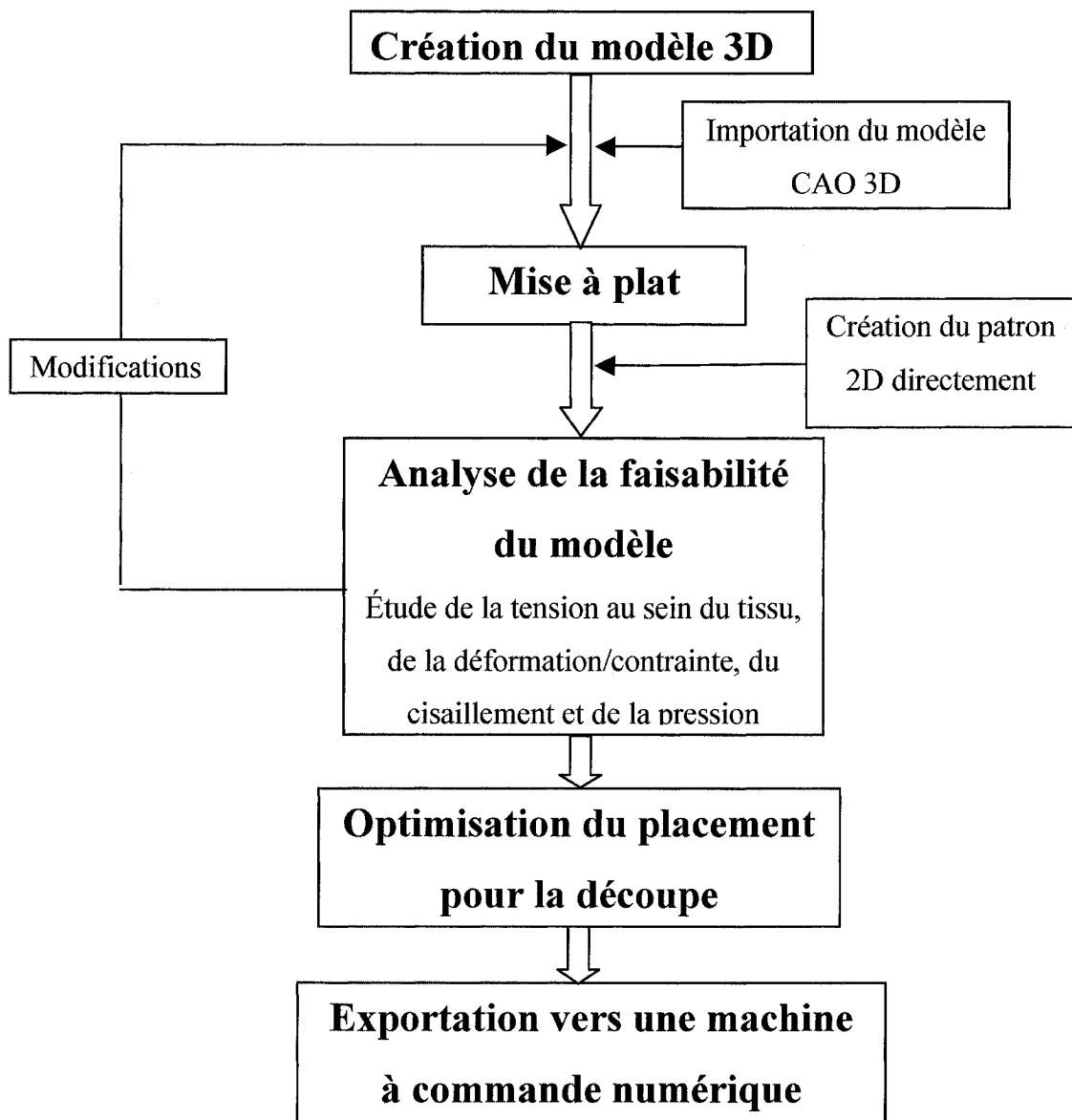


Figure A-1: Schéma fonctionnel de la solution informatique de Lectra.

Les différents types d'importations/exportations

Avec la solution Lectra, il est possible d'importer les modèles CAO, à partir de différents formats usuels, suivants :

- *ACIS*
- *Autocad DXF ou DWG v2.5-2002*
- *Catia V4* (option)
- *Catia V5* (option)
- *IGES*
- *Parasolid 7.0-14.1*
- *Solidedge 10 & 11*
- *Solidworks*
- *STEP AP203/AP214*
- *STL*
- *VDA*

De même l'exportation des données de découpe vers les machines à commandes numériques ou de CAO se fait sous les standards suivants :

- *OBJ*
- *STL*
- *VRML*
- *Windows Meta file*
- *ACIS*
- *DXF*
- *DWG*
- *IGES*
- *PARASOLID*
- *STEP AP203/AP214*
- *TRI*
- *Bitmap*

Coût

Diamino Tech Tex Mark Pro V5R1

DesignConcept3D V2R1 « School pack », included DesignConcept3D “Expert Pattern Modeling” + “Textile Rendering and Simulation”

\$ 1000 (Pour le support téléphonique).

Formation de 32 heures : \$ 10790.

Pas de prix d'achat pour le logiciel pour les universitaires propriétaires d'un système de découpe Lectra mais formation obligatoire.

Note sur le logiciel :

Ce logiciel est intéressant pour ses capacités d'analyses mécaniques des tissus. Il est en effet possible de rentrer une loi de comportement facilement selon des modèles prédéfinis. Le logiciel peut alors après avoir déterminé les allongements géométriques déterminer les contraintes en utilisant les propriétés du matériau. Les données de drapage ne sont malheureusement pas exportables. Il n'a pas été possible de tester directement le logiciel.

Solution informatique offerte par la société MSC Software

Généralités

MSC Software est le chef de file en matière de logiciels d'aide à la conception et d'analyse par éléments finis. Beaucoup de grandes entreprises issues de presque tous les secteurs utilisent aujourd'hui leurs logiciels. Le processus de développement des composites exige une bonne intégration entre les activités de conception, d'analyse et de fabrication. MSC Software fournit à travers ces logiciels une interface intuitive pour réaliser la conception des composites qui reflète exactement la morphologie de la structure à modéliser. MSC. Software peut également faciliter la fabrication en fournissant des données précises sur la forme des patrons pour chaque pli. *Patran Laminate Modeler* est entièrement intégré dans l'environnement d'analyse de *Patran*. De plus, l'utilisation du langage de commandes de *Patran* (PCL) permet d'automatiser le processus de conception et d'analyse.

Patran Laminate Modeler

Patran Laminate Modeler est une application d'aide à la conception des composites qui inclue des fonctions d'analyse et de fabrication. Il permet de créer des patrons pour chaque pli, évitant ainsi les problèmes d'espaces entre les plis dus à leur épaississement local (à cause du cisaillement). Les principales possibilités offertes par ce logiciel sont les suivantes :

- Calcul du critère de rupture de chaque pli.
- Optimisation des plis et de l'empilement.
- Simulation de la fabrication avec un algorithme de drapage géométrique permettant de déterminer la nouvelle orientation locale des fibres après drapage.
- Calcul de l'orientation locale des fibres et du cisaillement pour chaque élément de chaque pli. Ces données sont directement exploitables par *Nastran* pour une analyse mécanique complète (statique, dynamique et crash test).
- Interface possible avec beaucoup d'autres outils d'analyse.
- Ajustement automatique des différentes zones des tissus.
- Visualisation facile de l'orientation des plis.
- Possibilité de créer des lignes de couture sur la structure 3D avant la mise à plat.
- Création et exportation de patrons 2D et 3D pour chaque pli.

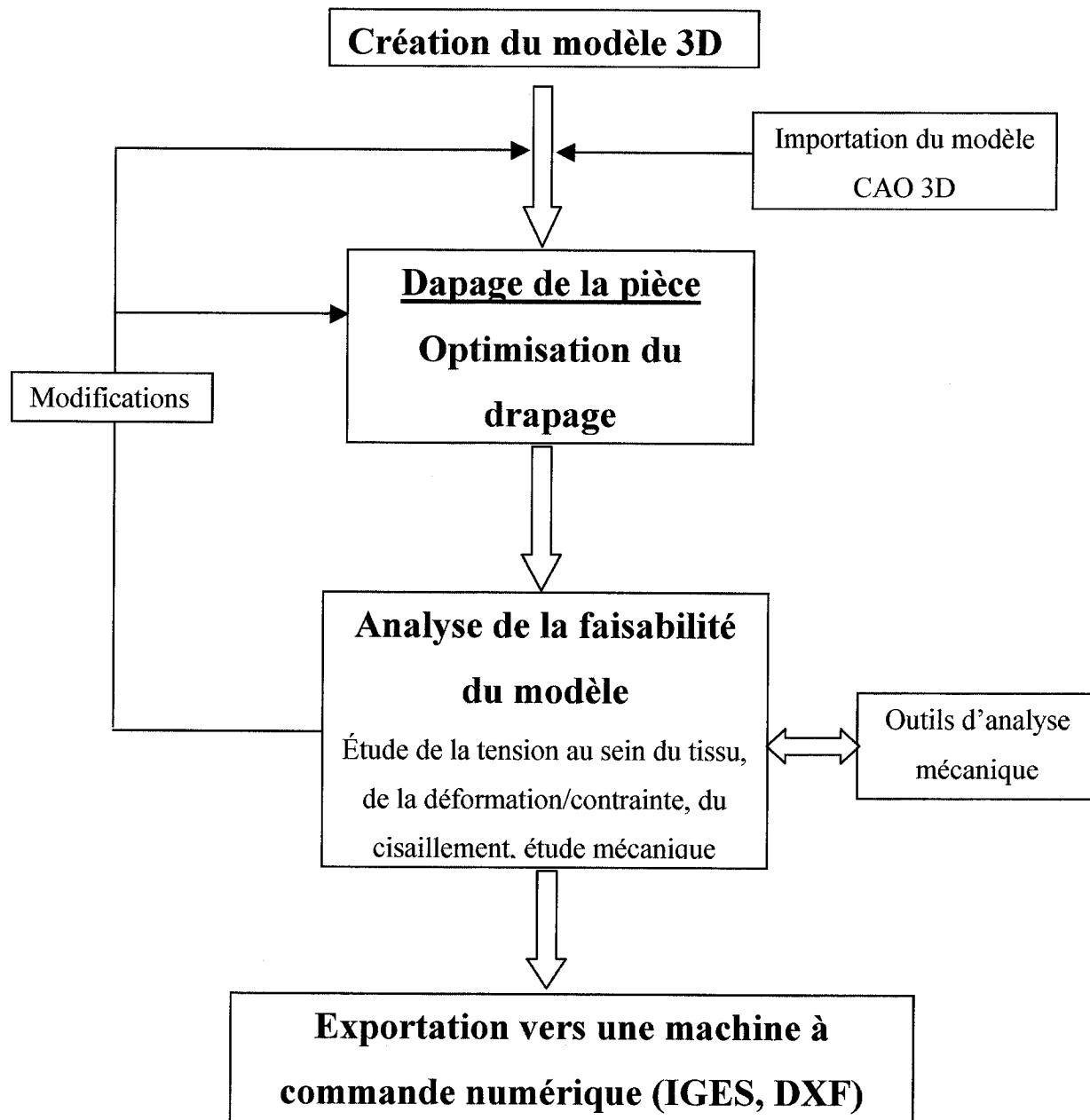


Figure A-2: Schéma fonctionnel de la solution informatique de MSC Software.

Les différents types d'importation/exportation de fichiers

Avec la solution de MSC.Software, il est possible d'importer les modèles CAO à partir de différents formats usuels suivants :

- *ACIS*
- *Pro/Engineer*
- *Express Neutral*
- *Nastran Input*
- *Msc Patran DB*
- *Neutral*
- *Catia V4*
- *Catia V5*
- *IGES*
- *Parasolid xmt*
- *STEP*
- *STL*
- *VBA*

De même l'exportation des données de découpe vers les machines à commande numérique se fait sous les standards suivants :

- *IGES*
- *DXF*

Coût

Licence du module *Patran Laminate modeler* :

500 USD / licence / an

Test du logiciel

Les possibilités premières du logiciel et notamment du module “*laminate Modeler*” de MSC. Software sont utilisées et présentées dans ce paragraphe. Cinq modèles ont été drapés afin d'établir les possibilités de l'algorithme de drapage : un demi cylindre, une pièce à angle prononcé, une pièce simple à double courbure, un toit de voiture et une pièce arrière de voiture. Les différents drapages sont présentés à la ci-dessous.

L'algorithme de drapage permet de draper rapidement (presque instantanément) les pièces ci-dessus. Il est alors rapidement possible d'obtenir différentes caractéristiques géométriques suite à ce drapage : déformation en cisaillement, épaisseur du tissu (l'épaisseur augmente avec le cisaillement du tissu (matériau incompressible)), patron 2D (ici en jaune).

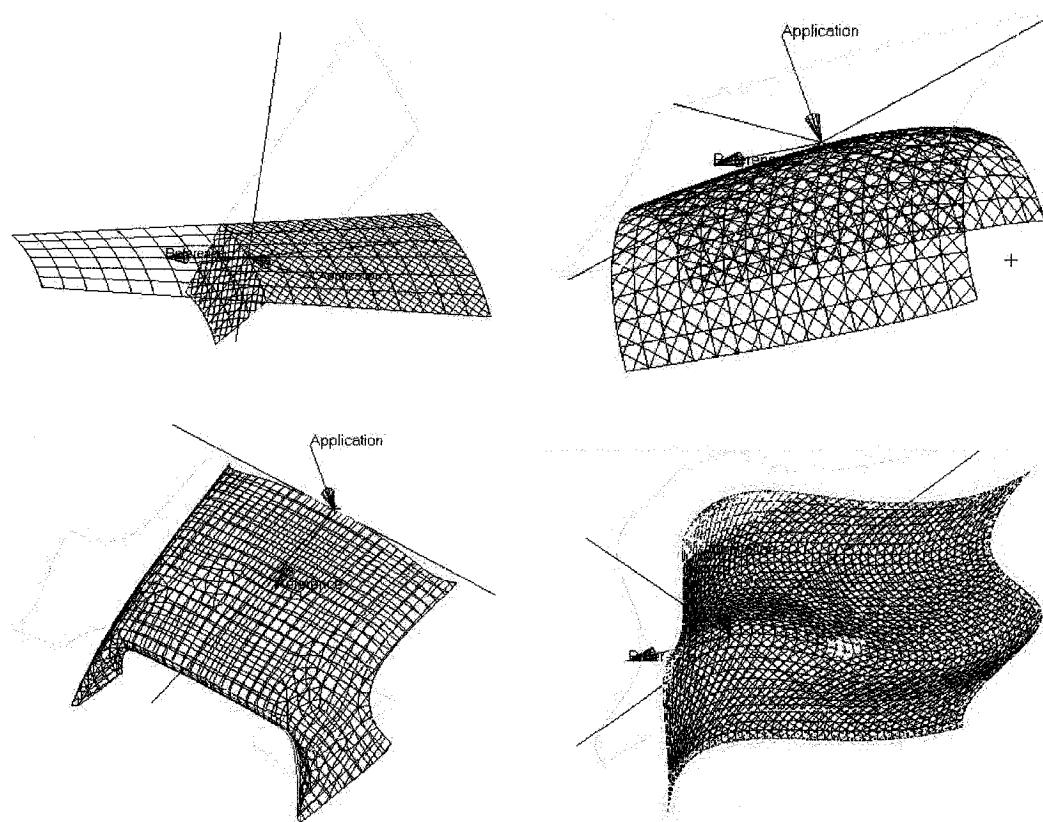


Figure A-3: Drapage de différentes pièces sous *Patran Laminate Modeler*.

Si l'on garde les même paramètres de drapage et que l'on change les propriétés mécaniques des tissus, les composantes mécaniques générées par le drapage ne changent pas, il s'agit donc d'un drapage purement géométrique.

Le drapage de la pièce arrière de voiture est impossible avec ce logiciel en une seule fois, il est nécessaire de réaliser différentes zones représentants différents tissus. Pour pouvoir essayer de draper cette pièce, les trous présents dans la pièce ont du être rebouchés et maillés. L'algorithme est incapable de draper des pièces avec des trous.

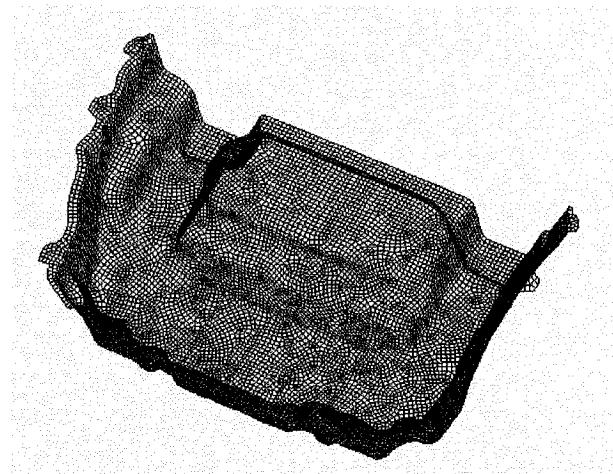


Figure A-4: Pièce arrière remaillée pour les besoins du drapage.

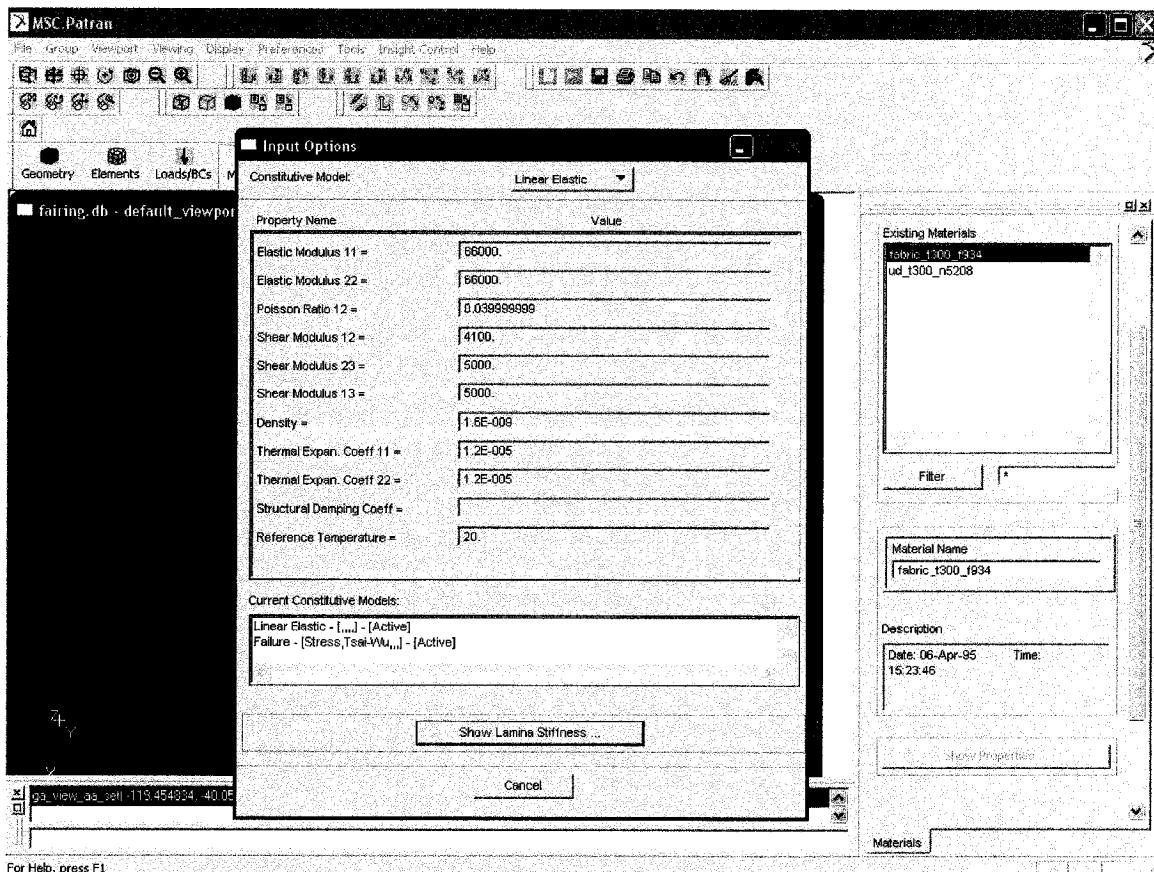


Figure A-5: Exemple d'entrée des propriétés mécaniques

L'ensemble des propriétés mécaniques des tissus utilisés doit être fournies au logiciel. Il existe différentes classes de matériaux prédéfinis : orthotrope 2D isotrope, anisotrope,... pouvant couvrir l'ensemble des matériaux utilisés. Ces propriétés mécaniques servent pour une analyse mécanique par éléments finis, mais n'interviennent pas pour le drapage.

Notes sur l'utilisation du logiciel :

La prise en main de ce logiciel a été assez rapide, la disposition des outils d'analyse étant très intuitive. Il existe un mode de drapage au sein de ce logiciel permettant à partir d'une direction de drapage (définie par deux nœuds, deux points ou tout autre vecteur), d'un point d'application et d'une direction de référence de venir positionner le tissu sur la pièce à fabriquer. L'exportation des patrons se fait très bien. L'analyse purement

géométrique du drapage permet d'obtenir le minimum et le maximum des déformations au sein du tissu (en % et en angle) par rapport à l'angle maximal défini par l'utilisateur. Le drapage du plancher arrière du véhicule présenté à la Figure A- n'a pas été possible en un seul morceau. Il est nécessaire de créer plusieurs zones représentants différents patrons. Il est également possible de définir des découpes au sein du tissu afin de minimiser les déformations. Le logiciel répond à l'ensemble de nos critères.

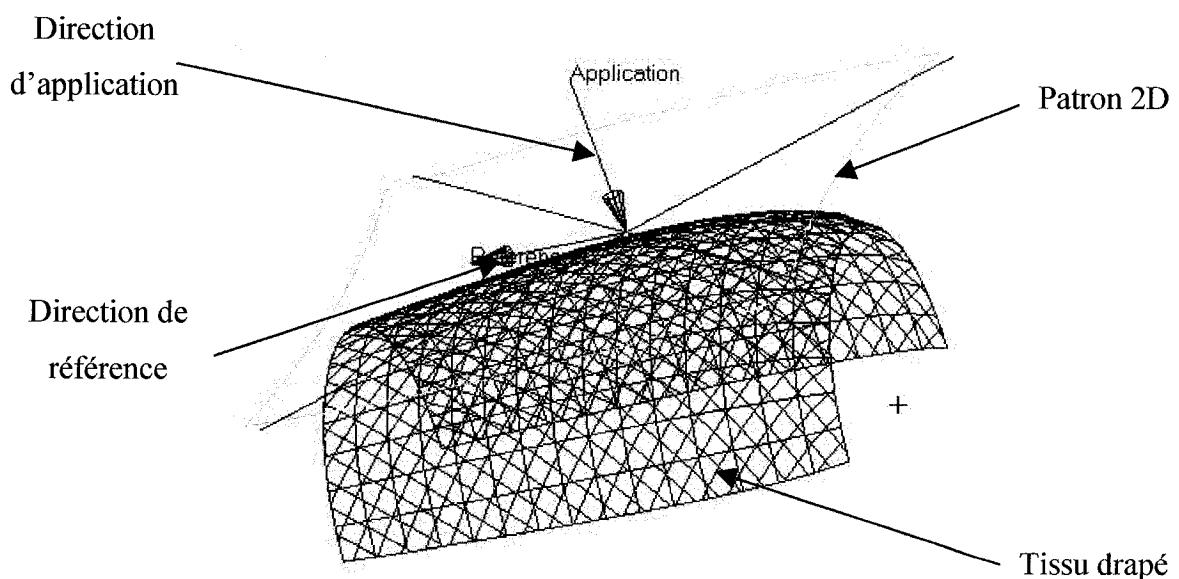


Figure A-6 : Paramètres de drapage de *Patran Laminate Modeler*.

Solution informatique offerte par la société Gerber

Gerber 3D direct

Gerber 3D direct est un logiciel principalement utilisé dans l'industrie textile. Il permet la mise à plat de modèle tridimensionnel. Il est possible de créer rapidement des patrons à partir de modèles 3D importés sous format IGES. Il est alors possible de retoucher le modèle 3D et de redéfinir correctement les surfaces. En effet les surfaces peuvent ne pas être en contact direct, il est alors nécessaire de rectifier cela. La visualisation de la

faisabilité des patrons utilise un code de deux couleurs que l'utilisateur ne maîtrise pas, indiquant à ce dernier les zones qui nécessitent des coupes supplémentaires directement sur les patrons (en rouge). Chaque retouche sur le modèle 3D est visualisable sur le patron.

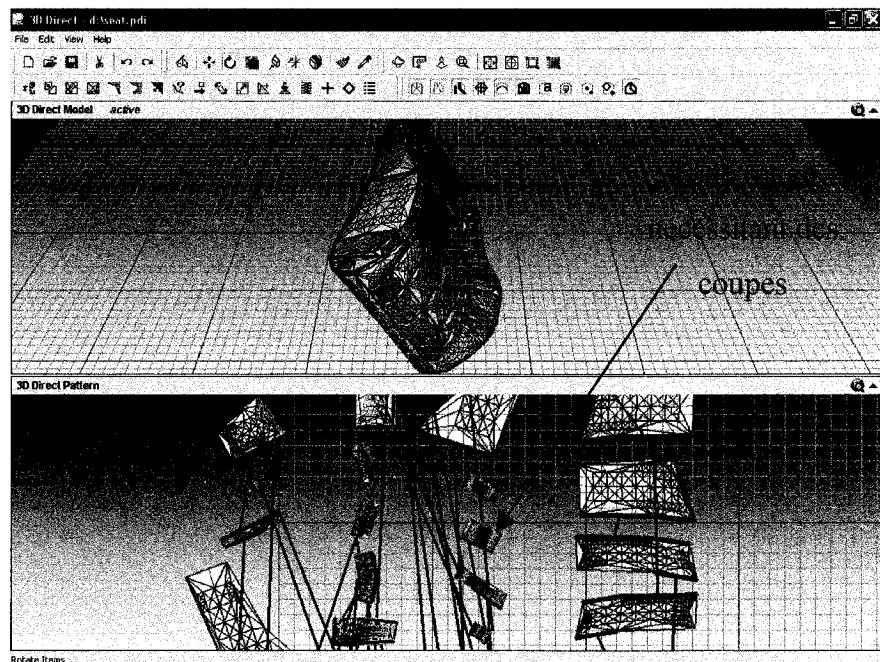


Figure A-7: Mise à Plat d'un siège d'auto avec le logiciel *3D direct*.

Les données des patrons doivent être exportées (sous un format propre à Gerber) vers un autre logiciel de la compagnie : *Accumark* ou *CatWork* (CAO 2D). De ce logiciel il est possible de retoucher et d'exporter les patrons sous format IGES ou DXF vers une machine à commande numérique.

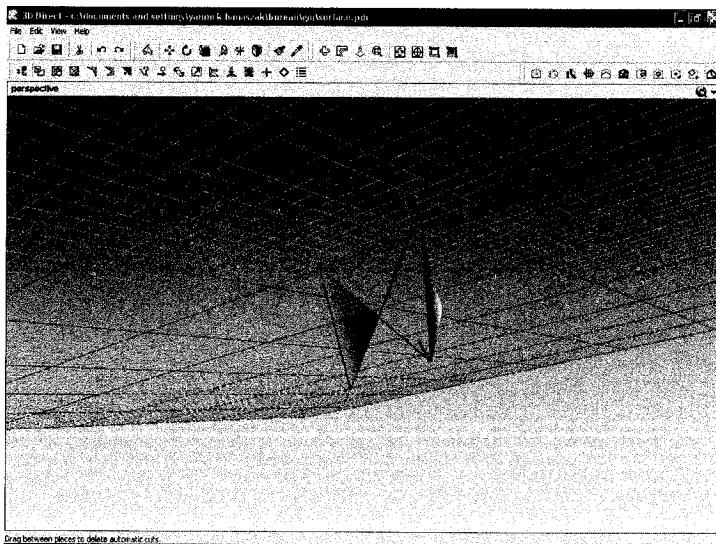


Figure A-8: Pièce à double courbure sous 3D direct.

L'importation de la pièce à double courbure sous format IGES est impossible.

Note sur le logiciel :

Le logiciel a pu être testé, la mise à plat du siège d'auto fourni par la société a été possible par contre l'importation de fichiers IGES ne s'est pas toujours bien déroulée. Il a été impossible d'importer d'autre fichier IGES provenant d'autres sources, ou les données importées n'étaient pas cohérentes. Le logiciel est incapable d'exporter les données de drapage. L'analyse de faisabilité est uniquement qualitative et fantaisiste (impossible de connaître les sources de ces résultats). La prise en main a été difficile, notamment pour la correction des surfaces.

Solution informatique offerte par la société Vistagy

FiberSim

La société Vistagy est un pionnier en matière de logiciels appliqués à la conception et la fabrication des composites. Le logiciel *FiberSim* permet d'établir des liens entre la

conception, l'analyse et la fabrication des matériaux composites. La Figure A-9, résume les possibilités offertes par *FiberSim*.

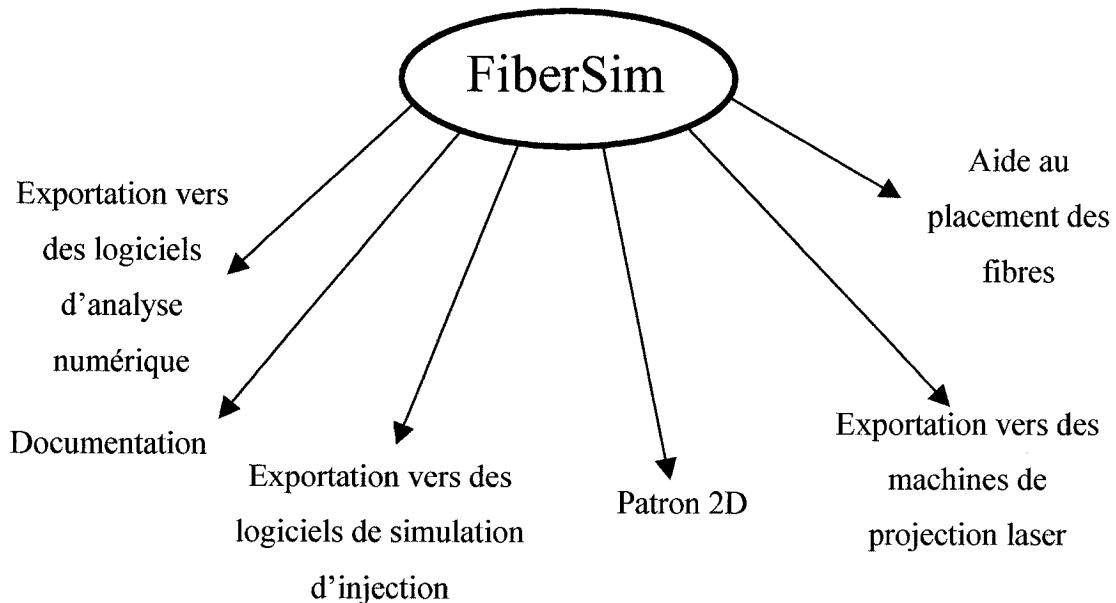


Figure A-9: Schéma de la solution informatique de Vistagy.

Un effort important est fourni par Vistagy en termes de support. Beaucoup de tutoriaux réalisés par des spécialistes des composites sont disponibles en ligne. *FiberSim* s'intègre très bien dans les logiciels de dessins actuels (*Catia V4, V5, Pro/Engineer, Unigraphics NX*). L'utilisation de *FiberSim* devient transparente à travers ces logiciels. L'importation et l'exportation des modèles CAO dépendent du logiciel de dessin dans lequel *FiberSim* est implanté.

FiberSim permet de réaliser trois modes de drapage :

- Ply-based Design
- Zone-based Design
- Grid-based Design

Dans les trois cas, il s'agit d'un drapage géométrique. La différence se trouve au niveau de la définition des zones de drapage. Il est possible de draper toute la pièce avec une seule zone géométrique ou par zones définies sur un quadrillage. Le choix de la méthode est ici essentiel pour l'exportation de données de fabrication, tel que l'aire des tissus, le poids des tissus, le centre de gravité, etc... Il existe une large bibliothèque de matériaux au sein de ce logiciel. Dans le cas du drapage par zone, il est possible de définir des zones de recouvrement afin d'obtenir les informations les plus précises possibles pour la fabrication (notamment le poids, qui est très important dans le domaine du composite). Ces zones de recouvrement existent lorsque l'on dispose d'empilements de différentes épaisseurs à raccorder. Il existe plusieurs algorithmes permettant de calculer les zones de transitions afin de minimiser les erreurs de positionnement schématisés à la Figure A-10.

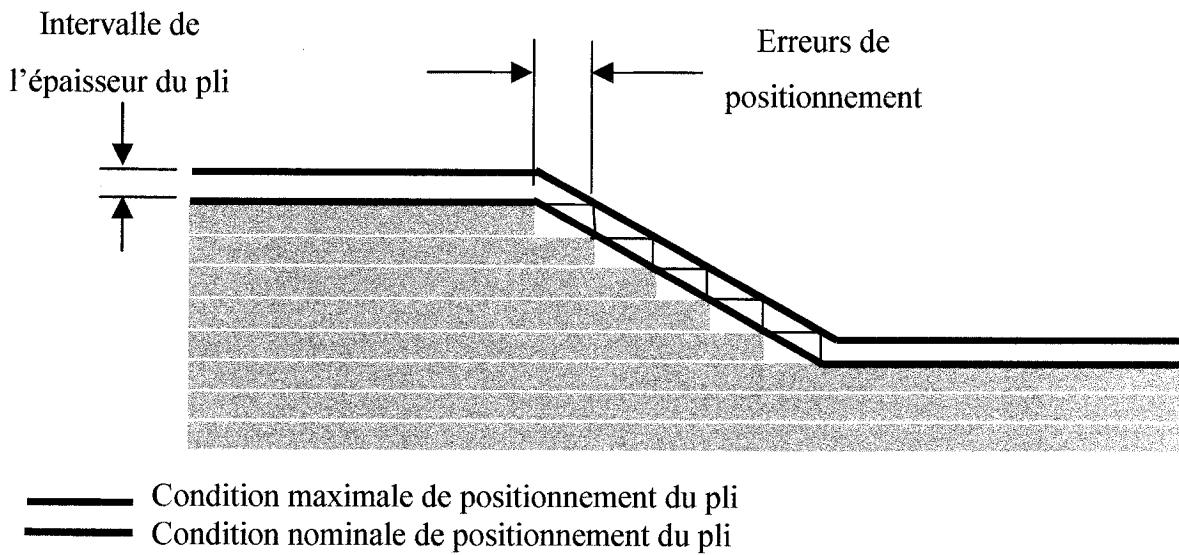


Figure A-10: Exemple de tolérance de fabrication.

FiberSim permet de définir les déformations des tissus suite au drapage. Ces déformations sont visualisées sous forme de code de couleurs dépendant des données entrées par l'utilisateur (angle de référence, angle maximum). L'ensemble des données de drapage (angle, orientation, épaisseur) est exportable vers d'autres logiciels d'analyse mécanique et de simulation d'injection. La création des patrons est possible sous *FiberSim*. Des

découpes peuvent même être réalisées pour diminuer les tensions au sein des tissus. Les résultats sont exportables sous les formats DXF et IGES.

Le logiciel possède une option de drapage, permettant de déterminer le flambement et le plissement pour des matériaux unidirectionnels. Les déformations et la déviation du matériau sont visualisables.

Note sur le logiciel :

Il n'a pas été possible de tester ce logiciel. D'après les informations recueillies, ce logiciel répond à l'ensemble de nos critères. *FiberSim* est un véritable outil de conception qui permet de faire le lien avec l'ingénierie mécanique et la fabrication. En utilisant *FiberSim* et les données de conception recueillies par ce logiciel pour l'analyse et la fabrication, les composites fabriqués correspondent entièrement au cahier des charges. En effet, il n'y a plus de surprise résultant des différents modèles réalisés pour la conception d'une part, l'analyse d'autre part et la fabrication.

Solution informatique offerte par la société Dassault Systèmes

Catia Composite

Le module composite *Engineering Design* (CPE) de *Catia* est un outil spécialement adapté à la conception de pièces composites. Ce module intervient à différentes étapes de la conception et permet d'étudier la faisabilité des pièces et d'aider les ingénieurs pendant l'étape de fabrication. Les principales possibilités offertes par ce logiciel sont les suivantes :

- facilité d'utilisation, notamment pour la création des différentes zones à draper,
- exportation de données de fabrication (poids, taille, coût,...),
- drapage géométrique,
- création et exportation des patrons sous formats DXF et IGES,
- analyse de faisabilité du drapage.

De la même façon que le logiciel *FiberSim*, trois modes de drapage géométriques peuvent être considérés. Les noms et fonctionnalités de ces 3 modes sont identiques à ceux du logiciel *FiberSim*.

Les différents types d'importation/exportation

Avec la solution Dassault Système il est possible d'importer/exporter les modèles CAO à partir de différents formats usuels suivants :

- *ACIS*
- *Autocad DXF* ou *DWG v2.5-2002*
- *Catia V4*
- *Catia V5*
- *IGES*
- *Parasolid 7.0-14.1*
- *Solidedge 10 & 11*
- *Solidworks*
- *STEP AP203/AP214*
- *STL*
- *VDA*

L'exportation des données de découpe est possible vers les machines à commande numérique sous les formats suivants :

- *IGES*
- *DXF*

Coût

Malgré des demandes réitérées, il est impossible pour le moment de connaître le prix de ce module de conception des composites.

Test du logiciel

La création de zones de drapage se fait sans difficultés, le drapage suit bien. L'analyse du drapage est purement géométrique et qualitative, aucune donnée mécanique quantitative n'est fournie après drapage. En revanche, il est possible d'obtenir les caractéristiques géométriques du tissu (angle, etc.) seulement en différents points géométriques, et non pas sur un maillage complet comme avec *Patran Laminate Modeler*. Le résultat du drapage n'est donc pas exportable vers d'autres logiciels pour réaliser une analyse mécanique complète (*PAM-RTM*, *Nastran*, etc.). Il est également possible comme pour tous les autres logiciels d'exporter les patrons (formats DXF et IGES).

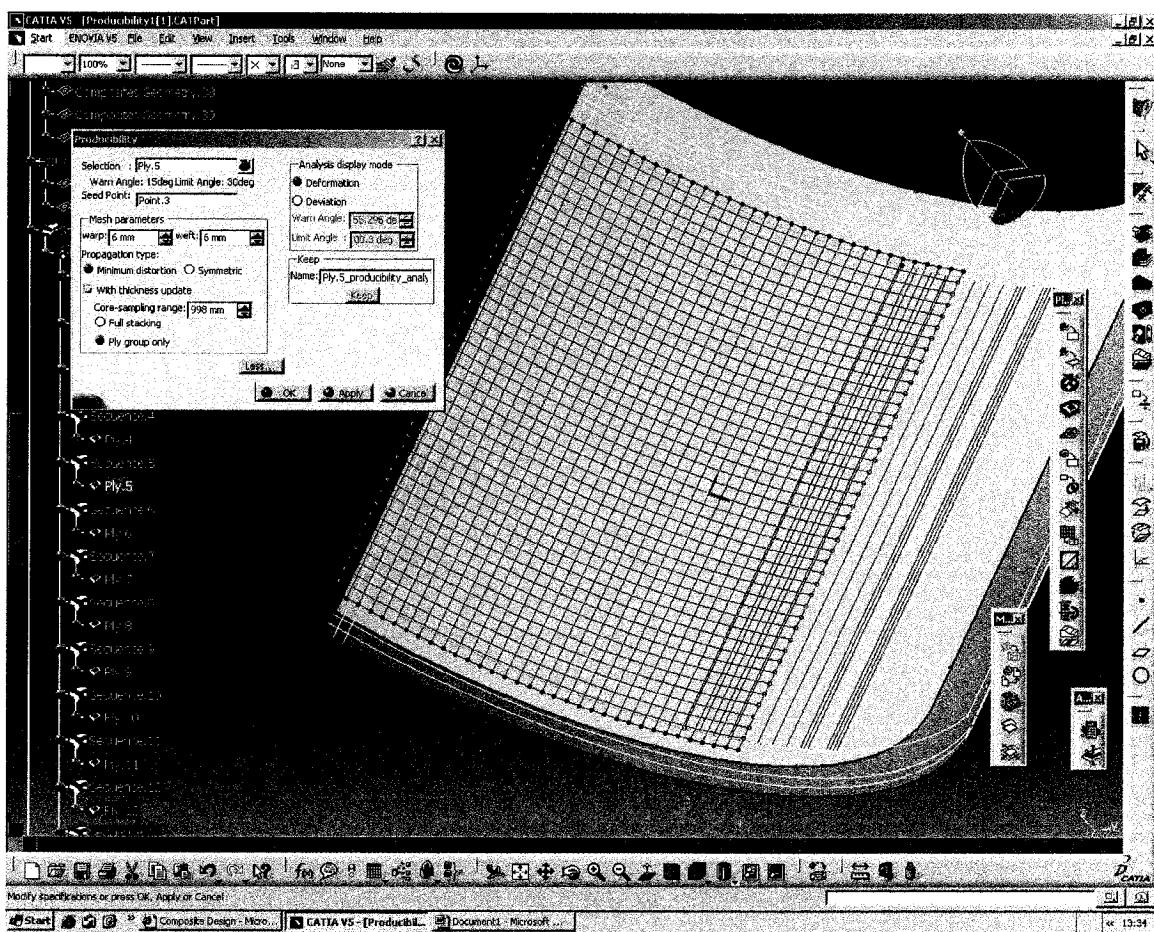


Figure A-11: Exemple d'analyse de tissu sous *Catia*.

L'angle de tissage est défini par l'utilisateur, la déformation maximum et l'angle maximum aussi. A partir de cela, le logiciel utilise le code de couleur suivant :

- bleu : déformation inférieure à 15 degrés par rapport à l'angle de référence.
- jaune : déformation comprise entre 15 et 30 degrés par rapport à l'angle de référence.
- rouge : déformation supérieure à 30 degrés par rapport à l'angle de référence.

A l'aide de ce code de couleur, l'utilisateur est capable d'identifier les zones les plus déformées.

Note sur le logiciel :

Il n'a pas été possible de draper la pièce arrière de voiture présentée ci-haut puisque nous ne disposons que du maillage de celle-ci et qu'il impossible d'importer un maillage non généré par *Catia V5* sous *Catia V5*. L'exportation des résultats du drapage est impossible. *Catia* est avant tout un excellent outil de conception, le module de conception des composites ne dispose pas de lien étroit avec l'analyse de composites mais ces données de conception peuvent être directement utilisées pour la fabrication. Il n'est pas possible d'exporter les données de conception vers l'analyse ce qui peut entraîner des problèmes importants puisque l'analyse n'est pas réalisée sur la pièce qui sera produite.

Solutions informatiques offertes par la société ESI

Introduction

ESI Group est une compagnie qui développe des solutions numériques utilisant la méthode de calcul par éléments finis pour différents types de problèmes industriels comme l'analyse des contraintes pour les matériaux composites avec le logiciel *Sysply* ou encore les tests d'impacts avec *PAM-CRASH*. Le préfixe PAM signifie « Product of Applied Mechanics ». Le logiciel *PAM-STAMP* a été développé pour simuler la mise en forme des métaux par emboutissage. L'un des logiciels qui nous intéresse ici est le

logiciel *PAM-FORM* qui permet de simuler la mise en forme mécanique des composites. *PAM-FORM* a été développé sur les bases de *PAM-STAMP*, logiciel très reconnu et très utilisé dans l'industrie de mise en forme de matériaux métalliques. Un autre logiciel proposé par cette compagnie traite du drapage géométrique des composites, il s'agit de *QUIK-FORM*.

Quik-Form

QUIK-FORM simule le drapage géométrique d'un ou plusieurs plis de tissu bidirectionnel ou unidirectionnel sur des surfaces complexes. La simulation du drapage est réalisée à partir du maillage de la surface à draper. Une simulation sous *QUIK-FORM* permet d'obtenir l'orientation des fibres et l'angle de cisaillement pour chaque élément du maillage. L'orientation des fibres peut alors être exportée vers le logiciel d'analyse structurale des composites d'ESI Software : *Sysply*. Ces mêmes données peuvent également être exportées vers *PAM-RTM*, afin de pouvoir lancer une simulation de remplissage d'une pièce. La mise à plat des surfaces est également possible à partir de ce logiciel. Le logiciel est disponible à l'École Polytechnique de Montréal est à donc pu être testé, la Figure A- 12 montre la mise à plat d'une demi sphère.

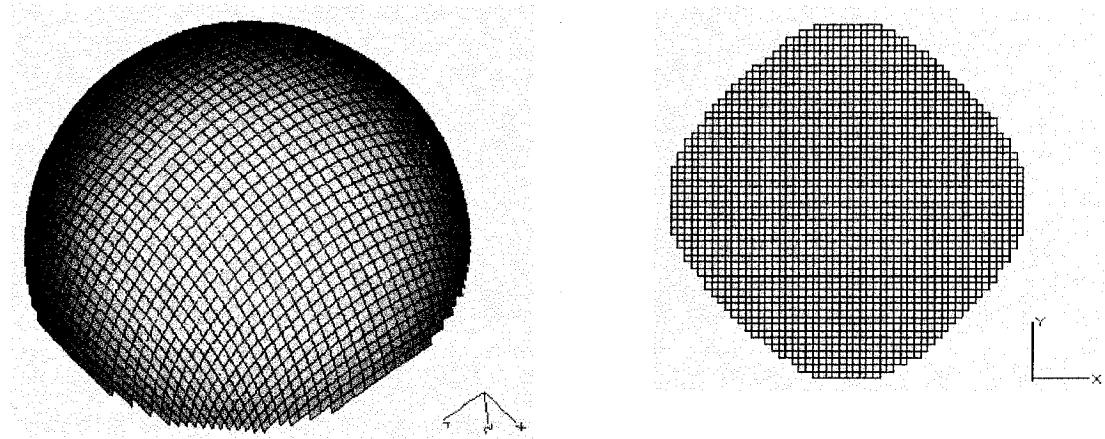


Figure A-12: Exemple de mise à plat sous *QUIK-FORM*.

Les 2 plus importants paramètres pour lancer une simulation sous *QUIK-FORM* sont les suivants (Figure A-12) :

- le point de départ de la simulation,
- la direction de drapage (ou d'application).

Un deuxième vecteur peut être défini de façon optionnelle pour simuler les tissus qui ne sont pas orthogonaux.

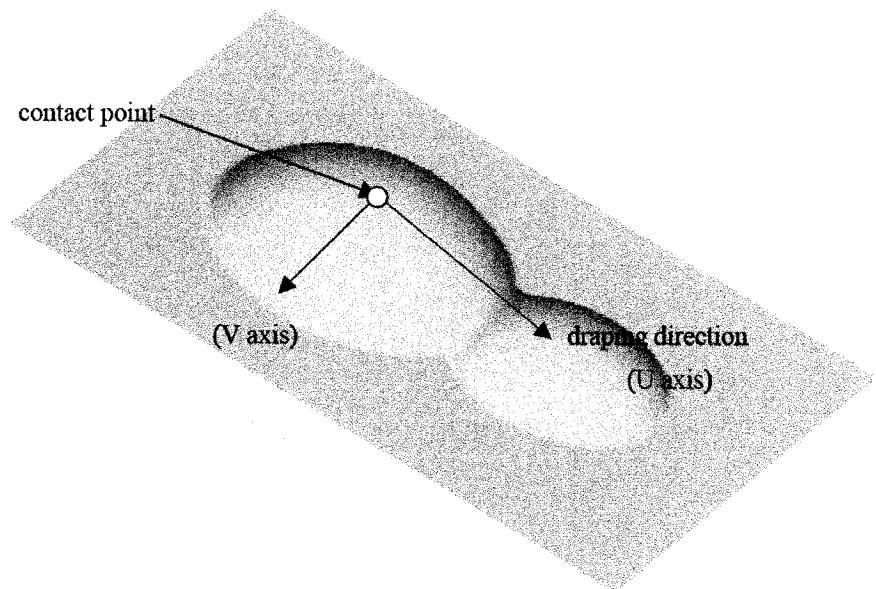


Figure A-13: Paramètres de drapage de *QUIK-FORM*.

Test de drapage :

Deux surfaces ont été drapées avec *QUIK-FORM*, les résultats sont visualisables à la Figure A-13. Il est alors possible de voir l'angle de cisaillement sur les 2 essais.

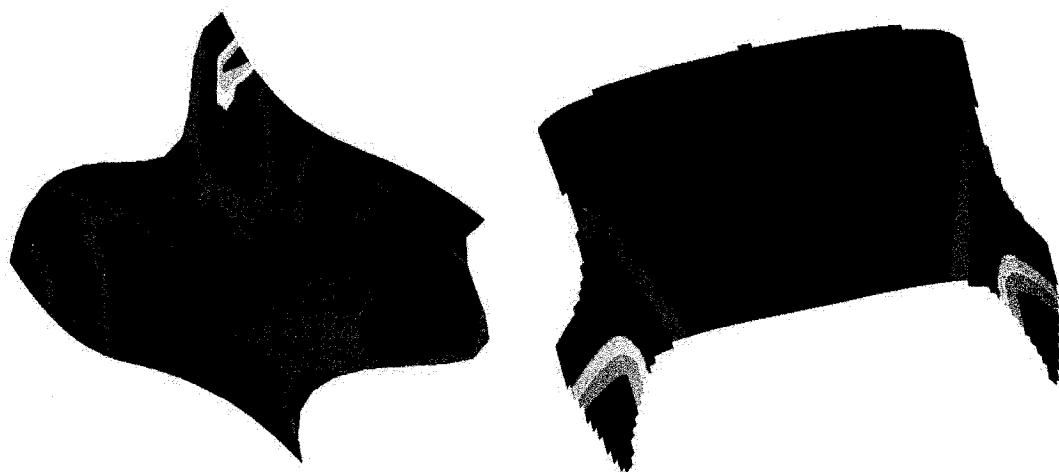


Figure A-14: Drapage d'une surface à double courbure (à gauche) et d'un toit de voiture (à droite) sous *QUIK-FORM*.

Note sur le logiciel

QUIK-FORM, permet de déterminer de façon très rapide l'angle de cisaillement d'un tissu bidirectionnel après drapage. La mise à plat des tissus est également possible avec ce logiciel mais le résultat du patron 2D n'est pas exportable pour être découpé. Les données des angles de cisaillement sont exportables uniquement vers des logiciels de la compagnie *ESI* notamment pour l'analyse structurale des pièces. Il n'est pas non plus possible de définir des coupes au sein du tissu afin de minimiser les déformations en cisaillement.

PAM-FORM

Préparation :

Le logiciel *PAM-FORM*, contrairement aux autres préalablement testés ou présentés demande beaucoup plus de travail en amont de la simulation. La préparation peut être divisée en plusieurs étapes : maillage, positionnement du pli et du poinçon, sélection du modèle de matériau, définition des paramètres de simulation.

Maillage, positionnement du pli et du poinçon :

La première opération pour lancer une analyse de mise en forme sous *PAM-FORM* est l'importation du modèle CAO du poinçon et de la matrice ainsi que le maillage de ces derniers par des éléments quadrangulaires 2D de type « Shell ». Le pli à mettre en forme doit également être maillé par des éléments de type « Shell ». Les différentes entités sont positionnées grâce à une fonction de positionnement automatique. La taille du maillage et la dimension des éléments dépendent de la surface des éléments CAO et doivent soigneusement être définies pour les calculs futurs.

Modèles de matériau :

Le choix du modèle de matériau est l'étape la plus difficile et la plus critique de *PAM-FORM*. Dans *PAM-FORM*, il existe différents types de modèles de matériaux prédéfinis.

Le Tableau A-4, ci-dessous résume l'ensemble des modèles utilisables dans *PAM-FORM* ainsi que les paramètres qui y sont associés. Pour chacun des modèles, il est nécessaire de réaliser des essais mécaniques afin de pouvoir caractériser les paramètres matériau.

Tableau A-2: Modèles de matériau sous PAM-FORM

Modèles de matériau	Éléments	Paramètres
Anisotrope élastoplastique	Poinçon, Matrice	Module d'Young : E Coefficient de Poisson : ν Coefficient d'anisotropie plastique : R Loi de durcissement
Thermo-élasto-visco-plastique	Diaphragme	Coefficients de la loi de comportement de Green-Lagrange

Si des simulations de thermoformage doivent être réalisées, le coefficient de capacité calorifique doit être entré dans le logiciel.

Paramètres de simulation :

Les différents paramètres de simulations qui doivent être connus pour une analyse avec *PAM-FORM* sont regroupés dans le Tableau A-3.

Tableau A-3: Définition des paramètres de simulation pour différents processus de mise en forme sous PAM-FORM

Paramètres de simulation	
Emboutissage	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse du poinçon • Force de maintient du pli
Mise en forme par double diaphragme	<ul style="list-style-type: none"> • Pression appliquée de chaque coté de la membrane

Paramètres de contact :

Deux types de contacts mécaniques peuvent être simulés sous *PAM-FORM* :

- contact symétrique : pli/pli,
- contact non symétrique : pli/poinçon (ou matrice), pli/diaphragme ou diaphragme /poinçon (ou matrice).

Pour chaque interface, l'entrée des paramètres requiert un coefficient de friction et la distance à partir de laquelle le contact est établi. Pour le thermoformage, un coefficient de conduction thermique doit également être entré.

Résultats :

Plusieurs résultats sont disponibles après une simulation. Pour chaque pli mis en forme, les résultats suivants peuvent être visualisés :

- épaissement,
- déformations,
- contraintes,
- température (pour thermoformage),
- déplacements,
- cisaillement des fibres.

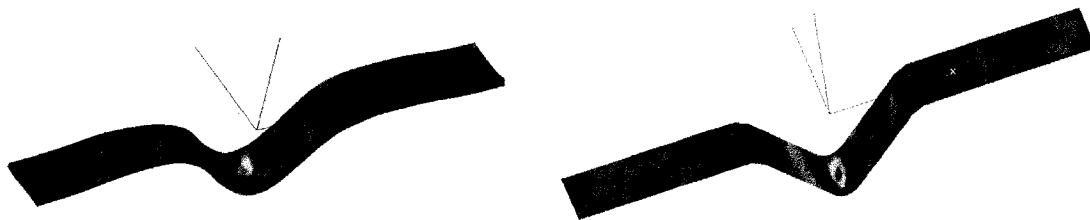


Figure A-15: Visualisation du cisaillement des fibres (à gauche) et de l'épaissement (à droite) pour un pli mis en forme par soufflage sous *PAM-FORM*.

L'évolution d'un de ces résultats peut être tracée pour chacun des nœuds en fonction du temps dans le post traitement.

Opérations multiples :

Avec *PAM-FORM*, il est possible, comme avec beaucoup de logiciels d'analyse mécanique par la méthode des éléments finis de récupérer les données d'un calcul et de les réutiliser pour un autre. Ainsi, il est ici possible de lancer deux mises en forme successives avec des pressions différentes par exemple.

Conclusion

PAM-FORM, permet de simuler des mises en forme mécaniques de tissu et non des simulations de drapage. L'utilisation de ce logiciel est donc plus exigeante et beaucoup de paramètres physiques des matériaux doivent être définis avant chaque utilisation. Les calculs réalisés sont non linéaires ce qui pose des problèmes de convergence de calcul parfois. Le temps de calcul pour une simulation est beaucoup plus long que pour une simulation de drapage. L'exportation des données de drapage est possible vers d'autres logiciels.

L'analyse comparée des logiciels a permis de mettre en évidence les possibilités de chacun des logiciels présentés. A partir de cela il est maintenant possible d'éclaircir le choix du ou des logiciels. Il est clair qu'en fonction des besoins, différents logiciels doivent être éliminés de la liste. Les besoins de l'École Polytechnique de Montréal sont tels qu'il est indispensable de pouvoir exporter les données de drapage (angle, orientation et épaisseur) vers d'autres logiciels d'analyses. En effet la conception, l'analyse et la production des futures pièces à réaliser impliquent des études par la méthode des éléments finis pour le dimensionnement final et des simulations d'injection pour la fabrication (la perméabilité dépend directement de l'angle de cisaillement du tissu). Sous cet angle trois logiciels restent en course : le logiciel de la société VISTAGY, celui de la société Msc Software et *QUIK-FORM* de ESI. Ces trois logiciels utilisent un algorithme géométrique pour modéliser le drapage. Le logiciel *PAM-FORM* est capable de réaliser des simulations de mise en forme en tenant compte des contraintes mécaniques et géométriques.

Parmi tous ces logiciels seuls deux sont capables de fournir de véritables données de fabrication, telles que le poids, les dimensions exactes, le coût, etc. à partir d'une riche bibliothèque de matériaux. Il s'agit des logiciels *FiberSim* et *Catia Composite*. Une attention supplémentaire doit être accordée à *FiberSim* qui par souci de précision utilise des algorithmes non linéaires pour modéliser les zones de recouvrement. Des rapports de fabrication peuvent être faits directement à partir de ces logiciels afin de permettre une documentation technique complète de chaque pli et disposer alors d'une documentation

idéale pour la fabrication. Pour ce qui est de la réalisation des patrons, tous les logiciels présentés excepté *PAM-FORM* et *QUIK-FORM* peuvent les définir, éditer et exporter vers des machines de découpe à commande numérique. L'analyse de la faisabilité du drapage est possible avec tous ces logiciels. Hormis les logiciels *PamForm* et *DesignConcept3D Expert Pattern Modeling*, le drapage est purement géométrique, pour le logiciel *DesignConcept3D Expert Pattern Modeling* l'elongation géométrique des éléments est calculée puis les déformations et enfin les contraintes en utilisant les données du matériau. Les données d'analyses générées par le logiciel *3D direct* sont purement qualitatives.

Au vu de ces différentes conclusions et du tableau récapitulatif présenté au Tableau A-1, le logiciel *Patran Laminate Modeler*, de la société MSC.Software est choisi. Ce logiciel permettra de réaliser les études de drapage des différentes pièces qui seront fabriquées par la chaire de recherche sur les Composites à Haute Performance de l'École Polytechnique de Montréal.

Annexe B : Décryptage d'un fichier *Layup* de *Patran Laminate Modeler*

**

** HEADER DATA

**

000 HEADER

001 C:\tmp\essais3.Layup

002

003

004 0 0 0

005 0 0 0

006 20031117

**

** LAYER DATA

**

300 LAYER

301 3

302 1

303 Ply_6

305 1

306 1

**

** LAYER DATA

**

300 LAYER

301 3

302 2

303 Ply_1

305 1

306 2

**

** MATERIAL DATA

**

500 MATERIAL

501 3

502 1

```

503 Mat_4
504 0.1
505 1.0471976
506 fabric_t300_f934
507 1.5707964
508 2
510 0 0 1 4 0 0 0
511 66000 66000 0 0 0 0
512 0.039999999 0 0 0 0 0
513 4100 5000 5000 0 0 0
514 1.2E-005 1.2E-005 0 0 0 0
515 375 368 0
516 279 268 0
517 46 40 40
518 -50790.098 0 0
519 1.6E-009 20 0
551 0 0 0
552 0 0 0
**
** GLOBAL LAYER DATA
**
600 GLOBAL LAYER
** NODE DATA
**
100 NODE
101 0 1
102 0 10 0
100 NODE
101 1 2
102 0 5 0
100 NODE
101 2 3
102 0 0 0
100 NODE
101 3 4
102 -2.1855693E-007 10 -5

```



Définition des 9 noeuds du
maillage

```
100 NODE
101 4 5
102 -2.1855693E-007 5 -5
100 NODE
101 5 6
102 -2.1855693E-007 0 -5
100 NODE
101 6 7
102 -4.371139E-007 10 -10
100 NODE
101 7 8
102 -4.371139E-007 5 -10
100 NODE
101 8 9
102 -4.371139E-007 0 -10
**
** ELEMENT DATA
**
200 ELEMENT
201 0 1 0
202 1 1 0
203 4
204 1 2 5 4
206 0.08726646 5
207 0 0
200 ELEMENT
201 1 2 0
202 1 1 0
203 4
204 2 3 6 5
206 0.08726646 5
207 0 0
200 ELEMENT
201 2 3 0
202 1 1 0
203 4
```



Définition des 4 éléments du
maillage

```

204 4 5 8 7
206 0.08726646 5
207 0 0
200 ELEMENT
201 3 4 0
202 1 1 0
203 4
204 5 6 9 8
206 0.08726646 5
207 0 0

```

**

** PATTERN DATA

**

400 PATTERN

```

401 3
402 2
403 Ply_1_pattern
404 0 1
405 -2.1848408E-007 5.0033333 -4.9983333
406 2.646978E-023 4.9966667 0
407 -7.285231E-011 -7.2852835E-011 -0.0016666667
408 1.5707964
409 1.0471976

```

Point de départ de la simulation

Longueur du pas de

drapage



Définition

explicite

```

410 0.375 -1
411 87 113 87 113 100
412 -2.1855693E-007 5 -5
413 1 0 -4.3699998E-008

```

Direction d'application

Direction de référence

Angle de référence (en radian)

414 0 1 0 0

415 -3.1663561E-013 -3.0375702E-013 0.1 0.1

416 0 0 0 0

Angles des directions de
chaîne et de trame par
rapport à la direction de

N° élément Variation de

l'épaisseur, ici

430 0 1 1 1.1093835 1.5707963 -3.1415927 -1 0
 430 0 2 1 -3.1093835E-013 3.1415927 1.5707963 -1 0
 430 0 3 1 -3.1059526E-013 -3.1415927 1.5707963 -1 0
 430 0 4 1 -3.1067325E-013 3.1415927 1.5707963 -1 0

**

** OFFSET DEFINITION DATA

**

700 OFFSET DEFINITION

**

** TOLERANCE DEFINITION DATA

**

800 TOLERANCE DEFINITION

809 0.08726646 5

**

** END

**

Définition des
données du drapage
pour les 4 éléments
présents dans le
fichier

Annexe C : Décryptage d'un fichier *fmd* de *PAM-RTM*

```

$..
PROJ      'DEMI_SPHERE-2PLY_FIBER_BEHAVIOR
$..
$..          EXECUTIVE CONTROL
$..
```

\$-----

\$..

\$.. NODES

\$..

GRID	1147	.0576067.0080556-.014717	}	Définition des nœuds
GRID	1362	.0585319.0070095-.011176		
GRID	1363	.0578566.00377 -.015441		
GRID	1734	.0036953.0357401-.048052		
GRID	1180	-.025249.0544203-.1-2		

\$..

\$-----

\$..

\$.. ELEMENTS

\$..

CTRIA3	1734	1734	1363	1147	1362	}	Définition des éléments triangles linéaires
CTRIA3	1738	1738	1000	1942	1372		

\$..

\$-----

\$..

N° élément

Angles des directions de chaîne et de trame par rapport à la direction de

\$. .

§ . .

PCOMP

1738

+ 17381

PROPERTIES

1734

ENDDATA

Annexe D : Code d'exportation des données de *Patran Laminate Modeler* vers *PAM-RTM*.

CLASS Draping

```

/*****
*****
FUNCTION init()
/*****
*****
WIDGET menubar, menu, item1

/* get the widget id of the top menu bar
* from the uil_primary class in the main program
* This will be used to hang the trainig menu from
* the top menu bar, i.e. the same level as the file
* selection menu.
*/
menubar= uil_primary.get_menu_bar_id()
menu= ui_menu_create (menubar, "Draping_menu", "Draping")
item1= ui_item_create (menu, "Function1", "Export_to_PAM-RTM", FALSE )

END FUNCTION /* init */

/*****
*****
FUNCTION raddeg(anglerad)
/*
* convert a angle in rad to an angle in deg
*/
REAL anglerad,angledeg
angledeg = 180.00 / 3.1415927* anglerad

```

```

Return angleddeg
END FUNCTION
*****
*****
*****
*****
*****
*****
```

FUNCTION ExpoRTM()

```

/*
*
*This function allow to export the draping result from Patran Laminate
Modeler
* to PAM-RTM layer by layer
* To use it, you need to generate the .layup containing draping result
* with Laminate Modeler (for more informations:
yannick.banaszak@polymtl.ca)
*/
```

STRING filename[100], outstr[720], filename2[80], filename3[80], fname[80]

STRING record[720], field[128], stmp[20](1,6)

INTEGER num_ints, status, channel, itoken, array_alloc_size, position,

nodenumber

INTEGER lrecl, increment = 100, i, j,k, itmp1, itmp(1,6), elementnumber,

ilayer

REAL numbers(VIRTUAL), tmp(1,4)

filename = ui_read_string ("Enter the file name with .layup extension to
read the draping results in the template folder")

```

***** ****
***** /
/*      Number of layer in the .layup file */

ilayer = 0
status = text_open( filename, "OR", 0, 0, channel )
IF( status != 0 ) THEN
write("Unable to open file to read coord "//filename)
RETURN status
END IF

WHILE( text_read_string( channel, record, lrecl ) == 0 )
field = str_token( record, " ", 1, TRUE)
IF( str_to_integer( field ) == 402 ) THEN
ilayer += 1
END IF
END WHILE

text_close( channel, " " )
***** ****
***** /

```

For (j = 1 to ilayer)

```

/*
 * Built a fname containing the pli data to PAM-RTM
 *
*/

```

fname = "layer"//str_from_integer(j)

```

file_build_fname("", fname, "bdf", "0", filename2)
text_open(filename2, "NOAW", 0, 0, channel)
/*
 * writting
*/

```



```
*/  
text_close(channel, "")  
  
/*  
* Open the external file.layup  
*/  
status = text_open( filename, "OR", 0, 0, channel )  
IF( status != 0 ) THEN  
write("Unable to open file to read coord "//filename)  
RETURN status  
END IF  
/*****  
*****  
* initialize variables and counters  
*/  
array_alloc_size = increment  
sys_allocate_array( numbers, 1, array_alloc_size, @  
1,4)  
num_ints = 1  
  
/*  
* Loop to end of file reading all records  
*/  
itoken = 0  
WHILE( text_read_string( channel, record, lrecl ) == 0 )  
  
/*  
* Reading nodes  
*/  
  
field = str_token( record, " ", 1, TRUE)  
  
IF( str_to_integer( field) == 101 ) THEN  
itoken += 1  
IF( itoken > array_alloc_size ) THEN
```

```
array_alloc_size += increment
sys_reallocate_array( numbers, 1, array_alloc_size, @
1, 4)
END IF

field = str_token(record, " ", 3, TRUE)
numbers (itoken,1) = str_to_integer( field)
END IF

IF( str_to_integer( field) == 102 ) THEN
field = str_token(record, " ", 2, TRUE)
numbers (itoken,2) = str_to_real( field)
field = str_token(record, " ", 3, TRUE)
numbers (itoken,3) = str_to_real( field)
field = str_token(record, " ", 4, TRUE)
numbers (itoken,4) = str_to_real( field)
END IF

END WHILE

nodenumber = itoken

/*
* Close the external file
*/
text_close( channel, " " )

/*
* Writing nodes
*/
file_build_fname("", fname, "bdf", "0", filename2)
text_open(filename2, "NOAW", 0, 0, channel)

/*
* writing
*/

```

```

outstr = "$.."
text_write_string(channel, outstr)
outstr = "$..          NODES"
text_write_string(channel, outstr)
outstr = "$.."
text_write_string(channel, outstr)
FOR (i= 1 to nodenumber)
itmp1 = numbers(i,1)
tmp(1,1)= numbers(i,2)
tmp(1,2)= numbers(i,3)
tmp(1,3)= numbers(i,4)
string_write(
"%A8.L%%I16.L%%F8.8L%%F8.8L%%F8.8L%",itmp1,tmp,"GRID",outstr)
text_write_string(channel, outstr)
END FOR
outstr = "$-----"
text_write_string(channel, outstr)
/*
* Close the external file
*/
text_close(channel, "")

sys_free_array( numbers )

/*****************/
/*
* Open the external file.layup
*/
status = text_open( filename, "OR", 0, 0, channel )
IF( status != 0 ) THEN
write("Unable to open file to read coord "//filename)
RETURN status
END IF

```

```
*****
*****
* initialize variables and counters
*/
array_alloc_size = increment
sys_allocate_array( numbers, 1, array_alloc_size, @
1,4)
num_ints = 1

/*
* Loop to end of file reading all records
*/
itoken = 0
WHILE( text_read_string( channel, record, lrecl ) == 0 )

/*
* Reading elements
*/
field = str_token( record, " ", 1, TRUE)

IF( str_to_integer( field) == 201 ) THEN
itoken += 1
IF( itoken > array_alloc_size ) THEN
array_alloc_size += increment
sys_reallocate_array( numbers, 1, array_alloc_size, @
1, 4)
END IF
field = str_token(record, " ", 3, TRUE)
numbers (itoken,1) = str_to_integer( field)
END IF

IF( str_to_integer( field) == 204 ) THEN
field = str_token(record, " ", 2, TRUE)
numbers (itoken,2) = str_to_integer( field)
field = str_token(record, " ", 3, TRUE)
```

```
numbers (itoken,3) = str_to_integer( field)
field = str_token(record, " ", 4, TRUE)
numbers (itoken,4) = str_to_integer( field)
END IF

END WHILE

/*
* Close the external file
*/
text_close( channel, " " )

elementnumber = itoken

/*
* Writing elements
*/
file_build_fname("", fname, "bdf", "0", filename2)
text_open(filename2, "NOAW", 0, 0, channel)

/*
* writing
*/
outstr = "$.."
text_write_string(channel, outstr)
outstr = "$..          ELEMENTS"
text_write_string(channel, outstr)
outstr = "$.."
text_write_string(channel, outstr)
FOR (i= 1 to elementnumber)

itmp(1,1) = numbers(i,1)
itmp(1,2) = numbers(i,1)
itmp(1,3) = numbers(i,2)
itmp(1,4) = numbers(i,3)
```

```

itmp(1,5) = numbers(i,4)

string_write(
"%A8.L%%I8.L%%I8.L%%I8.L%%I8.L%%I8.L%",itmp,1.2,"CTRIA3",outstr)
text_write_string(channel, outstr)
END FOR
outstr = "$-----"
-----"
text_write_string(channel, outstr)
/*
* Close the external file
*/
text_close(channel, "")

sys_free_array( numbers )

/*****
*****
*/
/*
* Open the external file.layup
*/
status = text_open( filename, "OR", 0, 0, channel )
IF( status != 0 ) THEN
write("Unable to open file to read coord "//filename)
RETURN status
END IF
/*****
*****
*
* initialize variables and counters
*/
array_alloc_size = increment
sys_allocate_array( numbers, 1, array_alloc_size, @
1,4)
num_ints = 1

/*

```

```

* Loop to end of file reading all records
*/
itoken = 0

/*****
*****
* get the position of the layer j in the .layup file
*/
WHILE( text_read_string( channel, record, lrec1 ) == 0 )
field = str_token( record, " ", 1, TRUE)
IF( str_to_integer( field ) == 402 ) THEN
field = str_token(record, " ", 2, TRUE)
If (str_to_integer( field ) == j )THEN
text_get_position ( channel, position )
END IF
END IF
END While
/*****
*****/

text_set_position ( channel, position )

WHILE( text_read_string( channel, record, lrec1 ) == 0 )

/*
* Reading properties
*/
field = str_token( record, " ", 1, TRUE)

IF( str_to_integer( field ) == 430 ) THEN
itoken += 1
IF( itoken > array_alloc_size ) THEN
array_alloc_size += increment
sys_reallocate_array( numbers, 1, array_alloc_size, @

```

```
1, 4)
END IF
IF( itoken <= elementnumber ) then
  field = str_token(record, " ", 3, TRUE)
  numbers (itoken,1) = str_to_integer( field)
  field = str_token(record, " ", 6, TRUE)
  numbers (itoken,2) = str_to_real( field)
  field = str_token(record, " ", 7, TRUE)
  numbers (itoken,3) = str_to_real( field)
END IF
END IF
END WHILE
```

```
/*
 * Close the external file
 */
text_close( channel, " " )
```

```
/*
 * Writing properties
 */
file_build_fname("", fname, "bdf", "0", filename2)
text_open(filename2, "NOAW", 0, 0, channel)

/*
 * writing
 */
outstr = "$.."
text_write_string(channel, outstr)
outstr = "$..          DRAPING DATA (SHEAR ANGLE)"
text_write_string(channel, outstr)
outstr = "$.."
text_write_string(channel, outstr)
```

```

FOR (i= 1 to elementnumber)

    itmp(1,1) = numbers(i,1)
    itmp(1,2) = numbers(i,1)+4

    stmp(1,1) = "+"
    stmp(1,2) = ".2-3"
    stmp(1,3) = "YES"
    stmp(1,4) = "1"
    stmp(1,5) = ".2-3"
    stmp(1,6) = "YES"

    tmp(1,1) = draping.raddeg(numbers(i,2))
    tmp(1,2) = draping.raddeg(numbers(i,3))

    itmp1 = numbers(i,1)*10+41

    string_write( "%A8.L%%I68.L%%I8.L%", itmp,1,2,"PCOMP",outstr)
    text_write_string(channel, outstr)
    string_write(
        "%A4.L%%I12.L%%A8.L%%F8.8L%%A8.L%%A8.L%%F8.8L%%A8.L%", @
        itmp1,tmp,stmp,outstr)
    text_write_string(channel, outstr)
END FOR
outstr = "$-----"
-----"
text_write_string(channel, outstr)
/*
* Close the external file
*/
text_close(channel, "")

sys_free_array( numbers )

/*

```

```

* Tell user complete
*/
ui_write("Export pli to PAMRTM completed.")

END FOR

/*****
*****
* creation of the file .fmd reading by PAMRTM containing the list of
the layer file (.bdf)
*/
.

file_build_fname("", "draping_result", "fmd", "0", filename3)
text_open(filename3, "NOAW", 0, 0, channel)

outstr = "These_are_the_files_containing_the_draping_result_for_each_layer,_readi
ng_by_PAM-RTM"
text_write_string(channel, outstr)

For (k=1 to j-1)
outstr = "layer"//str_from_integer(k)//".bdf"
text_write_string(channel, outstr)
END FOR

text_close(channel, "")

END FUNCTION
/*****
*/
/*****
*/
/*****
*/
/*****
*/

```

```
/****************************************
*****
FUNCTION Draping_menu ( item_name )
/****************************************
*****
STRING item_name []
! the value for the item is 'item_name'
SWITCH (item_name)

CASE ("Function1")
WRITE (" you have selected Function to export draping data to PAM-RTM ")
UI_EXEC_FUNCTION ("Draping", "exportm")

END SWITCH

END FUNCTION /* Draping_menu */
*****
*****
```

**Annexe E : Transformation du fichier DXF généré par *Patran Laminate Modeler*
afin de le transférer à la machine de découpe *LECTRA VECTOR AUTO 2500***

Objectifs

L'objectif de cette notice est de permettre une communication rapide et simple entre un logiciel de création de patron 2D et une machine de découpe à commande numérique. Le patron 2D (géométrie) de la pièce à découper est fourni par le module *Patran Laminate Modeler* du logiciel *Patran 2005R2* de la société MSC.SOFTWARE dans un fichier au format DXF. Si ce type de fichier correspond effectivement à ce qui est attendu par la machine de découpe *LECTRA VECTOR AUTO 2500*, les spécifications du fichier généré par *Patran* ne peuvent malheureusement pas être décodées directement par la machine. Aussi, avant de transmettre le fichier à la machine, il faut lui apporter quelques modifications. Celles-ci peuvent être apportées à l'aide du logiciel de CAO commercial *Autocad 2006*.

Cahier des charges

Les contraintes imposées par la machine de découpe sont les suivantes :

- le contour externe doit être fermé ;
- le contour ne doit être formé que d'une ligne ;
- le poinçon est défini par un point ;
- les éventuelles lignes à tracer et/à couper doivent rester à l'intérieur du contour externe ;
- les entités supportées sont des arcs et des lignes (polyligne) ;
- les entités non supportées sont C-Spline, B-Spline, Bezier ;
- le fichier doit être enregistré au format DXF R12.

Les fichiers DXF stockent les informations via un système de couches. Aussi, là encore, certaines règles sont dictées par la machine de découpe. La manière de répartir les informations est présentée au Tableau E-1.

Tableau E-1 : Répartition des informations en fonction du numéro de la couche du fichier DXF

Type d'information	Couche n°
Contour de découpe	1
Entailles de type 1	4
Nervures	7
Lignes de tracé intérieures	8
Lignes de coupe intérieures	11
Trous à percer de type 1	13
Trous à percer de type 2	15
Texte de l'utilisateur	19
Lignes de commentaire	26
Entailles de type 2	28

Fichier exporté par *Patran Laminate Modeler*

Lorsque l'on ouvre le fichier généré par *Patran* dans *Autocad*, il faut d'abord taper « **z espace e entrée** » afin de régler le centrage et le niveau de zoom, voir Figure E-1.

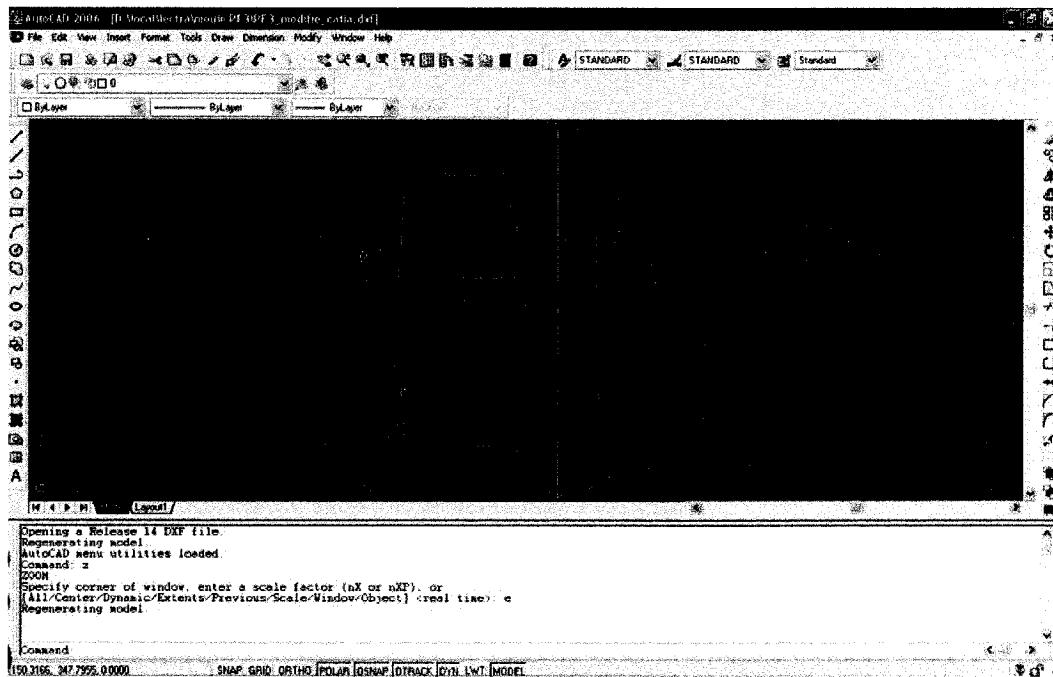


Figure E-1 : Importation du fichier DXF sous *Autocad* et zoom automatique.

Travail sous *Autocad*

On commence par supprimer les 2 lignes représentant les axes. Pour cela, il suffit de les sélectionner avec le bouton gauche de la souris et d'enfoncer la touche « Suppr ». On obtient ainsi la Figure E-2.

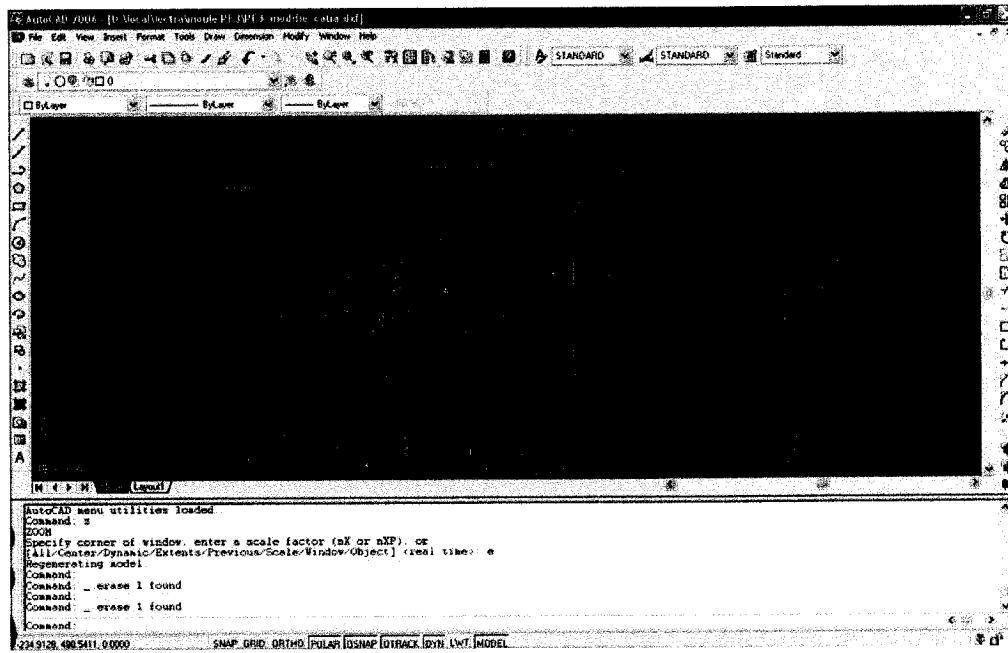


Figure E-2 : Visualisation du fichier après la suppression des axes du repère 2D.

Maintenant, il faut placer ce contour sur la bonne couche (n°1). On sélectionne le contour avec la souris. Ensuite *Autocad* déplace la sélection dès lors que l'on se place sur une autre couche, avec le menu déroulant adéquat (voir Figure E-3).

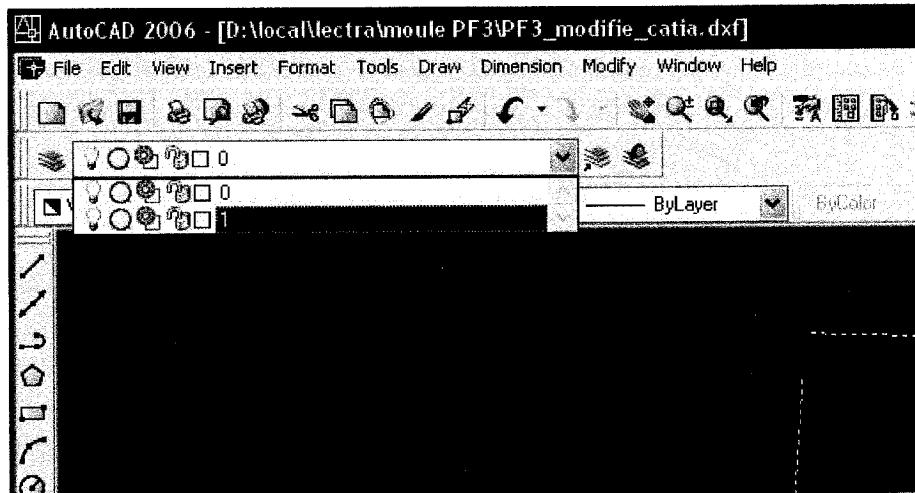


Figure E-3 : Sélection de la couche sur laquelle doit apparaître l'information.

Une fois cela fait, il faut se rendre dans le « Layer Properties Manager » afin de supprimer les couches qui ne servent à rien.

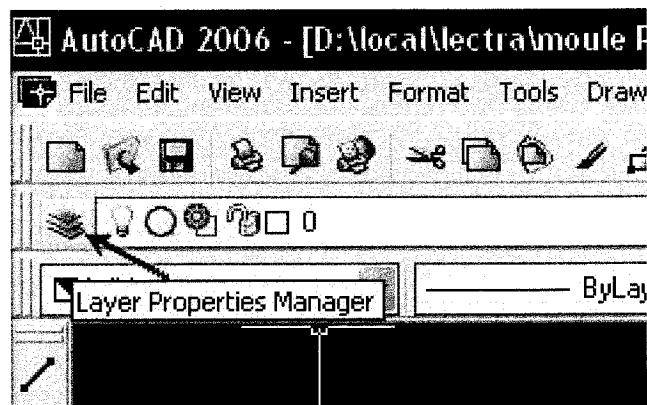


Figure E-4 : Visualisation de l'icône « *Layer Properties Manager* ».

Dans le manager, il suffit de sélectionner les couches en trop, d'appuyer sur la touche « Suppr » et de cliquer sur « OK » ; ceci est représenté sur la Figure E-4.

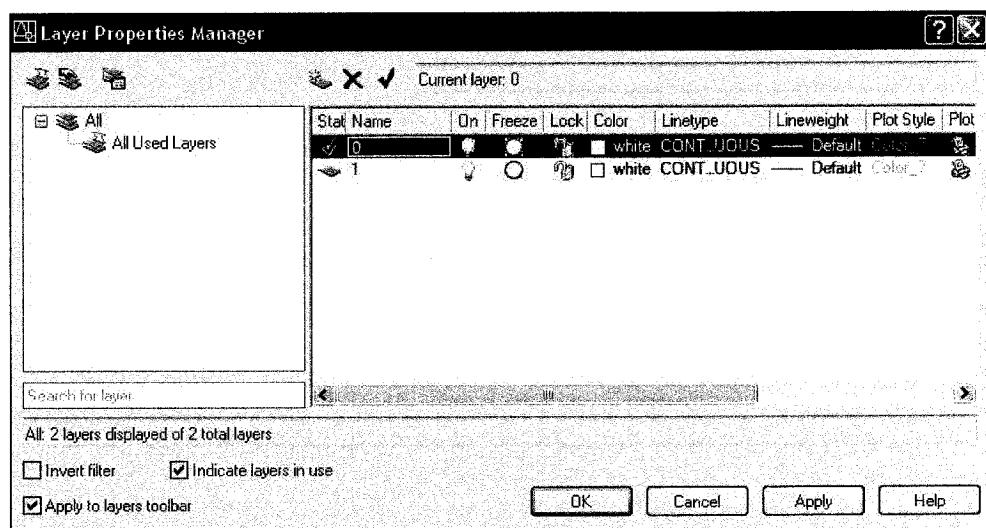


Figure E-5 : Suppression des couches en trop.

La dernière étape avant l'exportation vers la machine de découpe est le changement du type de contour. On sélectionne le contour et on fait dérouler le menu « Linetype » afin de choisir le mode « Continuous » (voir Figure E-5).

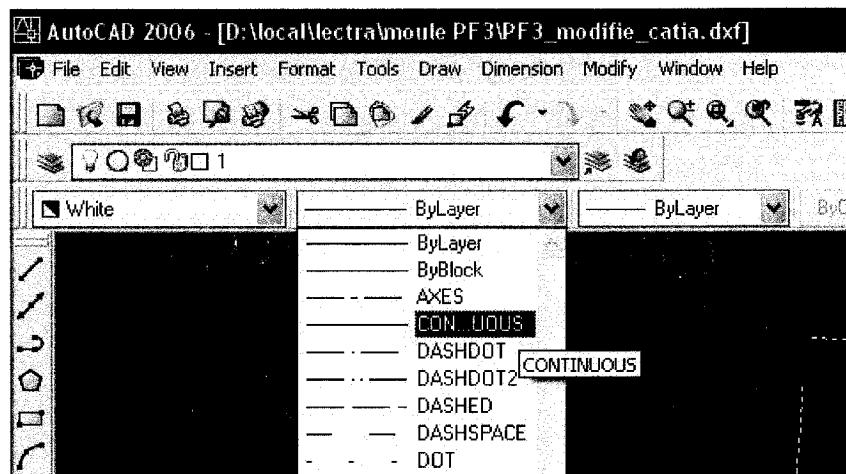


Figure E-6 : Changement du type de contour.

Il ne reste ensuite plus qu'à enregistrer au format DXF R12, qui convient à la machine de découpe LECTRA.

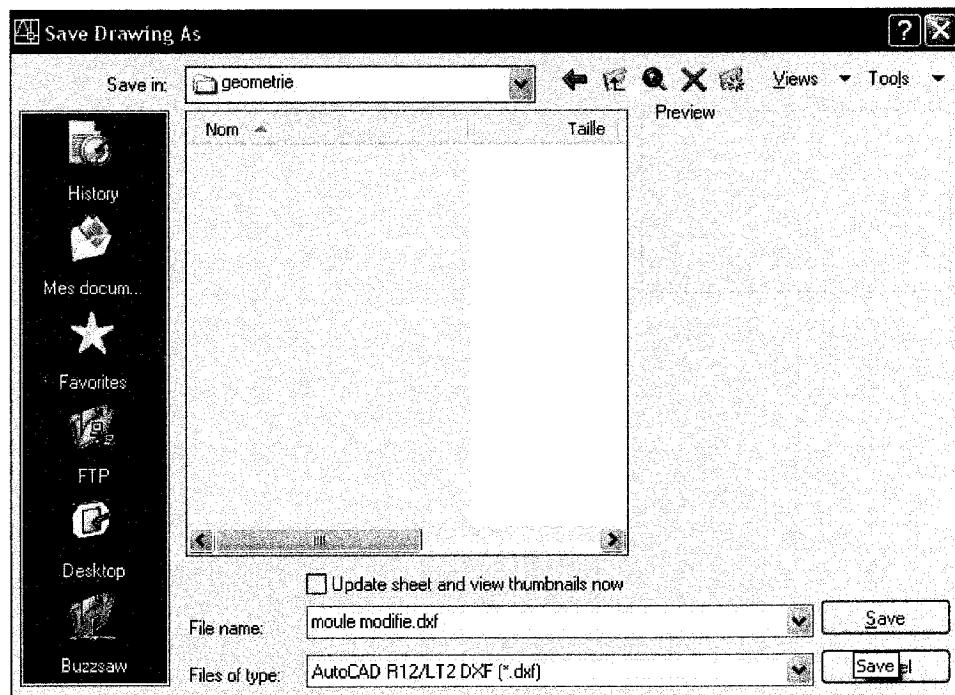


Figure E-7 : Enregistrement du nouveau fichier DXF sous le format R12.

Découpe de la pièce

Le fichier final a été envoyé à la machine de découpe afin d'en vérifier la compatibilité. Il est important de noter ici que **la lecture du fichier DXF par la machine de découpe se fait à l'aide d'une clef USB** et uniquement à partir de cela. La découpe a été réalisée avec succès.

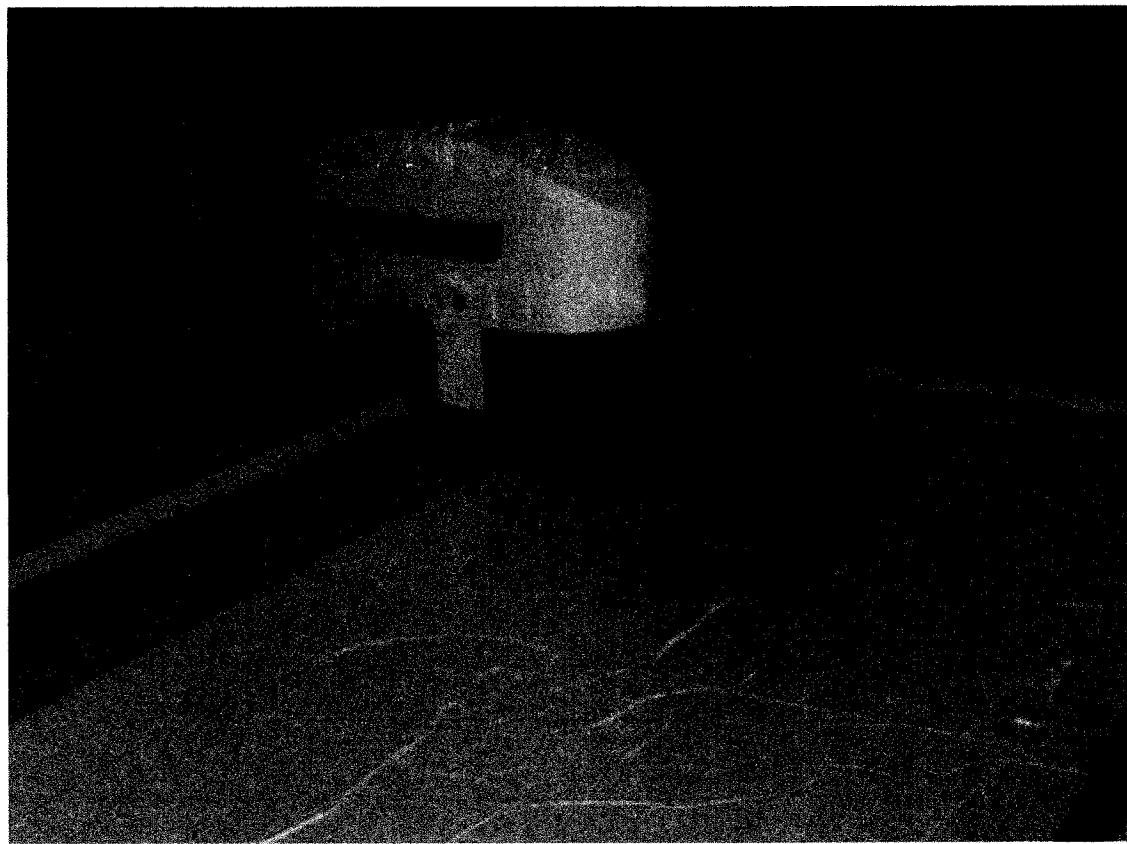


Figure E-8 : Configuration de la machine avant découpe.



Figure E-9 : Résultat de la première découpe.

Conclusion

Le logiciel *Autocad* est particulièrement adapté à la transformation du fichier DXF en provenance de *Patran Laminate Modeler*. La gestion des couches et des types de ligne y est aisée, ce qui rend l'opération de transfert simple et rapide à effectuer. Le passage vers la machine de découpe s'est fait sans problème, ce qui a permis de valider la méthodologie exposée dans ce document.

Annexe F : Fabrication d'un moule à préforme, Polyflex III (PF3).

Introduction

L'injection sur renforts tissés dans le moule Polyflex III nécessite que les fibres soient préformées. Le préformage à même le moule est toutefois contraignant : d'une part par manque d'espace, d'autre part en raison du temps d'utilisation. Aussi, le moule Polyflex III n'est conçu que pour atteindre des températures sous les 120°C. Ainsi, la nécessité de produire un autre type de membrane (à l'aide de feuilles de silicones non polymérisés) contribue au besoin d'un second moule pouvant atteindre des températures plus élevées. Ce travail documente brièvement la fabrication de ce nouveau moule par laminage manuel « wet layup ».

Le moule fabriqué n'est en fait qu'une coque avec la même cavité que la section femelle de Polyflex III, la même matrice a d'ailleurs été utilisée. Cette coque est obtenue par le laminage successif de couches d'époxy et de renforts de fibre de verre. Voyons en détail les différentes étapes de la fabrication.

Préparation de la matrice (modèle)

En un premier temps, les géométries de la matrice représentant la rainure du joint torique, les ports d'injection et l'évent ont été retirées. Ensuite, les imperfections ont été remplies avec du mastique et sablées. Finalement, toute la surface de la matrice a été scellée avec le « FMS Frekote » de *Loctite* et traité à l'agent démoulant « 700 NC » de *Loctite*. Toutefois, en raison de la grande porosité du MDF, ces produits n'ont été qu'absorbés. Ainsi, trois couches de cire « Chemlease » ont été appliquées pour palier au problème.

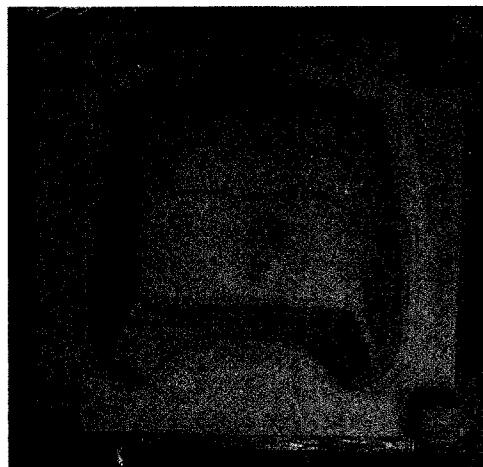


Figure F-1 Matrice apprêtée pour la fabrication du moule.

Gel coat

La première couche de résine appliquée sur la matrice consistait en un gel coat, afin d'assurer le fini de surface. Cette résine est en fait la même qu'utilisée pour le reste de la fabrication, mais chargée de talc et de silicate. Ces charges confèrent à la résine une plus grande onctuosité afin qu'elle demeurent en place sur les parois inclinées. Cette couche a été appliquée au pinceau en visant une épaisseur d'environ 0,5mm. Le durcissement c'est fait à température ambiante pour 30 minutes suivi d'une cuisson de 25 minutes à 60°C.

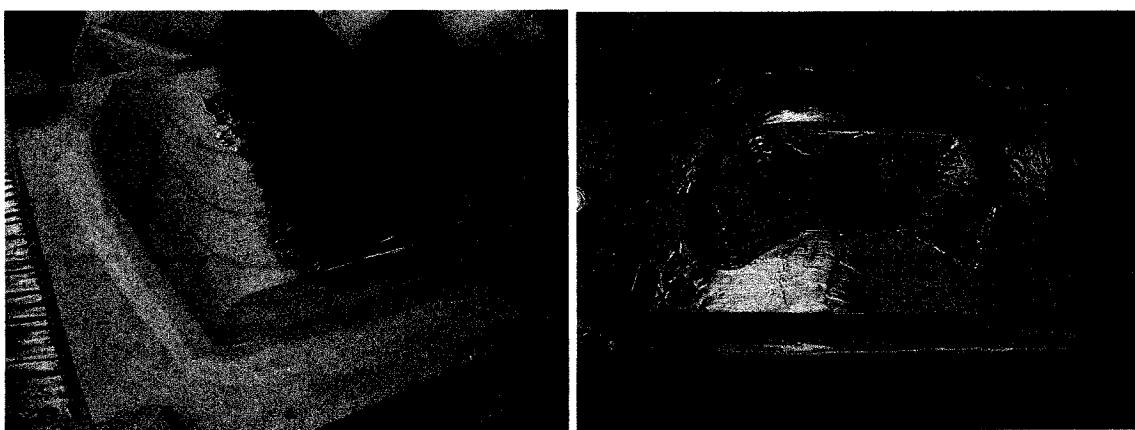


Figure F-2 : Application du *gel coat*.

Laminage

Le laminage c'est effectué en quatre étapes similaires, où chaque fois trois couches de tissus étaient déposées avant de laisser durcir la résine. Chaque couche consistait en quatre morceaux enchevêtrés de 50mm aux joints. Les trois premières couches ont été laminées avec un tissu fin de verre (180g/m²), les 9 autres avec un tissu plus grossier (650g/m²). La même procédure a été utilisée à chaque fois.

- 1- Application d'une couche de résine au pinceau.
- 2- Positionner et déposer un morceau de tissu.
- 3- Imprégnier le tissu, à l'aide des mains, du rouleau ou du pinceau.
- 4- Application de résine au pinceau et imprégnation dans les zones demeurées sèches.
- 5- Application de résine là où il y aura enchevêtrement.
- 6- Positionner et déposer un autre morceau de tissu de la même couche.
- 7- Répéter les étapes 3 à 6 pour tous les morceaux de tissu de cette couche.
- 8- Répéter les étapes 1 à 7 jusqu'à obtenir 3 couches.
- 9- Laisser la résine durcir (~60min) et reprendre à l'étape 1 pour une nouvelle couche.

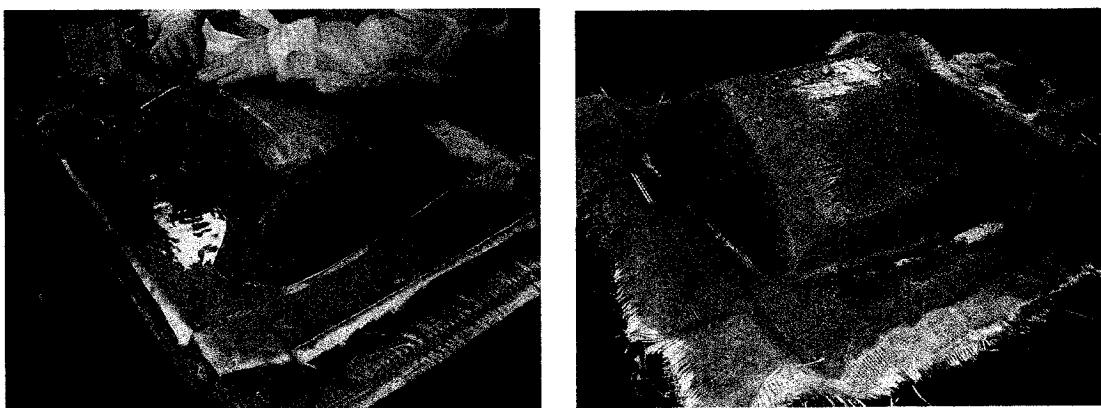


Figure F-3 : Application d'une couche de tissus sur une couche de résine.

Finition

Tout d'abord, les irrégularités (pics de fibres/époxy) ont été poncées à l'aide d'une meule et d'un disque de papier sablé. Ensuite, une boîte de bois, servant de support, a été déposée sur un cordon de mastique (même formulation que le *gel coat*) afin d'assurer un bon contact avec le moule. Finalement, des bandes de tissus (quatre épaisseurs) ont été laminées de manière à attacher rigidement la structure de bois au moule.

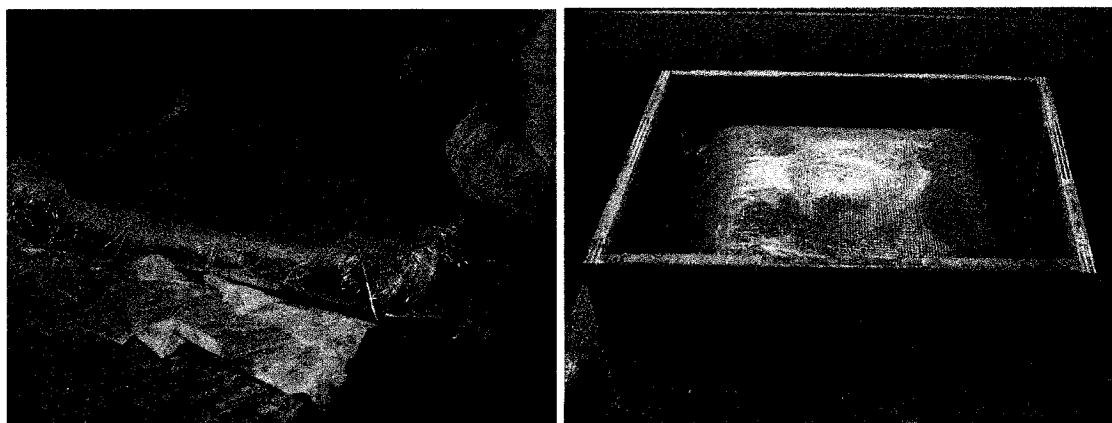


Figure F-4 : Ponçage des irrégularités (à gauche), structure de bois fixée au moule (à droite).

Contre moule

Le contre moule a été réalisé de la même manière que décrit précédemment. Il a été laminé par-dessus cette coque, sur laquelle a été fixée une feuille de cire calibrée (4mm). Cette feuille de cire représente en fait la géométrie de la pièce ou préforme à fabriquée, avec un excès de 5mm sur tout le contour. Ce, afin de faciliter les manipulations.

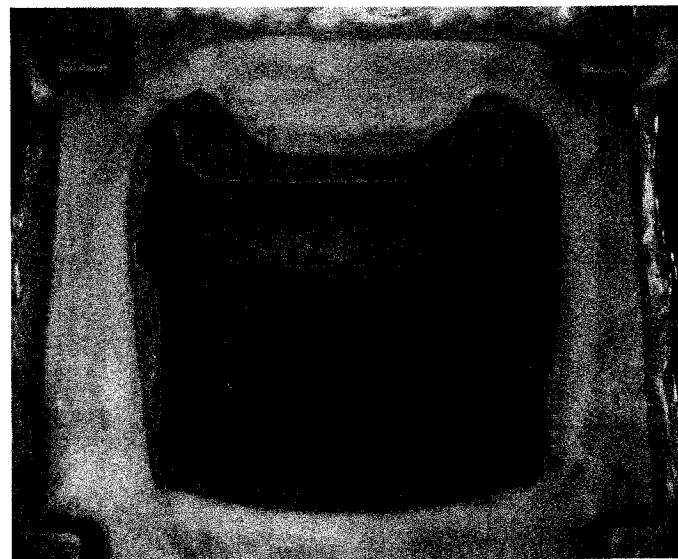


Figure F-5 : Contre moule après démoulage avec la cire calibrée

Résine utilisée

Tableau F-1 : Liste des résines utilisées pour la fabrication du moule à préformes PF3

<u>Gel coat</u>		<u>Résine</u>	
Époxy 100 (<i>Miapoxy</i>)	100 PHR _m	Époxy 100 (<i>Miapoxy</i>)	100 PHR _m
Durcisseur 97 (<i>Miapoxy</i>)	26 PHR _m	Durcisseur 95 (<i>Miapoxy</i>)	26 PHR _m
Talc	10 % _m		
Silicate	2,5 % _m		

Annexe G : Méthode manuelle de mesure des coordonnées 2D.

La première méthode utilisée pour obtenir les coordonnées des nœuds dans le repère 2D de la photographie consiste à venir pointer les nœuds un par un à la souris, en s'a aidant toutefois d'un code *Matlab* permettant d'enregistrer rapidement les coordonnées de chaque nœud.

Pointage des nœuds à la souris

La première étape de cette méthode consiste à utiliser *Matlab* pour venir cliquer sur les nœuds les uns à la suite des autres selon l'ordre choisi par l'expérimentateur. Le code utilisé permet l'utilisation d'un agrandissement pour un pointage plus précis (voir Figure G-1)

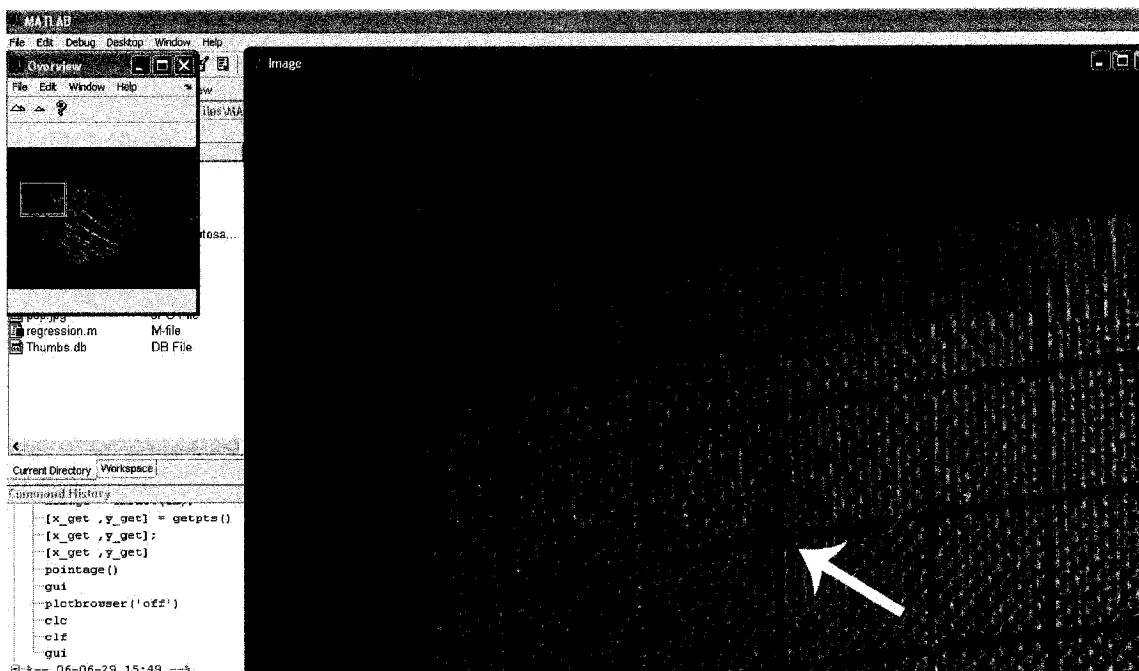


Figure G-1 : Pointage des nœuds du quadrillage.

Récupération des coordonnées des points

Les coordonnées des points sont inscrites dans un fichier ASCII contenant deux colonnes, une pour les abscisses et une pour les ordonnées (voir Figure G-2). Ces coordonnées sont disponibles immédiatement pour remonter aux coordonnées réelles des nœuds, qui elles sont en trois dimensions. Il faut cependant surveiller l'orientation des différents repères car les images au format jpg sont lues de **gauche à droite et de haut en bas**, ce qui peut prêter à confusion.

```

Editor - C:\Program Files\MATLAB71\work\gui\coornodes
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
plain text file Ln 1 Col 1 OVR
1 5.750000e+002 9.260000e+002
2 6.520000e+002 9.390000e+002
3 7.180000e+002 9.440000e+002
4 7.850000e+002 9.520000e+002
5 8.540000e+002 9.570000e+002
6 9.260000e+002 9.600000e+002
7 9.970000e+002 9.650000e+002
8 1.067000e+003 9.660000e+002
9 5.780000e+002 8.600000e+002
10 6.550000e+002 8.620000e+002
11 7.240000e+002 8.730000e+002
12 7.890000e+002 8.780000e+002
13 8.600000e+002 8.870000e+002
14
X          Y

```

Figure G-2 : Enregistrement des coordonnées 2D.

Annexe H : Méthode semi automatisé de mesure des coordonnées 2D.

Cette seconde méthode présente un avantage certain par rapport à la première : si le traitement graphique se déroule correctement, l'opérateur n'a jamais besoin de pointer des nœuds à la souris. En pratique, il faut souvent effectuer quelques corrections **à la main** pour obtenir un résultat satisfaisant. Toutefois, si l'image est de bonne qualité, on obtient rapidement les coordonnées des nœuds du quadrillage même si le quadrillage est très dense. Cela représente un gain de temps considérable.

Présentation de la méthode de traitement d'image

La seule information utile pour le calcul des angles de déformation est la donnée du déplacement des intersections du quadrillage. On utilise les outils graphiques du logiciel *Adobe Photoshop Cs* afin de ne conserver que les pixels autour des intersections. En sortie de traitement, ces pixels sont noirs tandis que le reste de l'image est blanc (Figure H-1).

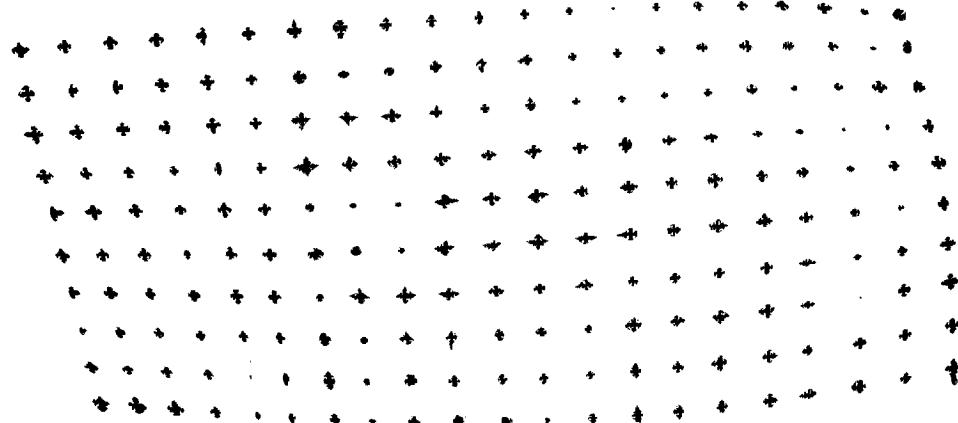


Figure H-1 : Image après le traitement graphique.

Le traitement graphique étape par étape

On commence par basculer en mode de niveaux de gris et on enregistre l'image au format bmp. Ensuite il faut fermer le document et l'ouvrir à nouveau car sinon l'étape suivant ne fonctionne pas. Le résultat de ces deux étapes est présenté sur la Figure H-2.

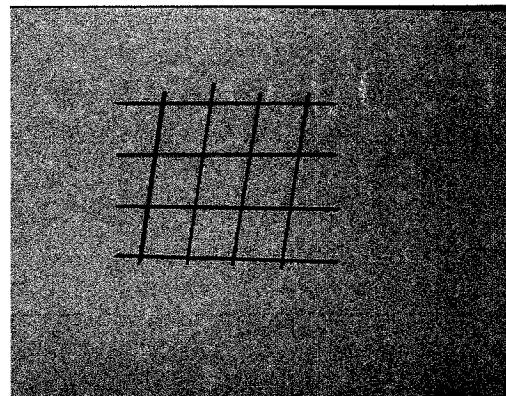


Figure H-2 : Passage en niveaux de gris.

Afin d'éviter tout problème de traitement d'image au niveau des bords, on décide de laisser une bande de blanc sur les 4 côtés. Cette bande n'est absolument pas gênante, puisque aucune intersection du quadrillage ne se trouve sur le bord. Ensuite, à l'aide de l'outil baguette magique, on sélectionne le quadrillage, tel qu'illustré sur la Figure H-3.

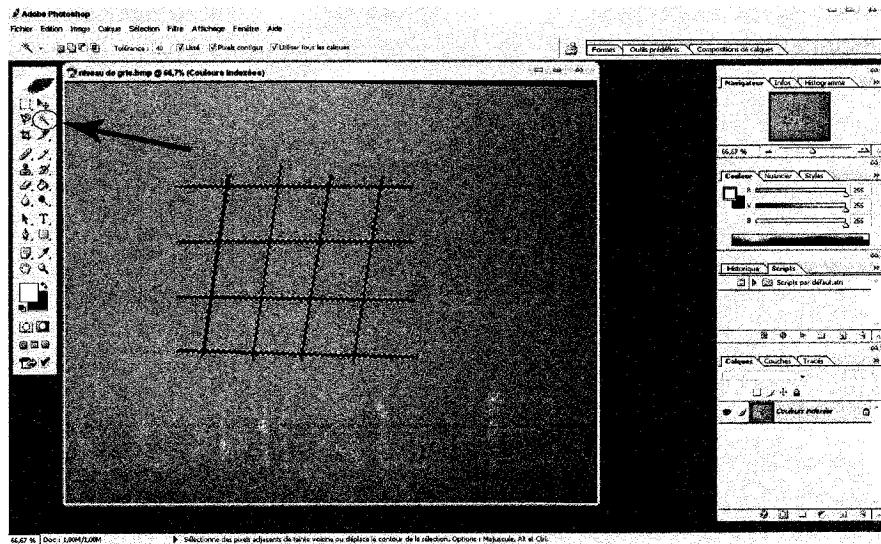


Figure H-3 : Outil *baguette magique*.

Si la sélection est trop ou pas assez large, il est possible de modifier la tolérance de cet outil jusqu'à ce que le quadrillage soit correctement sélectionné. Ensuite, on utilise le menu *Sélection, Contour progressif* (Figure H-4) et on ajuste le rayon afin de sélectionner seulement les intersections (Figure H-5).

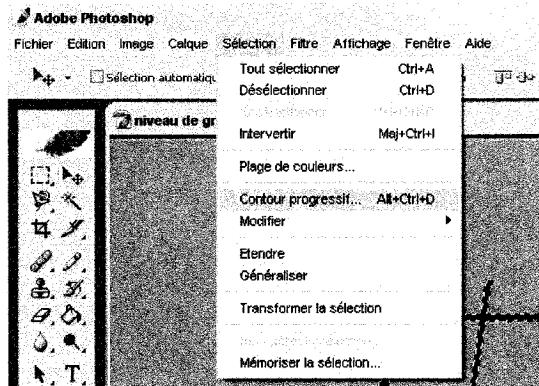


Figure H-4 : Accès à la fonction *Contour progressif*.

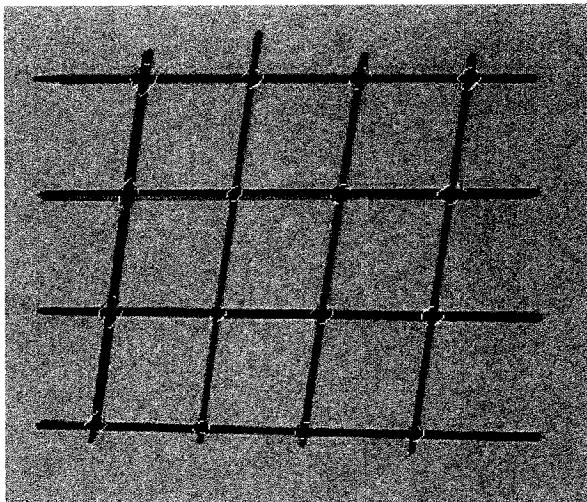


Figure H-5 : Sélection des intersections.

La dernière étape sous *Photoshop* consiste à convertir l'image en noir et blanc (noir pour les intersections et blanc pour tout le reste). A cette fin on utilise alternativement les fonctions Intervertir (Ctrl + Maj + i) et Supprimer / pot de peinture noire afin d'obtenir une image du type de la Figure H-6 (le cadre noir n'existe pas en réalité, il est juste là pour permettre la visualisation les bords de l'image).

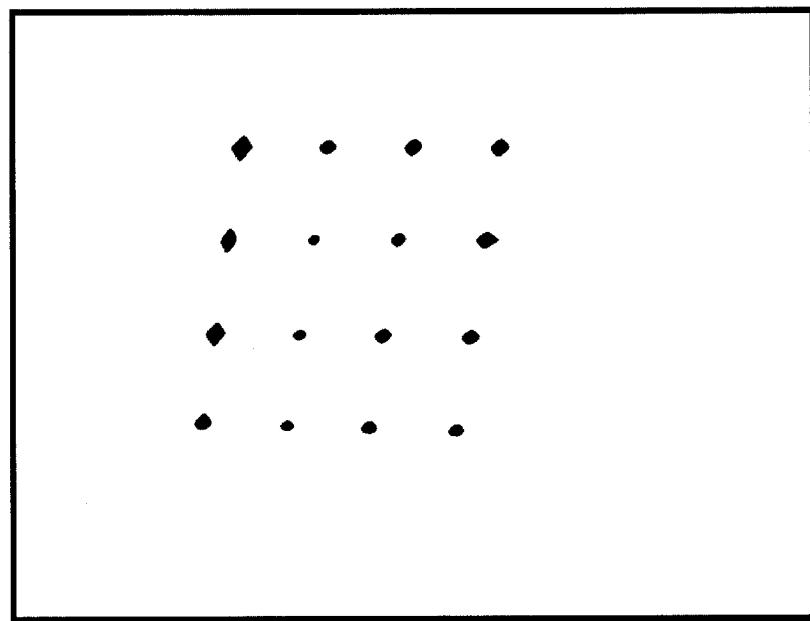


Figure H-6: Conversion en image noir et blanc.

Ensuite, il ne reste plus qu'à convertir l'image en bitmap : *Image, Mode, Bitmap* et à enregistrer en bmp (Figure H-7)

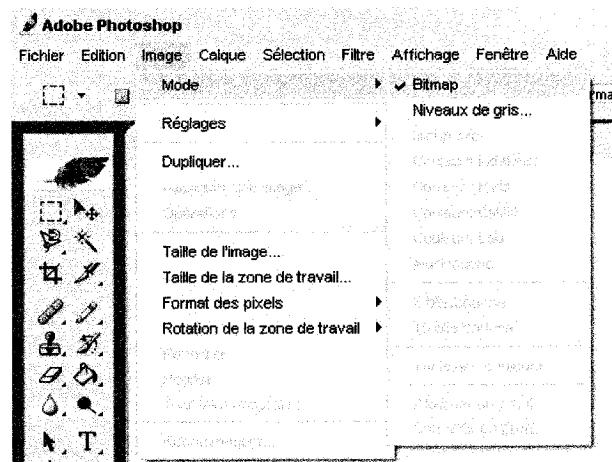


Figure H-7 : Conversion en mode bitmap.

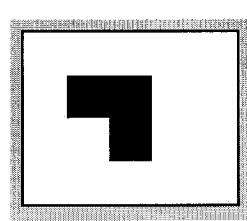
Calcul des coordonnées 2D des intersections

A la fin de l'étape précédente, une image noir et blanc est obtenue. Elle contient les positions des intersections sur la photo. L'étape suivante est l'utilisation du logiciel Matlab afin de générer un tableau contenant les coordonnées 2D (X et Y) des points d'intersection du quadrillage.

Importation de l'image

La fonction *imread* génère, à partir de l'image intersection.bmp, un tableau de n lignes sur p colonnes où chaque case correspond à un pixel de l'image. Ainsi dans le tableau, on trouve le chiffre 1 lorsque le pixel est noir et le chiffre 0 lorsque le pixel est blanc.

Tableau H-1 : Exemple de décodage des bitmaps sous *Matlab*



0	0	0	0	0
0	1	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	0

La syntaxe de la commande est la suivante :

```
table = imread ( 'intersection.bmp' )
```

Principe de l'algorithme

Le tableau fourni par *imread* contient **des paquets de 1** (les taches noires) au milieu d'une **matrice de 0** (le blanc). L'objectif sera donc d'obtenir pour chaque tache noire les coordonnées X et Y de son point moyen, qui constitueront finalement les coordonnées des intersections du quadrillages. Cette détermination se fera en 3 étapes (fonction *Matlab coor*) :

- On commence par générer un tableau à 2 lignes et x colonnes contenant les positions des pixels noirs, afin de réduire le domaine à balayer lors des différentes boucles de l'algorithme : au lieu de parcourir à chaque fois la table générale contenant tous les pixels, on se limitera à ceux qui sont noirs, ce qui permettra d'économiser du temps.
- Le tableau généré en étape 1 est agrandi d'une 3^{ème} ligne afin d'indiquer à quel paquet appartient chaque pixel noir. A cette fin, on parcourt le tableau à 3 lignes par ordre croissant des colonnes et à chaque nouvelle colonne, on regarde s'il existe un pixel des colonnes antérieures qui soit **proche** du nouveau pixel. Comme on connaît la distance théorique séparant deux intersections voisines, on peut fixer une règle de distance pour savoir si deux pixels appartiennent au même paquet ou pas.
- La dernière ligne contient désormais le numéro de paquet auquel appartient chaque pixel. Il suffit alors de parcourir k fois le tableau, où k est le nombre de paquets, et de faire la moyenne en X et Y sur les pixels appartenant à chaque paquet. En sortie, nous obtenons un tableau à 2 colonnes et k lignes contenant les coordonnées des k intersections.

Remarque : Les coordonnées sont orientées comme les numéros des lignes et colonnes dans les matrices, les abscisses augmentent en allant vers la droite et les ordonnées augmentent en descendant. Une solution consiste à inverser la coordonnée Y afin de retrouver les coordonnées classiques (repère direct).

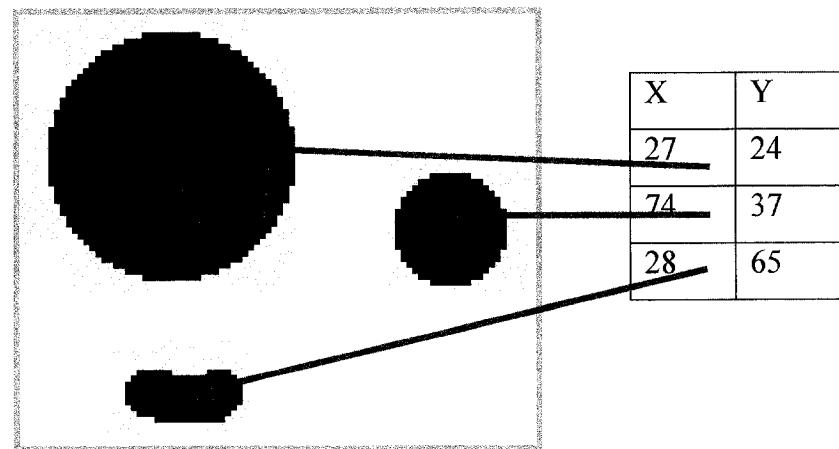


Figure H-8 : Calcul des coordonnées des points moyens.

Le code est fourni en annexe E. Il y a un seul paramètre à donner en entrée : il s'agit de l'écartement entre 2 intersections voisines, c'est ce paramètre qui permet de fixer la règle de distance qui sert à attribuer un numéro de paquet à chaque pixel noir. On le donne en nombre de pixels car c'est facile à voir avec *Photoshop* lors de la première étape.

Annexe I : Erreur de mesure.

Quadrillage plan

Afin de connaître l'erreur commise lors de la mesure des angles, on a utilisé des feuilles de papier étalon simulant des quadrillages réguliers dont les angles sont connus. On a donc tracé à l'imprimante deux quadrillages de points : l'un supposé à 10° et l'autre à 20° (voir Figure C1). On a ensuite mesuré l'angle réel de ces quadrillages à l'aide d'une règle graduée et du théorème d'Al-Kashi donnant l'angle d'un des sommets d'un triangle en fonction de la longueur de ses cotés.

$$\cos \theta = \frac{AB^2 + AC^2 - BC^2}{2 \cdot AB \cdot AC}$$

Ne connaissant pas le degré de précision de l'imprimante (les résolutions sont-elles identiques dans les deux directions ?), une mesure manuelle de chaque quadrillage fut effectuée afin de connaître l'angle réel de chacun. Ensuite, une photo fut prise à la verticale de chaque feuille posée sur une table horizontale (niveau à bulle pour l'horizontalité de la table et pour la verticalité de la prise de vue).

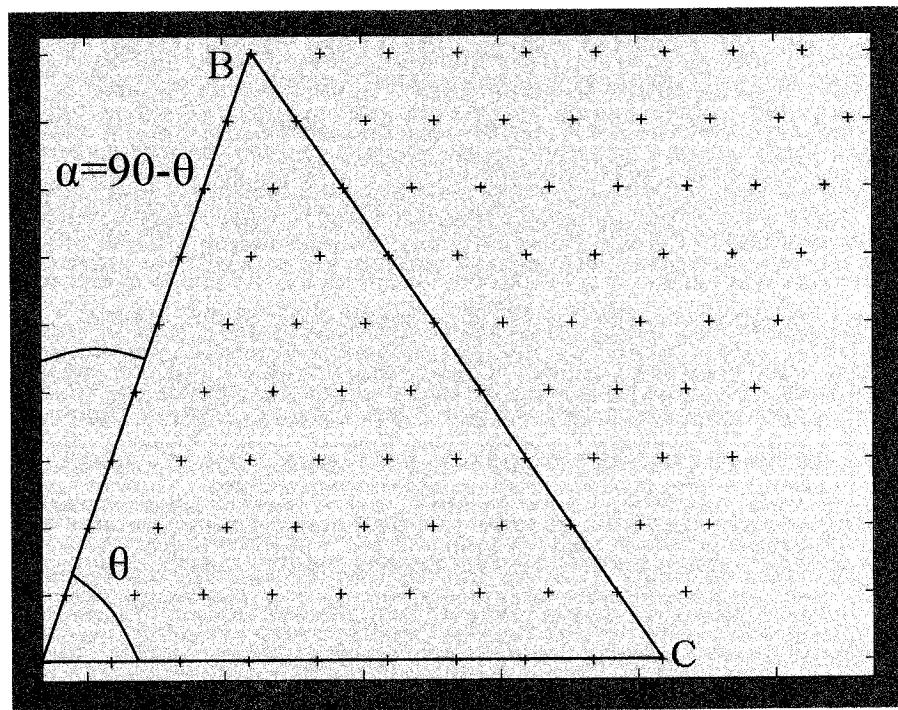


Figure I-1 : Quadrillage étalonné à 20° .

La distribution d'angles a été calculée et les résultats ont été rassemblés dans le Tableau I-1.

Tableau I-1 : Etalonnage de la mesure des angles

Angle théorique	10°	20°
Mesure AB	15,4 cm	14,55 cm
Mesure AC	15,65 cm	15,4 cm
Mesure BC	20,05 cm	17,45 cm
Mesure alpha	9,56°	18,79°
Calcul alpha moyen	9,58°	18,71°
Ecart type	0,64°	0,59°
Angle maximum	10,75°	19,62°
Angle Minimum	8,57°	17,53°

La première constatation réside dans la différence entre les angles théoriques (ceux que l'on a essayé de tracer) et les angles réels (mesurés grâce au théorème d'Al-Kashi). Ceci n'est rien de plus qu'un détail technique, le résultat majeur étant évidemment le très faible écart entre l'angle mesuré et l'angle moyen calculé (moins d'un dixième de degré dans les deux cas). Cela signifie que la méthode est sans biais, en moyenne les angles calculés sont les bons. En ce qui concerne l'écart type, la résolution de l'image (2048 x 1536 pixels) limite la précision de mesure. En effet, la mesure ne pourra être meilleure qu'un encadrement à plus ou moins 1°. L'utilisation d'un appareil haute définition (approchant la dizaine de millions de pixels) permettrait très certainement de gagner en précision. Il faut également garder à l'esprit ce que représente 1° à l'échelle de longueur considérée. La distance R entre deux intersections voisines du quadrillage vaut 10 mm, si bien qu'une erreur dL de 0,175 mm sur la position d'une des intersections génère déjà une erreur $d\theta$ de 1° sur la mesure de l'angle. Si on considère l'erreur possible sur la position de chaque intersection, on réalise qu'un écart type de 1° est déjà très satisfaisant. L'explication graphique est donnée sur la Figure I-2.

En radians, $dL = R d\theta$ et $L = R \theta$

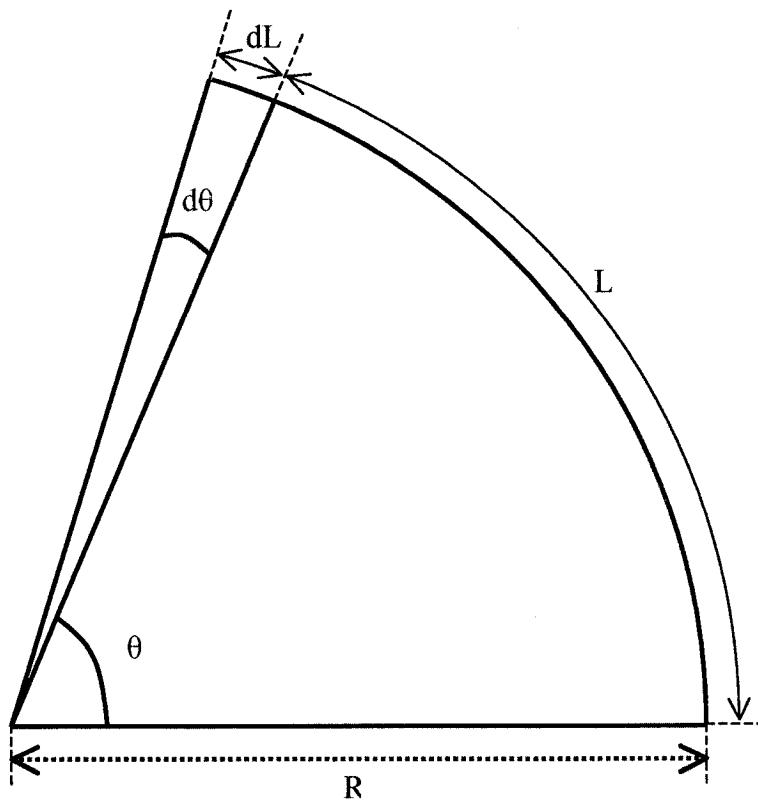


Figure I-2 : Relation entre erreur angulaire et erreur de position.

Prise en compte de la perspective

Afin de valider la technique de projection des points de calage et des intersections du quadrillage, une planche en bois (sur laquelle des points de calage ont été positionnés au préalable) fut inclinée d'un angle de 29,5° (voir Figure I-3)

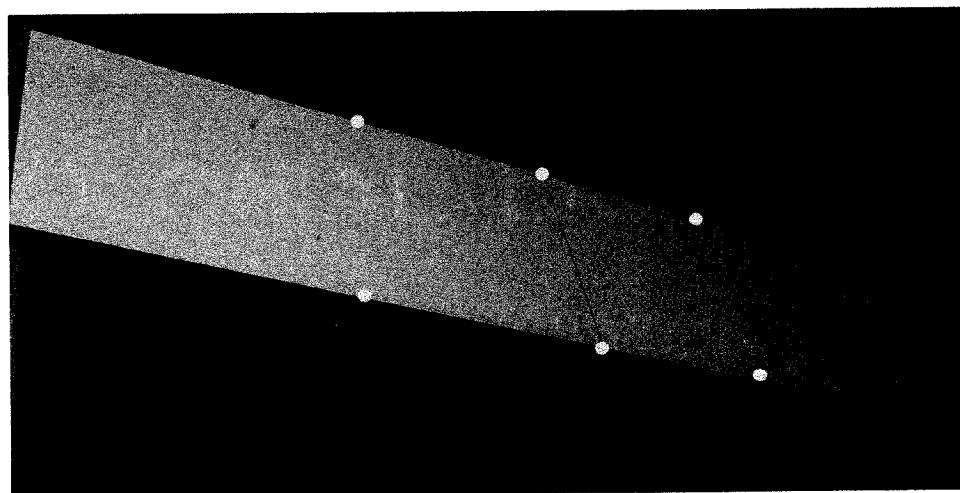


Figure I-3 : Montage de validation de la projection virtuelle

Cette planche a été modélisée sous *Patran* afin de pouvoir effectuer la projection virtuelle des points de calage. Une photo a été prise à la verticale du point central de la planche (milieu du segment tracé au feutre) et la procédure de centrage par moindres carrés a été réalisée. On a ensuite calculé la distance entre points projetés virtuellement et points photographiés. La moyenne des erreurs est de **2 pixels** (voir figure C4). Cette erreur très faible (la taille de l'image est de 2048 x 1536 pixels) permet de valider la méthodologie des rayons virtuels.

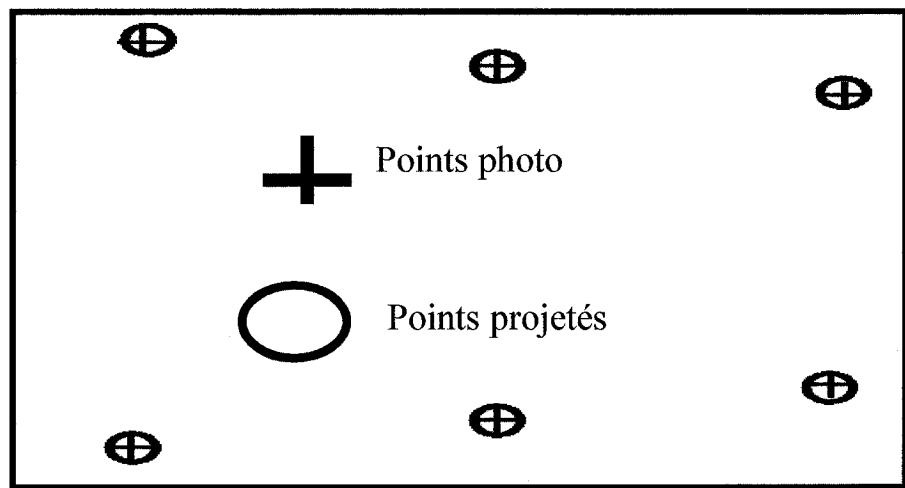


Figure I-4 : Comparaison entre projection virtuelle et photographie.

Annexe J : Spécifications techniques de la caméra numérique.

Type: **NIKON COOLPIX Digital Camera E885.**

CCD: 1/1.8 inch Interline CCD; 3.2 Effective Megapixels; Image Size: Full (2048 x 1536 pixels), XGA (1024 x 768 pixels), VGA (640 x 480 pixels); Four Small Picture sizes selectable (640 x 480, 320 x 240, 160 x120, and 96 x 72 pixels).

Lens: 3x Zoom-Nikkor; f = 8-24mm (35mm camera format equivalent to 38-114mm); f/2.8-4.9; 9 elements in 8 groups.

Digital Zoom: 4x digital zoom in 20 steps of 0.2x each.

Autofocus (AF): Contrast-detect through-the-lens (TTL) AF.

Focus Modes: Continuous AF (monitor on), Single AF, Manual (49 positions, with focus confirmation indication).

Focus Range: 1 ft - infinity at widest angle (W), 2 ft - infinity at telephoto (T); Macro Mode (Autofocus): 1.6 inches - infinity (W), 1 ft. - infinity (T).

Monitor: 1.5 inch, 110, 000-dot, low-temperature polysilicon TFT LCD with brightness and hue adjustment.

Storage System: File Formats include HI (uncompressed TIFF-RGB), 3 JPEG options (Compressed, Baseline-compliant; FINE = approx. 1:4 compression, NORMAL = approx. 1:8 compression, BASIC = approx. 1:16 compression), and MOV (QuickTime compliant, 15 fps). Compliant with Design rule for Camera File systems. Digital Print-Order Format (DPOF) and PRINT Image Matching (PIM) compatible.

Storage Media: CompactFlash(TM) (CF) Card Type I.

Approximate capacity: Number of images per 16MB: Full: Hi (1), Fine (10), Normal (20), Basic (39); XGA: Fine (39), Normal (76), Basic (144); VGA: Fine (97), Normal (177), Basic (324).

Shooting Modes: Auto, Scene (Portrait, Party/Indoor, Night Portrait, Beach/Snow, Landscape, Sunset, Night Landscape, Museum, Fireworks Show, Close Up, Copy, and Back Light), CustomSetting Menu (CSM) (includes menu control of White Balance, Metering, Continuous/Single Shooting, Best-Shot Selector, Image Adjustment, Image Sharpening, Lens, Image Size & Quality, Sensitivity, Exposure

Options, Focus Options, Auto Bracketing, Noise Reduction and CF Card Format), and Movie (up to 40 sec of QVGA frames at 15 fps).

Capture Modes: Single, Continuous, Multi-Shot 16 (16 pictures in one 2048 x 1536 frame), VGA Sequence, Ultra High Speed (70 QVGA images at approx 30 fps).

Exposure metering modes: 256-segment Matrix, Center-Weighted, Spot, Spot AF Area.

Exposure Modes: Programmed Auto, Manual, 12 Scene Modes.

Exposure Compensation: (+/-) 2.0 EV in steps of 1/3 EV, Auto Exposure Bracketing.

Exposure Range (ISO 100 equivalent): EV -3 to +15 (W), EV +1.4 to +16.6 (T).

Shutter: Mechanical and charge-coupled electronic shutter. Speed: 8-1/1,000 sec, Bulb up to 60 sec in Manual exposure mode.

Aperture: Electronically controlled preset aperture. Range: Two steps (f/2.8 and f/7.6[W]).

Sensitivity: ISO equivalent 100, 200, 400, Auto; can be set in CSM mode.

White Balance: Auto with TTL control, 5-mode manual with fine tuning, pre-set white balance, White Balance Bracketing.

Self-timer: 10-sec or 3-sec duration.

Built-in Speedlight range: 1.3 to 12.1 ft (W), 1.3 to 7.5 ft (T).

Flash Modes: Auto, Flash Cancel (off), Red-Eye Reduction, Anytime Flash (fill-flash), Slow Sync.

Computer Interface: USB 1.1.

Video output: Selectable, NTSC or PAL.

Power requirements: Rechargeable Li-ion Battery (EN-EL1) (included) or 6V 2CR5/DL245 lithium battery optional or AC Adapter/Battery Charger (EH-21).

Battery Life: 100 mins (2CR5/DL245) when using monitor at 68°F/20°C.

Battery Life: 100 mins (2CR5/DL245) when using monitor at 68°F/20°C.

Dimensions (W x H x D): Approx 3.7 x 2.7 x 2.0 in.

Weight: Approx 7.9 oz without battery or CompactFlash(TM) card.

System Requirements (NikonView 5): Windows:Windows?98 Second Edition (SE), Windows?Me or Windows?2000; Memory (RAM) 32MB (64MB or more recommended) Pentium?II, Celeron or later; Macintosh: Mac(R)OS 9.0-9.2.2, Mac(R)OS 10.1.2 or later (only built-in USB ports are supported) iMac(TM), iBook(TM), Power Macintosh?G3 Blue and White or PowerMac(TM) G4 or later; Powerbook?G3 (with USB built-in) or later; Memory (RAM) 32MB (64MB or more recommended).

Bundled Software: Arcsoft: PhotoImpression(TM), VideoImpression(TM), and PanoramaMaker(TM).

Annexe K : Utilisation des codes Matlab.

- 1) Prendre une photo du tissu drapé et relever la distance entre le plan contenant les points de calage et l'objectif de la caméra
- 2) Retoucher l'image (*Photoshop*) afin de faire coïncider les axes *X* et *Y* entre le repère 3D (*Patran*) et le repère 2D (*Matlab*). Effectuer une rotation de 180° de l'image. Placer l'image jpg obtenue dans le dossier **pointage**
- 3) Ouvrir *Matlab* et lancer le fichier **gui** (dans le dossier *Pointage*). Suivre les indications. Récupérer les fichiers **nodes** et **calage** et les remettre dans le dossier de travail (celui qui contient tous les autres fichiers).
- 4) Déposer le fichier contenant les coordonnées 3D des points de calage (à récupérer sous *Patran*). Le codage de ce fichier doit être de type ASCII et on doit le renommer **patran** (pas d'extension).
- 5) Lancer le fichier **projection** en lui donnant la distance entre le plan de calage et objectif en paramètre. Si les axes *Z* sont inversés, penser à donner la focale en valeur négative. Noter les coordonnées 3D du centre de la lentille
- 6) Lancer ensuite le fichier **moindre** et récupérer le fichier **newnodes** contenant les coordonnées 2D des nœuds après calage.
- 7) Déposer ce fichier dans le répertoire de travail de *Patran*. Donner les coordonnées du centre de la lentille à *Patran* et lancer la projection sur le moule 3D. Récupérer le fichier contenant les coordonnées 3D des intersections du quadrillage.

- 8) Renommer ce fichier en **coor3d** et lancer le fichier angle avec la distance entre 2 nœuds voisins (mesuré à la règle en millimètres directement sur le tissu) en paramètre.
- 9) Visualiser le cisaillement.

Annexe L : Codes *Matlab*.

Plusieurs fonctions *Matlab* sont utilisées lors de la méthode de mesure des angles. Pour chacune d'entre elles, il faut un ou plusieurs fichiers en entrée (placés dans le répertoire où ce se trouve la fonction) et parfois un paramètre. Un ou plusieurs fichiers sont générés en sortie. Certains fichiers sont présents en entrée et en sortie, souvent modifiés. Le code commenté des principales fonctions est présenté ci-dessous :

Fonction coor

```
function coor(ecart)
```

```
% cette fonction sert à calculer les centres de taches noires sur une image
% bmp à matrice blanche
% le fonctionnement du code est expliqué en annexe B
```

```
% ecart est la distance entre 2 taches voisines.
```

```
% lecture de l'image
```

```
[calagename,pname]=uigetfile('*.bmp','Choisir le bmp de calage');
[nodesname,pname]=uigetfile('*.bmp','Choisir le bmp des noeuds');
coorcalage = readimage(imread(calagename),ecart);
save -ASCII coorcalage coorcalage
```

```
xx=mean(coorcalage(:,1))
yy=mean(coorcalage(:,2))
```

```
coornodes = readimage(imread(nodesname),ecart);
```

```
save -ASCII coornodes coornodes
```

```
plot(coorcalage(:,1),coorcalage(:,2),'ro',coornodes(:,1),coornodes(:,2),'b+')
axis equal
```

```
function coorimage=readimage(image,ecart)
```

% Construction de la table des pixels noirs

```
[n,p] = size(image);
```

```
table =[];
```

```
for i=1:n
```

```
    for j=1:p
```

```
        if image(i,j)==1
```

```
            vect=[i,j]';
```

```
            table=[table,vect];
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

% Construction de la colonne contenant les n° de paquets

```
table(3,1)=1;
```

```
[a,b]=size(table);
```

```
compteur=1;
```

```
for i=2:b
```

```

x=table(1,i);
y=table(2,i);
for j=1:i-1
    dist=(x-table(1,j))^2+(y-table(2,j))^2;

% si deux points sont proches ils appartiennent à la même tache noire

```

```

if dist<ecart^2
    table(3,i)=table(3,j);
end
end
if table(3,i)==0
    compteur=compteur+1;
    table(3,i)=compteur;
end
end

```

% calcul des coordonnées des points moyens

```

coorimage=zeros(compteur,2);

for k=1:compteur
    vect=[];
    for i=1:b
        if table(3,i)==k
            vect=[vect,table(:,i)];
        end
    end
    coorimage(k,1)=mean(vect(2,:));

```

```
coorimage(k,2)=n-mean(vect(1,:));  
coorimage(k,3)=0;  
end  
  
% Sortie  
coorimage;
```

Fonction projection

function projection(focal)

% ce fichier sert à déterminer les coordonnées 3D du centre de la photo
% les points de calage sont projetés à travers la lentille virtuelle
% afin de procéder ensuite au calage avec la fonction moindre
% cette fonction est utilisée au paragraphe 4.5.2 « Principe du calage »

load -ASCII patran

load -ASCII calage

% on centre la photo par barycentrage des 3 points de calage
% on calcule l'écart en X et en Y entre les points de calage et
% le centre de la photo (Xcentre=768, Ycentre=1024 ici)

for i=1:3

coordecale(i,1)=calage(i,1)-768;
 coordecale(i,2)=calage(i,2)-1024;

end

% on fixe le poids à 1 pour le point de calage n°1 et on cherche
% les poids n et p à affecter aux points de calage 2 et 3 afin que le point G
% centre de la photo soit le barycentre des points A muni du poids 1,
% du point B muni du poids n, et du point C muni du poids p

n=sym('n');
 p=sym('p');

**% on résout l'équation $1.\overrightarrow{GA} + n.\overrightarrow{GB} + p.\overrightarrow{GC} = \vec{0}$ (définition du barycentre de 3 points
% pondérés)**

```
eq1=coordecale(1,1)+n*coordecale(2,1)+p*coordecale(3,1);
eq2=coordecale(1,2)+n*coordecale(2,2)+p*coordecale(3,2);
```

```
g=solve(eq1,eq2,n,p);
```

```
nn=single(g.n);
pp=single(g.p);
```

```
somme=1+nn+pp;
```

% normalisation des poids (pour que la somme fasse 1)

```
m=1/somme;
n=nn/somme;
p=pp/somme;
```

```
coef=[m,n,p];
```

```
xc=calage(1,1)*m+calage(2,1)*n+calage(3,1)*p;
yc=calage(1,2)*m+calage(2,2)*n+calage(3,2)*p;
```

% calcul des coordonnées 3D du centre de la photo

% on sait que l'axe de visée (centre de la photo) est le barycentre de 3 points munis des % poids respectifs m, n et p, on peut donc calculer les coordonnées du centre de la

% lentille dans le repère *Patran* en appliquant la relation $\overrightarrow{OG} = m\overrightarrow{OA} + n\overrightarrow{OB} + p\overrightarrow{OC}$

```
x3D=patran(1,1)*m+patran(2,1)*n+patran(3,1)*p;
y3D=patran(1,2)*m+patran(2,2)*n+patran(3,2)*p;
z3D=patran(1,3)*m+patran(2,3)*n+patran(3,3)*p;
```

% visualisation du résultat

```
plot(patran(1:3,1),patran(1:3,2),'ro',x3D,y3D,'b+')
```

```
dist=zeros(3,3);
```

```
dist(1,1)=sqrt((calage(1,1)-calage(2,1))^2+(calage(1,2)-calage(2,2))^2);
dist(2,1)=sqrt((calage(2,1)-calage(3,1))^2+(calage(2,2)-calage(3,2))^2);
dist(3,1)=sqrt((calage(3,1)-calage(1,1))^2+(calage(3,2)-calage(1,2))^2);
```

```
dist(1,2)=sqrt((patran(1,1)-patran(2,1))^2+(patran(1,2)-patran(2,2))^2);
dist(2,2)=sqrt((patran(2,1)-patran(3,1))^2+(patran(2,2)-patran(3,2))^2);
dist(3,2)=sqrt((patran(3,1)-patran(1,1))^2+(patran(3,2)-patran(1,2))^2);
```

```
for i=1:3
```

```
    dist(i,3)=dist(i,1)/dist(i,2);
```

```
end
```

% calcul du facteur d'échelle *ratio*

% c'est ce facteur qui permet de calculer l'élévation du plan focal virtuel afin

% de faire coïncider l'échelle de la photo et celle du plan focal virtuel
% cette coïncidence d'échelle est indispensable à l'étape suivante de calage
% par moindres carrés. En effet, si les échelles diffèrent il sera impossible de caler
% les coordonnées « photo » sur les coordonnées « projetées ».
% De plus, si l'élévation du plan focal virtuel est incorrecte, la projection sur la
% maquette numérique 3D ne pourra s'effectuer correctement dans *Patran*
% par la suite

```

ratio = mean(dist(:,3));
ecart = std(dist(:,3));
dist(:,3);

```

% chargement des vecteurs de coordonnées des noeuds

```

vectx = patran(:,1);
vecty = patran(:,2);
vectz = patran(:,3);

```

```

mx=x3D;
my=y3D;
mz=z3D+focal;

```

% affichage des coordonnées du centre de la photo

```

centre_lentille(1,:)={'Xcentre','Ycentre','Zcentre'};;
centre_lentille(2,:){mx,my,mz};
centre_lentille

```

```
altitude=mz+ratio*focal;
```

% projection des points de calage sur le plan focal virtuel

for i=1:3

 vectlocal=[mx-vectx(i),my-vecty(i),mz-vectz(i)];

 t=sym('t');

 originelocal=[vectx(i),vecty(i),vectz(i)];

 eq=vectz(i)+t*(mz-vectz(i))-altitude;

 tloc=single(solve(eq,t));

 destilocal=originelocal+tloc*vectlocal;

 coorgen(i,:)=destilocal;

end

plot(coorgen(:,1),coorgen(:,2),'bo',mx,my,'r+')

axis equal

save altitude altitude

save coorgen coorgen

Fonction moindre

function moindre()

**% la fonction moindre sert à effectuer le calage par moindres carrés entre
% les coordonnées "photo" et les coordonnées "projétés"
% cette fonction est relative au paragraphe « La méthode des moindres carrés »**
4.5.2.3

load coorgen
load -ASCII calage
load -ASCII nodes
load altitude

**% on charge les coordonnées de la photo et ceux générés par la fonction projection
% le fichier coorgen contient les coordonnées projetées**

for i = 1:3

X(i)=calage(i,1);
Y(i)=calage(i,2);

XL(i)=X(i);
YL(i)=Y(i);

x(i)=coorgen(i,1);
y(i)=coorgen(i,2);
end

% on minimise la somme des carrés des distance entre les points "photo" (grand X et

% grand Y) et les points "imaginaires" (petit x et petit y)

% pour cela on résout un système de manière linéarisé d'abord afin

% d'obtenir une solution approchée. Ensuite on résout le système complet,

% ce qui génère des solutions exactes. Pour sélectionner la bonne solution,

% on prend la solution réelle la plus proche de la solution linéarisée.

t = sym('t');

Cxl=mean(x-XL+t*YL);

Cyl=mean(y-YL-t*XL);

eq=(x-XL+t*YL-Cxl)*YL'-(y-t*XL+YL-Cyl)*XL';

thetal=single(solve(eq,t));

Cx=mean(x-cos(t)*X+sin(t)*Y);

Cy=mean(y-cos(t)*Y-sin(t)*X);

eq2=0;

for i=1:size(X)

 eq2=eq2+(x(i)-cos(t)*X(i)+sin(t)*Y(i)-Cx)*(sin(t)*X(i)+cos(t)*Y(i));

 eq2=eq2+(y(i)-cos(t)*Y(i)-sin(t)*X(i)-Cy)*(sin(t)*Y(i)-cos(t)*X(i));

end

theta=real(single(solve(eq2,t)));

```

for i=1:size(theta)
    theta(i,2)=abs(theta(i,1)-thetal);
end

theta=sortrows(theta,2);
a=theta(1,1);
deplx=mean(x-cos(a)*X+sin(a)*Y);
deply=mean(y-cos(a)*Y-sin(a)*X);

% une fois l'angle de rotation et le vecteur de translation trouvés, il ne
% reste plus qu'à calculer les nouvelles coordonnées des points photos.
% on évalue le résidu du calage par moindre carré avec le vecteur 'carre'
% dont on prend la somme des éléments.

for i=1:3
    coorpositionne(i,1)=cos(a)*calage(i,1)-sin(a)*calage(i,2)+deplx;
    coorpositionne(i,2)=cos(a)*calage(i,2)+sin(a)*calage(i,1)+deply;
    carre(i)=(coorpositionne(i,1)-x(i))^2+(coorpositionne(i,2)-y(i))^2;
end

% visualisation de la solution

sol(1,:)={'angle rotation','deplacement x','deplacement y','distance moyenne'};
sol(2,:)= {a*180/pi,deplx,deply,sum(carre)^0.5/3;};
sol

[n,p]=size(nodes);

% calcul des nouvelles coordonnées

```

```
newnodes=nodes;

for i=1:n
    newnodes(i,1)=cos(a)*nodes(i,1)-sin(a)*nodes(i,2)+deplx;
    newnodes(i,2)=cos(a)*nodes(i,2)+sin(a)*nodes(i,1)+deply;
    newnodes(i,3)=altitude;
end
newnodes;

plot(coorpositionne(:,1),coorpositionne(:,2),'r+',coorgen(:,1),coorgen(:,2),'bo',newnodes(:,1),newnodes(:,2),'g+')

% on enregistre les nouvelles coordonnées dans le fichier newnodes

save -ASCII newnodes newnodes
```

Fonction angle

```
function angle(d)
```

```
% cette fonction sert à calculer les angles à partir des
% coordonnées 3D des intersections du quadrillage
% les résultats sont visualisés de manière graphique
% le paramètre d donne la distance entre 2 lignes
% voisines du quadrillage (en mm)
% chargement des vecteurs de coordonnées des nœuds
% cette fonction est à relier au paragraphe 4.6 « Calcul des angles de déformation ».
```

```
load -ASCII coor3d
```

```
coordonnees = coor3d;
```

```
vectx = coordonnees(:,1);
vecty = coordonnees(:,2);
vectz = coordonnees(:,3);
```

```
[n,p]=size(vectx);
```

```
densite=1;
```

```
r=4;
```

```
% fabrication du tableau [X Y Z alpha]
```

```

mat = [vectx,vecty,vectz];

for i=1:n
    pourcentage_accompli=single(i/n*100);
    mat(i,4) = calcmoyenne(i,mat,n,d,r);
end.

maxx=max(mat(:,1));
maxy=max(mat(:,2));

minx=min(mat(:,1));
miny=min(mat(:,2));

mat;

for i=1:n
    coor3d(i,4)=mat(i,4);
end

save -ASCII coor3d coor3d

tx = minx:densite:maxx;
ty = miny:densite:maxy;

[XI,YI] = meshgrid(tx,ty);
ZI = griddata(mat(:,1),mat(:,2),mat(:,3),XI,YI);
AI = griddata(mat(:,1),mat(:,2),mat(:,4),XI,YI);

```

**% représentation de l'angle sur la géométrie déformée à l'aide d'un code de
% couleur généré par matlab**

mesh(XI,YI,ZI,Al)

axis equal

shading interp

colorbar

**% la fonction calcmoyenne effectue la moyenne des 4 angles autour d'un
% point, afin de déterminer l'angle alpha représentatif de l'état de
% cisaillement au niveau du noeud considéré**

function alphamoyenne=calcmoyenne(a,mat,n,d,r)

xa = mat(a,1) ; ya = mat(a,2) ; za = mat(a,3);

matlocal= [];

**% la boucle qui suit sert à déterminer quels sont les voisins du noeud
% considéré. On le fait de manière géométrique grâce à la distance entre les
% voisins (qui est connue d'avance puisque l'on suppose que les fibres sont
% inextensibles**

for k = 1:n

 xk = mat(k,1) ; yk = mat(k,2) ; zk = mat(k,3);

 dx=(xa-xk)^2 ; dy=(ya-yk)^2 ; dz=(za-zk)^2;

 dak = sqrt(dx+dy+dz);

 if (dak<d*1.3) & (dak>0)

```

matk = mat(k,:);
matk(4,1)=abs(d-dak);
matlocal =[matlocal,matk];
end
end

matlocal = matlocal';

[nvoisin,ncolonne]=size(matlocal);
nvoisin;

if (nvoisin>4) % on ne garde que les 4 vrais voisins
    matdist=sortrows(matlocal,4);
    matlocal=matdist(1:4,:);
    nvoisin=4;
end

matlocal=matlocal(:,:,1);

if (nvoisin==4) % si le noeud est au bord (nvoisin<4) on ne fait pas le calcul
    trot=1;
    nn=0;
    for i=1:4
        for j=1:i
            point=(matlocal(i,:)+matlocal(j,:))/2;
            milieu(i,j,1:3)=point(1:3);
            xk = point(1) ; yk = point(2) ; zk = point(3);
        end
    end
end

```

```

dx=(xa-xk)^2 ; dy=(ya-yk)^2 ; dz=(za-zk)^2;
dist=sqrt(dx+dy+dz);
milieu(i,j,4)=dist;
if dist < d/r
    matpolaire(trot,:)=matlocal(i,:);
    matpolaire(trot+2,:)=matlocal(j,:);
    trot=trot+1;
    [nn,pp]=size(matpolaire);
end

end

if nn==4
    alphavect = zeros(1,4);
    alphavect(1)=calcangle(xa,ya,za,1,2,matpolaire);
    alphavect(2)=calcangle(xa,ya,za,2,3,matpolaire);
    alphavect(3)=calcangle(xa,ya,za,3,4,matpolaire);
    alphavect(4)=calcangle(xa,ya,za,4,1,matpolaire);

% on fait la moyenne et on retranche 90 afin d'avoir seulement la
% variation d'angle et non l'angle final
%alphamoyenne = mean(alphavect)-90;
alphamoyenne=mean(alphavect);

```

```

else
    alphamoyenne=0;
end

else
    alphamoyenne = 0;
end

alphamoyenne;

%la fonction calcangle est au centre du procédé, c'est elle qui assure la
%détermination de l'angle au sommet A du triangle ABC. On utilise le
%produit scalaire, que l'on exprime de deux manière afin de déterminer
%l'angle via son cosinus. Attention à la périodicité du cosinus

function alpha=calcangle(xa,ya,za,b,c,matpolaire)

xb = matpolaire(b,1) ; yb = matpolaire(b,2) ; zb = matpolaire(b,3);
xc = matpolaire(c,1) ; yc = matpolaire(c,2) ; zc = matpolaire(c,3);

ABcarre = (xa-xb)^2+(ya-yb)^2+(za-zb)^2;
ACcarre = (xa-xc)^2+(ya-yc)^2+(za-zc)^2;

Phi = (xb-xa)*(xc-xa)+(yb-ya)*(yc-ya)+(zb-za)*(zc-za);
Phicarre = Phi^2;

coscarrealpha = Phicarre/(ABcarre*ACcarre);

```

```
cosalpha = sqrt (coscarrealpha);
```

```
alpha = absacos(cosalpha)*180/pi-90);
```

Annexe M : Code de projection croisée *Patran Command Language*.

```

FUNCTION Z_coord( )

/* Cette fonction permet de faire une projection croisée (type appareil
photo)
* sur un plan focal, en passant par un point focal
* Le code est écrit en PCL (Patran command language) et doit être
compilé dans Patran
* Entrée: Fichier contenant les points que l'on desire projeter
*
* Sortie: coordonne.dat Contenant les coordonnées projeter des points
d'entrée
*
*/
STRING filename[100], outstr[720],filename2[80]
STRING coordonnees[80]
STRING record[720], field[128]
STRING fem_create_node_pro_created_ids[VIRTUAL]
STRING fem_create_nodes_nodes_created[VIRTUAL]
STRING fem_delete_node_deleted_ids[VIRTUAL]
STRING fem_delete_node_not_found_ids[VIRTUAL]
STRING sgm_transform_point_created_ids[VIRTUAL]
STRING sgm_create_vector_2_created_ids[VIRTUAL]
STRING ASM_CREATE_GRID_XYZ_CREATED_IDS[VIRTUAL]
STRING asm_delete_vector_deleted_ids[VIRTUAL]

INTEGER num_ints, channel, array_alloc_size
INTEGER ref_coords(1)
INTEGER analy_coords(1), nodis(1), refrecords(1), anacords(1), nodis2(1)
INTEGER status, itoken
INTEGER icoord, node_exist
INTEGER lrecl, increment = 100, i

REAL glob_xyz(1,3), dfocal
REAL hfocal, hlfocal, tmp

```

```

REAL numbers (VIRTUAL)
REAL glob_xyzs(1,3)

/* définition du point milieu de la surface (coordonnées x et y du point
focal)*/
asm_const_grid_xyz( "1", "[19.2522 -28.62 -100.0]",@
"Coord 0", asm_create_grid_xyz_created_ids )

filename = ui_read_string ("Entrer le nom du fichier pour lire les
coordonnées")

dfocal = -910.0 /*Entrer la distance à laquelle la photo a été prise*/

h1focal = -2252. /*Entrer le focal (distance entre le point et le plan
focal)*/

coordonnees = "< 0 0 //str_from_real(dfocal)//>"
/*creation du point 2 distant de la focal f du point 1 milieu de la
surface*/
asm_transform_grid_translate( "2", coordonnees, "Coord 0", 1,@
FALSE, FALSE, "Point 1", sgm_transform_point_created_ids )

fem_create_nodes_1( "Coord 0", "Coord 0", 3, "1",@
" point 2", fem_create_nodes_nodes_created )
nodis(1) = 1
db_get_nodes( 1, nodis, ref_coords, analy_coords, glob_xyz )
tmp = glob_xyz (1,3)
fem_delete_free_node( "node 1", fem_delete_node_deleted_ids,@
fem_delete_node_not_found_ids )

hfocal = h1focal + tmp

```

```
/*
 * Ouverture du fichier externe
 */
status = text_open( filename, "OR", 0, 0, channel )
IF( status != 0 ) THEN
write("Unable to open file to read coord "//filename)
RETURN status
END IF
/*
* initialisation des variables et des compteurs
*/
array_alloc_size = increment
sys_allocate_array( numbers, 1, array_alloc_size, @
1,4)
num_ints = 1
/*
* Boucle jusqu'a la fin du fichier pour lire les coordonnées x et y
d'entrée
*/
WHILE( text_read_string( channel, record, lrecl ) == 0 )
/*
* recherche de réel dans le fichier et de blanc
*/
itoken = 0
icoord = 0
REPEAT
itoken += 1
field = str_token( record, " ", itoken, TRUE)
IF( str_datatype( field ) == "INTEGER" ) THEN
numbers (num_ints,4) = str_to_integer( field)
END IF
IF( str_datatype( field ) == "REAL" ) THEN
icoord +=1
IF( num_ints > array_alloc_size ) THEN
array_alloc_size += increment
```

```

sys_reallocate_array( numbers, 1, array_alloc_size, @
1, 4)
END IF
IF( icoord == 1) THEN
numbers (num_ints, 1) = str_to_real( field )
END IF
IF (icoord == 2) THEN
numbers (num_ints, 2) = str_to_real( field )
num_ints += 1
END IF
END IF
UNTIL ( field == "" )
END WHILE

/*Boucle sur:
* Calcul de la coord Z (projection)
* On efface les nœuds restant du tour d'avant
*On crée un noeud a partir du point i de coord x, y lu
*On le projete
*On récupère ses coordonnées
*/
nodis (1) = 1
refcords (1) = 0
anacords (1) = 0
nodis2 (1) = 2

FOR (i=1 to num_ints - 1)

glob_xyzs (1,1) = numbers (i,1)
glob_xyzs (1,2) = numbers (i,2)
glob_xyzs (1,3) = hfocal

fem_delete_free_node( "node 1 2", fem_delete_node_deleted_ids, @

```

```

fem_delete_node_not_found_ids )

db_create_nodes ( 1, refrecords , anacords, glob_xyzs,1, nodis ,
node_exist )

/*creation du vecteur 1 de projection du noeud 1 a projeter*/

sgm_const_vector_2point_v1( "1", "Node 1" , "point 2",@
TRUE, sgm_create_vector_2_created_ids )

/*projection du noeuds 1 (creation du noeud 2) sur les surfaces 1 a 63
suivant le vecteur 1*/
fem_create_node_project_v1( "Coord 0", "Coord 0", 2, "2",@
"node 1", "Surface 2:63", 1, 2, "Vector 1", "Coord 0",
fem_create_node_pro_created_ids )

/* Recuperation des coordonnées */
db_get_nodes( 1, nodis2, ref_coords, analy_coords, glob_xyz )

numbers (i,1) = glob_xyz (1,1)
numbers (i,2) = glob_xyz (1,2)
numbers (i,3) = glob_xyz (1,3)

asm_delete_vector( "Vector 1", asm_delete_vector_deleted_ids )

END FOR

/*
* fermeture du fichier externe

```

```

*/
text_close( channel, " " )

/*
* Creation d'un nouveau fichier externe dans lequel les coordonnées
projétées seront écrites
*/
FOR (i= 1 to num_ints - 1)

file_build_fname("", "coordonne", "dat", "0", filename2)

text_open(filename2, "NOAW", 0, 0, channel)

/*
* écritures des coords projectées
*/
/* STR_FROM_INTEGER(numbers (i,4))// " " // */
outstr = STR_FROM_REAL(numbers (i,1))// " " // @
STR_FROM_REAL(numbers (i,2))// " " // STR_FROM_REAL(numbers(i,3))
text_write_string(channel, outstr)

/*
* fermeture du fichier
*/
text_close(channel, "")

END FOR

sys_free_array( numbers )
/*
* Dire à l'utilisateur que le programme est fini
*/
ui_write("Z coords record completed.")
END FUNCTION

```