

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE EXPÉRIMENTALE SUR DES RENFORTS TISSÉS D'UN
PROCÉDÉ D'INJECTION FLEXIBLE POUR LA FABRICATION
RAPIDE DES COMPOSITES

TARIK DAQOUNE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
DÉCEMBRE 2007



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-36906-7

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-36906-7

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.

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 protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

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

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

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

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

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ANALYSE EXPÉRIMENTALE SUR DES RENFORTS TISSÉS D'UN
PROCÉDÉ D'INJECTION FLEXIBLE POUR LA FABRICATION
RAPIDE DES COMPOSITES

présenté par : DAQOUNE Tarik

en vue de l'obtention de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. GAUVIN Raymond, Ph.D., président

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

M. RUIZ Eduardo Antonio Julian, Ph.D., codirecteur de recherche

M. TRÉPANIÉ Jean Yves, Ph.D., membre

DÉDICACE

À ceux qui me définissent

À ma famille, mes amis, mon amour et mes modèles

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mon directeur de maîtrise M. François Trochu pour m'avoir donné la chance de réaliser une maîtrise recherche au sein de la Chaire sur les Composites à Haute Performance (CCHP). Ce travail m'a permis de confirmer mon intérêt pour ce type de matériaux, qui reste à mes yeux un matériau d'avenir car de qualité et extrêmement adaptable.

Je tiens à remercier également mon co-directeur de recherche M. Eduardo Ruiz pour l'aide qu'il m'a apporté tout au long des deux années de ma maîtrise.

Je souhaite aussi remercier les différents stagiaires qui m'ont permis d'effectuer plus rapidement les phases expérimentales, qui sont essentielles à mon travail. Je remercie donc Alexandre Lupien, Louis Lamoureux et Morgan Antoine. Plus largement je remercie l'ensemble de l'équipe du CCHP, les techniciens, assistants de recherche et étudiants à la maîtrise et au doctorat pour leur appui technique et leur aide apportée à ma réflexion personnelle. Je me souviendrai tout particulièrement des longues discussions et des échanges enrichissants que j'ai pu avoir autour d'une simple table ou dans les laboratoires.

Mes remerciements vont également au Conseil de la Recherche en Sciences Naturelles et Génies (CRSNG) et à General Motors (GM) pour leur aide financière. Et pour finir je remercie M. Raymond Gauvin et M. Michel Prud'homme président et membre du jury pour avoir accepté d'y prendre part.

RÉSUMÉ

Depuis 2003 le CCHP (Chaire sur les Composites à Hautes Performances) travail sur le développement d'un procédé d'injection flexible. Le procédé consiste en l'injection d'un fluide dit de compaction dans la chambre supérieure du moule, pour obtenir une répartition de la résine et une imprégnation du renfort plus rapides. La résine est injectée dans la chambre inférieure du moule où est disposé le renfort. Ce travail de développement est réalisé en partie sur un moule de forme simple -rectangle de 125/375 mm - conçu pour réaliser des injections flexibles. La partie supérieure de ce moule est en acrylique donc transparente. Cette particularité permet de visualiser l'injection et d'extraire des informations supplémentaires comme la vitesse d'écoulement de la résine.

L'objectif du procédé d'injection flexible est de diminuer sensiblement le temps d'injection par rapport au procédé d'injection RTM (« Resin Transfer Moulding »). Ce procédé très répandu dans l'industrie des matériaux composites est une bonne référence pour estimer les cadences de production. Des travaux portant sur l'utilisation de mat à fibres aléatoires ont été réalisés au sein de la chaire de recherche. Toutefois, dans un cadre industriel mais aussi comme suite logique au développement du procédé d'injection flexible, il est important d'appliquer ce procédé aux renforts tissés. C'est dans cette orientation que s'inscrit ce mémoire. Les objectifs de cette étude sont donc d'augmenter les cadences de production par rapport au procédé RTM, mais surtout de comprendre et de maîtriser les phénomènes associés à l'utilisation de renforts tissés. Nous verrons qu'avec l'utilisation de renforts tissés, la qualité de l'imprégnation devient une question essentielle.

Après être revenu sur l'essentiel des travaux antérieurs, le chapitre 4 démontrera qu'un mode d'imprégnation radicalement différent se produit lors de l'utilisation de renforts tissés. L'écoulement de la résine se fait alors principalement au dessus du renfort. À travers 4 autres chapitres, plusieurs questions sont posées pour tenter d'améliorer

l'imprégnation des tissus. Les chapitres 5 et 6 montrent que l'épaisseur de la chambre de compaction et à la quantité de résine injectée ont une grande influence sur l'apparition de zones sèche. Une épaisseur de cadre optimale et un taux de fibres minimum semblent être nécessaire à la bonne qualité de l'imprégnation du composite. Le chapitre 7 traitant de la pression de vide de la chambre d'injection révèle sa grande importance. Il devient possible d'éliminer toutes zones sèches, mais il reste que dans certaines conditions des accumulations de résine apparaissent. Enfin, l'étude de la viscosité du fluide de compaction, réalisée au chapitre 8, apporte également son lot de résultats. Le duo viscosité et rigidité de la membrane semble une piste de recherche intéressante pour les travaux futurs.

ABSTRACT

Since 2003, the CCHP has been watching on a new flexible injection process. To spread the resin and to obtain a fast impregnation of the reinforcement, this new process consists on the injection of a compaction fluid in the upper cavity mould. In the bottom cavity, the reinforcement is placed and the resin is injected. All experimentations, described in this work, are done on a simple rectangular shape mould (125/375 mm) especially made for flexible injection. The upper part of the mould is in clear acrylic, witch lets us see the entire injection and by using this method information like the flow speed of resin can be extracted more accurately.

The objective of this new process is to be competitive with the RTM process (« Resin Transfer Moulding »). This process, widely used in composite manufacture, is a good reference to estimate the productivity of the flexible injection process. Works on mats reinforcement have already been done. Nevertheless, within the industrial framework, the logical follow-up is to determine the new process capacities on woven fabric. One objective of this memoire is to decrease the injection times, however the main objective is to understand and to master the process behaviours using woven reinforcement. The noted observations will show us that the quality of impregnation is crucial.

After to present mains results of past works, the chapter 4 will describe an impregnation radically different with woven fabric, this way resin will flow above the reinforcement. The remainder of the memoire focuses on ways to improve the impregnation of fabrics. Chapters 5 and 6 will attempt to prove that the upper cavity thickness and the injected resin quantity have a great impact on dry spots, and that an optimum cavity thickness and a minimum fiber volume fraction seem to be necessary to obtain good composites. Chapter 7 describes the importance of vacuum pressure of the injection cavity, which appears very important. Dry spots can be eliminating by increasing vacuum pressure. However, it does not change the kind of impregnation and resin accumulation can appear. Finally, a study on compaction fluid viscosity has been done in chapter 8, witch show us the great membrane influence.

TABLE DES MATIÈRES

Dédicace	IV
Remerciements	V
Résumé	VI
Abstract	VIII
Table des matières	IX
Liste des tableaux	XV
Liste des figures	XVIII
Liste des symboles	XXII
Introduction	1
Chapitre 1 : INTRODUCTION AU MATÉRIAUX COMPOSITES	5
1.1 Introduction	5
1.2 Renforts	6
1.2.1 Verre	7
1.2.2 Carbone	8
1.2.3 Aramide (kevlar 49)	8
1.2.4 Comparaison des propriétés mécaniques des principales fibres synthétiques	9
1.2.5 Préformage	10
1.3 Matrice	11
1.3.2 Thermoplastique	12
1.3.3 Thermodurcissable	13
1.3.3.1 Polyester	13
1.3.3.2 Époxy	15
1.3.3.3 Vinylester	15
1.3.3.4 Propriétés physiques	17
1.4 Procédés de mise en forme	17
1.4.2 Moulage manuel	19

1.4.3	Pultrusion	19
1.4.4	Moulage par compression	19
1.4.5	Enroulement filamentaire.....	19
1.4.6	Drapage en autoclave	20
1.5	Moulage de composite par injection (« Liquid Composite Molding »).....	20
Chapitre 2 : Revue de la littérature.....		24
2.1	Introduction.....	24
2.2	Pression dynamique, nombre de Reynolds et pertes de charge	24
2.3	Écoulement de Poiseuille	26
2.4	Perméabilité et loi de Darcy	27
2.5	Perméabilité équivalente	30
2.6	Compressibilité, loi de Terzhagi et relaxation	32
Chapitre 3 : Description du procédé d'injection flexible		37
3.1	Introduction.....	37
3.2	Procédé d'injection flexible	37
3.2.1	Objectif du procédé	37
3.2.2	Description du procédé	38
3.2.2.1	Description d'un moule d'injection flexible.....	38
3.2.2.2	Mise sous vide	40
3.2.2.3	Injection de la résine.....	41
3.2.2.4	Injection du fluide de compaction	41
3.2.2.5	Consolidation et polymérisation du composite	42
3.2.2.6	Démoulage de la pièce composite	43
3.2.3	Avantages et inconvénients du procédé d'injection flexible.....	43
3.3	Moule transparent	44
3.3.1	Description du moule transparent	45
3.3.2	Limites d'utilisation du moule	49

3.3.2.1	Taille.....	49
3.3.2.2	Pression	50
3.3.2.3	Température.....	50
3.3.3	Données observées.....	50
3.3.3.1	Observations visuelles.....	50
3.3.3.2	Pression du fluide de compaction.....	53
3.3.3.3	Épaisseur des pièces fabriquées.....	55
3.4	Conclusion	56
Chapitre 4 : Utilisation de renforts tissés.....		57
4.1	Introduction.....	57
4.2	Passage aux renforts tissés	57
4.2.1	Principales différences entre les deux types de renforts	57
4.2.2	Limite d'utilisation des mats à fibres aléatoires.....	59
4.3	Résultats obtenus sur les mats à fibres aléatoires.....	60
4.3.1	Principaux résultats obtenus par Allard	61
4.3.1.1	Amélioration du temps d'injection pour des mats à fibres de verre.....	61
4.3.1.2	Ralentissement du front de résine.....	62
4.3.1.3	Conditions optimales d'utilisation des mats à fibres aléatoires.....	63
4.4	Plan d'expérience 1 : application du procédé d'injection flexible aux tissus	65
4.4.1	Objectifs du plan d'expérience.....	65
4.4.2	Conditions expérimentales.....	65
4.4.2.1	Matériaux utilisés	65
4.4.2.2	Paramètres de mise en œuvre	67
4.4.3	Résultats et discussions.....	76
4.4.3.1	Information générale sur les pièces obtenues.....	76
4.4.3.2	Temps d'injection et d'imprégnation	77
4.4.3.3	Mode d'écoulement et zone sèche.....	79
4.4.3.4	Épaisseur des pièces	84

4.4.3.5	Conclusion du plan d'expérience	90
4.5	Objectifs des chapitres 5, 6, 7 et 8	91
4.5.1	Amélioration de l'imprégnation des renforts tissés	91
4.5.2	Comprendre l'influence des différents paramètres du procédé.....	91
4.5.2.1	Épaisseur de la chambre de compaction.....	91
4.5.2.2	Taux volumique de fibres.....	92
4.5.2.3	Vide de la chambre d'injection.....	93
4.5.2.4	Viscosité du fluide de compaction	93
4.6	Nouveaux cadres	93
	Chapitre 5 : Étude de l'épaisseur de la chambre de compaction	95
5.1	Introduction	95
5.2	Conditions expérimentales.....	96
5.2.1	Matériaux	96
5.2.2	Paramètres de mises en œuvre	98
5.3	Résultats et discussion	102
5.3.1	Informations générales sur les pièces obtenues	103
5.3.2	Observations visuelles et imprégnation : élimination de la zone sèche	105
5.3.3	Épaisseur optimale de la chambre de compaction	107
5.3.4	Analyse de l'épaisseur des pièces	114
5.3.5	Influence de l'épaisseur sur l'air contenue dans la pièce finale.....	119
5.4	Conclusion	121
	Chapitre 6 : Taux Volumique de fibres	122
6.1	Introduction	122
6.2	Quantité de résine et position du front de résine.....	123
6.3	Compressibilité et loi de Terzhagi	124
6.4	Conditions expérimentales.....	127
6.4.1	Matériaux	127

6.4.2	Paramètres de mise en œuvre.....	127
6.5	Résultats et discussion	130
6.5.1	Informations générales sur les pièces fabriquées	130
6.5.2	Observations visuelles : formation d'une zone sèche	132
6.5.3	Influence de la position du front de résine	134
6.5.4	Compression du renfort et imprégnation	135
6.5.5	Analyse l'épaisseur des pièces.....	136
6.5.6	Discussion : taux de fibres maximum	140
6.6	Conclusion	141
	Chapitre 7 : pression de vide dans la chambre d'injection	142
7.1	Introduction.....	142
7.2	Conditions expérimentales.....	143
7.2.1	Matériaux	143
7.2.2	Conditions d'opération.....	143
7.3	Résultats et discussion	145
7.3.1	Information générale sur les pièces obtenues.....	145
7.3.2	Amélioration de l'imprégnation : élimination de la zone sèche	146
7.3.3	Influence combinée de la pression de vide et de l'épaisseur de la chambre de compaction sur le déroulement de l'injection	150
7.3.4	Analyse de l'épaisseur des pièces	156
7.3.5	Influence de la pression de vide dans la chambre d'injection sur le temps d'injection	158
7.4	Conclusion	160
	Chapitre 8 : Viscosité du fluide de compaction	161
8.1	Introduction.....	161
8.2	Conditions expérimentales.....	163

8.2.1	Matériaux	163
8.2.2	Conditions d'opération.....	166
8.3	Résultats et discussion	168
8.3.1	Données générales sur les pièces	168
8.3.2	Analyse du temps d'injection.....	169
8.3.3	Observations visuelles.....	171
8.3.4	Positionnement de la membrane en fonction de la viscosité du fluide de compaction	172
8.3.4.1	Hypothèse sur le positionnement de la membrane en fonction de la viscosité du fluide de compaction	172
8.3.4.2	Observation de la démarcation entre les fronts	173
8.3.4.3	Viscosité et pression statique.....	174
8.3.4.4	Positionnement de la membrane et imprégnation	181
8.3.5	Taux d'air	182
8.4	Conclusion	183
	Conclusion.....	185
	Recommandations et travaux futurs	191
	Références	192

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Propriétés spécifiques en tension de quelques matériaux métalliques et composites structuraux [2]	6
Tableau 1.2	Propriétés mécaniques des principaux renforts	10
Tableau 1.3	Comparaison des propriétés des matrices thermodurcissables et thermoplastiques [3]	12
Tableau 1.4	Comparaison des propriétés mécaniques des trois principaux types de résines	17
Tableau 1.5	Synthèse des procédés de fabrication [3]	18
Tableau 1.6	Paramètres des procédés LCM [9]	23
Tableau 4.1	Taux de fibres maximum en fonction du type de renfort (DIGITIP p.21).	58
Tableau 4.2	Exemple de valeurs de perméabilité.....	59
Tableau 4.3	Résumé des temps d'injections obtenues par Allard [27] (p. 99).....	61
Tableau 4.4	Impact des paramètres de fabrication sur les deux objectifs principaux de mémoire d'Allard [27] (p. 164).....	63
Tableau 4.5	Masse surfacique du renfort de Saertex.....	66
Tableau 4.6	Proportion des additifs à la résine vinylester DERA-KANE 411-350 avec l'utilisation de la machine d'injection	67
Tableau 4.7	Tableau récapitulatif des caractéristiques des pièces fabriquées pour chaque nombre de plis pour un taux de fibres de 46 %.....	69
Tableau 4.8	Paramètres fixes du plan d'expérience #1	75
Tableau 4.9	Tableau récapitulatif des conditions d'injection.....	75
Tableau 4.10	Tableau récapitulatif des résultats du plan d'expérience #1	76
Tableau 4.11	Temps d'injection des pièces du plan d'expérience #1	77
Tableau 4.12	Comparaison avec le procédé RTM	79
Tableau 4.13	Coefficients des courbes de tendance linéaire de chaque balayage	89
Tableau 5.1	Masse surfacique du renfort de Roviply.....	96

Tableau 5.2	Proportion des additifs ajoutés à la résine vinylester DERA KANE 411-350 utilisée avec le pistolet d'injection	97
Tableau 5.3	Paramètres fixes du plan d'expérience #2	102
Tableau 5.4	Tableau récapitulatif des conditions d'injection.....	102
Tableau 5.5	Tableau récapitulatif de données sur les pièces du plan d'expérience #2	103
Tableau 5.6	Temps d'injection des pièces du plan d'expérience #2	104
Tableau 5.7	Comparaison avec le procédé RTM	105
Tableau 5.8	Analyse visuelle des pièces produites	107
Tableau 5.9	Position du front de résine après injection	111
Tableau 6.1	Proportion des additifs ajoutés à la résine vinylester DERA KANE 411-350 utilisée avec le pistolet d'injection	127
Tableau 6.2	Répartition théorique de la pression	129
Tableau 6.3	Paramètres fixes du plan d'expérience #3	129
Tableau 6.4	Tableau récapitulatif des conditions d'injection.....	130
Tableau 6.5	Tableau récapitulatif de données sur les pièces du plan d'expérience #3	131
Tableau 6.6	Temps d'injection des pièces du plan d'expérience #3	131
Tableau 6.7	Analyse visuelle des pièces produites	133
Tableau 6.8	Position du front de résine en fonction de la quantité de résine injectée	134
Tableau 7.1	Proportion des additifs ajoutés à la résine vinylester DERA KANE 411-350 utilisée avec le pistolet d'injection	143
Tableau 7.2	Paramètres fixes du plan d'expérience #5	144
Tableau 7.3	Détail du plan d'expérience	144
Tableau 7.4	Tableau récapitulatif de données sur les pièces du plan d'expérience #4	146

Tableau 7.5	Analyse visuelle des pièces du plan d'expérience #4 pour une épaisseur de la chambre de compaction de 0.14 po.	149
Tableau 7.6	Analyse visuelle des pièces du plan d'expérience #4 pour une épaisseur de la chambre de compaction de 0.05 po.	149
Tableau 8.1	Masse surfacique du renfort de Saertex.....	164
Tableau 8.2	Proportion des additifs ajoutées à la résine vinylester DERAKANE 411-350 pour utilisation avec le pistolet d'injection	165
Tableau 8.3	Viscosités mesurées au viscosimètre Brookfield DV-II.....	166
Tableau 8.4	Paramètres fixes du plan d'expérience #5	167
Tableau 8.5	Détails du plan d'expérience.....	168
Tableau 8.6	Données générales sur les pièces produites.....	169
Tableau 8.7	Temps d'injection (s)	170
Tableau 8.8	Analyse visuelle des pièces produites	171
Tableau 8.9	Variation de la pression avec la viscosité entre les cadres 0.08 et 0.14 po	181

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Formation de chaînes polyester par polycondensation.	14
Figure 1.2	Formation du réseau de réticulation : a) groupe ester b) schémas d'une chaîne polyester c) réseau tridimensionnel réalisé par le styrène.	14
Figure 1.3	Molécule époxy et groupe époxy.	15
Figure 1.4	Synthèse d'une chaîne vinylester.	16
Figure 1.5	Comparaison des réseaux de réticulation dans les cas d'une résine vinylester (a) et d'une résine polyester (b).	16
Figure 1.6	Étapes du procédé RTM.	23
Figure 2.1	Courbe de compaction typique d'un renfort fibreux.	33
Figure 2.2	Cycles de compressibilité.	34
Figure 2.3	Relation d'équilibre de Terzhagi.	35
Figure 3.1	Description des différentes composantes d'un moule d'injection flexible.	39
Figure 3.2	Fermeture du moule.	39
Figure 3.3	Mises sous vide des chambres du moule d'injection flexible.	40
Figure 3.4	Injection de la résine dans le moule.	41
Figure 3.5	Injection du fluide de compaction.	42
Figure 3.6	Consolidation de la pièce composite.	42
Figure 3.7	Démoulage de la pièce composite.	43
Figure 3.8	Photographie du moule transparent.	45
Figure 3.9	Composante du moule transparent.	46
Figure 3.10	Cadre en PMMA.	47
Figure 3.11	Maintien du renfort tissé.	48
Figure 3.12	Ordre de fermeture.	48
Figure 3.13	Dimension d'une pièce fabriquée avec le moule transparent.	49
Figure 3.14	Capture vidéo en vue de dessus.	51
Figure 3.15	Interface du logiciel AVIMECA.	52
Figure 3.16	Exemple de courbe obtenue à l'aide du logiciel AVIMECA.	53

Figure 3.17	Position du capteur de pression sur la conduite du fluide de compaction..	54
Figure 3.18	Évolution de la pression pendant l'injection.....	55
Figure 4.1	Diminution de la vitesse d'écoulement de la résine après croisement des fluides (p. 58).	62
Figure 4.2	Photographie des deux côtés du tissu Saertex.....	66
Figure 4.3	Photographie de la membrane utilisée sur le moule transparent.....	67
Figure 4.4	Pièce composite d'épaisseur plus grande que sa préforme.	68
Figure 4.5	Outillage nécessaire à la fabrication de pièces composites par injection flexible.....	70
Figure 4.6	Photographie des pots de vides et de pression.	70
Figure 4.7	Machine d'injection et ordinateur de contrôle.	72
Figure 4.8	Tête d'injection.	73
Figure 4.9	Photographie de la MMT.	74
Figure 4.10	Schéma de l'emplacement des balayages effectués avec la MMT sur une pièce.	74
Figure 4.11	Écoulement de Poiseuille et de Darcy dans le moule.....	79
Figure 4.12	Écoulement dans le cas d'un mat.	81
Figure 4.13	Écoulement dans le cas d'un renfort tissé.	82
Figure 4.14	Pièces finales vue côté moule pour différent nombre de plis.....	83
Figure 4.15	Introduction du fluide de compaction.....	84
Figure 4.16	Balayages de la pièce H07P2001 avec la MMT.....	85
Figure 4.17	Balayages de la pièce H07P3013 avec la MMT.....	85
Figure 4.18	Balayages de la pièce H07P4003 avec la MMT.....	86
Figure 4.19	Balayages de la pièce H07P5004 avec la MMT.....	86
Figure 4.20	Balayages de la pièce H07P4003 avec la MMT sur les 250 premiers millimètres.....	87

Figure 4.21	Balayages de la pièce H07P5004 avec la MMT sur les 250 premiers millimètres.....	88
Figure 4.22	Disposition des nouveaux cadres.....	94
Figure 5.1	Photographie du tissu Roviply.	96
Figure 5.2	Cadres inférieur et supérieur en position.	98
Figure 5.3	Pistolet pour injection manuelle.....	100
Figure 5.4	Micromètre.....	101
Figure 5.5	Mesure des pièces fabriquées.....	101
Figure 5.6	Pièces finales vue côté moule pour différentes épaisseurs de cadres.....	106
Figure 5.7	Position du front de résine dans le temps pour chaque épaisseur de cadre....	108
Figure 5.8	Temps d'injection en fonction de l'épaisseur du cadre utilisé.....	109
Figure 5.9	Imprégnation du renfort pendant l'injection de la résine.	111
Figure 5.10	Position du front de résine pour chaque pièce.....	113
Figure 5.11	Pression du fluide de compaction.....	114
Figure 5.12	Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH06 (0.14 po).....	115
Figure 5.13	Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH07 (0.08 po).....	116
Figure 5.14	Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH08 (0.05 po).....	116
Figure 5.15	Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH05 (0.04 po).....	117
Figure 5.16	Mesures d'épaisseurs de la ligne centrale des pièces du plan d'expérience #2.	118
Figure 6.1	Pression appliquée par le fluide de compaction.	124
Figure 6.2	Courbe de compressibilité du tissu Roviply de CHOMARAT.....	126
Figure 6.3	Premier cycle de la courbe de compressibilité.....	128
Figure 6.4	Pièces finales vues du côté moule pour différente quantité de résine.....	133
Figure 6.5	Vue côté moule de la pièce E07PH31.....	136
Figure 6.6	Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH08 (100 g).	137
Figure 6.7	Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH25 (90 g).	137
Figure 6.8	Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH26 (80 g).	138

Figure 6.9	Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH31 (70 g).	138
Figure 6.10	Mesures d'épaisseur sur la ligne centrale des pièces du plan d'expérience #3.	139
Figure 7.1	Schémas d'un moule d'injection flexible avec les chambres d'injection et de compaction.	142
Figure 7.2	Photographies côté moule des pièces du plan d'expérience #4 pour une épaisseur du cadre de compaction de 0.05po.	147
Figure 7.3	Photographies côté moule des pièces du plan d'expérience #4 pour une épaisseur du cadre de compaction de 0.14po.	148
Figure 7.4	Vue rapprochée des pièces E07PH15 et E07PH16 réalisée avec une pression de vide de 1 bar : microporosité.....	148
Figure 7.5	Mise sous vide des deux chambres du moule d'injection flexible.....	150
Figure 7.6	Vagues formées par la membrane en fonction de son usure et de l'épaisseur de la chambre de compaction.....	151
Figure 7.7	Écoulement perturbé de la résine dans le cas d'un cadre de 0.14 po.	152
Figure 7.8	Imprégnation du renfort après fermeture de l'évent de la chambre d'injection pour un cadre de 0.14 po.....	154
Figure 7.9	Imprégnation du renfort après fermeture de l'évent de la chambre d'injection pour un cadre de 0.05 po.....	155
Figure 7.10	Épaisseur médiane des pièces du plan d'expérience #4 pour une épaisseur de la chambre de compaction de 0.14 po.	157
Figure 7.11	Épaisseur médiane des pièces du plan d'expérience #4 pour une épaisseur de la chambre de compaction de 0.05 po.	157
Figure 7.12	Position du front de résine des pièces du plan d'expérience #4 pour un cadre de compaction de 0.05 po.	159
Figure 8.1	Compaction avec un fluide de haute viscosité.	162

Figure 8.2	Compaction avec un fluide de faible viscosité.....	162
Figure 8.3	Photographie des deux côtés du tissu Saertex.....	164
Figure 8.4	Viscosimètre rotationnel digital Brookfield DV-II et ses plongeurs.	165
Figure 8.5	Limite entre les fronts de résine et du fluide de compaction pour le cadre de la chambre de compaction de 0.14 po.	174
Figure 8.6	Écoulement du fluide de compaction pour un cas sans résine.	175
Figure 8.7	Évolution de la pression statique à l'interface dans le cas simplifié.	176
Figure 8.8	Évolution de la pression statique à l'interface en fonction de la viscosité pendant le déplacement de la résine dans le moule.....	179
Figure 8.9	Évolution de la pression du fluide de compaction en fonction de sa viscosité et de l'épaisseur du cadre.	180

LISTE DES SYMBOLES

D	Diamètre équivalent
g	accélération de l'apesanteur
K	Perméabilité d'un renfort fibreux
k_c	Perméabilité équivalente de l'interstice
M	Module d'élasticité
n	Nombre de plis de tissu
V	Vitesse du fluide de compaction
V_f	Taux de fibres
P_{appl}	Pression qu'applique le fluide de compaction
P_C	Pertes de charge
P_D	Pression dynamique
P_i	Pression Initiale
$P_{résine}$	Pression supportée par la résine
P_t	Pression totale
P_v	Pression de vide
Q	Débit du fluide de compaction
R	Résistance en tension
t_p	Temps d'injection à l'aide du procédé d'injection flexible
t_r	Temps d'injection à l'aide du procédé RTM
ρ	Masse volumique
ρ_s	Masse surfacique
μ	Viscosité du fluide
Φ	Porosité du renfort
σ_{renf}	Contrainte appliquée au renfort

INTRODUCTION

Les matériaux composites ont une longue histoire et englobent une très large famille de matériaux allant du torchis au système carbone/époxy en passant par le bois. Un matériau composite est une combinaison d'au moins deux composantes distinctes, dont l'association confère à l'ensemble des propriétés particulières. En ce sens, le bois est un matériau composite naturel, car il est composé de différents types de fibres.

La science et la recherche ont permis de développer le concept de matériaux composites bien au-delà de la fabrication de briques en torchis. En ce début de 21^{ème} siècle, les matériaux composites prennent de toutes autres formes. Dans des industries comme l'aéronautique, l'automobile, le nautisme ou encore le bâtiment, une catégorie de matériaux composites s'impose face aux matériaux traditionnels comme les métaux. Ce sont les composites à renfort fibreux et à matrice polymère. Le renfort permet de supporter la charge mécanique; la matrice distribue cette charge et assure la cohésion et la protection du renfort. Ce type de matériaux composites est de plus en plus répandu, car ils offrent une grande variété de propriétés et permettent une réduction de poids appréciable.

Pour former de tels matériaux, il est possible de puiser dans un large éventail de renforts et de matrices. Les renforts les plus connus sont les fibres de verre, de carbone et d'aramide. Les matrices utilisées sont constituées de chaînes polymères, qui peuvent être thermodurcissables ou thermoplastiques. Les thermodurcissables durcissent avec la température, alors que les thermoplastiques fondent. Les travaux de la Chaire sur les Composites à Haute Performance (CCHP), portent sur les matériaux composites à renfort fibreux et à matrice thermodurcissable.

Il existe de nombreux procédés de mise en forme pour fabriquer ce genre de matériaux composites. Gutowski décrit une grande partie de ces procédés [1]. Le moulage par compression (« *Sheet Molding Compound* ») et la pultrusion sont des procédés adaptés à la production de masse. Le moulage par compression nécessite un outillage coûteux et

ne permet pas de contrôler avec précision l'orientation des fibres et donc la production de pièces structurales reste limitée par ce procédé. De son côté, la pultrusion ne permet que la fabrication de profilés. Les procédés utilisés pour la fabrication des composites à haute performance sont en général des procédés lents et coûteux. Le secteur aéronautique, où le poids importe plus que le coût, utilise des procédés tels que le drapage et la cuisson en autoclave. Il existe une autre catégorie de procédés qui permet la production, à moyen volume et à un coût raisonnable, de pièces structurales. Ce sont les procédés de moulage par injection. Le plus connu reste le procédé RTM (« *Resin Transfer Molding* »).

Depuis 2003 un nouveau procédé est en développement à l'École Polytechnique. Ce nouveau procédé d'injection flexible est rapide et peu coûteux en énergie. L'objectif ici est d'augmenter les cadences de production par rapport à un procédé d'injection tel que le RTM, sans que le remplissage du moule ne nécessite un système d'injection puissant. Cela semble possible en compactant le renfort après l'injection de la résine. Un moule utilisant le procédé d'injection flexible est constitué de deux cavités séparées par une membrane. D'un côté se trouvent le renfort et la matrice; de l'autre, un liquide de compaction contribuant à la dispersion de la résine dans le moule et à la consolidation de la pièce.

Ce document fait suite aux mémoires de Lothar Briones et d'Éric Allard, qui ont tous deux travaillé sur ce procédé d'injection flexible pour des mats à fibres de verre. Ce mémoire traite de l'utilisation de tissus en fibres de verre. Dans le contexte du développement d'un nouveau procédé de mise en forme des matériaux composites, il est important d'évaluer ses performances sur les deux types de renforts usuels, soit les mats et les tissus.

Ce mémoire a un double objectif. Tout d'abord exploratoire, dans le sens que l'utilisation de renforts tissés représente une nouvelle étape dans le développement du procédé. Il s'agit ici de comprendre le comportement de la mise en œuvre du composite.

D'autre part, le travail effectué vise à optimiser les paramètres qui gouvernent le procédé dans le cas des renforts tissés. Pour répondre à ces objectifs, 5 plans d'expérience ont été réalisés. Le premier examine le comportement du procédé d'injection flexible appliqué aux renforts tissés. Ce plan d'expérience représente le point de départ d'une étude plus large sur les renforts tissés. En effet, il permet de poser des hypothèses sur le rôle de certains paramètres sur le comportement du procédé. Ces hypothèses sont par la suite évaluées à travers 4 autres plans d'expérience plus spécifiques.

Le chapitre 1 de ce mémoire est une description des matériaux composites à renfort fibreux. Il décrit les différents types de renforts, de matrices et les procédés de mise en forme associés.

Le chapitre 2 est une revue de littérature, qui donne les informations nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques intervenant dans les différents plans d'expérience. Les notions de perméabilité et de perméabilité équivalente, de compression du renfort et de pression dynamique sont traitées dans ce chapitre.

Le chapitre 3 décrit le déroulement de l'injection flexible dans le cas de renforts tissés. En même temps on décrit le moule transparent utilisé pour l'ensemble des plans d'expérience présentés dans ce mémoire. Ce chapitre présente les résultats que le moule permet d'obtenir et les limites d'extrapolation de ces résultats.

Le chapitre 4 permet de faire la transition entre les travaux déjà réalisés sur le procédé d'injection flexible et la présente étude. Ce mémoire se distingue des précédentes études par l'utilisation de renforts tissés plutôt que de mats à fibres aléatoires. Ce chapitre a pour objectif de mettre en évidence, à l'aide du plan d'expérience #1, les différences de comportement du procédé d'injection flexible en fonction du type de renforts utilisés.

Après analyse du plan d'expérience #1, 4 autres plans d'expérience sont réalisés et exposés dans chapitres 5 à 8. Chacun d'entre eux vise à montrer l'influence d'un

paramètre sur le temps d'injection et la qualité des pièces obtenues. Il existe bien sûr des liens entre les paramètres étudiés et donc entre les différents chapitres.

Le plan d'expérience #2 décrit au chapitre 5 traite de l'influence de l'épaisseur de la chambre de compaction. Le plan d'expérience #3 décrit au chapitre 6 présente l'étude de l'influence du taux de fibres sur la qualité des pièces produites. Ces deux plans d'expérience mettent en lumière le rôle de la position du front de résine après injection sur la qualité de l'imprégnation des pièces. Ainsi pour une épaisseur de chambre de compaction constante, la diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction déplace cette position vers l'évent de sortie. L'augmentation du taux de fibres diminue de la quantité de résine injectée. L'augmentation de ce paramètre a donc pour effet de rapprocher le front de résine du port d'injection. Les analyses effectuées dans ces deux chapitres ont pour objectif d'établir les limites d'utilisations du procédé d'injection flexible. Ces limites sont établies dans le cas d'une polymérisation à température ambiante et pour l'application d'une pression de vide partielle dans la chambre d'injection.

Le plan d'expérience #1 montre la présence de zones sèches dans les pièces produites. Une solution simple consiste à imposer un vide complet dans la chambre d'injection. Le plan d'expérience #4 décrit au chapitre 7 traite de l'influence de la pression de vide dans la chambre de compaction. La complexité du procédé d'injection flexible nécessite toutefois un couplage de ce paramètre avec l'épaisseur de la chambre de compaction.

Enfin, le dernier plan d'expérience décrit dans le chapitre 8 étudie l'influence, pour différentes épaisseurs de chambre de compaction, de la viscosité du fluide de compaction sur la qualité des pièces produites. Finalement, une conclusion générale établit un bilan sur le rôle des 4 paramètres étudiés dans les plans d'expérience spécifiques, sur la performance du procédé d'injection flexible dans le cas de l'utilisation de renforts tissés. Ce bilan est suivi de recommandations pour les travaux futurs.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION AU MATÉRIAUX COMPOSITES

1.1 Introduction

L'atout des matériaux composites réside dans la variété des fibres et résines. La combinaison fibres / résine confère au composite des propriétés qui ne peuvent être atteintes par les matériaux seuls. De plus, la variété des matériaux permet une spécification des propriétés physiques des composites, ils répondent alors de manière plus adéquate aux conditions d'utilisations.

La principale caractéristique des matériaux composites est leur faible densité (ρ), ceci leur confère des rapports de résistance / densité (R/ρ) et de module / densité (M/ρ) nettement supérieurs à ceux des métaux (Tableau 1.1). D'autres avantages tels qu'une faible expansion thermique ou une grande résistance à la fatigue permettent de considérer les composites comme une bonne alternative aux métaux. Le caractère anisotrope des matériaux composites est considéré comme un désavantage car il peut induire des distorsions dans le composite. Toutefois, grâce à l'anisotropie due à la forte orientation des fibres, il est possible de rendre la conception plus en adéquation avec l'application. Par exemple, la déformation du composite peut être favorisée dans une direction de l'espace. D'autre part, l'utilisation d'au moins deux constituants dans les matériaux composites leur attribue une capacité d'amortissement importante (bruit et vibration). Les matrices polymères jouent un rôle protecteur, elles préviennent la corrosion et l'absorption de l'humidité par le renfort. Des peintures ou revêtements sont également utilisés pour former une barrière aux agressions extérieures.

Tableau 1.1 Propriétés spécifiques en tension de quelques matériaux métalliques et composites structuraux [2]

Matériaux	Densité spécifique	Module (GPa)	Résistance en tension (MPa)	M/p (106 m)	R/p (103 m)
Acier AISI 4340 (trempé)	7.87	207	1722	2.68	22.3
Aluminium AL 7178-T6	2.70	68.9	606	2.60	22.9
Titane Ti-6Al-4V	4.43	110	1171	2.53	26.9
Nickel INCO 718	8.20	207	1399	2.57	17.4
Fibres verre E – époxy (UD)	1.85	39.3	965	2.16	53.2
Fibres kevlar 49 – époxy (UD)	1.38	75.8	1378	5.60	101.8
Fibres carbone haut module – époxy (UD)	1.63	215	1240	13.44	77.5

1.2 Renforts

Le rôle du renfort est de supporter la charge appliquée au composite. Les renforts utilisés pour la fabrication de pièces sont le plus souvent des laminés c'est-à-dire un empilement de tissus. Ces derniers sont faits de filaments de fibres orientées. Les renforts sont donc eux-mêmes orientés, ce qui leur confère des propriétés mécaniques et thermiques anisotropes. Le plus souvent les tissus sont bidirectionnels ou unidirectionnels, ceci correspond au nombre d'orientations des fibres. Il est également possible de fabriquer des pièces composites à partir de mats à fibres aléatoires. Dans le cas des pièces de mats les propriétés physiques sont considérées isotropes. Les fibres les plus répandues sont les fibres synthétiques tel que le verre, le carbone et l'aramide. D'autres fibres synthétiques sont utilisées pour des applications particulières, comme les fibres de bore, de carbure de silicium (SiC) ou encore d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). Il faut également compter sur les fibres naturelles qui ont l'avantage d'être une ressource locale et plus facilement

recyclable que les fibres de verre. Toutefois, les fibres naturelles comme le lin ou la laine de mouton ne présentent pas de suffisamment bonnes propriétés physiques.

1.2.1 Verre

Les renforts de fibres de verre sont les plus répandus, ils représentent 95 % [3] des renforts utilisés pour la fabrication de composites. La principale raison de leur grande diffusion est leur faible coût.

Avantages :

- Haute résistance en tension.
- Excellentes propriétés isolantes.
- Bonne résistance aux agressions chimiques.
- Bonne adhérence entre les fibres et la résine.
- Faible coût.

Désavantages :

- Faible module en tension.
- Faible résistance à la fatigue.
- Haute densité spécifique dans la gamme des fibres commerciales.
- Sensible à l'abrasion.

1.2.2 Carbone

Les fibres de carbone sont un produit de très haute qualité dont le coût le limite aux applications aéronautiques et à certains produits de sport et de loisir. Les produits commerciaux de série ne bénéficient pas de performance mécanique des fibres de carbone du fait de leur prix élevé.

Avantages :

- Excellents résistance en tension et module en tension.
- Très peu d'expansion thermique.
- Très grande résistance à la fatigue.

Désavantages :

- Interface fibres / résine faible.
- Allongement à la rupture faible.
- Grande conductivité électrique.
- Coût très élevé.

1.2.3 Aramide (kevlar 49)

Les fibres d'aramide ne sont utilisées que pour des applications particulières. Sa bonne résistance à l'impact en fait une fibre utilisée dans des domaines de pointe comme l'armement ou l'aérospatial.

Avantages :

- Très faible densité spécifique.
- Haute résistance en tension.
- Très bonne résistance à l'impact.
- Faible coefficient d'expansion thermique.
- Bonne résistance chimique.
- Bonne stabilité en température.

Désavantages :

- Faible résistance en compression.
- Très difficiles à couper ou usiner.
- Se dégrade sous rayonnement ultraviolet.
- Absorption importante d'eau.
- Prix élevé.

1.2.4 Comparaison des propriétés mécaniques des principales fibres synthétiques

Le Tableau 1.2 montre les points forts de chaque type de fibres. Les matériaux composites ont été créés pour répondre à tous types d'applications et ce tableau montre que la gamme de fibres disponible sur le marché permet une spécialisation des propriétés mécaniques du composite produit. Les fibres de verre apporte une souplesse au composite, les fibres de carbone une très grande résistance mécanique et les fibres d'aramide une légèreté et une résistance à l'impact importante.

Tableau 1.2 Propriétés mécaniques des principaux renforts [3]

Type de renfort	Diamètre mono filament (μ)	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance		Module d'allongement	
			Traction (Gpa)	Compression (Gpa)	Elasticité (Gpa)	Rupture (%)
Verre E	10 à 20	2,6	2,5	1 à 1,2	72	4,5
Verre R		2,5	3,5		85	5,2
Carbone HR	6 à 7	1,8	3 à 4	1,1 - 1,8	230-250	1,3
Carbone HM		1,9	2,7		400-500	0,5
Aramide	12	1,45	2,8 à 3	0,3 - 0,5	120-130	2,5
Polyéthylène haut module		0,96	3		100	

1.2.5 Préformage

Pour faciliter la mise en position des renforts dans un moule complexe ou pour conférer au renfort une épaisseur particulière, il est possible de le préformer. Principalement trois méthodes de préformage sont utilisées. La première est de projeter simultanément des fibres coupées et un agent liant sur un écran perforé à l'arrière duquel une pression de vide est appliquée pour permettre le maintien des fibres [2].

Il est également possible de donner une forme au renfort par estampage et chauffage. Dans ce cas, un agent liant est déposé entre les couches de renforts prédécoupées qui sont ensuite placées dans un moule fermé et chauffé [2]. L'agent liant peut être la résine utilisée lors de la fabrication du composite ou une poudre thermoplastique. Dans ces deux cas l'élévation de la température permet au renfort de maintenir la forme donnée par le moule.

Le dernier moyen de préformage s'appliquant aux tissus multidirectionnels, est appelé méthode par découpe et couture (« cut and sew »). Elle consiste à coudre dans la forme

désirée l'ensemble les couches de tissus préalablement découpées. La couture est réalisée à l'aide de fils de polyester, de verre ou d'aramide. Cette méthode utile au préformage de pièces épaisses est principalement utilisée dans des applications aéronautiques ou aérospatiales [1].

1.3 Matrice

Dans un matériau composite, la matrice donne la forme à la pièce fabriquée et transfère au renfort la charge qui lui est appliquée. D'autre part, les matrices protègent le renfort des attaques de l'environnement et préviennent l'abrasion des fibres. Pour améliorer les propriétés de la matrice, certains additifs peuvent être utilisés. Il s'agit, de colorant, de stabilisateur, d'agents antistatiques, d'additifs à bas retrait et d'agents de réticulation. Les matrices les plus utilisées sont des résines organiques. Il existe d'autres types de matrices tels que les matrices céramiques et métalliques. Ce genre de matériel n'est utilisé que dans des applications particulières nécessitant de bonnes propriétés thermiques. Les matrices organiques sont aussi appelées matrices polymères car sont formées de chaînes polymères. Ce type de matrices se divise en deux sous familles : les thermodurcissables (TD) et les thermoplastiques (TP). Le Tableau 1.3 compare les caractéristiques de chaque sous famille. Ce tableau montre que le choix d'une matrice joue sur la facilité de mise en forme et sur les propriétés finales.

Tableau 1.3 Comparaison des propriétés des matrices thermodurcissables et thermoplastiques [3]

Matrices	Thermodurcissables TD	Thermoplastiques TP
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
Cycle	Long (polymérisation)	Court
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Meilleure	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Conditions de travail	Emanations de solvants	Propreté

Lorsque l'on choisit une matrice il faut prendre en compte son interaction avec les fibres. En effet, la qualité de l'interface matrice/fibres qui rentre en jeu dans les propriétés mécaniques de cisaillement, dépend de l'énergie de surface des matériaux utilisés.

1.3.2 Thermoplastique

Cette sous famille de matrices organiques se caractérise par ses propriétés plastiques. En effet, ce genre de matrice fond avec l'augmentation de la température et durci avec la diminution de la température. Les très longues chaînes polymères, formant ce genre de matrice, n'ont pas d'interaction chimique. La rigidité des thermoplastiques à température ambiante, provient de la longueur de leurs chaînes et des faibles liaisons secondaires de Van der Waals. Dans ces conditions un certain niveau d'agitation thermique des chaînes polymères permet leur écoulement. Les matrices thermoplastiques les plus répandues sont le polypropylène (PP), le sulfure de polyphénylène (PPS), le polyether-ether-ketone (PEEK) et les polyamides (PA).

1.3.3 Thermodurcissable

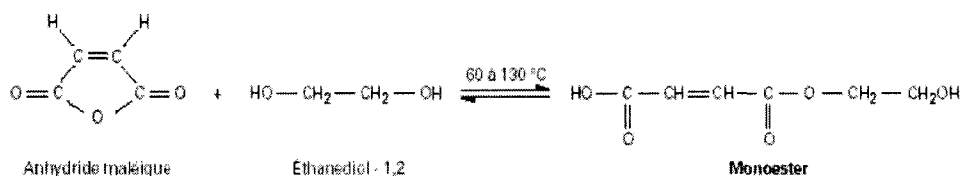
Les chaînes polymères des matrices thermodurcissables réticulent, c'est-à-dire qu'elles forment des liaisons chimiques covalentes. La polymérisation ou réticulation d'une matrice thermodurcissable produit un réseau tridimensionnel rigide [4]. Le phénomène de réticulation est irréversible. Il n'est pas possible de faire fondre ou recycler ce genre de matrice. Les résines thermodurcissables les plus utilisées sont les résines polyester, époxy et vinylester. Les deux premières résines ont leur propre mode de réticulation. La résine vinylester est elle une combinaison des résines polyester et époxy. D'autres matrices telles que les résines phénoliques, polyimides ou polyuréthannes font également partie de la famille des thermodurcissables.

1.3.3.1 Polyester

Les résines polyester sont obtenues par polycondensation d'anhydride et d'éthylène (ou de glycol de propylène). Cette réaction chimique, décrite à la Figure 1.1, implique la formation de molécules de polyester insaturées contenant de nombreuses doubles liaisons $C = C$. Pour permettre la réticulation de la résine il faut préalablement ajouter du styrène au polymère formé par condensation. Ce dernier a l'avantage de diminuer la viscosité de la résine et rendre ainsi la mise en forme plus facile. Cependant, il est inflammable, extrêmement volatile et potentiellement cancérigène [5].

Grâce aux doubles liaisons également présentes dans le styrène, ce dernier joue le rôle d'agent de réticulation en réalisant des liaisons covalentes avec les chaînes de polymères et permet ainsi la formation d'un réseau tridimensionnel. La Figure 1.2 présente le type de réseau obtenu par ajout d'un catalyseur qui se décompose rapidement pour former des radicaux libres qui brisent les liaisons $C = C$ du styrène. À leur tour, les radicaux du styrène peuvent se réticuler avec les chaînes de polyester.

• Première étape : estérification :



• Seconde étape : polycondensation :

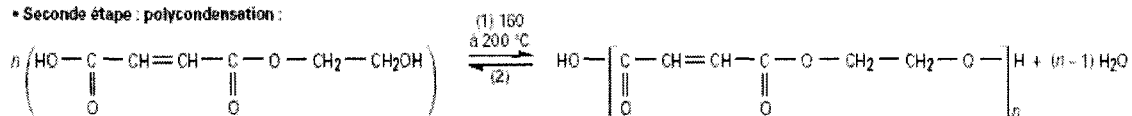
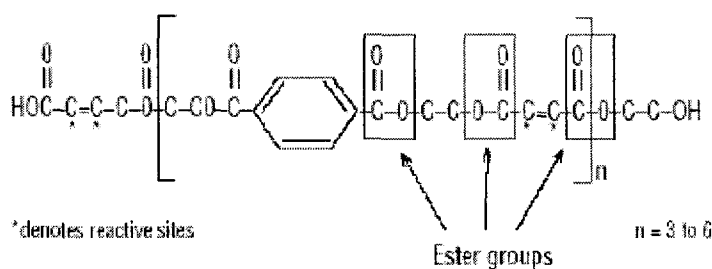
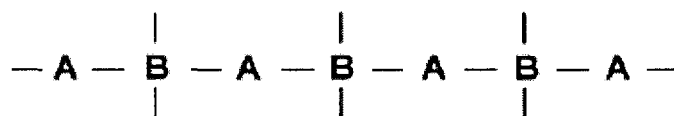


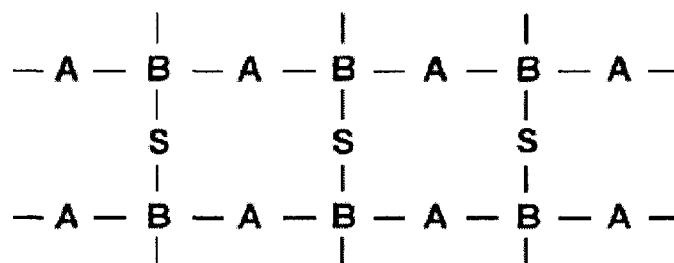
Figure 1.1 Formation de chaînes polyester par polycondensation [4].



a)



b)



c)

Figure 1.2 Formation du réseau de réticulation : a) groupe ester b) schémas d'une chaîne polyester c) réseau tridimensionnel réalisé par le styrène [4].

1.3.3.2 Époxy

Le mode de réticulation des résines époxy est différent de celui des résines polyester. Le catalyseur de ce type de résine est le plus souvent un anhydride d'acide. Lors de la réticulation, ce dernier forme des liaisons covalentes avec les groupes époxy ou les groupes hydroxyle (OH). La Figure 1.3 montre le cas d'une chaîne polymère époxy avec deux groupes époxy situés aux deux extrémités et un groupe hydroxyle au centre.

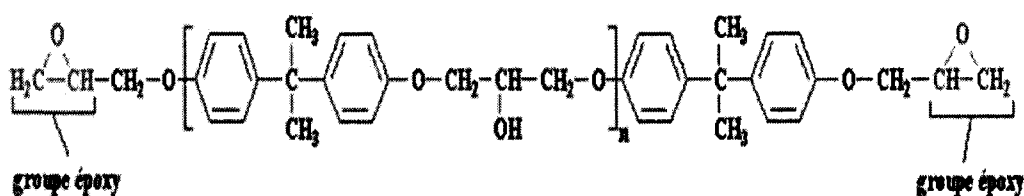


Figure 1.3 Molécule époxy et groupe époxy [4].

Les résines époxy sont les matrices par excellence des composites hautes performances et les plus utilisées dans les domaines de technologies de pointes comme l'aéronautique.

1.3.3.3 Vinylester

Les résines vinylester sont formées à partir de résine chaîne époxyde auxquelles sont ajoutés des acides carboxyliques. C'est pour cela que certaines compagnies leur donne le nom d'époxyvinylester. Le Figure 1.4 montre la réaction chimique nécessaire à la formation d'une telle chaîne polymère.

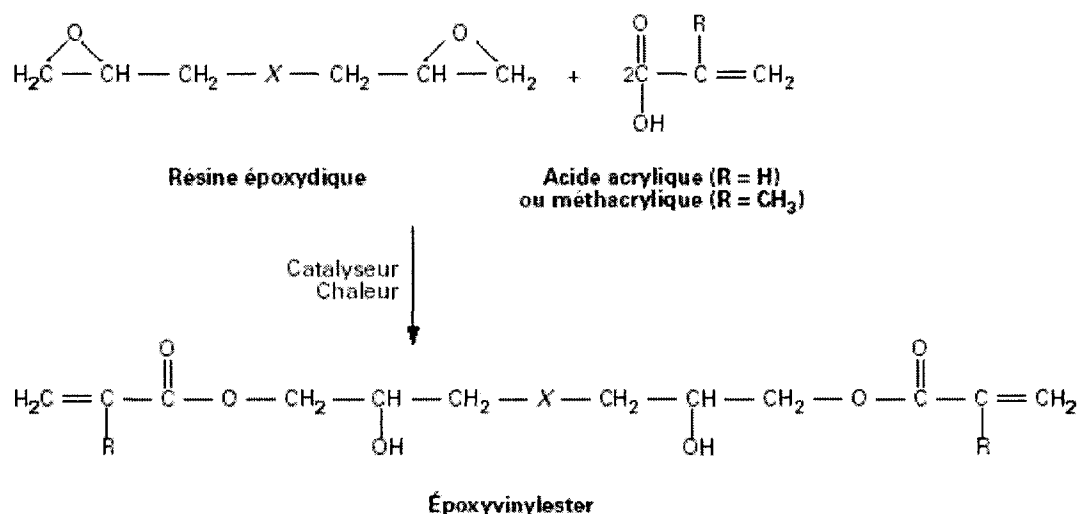


Figure 1.4 Synthèse d'une chaîne vinylester [4].

Les résines vinylester sont issues de résine époxy mais ont un mode de réticulation identique à celui des résines polyester, c'est-à-dire que la réaction de polymérisation forme des liaisons covalentes au niveau des doubles liaisons $\text{C} = \text{C}$. Dans le cas d'une résine vinylester ce type de liaison n'est présent qu'aux extrémités des chaînes polymères (Comme les groupes époxy). Cette particularité produit un réseau moins dense et donne une souplesse plus grande à la résine réticulée. Les résines vinylester sont de par nature moins rigides que les résines polyesters.

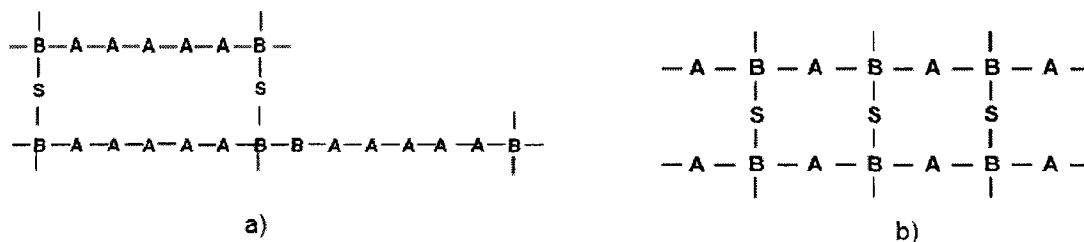


Figure 1.5 Comparaison des réseaux de réticulation dans les cas d'une résine vinylester (a) et d'une résine polyester (b) [4].

D'autre part les groupes hydroxyles (OH) présent dans les chaînes vinylester réalisent des liens hydrogénés avec les groupes similaires des fibres de verre. Ces faibles liaisons

ont pour effet d'augmenter la mouillabilité des fibres et donc de créer une bonne interface fibres/résine.

1.3.3.4 Propriétés physiques

Le Tableau 1.4 présente la résistance en traction et le module de flexion des trois résines évoquées. Nous remarquons qu'un ordre peut s'établir. En effet, les résines époxy sont réputées pour être plus résistantes que les résines polyester. Les résines vinylester qui sont une combinaison de ces deux types de résines possèdent des propriétés mécaniques intermédiaires.

Tableau 1.4 Comparaison des propriétés mécaniques des trois principaux types de résines [3]

Polymère	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (Gpa)	Module de flexion (Gpa)	Tenue à la chaleur continue (°C)	Allongement à la rupture (%)
Polyester	1,2	50-65	3	120	3-4
Vinyl-ester	1,15	70-80	3,5	140	4,5-5
Epoxyde	1,1-1,4	50-90	3	120-200	6-7

L'autre propriété importante d'une résine est l'allongement. Les résines vinylester sont plus souples que les résines polyester car elles présentent moins de liaison mais sont moins élastiques que les résines époxy. Ce paramètre est important dans le choix des matériaux car il dirige le mode de rupture. En effet, si l'allongement de la résine est plus faible que celle des fibres, des microfissures peuvent à la longue endommager la matrice. Dans ce cas, la pièce composite brise en fatigue.

1.4 Procédés de mise en forme

De nombreux procédés de mise en forme de pièces composites existent. Pour choisir un procédé adapté aux caractéristiques de la pièce à produire, il faut connaître les particularités de chacun d'entre eux. Les types de renforts et de résines utilisés, la complexité géométrique et la taille du composite ou encore le coût recherché sont autant de points qui influencent le choix du procédé à utiliser. Le Tableau 1.5 présente le

domaine d'application de la plupart des procédés de mise en forme de pièces composites.

Tableau 1.5 Synthèse des procédés de fabrication [3]

Procédés de transformation	Utilisation	Renfort		Matrice	Cycle
		Nature	Taux (%)		
1.- Formes 3D moulées, sans presse avec 1 seul moule					
Contact	GD	Mat ou tissu de verre	30-40	Polyester, vinylester	Jour
Projection simultanée	GD	Fibres coupées (l=4-6 cm)	25-30	Polyester	2 jours
Drapage autoclavé	HP	Tissus préimprégnés carbone, aramide, verre R	Jusqu'à 50	Epoxy	2 jours
2.- Formes 3D moulées à la presse avec 2 moules					
Pressage basse pression RTM	GD	Mats de verre	22-28	Polyester	20-30 mn
	HP	Tissu verre R ou carbone	Jusqu'à 80	Epoxy	20-30 mn
Compression moyenne pression	GD	Semi-produit BMC ou SMC		Matrice TD	2-3 mn
Eclapage TRE	GD	Plaques TRE		Matrice TP	1 mn
Injection haute pression TP	GD	Granulé TPR		Matrice TP	De 10 s à 1 mn
Injection transfert haute pression TD	GD	Semi-produit BMC		Matrice TD	1,5-2 mn
Injection réaction R-RIM (moule fermé)	GD	Fibres de verre broyées l=0,1-0,2 mm	15-20	Polyuréthane	1-2 mn
Injection réaction S-RIM (moule ouvert)	GD	Mat de fibres longues	<30	Polyuréthane	1-2 mn
3.- Formes profilées ou produits longs					
Stratification en continu	GD	Mat de verre fibres coupées	25-30	Polyester	6-12 mn
	GD	Fibres continues verre	50-80	Polyester	1-2 m/mn
	HP	Fibres continues carbone	50-80	Epoxy	0,5 m/mn
4.- Formes de révolution					
Centrifugation	GD	Fibres coupées, mat enroulé ou tresses de verre	35-45	Polyester	Quelques heures
	GD	Fibres continues verre E	50-70	Polyester, vinylester	De 1 heure à 1 jour
Enroulement filamentaire	HP	Fibres continues verre R, carbone, aramide	60-80	Epoxy	De 1 jour à quelques jours
GD avec matrice TD	HP avec matrice TD	GD avec matrice TP		HP avec matrice TP	

1.4.2 Moulage manuel

Le moulage par contact et la projection sont les deux méthodes de moulage manuel. Ces deux moyens de mise en forme ont en commun l'utilisation d'un moule ouvert. Dans le cas du moulage par contact, la résine est déposée sur le renfort à l'aide de pinceaux. Il est également possible de projeter la résine sur le renfort à l'aide d'un pistolet. Les procédés de moulages par contact se font de plus en plus rares car une législation plus stricte en matière de santé va progressivement les rendre inutilisables du fait de leur haute émission de styrène [3].

1.4.3 Pultrusion

La pultrusion permet la fabrication de profilé de longue taille à haut taux de fibres. Ce procédé automatisé en moule fermé permet le préformage, l'imprégnation des fibres par la résine et la cuisson du composite sur une seule ligne de fabrication. La pultrusion nécessite un équipement coûteux qui ne permet de fabriquer que des pièces de section constante.

1.4.4 Moulage par compression

Ce procédé consiste en l'estampage à pression élevée de renforts préimprégnés (SMC – « *Sheet Molding Compound* »). Les renforts utilisés sont généralement des fibres courtes ou des mats car l'utilisation de forte pression de compression nécessite la possibilité d'un déplacement relatif des fibres entre elles. Bien que ce procédé automatisable permette la fabrication de géométrie complexe, il reste limité aux pièces non-structurales et nécessite un outillage très coûteux.

1.4.5 Enroulement filamentaire

Dans ce procédé, une mèche de fibres continue imprégnée de résine est enroulée autour d'un mandrin en rotation. Ce procédé automatisé contrôle l'orientation des fibres, leurs tensions et leurs imprégnations, ceci permet de produire des pièces axisymétriques creuses de très bonne qualité.

1.4.6 Drapage en autoclave

Le procédé de drapage en autoclave est très utilisé dans le domaine aéronautique pour la haute qualité des pièces produites. Le matériel utilisé dans le procédé de drapage en autoclave est un renfort tissé préimprégné (« *preg* ») constitué de fibres imbibées de résine époxy partiellement polymérisée. Ce matériau est placé sur le moule, recouvert d'un média absorbant (« *bleeder* ») qui est utilisé pour purger l'excédent de résine et d'un film plastique qui scelle le montage. Le moule est mis sous vide puis installé dans l'autoclave où une combinaison de température et de pression confère au composite un taux de fibres élevé et la forme désirée. Les conditions de mise en œuvre de ce procédé imposent l'utilisation d'autoclaves robustes et des manipulations par un personnel qualifié, ceci confère au procédé un coût élevé.

1.5 Moulage de composite par injection (« Liquid Composite Molding »)

De nombreux procédés de mise en forme composent la famille des LCM [6]. Les LCM les plus répandus peuvent se répartir dans deux catégories, les procédés d'injections de résine et les procédés d'infusion.

Injection de résine :

- RTM (« *Resin Transfer Molding* »).
- RTM Light.
- CRTM (« *Compression Resin Transfer Molding* »).
- VARTM (« *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* »).

Infusion de résine :

- VARI (« *Vacuum Assisted Resin Infusion* »).
- LRI (« *Liquid Resin Infusion* »).
- FASTRAC (« *Fast Remotely Actuated Channeling* »).
- RFI (« *Resin Film Infusion* »).
- SCRIMP (« *Seeman Composites Resin Infusion Molding Process* »).

Chaque catégorie de procédé LCM est composée de procédés dérivants d'un principal. Dans le cas de procédés d'injection il s'agit du RTM et dans le cas des procédés d'infusion du VARI. Ce dernier consiste en l'utilisation, d'un côté, d'un moule rigide pour donner la forme au composite et de l'autre d'un film plastique. Dans ce procédé une pression de vide est appliquée à l'extrémité du moule pour permettre l'aspiration de la résine et ainsi l'imprégnation au travers du renfort. L'épaisseur du renfort est déterminée par la combinaison du différentiel de pression entre l'atmosphère et la résine et la capacité de compaction du renfort. Le LRI diffère du procédé d'infusion VARI de part introduction d'un média de dispersion entre le renfort et la membrane. Dans le cas du LRI, ce milieu est un renfort très perméable permettant un écoulement plus rapide de la résine qui imprègne le renfort dans sa longueur mais également transversalement. Ce média de dispersion peut être intégré à la pièce finale ou retiré après fabrication. Le principe du procédé SCRIMP est identique à celui du LRI, leur différence vient du type de média de dispersion utilisé. Dans le cas du SCRIMP l'écoulement au dessus du renfort est réalisé par un milieu drainant constitué de tubes hélicoïdaux qui permettent de distribuer la résine sur toute la surface de la pièce. L'emplacement de ces tubes à la surface de la pièce est primordial pour une imprégnation complète de la pièce. Le procédé FASTRAC ressemble au SCRIMP de part la création d'espaces vide qui permettent l'écoulement rapide de la résine. Cependant, le FASTRAC [7, 8] permet une distribution plus précise de la résine. Le contre moule souple est formé de deux

membranes qui dans la première partie de l'injection sont collées par l'application d'une pression de vide. Entre ces deux membranes est disposée une pièce qui permet la formation de canaux de distributions. Ces canaux sont suffisamment rapprochés pour former un réseau de distribution efficace. Notons que dans ce procédé le réseau de canaux est réutilisable, ceci produit moins de déchets que le SCRIMP. Le dernier procédé d'infusion est le RFI. Celui-ci consiste à déposer un film de résine entre le renfort et la membrane (« vacuum bag »). Le tout est mis sous vide pour donner la forme à la pièce et introduit sous autoclave. Un cycle de température et de pression est alors appliqué à l'assemblage, ceci produit la réduction de la viscosité de la résine, l'imprégnation du renfort et finalement la polymérisation de la résine. Le temps d'imprégnation est réduit car l'imprégnation se fait transversalement. Cependant, ce procédé nécessite un autoclave et augmente donc le coût de production.

Le procédé RTM est de loin le plus connu des procédés LCM. Dans ce cas le renfort est placé dans un moule rigide fermé, la résine est ensuite injectée à basse pression (2 à 6 bars) au travers du renfort. La perméabilité du renfort, c'est-à-dire la capacité du renfort de laisser s'écouler la résine influence alors grandement le temps d'injection. Ensuite la résine pré catalysée polymérise et la pièce est démoulée (Figure 1.6). À partir de ce procédé d'autres ont vu le jour. La première est d'augmenter le gradient de pression entre le port d'injection et l'évent de sortie de résine. Dans le cas du procédé VARTM une pression de vide appliquée à l'évent permet la diminution du temps d'injection et d'améliorer la qualité du composite. En effet, la pression de vide diminue la quantité d'air et donc la formation de vide dans les pièces composites. Un autre procédé d'injection permet le déplacement contrôlé du contre moule. Ce procédé nommé CRTM consiste à injecter la résine au travers d'un renfort non comprimé. Dans ce cas la perméabilité du renfort augmente et le temps d'injection diminue. Au fur et à mesure que l'injection progresse, le contre moule est déplacé pour réduire l'épaisseur du renfort et ainsi obtenir le taux de fibres souhaité. Le dernier procédé dérivé du procédé RTM est le RTM-Light. Dans ce procédé le contre moule est semi-rigide, c'est-à-dire qu'il peut se déformer lors de l'injection de la résine. Ce procédé permet d'augmenter l'épaisseur de

la cavité lors de l'injection de résine et ainsi réduire le temps d'injection. Une fois la résine injectée une pression de vide permet au contre moule de retrouver sa forme.

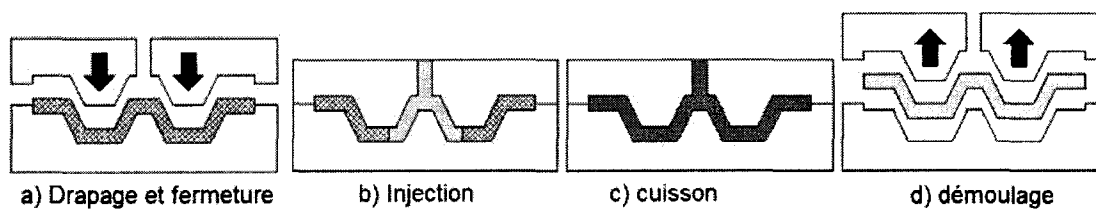


Figure 1.6 Étapes du procédé RTM [4].

Le Tableau 1.6 présente les paramètres utilisés pour chaque procédé LCM. Le type d'imprégnation et les pressions nécessaires au fonctionnement des différents procédés y sont décrits.

Tableau 1.6 Paramètres des procédés LCM [9]

Procédé	Contrôle du moule	Nature du moule	Pression évent	Pression injection	Front	Drainant
LRI	contrainte	souple	< 1	1	L + T	Préforme
VARI	contrainte	souple	< 1	1	L	Aucun
SCRIMP	contrainte	souple	< 1	1	L + T	Filet
RFI	contrainte	souple	1	1	T	Aucun
FASTRAC	contrainte	2 membranes	< 1	> 1	L + T	Canal
RTM	épaisseur fixe	rigide	1	> 1	L	Aucun
VARTM	épaisseur fixe	rigide	< 1	> 1	L	Aucun
CRTM	déplacement	rigide	< 1	> 1	L + T	Canal
RTM-light	contrainte	semi-rigide	1	> 1	L	Aucun

CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Ce chapitre décrit les phénomènes physiques connus et utilisés dans ce mémoire. Ceci vise à rendre plus facile la lecture des prochains chapitres. En effet, l'explication de certains phénomènes connus et déjà longuement étudiés au sein de chapitres propres à l'analyse du comportement du procédé d'injection flexible, les rendrait indigestes et moins cohérents. Il est ici question de pression dynamique, de perméabilité, d'écoulement de Poiseuille et de compressibilité. Les phénomènes de perméabilités ou d'écoulement de Poiseuille sont certes bien connus mais reste nécessaire à la compréhension du comportement du procédé d'injection flexible.

2.2 Pression dynamique, nombre de Reynolds et pertes de charge

Cette section aborde la notion de pression dynamique car dans le cas des fluides utilisés dans ce mémoire, certaines explications s'appuient sur sa faible valeur. Lorsque qu'il est question d'écoulement de Poiseuille ou que la pression statique du fluide de compaction est analysée, il faut s'assurer de pouvoir négliger la pression dynamique.

Lorsqu'un fluide circule au travers d'une conduite, la pression fournie par un pot de pression (P_I) est transformée en pression dynamique (P_D), en perte de charge (P_C) et en pression statique (P_S) [10-12].

$$P_I = P_C + P_D + P_S \quad (2.1)$$

En connaissant la vitesse d'écoulement du fluide, l'équation suivante permet de déterminer la pression dynamique.

$$P_D = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \quad (2.2)$$

où ρ est la masse volumique du fluide et V sa vitesse.

Dans le cas de ce mémoire sont utilisés des huiles silicones de la compagnie (200® fluid) DOW CORNING d'une viscosité variant de 100 à 2500 cSt et d'une masse volumique proche de 970 kg/m³. Des essais ont été réalisés avec Allard (annexe A) pour calculer la pression dynamique de certain fluide. Pour effectuer ces essais, un pot de pression relié à une conduite souple d'une section de 11.2 mm ont été utilisés. Proche de l'extrémité de la conduite un capteur de pression permet de relever la pression statique.

Dans le cas d'une huile de 350 cSt, la pression dynamique représente 3/1000^{ème} de la pression totale. La pression dynamique peut donc être négligée. À ce moment là l'équation 2.1 devient :

$$P_I = P_C + P_S \quad (2.3)$$

La valeur du nombre de Reynolds permet de qualifier le type d'écoulement [12]. En effet, l'écoulement est soit laminaire en dessous de 2000 ou turbulent au dessus de 4000. Une mode de transition est observable entre ces deux types d'écoulement.

Dans le cas du procédé d'injection flexible, les essais réalisés démontrent l'aspect laminaire des écoulements. Pour les différentes huiles testées, le nombre de Reynolds est inférieur à 100. Dans une conduite de diamètre constante, les pertes de charges prennent alors la forme suivante [10-12] :

$$\Delta P = \frac{32 \cdot \mu \cdot L \cdot V}{D^2} \quad (2.4)$$

L'extrémité de la conduite étant à l'air libre, la pression statique y est nulle. Cette section permet d'affirmer que la différence de pression entre le pot de pression et le pot de vide est transformée entièrement en perte de charge. Finalement, la vitesse du fluide

dépend du diamètre (D) et la longueur (L) de la conduite, de la différence de pression appliquée à ces extrémités (ΔP) et de la viscosité du fluide utilisé (μ).

$$V = \frac{D^2}{32 \cdot \mu \cdot L} \cdot \Delta P \quad (2.5)$$

2.3 Écoulement de Poiseuille

L'écoulement lent d'un fluide visqueux dans une petite conduite ou entre deux plaques est un écoulement de Stokes. Cependant, il est possible de décrire l'écoulement des huiles utilisées dans le moule transparent par un écoulement de Poiseuille.

Dans le cas de l'écoulement d'un fluide dans une conduite circulaire ou entre deux plaques parallèles, l'application de la loi de Poiseuille impose trois hypothèses sur l'écoulement du fluide. Tout d'abord, que le vecteur déplacement du fluide soit parallèle à la direction donnée par la conduite. Il faut également s'assurer de la condition de non glissement, c'est-à-dire que sur les parois de la conduite le fluide a une vitesse nulle. La dernière hypothèse nécessaire, pour considérer qu'un écoulement est de type Poiseuille, est une homogénéité de la pression dans l'épaisseur de l'écoulement.

Dans le cas d'une conduite circulaire comme dans le cas d'un écoulement entre deux plaques parallèles, la loi de Poiseuille permet d'exprimer la vitesse moyenne de l'écoulement à l'aide de l'équation 2.5 où D correspond à deux fois le rayon hydraulique équivalent. Ce dernier se définit par l'équation suivante :

$$R = \left(\frac{h \cdot d}{\pi} \right)^2 \quad (2.6)$$

où d est la largeur et h la hauteur de la conduite rectangulaire.

Aussi, nous venons de voir que la négligeabilité de la pression dynamique a permis d'exprimer la vitesse de l'huile à l'aide de l'équation 2.5. En remplaçant, dans cette formule, le diamètre par le rayon de la conduite, nous remarquons qu'elle est identique à l'expression de la vitesse moyenne de Poiseuille. Les essais réalisés avec Allard montrent que l'écoulement des fluides utilisés dans le procédé d'injection flexible peut se réduire à un écoulement de type Poiseuille.

2.4 Perméabilité et loi de Darcy

Henry Darcy (1803-1858) fut le premier à utiliser le terme de perméabilité. Sous la casquette d'ingénieur général des ponts et chaussées œuvrant dans la ville de Dijon, il découvrit la notion de perméabilité en étudiant la filtration de l'eau au travers des sols. Ces découvertes, d'abord très utiles dans l'assainissement et la distribution d'eau potable, sont ensuite utilisées pour d'autres applications nécessitant le passage d'un fluide au travers d'un matériau poreux. La perméabilité est ici la mesure de la capacité d'un matériau poreux à laisser s'écouler un fluide. Plus la perméabilité du matériau est grande, plus le fluide circule vite au travers du milieu poreux. La première forme de la loi de Darcy [13], permettait de relier la vitesse d'écoulement au gradient de charge hydraulique par une constante de proportionnalité K , qui est définie comme la perméabilité.

$$\vec{V} = K \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (2.7)$$

Cette formulation ne prend pas en compte un possible changement de viscosité. En réalité, Henry Darcy n'ayant utilisé que de l'eau, la viscosité est intégrée à sa définition de la perméabilité. Dans cette équation nous voyons qu'il utilise un gradient hydraulique. Il est possible de généraliser la formule à toute application en utilisant non pas la différence de hauteur, mais la différence de pression qui est à la source des observations de Darcy. Initialement, la définition de la perméabilité comprenait la masse

volumique de l'eau et la constante de pesanteur g . La perméabilité définie par Darcy peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (2.8)$$

où k est la perméabilité propre au milieu poreux, ρ est la masse volumique du fluide, g est l'accélération de pesanteur et μ est viscosité du fluide.

D'autre part, les études d'Henry Darcy ont portées sur des écoulements unidirectionnels. Toutefois, certains milieux sont anisotropes ce qui nécessite la connaissance de la perméabilité dans les trois directions de l'espace. À cette fin, le tenseur de perméabilité est introduit dans la loi de Darcy.

$$\vec{V} = -\frac{[K]}{\mu} \vec{\nabla} P \quad (2.9)$$

Dans cette équation, $\vec{V}$ est le champ de vitesse du front du fluide, $\vec{\nabla} P$ le champ de gradient de pression et $[K]$ le tenseur de perméabilité.

Le tenseur de perméabilité est de règle générale une matrice 3 par 3. Dans le cas le plus classique d'un matériau orthotrope, le tenseur de perméabilité est diagonalisable. k_1 , k_2 et k_3 sont alors les perméabilités des directions principales du matériau. Si le matériau est isotrope, ces trois valeurs de perméabilités sont identiques.

Dans le cas des matériaux composites, la perméabilité d'un renfort peut être déterminée expérimentalement pour chaque direction. Pour permettre la simulation numérique de procédés de fabrication de composite par injection, plusieurs techniques ont été développées pour déterminer la perméabilité des renforts fibreux [14-17]. Celle proposée par Ferland [15] est utilisée à l'école Polytechnique de Montréal.

Pour décrire cette méthode, nous devons d'abord développer la loi de Darcy dans le cas d'un moule de section rectangulaire fixe. Dans ce cas, la vitesse d'un fluide incompressible ne varie pas en fonction de la position. En effet, la continuité de la vitesse dans le cas d'un tel moule montre la nullité du gradient de vitesse.

$$\frac{dV}{dx} = 0 \quad (2.10)$$

Aussi, si la vitesse est constante l'équation 2.3 simplifiée au cas d'une direction nous montre que le gradient de pression est constant. Autrement dit, la pression diminue linéairement entre le point d'entrée $(P_0(t), x_0)$ et le front du fluide $(P_f, x_f(t))$. En considérant, que la pression d'entrée est fixe en fonction du temps et que la position initiale est nulle, le gradient de pression peut s'écrire comme suit :

$$\frac{dP}{dx}(t) = -\frac{(P_0 - P_f)}{x_f(t)} \quad (2.11)$$

Lors de ces expériences Henry Darcy récupérait la vitesse de l'eau qui sortait d'une colonne de mesure. Seulement, il faut comprendre que la vitesse de l'écoulement d'une résine au travers d'un renfort est augmentée par la diminution de l'espace. En effet, le renfort prend une partie de l'espace du moule, ce qui diminue la section où s'écoule la résine. La porosité (ϕ) du renfort vient donc modifier la loi de Darcy. L'équation de Darcy peut s'écrire comme suit :

$$\frac{dx_f}{dt} = \frac{K \cdot (P_0 - P_f)}{\mu \cdot \phi \cdot x_f} \quad (2.12)$$

Pour résoudre cette équation différentielle il faut réorganiser les termes. Ensuite, elle est résolue par intégration.

$$\int_0^{x_f} dx_f = \int_0^t \frac{K \cdot (P_0 - P_f)}{\mu \cdot \phi} dt \quad (2.13)$$

$$\frac{x_f^2}{2} = \frac{K \cdot (P_0 - P_f)}{\mu \cdot \phi} t \quad (2.14)$$

Cette courte analyse de la loi de Darcy nous montre que, dans le cas d'un moule 1D, le temps pour que le front de résine atteigne la position x_f est donné par la formule suivante :

$$t = \frac{\mu \cdot \phi \cdot x_f^2}{2 \cdot K \cdot (P_0 - P_f)} \quad (2.15)$$

Grâce à l'équation 2.7, il est possible de remonter à la perméabilité d'en renfort. Le banc d'essai mis au point par Ferland est un moule à section rectangulaire fixe possédant un capteur de pression relatif situé juste en amont du renfort. L'idée de la méthode est de prendre un ensemble de temps de passage pour différentes distances et ainsi récupérer un ensemble de valeur de perméabilité instantanée. L'ensemble de ces valeurs est ensuite traité pour obtenir la valeur de la perméabilité du renfort dans la direction testée.

2.5 Perméabilité équivalente

La perméabilité équivalente est une notion apparue suite à l'étude de l'impact de canaux préférentiels sur l'imprégnation des renforts. Un canal préférentiel est un espace entre une paroi du moule (généralement un côté) et le renfort. La résine s'écoule plus facilement dans ce genre d'espace, ce qui peut provoquer l'apparition de zones sèches. En effet, si la résine passe par un canal préférentiel, elle peut accéder plus vite au port d'évent et emprisonner l'air présent dans le renfort.

Les travaux de Hammami et Al. [18] montrent que dans un canal préférentiel, il est possible d'utiliser la loi de Darcy pour définir l'écoulement de la résine. Après plusieurs simplifications, l'équation de Navier-Stokes permet de définir la perméabilité du canal

utile à la résolution de la loi de Darcy. Le raisonnement fait par Hammani et Al. permet d'écrire la perméabilité équivalente d'un canal préférentiel sous la forme suivante :

$$k_c = \frac{d^2}{12} \quad (2.16)$$

où k_c est la perméabilité équivalente et d la largeur du canal préférentiel.

Lee et Fong [19, 20] ont également montré qu'en considérant l'écoulement dans le canal préférentiel comme un écoulement de type Poiseuille, il est possible de donner une autre expression à la perméabilité équivalente.

$$k_{c2} = \frac{R^2}{8} \quad (2.17)$$

où R est le rayon équivalent du canal, qui s'exprime en fonction de la largeur (d) et la hauteur (h) du canal préférentiel. La seconde expression de la perméabilité équivalente peut s'écrire alors comme suit :

$$k_{c2} = \frac{h \cdot d}{8\pi} \quad (2.18)$$

Cette notion de perméabilité équivalente peut être utilisée pour déterminer le débit transversal de la résine dans le renfort. Hammami et Al. ont montré que la présence d'un canal préférentiel peut produire plusieurs modes d'imprégnation du renfort. Le mode se détermine grâce au facteur de débit transversal (η).

$$\eta = \frac{12 \cdot k_y}{d^2} \cdot m \quad (2.19)$$

où k_y est la perméabilité transversale du renfort utilisé. m est défini par Adams [21] comme suit :

$$m = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad (2.20)$$

où k_x est la perméabilité longitudinale du renfort

Plus le facteur de débit transversal est élevé, moins le canal préférentiel aura d'impact sur l'imprégnation, c'est-à-dire que l'imprégnation du renfort ne sera que légèrement modifiée.

Nous verrons plus loin que dans le cas de l'injection flexible, la notion de perméabilité revêt un caractère important du fait de la formation d'un interstice dans le moule.

2.6 Compressibilité, loi de Terzhagi et relaxation

Compressibilité

Lorsqu'un renfort fibreux est soumis à une contrainte, il se comprime. Ce phénomène de compaction dû à la porosité du renfort suit un comportement particulier. La loi de compressibilité d'un renfort fibreux lie le taux volumique de fibres à la contrainte qui lui est appliquée. Cette relation s'exprime mathématiquement par une loi de puissance [22]. L'équation suivante montre la forme générale de la loi de compressibilité des renforts fibreux.

$$V_f = A * \sigma_c^B \quad (2.21)$$

où A et B sont des coefficients que l'on détermine expérimentalement.

La Figure 2.1 donne l'allure type d'une courbe de compression. Cette figure montre qu'au début de l'essai la contrainte appliquée croît faiblement avec l'augmentation du

taux de fibres. Progressivement l'augmentation devient plus rapide jusqu'à atteindre une asymptote verticale, correspondant à un taux de fibres maximum.

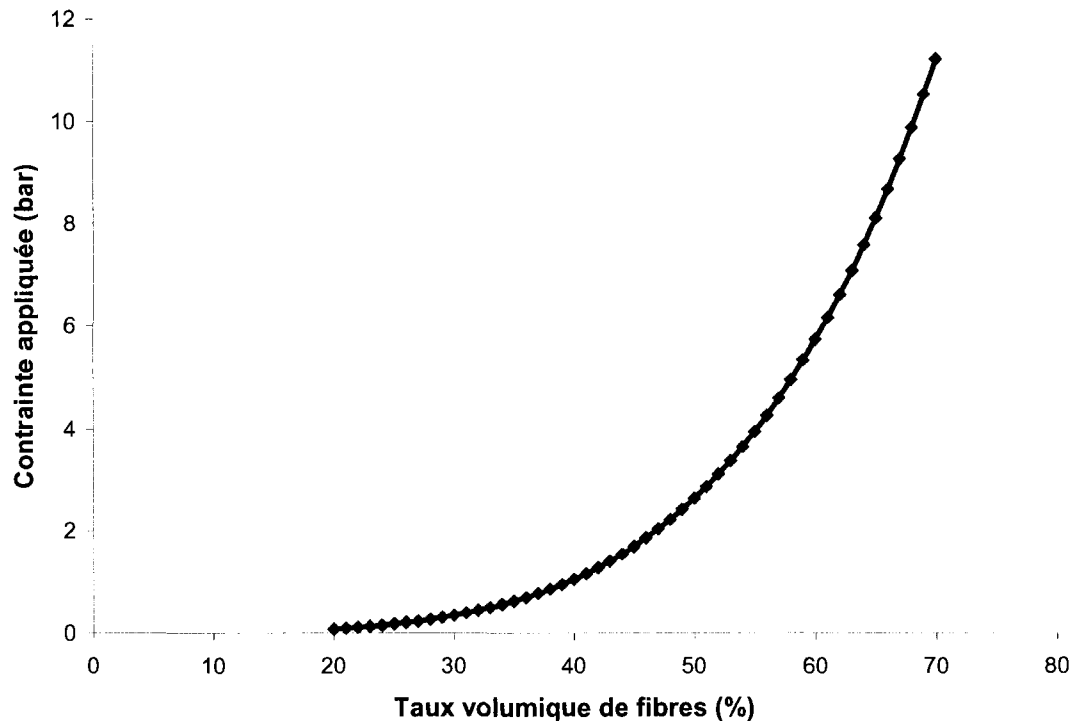


Figure 2.1 Courbe de compaction typique d'un renfort fibreux.

Les travaux de Robitaille et Gauvin [23] ont montré que cette augmentation progressive de la contrainte nécessaire pour atteindre un certain taux de fibres, provient de la transition du contact inter-fibres qui passe d'un état ponctuel à linéaire. La surface de contact entre les fibres croît très rapidement ce qui limite leur déplacement et nécessite des contraintes plus importantes.

La notion de compressibilité ne se limite pas à la compaction du renfort. Si la contrainte appliquée au milieu fibreux est relâchée, le renfort se décomprime. Cette décompression s'exprime également par une loi de puissance. Cependant, elle ne suit pas la même trajectoire. On observe ici un effet d'hystérésis dû au phénomène de glissement des

fibres. Un cycle de compressibilité correspond à la compression et à la décompression du renfort.

Un autre effet d'hystérésis est visible lors d'une succession de cycle de compressibilité [24]. Comme le montre la Figure 2.2 la rigidité du renfort augmente avec le nombre de cycle de compressibilité. Ce phénomène se traduit par un décalage du cycle de compaction vers des taux de fibres plus élevés.

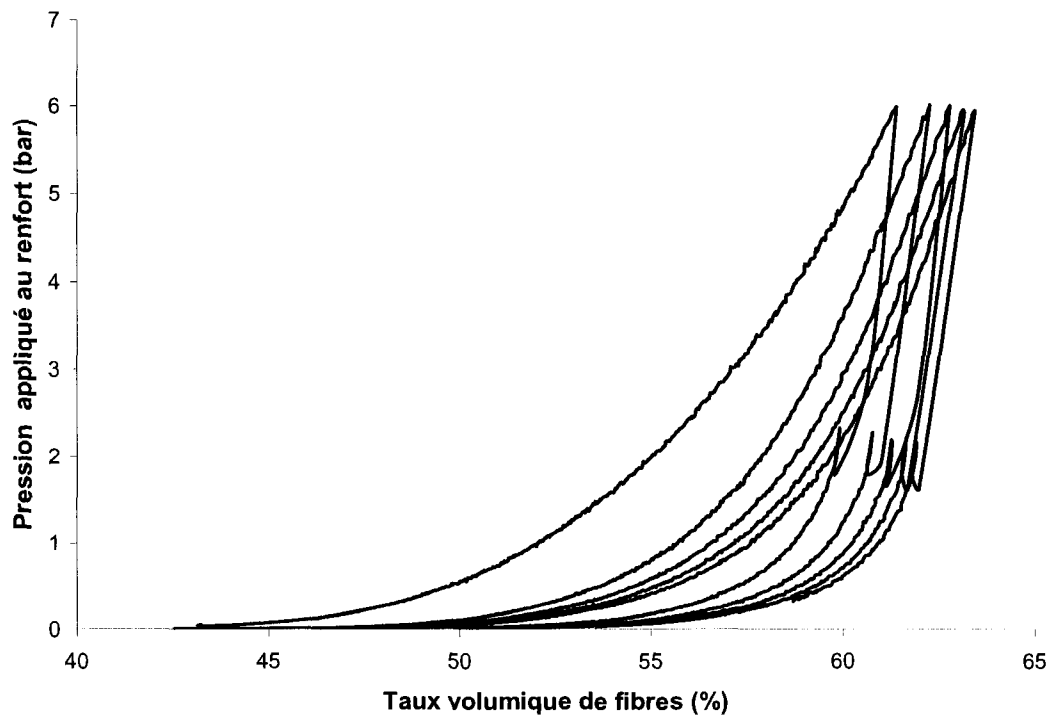


Figure 2.2 Cycles de compressibilité.

Terzhagi

La loi de Terzhagi [25] spécifie que la pression appliquée (P_{appl}) à un renfort saturé de résine non polymérisée est égale à la somme de la contrainte reprise par le renfort (σ_{renf}) et de la pression statique supporté par la résine ($P_{résine}$).

$$P_{appl} = \sigma_{renf} + P_{résine} \quad (2.22)$$

À l'aide d'un essai de compressibilité, il est possible de déterminer la contrainte reprise par le renfort. La quantité de résine injectée dans le renfort permet de connaître le taux volumique de fibres du composite. La courbe de compaction permet alors de déterminer la contrainte supportée par le renfort. De la loi de Terzhagi, il est ensuite possible de déduire la pression statique de la résine. La Figure 2.3 illustre la répartition des efforts au sein du composite, dans le cas d'une pièce à 50 % de taux volumique de fibres et pour une pression d'application de 6 bars.

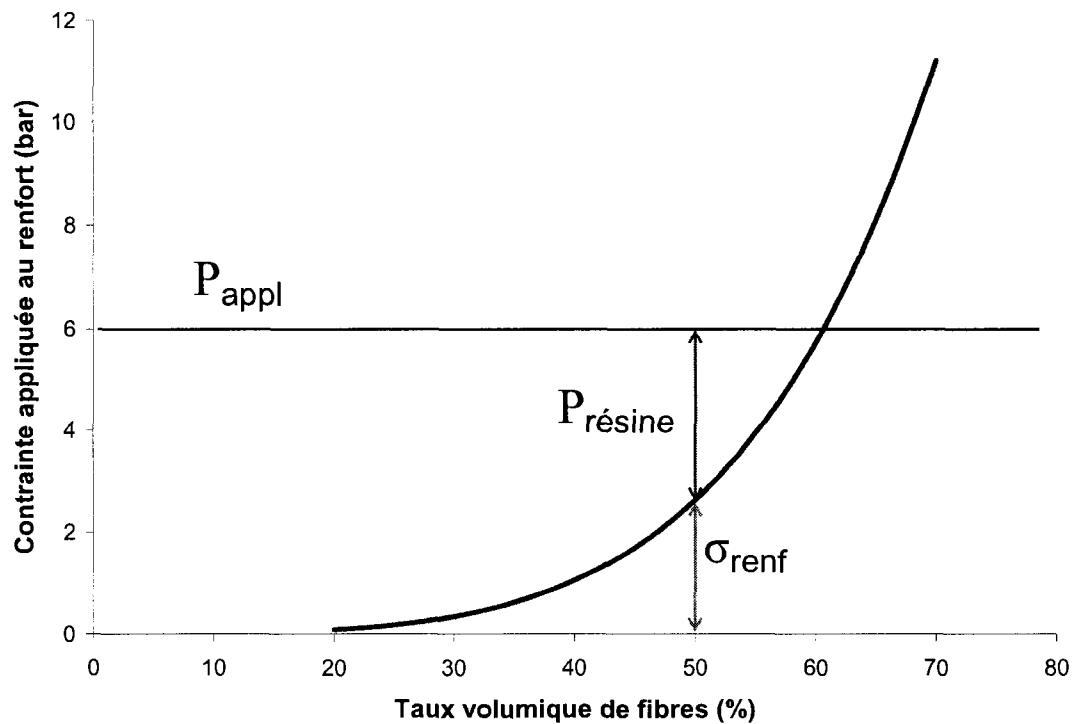


Figure 2.3 Relation d'équilibre de Terzhagi.

Relaxation

Lors de la fabrication d'une pièce composite un autre phénomène entre en jeu : la relaxation. La répartition de contrainte dont nous venons de définir la relation, varie en fonction du temps. En effet, un transfert de charge s'effectue entre le renfort et la résine. Suite à la compression du renfort, il peut se produire un glissement relatif des fibres, ce qui, pour un taux de fibres donné, implique la réduction de la contrainte reprise par le renfort. Pour une pression d'application constante cette diminution de pression se traduit par une augmentation de la pression de la résine.

Le phénomène de relaxation est fonction de la rapidité de la phase de compaction. Lors d'une compaction lente, un positionnement relatif des fibres plus stable a le temps de s'effectuer. À ce moment, les contraintes internes, gouvernant le glissement relatif des fibres, diminuent et limitent ainsi la relaxation du renfort. Pour cette raison, les tests de compressibilité se déroulent à vitesse lente.

Les expérimentations de Robitaille et Gauvin [22] ont permis d'exprimer la relaxation d'un composite en fonction du temps, sous la forme suivante :

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 - C \cdot t^{(1/D)} \quad (2.23)$$

où σ est la contrainte reprise par le renfort, σ_0 celle appliquée au composite et C et D sont des coefficients obtenus expérimentalement.

CHAPITRE 3 : DESCRIPTION DU PROCÉDÉ D'INJECTION FLEXIBLE

3.1 Introduction

Ce chapitre décrit le procédé d'injection flexible qui fait l'objet de cette étude. Dans ce chapitre, il sera également question du moule transparent utilisé dans les essais expérimentaux. Pour mieux comprendre les résultats et déterminer les limites de leur interprétation, les descriptions du moule et des étapes successives d'une injection flexible sont importantes.

3.2 Procédé d'injection flexible

3.2.1 Objectif du procédé

Les matériaux composites sont utilisés de plus en plus couramment dans l'industrie automobile pour la fabrication de pièces comme les planchers, des pièces d'habitacle et certains éléments de carrosserie. La mise en œuvre à faible coût énergétique de pièces de forme complexe constitue un objectif important pour généraliser l'emploi des matériaux composites. La quantité d'énergie nécessaire pour la fabrication de pièces en matériaux composites à matrice thermodurcissable est 40 fois plus faible qu'avec l'utilisation de métaux et 100 fois plus faible qu'avec l'utilisation de polymères thermoplastiques [1].

Pour obtenir les cadences de production de masse, il est nécessaire de développer de nouveaux procédés, car les technologies actuelles sont limitées en volume. Le procédé RTM reste le plus répandu, car plus facile à mettre en œuvre. Cependant, ce procédé ne permet de fabriquer que quelques milliers de pièces par an. Pour faire une percée dans le domaine automobile, le nouveau procédé d'injection flexible qui est le sujet d'étude de ce mémoire, vise des cadences de production d'au moins 20 000 pièces par an.

La fabrication d'une pièce en composite se déroule en plusieurs étapes. L'injection à proprement dit représente plus 25% du temps du cycle de fabrication [2]. Les autres

étapes sont le positionnement du renfort dans le moule, la fermeture du moule, la cuisson de la pièce et finalement, le démoulage. C'est au niveau de l'étape d'injection que le procédé d'injection flexible établit une différence avec le procédé RTM. Les travaux d'Allard [26] ont déjà permis de rendre cette étape jusqu'à huit fois plus rapide que le procédé RTM.

Les études réalisées par Briones [27] et Allard [26] portaient sur l'imprégnation de mats à fibres aléatoires. Ce type de renfort ne peut servir qu'à la fabrication de pièces non structurales. Par conséquent, la suite logique du développement du procédé d'injection flexible est de travailler sur les renforts tissés afin de réaliser des pièces structurales et semi-structurales. Le présent mémoire se propose d'étudier la performance du procédé d'injection flexible pour des composites renforcés par des tissus en fibres de verre.

3.2.2 Description du procédé

Le procédé d'injection flexible consiste à introduire une résine thermodurcissable dans la chambre d'injection où est disposé le renfort. Une autre cavité, la chambre de compaction, est séparée hermétiquement de la première par une membrane silicone. La chambre de compaction est située au dessus de la chambre d'injection. La résine est d'abord introduite dans la chambre d'injection. Ensuite, un fluide de compaction est injecté dans la chambre de compaction. Le fluide de compaction disperse la résine et aide à compléter l'imprégnation du renfort. Une fois l'injection terminée, la mise sous pression du fluide de compaction permet la consolidation du composite. Les différentes étapes de fabrication sont décrites ici plus longuement dans le cas des renforts tissés.

3.2.2.1 Description d'un moule d'injection flexible

La chambre de compaction constitue un des points originaux et novateurs du procédé d'injection flexible. En effet, l'utilisation d'un fluide de compaction lors de l'injection nécessite une seconde chambre, qui doit être hermétiquement séparée de la chambre d'injection au moyen d'une membrane imperméable. La Figure 3.1 montre un schéma des différentes composantes nécessaires pour fabriquer un moule rectangulaire

permettant d'évaluer la performance de cette nouvelle approche. La base du moule forme la chambre d'injection et permet le positionnement d'un renfort fibreux. Le contre-moule délimite la chambre de compaction. Chacune des chambres doit être munie d'un port d'injection et d'un évent.

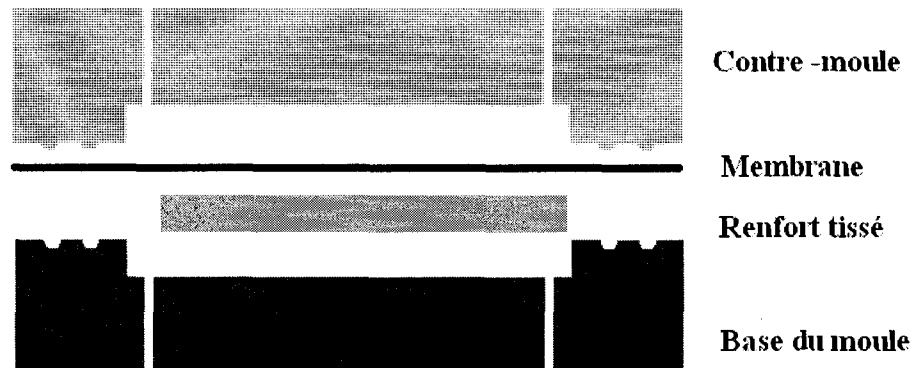


Figure 3.1 Description des différentes composantes d'un moule d'injection flexible.

Le moule est fermé (Figure 3.2) et la préforme est disposée de façon à laisser un espace libre pour l'entrée de résine. Cette disposition de la préforme permet à la résine d'entrer dans le moule le plus rapidement possible.

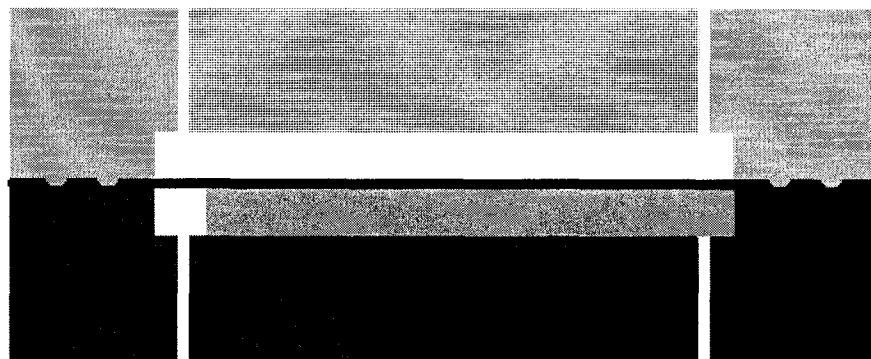


Figure 3.2 Fermeture du moule.

3.2.2.2 Mise sous vide

Il est possible de tirer le vide dans les deux chambres (Figure 3.3). De manière générale, il est préférable d'établir la plus haute pression de vide dans la chambre de compaction pour éviter de compacter trop le renfort contenu dans la chambre d'injection et faciliter ainsi l'écoulement de la résine dans le moule. Puisque les renforts tissés ont une compressibilité faible, ils gardent leur épaisseur de préformage, lorsque la pression de vide colle la membrane sur la face supérieure de la cavité. Un interstice entre le renfort et la membrane est alors créé. Lorsque la résine est injectée dans le moule, elle peut alors progresser sans contrainte. De cette manière, le système nécessite un moindre apport d'énergie pour injecter la résine.

La chambre d'injection peut également être mise sous vide pour permettre une diminution de la quantité d'air présent dans le renfort et décroître ainsi le volume des micro-porosités du composite.

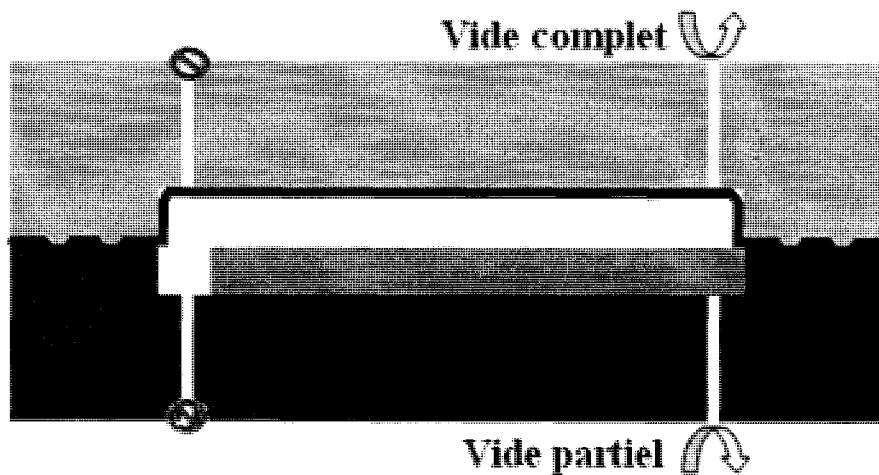


Figure 3.3 Mises sous vide des chambres du moule d'injection flexible.

3.2.2.3 Injection de la résine

Au moment de l'injection, une quantité déterminée de résine correspondant au taux de fibres désiré est introduite dans le moule. La résine s'écoule alors naturellement au dessus du renfort fibreux, car la perméabilité équivalente de l'interstice est considérablement plus élevée que celle du renfort. Comme le montre la Figure 3.4, la résine commence en même temps à imprégner progressivement le début et la couche supérieure du renfort.

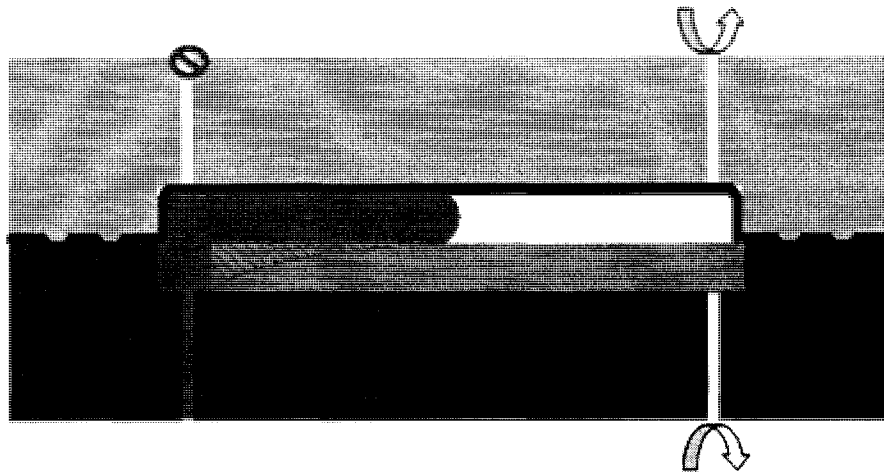


Figure 3.4 Injection de la résine dans le moule.

3.2.2.4 Injection du fluide de compaction

Cette étape commence immédiatement après l'introduction de la résine. Le fluide de compaction est injecté avec une pression précise. Sa viscosité est aussi connue. Le fluide de compaction applique alors à la résine une pression qui permet l'imprégnation du renfort. Lorsque la résine arrive à l'évent, ce dernier est fermé. Il en est de même pour le fluide de compaction. La Figure 3.5 illustre l'effet du fluide de compaction sur la résine.

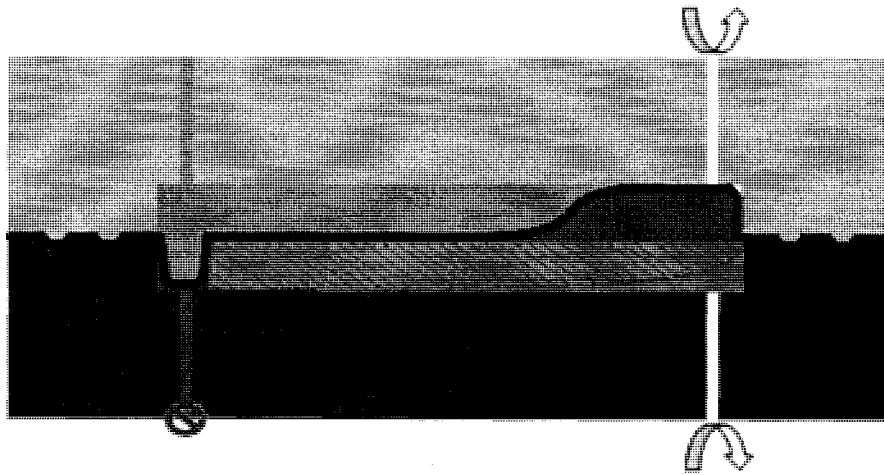


Figure 3.5 Injection du fluide de compaction.

3.2.2.5 Consolidation et polymérisation du composite

Lorsque les deux évents sont fermés, l'écoulement du fluide de compaction est interrompu. Il applique donc une pression statique uniforme sur le renfort saturé (Figure 3.6). Ce qui permet d'équilibrer la distribution de la résine dans la pièce. Un tel équilibre est important afin d'obtenir des pièces d'épaisseur constante.

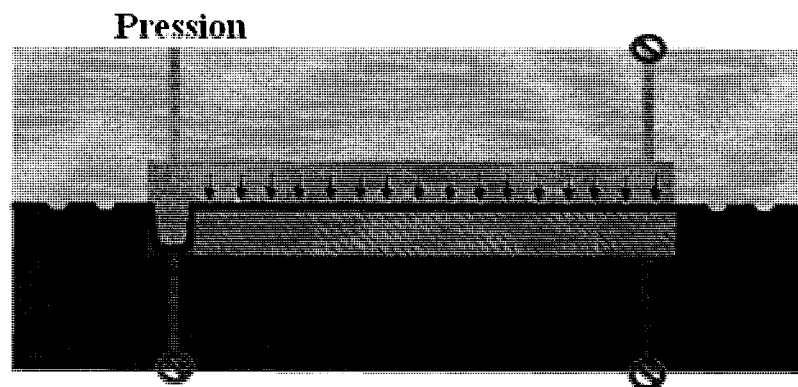


Figure 3.6 Consolidation de la pièce composite.

3.2.2.6 Démoulage de la pièce composite

Lorsque la pièce est totalement polymérisée, il faut alors évacuer le fluide de compaction soit avec de l'air comprimé ou bien par aspiration. Ensuite le moule est ouvert, la membrane est enlevée et la pièce est démoulée (Figure 3.7). Le cycle de fabrication est alors terminé.

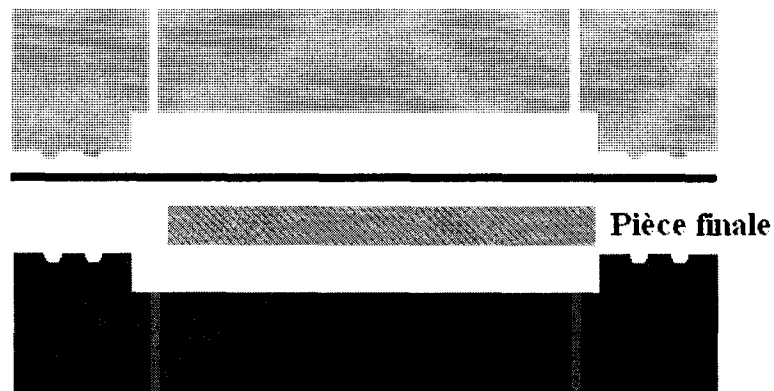


Figure 3.7 Démoulage de la pièce composite.

3.2.3 Avantages et inconvénients du procédé d'injection flexible

Le procédé d'injection flexible combine des caractéristiques de plusieurs autres procédés. La compression du renfort par le fluide de compaction entraîne une imprégnation du renfort qui est voisine de celle du procédé d'injection-compression. L'assistance de l'injection par une pression de vide est analogue au principe de fonctionnement de l'infusion, de même que l'utilisation d'une membrane flexible pour séparer les chambres d'injection et de compaction.

Les principaux avantages et inconvénients du procédé d'injection flexible peuvent être énumérés comme suit.

Avantages

- Imprégnation très rapide du renfort.
- Faible consommation énergétique pour l'injection de résine.
- Pression uniforme sur une des surfaces du composite, qui aide à la consolidation.
- Imposition du vide dans la chambre d'injection, ce qui améliore la qualité des pièces fabriquées.
- Moule fermé qui répond à des exigences sanitaires strictes.

Inconvénients

- Mauvais état de surface, côté membrane.
- Nécessite un plus grand nombre d'équipements pour l'injection des différents fluides.
- Beaucoup de paramètres entrent en jeu, ce qui complexifie le procédé et rend sa maîtrise plus difficile.

3.3 Moule transparent

Tous les travaux expérimentaux décrits dans ce mémoire ont été réalisés sur un moule spécialement conçu pour l'étude du procédé d'injection flexible à température ambiante. La principale caractéristique est de disposer ici un contre-moule en plexiglas qui permet l'observation de l'avancée du front de résine, puis celle du fluide de compaction. La section ci-dessous présente le moule ainsi qu'une description de ses limites d'utilisation.

3.3.1 Description du moule transparent

La Figure 3.8 montre une photo du moule. Le contre-moule transparent permet d'observer toutes les étapes de l'injection.

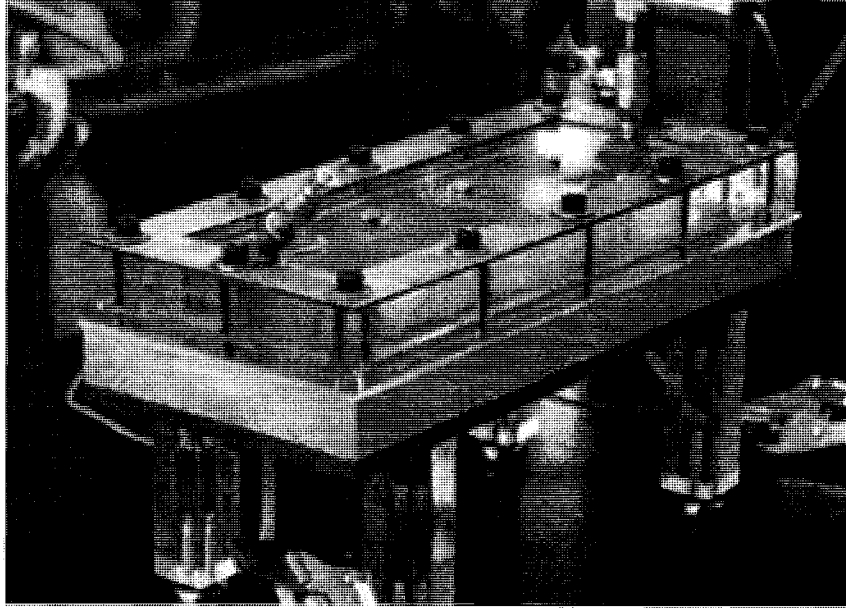


Figure 3.8 Photographie du moule transparent.

La Figure 3.9 montre une représentation 3D du moule en position ouvert, qui permet de distinguer les différentes composantes du moule : la base du moule en aluminium 6061-T6, le contre-moule en PMMA (polyméthylméthacrylate ou plexiglas), la membrane transparente en silicone et l'un des cadres conçus avec le moule. La base du moule n'a pas été réalisée en PMMA, car ce matériau ne résiste pas aux agressions chimiques du styrène, présent dans la résine. Lors de la conception du moule transparent, Briones [27] a réalisé cinq cadres en PMMA et d'épaisseurs différentes. Les cadres sont numérotés de 1 à 5 et leurs épaisseurs sont respectivement de 3.175 mm (1/8 po), 6.35 mm (1/4 po), 7.938 mm (5/16 po), 9.525 mm (3/8 po) et 15.875 mm (5/8 po). Ils sont conçus pour fabriquer des pièces de 375 mm par 125 mm.

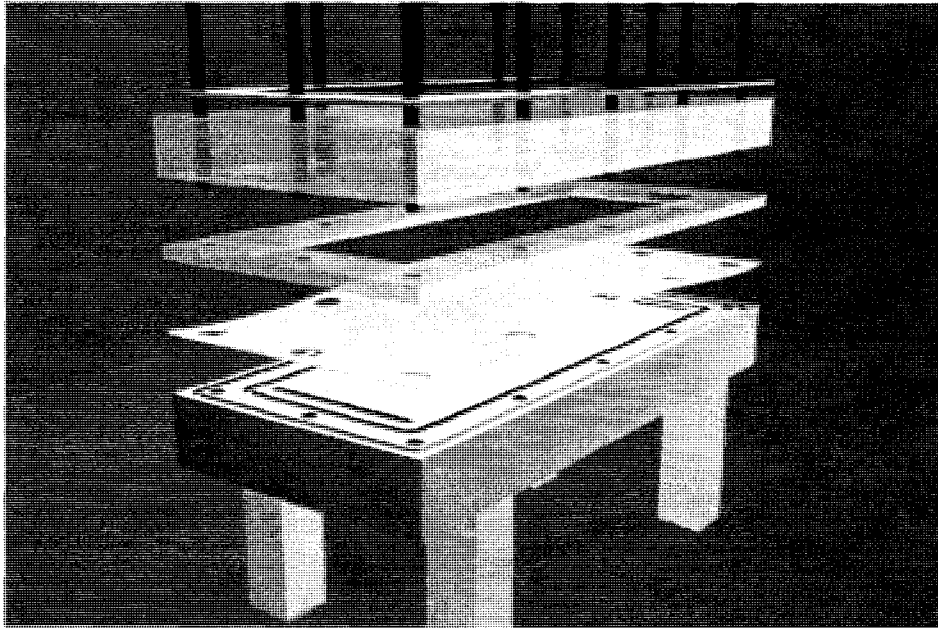


Figure 3.9 Composante du moule transparent.

L'épaisseur des deux chambres est déterminée par le cadre. Les cadres en PMMA sont tous conçus sur le même modèle (Figure 3.10). L'encoche qui sert à maintenir le renfort correspond à $\frac{1}{3}$ de l'épaisseur totale.

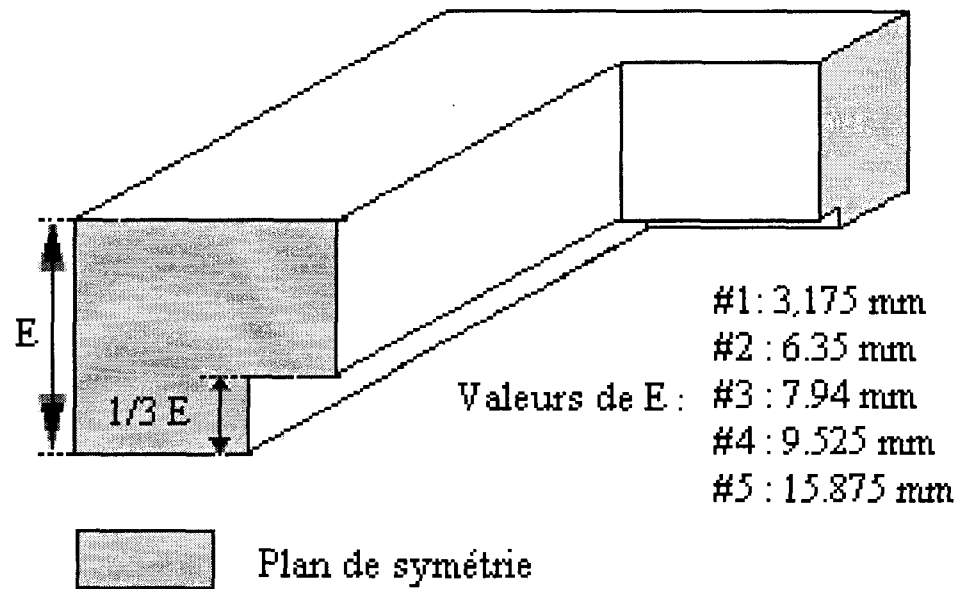


Figure 3.10 Cadre en PMMA.

Le renfort est placé entre la base du moule en aluminium et la membrane. La Figure 3.11 décrit la mise en position et le maintien du renfort par le cadre. Cette figure montre également l'espace libre produit par la pression de vide. On observe que le renfort est comprimé par le cadre, ce qui augmente le taux de fibres et rend le serrage plus difficile. Pour un cadre donné, il y a donc une épaisseur maximale de renfort utilisable.

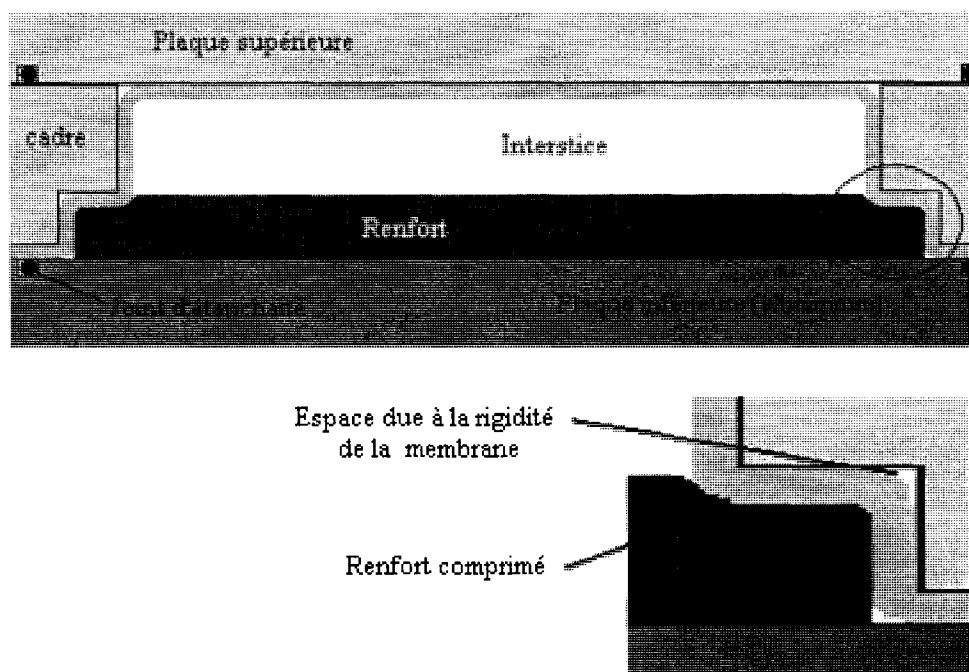


Figure 3.11 Maintien du renfort tissé.

La fermeture du moule est effectuée manuellement à l'aide de 12 boulons selon un ordre préétabli, pour s'assurer de l'étanchéité par un serrage le plus uniforme possible. Chaque boulon doit être serré avec un couple de 17 N.m. La Figure 3.12 montre l'ordre utilisé pour serrer les boulons du moule transparent.

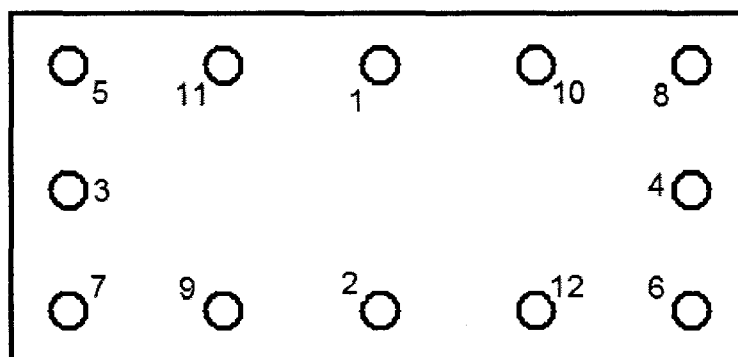


Figure 3.12 Ordre de fermeture.

3.3.2 Limites d'utilisation du moule

Les résultats obtenus avec le moule transparent ne sont pas applicables, lorsque certains paramètres sont en dehors des limites expérimentales du moule. Le moule transparent a plusieurs limites de nature géométrique, mécanique et thermodynamique.

3.3.2.1 Taille

L'objectif du nouveau procédé d'injection flexible est de permettre la production de pièces composites à plus haut volume que les procédés actuels. Il doit donc assurer de faible temps d'injection, et cela pour des pièces aussi grandes que des capots de voiture. Les études réalisées par Briones [27] et Allard [26] sur le moule transparent portaient sur la fabrication de pièces de petite taille. En effet, les pièces fabriquées avec le moule transparent sont de 360 mm sur 125 mm (Figure 3.13). D'autre part, aucune étude n'a montré que le procédé se comporte de la même manière pour des pièces de différentes dimensions. Par conséquent, le cadre d'application des résultats obtenus avec le moule transparent est limité aux pièces de petite taille.

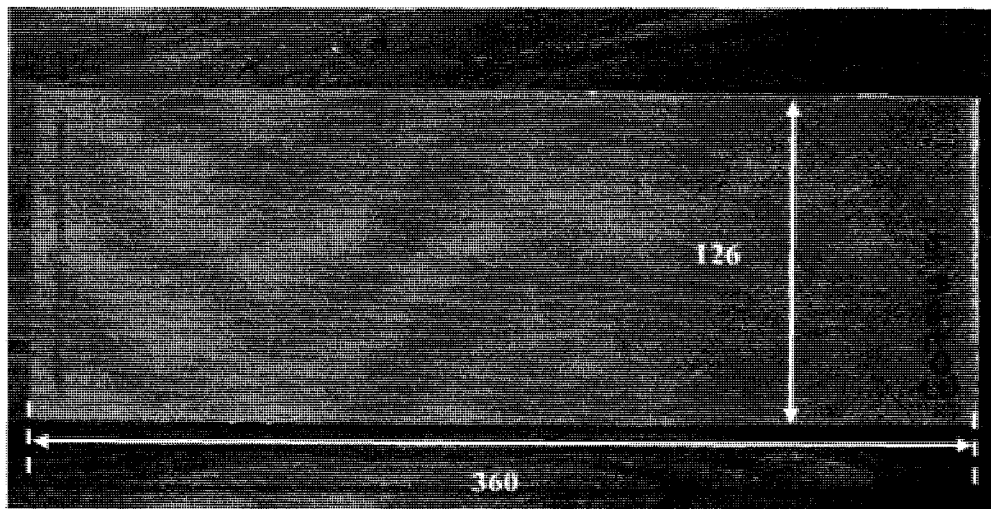


Figure 3.13 Dimension d'une pièce fabriquée avec le moule transparent.

3.3.2.2 Pression

Le contre-moule étant en plexiglas, un matériau très rigide, donc fragile, sa résistance mécanique n'est pas adaptée à des pressions supérieures à 8 bars. Aussi, pour des raisons de sécurité, la pression limite à l'intérieur du moule est de 6 bars. Ce moule ne permet donc pas d'étudier les modes d'injection à haute pression.

3.3.2.3 Température

Il n'y a pas de système de chauffage adapté au moule transparent. Ceci limite les temps de gel et de polymérisation des pièces fabriquées. Outre le fait de ne pas pouvoir fabriquer des pièces en série, la fabrication à température ambiante ne permet pas de diminuer la viscosité de la résine. Or la viscosité des résines thermodurcissables diminue avec l'augmentation de la température (jusqu'au début de la polymérisation) [28]. Ce phénomène modifie la performance de l'injection flexible. On verra plus loin que les résultats dépendent de la viscosité de la résine. Puisque le moule n'a pas la capacité d'être chauffé, les discussions et résultats de ce mémoire ne s'appliquent qu'au cas de fabrications à température ambiante.

3.3.3 Données observées

Lors d'une injection réalisée avec le moule transparent, plusieurs types de données ont été obtenus. Le contre-moule en plexiglas permet d'observer le déroulement de l'injection et de l'analyser avec un enregistrement vidéo. D'autres données sont récupérées pendant l'injection et sur les pièces après démoulage.

3.3.3.1 Observations visuelles

Chaque injection est filmée en vue de dessus (Figure 3.14). À l'aide du logiciel AVIMECA, le déplacement de la résine dans le moule est analysé. Ce logiciel de pointage vidéo permet l'enregistrement des coordonnées cartésiennes planes de points situés sur un objet en mouvement. Dans le cas du moule transparent, ce logiciel permet

d'obtenir les positions des fronts de la résine et du fluide de compaction pendant l'injection.

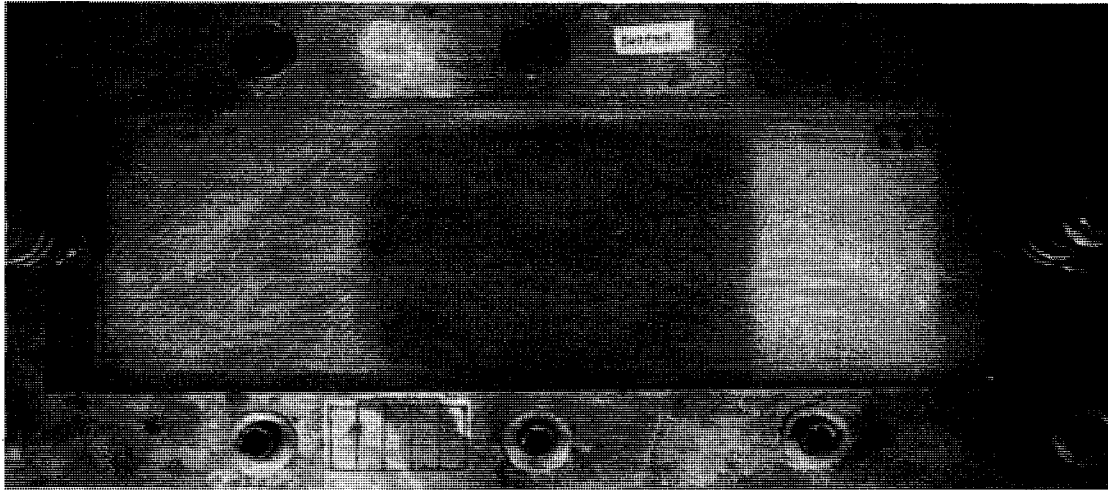


Figure 3.14 Capture vidéo en vue de dessus.

La Figure 3.15 montre l'interface du logiciel lors de l'enregistrement des coordonnées du front de résine dans le temps. Ces coordonnées sont déterminées par rapport à un repère fixe dans le temps. Il faut donc s'assurer que la caméra et le moule ne bougent pas.

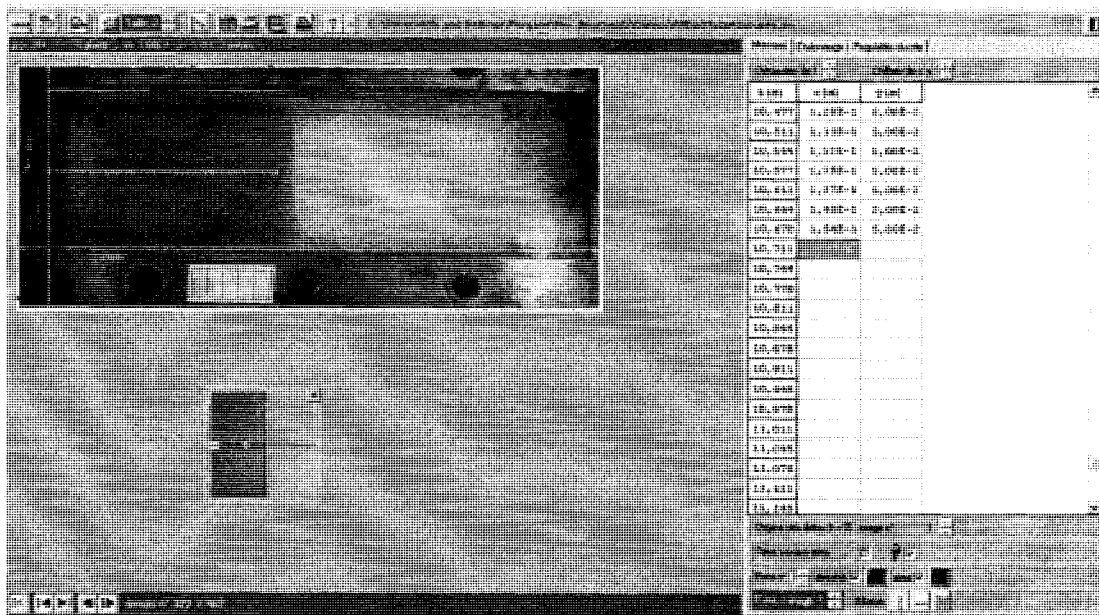


Figure 3.15 Interface du logiciel AVIMECA.

L'utilisation de ce logiciel permet de faire plusieurs observations, comme la position du front de résine après à la fin de son injection ou encore le temps d'injection. Il est également facile d'extraire les vitesses des deux fluides afin d'étudier l'influence des différents paramètres du procédé sur l'imprégnation du renfort pendant l'injection. La Figure 3.16 donne un exemple de courbes des positions des fronts de résine et du fluide de compaction en fonction du temps. L'axe des ordonnées correspond à la position du front dans le moule avec, comme origine, les ports d'entrée des fluides. Une courbe typique représentant le front de résine se décompose en trois parties : une première décrit l'entrée de la résine, une seconde correspond à un temps mort et la dernière correspond à l'avancement de la résine sous l'effet de la pression imposée par le fluide de compaction. Le temps mort correspondant au temps nécessaire à la fermeture du port d'injection de résine et l'ouvrir de la valve du fluide de compaction.

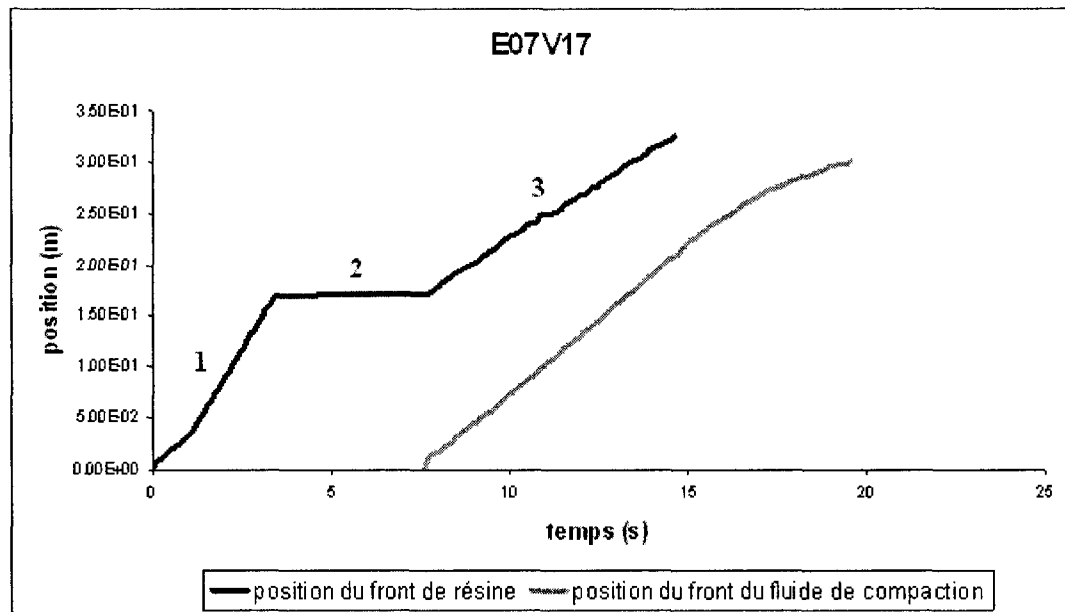


Figure 3.16 Exemple de courbe obtenue à l'aide du logiciel AVIMECA.

3.3.3.2 Pression du fluide de compaction

Un capteur de pression est placé à l'entrée de la chambre de compaction. Il permet de constater l'évolution de la force statique que délivre le fluide pendant l'injection. La photographie de ce capteur (Figure 3.17) montre sa position exacte sur la ligne, c'est-à-dire en aval d'une valve à bille qui permet l'injection du fluide de compaction.

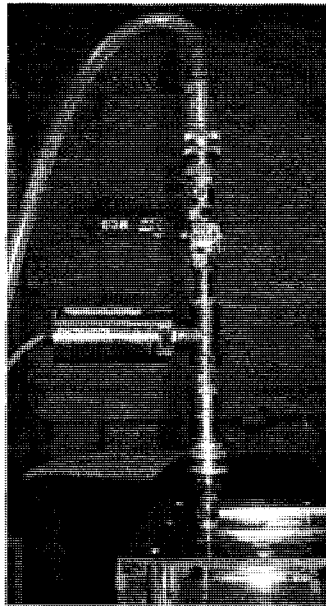


Figure 3.17 Position du capteur de pression sur la conduite du fluide de compaction.

Ce capteur de pression donne un certain nombre d'indications sur le déroulement de l'injection. Si l'on trace le graphique de la pression en fonction du temps, on obtient une courbe caractéristique avec les paliers successifs qui apparaissent sur la Figure 3.18. Le premier palier (1) correspond à la pression statique à l'entrée du moule pendant l'avancée de la résine. Ce palier se termine quand la résine vient buter au fond du moule. Le deuxième palier (2) correspond à l'imprégnation de la préforme par la résine jusqu'à ce que le fluide de compaction atteigne l'évent. Le troisième palier (3) correspond au passage du fluide de compaction dans la restriction de section de l'évent, qui provoque une augmentation de la pression statique. Le dernier palier (4) correspond à la fermeture de l'évent de la chambre de compaction. Le pot de pression impose alors une pression de 6 bars dans toute la chambre de compaction.

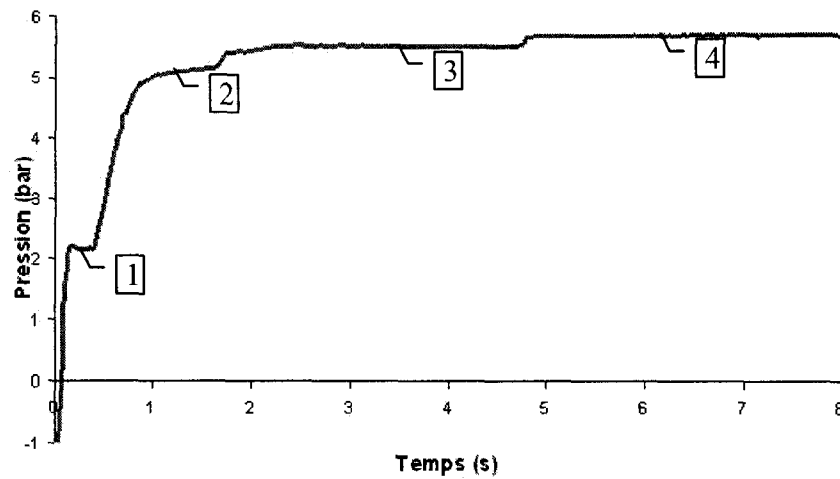


Figure 3.18 Évolution de la pression pendant l'injection.

3.3.3.3 Épaisseur des pièces fabriquées

Une observation à l'œil nu ne permet pas de déceler l'inhomogénéité dans l'épaisseur des pièces fabriquées. Deux méthodes sont utilisées pour mesurer précisément l'épaisseur. La première utilise une machine de mesure tridimensionnelle (MMT), et la seconde un micromètre analogique. Ces deux techniques mettent en évidence les variations d'épaisseur sur la longueur des pièces. Ces méthodes sont décrites dans les différents plans d'expérience qui suivent.

3.4 Conclusion

Les trois principales étapes du procédé d'injection flexible ont été décrites dans la première partie du chapitre. Il faut d'abord injecter la quantité exacte de résine pour obtenir un composite avec le taux de fibres désiré. Une fois l'injection de la résine réalisée, le port d'entrée de résine est fermé et celui du fluide de compaction ouvert pour permettre à la résine d'imprégner tout le renfort. Lorsque la résine et le fluide de compaction ressortent par leurs événements respectifs, ces derniers sont fermés. Seul le port d'entrée du fluide de compaction reste ouvert. Le fluide de compaction applique ainsi une pression uniforme sur la surface de la pièce par l'intermédiaire de la membrane. La pression créée dans la résine favorise alors l'imprégnation de la pièce et tend à diminuer le taux de vide.

La transparence du contre-moule a montré qu'un certain nombre de données pouvaient être obtenues à partir de l'enregistrement vidéo : les vitesses des fronts de résine et du fluide de compaction et l'avancement de ces mêmes fronts. Enfin, la connaissance de la pression statique du fluide de compaction et les mesures d'épaisseur permettent d'affiner les analyses.

Il reste toutefois des limites sur les conclusions qui peuvent être tirées des résultats obtenus à l'aide du moule transparent. La taille des pièces fabriquées détermine les pressions requises pour l'injection de la résine et du fluide de compaction, qui gouvernent le temps d'injection. L'absence de système chauffant dans le moule transparent ne permet pas d'anticiper les résultats dans un moule chauffé, car la viscosité de la résine, qui dépend de la température, peut modifier significativement le comportement de l'injection flexible. Finalement, l'utilisation du moule est limitée à une pression du fluide de compaction de 6 bars. L'application d'une pression plus importante pourrait éventuellement changer le comportement du procédé.

CHAPITRE 4 : UTILISATION DE RENFORTS TISSÉS

4.1 Introduction

Les travaux de Briones [27] et d'Allard [26] sur le procédé d'injection flexible traitent de renforts à fibres aléatoires (mats en fibres de verre). Ce chapitre présente les raisons pour lesquelles des renforts tissés ont été utilisés plutôt que des mats. Ce changement du type de renforts s'inscrit à la fois dans la ligne des besoins industriels et dans les objectifs de développement du procédé d'injection flexible. Finalement, un plan d'expérience, qui vise à mettre en évidence les différences de comportement de l'injection flexible selon que l'on utilise des mats ou des tissus est analysé. Les paramètres de ce plan d'expérience sont déterminés à l'aide des résultats obtenus pour des mats à fibres aléatoires.

4.2 Passage aux renforts tissés

Les raisons de l'utilisation de renforts tissés sont doubles. D'une part, il s'agit d'un besoin industriel et d'autre part, ceci s'inscrit dans la progression logique du développement du procédé. L'industrie des matériaux composites utilise des mats et des tissus, mais de nombreuses applications nécessitent l'utilisation de matériaux performants, et donc de tissus.

4.2.1 Principales différences entre les deux types de renforts

La famille des mats à fibres de verre, se distingue de la famille des renforts tissés, notamment par le diamètre de leurs fibres. Les mats sont faits de fibres de verre courtes ou longues dont le diamètre varie entre 0.05 et 0.5 mm, alors que pour les tissus de fibres de verre, le diamètre des fibres se situe entre 10 et 20 μm .

Cette différence de diamètre ainsi que l'orientation des fibres, confères aux renforts tissés des taux de fibres plus élevés et une perméabilité sensiblement plus faible que les mats. Il est facile d'obtenir un taux de fibres de plus de 60 % avec un renfort tissé alors

qu'il s'avère compliqué d'obtenir un taux de fibres supérieur à 30 % avec un mat à fibres aléatoires (Tableau 4.1) [3]. Sachant que la résistance mécanique en traction d'un matériau composite provient essentiellement des fibres de verre, une pièce composite réalisée à partir d'un renfort tissé sera, pour une même épaisseur, plus résistante que si elle était fabriquée à partir de mats de fibres de verre.

Tableau 4.1 Taux de fibres maximum en fonction du type de renfort (DIGITIP p.21)

Architecture des fibres	Comportement mécanique recherché	Orientation de la tenue mécanique	Taux maximal de renfort	Type de fibres
Fibres coupées et broyées	Moyen	quelconque	30%	verre
Mats fibres coupées	Moyen	quelconque	30%	verre ou carbone
Mats fibres continues	Moyen	orientée	30%	verre
Fibres continues	Intermédiaire	unidirectionnelle	50 à 70%	toutes
Tissu	Fort	bi ou tri directionnelle	30 à 70%	toutes
Nappe	Très fort	Unidirectionnelle (Bi-directionnelle si superposition)	50 à 85%	toutes

Comme le montre l'équation 2.15 qui découle de la loi de Darcy, la perméabilité du renfort est un paramètre très important pour le temps d'injection. La perméabilité sensiblement plus faible des tissus rend leur imprégnation difficile et augmente les temps d'injections. Le Tableau 4.2 donne des exemples de perméabilités pour des mats et des tissus à fibres de verre. Il souligne également une perméabilité plus faible et cela à taux de fibres égal (ce qui nous l'avons vu est rarement le cas).

Tableau 4.2 Exemple de valeurs de perméabilité

Type de renfort	Volume de fibres (%)	Ordre de grandeur de la perméabilité (m ²)
tissu	35	2 E-10
	45	6 E-11
mat	20	1 E-9
	30	3 E-10
	35	1.5 E-10

Dans tous les procédés de mise en forme de pièces composites à matrice thermodurcissable, il faut donc s'attendre à des comportements d'imprégnation différents, lorsque que l'on utilise des tissus. La caractérisation du procédé d'injection flexible ayant déjà été réalisée pour des mats, il faut maintenant la faire pour des renforts tissés.

4.2.2 Limite d'utilisation des mats à fibres aléatoires

Dans les principales industries où les matériaux composites apportent une alternative intéressante à l'emploi des matériaux métalliques comme l'aéronautique, l'automobile et les bateaux de plaisance, la principale raison qui motive leur emploi est le gain de poids.

Dans le domaine aéronautique, ils permettent d'augmenter la charge utile des appareils en diminuant le poids de l'aéronef ou du véhicule (militaire). Les conditions d'utilisation des composites requièrent de bonnes caractéristiques mécaniques. Les composites utilisés dans ce domaine sont donc le plus souvent renforcés par des tissus orientés. Dans un avion, les renforts sous forme de mats ne sont utilisés que pour la fabrication de pièces d'habillage interne. Les renforts tissés sont de plus en plus utilisés pour la fabrication de pièces primaires, comme la voilure ou encore le fuselage.

Le domaine automobile utilise depuis les années 80 les matériaux composites, principalement aux États-Unis. Une voiture américaine est composée en moyenne de 113 kg de composites contre 30 kg en Europe [3]. Les matériaux composites utilisés dans le domaine automobile sont en grande partie des thermoplastiques renforcés de

granules, et non pas des mats ou des renforts tissés. Ces composites se retrouvent principalement dans de pièces d'habillage ou les pare-chocs. Les grandes compagnies automobiles travaillent de plus en plus au développement de procédés rapides d'injection sur des renforts tissés afin d'élargir le champ d'application des composites aux pièces structurales. Les tissus permettent de fabriquer une grande gamme de pièces, comme l'ensemble de la carrosserie. Pour actualiser la promesse des composites dans ce domaine, il faut casser le verrou technologique qui empêche la production de masse de ce genre de pièces.

Dans le secteur nautique, les mats à fibres de verre restent le standard. En plus du gain de poids pour une résistance équivalente, les matériaux composites permettent de fabriquer de grandes pièces de forme complexe, facilement réparables. Le composite a donc très vite trouvé sa place chez les fabricants de bateaux. Les coques sont généralement réalisées par infusion sur des mats pour diminuer les coûts et faciliter l'injection. Seules les industries nautiques de luxe et de compétition semblent se tourner vers les tissus. Les performances requises dans ces industries imposent l'utilisation de renforts tissés.

De manière générale, les tissus sont utilisés pour leur performance mécanique plus grande. Certaines industries, comme l'aéronautique, utilisent uniquement des tissus pour la fabrication de pièces composites. D'autres diversifient les types de renfort en fonction des produits. Il reste que les renforts tissés répondent aux besoins de nombreuses applications. Ceci leur confère une place de plus en plus importante dans l'industrie des composites.

4.3 Résultats obtenus sur les mats à fibres aléatoires

Deux mémoires de maîtrise portent sur le moule transparent : l'un de Briones [27] sur la conception du moule transparent, et l'autre d'Allard [26] sur l'optimisation du procédé d'injection flexible pour la fabrication de pièces composites à partir de mats. Les informations qui suivent sont tirées de ce dernier travail.

4.3.1 Principaux résultats obtenus par Allard

Les conclusions d'Allard sont riches d'enseignements et constituent le point de départ de la présente étude.

4.3.1.1 Amélioration du temps d'injection pour des mats à fibres de verre

L'étude d'Allard [26] a été réalisée avec l'OCF 8610, un mat à fibres aléatoires de la compagnie Owens Corning. Avec l'aide du moule transparent, l'utilisation du procédé d'injection flexible a permis d'injection de pièces composites avec un gain de temps d'un facteur sept (7) comparé au procédé RTM. Le Tableau 4.3 montre les temps d'injection obtenus avec le procédé d'injection flexible pour la fabrication de pièces de 375 mm par 125 mm, d'une épaisseur voisine de 1.6 mm.

Tableau 4.3 Résumé des temps d'injections obtenues par Allard [26] (p. 99)

No. D'expérience	Injection du fluide de compaction	Consolidation	(1) tp (s)	(2) tr / tp (s)
PF1E05024	P = 4 bars	P = 6 bars	37.7	6.84
PF1E05027	P = 6 bars	P = 6 bars	38.6	6.71
PF1E05009	P = 4 bars	P = 4 bars	39.7	6.84
PF1E05023	P = 4 bars	P = 4 bars	41.5	6.54
PF1E05011	D = 5 mL/s	P = 4 bars	44.0	6.17
PF1E05018	D = 2 mL/s	P = 4 bars	54.2	5.03
PF1E05025	P = 4 bars	P = 2 bars	82.8	3.13
PF1E05026	P = 2 bars	P = 2 bars	84.9	2.80

(1) temps de remplissage de l'injection flexible (tp) ; (2) temps de remplissage RTM / injection flexible (tr / tp)

La colonne tp indique les temps d'injections obtenues avec le procédé d'injection flexible. La colonne tr/tp évalue le gain en rapidité de l'injection flexible par rapport au

procédé RTM (t_r représente ici le temps d'injection à l'aide du procédé RTM). Dans tous les cas, les essais de cette étude montrent une amélioration du temps d'injection.

4.3.1.2 Ralentissement du front de résine

Lors d'une injection flexible à travers un mat de fibres aléatoires, la résine imprègne le renfort jusqu'à une certaine distance du port d'injection, puis vient l'injection du fluide de compaction qui fait avancer rapidement la résine afin de compléter l'imprégnation du renfort. Ce déplacement de la résine est très rapide jusqu'à ce que le front du fluide de compaction dépasse celui de la résine. À ce moment là, le fluide de compaction comprime le renfort encore non imprégné. Ce phénomène a pour effet d'augmenter le taux de fibres et de diminuer la perméabilité. L'écoulement de la résine se voit alors ralenti considérablement, ce qui augmente le temps d'injection et modifie l'épaisseur de la pièce dans cette zone.

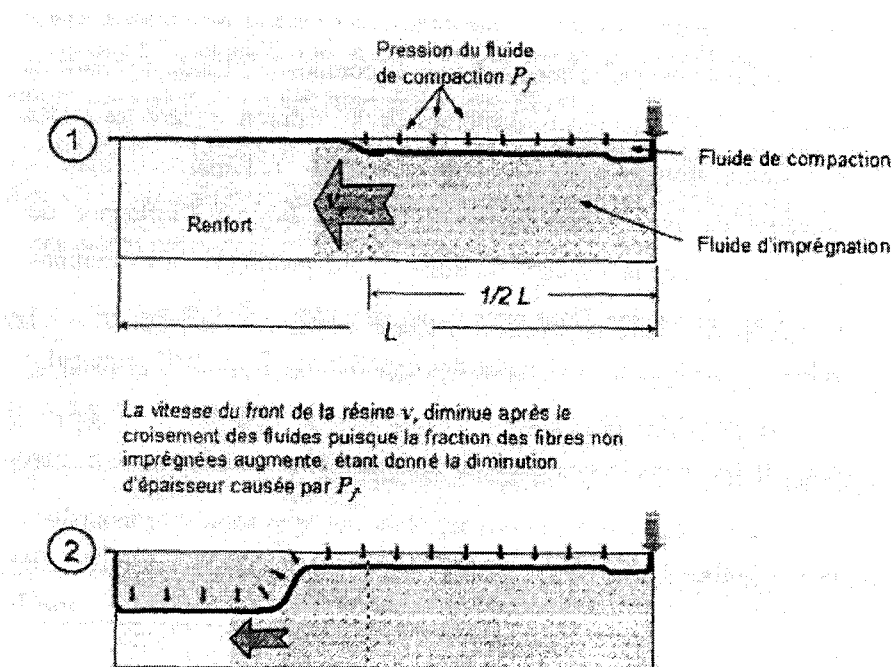


Figure 4.1 Diminution de la vitesse d'écoulement de la résine après croisement des fluides (p. 58).

4.3.1.3 Conditions optimales d'utilisation des mats à fibres aléatoires

Dans la conclusion du mémoire d'Allard [26], un tableau récapitule l'influence des paramètres étudiés sur le temps de remplissage et la régularité de l'épaisseur des pièces fabriquées. Ce tableau est repris ici (Tableau 4.4). Les résultats obtenus par Allard [26], nous servent à déterminer les paramètres d'injections, du premier plan d'expérience sur des renforts tissés.

Tableau 4.4 Impact des paramètres de fabrication sur les deux objectifs principaux de mémoire d'Allard [26] (p. 164)

	Paramètres comparés	Contribution à	
		Minimisation du temps de remplissage	Régularité d'épaisseur des plaques fabriquées
Mode d'écoulement 1	Viscosité du fluide de compaction élevée VS faible	-	+
	Pression de compaction élevée VS faible	+++	=
	Cyclage de pression durant la compaction dynamique VS pression constante	++	=
	Amplitude du cyclage de pression durant la compaction dynamique élevée VS faible	+	=
	Cyclage de pression durant la compaction statique VS pression constante	=	=
Mode d'écoulement 2	Épaisseur de la cavité grande VS petite	---	-
	Viscosité du fluide de compaction élevée VS faible	-	N.D
	Application du vide dans la chambre de compaction VS pression atmosphérique	+	N.D
	L'incorporation d'un milieu poreux	+	-

Pour comprendre ce tableau, il faut connaître la signification des modes d'écoulement 1 et 2. Le premier mode correspond au cas où le renfort n'est pas préformé. Dans ce cas, le renfort n'est pas comprimé et occupe tout le volume de la chambre d'injection. Le second écoulement considère que le renfort est préformé et ne remplit pas entièrement la cavité. Dans ce cas, il y a un interstice entre le renfort et la membrane.

La géométrie des cadres de la chambre de compaction et la faible compressibilité des renforts tissés produit également un interstice entre le renfort et la membrane (c.f. chapitre 3). Le cas de renforts tissés est donc plus proche du mode d'écoulement 2.

Une faible viscosité de fluide de compaction et l'application d'une pression de vide dans la chambre de compaction ont un impact positif sur le mode d'écoulement 2. La pression de vide tend à coller la membrane sur le contre-moule et contribue ainsi à augmenter le volume de l'interstice. Toutefois, ce tableau montre que, dans le cas du mode d'écoulement 1, l'augmentation de la viscosité a un impact positif sur la qualité des pièces produites. Dans le premier plan d'expérience réalisé sur les tissus, il semble préférable de choisir une viscosité du fluide de compaction intermédiaire. En ce qui concerne les pressions de vide imposées dans les chambres de compaction et d'injection, les conditions opératoires seront reprises à partir de celles d'Allard [26]. Ainsi, une pression de vide de 0.75 bar est appliquée dans la chambre de compaction et de 0.25 bar dans la chambre d'injection.

D'autre part, le Tableau 4.4 montre que la pression du fluide de compaction a un grand impact sur le temps d'injection, mais pas sur la qualité des pièces. La pression maximale de 6 bars permise par le moule transparent semble donc un bon point de départ. Les essais réalisés par Allard [26] montrent également l'importance de l'épaisseur de la chambre de compaction. D'après ces travaux, l'épaisseur de la chambre de compaction doit être égale à l'épaisseur de la pièce finale.

4.4 Plan d'expérience 1 : application du procédé d'injection flexible aux tissus

Cette section décrit le premier plan d'expérience réalisé sur des renforts tissés avec le moule transparent. Les matériaux et le protocole expérimental y sont détaillés et les premiers résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus avec des mats.

4.4.1 Objectifs du plan d'expérience

Ce plan d'expérience a pour objectif de tester le procédé d'injection flexible sur les tissus, c'est-à-dire de déterminer les différences de comportement du procédé entre les mats à fibres aléatoires et les renforts tissés. À cette fin, les paramètres optimums déterminés pour la fabrication de pièces composites à partir de mats seront en partie repris. Conscient des demandes de l'industrie, l'épaisseur des pièces fabriquées ici un paramètre variable.

4.4.2 Conditions expérimentales

4.4.2.1 Matériaux utilisés

Le tissu choisi pour ce plan d'expérience est le renfort SAERUni fabriqué par Saertex. Il s'agit d'un tissu quasi-unidirectionnel. Seules quelques fibres transversales sont cousues au dos du renfort à 90 ° pour permettre une meilleure tenue (Figure 4.2). Ce choix vise à éviter d'orienter l'écoulement de la résine. En effet, ce phénomène pourrait apparaître du fait de l'orientation des fibres. La masse surfacique de ce tissu a été déterminée pour plusieurs échantillons à environ 970 g/m² (Tableau 4.5).

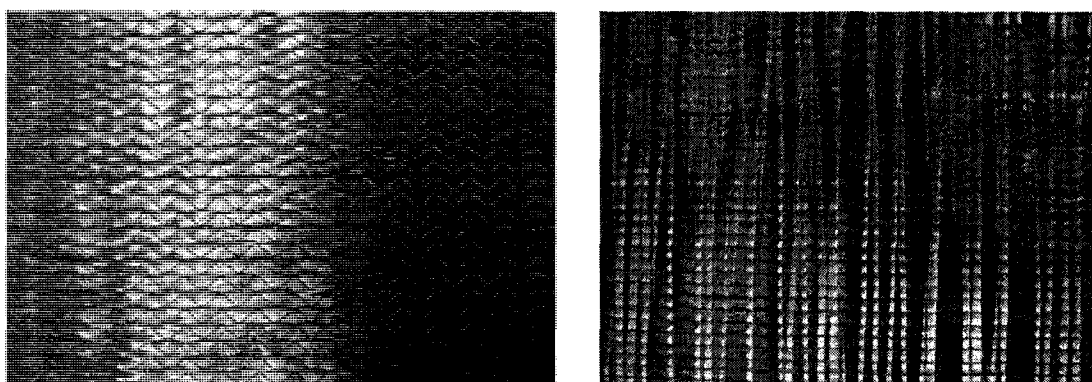


Figure 4.2 Photographie des deux côtés du tissu Saertex.

Tableau 4.5 Masse surfacique du renfort de Saertex

Longueur (mm)	Largeur (mm)	Poids (g)	Masse surfacique (g/m ²)
102	103	10.16	967
101	99	9.76	976
100	104	10.10	971

La principale caractéristique d'un renfort est sa perméabilité. La perméabilité du tissu SAERUni est de $1.43E-10 \text{ m}^2$. La perméabilité du renfort a été déterminée avec le banc d'essai mis au point au laboratoire de composites de l'École Polytechnique.

La résine utilisée est une résine vinylester de la compagnie DERAKANE, la vinylester 411-350. Cette résine a une viscosité de 0.35 cSt. Dans ce plan d'expérience, l'injection est réalisée grâce à une machine d'injection où sont stockés la résine et le catalyseur. Le temps de vie d'une résine accélérée n'excédant pas un mois, la résine ne peut être que promotee. Le naphthalène de cobalt 12 % (NaCo) de la compagnie Dussek est le promoteur, qui est nécessaire ici pour initier la polymérisation à température ambiante. Le catalyseur est le methyl ethyl ketone peroxide (MEKP 925 H) de la compagnie NORAC. Pendant l'injection, le catalyseur est ajouté à la résine promotee juste avant son entrée dans le moule. Le Tableau 4.6 donne les proportions des constituants qui permettent la polymérisation de la résine.

Tableau 4.6 Proportion des additifs à la résine vinylester DERAKANE 411-350 avec l'utilisation de la machine d'injection

additifs	PHR (pour 100g de résine)
NaCo 12 %	0.15
MEKP 925 H	2.5

Dans le plan d'expérience #1, le fluide de compaction est une huile silicone de la compagnie (200® fluid) DOW CORNING. La viscosité du fluide de compaction est fixée à 1000 cSt. La membrane qui sépare les chambres d'injection et de compaction est en silicone transparent. Elle permet ainsi d'observer les écoulements de la résine et du fluide de compaction. La membrane EL1040T provient de la firme TORR-TECHNOLOGIE et a une épaisseur de 0.061 pouces (1.5 mm). Sa bonne compressibilité assure l'étanchéité et sa compatibilité avec les huiles silicones en fait une très bonne membrane.

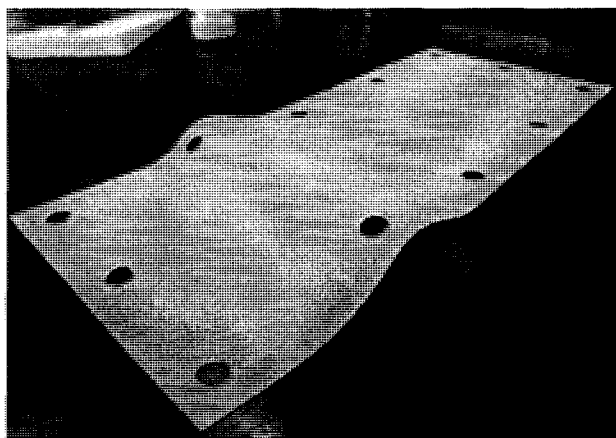


Figure 4.3 Photographie de la membrane utilisée sur le moule transparent.

4.4.2.2 Paramètres de mise en œuvre

Dans ce plan d'expérience, plusieurs épaisseurs de pièces ont été obtenues. À cette fin, le nombre de plis de tissus et la quantité de résine ont varié. Les pièces ont entre 2 et 5 plis et sont réalisées respectivement avec les cadres 1 à 4. D'après les résultats d'Allard

[26], pour optimiser le temps d'injection, les épaisseurs des chambres de compaction et d'injection doivent être égales. Cependant il faut comprendre que les cadres à notre disposition ont une forme particulière (cf. chapitre 3), qui limite l'épaisseur de la préforme utilisable pour chacun d'entre eux. L'encoche que forme le cadre limite l'épaisseur du renfort. Au dessus d'une certaine épaisseur, la compressibilité du renfort ne permet pas une bonne étanchéité du moule. Pour chaque cadre, le nombre de plis de tissu est donc limité. Un compromis a du être fait entre la hauteur de la pièce finale par rapport à l'épaisseur du cadre utilisé et la compaction du renfort pendant la phase de consolidation. Ce dernier point est important car la préforme a une hauteur naturelle qui correspond à l'épaisseur maximale possible de la pièce finale. Si la pièce fabriquée est plus épaisse que sa préforme, aucune pression ne peut être exercée sur le renfort et une partie de la pièce n'est alors composée que de résine. Autrement dit, il existe un taux de fibres minimum pour la pièce finale. La Figure 4.4 illustre le cas d'une pièce plus épaisse que sa préforme. Aussi, pour permettre une comparaison entre les pièces de différentes épaisseurs, un taux de fibres commun doit être fixé. Toutes ces observations montrent que, pour chaque nombre de plis de tissu, il n'y a qu'un cadre qui puisse convenir. Finalement, le taux de fibres choisi est de 46 %, ce qui nous donne des épaisseurs de pièces théoriques proches de la moitié de celle du cadre. Pour chaque nombre de plis, le Tableau 4.7 récapitule, le cadre associé, la hauteur finale théorique et la quantité de résine que doit contenir une pièce de 125 mm sur 360 mm.

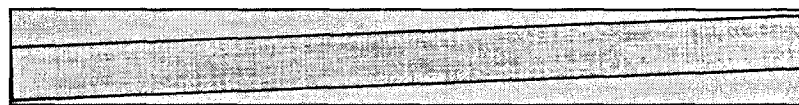


Figure 4.4 Pièce composite d'épaisseur plus grande que sa préforme.

Tableau 4.7 Tableau récapitulatif des caractéristiques des pièces fabriquées pour chaque nombre de plis pour un taux de fibres de 46 %

Nombre de plis de tissu	Numéro de cadre associé	Hauteur de pièce théorique (mm)	Hauteur du cadre (mm)	Volume de résine (mL)
2	#1	1.66	3.18	36.2
3	#2	2.49	6.35	54.3
4	#3	3.32	7.94	72.4
5	#4	4.15	9.53	90.5

La hauteur théorique (e) de la pièce obtenue se calcule à l'aide de l'équation suivante, qui fait intervenir le nombre de plis (n), la masse surfacique du tissu (m_s), la masse volumique du verre (ρ) et le taux de fibres souhaité (V_f) :

$$e = \frac{1}{V_f} \cdot \frac{n \cdot m_s}{\rho} \quad (4.1)$$

Le volume de résine (V) se détermine en fonction des mêmes paramètres et des dimensions de la pièce fabriquée. Les plaques réalisées ont une longueur de 360 mm (L) et une largeur de 125 mm (l). L'équation suivante donne la quantité de résine en fonction ces paramètres :

$$V = L \cdot l \cdot \frac{(1 - V_f)}{V_f} \cdot \frac{n \cdot m_s}{\rho} \quad (4.2)$$

Plusieurs pots de pression et de vide sont nécessaires à l'utilisation du procédé d'injection flexible. Comme le montre la Figure 4.5, il faut deux pots de vide pour réaliser les pressions de vide des chambres de compaction et d'injection ainsi que deux systèmes permettant l'injection de la résine et du fluide de compaction.

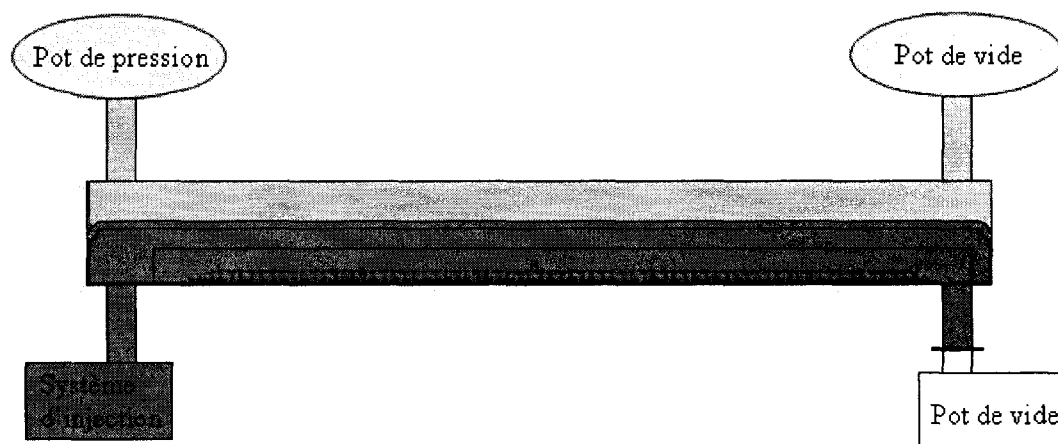


Figure 4.5 Outillage nécessaire à la fabrication de pièces composites par injection flexible.

Dans le cadre de ce plan d'expérience, deux pots de vide sont utilisés pour les pressions de vide de la chambre de compaction et d'injection respectivement en PVC et en ACIER et un pot de pression pour l'injection du fluide de compaction (Figure 4.6).

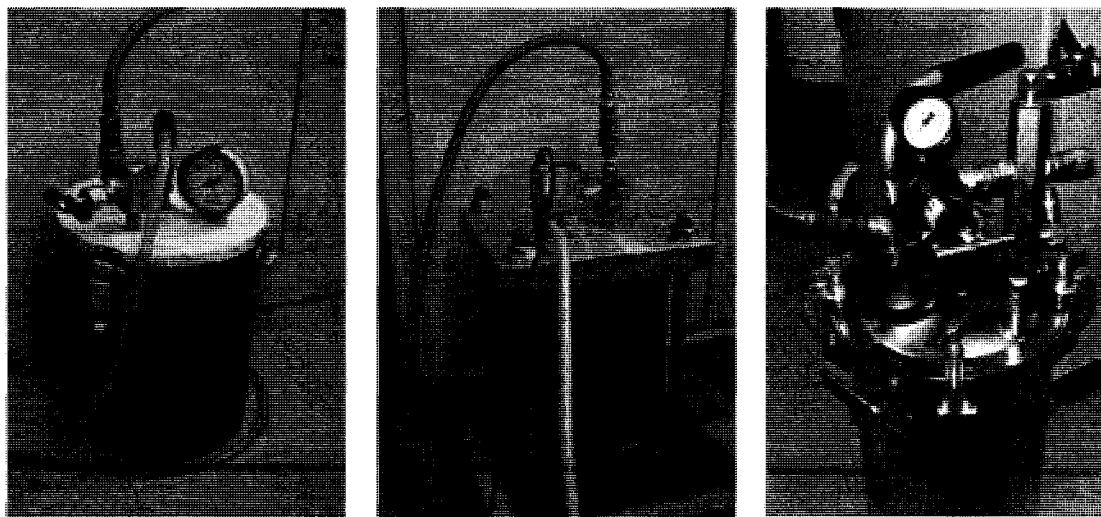


Figure 4.6 Photographie des pots de vides et de pression.

En ce qui concerne l'injection de la résine, un système d'injection à débit contrôlé développé au laboratoire de l'École Polytechnique est utilisé. Ce système se compose de deux machines de traction, sur chacune desquelles est monté un piston à double action (Figure 4.7). Ce type de piston permet de pomper en continu le fluide, c'est-à-dire aussi bien dans un sens que dans l'autre. Le premier contrôle le débit de la résine, et le second le débit du catalyseur. Les deux lignes se rejoignent dans une tête d'injection commandée pneumatiquement. La tête d'injection est raccordée à un mélangeur statique (Figure 4.8). Le tout est contrôlé par ordinateur grâce au logiciel Poly-J. Ce dernier donne la possibilité d'acquérir des données telles que la pression dans les lignes d'injection ou la pression des pots de vide et d'injection.

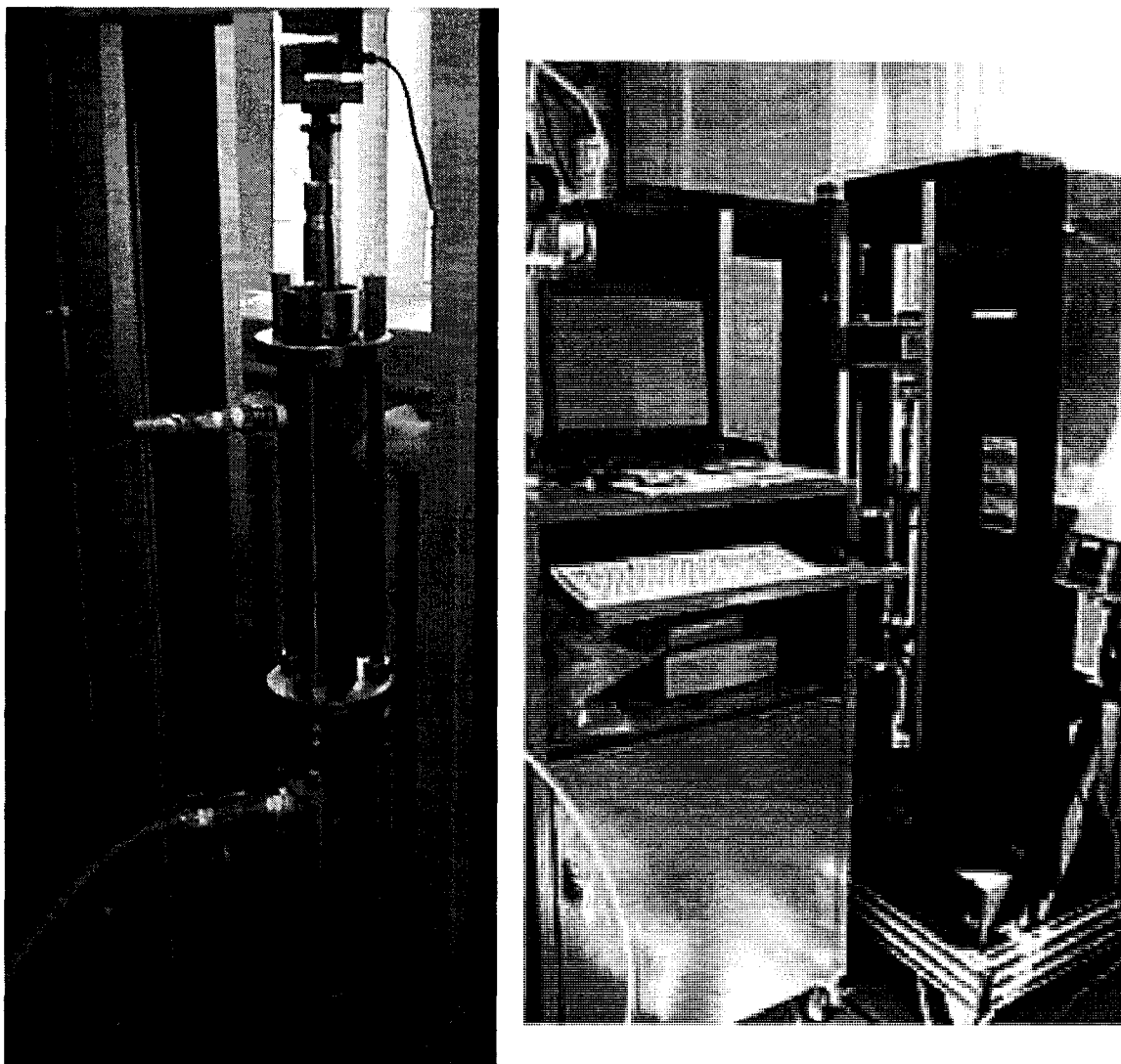


Figure 4.7 Machine d'injection et ordinateur de contrôle.

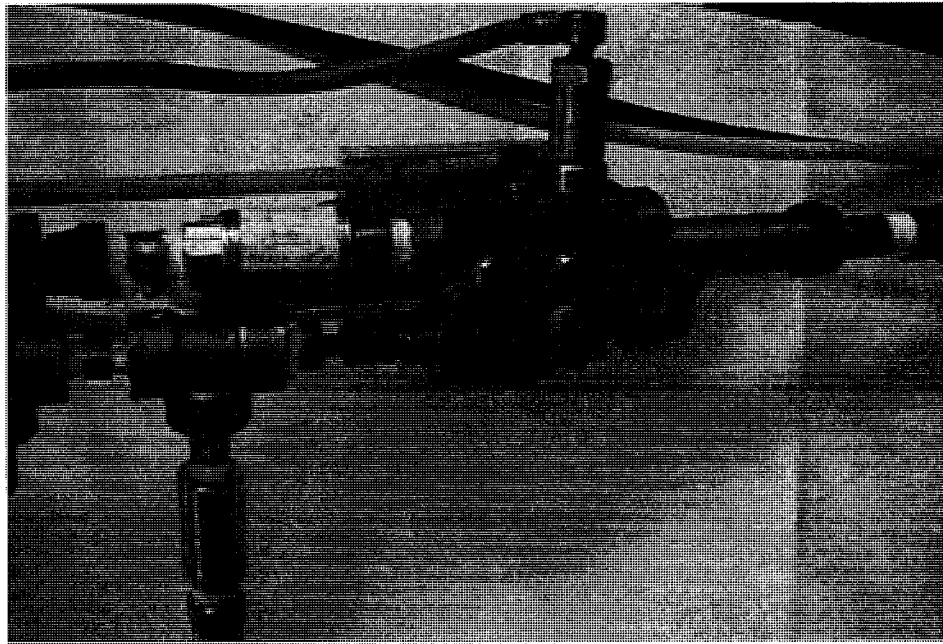


Figure 4.8 Tête d'injection.

Le débit d'injection est fixé à 10 mL/s pour assurer un mélange homogène de la résine avec le catalyseur, mais aussi pour respecter les limites dans la vitesse de déplacement des machines de traction. Les travaux de Lebel [29] sur l'évaluation de la précision du système montre des erreurs sur les volumes de résine et de catalyseur inférieures à 1 %.

L'équipe du Laboratoire de recherche en fabrication virtuelle de l'école polytechnique a permis de réaliser des mesures très précises de l'épaisseur curviligne des pièces fabriquées. La Machine de Mesure Tridimensionnelle (MMT) utilisée est la Legex 12128 de la compagnie MITUTOYO (Figure 4.9).

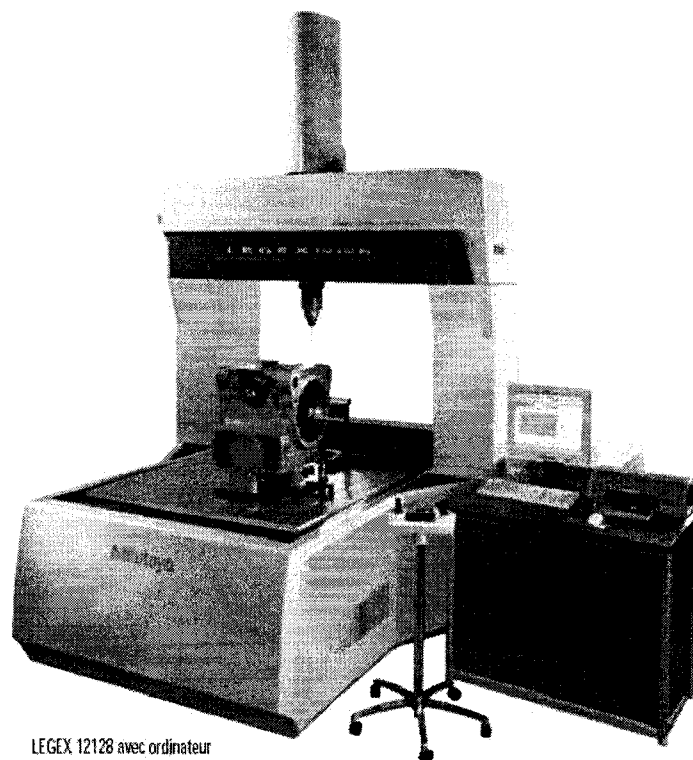


Figure 4.9 Photographie de la MMT.

Pour obtenir trois courbes représentant l'épaisseur curviligne sur la longueur des pièces, six balayages ont été réalisés. La Figure 4.10 montre l'emplacement des six lignes (trois de chaque côté de la pièce) où les balayages ont été effectués.

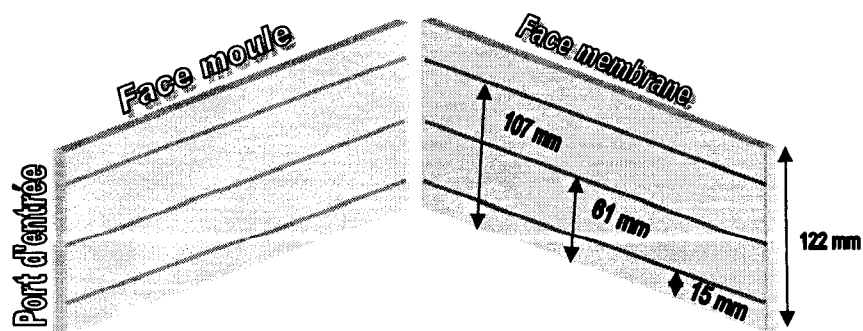


Figure 4.10 Schéma de l'emplacement des balayages effectués avec la MMT sur une pièce.

Les données recueillies ont demandé plusieurs traitements pour finalement obtenir les courbes désirées. La démarche du traitement des données se trouve à l'annexe B.

Le plan d'expérience comporte huit injections pour différents nombres de plis de renforts tissés. Le cadre et la quantité de résine injectée sont fonction du nombre de plis et du taux de fibres (46 %). La pression d'injection du fluide de compaction (de viscosité 1000 cSt) est fixée à 6 bars. Les pressions de vide dans la chambre de compaction et d'injection sont respectivement de 0.75 et 0.25. Le Tableau 4.8 récapitule tous les paramètres fixes du plan d'expérience #2. Le Tableau 4.9 donne identifie chaque pièce; il y en a deux pour chaque nombre de plis.

Tableau 4.8 Paramètres fixes du plan d'expérience #1

Paramètres	Valeurs
Viscosité du fluide de compaction	1000 cSt
Pression de vide de la chambre de compaction	0.75 bar
Pression de vide de la chambre d'injection	0.25 bar
Pression du fluide de compaction	6 bars
Débit d'injection de la résine	10 mL/s
Taux de fibres visé	46 %

Tableau 4.9 Tableau récapitulatif des conditions d'injection

Identification	Nombre de plis de tissu	Numéro du cadre	Résine injectée (g)	Épaisseur théorique (mm)
H07P2001	2	#1	36.2	1.66
H07P2003				
H07P3013	3	#2	54.3	2.49
H07P3014				
H07P4001	4	#3	72.4	3.32
H07P4003				
H07P5002	5	#4	90.5	4.15
H07P5004				

4.4.3 Résultats et discussions

Ce plan d'expérience permet de mettre en évidence plusieurs résultats propres aux renforts tissés. D'une part, l'objectif de rapidité du procédé semble atteint. Les temps d'injection sont très courts mais un temps d'imprégnation du renfort se rajoute. D'autre part, le plan d'expérience #1 amène à une meilleure compréhension du mode d'écoulement de la résine. Nous verrons que ce mode d'écoulement rend l'imprégnation du renfort fonction de son épaisseur. L'augmentation de l'épaisseur favorise la création d'une zone sèche au voisinage du port d'injection.

4.4.3.1 Information générale sur les pièces obtenues

Le Tableau 4.10 retranscrit un ensemble de données qui donnent des informations sur de la qualité des injections. La quantité de résine dans la pièce finale permet de comparer la valeur de résine théorique à la réalité. Le taux de fibres est calculé grâce aux masses du renfort avant l'injection, puis après imprégnation par la résine. Toutefois, ce taux de fibres ne prend pas en compte l'hétérogénéité de la pièce.

Tableau 4.10 Tableau récapitulatif des résultats du plan d'expérience #1

Identification	Poids Préforme (g)	Poids final (g)	Masse résine (g)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Taux de fibres global (%)
H07P2001	82.72	117.18	34.46	356	121	51.59
H07P2003	82.89	118.56	35.67	355	121	50.72
H07P3013	127.18	182.63	55.45	354	122	49.73
H07P3014	127.52	183.12	55.60	355	121	49.72
H07P4001	170.05	246.16	76.11	356	121	48.75
H07P4003	169.16	151.20	82.04	355	122	46.69
H07P5002	211.8	307.6	95.8	354	122	48.32
H07P5004	213.13	308.8	95.67	355	121	48.51

Nous pouvons voir dans le Tableau 4.10 une différence de taux de fibres entre les valeurs visées et les valeurs obtenues. Cela s'explique par le fait qu'une quantité de résine est perdue dans le moule. La résine peut, de manière aléatoire, s'introduire dans la

rainure du joint torique qui assure l'étanchéité. Cette perte de résine a conduit à augmenter la quantité de résine injectée. Une quantité supplémentaire de 30 mL a été ajoutée. Ceci comprend non seulement la perte évoquée, mais aussi le volume de résine présent dans les tubes d'entrée et de sortie. La nature aléatoire de la perte de résine conduit donc à des pièces avec des taux de fibres différents.

4.4.3.2 Temps d'injection et d'imprégnation

La courbe de la position du front de résine en fonction du temps se compose de 3 parties (Figure 3.16). Le temps d'injection est la somme du temps d'entrée de la résine et du temps correspondant au déplacement de la résine sous l'influence du fluide de compaction jusqu'au remplissage complet du moule. Le Tableau 4.11 présente les temps recueillis pour chaque injection avec l'enregistrement vidéo.

Tableau 4.11 Temps d'injection des pièces du plan d'expérience #1

Identification	Temps d'entrée de la résine (s)	Temps de fin de remplissage (s)	Temps d'injection total (s)
H07P2001	4.37	1.60	5.97
H07P2003	4.24	4.10	8.34
H07P3013	6.61	1.87	8.48
H07P3014	6.54	1.80	8.34
H07P4001	8.38	1.87	10.25
H07P4003	8.38	1.94	10.31
H07P5002	10.75	1.97	12.72
H07P5004	10.61	2.00	12.61

Ce tableau montre que les temps d'injection obtenus sont très rapides. Comparativement au temps nécessaire pour imprégner un mat à fibres aléatoire, le temps d'injection du renfort tissé de SAERTEX est beaucoup plus court. C'est un point particulièrement intéressant, d'autant plus que l'on passe d'un taux de fibres de 21 % dans le cas des mats à plus de 46 % pour les renforts tissés.

Malgré un débit d'entrée de résine faible de 10 mL/s, les temps d'injection sont très encourageants. Si le débit d'injection augmentait, le temps d'entrée de la résine en serait d'autant plus réduit. Remarquons que l'entrée de la résine représente ici une grande proportion du temps total de l'injection. Le fluide de compaction met moins de deux secondes à pousser la résine vers l'évent.

Notons toutefois que pour assurer une bonne qualité à la pièce fabriquée, il faut que l'injection soit terminée avant le début de la polymérisation de la résine. Lorsque la résine sort par l'évent, le fluide de compaction n'a pas encore atteint l'évent et la résine n'a pas fini d'imprégner le renfort. Il faut donc compter un temps supplémentaire au temps d'injection. Ce temps n'est pas facile à déterminer. L'analyse visuelle ne permet pas de définir avec exactitude le moment où la résine ne progresse plus à travers le renfort. Ceci dit, nous estimons ce temps d'imprégnation complémentaire à 10 secondes après la sortie de la résine par l'évent.

Pour un taux volumique de fibres de 50 %, le tissu utilisé a une perméabilité de $1.43 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. La loi de Darcy permet d'estimer les temps d'injections à l'aide du procédé RTM. Le temps d'injection requis, pour imprégner une plaque de 355 mm de longueur par une résine d'une viscosité de 0.35 Pa.s et à l'aide d'un pot de pression de 3 bars est de 571 s. Les temps d'injection ajoutés au temps d'imprégnation montrent que le procédé d'injection flexible est au moins 25 fois plus rapide que le procédé RTM. Tableau 4.12 montre également qu'il est possible d'aller jusqu'à 35 fois plus vite avec le procédé d'injection flexible. Le procédé d'injection flexible diminue considérablement le temps d'injection pour une pression d'injection de 1 bar. Ceci répond donc à l'objectif de rapidité initial.

Tableau 4.12 Comparaison avec le procédé RTM

Identification de l'injection flexible	Temps injection flexible (s)	$\frac{t_R}{t_f}$	Qualité
H07P2001	15.97	35.75	bonne
H07P2003	18.34	31.13	
H07P3013	18.48	30.90	bonne
H07P3014	18.34	31.13	
H07P4001	20.25	28.20	zone sèche
H07P4003	20.31	28.11	
H07P5002	22.72	25.13	zone sèche
H07P5004	22.61	25.25	

t_R est le temps d'injection obtenue avec le procédé RTM et t_f est celui obtenue à l'aide du procédé d'injection flexible.

4.4.3.3 Mode d'écoulement et zone sèche

Un temps d'injection aussi court suivi d'un temps supplémentaire d'imprégnation s'explique par le type d'écoulement. Deux types d'écoulement se font concurrence lors de l'injection de la résine. Nous verrons que ces deux écoulements sont également présents dans le cas de l'utilisation de mats préformés. Lorsqu'il existe un espace entre le renfort et la membrane, un écoulement de Poiseuille y prend place. Il y a également un écoulement laminaire de fluide en milieu poreux homogène (écoulement de Darcy). Ces deux écoulements sont expliqués schématiquement à la Figure 4.11.

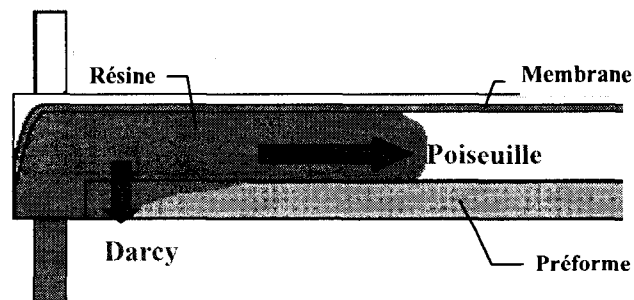


Figure 4.11 Écoulement de Poiseuille et de Darcy dans le moule.

Il faut apporter ici une mise en garde. Les explications qui suivent sont des simplifications faites sur le type d'écoulement. Dans ce mode d'écoulement, le rôle de la gravité n'est pas pris en compte. Notons simplement que la gravité implique un gradient de pression vertical supplémentaire qui favorise l'écoulement de Darcy.

Ces deux écoulements suivent des lois qui permettent d'exprimer la vitesse du fluide en fonction du gradient de pression. Pour l'écoulement de Poiseuille entre deux plaques, l'équation de la vitesse prend la forme suivante :

$$V_p = -\frac{R^2}{8\mu} \frac{dP}{dx} \quad (4.5)$$

où V_p est la vitesse moyenne (m.s^{-1}), R est le rayon équivalent de l'interstice (m), μ la viscosité dynamique ou absolue du fluide (Pa.s) et P la pression (Pa).

La vitesse de Darcy dans un écoulement en milieu poreux homogène s'exprime de la façon suivante :

$$V_D = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (4.6)$$

où V_D est la vitesse de Darcy (m.s^{-1}), k la perméabilité du renfort (m^2), μ la viscosité dynamique ou absolue du fluide (Pa.s) et P la pression (Pa).

Le rapport des vitesses de Poiseuille et de Darcy donne une idée de la prédominance d'un type d'écoulement sur l'autre.

$$\frac{V_p}{V_D} = \frac{R^2}{8 \cdot k} \quad (4.7)$$

Le rapport des ordres de grandeur et de l'épaisseur au carré de l'espace entre la membrane et de la perméabilité du renfort indique si la résine a tendance à passer sur le renfort ou à remplir toute la cavité comme dans le cas des mats.

Pour permettre une meilleure compréhension des phénomènes, la perméabilité équivalente de l'interstice peut également être introduite. Cette notion est plus longuement décrite dans le chapitre 2. L'équation suivante permet de rendre compte de la perméabilité équivalente de l'interstice [18]:

$$k = \frac{R^2}{8} \quad (4.8)$$

où d est l'épaisseur de l'interstice.

Dans le cas de l'utilisation d'une perméabilité équivalente pour l'interstice, le rapport entre cette perméabilité et celle de renfort montre clairement la prédominance d'un écoulement sur l'autre. La perméabilité du renfort ne peut être supérieure à celle du vide. La vitesse dans l'interstice est donc toujours plus rapide que dans le renfort.

L'ordre de grandeur de la perméabilité d'un interstice de 1 mm est de 10^{-7} m^2 et celui du mat à fibres aléatoire préformé est de 10^{-8} m^2 . L'écoulement de la résine se fait alors quasiment de front, car il faut également prendre en compte l'influence de la gravité. Dans le cas du procédé d'injection flexible, la gravité favorise l'équilibre entre les deux écoulements, mais cet effet reste faible par rapport à celui des gradients de pression qui gouvernent l'écoulement.

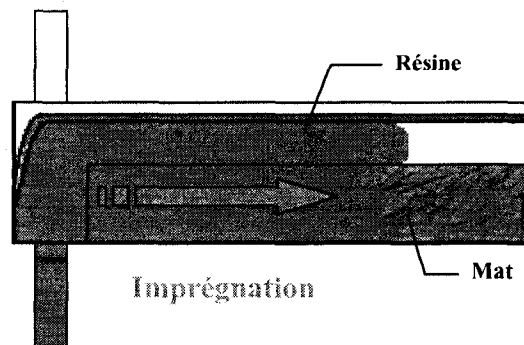


Figure 4.12 Écoulement dans le cas d'un mat.

Dans le cas d'un renfort tissé, la perméabilité est beaucoup plus petite que pour les mats. L'ordre de grandeur varie de 10^{-10} m^2 à 10^{-14} m^2 . Dans le cas des fibres de verres, l'ordre de grandeur est plus proche de 10^{-10} m^2 . De telles valeurs de perméabilité rendent l'écoulement beaucoup plus difficile dans le renfort, ce qui force à la résine à passer au dessus du renfort (Figure 4.13).

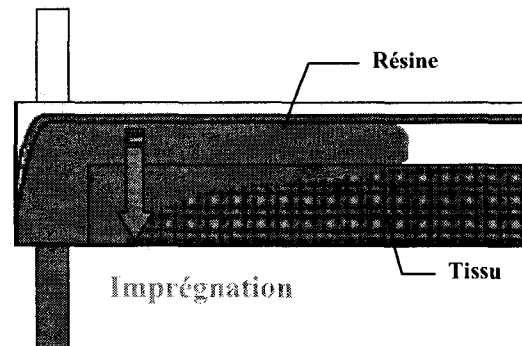


Figure 4.13 Écoulement dans le cas d'un renfort tissé.

La grande différence entre les perméabilités des mats à fibres aléatoire et des renforts tissés, modifie radicalement le comportement du procédé d'injection. Ce comportement particulier induit la création d'une zone sèche concentrée au début des pièces de 4 et 5 plis. Pour les pièces de 2 et 3 plis, ce phénomène ne se produit pas. Les photographies des pièces de la Figure 4.14 montrent l'apparition de zones sèches en fonction du nombre de plis.

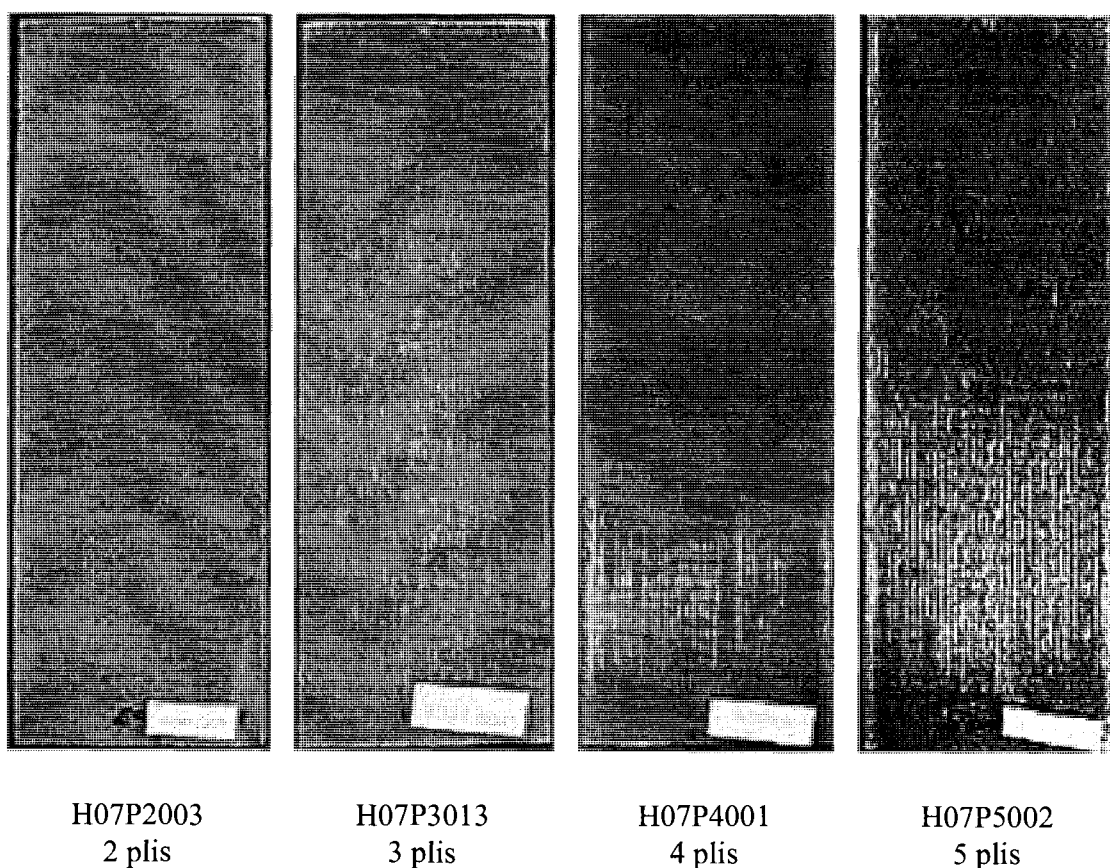


Figure 4.14 Pièces finales vue côté moule pour différent nombre de plis.

En réalité, le phénomène est progressif et est fonction de l'épaisseur de la pièce. La zone sèche est très marquée pour les pièces de 4 et 5 plis, mais le déroulement de l'injection reste le même. La résine pénètre dans le moule et passe au dessus de la préforme en imprégnant la couche supérieure du renfort. Dans le cas de pièces avec 2 et 3 plis de tissus, le renfort est d'ores et déjà bien imprégné. Ensuite, le fluide de compaction est injecté à l'aide d'un pot de pression. Comme l'indique la Figure 4.15 dans le cas des tissus de 4 et 5 plis, le fluide pousse la résine qui n'imprègne que très peu le renfort. Une fois la résine arrivée à l'extrémité du moule, elle ne peut, sous l'action du fluide de compaction, qu'imprégner le renfort pour ressortir par l'évent qui ensuite est fermé. Une quantité d'air reste alors emprisonnée dans le renfort. C'est l'emprisonnement d'air qui

cause la zone sèche. Sous la pression du fluide de compaction, la résine déplace l'air qui se concentre.

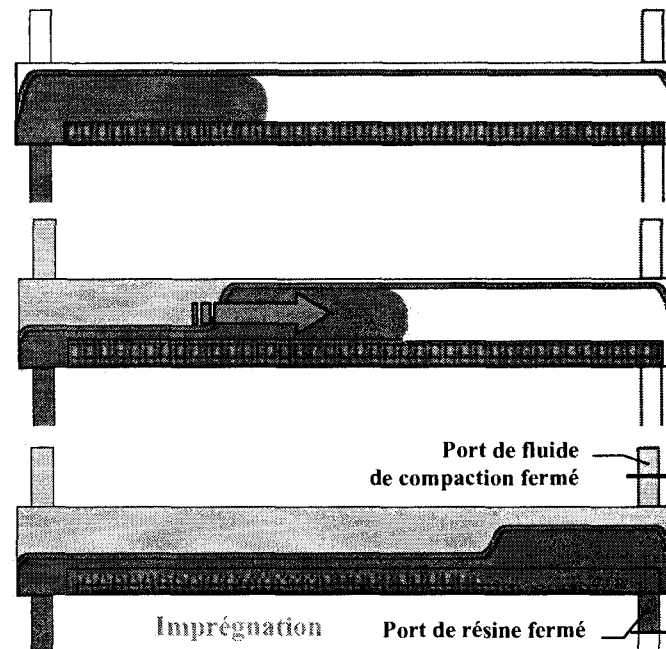


Figure 4.15 Introduction du fluide de compaction.

4.4.3.4 Épaisseur des pièces

Après analyse, les données obtenues grâce à la Machine de Mesure Tridimensionnelle montrent une augmentation de l'épaisseur des pièces fabriquées. À l'œil nu, seules des accumulations de résine en fin de pièce sont visibles pour les plaques avec 4 et 5 plis. Les balayages permettent de voir ces accumulations ainsi que la variation d'épaisseur dans le reste de la pièce.

La Figure 4.19 montre une vue 3D des trois balayages pour chaque épaisseur de pièce. Une accumulation importante de résine sur la pièce H07P4003 impose une échelle plus grande que les autres pièces. Les épaisseurs sont ici décrites sur toute la longueur des pièces.

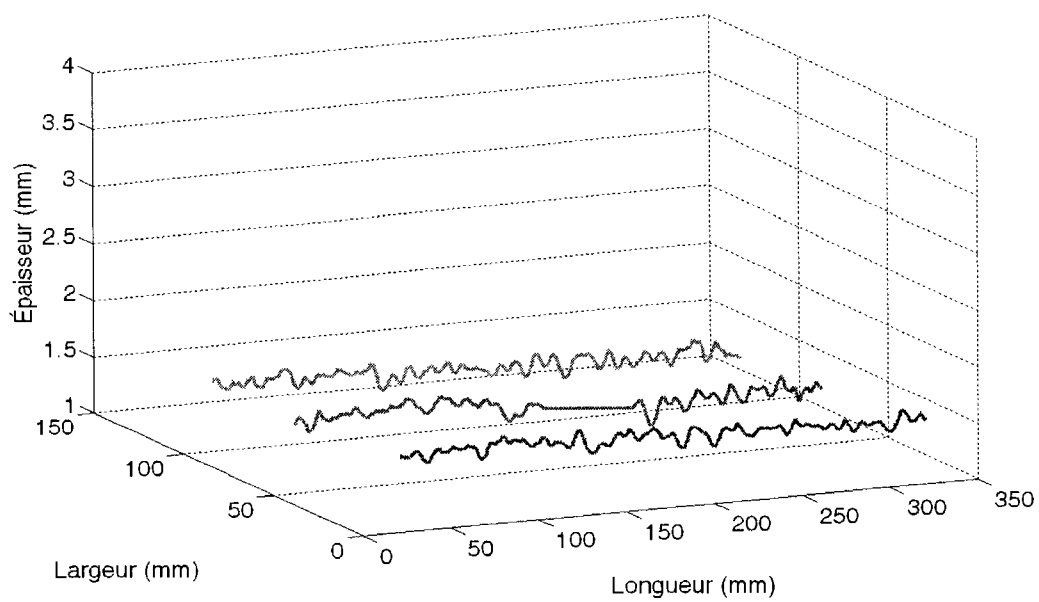


Figure 4.16 Balayages de la pièce H07P2001 avec la MMT.

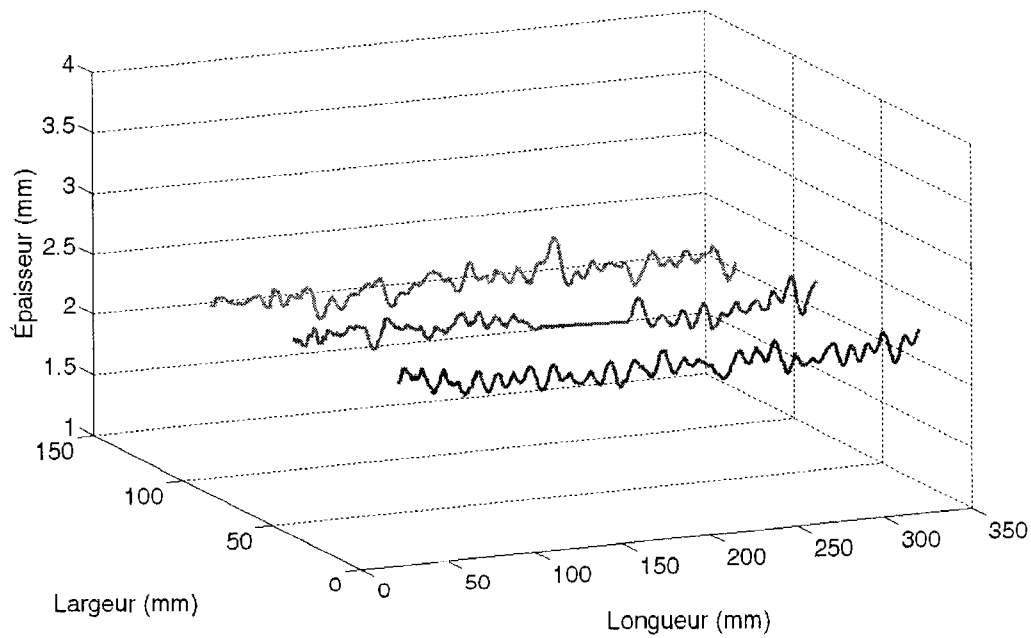


Figure 4.17 Balayages de la pièce H07P3013 avec la MMT.

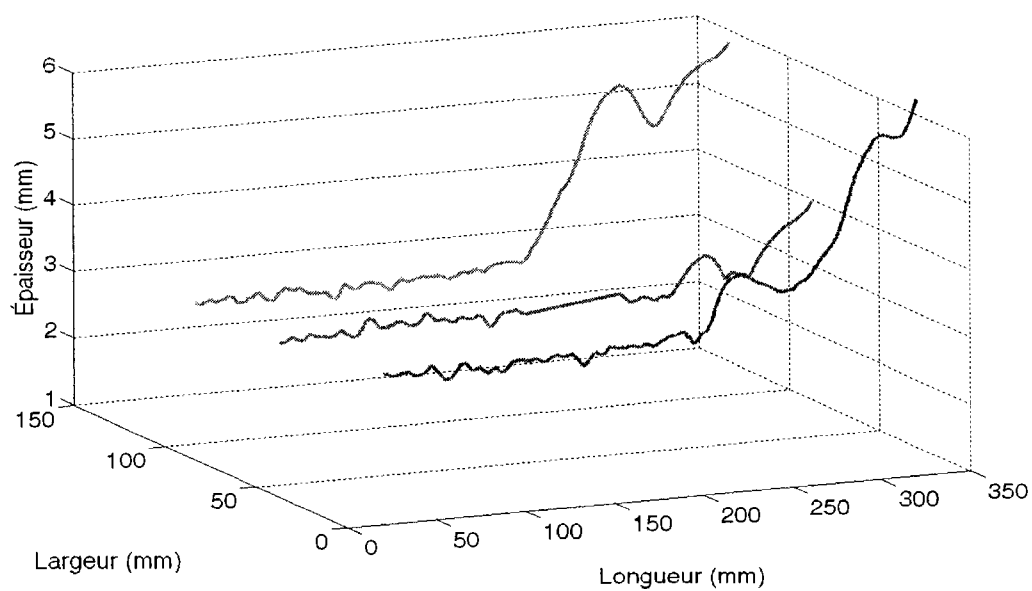


Figure 4.18 Balayages de la pièce H07P4003 avec la MMT.

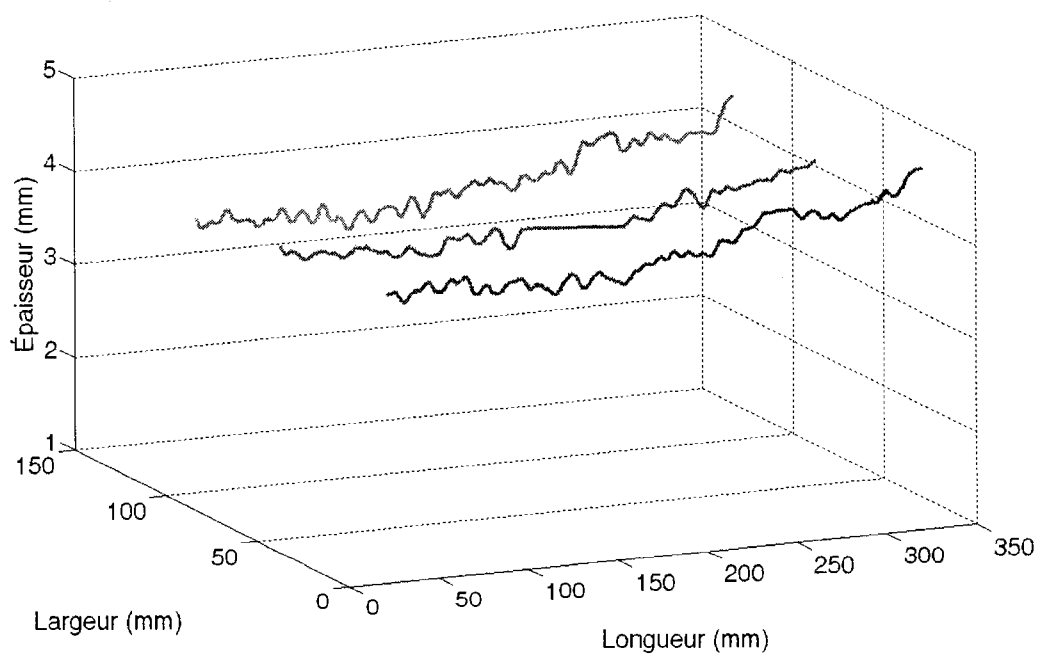


Figure 4.19 Balayages de la pièce H07P5004 avec la MMT.

Les pièces H07P2001 et H07P3013 ne présentent pas d'accumulation, aussi leurs épaisseurs semblent diminuer avec la distance au port d'entrée. Les accumulations de résine à la fin des pièces H07P4003 et H07P5004, ne permettent pas de déterminer l'évolution de l'épaisseur.

La Figure 4.21 reprend les balayages des pièces H07P4003 et H07P5004 sur les 250 premiers millimètres. Ces deux graphiques semblent confirmer l'augmentation de l'épaisseur sur toute la longueur de la pièce.

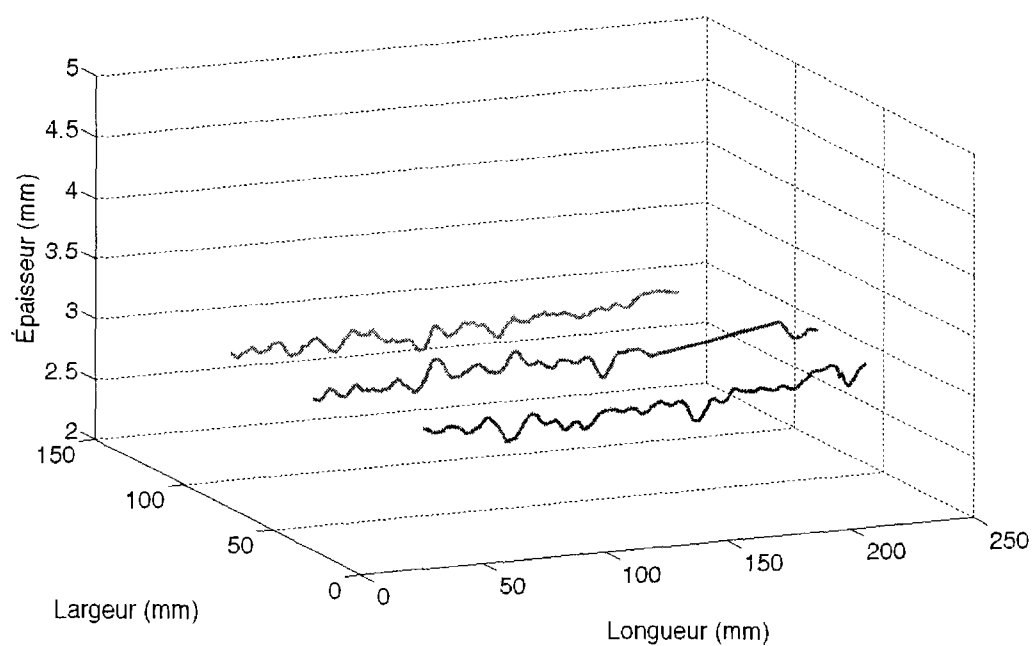


Figure 4.20 Balayages de la pièce H07P4003 avec la MMT sur les 250 premiers millimètres.

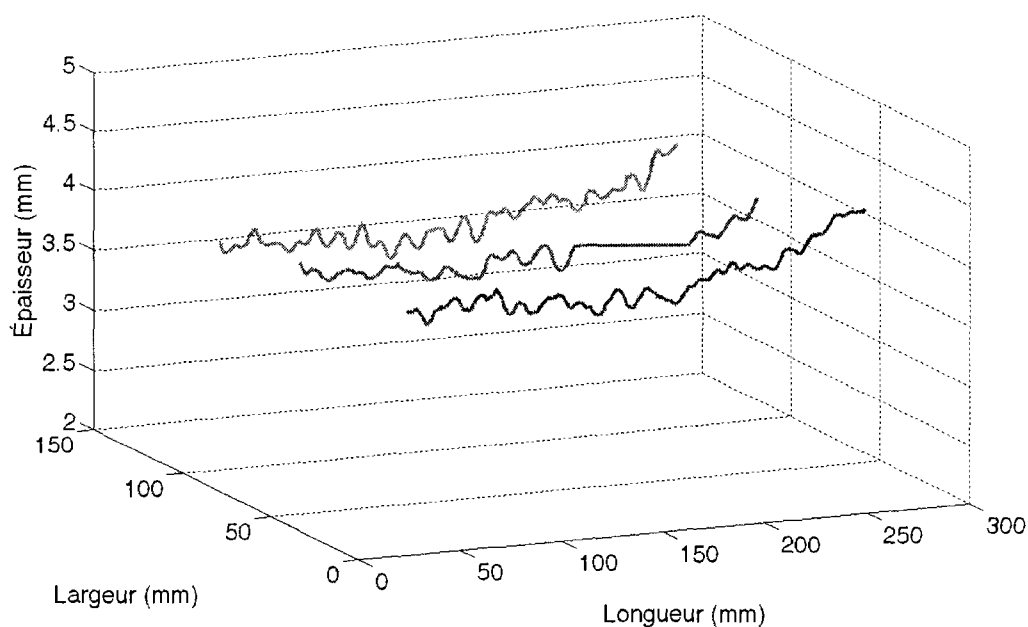


Figure 4.21 Balayages de la pièce H07P5004 avec la MMT sur les 250 premiers millimètres.

Pour chaque balayage, on trace une courbe de tendance linéaire sur une longueur donnée. Le signe du coefficient directeur de chaque courbe indique si l'épaisseur de la pièce augmente ou diminue. Pour les pièces H07P2001 et H07P3013, une seule courbe de tendance est réalisée sur toute la longueur. Pour les pièces H07P4003 et H07P5004, plusieurs courbes donnent les tendances sur les 100, 150, 200 et 250 premiers millimètres. Les coefficients directeurs de toutes ces courbes de tendance linéaire sont regroupés dans le Tableau 4.13.

Tableau 4.13 Coefficients des courbes de tendance linéaire de chaque balayage

Identification	Application de la courbe de tendance (mm)	Position du balayage (mm)	Coefficient (mm/m)
H07P2001	350	15	- 0. 4
		61	- 0. 7
		107	- 0. 5
H07P3013	350	15	- 0. 3
		61	- 0. 4
		107	- 0.05
H07P4003	100	15	- 0. 8
		61	1. 7
		107	0. 1
	150	15	0. 1
		61	0. 6
		107	0. 3
	200	15	0. 8
		61	0. 7
		107	0. 8
	250	15	0. 9
		61	0. 6
		107	0. 7
H07P5004	100	15	- 0. 4
		61	- 1. 4
		107	-0. 7
	150	15	- 1.1
		61	- 0. 3
		107	-0. 7
	200	15	- 0.006
		61	- 0. 3
		107	0. 7
	250	15	0. 9
		61	0. 6
		107	0. 7

L'épaisseur des pièces fines (1.6 mm) diminue avec la distance au port d'entrée de la résine. Lorsque le nombre de plis augmente, cette tendance s'inverse progressivement jusqu'à ce qu'il y ait accumulation de la résine en fin de pièce. Au delà de 3 plis, le

mode d'imprégnation induit une zone sèche en début de pièce et une accumulation de résine à l'extrémité. Pour la pièce H07P4003, l'épaisseur augmente progressivement jusqu'à l'accumulation, mais pour une pièce encore plus épaisse (H07P5004), on observe une diminution de l'épaisseur sur les 15 premiers centimètres, puis une augmentation de l'épaisseur. Ce phénomène est relié à la zone sèche. La pression appliquée par le fluide de compaction implique une compression du renfort plus importante sur les zones sèche. Ce phénomène augmente avec la taille de la zone sèche et donc avec l'épaisseur des pièces.

4.4.3.5 Conclusion du plan d'expérience

L'objectif du plan d'expérience #1 était de décrire le comportement du procédé d'injection flexible lors de l'utilisation de renforts tissés à température ambiante. Il a permis de mettre en lumière les différences entre l'utilisation des mats et des tissus. Dans ce premier plan d'expérience, huit pièces ont été fabriquées. Un seul paramètre a été étudié : le nombre de plis des pièces fabriquées.

Deux points importants se dégagent de cette étude. D'abord, les temps d'injections obtenus sont très satisfaisants. En effet, en ajoutant un temps d'imprégnation de 10 secondes au temps d'injection, l'injection est près de 30 fois plus rapide qu'avec le procédé RTM. Toutefois, la qualité des pièces fabriquées n'est pas constante.

Le mode d'écoulement, selon à l'épaisseur de la pièce fabriquée, peut induire une zone sèche en début de plaque. Pour des préformes comprenant plus de trois plis, la résine imprègne mal le renfort lors de son introduction dans le moule. Ceci tend à former une accumulation de résine (vague) dans l'interstice entre le renfort et la membrane. Lorsque le fluide de compaction est injecté, cette accumulation est déplacée vers le fond du moule, laissant le début du renfort non imprégné. Dans cette zone, l'air non expulsé se concentre pour former une zone sèche. Cette zone sèche a des conséquences sur l'épaisseur. En effet, pour des pièces de plus de trois plis, ce mode d'écoulement implique la formation d'accumulations de résines en fin de pièce et de zones sèches. Ce

phénomène induit de grandes variations de l'épaisseur. Les prochains plans d'expérience tentent de maintenir un équilibre entre l'amélioration du temps d'injection et la qualité des pièces.

4.5 Objectifs des chapitres 5, 6, 7 et 8

4.5.1 Amélioration de l'imprégnation des renforts tissés

La mise en œuvre du procédé d'injection flexible avec des renforts tissés démontre sa rapidité. Toutefois, il faut prendre en compte la qualité des pièces fabriquées. Dans la fabrication de pièces relativement épaisses (3.3 mm), une zone sèche apparaît proche du port d'injection. Comme la qualité d'une pièce est fonction de son imprégnation, il est nécessaire de travailler sur les différents paramètres d'injection pour améliorer l'imprégnation. L'objectif est de limiter la formation de zone sèche et d'uniformiser l'épaisseur des pièces produites.

4.5.2 Comprendre l'influence des différents paramètres du procédé

Pour améliorer l'imprégnation, plusieurs paramètres doivent être pris en compte. Les chapitres suivants traiteront de l'épaisseur de la chambre de compaction, de la quantité de résine injectée, de la pression de vide dans la chambre d'injection et finalement, de la viscosité du fluide de compaction.

Le plan d'expérience #1 a révélé la formation d'une zone sèche sur les pièces épaisses. Pour comprendre l'influence des autres paramètres, la suite de l'étude se concentrera sur des préformes de 4 plis, car une préforme moins épaisse ne présente pas de difficultés particulière.

4.5.2.1 Épaisseur de la chambre de compaction

L'existence d'une chambre de compaction est l'élément essentiel qui différencie le procédé d'injection flexible du procédé RTM. Son influence sur l'injection est fondamentale. Il faut donc bien comprendre cette particularité pour maîtriser le procédé d'injection flexible. Puisque la chambre de compaction est une cavité, la question de sa

forme est centrale. Le chapitre 5 se concentre sur un plan d'expérience où l'épaisseur de la chambre de compaction est le paramètre pris en compte.

Le mode d'imprégnation d'un tissu à l'aide du procédé d'injection flexible produit une zone sèche. L'étude de l'épaisseur de la chambre de compaction va permettre de vérifier si la position du front de résine après l'injection a un impact sur cette zone sèche. Si la résine progresse d'avantage dans le moule pendant la première étape du procédé, elle ne sera pas autant déplacée lors de l'injection du fluide de compaction. L'effet de vague sera moins important, et sous l'action du fluide de compaction, la résine n'aura d'autre choix que d'imprégner le renfort. Dans ce plan d'expérience, quatre épaisseurs de chambre de compaction seront évaluées.

4.5.2.2 Taux volumique de fibres

Le chapitre 6 s'attarde sur le taux volumique de fibres des pièces fabriquées. Le taux de fibres d'une pièce fabriquée par injection flexible est déterminé par la quantité de résine injectée. L'étude de ce paramètre est directement reliée aux résultats du chapitre 5. En effet, l'augmentation du taux de fibres implique que, pour un même cadre, la résine se rend moins loin dans le moule. En ce sens, ce chapitre est la suite du chapitre 5.

L'augmentation du taux de fibres à un autre impact dans une injection flexible. La loi de Terzhagi montre que seule une partie de la pression imposée par le fluide de compaction est supportée par la résine. Si le taux de fibres augmente, le renfort reprend une plus grande part de la pression induite par le fluide de compaction. La résine est alors soumise à une pression plus faible. Le plan d'expérience du chapitre 6 a pour objectif de déterminer comment l'imprégnation du renfort évolue en fonction de la quantité de résine injectée.

4.5.2.3 Vide de la chambre d'injection

La qualité des pièces fabriquées repose avant tout sur la quantité d'air ou de vide emprisonné à la fin de l'imprégnation. Une solution simple serait donc de faire le vide dans la chambre d'injection avant d'introduire la résine. Dans cette optique, le chapitre 7 vise à comprendre l'influence de la présence d'air dans la chambre d'injection. La pression de vide dans la chambre d'injection est ici le paramètre essentiel. Cependant, il faut prendre en compte la hauteur de la chambre de compaction, qui a une influence sur la quantité d'air et l'écoulement de la résine dans le moule.

4.5.2.4 Viscosité du fluide de compaction

Le chapitre 8 étudie l'effet de la viscosité du fluide de compaction. Ce paramètre caractéristique du fluide de compaction peut avoir un impact important sur le déroulement du procédé d'injection flexible. La viscosité est la propriété d'un fluide qui tend à empêcher son écoulement, lorsqu'il est soumis à une force. Elle est déterminée par la capacité de transfert de quantité de mouvement que possède une couche en déplacement relatif par rapport aux adjacentes. Selon la position relative des deux chambres, on peut penser qu'une diminution de la viscosité améliorerait l'imprégnation. Dans le chapitre 8, quatre huiles silicone de viscosité différentes vont être utilisées pour étudier l'influence de la viscosité du fluide de compaction.

4.6 Nouveaux cadres

De nouveaux cadres ont été fabriqués pour effectuer ces essais. Deux types de cadres existent : le premier donne l'épaisseur de la chambre d'injection et le second celle de la chambre de compaction. L'épaisseur du cadre de la chambre d'injection correspond approximativement à l'épaisseur de la préforme. Le cadre de la chambre de compaction a une épaisseur qui varie en fonction des travaux réalisés dans les différents plans d'expérience. Les dimensions de la cavité du cadre de la chambre de compaction sont légèrement plus faibles que celle de la cavité de la chambre d'injection pour assurer un

bon maintien du renfort. La Figure 4.22 montre une vue en coupe du positionnement des cadres, de la membrane et du renfort.

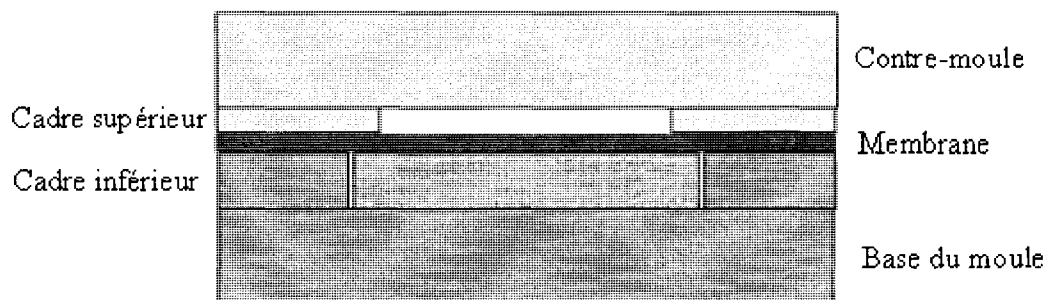


Figure 4.22 Disposition des nouveaux cadres.

Un cadre de 0.125 po a été fabriqué pour la chambre d'injection et quatre cadres de 0.08, 0.06, 0.05 et 0.04 po pour la chambre de compaction. Le cadre de chambre d'injection est en aluminium 6061 pour éviter toute attaque chimique de la résine.

CHAPITRE 5 : ÉTUDE DE L'ÉPAISSEUR DE LA CHAMBRE DE COMPACTION

5.1 Introduction

Ce chapitre présente un volet important des travaux visant à la compréhension du comportement du procédé d'injection flexible appliqué au renfort tissé. Ce chapitre montre que l'épaisseur de la chambre est le paramètre, auquel il faut apporter le plus d'attention. Le plan d'expérience #2 met en lumière les conséquences d'une diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction et démontre l'existence d'une épaisseur optimale.

Un certain nombre d'observations montrent qu'en deçà d'une certaine épaisseur, le procédé d'injection flexible est sensiblement ralenti. Puisque l'objectif du procédé est d'atteindre des cadences de production élevées, une telle épaisseur s'avère importante.

Une autre section de ce chapitre mettra en évidence l'importance de la pression de vide dans la chambre d'injection. Une pression de vide partiel se traduit par une présence d'air dans la chambre d'injection. Nous verrons que la mise en œuvre d'une injection flexible combinée avec une bonne épaisseur de la chambre de compaction influent grandement sur la formation de zones sèches.

L'épaisseur de la chambre de compaction varie d'une injection à l'autre mais elle sera la même partout dans le moule. Une étude portant sur la forme de la chambre de compaction a été réalisée [30]. Ce travail présenté à l'annexe E, a pour objectif d'analyser l'influence de la variation de la section de la chambre de compaction sur la performance du remplissage de la cavité. À cette fin, trois profils de la chambre de compaction ont été étudiés.

5.2 Conditions expérimentales

5.2.1 Matériaux

Pour ce plan d'expérience, le tissu utilisé est fabriqué par CHOMARAT. Le Roviplay (CP 097) est un tissu bidirectionnel $[-45/ +45]$ en fibres de verre (Figure 5.1). Son tissage le dote de surfaces lisses qui n'influencent pas l'écoulement de la résine. Pour obtenir une meilleure imprégnation, le tissu SAERTEX est remplacé par le renfort de CHOMARAT. Les filaments fibreux du tissu de SAERTEX sont très compacts, se qui rend difficile leur imprégnation. Dans le cas de ce tissu, des micro-vides se forment. Le tissu de CHOMARAT permet d'améliorer l'analyse visuelle, car seul des zones sèches induites par le procédé sont visibles. La masse surfacique de ce tissu a été déterminée pour plusieurs échantillons comme étant environ 810 g/m^2 (Tableau 4.5).

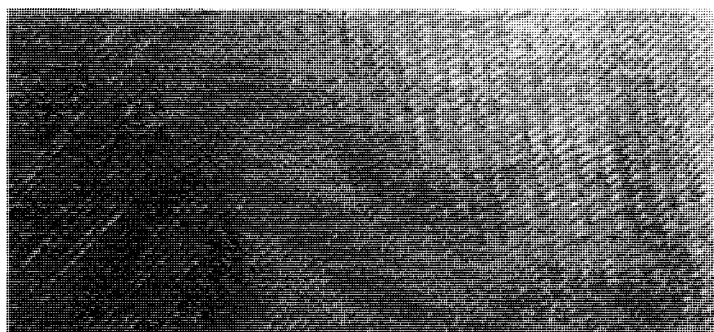


Figure 5.1 Photographie du tissu Roviplay.

Tableau 5.1 Masse surfacique du renfort de Roviplay

Longueur (mm)	Largeur (mm)	Poids (g)	Masse surfacique (g/m ²)
100	102	8.22	806
103	101	8.44	812
104	105	8.88	813

La principale caractéristique d'un renfort est sa perméabilité. La perméabilité du tissu SAERUni est de $5.54E-10 \text{ m}^2$. La perméabilité du renfort a été déterminée sur un banc d'essai du laboratoire de l'École Polytechnique.

La résine utilisée est une résine vinylester de la compagnie DERAKANE, la vinylester 411-350. Cette résine a une viscosité de 0.35 cSt. Dans plan d'expérience, l'injection est réalisée avec un pistolet d'injection. Dans ce cas la résine est formulée, puis introduite dans la cartouche du pistolet. Le naphthalène de cobalt 12 % (NaCo) de la compagnie Dussek est le promoteur. Ce dernier est nécessaire pour initier la polymérisation à température ambiante. Un accélérateur est ajouté, le N-dimethylaniline (DMA). Le Tableau 4.6 donne les proportions des éléments qui permettent la polymérisation de la résine.

Tableau 5.2 Proportion des additifs ajoutés à la résine vinylester DERAKANE 411-350 utilisée avec le pistolet d'injection

Additifs	PHR (pour 100g de résine)
NaCo 12 %	0.15
DMA	0.2
MEKP 925 H	1.5

Le fluide de compaction est un huile silicone de la compagnie (200® fluid) DOW CORNING. Dans ce plan d'expérience, nous avons choisi l'huile d'une viscosité 1000 cSt.

La membrane qui sépare les chambres d'injection et de compaction est en silicone transparent afin d'observer les écoulements de la résine et du fluide de compaction. La membrane EL1040T provient de la firme TORR-TECHNOLOGIE et possède une épaisseur de 0.061 pouces (1.5 mm). Ses propriétés d'étanchéité et de compatibilité avec les huiles silicones en font une très bonne membrane.

5.2.2 Paramètres de mises en œuvre

Pour faire varier l'épaisseur de la chambre de compaction, de nouveaux cadres ont été fabriqués (c.f. chapitre 4). Le cadre inférieur à une épaisseur proche de celle des préformes utilisées, c'est-à-dire 0.125 po. L'épaisseur du cadre supérieur varie grâce aux quatre cadres réalisés à cet effet. Leurs épaisseurs sont de 0.08, 0.06, 0.05 et 0.04 po. Pour le plan d'expérience, quatre épaisseurs sont choisies pour observer l'influence de l'épaisseur de la chambre de compaction. La première épaisseur de 0.14 po est le résultat de la combinaison des deux cadres de 0.08 et 0.06 po. Les cadres 0.08, 0.05 et 0.04 po sont également utilisés pour changer l'épaisseur de la chambre de compaction.

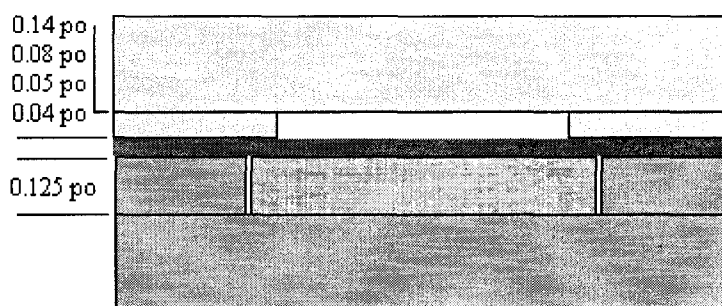


Figure 5.2 Cadres inférieur et supérieur en position.

Un ensemble de pots de pression et de vide sont nécessaires pour la mise en œuvre du procédé d'injection flexible. Tel qu'illustré à la Figure 4.5, il faut deux pots de vide pour réaliser le vide dans les chambres de compaction et d'injection, ainsi que deux systèmes permettant l'injection de la résine et du fluide de compaction.

Les deux pots de vide utilisés pour les chambres de compaction et d'injection sont respectivement en PVC et en acier. Le fluide de compaction est injecté à l'aide d'un pot de pression (Figure 4.6).

La pression de vide de la chambre de compaction est établie à 1 bar. Pour obtenir une plus grande stabilité des pressions, cette pression de vide a été modifiée par rapport au plan d'expérience #1. Un vide partiel obtenu à partir d'une pompe à vide nécessite

l'utilisation d'une valve. Cette valve permet l'établissement d'un débit d'air entre l'atmosphère et le pot, et rend plus instable la pression de vide. La pression de vide dans la chambre d'injection est maintenue à 0.25 bar pour permettre la formation d'un interstice entre la préforme et la membrane. La pression d'injection du fluide de compaction reste de 6 bars.

Le système d'injection de résine est un pistolet à air comprimé. La pression d'injection est fixée à 1 bar. La Figure 5.3 montre ce pistolet qui est commandé manuellement. La précision en volume et la simplicité d'utilisation représentent les principaux avantages de ce système. Une fois la cartouche remplie avec la bonne quantité de résine, un connecteur barbelé permet une fixation aisée au moule. Il reste alors à régler la pression du pot et à lancer l'injection en actionnant la gâchette. Une fois la résine introduite, le tuyau d'entrée est pincé et le fluide de compaction est injecté. La cartouche du pistolet étant opaque, la fin de l'injection de la résine est déterminée grâce à la transparence du contre-moule. D'une injection à l'autre, l'utilisateur a un temps de réaction différent, ce qui fait varier la durée du temps mort entre les deux étapes du procédé (injection et compaction).

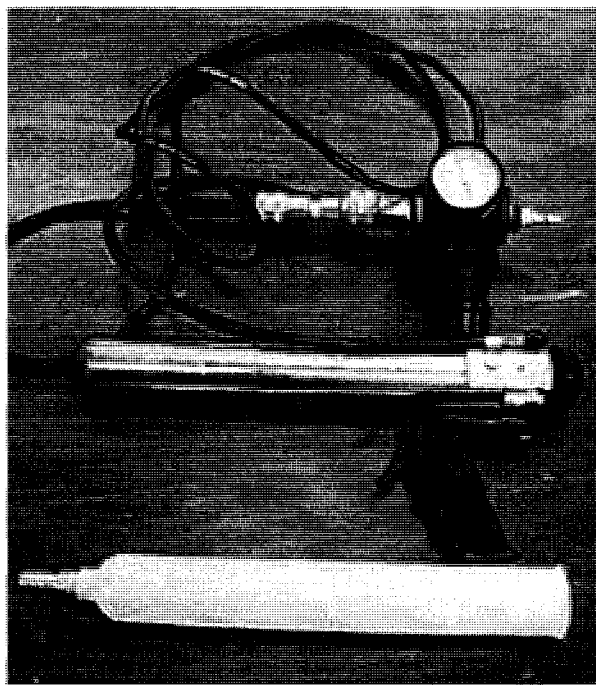


Figure 5.3 Pistolet pour injection manuelle.

Dans le plan d'expérience #1, nous avons vu que la quantité de résine varie en fonction des pertes à l'intérieur du moule. Pour faciliter la préparation de l'ensemble des travaux qui suivent, 100 g de résine sont formulés par pièce. Cela revient approximativement à 71 g de résine dans le renfort. Cette quantité de résine permet d'obtenir un taux de fibres d'environ 46% et une épaisseur théorique de 2.77 mm.

Pour mesurer l'épaisseur des pièces fabriquées, nous utilisons un micromètre analogique de Mitutoyo. La Machine de Mesure Tridimensionnelle étant trop précise pour l'analyse voulue, il est judicieux d'utiliser une méthode moins coûteuse. La Figure 5.4 montre le micromètre analogique à gorge profonde, qui permet de mesurer l'épaisseur à n'importe quelle position sur la pièce. La Figure 5.5 montre l'emplacement des 80 points de mesures réalisées.

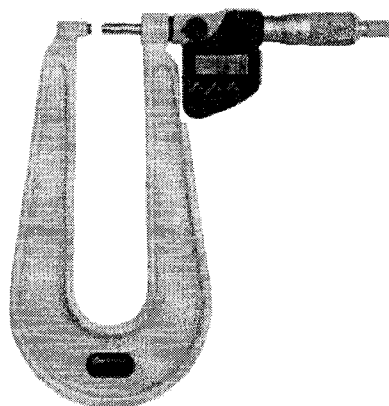


Figure 5.4 Micromètre.

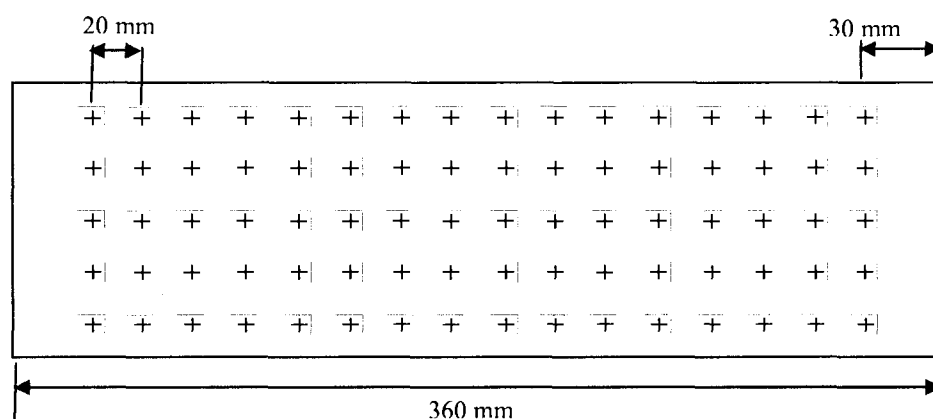


Figure 5.5 Mesure des pièces fabriquées.

La résolution du micromètre est de 1/1000ème de millimètre. Puisque, la surface du côté membrane des pièces fabriquées n'est pas parfaitement plane, la précision du micromètre est affectée. Il faut alors prendre en compte une incertitude de l'ordre de 1/100ème de millimètre.

Le plan d'expérience comporte huit injections. L'épaisseur du cadre de la chambre de compaction en est la seule variable. Dans le but d'obtenir des pièces à un taux de fibres de 46 %, les renforts sont formés de 4 plis Rovipty. Le fluide de compaction d'une viscosité de 1000 cSt est injecté à six bars. Les pressions de vide dans la chambre de

compaction et d'injection sont respectivement de 1 bar et 0.25 bar. Le Tableau 5.3 récapitule tous les paramètres fixes du plan d'expérience #2. Le Tableau 5.4 identifie chaque pièce fabriquée, deux pour chaque épaisseur de cadre.

Tableau 5.3 Paramètres fixes du plan d'expérience #2

Paramètres	Valeurs
Viscosité du fluide de compaction	1000 cSt
Pression de vide de la chambre de compaction	1 bar
Pression de vide de la chambre d'injection	¼ de bar
Pression du fluide de compaction	6 bars
Pression d'injection de la résine	1 bar
Taux de fibres visé	46 %

Tableau 5.4 Tableau récapitulatif des conditions d'injection

Identification	Épaisseur de la chambre de compaction (po)
E07P06	0.14
E07P30	
E07P07	0.08
E07P32	
E07P08	0.05
E07P33	
E07P05	0.04
E07P34	

5.3 Résultats et discussion

Les résultats obtenus avec ce plan d'expérience semblent établir une relation entre la position du front de résine après son introduction et la qualité de la pièce produite. En effet, il est démontré par la suite que plus la résine progresse dans le moule pendant l'injection, meilleure est la qualité de l'imprégnation des fibres du renfort tissé. Pour

amener la résine plus loin dans le moule, il faut diminuer l'épaisseur de la chambre de compaction. Toutefois, les résultats de ce plan d'expérience montrent qu'il existe une épaisseur minimale limite. En effet, au dessous d'une certaine épaisseur de chambre de compaction, le temps d'injection augmente de manière importante.

5.3.1 Informations générales sur les pièces obtenues

Le Tableau 4.10 retranscrit un ensemble de données qui informent sur la qualité des injections. La quantité de résine introduite dans la pièce finale permet de comparer la consigne d'injection avec la réalité. Le taux de fibres global est calculé grâce aux masses du renfort sec et saturé avec la résine. Ce taux de fibres ne prend évidemment pas en compte l'hétérogénéité sur l'épaisseur de la pièce.

Tableau 5.5 Tableau récapitulatif de données sur les pièces du plan d'expérience #2

Identification	Cadre (po)	Poids préforme (g)	Poids final (g)	Masse résine (g)	Taux de fibres global (%)
E07P06	0.14	150.57	217.92	67.35	48.88
E07P30		148.26	221.25	72.99	46.41
E07P07	0.08	146.87	220.39	73.52	45.99
E07P32		148.42	220.74	72.32	46.68
E07P08	0.05	146.82	218.07	71.25	46.79
E07P33		149.30	222.35	73.05	46.57
E07P05	0.04	147.28	221.03	73.75	45.98
E07P34		147.91	219.11	71.20	47.00

Ce tableau montre que, pour la majorité des pièces, le taux de fibres approche 46 %. Quant aux légères variations du taux de fibres, elles s'expliquent par les pertes variables de résine dans le moule.

Le Tableau 4.11 donne les temps d'injection, qui comprennent le temps d'entrée de la résine et du déplacement de la résine vers l'évent sous l'effet de la pression du fluide de compaction. Le temps mort entre la fin de l'entrée de résine et le début de l'injection du fluide de compaction n'est évidemment pas pris en compte dans le calcul du temps

d'injection. L'automatisation du procédé pouvant annuler ce temps mort, il ne présente pas d'intérêt.

Tableau 5.6 Temps d'injection des pièces du plan d'expérience #2

Identification	Temps d'entrée de la résine (s)	Temps de fin de remplissage (s)	Temps d'injection total (s)
E07P06	3.971	2.669	6.64
E07P30	3.47	2.469	5.939
E07P07	4.338	1.102	5.44
E07P32	4.497	1.246	5.743
E07P08	7.842	0.567	8.409
E07P33	8.046	0.586	8.632
E07P05	10.576	1.335	11.911
E07P34	11.073	1.231	12.304

Ce tableau indique des temps d'injections très satisfaisants. Encore une fois, dans le cadre d'une fabrication en série, la fenêtre de temps avant le début de la polymérisation est augmentée d'un temps d'imprégnation. Dans le plan d'expérience #2, ce temps correspond à la fin de l'imprégnation du renfort sous l'effet de la pression du fluide de compaction. Ce temps plus court que dans le cas du tissu SAERUni, il est d'environ 5 secondes.

Pour les cadres épais, les temps d'injections obtenus sont très faibles. Plus l'épaisseur du cadre diminue, plus le temps d'injection augmente. Ce phénomène est traité plus loin lorsque nous tenterons de démontrer l'existence d'une épaisseur optimale de la chambre de compaction.

Pour un taux volumique de fibres de 46 %, le tissu utilisé a une perméabilité de $5.54 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. La loi de Darcy permet d'estimer les temps d'injections à l'aide du procédé RTM. Le temps requis, pour imprégner une plaque de 355 mm de long par une résine d'une viscosité de 0.35 Pa.s à l'aide d'un pot de pression de 3 bars est de 147 s. Les temps d'injections additionnés du temps d'imprégnation montrent que le procédé

d'injection flexible est au moins 8.5 fois plus rapide que le procédé RTM. Le Tableau 5.7 compare ces temps avec le procédé RTM.

Tableau 5.7 Comparaison avec le procédé RTM

Identification : Injection flexible	Cadre (po)	Temps injection flexible (s)	$\frac{t_R}{t_f}$	Qualité
E07P06	0.14	11.64	12,66	zone sèche
E07P30		10.939	13,47	
E07P07	0.08	10.44	14,12	zone sèche
E07P32		10.743	13,72	
E07P08	0.05	13.409	10,99	bonne
E07P33		13.632	10,81	
E07P05	0.04	16.911	8,71	bonne
E07P34		17.304	8,52	

Nous remarquons une diminution des capacités du procédé d'injection flexible par rapport aux résultats obtenus au chapitre 4. Le changement de perméabilité des renforts utilisés produit une chute du temps d'injection RTM de près de 4 fois. Cependant, les temps d'injection obtenus à l'aide du procédé d'injection flexible ne varient pas d'un tissu à l'autre. Dans une certaine mesure, le temps d'injection ne semble pas dépendre du type de renfort. Seul le temps d'imprégnation est modifié par la perméabilité du renfort utilisé. Cette observation semble indiquer qu'il existe une limite sur la perméabilité du renfort utilisé. En effet, si le renfort a une perméabilité trop faible, le temps total d'injection ne sera pas favorable à l'utilisation du procédé d'injection flexible. Il faut donc travailler sur le temps d'imprégnation pour améliorer le procédé d'injection flexible.

5.3.2 Observations visuelles et imprégnation : élimination de la zone sèche

Pour chaque épaisseur de la chambre d'injection, la Figure 5.6 montre la photographie côté moule d'une des deux pièces fabriquées. Une analyse visuelle est décrite dans le Tableau 5.8. Cette analyse synthétique indique la présence de zones sèches et

d'accumulations de résine. Elle donne également une appréciation visuelle de la qualité générale de la pièce.

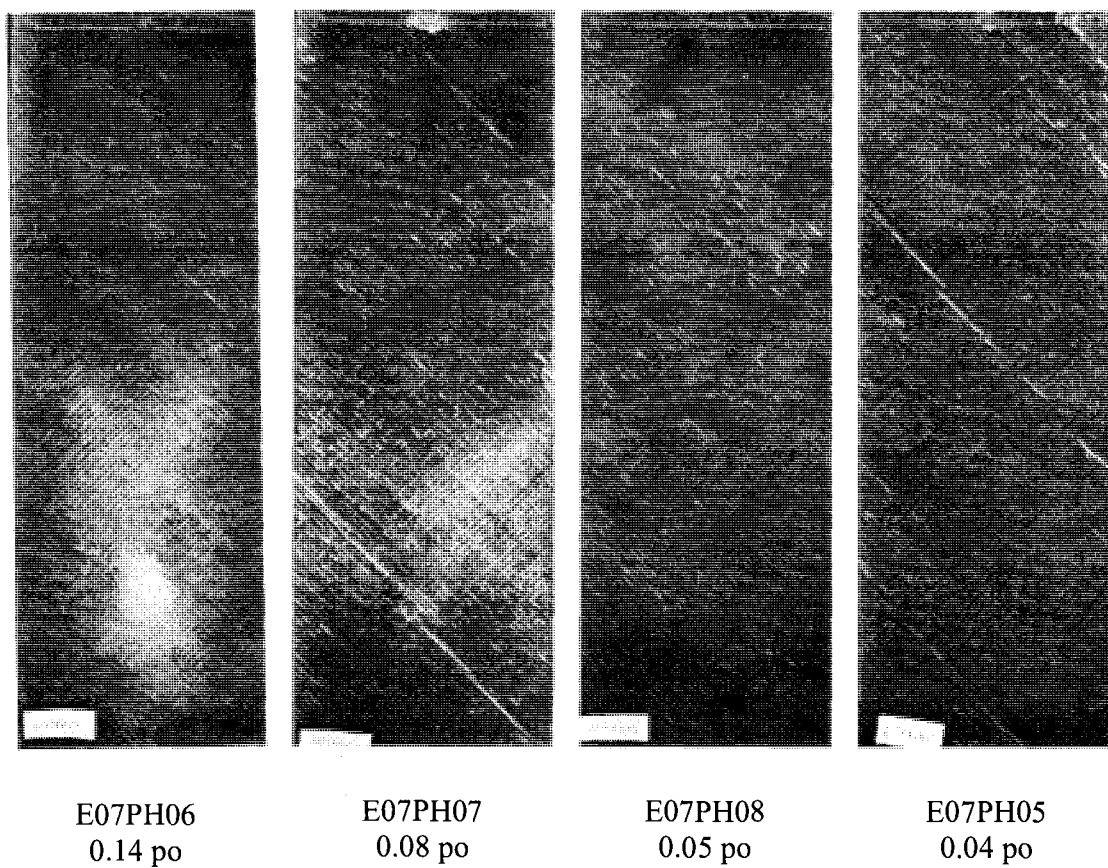


Figure 5.6 Pièces finales vue côté moule pour différentes épaisseurs de cadres.

Tableau 5.8 Analyse visuelle des pièces produites

Épaisseur de cadre	Qualité de l'imprégnation	Zone sèche	Accumulation de résine
0.14 po	très mauvaise	très importante très concentrée : 7 cm de l'entrée	grosse accumulation
0.08 po	mauvaise	importante concentrée : 10 cm de l'entrée	grosse accumulation
0.05 po	bonne	faible dispersée	petite accumulation
0.04 po	bonne	très faible dispersée	pas d'accumulation

On remarque clairement que plus l'épaisseur du cadre de la chambre de compaction est petite, meilleur est la qualité de la pièce. La zone sèche se déplace vers l'extrémité du moule, diminue et se disperse. L'accumulation de résine à l'extrémité de la pièce est observée pour toutes les épaisseurs de chambre de compaction, sauf quand le cadre de 0.04 po est utilisé.

L'analyse des temps d'injection combinée avec celle de la qualité de l'imprégnation laisse présager de l'existence d'une épaisseur optimale de la chambre de compaction dans le procédé d'injection flexible.

5.3.3 Épaisseur optimale de la chambre de compaction

Cette section tente de démontrer l'existence d'une valeur optimale de l'épaisseur du cadre utilisé. Les résultats analysés sont les courbes de déplacement du front de résine dans le temps, les temps d'injections et la pression du fluide de compaction.

À l'aide du logiciel AVIMECA, les courbes représentant la position du front de résine de chaque pièce sont tracées. La Figure 5.7 contient une courbe pour chaque épaisseur de cadre utilisée. L'allure de la courbe du front de résine évolue en fonction de l'épaisseur du cadre de la chambre de compaction. On observe que, pour un cadre de

0.14 po, la résine pénètre dans le moule en accélérant légèrement. Lorsque l'épaisseur du cadre diminue, l'inflexion de la courbe change et montre une décélération de la résine.

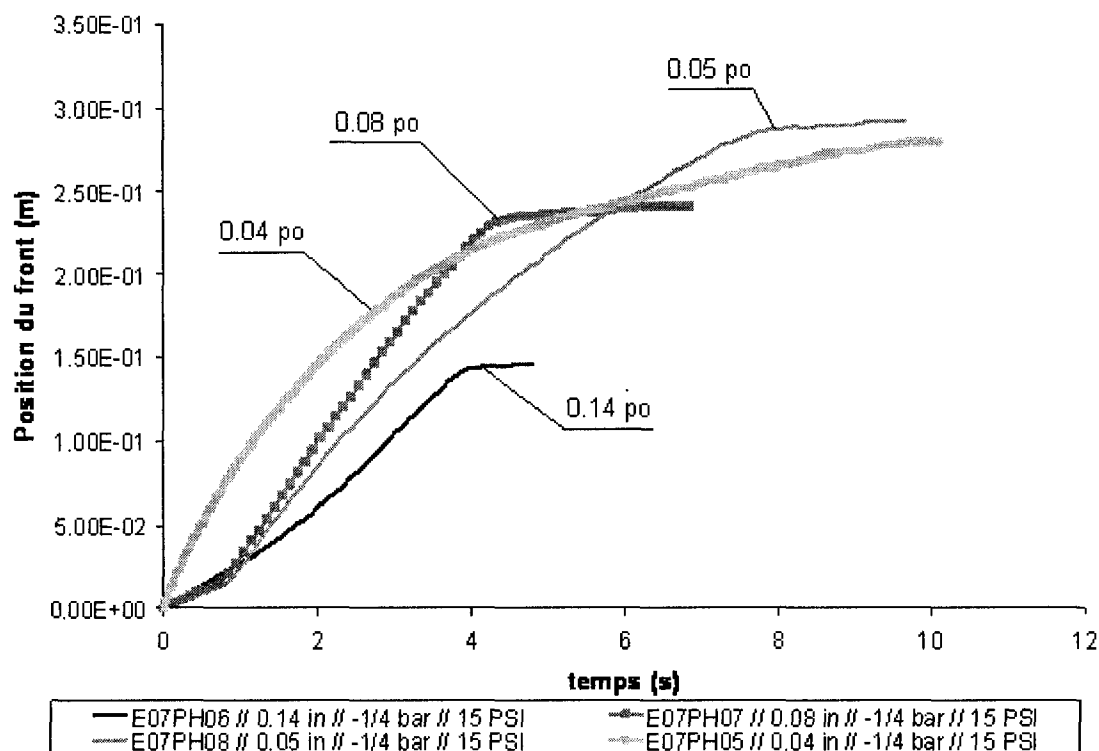


Figure 5.7 Position du front de résine dans le temps pour chaque épaisseur de cadre.

Dans le chapitre 4, nous avons vu que l'écoulement dans l'interstice entre le renfort et la membrane est quasiment un écoulement de Poiseuille. L'équation (4.5) montre que pour un même incrément de pression, la vitesse est fonction de l'épaisseur au carré de l'interstice et de sa longueur. Dans le cas du moule transparent, cette vitesse est dépendante des pertes de charges qui sont en grande partie gouvernée par la géométrie de l'interstice. Le ralentissement de vitesse du front de résine pour un cadre fin s'explique donc par l'augmentation de pertes de charge. Pour un cadre épais et sur une courte distance, la résine ne rencontre alors presque aucune résistance car l'espace conféré par le cadre n'implique que très peu de perte de charge. Dans le cas d'une

épaisseur faible la distance parcourue augmente. Ces deux facteurs rendent l'avancée de la résine plus difficile. Finalement, la Figure 5.7 qui montre un ralentissement de la vitesse du front de résine avec la diminution de l'épaisseur du cadre de la chambre de compaction, traduit l'augmentation des pertes de charge en fonction de la diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction et de la distance parcourue par la résine.

Le Figure 5.8 reprend les temps d'injection donnés dans le Tableau 5.6. Ce graphique montre que le temps d'entrée de la résine est également un bon indicateur sur le changement du comportement du procédé en fonction de l'épaisseur du cadre.

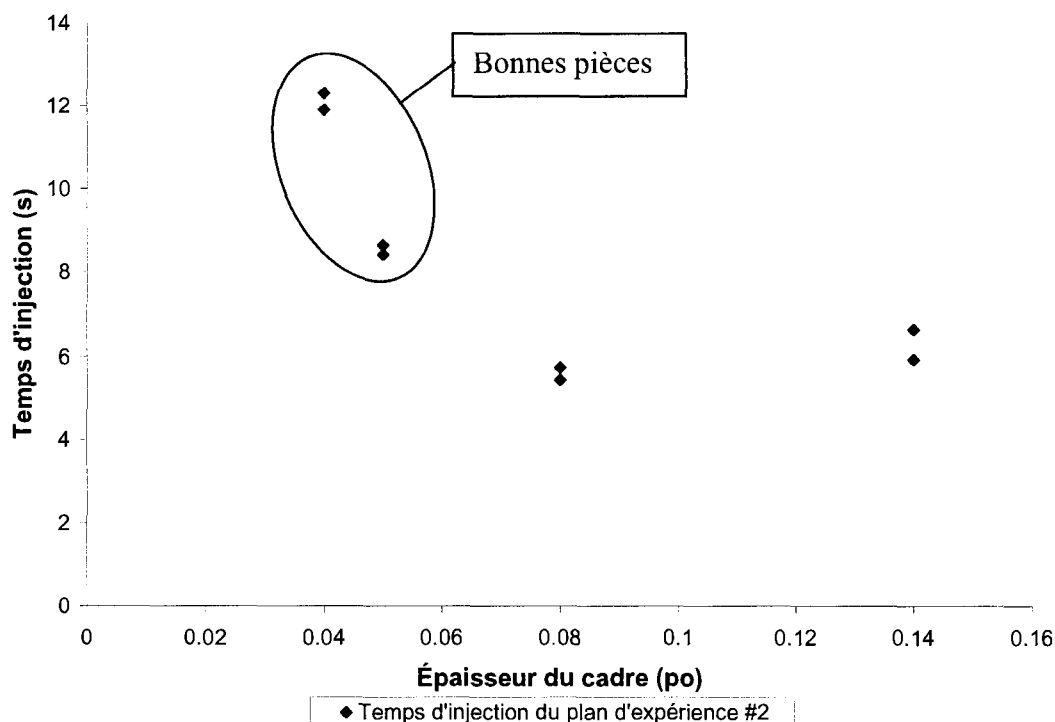


Figure 5.8 Temps d'injection en fonction de l'épaisseur du cadre utilisé.

On remarque que pour les cadres 0.14 et 0.08 po, le temps d'entrée de la résine est d'environ 6 s alors qu'il est de 8.5 s pour un cadre de 0.05 po et de 12 s pour le cadre de 0.04 po. Dans le cas d'une injection à pression contrôlée, le temps d'injection augmente quand l'épaisseur du cadre diminue. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la perte

de charge dans le moule. En effet, les pertes de charges sont fonction de la section de la conduite, de sa longueur, de la viscosité du fluide et de la vitesse d'écoulement selon la formule.

$$\Delta P = \frac{32 \cdot \mu \cdot L \cdot V}{D^2} \quad (5.1)$$

Dans le cas d'une cavité rectangulaire, D correspond au diamètre hydraulique équivalent exprimé par l'équation :

$$D = 4 \cdot \frac{S}{P} \quad (5.2)$$

où S est la section, et P le périmètre.

En d'autres termes, l'écoulement devient plus difficile dans l'interstice et cela a pour effet de ralentir l'avancée de la résine. Ce ralentissement a deux conséquences : l'augmentation du temps d'injection et une imprégnation plus importante du renfort pendant la phase d'injection. La diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction augmente les pertes de charge dans l'interstice entre le renfort et la membrane. Ceci ralentit l'écoulement de Poiseuille. Dans le chapitre 4, l'introduction de la notion de perméabilité équivalente de l'interstice a permis d'illustrer la prédominance de l'écoulement de Poiseuille, qui est beaucoup plus rapide que celui de Darcy à travers le renfort. Lorsque l'épaisseur de l'interstice diminue, la perméabilité équivalente diminue également, ce qui tend à rapprocher les deux types d'écoulement. Pour la résine, il devient alors aussi facile de traverser le renfort que de s'écouler dans l'interstice. Sur les vidéos des pièces fabriquées avec le cadre de 0.04 po, on observe que la résine imprègne fortement le renfort au début de la pièce (Figure 5.9). Ce phénomène commence à partir d'une certaine épaisseur de cadre.

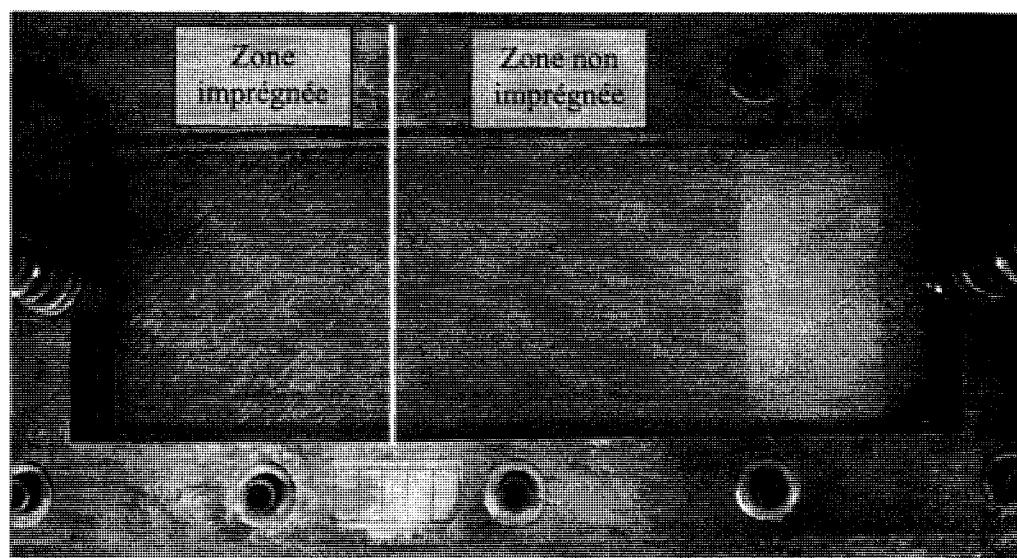


Figure 5.9 Imprégnation du renfort pendant l'injection de la résine.

Le Tableau 5.9 présente, pour chaque injection, la position du front de résine dans le moule à la fin de la phase d'injection.

Tableau 5.9 Position du front de résine après injection

Identification	Épaisseur du cadre (po)	Position du front de résine (cm)
E07P05	0.04	28
E07P34	0.04	28.2
E07P08	0.05	29.2
E07P33	0.05	28.9
E07P07	0.08	24
E07P32	0.08	24.3
E07P06	0.14	14.6
E07P30	0.14	14.8

Si l'épaisseur de la chambre de compaction n'avait pas d'influence sur l'imprégnation du renfort lors de l'injection de la résine, l'équation suivante décrirait la position du front de résine après la phase d'injection en fonction de l'épaisseur de la chambre de compaction :

$$L = \frac{V}{e \cdot l} \quad (5.3)$$

où V est le volume de résine, e l'épaisseur et l la largeur de la chambre de compaction.

La Figure 5.10 trace les positions des fronts de résine après la phase d'injection en fonction de l'épaisseur du cadre. À partir d'un cadre de 0.14 po comme référence, l'équation (5.3) suit la courbe de la Figure 5.10, qui décrit la position théorique du front de résine en fonction de l'épaisseur de la chambre de compaction, dans le cas où la résine n'imprègnerait pas plus le renfort que lors de l'utilisation du cadre de 0.14 po. Sur cette figure, on voit que la position du front d'injection dévie de la courbe de l'équation (5.3) à partir de 0.05 po. Ceci montre que la résine imprègne en partie le renfort. La diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction modifie donc le comportement du procédé d'injection flexible en forçant la résine à imprégner de plus en plus le renfort. En dessous d'une certaine épaisseur (0.05 po), l'imprégnation se fait en grande partie pendant la phase d'injection de la résine. Ceci améliore la qualité des pièces fabriquées; cependant, nous avons vu que la diminution de l'épaisseur du cadre augmente le temps d'injection.

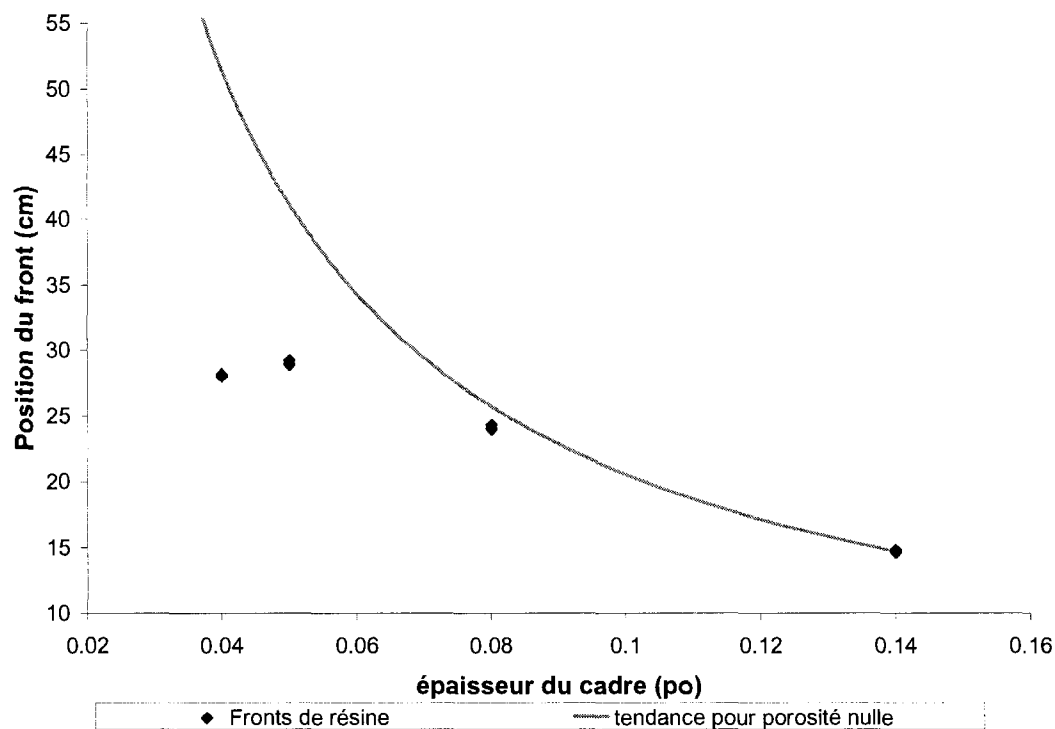


Figure 5.10 Position du front de résine pour chaque pièce.

L'analyse de la pression du fluide de compaction montre également ce changement de comportement. Pour un capteur de pression situé juste à l'entrée de la chambre de compaction, la Figure 5.11 montre les courbes obtenues pour chaque épaisseur de cadre utilisé. L'échelle des temps de ce graphique commence lorsque le fluide de compaction est injecté. On observe que la pression atteint immédiatement un premier palier. Pour les cadres de 0.14 et 0.08 po, ce palier est proche de 2.5 bars. La longueur de ce palier correspond à la durée de la fin du remplissage du moule. Dans le cas des cadres 0.05 et 0.04 po, la pression de ce premier palier augmente rapidement.

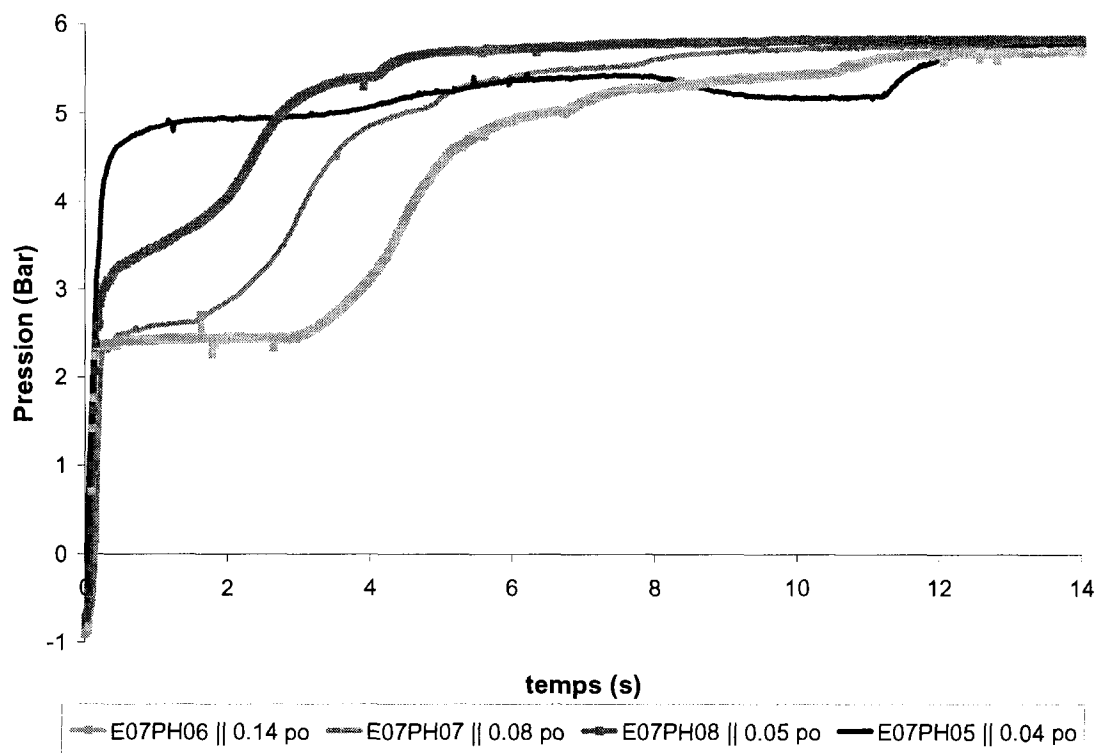


Figure 5.11 Presson du fluide de compaction.

Aussi bien l'analyse des temps d'injection que de la position du front de résine que l'étude de la pression du fluide de compaction démontrent un changement du mode d'écoulement en fonction du cadre utilisé. Lorsque l'épaisseur de la chambre de compaction est inférieure à une certaine valeur, l'écoulement de Darcy prend plus d'importance. L'imprégnation est alors meilleure, car la résine imprègne le renfort dans son plan, mais le temps d'injection devient plus long. Cette discussion montre l'existence d'une épaisseur optimale de la chambre de compaction, qui assure une bonne imprégnation du renfort fibreux pour un temps d'injection le plus court possible.

5.3.4 Analyse de l'épaisseur des pièces

À l'aide du micromètre digital, l'épaisseur de certaines pièces a été récupérée. Au total, 80 mesures ont été réalisées sur une pièce de chaque épaisseur. Les valeurs sont

regroupées à l'annexe C. À l'œil nu, il est facile d'estimer la présence et l'importance de l'accumulation de résine à l'extrémité des pièces. Le micromètre permet de mettre en évidence des variations d'épaisseur dans le reste de la pièce. À l'aide du logiciel MATHLAB, des vues tridimensionnelles de l'épaisseur de chaque pièce sont produites. Le code utilisé est présenté à l'annexe D.

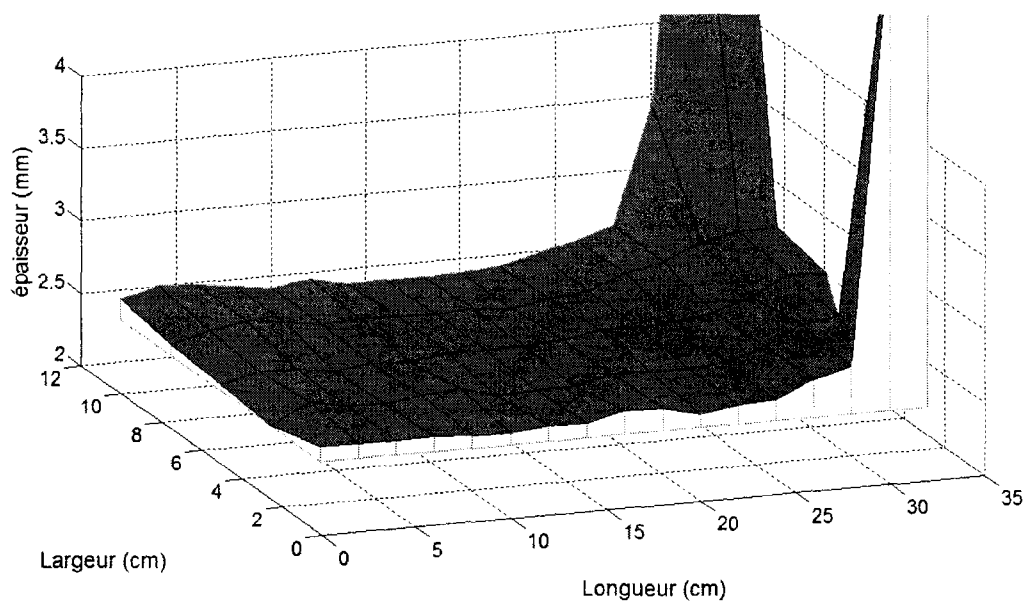


Figure 5.12 Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH06 (0.14 po).

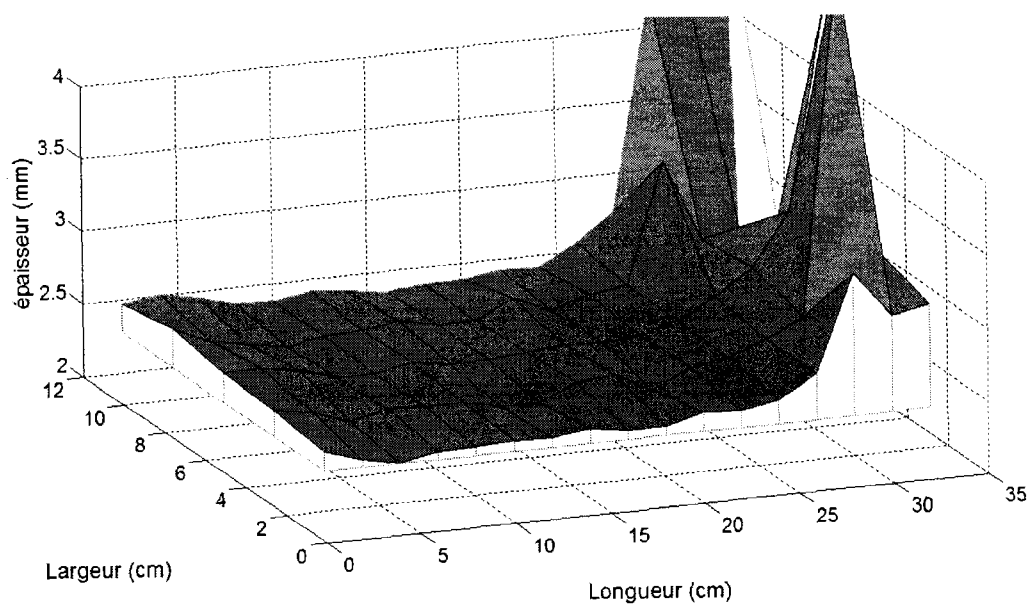


Figure 5.13 Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH07 (0.08 po).

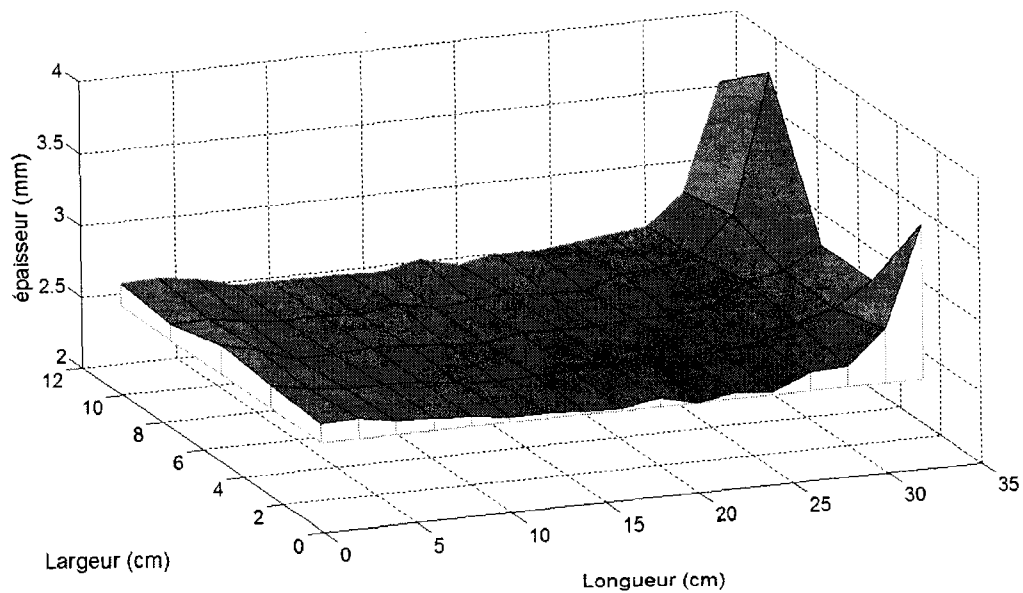


Figure 5.14 Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH08 (0.05 po).

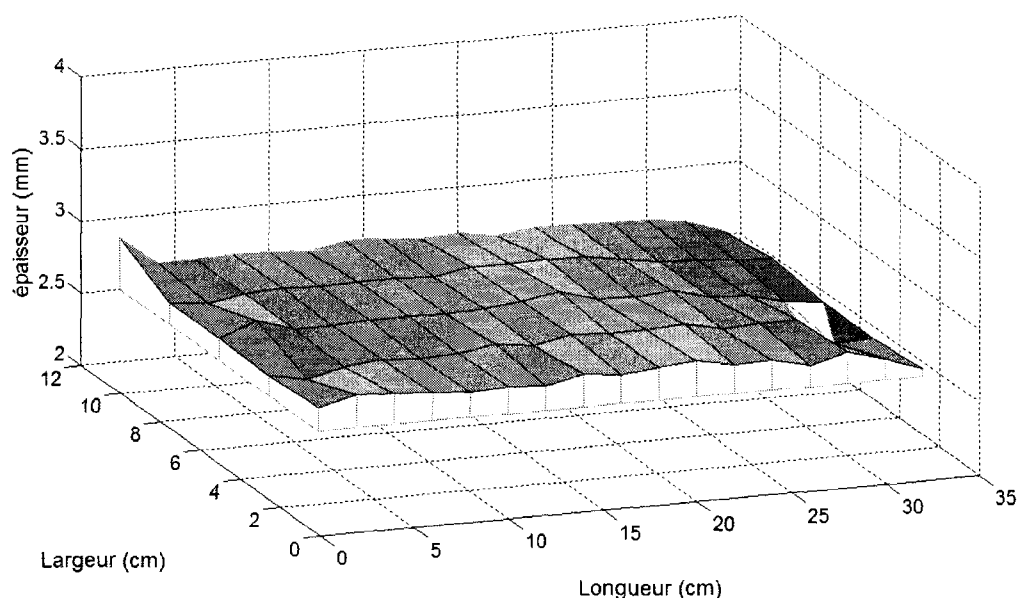


Figure 5.15 Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH05 (0.04 po).

Ces graphiques donnent une idée générale de l'homogénéité des pièces fabriquées. Les accumulations évoquées plus haut sont visibles. Ces accumulations peuvent avoir, au maximum, l'épaisseur de la chambre de compaction. À l'endroit de l'accumulation le composite peut donc avoir l'épaisseur de la cavité totale du moule. Nous voyons ici qu'il est important de contrôler le mode d'imprégnation du procédé pour diminuer l'accumulation de résine. Ce contrôle passe tout d'abords par l'épaisseur de la chambre de compaction.

Par ailleurs, nous pouvons observer une diminution de l'épaisseur dans le centre des pièces réalisées à l'aide des cadres 0.14, 0.08 et 0.05 po. Nous remarquons également qu'il y a une diminution de l'épaisseur à la fin de la pièce E07PH05 réalisée avec le cadre de 0.04 po. Cette pièce a une épaisseur plus importante sur le reste de la plaque. Les mesures d'épaisseurs sont prises suivant 5 lignes, le long de chaque pièce. Pour mieux analyser les données, la Figure 5.16 se concentre sur les mesures de la ligne centrale.

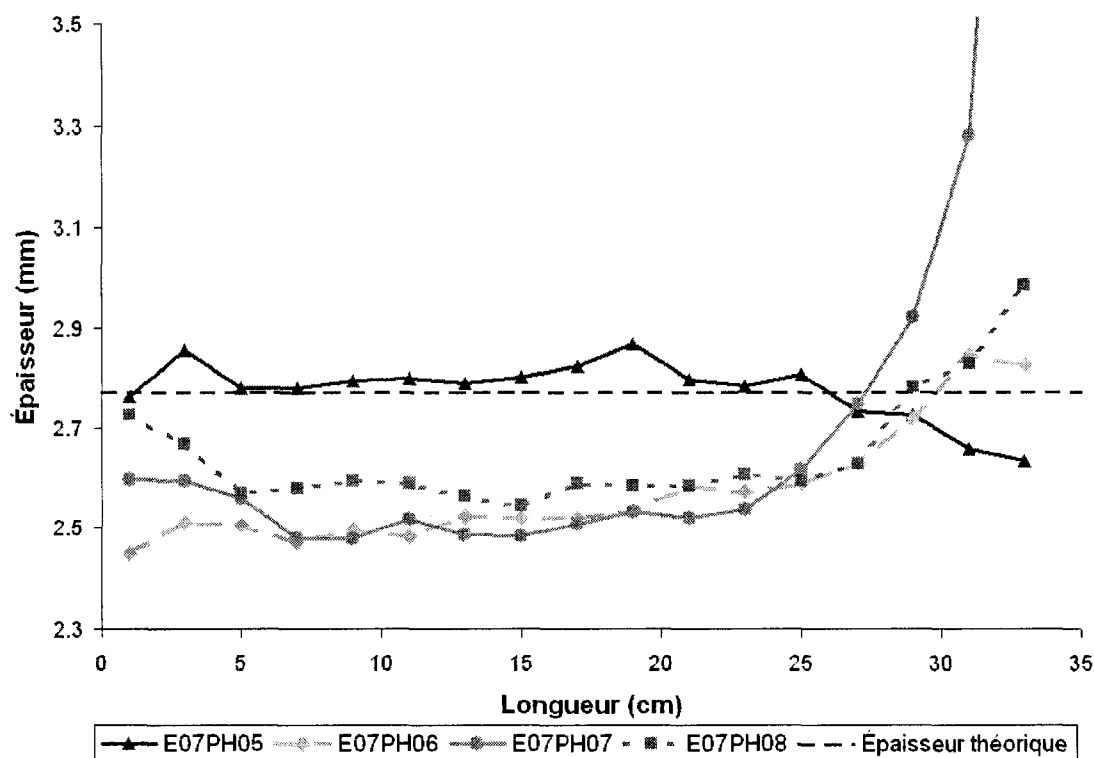


Figure 5.16 Mesures d'épaisseur de la ligne centrale des pièces du plan d'expérience #2.

Sur ce graphique, nous retrouvons les accumulations de résine pour les pièces E07PH06, E07PH07 et E07PH08. Dans la partie plane de ces mêmes pièces, l'épaisseur est en dessous de la valeur théorique. Pour la pièce E07PH05, réalisée avec le cadre de 0.04 po, l'épaisseur est proche de 2.77 mm, qui est la valeur théorique pour un taux volumique de fibres de 46 %. Notons également l'épaisseur que diminue sur les 10 derniers centimètres de cette pièce.

Les accumulations dues à l'épaisseur de la chambre de compaction ne se produisent plus lorsque l'épaisseur permet une bonne imprégnation du renfort pendant l'injection de la résine. Nous avons vu plus haut que, pour une épaisseur de la chambre de compaction de 0.04 po, l'écoulement de Darcy est favorisé. Autrement dit, une grande partie de la résine imprègne le renfort pendant la phase d'injection de la résine. Dans ce cas, la

résine est mieux répartie, car elle n'est pas poussée vers l'extrémité du moule lors de l'injection du fluide de compaction.

Pour optimiser la fabrication, il faut faire un compromis entre la qualité des pièces produites et le temps d'injection. L'utilisation du cadre fin de 0.04 po amène une homogénéité plus grande de l'épaisseur. Toutefois, il faut prendre en compte l'augmentation du temps d'injection qui accompagne cette diminution de l'épaisseur du cadre.

5.3.5 Influence de l'épaisseur sur l'air contenue dans la pièce finale

Cette section examine la quantité d'air emprisonné lors d'une injection flexible. En s'appuyant sur le déroulement d'une injection flexible et sur les résultats obtenus dans le plan d'expérience #2, une hypothèse sera formulée pour expliquer l'influence de l'épaisseur de la chambre de compaction sur la quantité d'air emprisonné.

L'observation des pièces fabriquées a montré que la diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction disperse et diminue la quantité d'air emprisonné. Pour comprendre ce phénomène, il faut raisonner en termes d'espace. La pression de vide dans la chambre d'injection étant partielle, il y réside une certaine quantité d'air. Plus le volume de la chambre d'injection est grand, plus la quantité d'air est importante. Lors de l'injection de la résine, la membrane est collée sur le contre-moule. Ceci crée un interstice entre le renfort et la membrane. L'épaisseur de cet interstice est directement reliée à celle du cadre de la chambre de compaction. Ainsi, plus le cadre utilisé est épais, plus il y aura d'air dans le moule avant l'injection de la résine.

Pendant l'injection de la résine, puis du fluide de compaction, l'air présent dans l'interstice est déplacé, mais n'est pas entièrement évacué par l'évent. La rapidité de l'injection provoque un déséquilibre entre de la pression d'air dans le moule et dans le pot de vide. Cependant l'équilibre de la pression n'a pas le temps d'être rétabli avant que la résine n'obstrue l'évent.

Les temps d'entrée de résine et de fin de remplissage permettent d'affiner l'explication. En effet, les temps d'entrée de résine sont plus longs que ceux de la fin du remplissage. D'autre part, un laps de temps relativement important s'écoule entre la fin de l'introduction de la résine et l'injection du fluide de compaction. Ceci revient à dire que, pendant l'introduction de la résine, le déséquilibre de pression est grandement diminué. Nous pouvons donc estimer que la quantité d'air emprisonné est fonction du volume de la chambre d'injection au moment où la phase d'injection de la résine dans le moule est complétée.

Le plan d'expérience #2, montre que plus l'épaisseur du cadre de la chambre d'injection augmente plus le volume d'air emprisonné est important. Pour expliquer ce phénomène, il faut revenir à la description du déroulement d'une injection flexible. La Figure 4.15, du chapitre 4, illustre le déroulement d'une injection flexible dans le cas d'un cadre épais.

Cette figure présente le cas où la résine progresse peu dans le moule pendant la première phase du procédé, soit l'injection de la résine. Pendant l'injection du fluide de compaction, la résine se déplace vers l'évent sans imprégner une grande partie du renfort. Finalement, une fois la résine rendue en fin de moule, la pression exercée par le fluide de compaction pousse la résine à imprégner uniquement l'extrémité du renfort. La résine obstrue rapidement l'évent, en laissant une grande partie du renfort non imprégné. Dans la mesure où la membrane exerce une forte pression sur le renfort, la résine située à l'extrémité du moule n'a pas d'autre choix que de se déplacer à travers le renfort. La résine comprime alors l'air non expulsé, qui produit une diminution de l'épaisseur au centre des pièces.

Lors de l'utilisation d'un cadre plus fin, la résine progresse davantage dans le moule. Dans ce cas, le déplacement de la résine est moins important pendant la seconde phase d'injection du fluide de compaction, car elle se retrouve très vite bloquée en fin de moule. Sous la pression du fluide de compaction, la résine imprègne transversalement le

renfort sans laisser de zone sèche importante. La diminution de l'épaisseur du cadre de la chambre de compaction réduit ainsi la quantité d'air emprisonné. Cette faible quantité d'air étant alors répartie tout au long de la pièce, il ne se crée pas de zone sèche importante.

5.4 Conclusion

Ce plan d'expérience est capital pour la compréhension du procédé d'injection flexible. Il montre qu'il est possible d'améliorer la qualité des pièces fabriquées tout en maintenant des temps d'injection satisfaisants. Comparativement au procédé RTM, pour fabriquer une pièce de bonne qualité, le procédé d'injection flexible est jusqu'à 11 fois plus rapide.

Ce chapitre a également montré l'existence d'une épaisseur optimale de la chambre de compaction. La diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction réduit la zone sèche à la fin de la phase d'injection et tend à uniformiser l'épaisseur de la pièce. Toutefois, en deçà d'une certaine épaisseur, les pertes de charge augmentent. Ceci rend l'écoulement de la résine plus difficile et augmente le temps d'injection.

Cette étude montre que la position du front de résine après la phase d'injection a une influence directe sur la qualité de l'imprégnation. Il reste à évaluer si cette amélioration de l'imprégnation n'est pas due à la seule diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction.

CHAPITRE 6 : TAUX VOLUMIQUE DE FIBRES

6.1 Introduction

Ce chapitre étudie l'influence du taux volumique de fibres sur la qualité des pièces produites par injection flexible. Dans le plan d'expérience #3 présenté dans ce chapitre, l'augmentation du taux de fibres est produite par la diminution de la quantité de résine injectée. L'épaisseur de la chambre de compaction n'est pas modifiée ici. Il est également important de rappeler que ce chapitre traite du cas d'injections flexibles où la chambre d'injection est sous vide partiel.

Le premier des objectifs du plan d'expérience #3 est de valider l'hypothèse formulée à la fin du chapitre 5, soit que c'est seulement la position du front de résine après la phase d'injection qui gouverne la qualité de la pièce produite. Si le front de résine s'approche de l'évent, la quantité d'air résiduel à expulser est réduite et le déplacement de la résine par le fluide de compaction diminue. La combinaison de ces deux phénomènes réduit la quantité d'air emprisonné dans la pièce. Le chapitre 5 a montré qu'avec la diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction, la position du front de résine augmente et améliore l'imprégnation. Toutefois, le changement de position du front s'accompagne d'une modification de l'épaisseur de la chambre de compaction. Il est donc possible que l'épaisseur de la chambre de compaction ait un impact direct sur l'imprégnation. Le chapitre 6 permettra d'isoler la position du front de résine de la variation de l'épaisseur de la chambre de compaction et de valider ainsi l'hypothèse du chapitre 5 sur le mode d'imprégnation.

Le second objectif du plan d'expérience #3 est de mettre en évidence l'existence d'un taux de fibres maximum. Ce chapitre veut mettre en lumière l'effet d'un paramètre important du procédé d'injection flexible : la pression de la résine lors de la consolidation de la pièce. Cette pression est nécessaire pour diminuer le taux de vide et donc améliorer la qualité des pièces produites. La pression appliquée par le fluide de

compaction est répartie entre le renfort et la matrice. L'augmentation du taux de fibres diminue la pression sur la matrice. La pression de la matrice ayant un rôle important sur le taux de vide des pièces produites, le plan d'expérience #3 a également pour but de vérifier si ce phénomène impose un taux de fibres maximum pour obtenir une bonne qualité des composites.

6.2 Quantité de résine et position du front de résine

Pour faire varier le taux de fibres des pièces fabriquées, il faut changer la quantité de résine injectée. En effet, les dimensions du moule et le nombre de plis étant fixés, la seule façon de changer le taux volumique de fibres est de jouer sur la quantité de résine.

Pour une épaisseur de chambre de compaction fixe, le fait de modifier la quantité de résine a une autre conséquence que seulement de changer le taux de fibres. La position du front de résine à la fin de la phase d'injection recule ou avance selon que l'on diminue ou augmente la quantité de résine injectée. Nous avons évoqué au chapitre 5 que la position du front de résine semblait avoir une grande importance sur la qualité des pièces produites. Pendant la phase d'injection du fluide de compaction, la résine s'écoule au dessus du renfort sans l'imprégner jusqu'à l'extrémité du moule. Ce phénomène dû à la faible perméabilité du renfort produit une zone sèche. Cette zone sèche diminue avec la distance que parcourt la résine lors de l'injection du fluide de compaction. Ainsi, nous avons vu au chapitre 5 que si l'épaisseur du cadre diminue, les pièces produites sont de meilleure qualité. À la suite du chapitre 5, il est possible de se demander si la diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction n'est pas la seule raison de la bonne qualité des composites. Le plan d'expérience #3 tente ainsi de confirmer que la position de la résine après la phase d'injection gouverne à elle seule la qualité des pièces produites.

6.3 Compressibilité et loi de Terzhagi

Cette section traite de l'application de la loi de Terzhagi au procédé d'injection flexible. La loi de Terzhagi a été introduite au chapitre 2. Dans le cas de l'injection flexible, elle permet de prédire l'effort supporté par le renfort et la pression imposée à la résine.

$$P_{appl} = \sigma_{eff} + P_{résine} \quad (6.1)$$

où P_{appl} est la pression appliquée par le fluide de compaction, σ_{eff} la contrainte reprise par les fibres et $P_{résine}$ la pression transmise à la résine.

Dans un moule rigide, c'est le moule qui impose une contrainte au renfort. La pression imposée à la résine est créée par le système d'injection. Dans le cas du procédé d'injection flexible, la contrainte exercée sur le renfort et la pression transmise à la résine sont toutes deux imposées par le fluide de compaction (Figure 6.1).

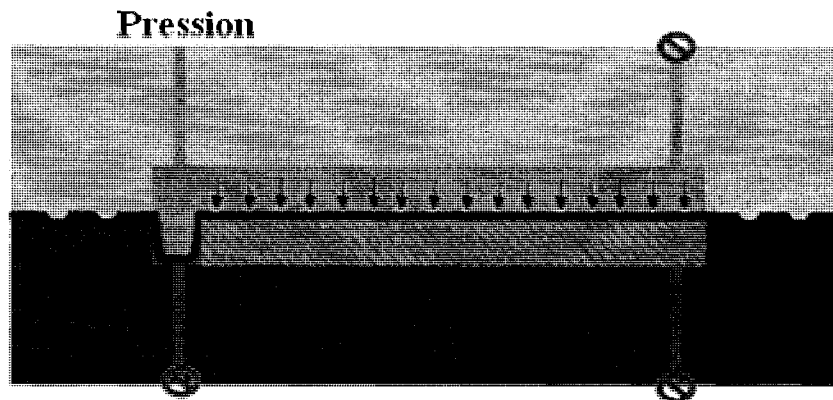


Figure 6.1 Pression appliquée par le fluide de compaction.

La loi de Terzhagi (équation 6.1) ainsi que la courbe de compressibilité du renfort permettent de prédire la répartition de la pression appliquée par le fluide de compaction. Les courbes de compressibilité indiquent la contrainte nécessaire à exercer sur le renfort pour qu'il atteigne un certain taux volumique de fibres, c'est-à-dire une certaine épaisseur. À l'aide d'une machine de traction, il est possible de tracer cette courbe.

Nous utilisons une machine de traction de la compagnie MTS qui enregistre la force exercée et le déplacement de ses mors (plateaux). Pour réaliser un essai de compressibilité, il faut tout d'abord définir l'origine du déplacement des mors. Cette origine est définie par la mise en contact des deux plateaux. Ainsi, la valeur du déplacement correspond à l'épaisseur du renfort. Un échantillon de tissu de dimensions connues est placé sur le plateau inférieur. Un logiciel de commande définit la vitesse de descente du plateau supérieur et une force limite pour l'essai. Généralement, lors d'un test de compaction, plusieurs cycles sont réalisés. Dans ce cas, la remontée du mors supérieur est également asservie en vitesse.

Pour réaliser le graphique de la contrainte supportée par le renfort en fonction du taux de fibres, il faut traiter les données. Pour cela, la force récupérée est convertie en pression grâce à l'aire de l'échantillon testé. L'équation suivante montre la relation entre le déplacement de la machine de traction et le taux volumique de fibres :

$$V_f = \frac{n \cdot \rho_s}{e \cdot \rho} \quad (6.2)$$

où V_f est le taux volumique de fibres, n le nombre de plis de tissu, ρ_s la masse surfacique du renfort, ρ la masse volumique du renfort et e la distance entre les plateaux.

Pour l'analyse du plan d'expérience #3, un test de compressibilité est réalisé sur le renfort Roviply de CHOMARAT. L'échantillon testé est un empilement de 4 plis de tissu sec de 100 mm de côté. Pour ne pas endommager le moule lors de la phase de compaction, la pression maximale du fluide de compaction est de 6 bars. La force maximale utilisée dans l'essai est donc fixée à 6000 N. Les vitesses de montée et de descente des mors sont de 2 mm/min. La Figure 6.2 montre la courbe de compressibilité obtenue pour 5 cycles. Sur cette courbe, il est possible de déterminer la contrainte appliquée par le fluide de compaction au renfort.

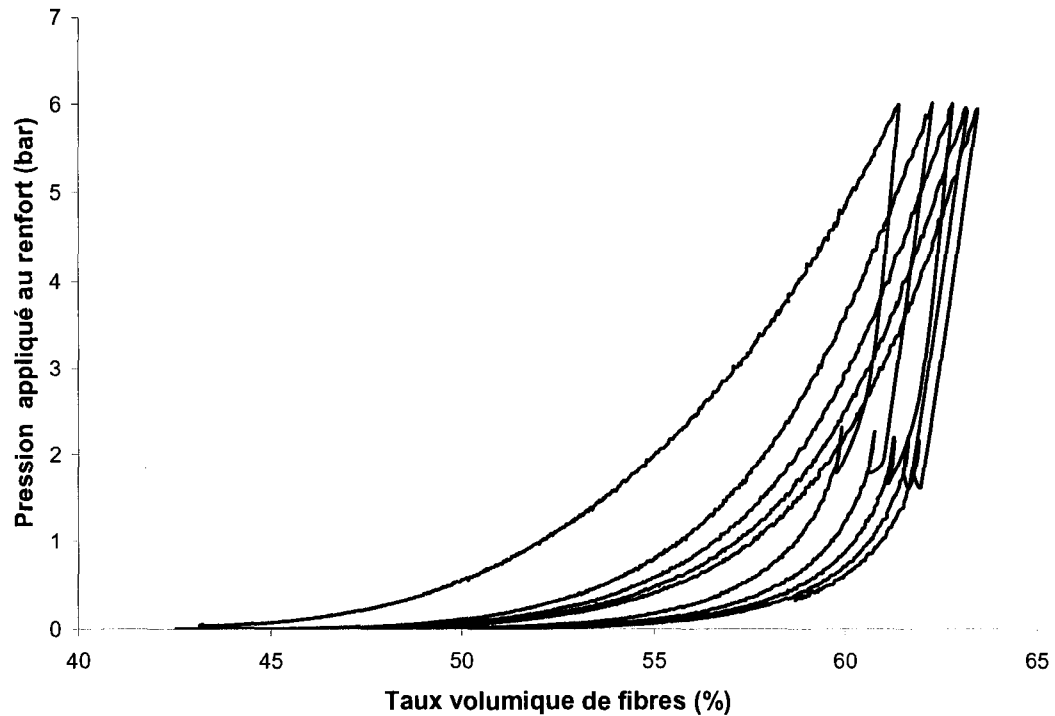


Figure 6.2 Courbe de compressibilité du tissu Roviply de CHOMARAT.

Le déroulement du procédé d'injection flexible n'implique qu'une phase de compaction. Nous pouvons donc supposer que le premier cycle répond le mieux au cas d'une injection flexible. Dans le cas de l'application d'une pression de 6 bars, l'ordonnée de la pointe de chaque cycle donne le taux volumique de fibres maximal qu'il est possible d'atteindre. Ce cas extrême implique une pression nulle dans la matrice. Cette observation laisse à penser que, au-delà d'un certain taux volumique de fibres, la pression appliquée à la résine ne sera pas suffisante pour permettre une bonne imprégnation du renfort. L'un des objectifs du plan d'expérience #3 est de vérifier si ce phénomène influence effectivement l'imprégnation du renfort.

6.4 Conditions expérimentales

6.4.1 Matériaux

Les matériaux utilisés restent inchangés : des préformes de 4 plis de tissu bidirectionnel [-45/ +45] en fibres de verre Roviply (CP 097). La masse surfacique de ce tissu a été déterminée pour un ensemble d'échantillon comme étant d'environ 810 g/m².

La résine utilisée est une résine vinylester de la compagnie DERAKANE, la vinylester 411-350. Pour ce plan d'expérience, l'injection est réalisée avec un pistolet d'injection. Comme pour le plan d'expérience #2 la résine est formulée, puis introduite dans la cartouche du pistolet. Le Tableau 4.6 donne les proportions des constituants qui permettent la polymérisation de la résine.

Tableau 6.1 Proportion des additifs ajoutés à la résine vinylester DERAKANE 411-350 utilisée avec le pistolet d'injection

Additifs	PHR (pour 100g de résine)
NaCo 12 %	0.15
DMA	0.2
MEKP 925 H	1.5

Le fluide de compaction utilisé est une huile silicone de la compagnie (200® fluid) DOW CORNING de viscosité 1000 cSt.

La membrane qui sépare les deux chambres d'injection et de compaction est en silicone transparent pour observer les écoulements de la résine et du fluide de compaction. La membrane EL1040T provient de la firme TORR-TECHNOLOGIE et a une épaisseur de 0.061 pouces (1.5 mm).

6.4.2 Paramètres de mise en œuvre

Le plan d'expérience #3 reprend la plupart des paramètres utilisés pour le plan d'expérience #2. Le matériel est identique et les valeurs des pressions d'injection et de vide restent inchangées. L'épaisseur de la chambre de compaction est fixée à 0.05 po.

Ce plan d'expérience se concentre sur l'influence du taux de fibres, qui est ici la seule variable considérée. Pour augmenter le taux volumique de fibres, il faut diminuer la quantité de résine injectée. Le chapitre 5 a montré que pour 100 g de résine préparée, 71 g se retrouve dans la pièce, ce qui lui confère un taux volumique de fibres de 46 %. Pour simplifier la préparation, la quantité de résine formulée est réduite de 10 g, ce qui réduit d'autant la quantité de résine injectée. Quatre taux volumique sont ainsi obtenus. Pour 100 g, 90 g, 80 g et 70 g de résine préparée, les taux volumiques de fibres des pièces sont approximativement de 46 %, 50 %, 55 % et 60 %. À l'aide de la courbe de compressibilité du renfort Roviply, il est possible de déterminer la répartition de pression pour chaque taux volumique de fibres. La Figure 6.3 reprend le premier cycle de la courbe. Cette figure montre la pression supportée par le renfort pour atteindre chaque taux volumique de fibres. Le Tableau 6.2 donne ces valeurs ainsi que les pressions de résine correspondantes.

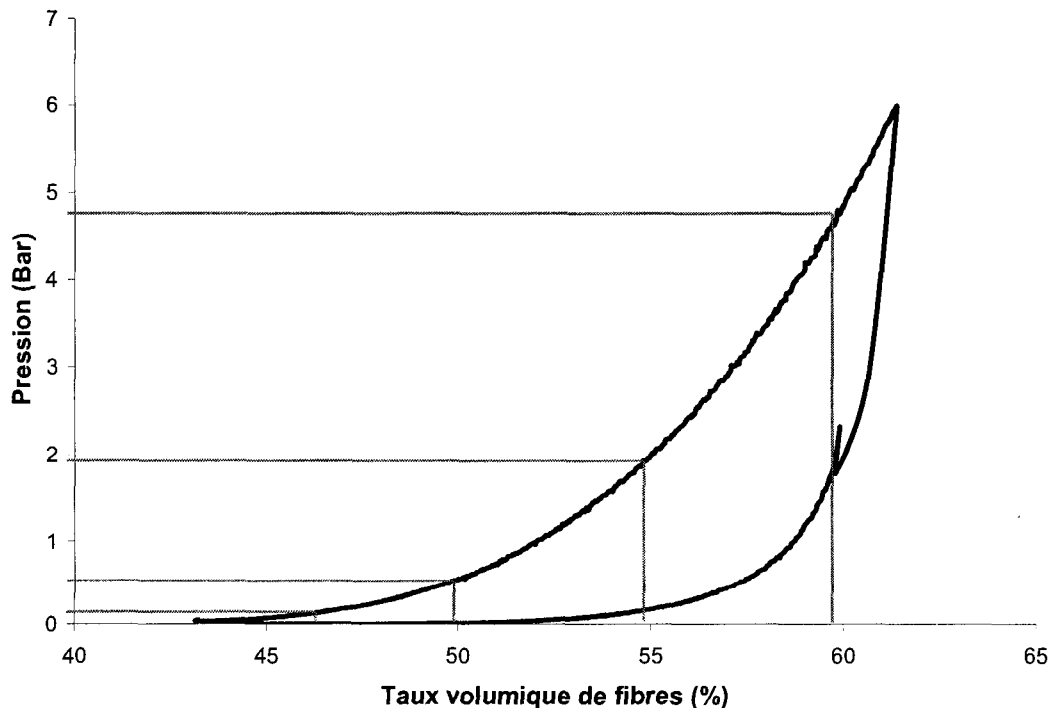


Figure 6.3 Premier cycle de la courbe de compressibilité.

Tableau 6.2 Répartition théorique de la pression

Taux volumique de fibres (%)	Pression supportée par le renfort (bar)	Pression de la résine (bar)
60	4.93	1.07
55	1.98	4.02
50	0.55	5.45
46	0.12	5.88

Nous remarquons que, pour un taux de fibres proche de 60 %, la pression de la résine est très faible. Pour que la résine imprègne correctement le renfort et que le taux de vide soit faible, la pression de la résine doit être suffisante. Il faut donc se demander si une telle diminution de la pression de la résine ne dégrade pas la qualité des pièces produites.

Le plan d'expérience comporte huit injections. La variable est ici la quantité de résine injectée. Les renforts sont formés de 4 plis Roviply. Le fluide de compaction d'une viscosité de 1000 cSt est injecté à six bars. Les pressions de vide dans la chambre de compaction et d'injection sont respectivement de 1 bar et de 0.25. Le Tableau 6.3 récapitule tous les paramètres fixes du plan d'expérience #3. Le Tableau 6.4 identifie chaque pièce fabriquée et donne son épaisseur théorique calculée par l'équation 4.1 en fonction du taux volumique de fibres.

Tableau 6.3 Paramètres fixes du plan d'expérience #3

Paramètres	Valeurs
Viscosité du fluide de compaction	1000 cSt
Pression de vide de la chambre de compaction	1 bar
Pression de vide de la chambre d'injection	0.25 bar
Pression du fluide de compaction	6 bars
Pression d'injection de la résine	1bar
Cadre utilisé	0.05 po

Tableau 6.4 Tableau récapitulatif des conditions d'injection

Identification	Quantité de résine préparée (g)	Taux volumique de fibres (%)	Épaisseur théorique (mm)
E07P08	100	46	2.77
E07P33			
E07P23	90	50	2.55
E07P25			
E07P26	80	55	2.32
E07P27			
E07P29	70	60	2.13
E07P31			

6.5 Résultats et discussion

Les résultats du chapitre 6 permettent de vérifier le rôle de la position du front de résine à la fin de la phase d'injection. Dans le chapitre 5, nous avons vu que la diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction améliore l'imprégnation. Cependant, le pan d'expérience #3 montre que ce n'est pas tant l'épaisseur de la chambre que la position du front de la résine dans le moule qui a un effet positif sur l'imprégnation des pièces produites.

Nous verrons que, pour obtenir une pièce de bonne qualité, il existe un taux de fibres maximal. Ce taux de fibres est fonction de l'épaisseur de la chambre de compaction. Ce chapitre met également en garde, quand le taux de fibres augmente, sur la diminution de la pression de la résine qui en résulte et donc d'une possible détérioration du composite.

6.5.1 Informations générales sur les pièces fabriquées

Le Tableau 6.5 présente un ensemble de données concernant la qualité des injections. La quantité de résine dans la pièce finale permet de comparer la consigne d'injection à la réalité. À l'aide des masses du renfort seul et du composite, un taux de fibres est calculé. Ce taux de fibres ne prend pas en compte l'hétérogénéité sur l'épaisseur de la pièce.

Tableau 6.5 Tableau récapitulatif de données sur les pièces du plan d'expérience #3

Identification	Poids préforme (g)	Poids final (g)	Masse de résine (g)	Taux de fibres global (%)
E07P08	146.82	218.07	71.25	46.79
E07P33	149.30	222.35	73.05	46.57
E07P23	148.69	208.44	59.75	51.68
E07P25	148.89	210.34	61.45	50.98
E07P26	147.52	200.5	52.98	54.62
E07P27	144.67	199.44	54.77	53.27
E07P29	148.26	195.27	47.01	57.84
E07P31	144.42	189.42	45.00	58.32

Ce tableau montre que certains taux de fibres sont légèrement en dessous des valeurs souhaitées. Toutefois, ces variations impliquent une modification sensible de la pression supportée par la résine.

Le Tableau 6.6 donne les temps d'injection, qui sont la somme des temps d'entrée de la résine et de déplacement de la résine vers l'évent sous l'effet de la pression du fluide de compaction.

Tableau 6.6 Temps d'injection des pièces du plan d'expérience #3

Identification	Temps d'entrée de la résine (s)	Temps de fin de remplissage (s)	Temps d'injection total (s)
E07P08	7.84	0.57	8.41
E07P33	8.05	0.59	8.64
E07P23	15.08	1.63	16.78
E07P25	4.33	1.07	5.40
E07P26	3.8	1.2	5.00
E07P27	3.6	1.5	5.10
E07P29	3.33	1.83	5.16
E07P31	2.94	1.86	4.80

Ce tableau indique une augmentation du temps de la fin de remplissage et une diminution du temps d'entrée de résine quand le taux de fibres augmente. Le temps d'entrée de la résine est évidemment moins long lorsque la quantité de résine injectée est plus petite. D'autre part, la diminution de la quantité de résine injectée limite la progression de la résine dans le moule. Le parcours de la résine lors de l'injection du fluide de compaction est alors plus long. La pression d'injection de la résine est 6 fois plus faible que celle du fluide de compaction. Cela implique que le temps d'injection de la résine a plus d'impact sur le temps d'injection total. C'est pour cette raison que le temps d'injection total diminue.

6.5.2 Observations visuelles : formation d'une zone sèche

Pour chaque taux volumique de fibres, la Figure 5.6 montre la photographie côté moule d'une des deux pièces fabriquées. Une analyse visuelle est retranscrite dans le Tableau 5.8. Cette analyse synthétique indique la présence de zones sèches et d'accumulations de résine. Elle donne également une appréciation visuelle de la qualité générale des pièces.

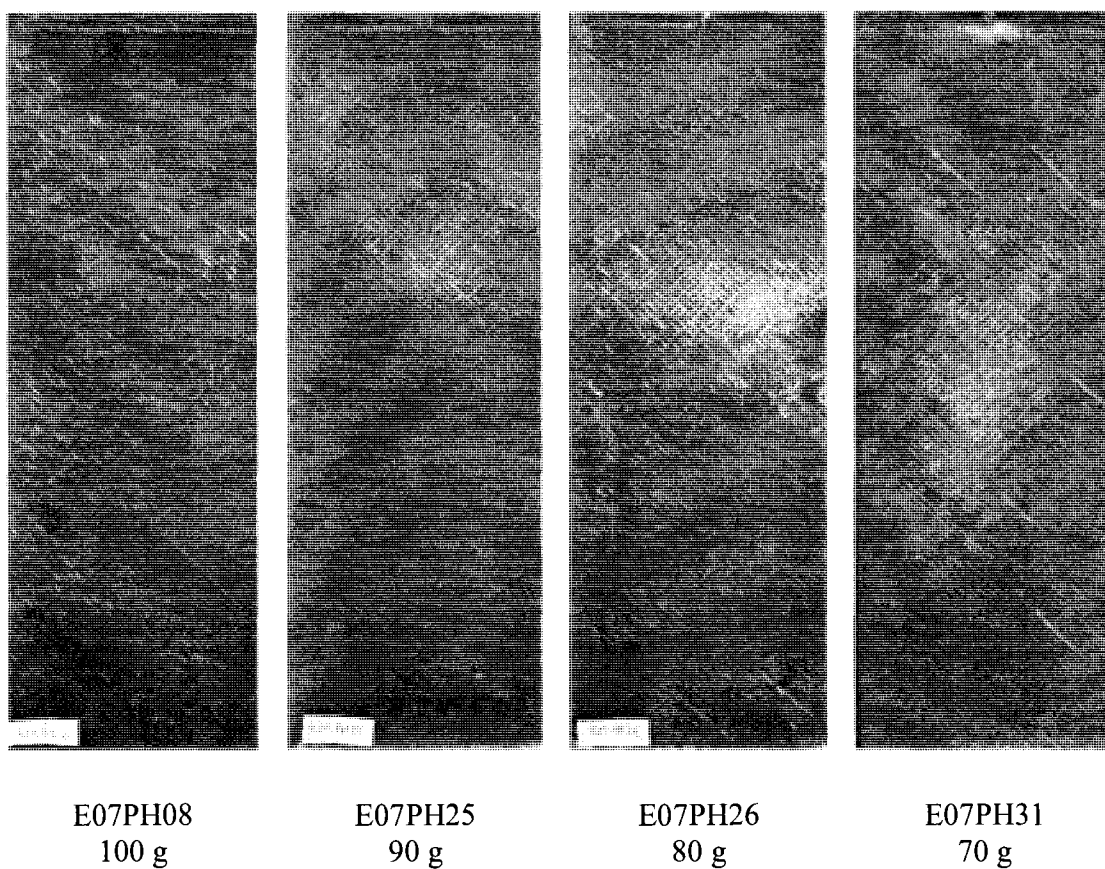


Figure 6.4 Pièces finales vues du côté moule pour différente quantité de résine.

Tableau 6.7 Analyse visuelle des pièces produites

Quantité de résine injectée	Qualité de l'imprégnation	Zone sèche	Accumulation de résine
100 g	bonne	faible dispersée	petite accumulation
90 g	assez bonne	faible légère concentration : 24 cm de l'entrée	léger creux
80 g	mauvaise	assez importante concentrée : 21 cm de l'entrée	léger creux
70 g	très mauvaise	importante très concentrée : 17.5 cm de l'entrée	creux important

Nous remarquons que l'augmentation du taux de fibres induit la formation d'une zone sèche. Ce tableau montre également que la quantité de résine injectée a une influence sur l'accumulation de résine.

6.5.3 Influence de la position du front de résine

Cette section montre que le plan d'expérience #3 valide l'hypothèse faite dans le chapitre 5. À l'aide du logiciel AVIMECA, nous dressons le Tableau 6.8 qui, pour chaque injection, indique la position du front de résine après son introduction.

Tableau 6.8 Position du front de résine en fonction de la quantité de résine injectée

Identification	Position du front de résine (cm)	Masse de résine injectée (g)	Qualité
E07P08	29.2	100	bonne
E07P33	28.9		
E07P23	24.9	90	petite zone sèche
E07P25	26.0		
E07P26	22.7	80	petite zone sèche
E07P27	22.5		
E07P29	19.9	70	zone sèche
E07P31	19.1		

Ce tableau montre une relation entre la position finale du front de résine et la taille de la zone sèche. Plus la distance parcourue par la résine lors de son injection est grande, meilleure est l'imprégnation du renfort. Dans le chapitre 5, bien que nous ayons évoqué l'importance de la position du front de résine sur le déroulement du procédé d'injection flexible, il était encore possible de penser que c'était surtout l'épaisseur de la chambre de compaction qui influençait l'imprégnation des pièces. Le plan d'expérience #3 montre bien que la qualité des pièces est directement reliée à la position du front de résine et qu'elle n'est pas uniquement liée à l'épaisseur de la chambre de compaction.

La position du front de résine a donc une influence sur la quantité et la répartition de l'air emprisonné dans la pièce. La rapidité de l'injection provoque l'obstruction de

l'évent, sans que l'air présent dans le moule puisse être entièrement expulsé. Si le front de résine est éloigné du port d'évent, la résine sera repoussée au fond du moule et donc ne sera pas répartie à travers la pièce. Dans ce cas, la résine transite au dessus du renfort et laisse une grande partie de la préforme non imprégnée. Une fois la résine arrivée à l'extrémité du moule, elle imprègne transversalement le renfort, puis s'écoule à travers. L'air emprisonné est alors concentré et forme une importante zone sèche.

Cette zone sèche dépend de la quantité d'air présente dans le moule avant l'injection du fluide de compaction. La plus grosse proportion de cet air se trouve dans l'interstice situé entre le renfort et la membrane. Les chapitres 5 et 6 montrent que, pour obtenir des pièces de qualités, il faut que, lors de l'injection du fluide de compaction, la résine ne puisse qu'imprégner transversalement le renfort. C'est-à-dire que la résine ne puisse pas se déplacer en bloc vers l'extrémité du moule et laisser ainsi une zone du renfort non imprégnée. À cette fin, la résine doit recouvrir la presque totalité de la pièce avant l'injection du fluide de compaction.

6.5.4 Compression du renfort et imprégnation

Nous avons vu plus haut que la pression appliquée par le fluide de compaction est répartie entre le renfort et la matrice. Par ailleurs, plus le taux de fibres est élevé, plus la pression de la résine est faible. Le plan d'expérience #3 cherche à savoir si une augmentation du taux de fibres dégrade l'imprégnation des pièces.

Si l'on observe de plus près les pièces avec 58 % de taux de fibres, il semble qu'elles n'ont pas été soumises à une compaction suffisante. Comme le montre la Figure 6.5, les nombreuses taches blanches sur la plaque E07P31 indiquent une mauvaise imprégnation. Cette observation semble concorder avec l'application de la loi de Terzhagi au procédé d'injection flexible. Cependant, il n'est pas possible d'affirmer qu'une diminution de la pression de la résine est la cause d'une mauvaise qualité de l'imprégnation. La mauvaise imprégnation du composite peut être due à la faible pression de la résine pour taux de fibres élevé, comme elle peut dépendre de la position du front de résine.

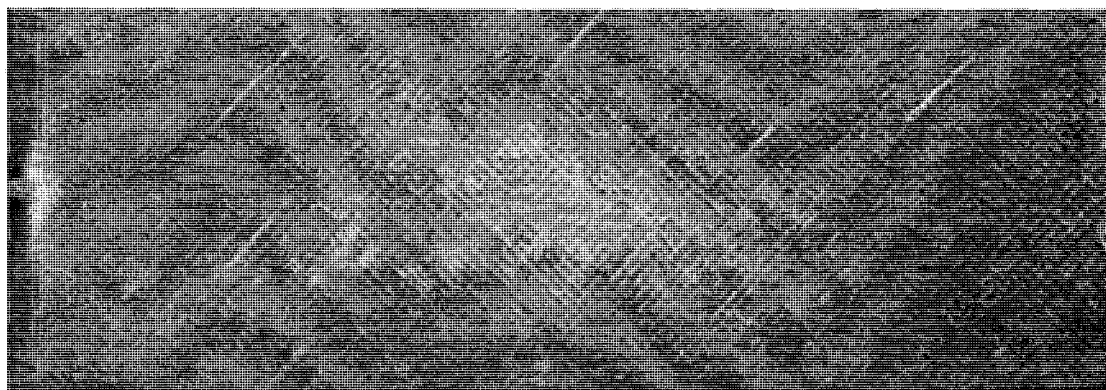


Figure 6.5 Vue côté moule de la pièce E07PH31 (70g).

D'autre part, un phénomène de relaxation du renfort peut jouer en faveur d'une meilleure imprégnation de la préforme. Dans les plans d'expérience, réalisés dans ce mémoire, le temps de gel est suffisamment long pour permettre un transfert de charges du renfort à la matrice. En effet, pour l'ensemble des essais réalisés, le temps de gel de 15 minutes de la résine ne permet pas de rejeter l'hypothèse de l'influence du taux de fibres sur la qualité des pièces produites. Dans le cas d'un temps de gel très court, c'est-à-dire dans le cas où le renfort n'a pas le temps de se relaxer, la qualité des pièces risque de dépendre davantage de la pression appliquée à la résine et donc du taux de fibres.

Bien que le plan d'expérience #3 ne permette pas de trancher sur le rôle exact du taux de fibres sur l'imprégnation, il a tout de même mis en évidence une réalité physique. Le mode de compaction du procédé d'injection flexible implique une diminution de la pression de la résine avec l'augmentation du taux de fibres.

6.5.5 Analyse l'épaisseur des pièces

Une série de 80 points ont été pris sur la surface de chaque pièce à l'aide d'un micromètre analogique. L'ensemble des données est présenté à l'annexe C. À l'œil nu, il est facile d'estimer la présence et l'importance des accumulations de résine à l'extrémité des pièces. Le micromètre met en évidence des variations d'épaisseur dans le reste de la

pièce. À l'aide du logiciel MATHLAB, des vues tridimensionnelles de l'épaisseur de chaque pièce sont réalisées. Le code utilisé est présenté à l'annexe D.

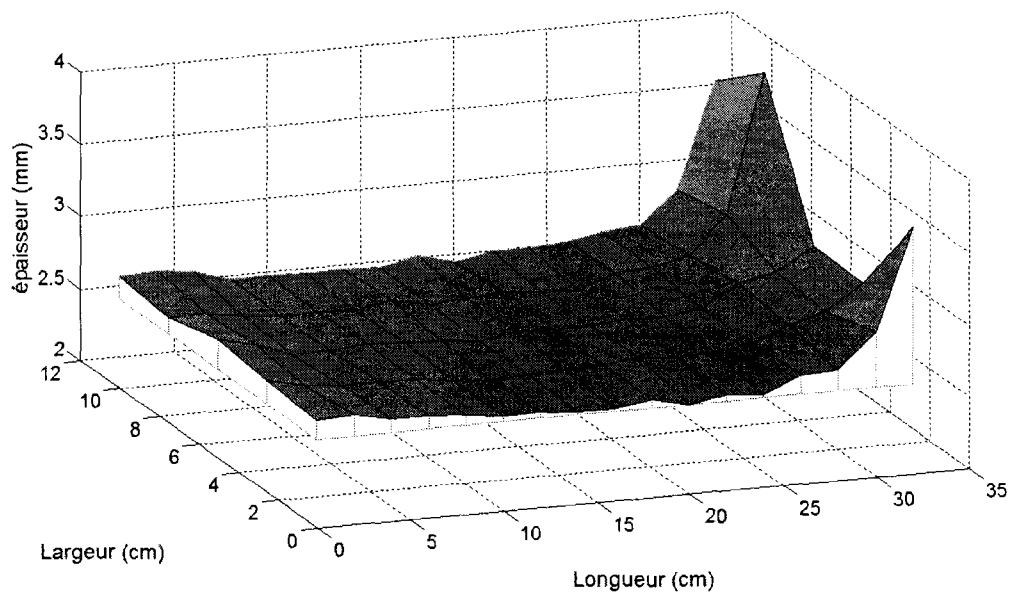


Figure 6.6 Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH08 (100 g).

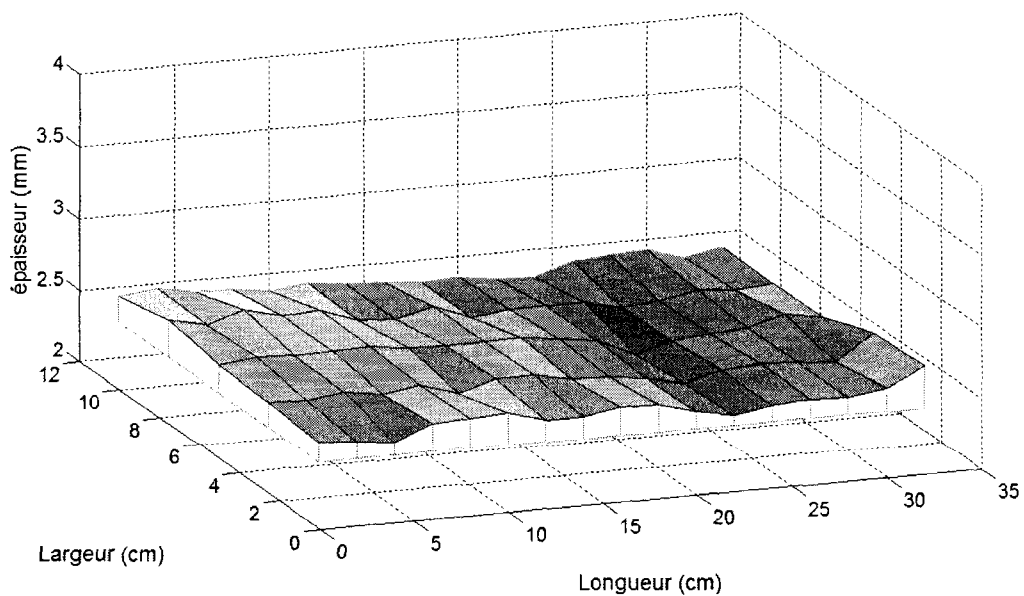


Figure 6.7 Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH25 (90 g).

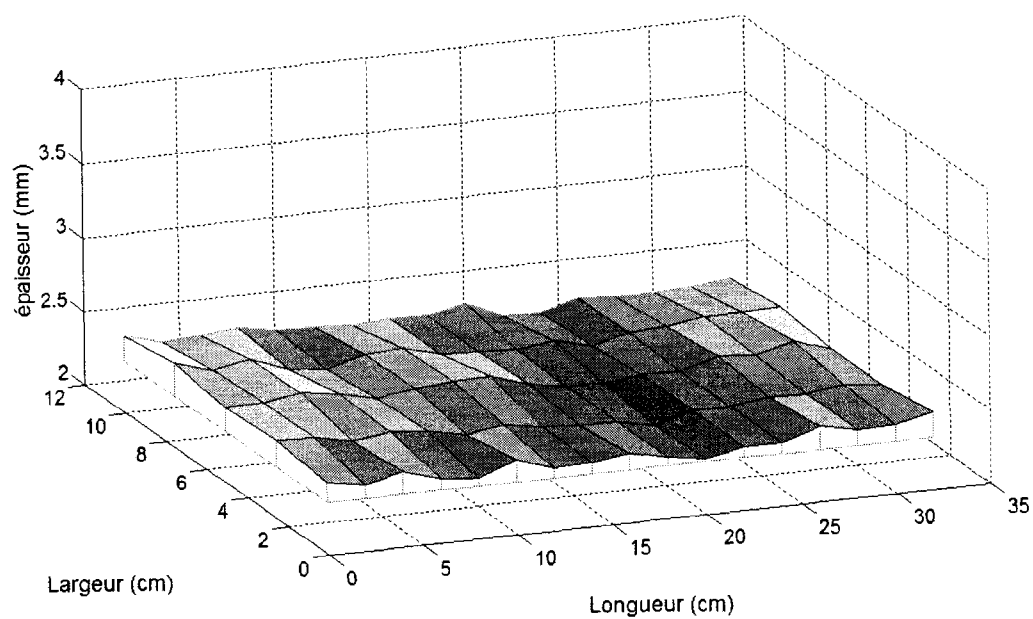


Figure 6.8 Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH26 (80 g).

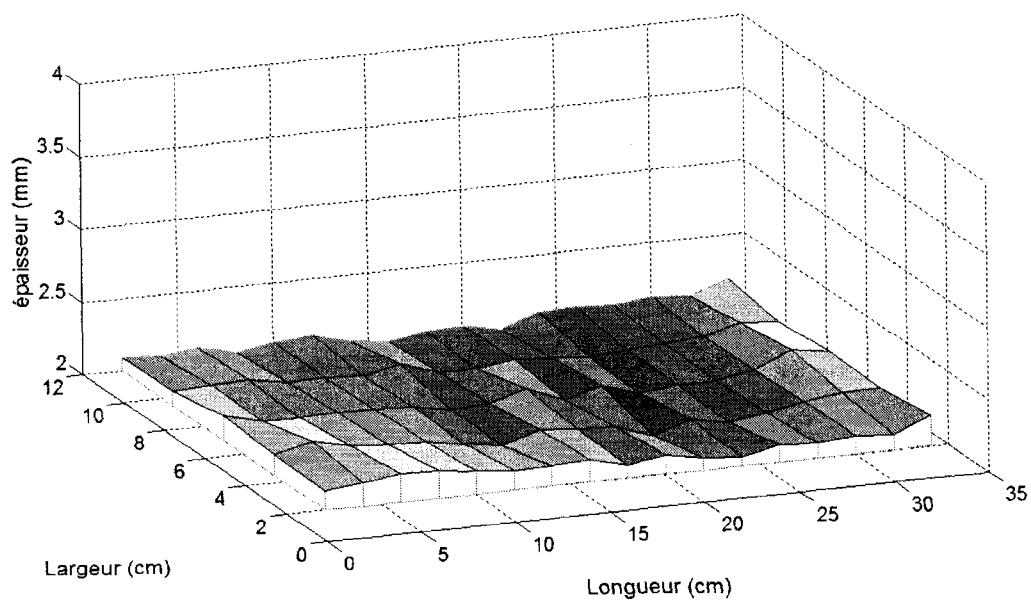


Figure 6.9 Vues 3D de l'épaisseur de la pièce E07PH31 (70 g).

Ces figures montrent, au-delà d'un certain taux de fibres, une plus grande homogénéité de l'épaisseur des pièces composites. En effet, pour les pièces à 46 % de taux volumiques de fibres, une accumulation de résine est visible à l'extrémité. Pour les autres pièces, dont le taux volumique de fibres est supérieur à 50 %, il n'y a pas d'accumulation de résine. Cependant, pour chacune de ces pièces, une diminution de l'épaisseur est visible à une distance comprise entre 15 et 25 cm du port d'injection. Les mesures d'épaisseur sont prises suivant 5 lignes le long de chaque pièce. Pour mieux analyser les données, la Figure 6.10 se concentre sur les mesures de la ligne centrale.

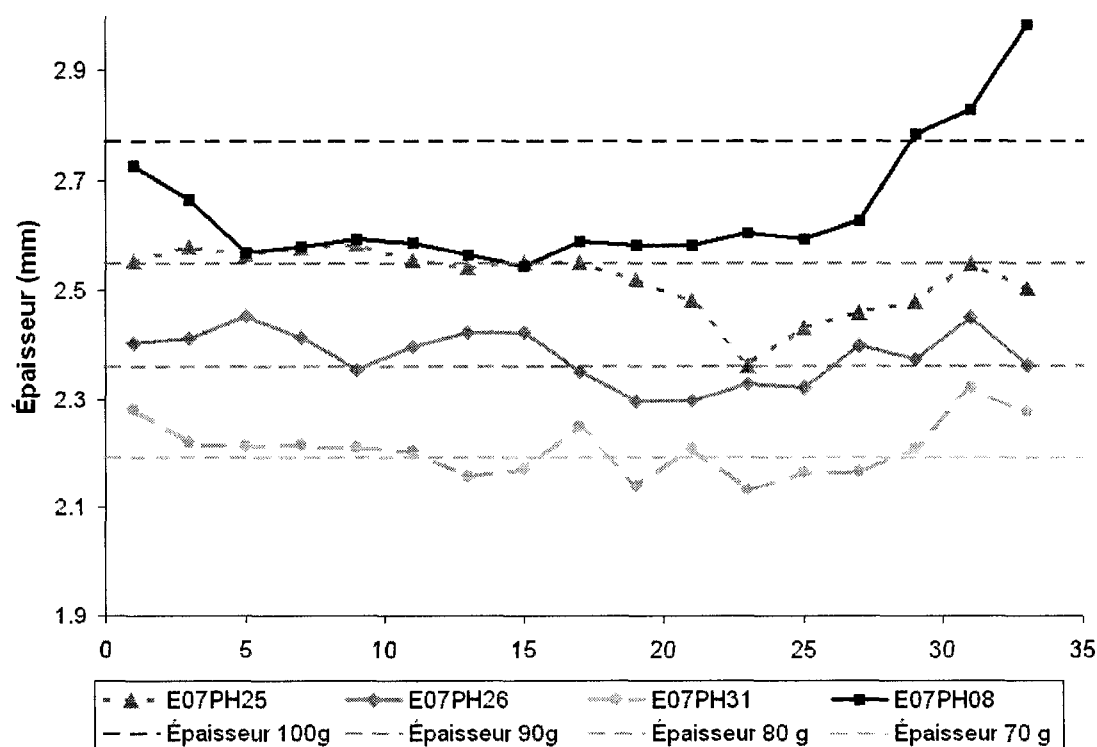


Figure 6.10 Mesures d'épaisseur sur la ligne centrale des pièces du plan d'expérience #3.

L'épaisseur théorique calculée à l'aide de l'équation 4.1 apparaît en pointillé pour chaque quantité de résine. La première remarque porte sur l'homogénéité des pièces dont le taux volumique de fibres est supérieur à 50 %. En effet, pour les pièces

E07PH25, E07PH26 et E07PH31, l'épaisseur est plus uniforme et les valeurs sont plus proches des valeurs théoriques que dans le cas de la pièce E07PH08. Nous voyons ici l'influence d'un excès de résine, même faible, sur l'uniformité de l'épaisseur et cela sur toute la longueur de la pièce.

Le plan d'expérience #3 montre que l'augmentation du taux de fibres semble être un moyen de limiter les accumulations de résine. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait qu'il est plus facile de répartir une plus faible quantité de résine à travers un renfort. Il semble donc qu'un taux de fibres plus élevé aide à obtenir une épaisseur plus régulière du composite. Cependant, ce phénomène est en concurrence avec la qualité de l'imprégnation des pièces obtenues. En effet, tel que mentionné plus haut, pour éliminer la zone sèche, il faut que la résine se rende le plus proche possible de l'évent de sortie à la fin de la phase d'injection. Pour obtenir un taux de fibres plus élevé, il faudrait diminuer l'épaisseur de la chambre de compaction, mais le chapitre 5 a montré l'existence d'une épaisseur minimale. En conclusion, le procédé d'injection flexible semble imposer un taux de fibres maximum.

6.5.6 Discussion : taux de fibres maximum

Avant de lancer la fabrication d'une pièce, il est nécessaire de bien cerner les limitations du procédé d'injection flexible. Dans cette optique, cette section clarifie les interactions entre le matériel utilisé, les dimensions de la pièce fabriquée et l'épaisseur de la chambre de compaction.

Les plans d'expérience #2 et #3 ont montré que la qualité des pièces produites dépend de la position du front de résine après la phase d'injection. Plus précisément, il faut que la résine atteigne l'extrémité du moule pour que la pièce soit de bonne qualité. Réduire l'épaisseur de la chambre de compaction est un moyen d'amener la résine le plus loin possible dans la cavité lors de l'injection. Toutefois, il existe une valeur minimum pour cette épaisseur liée à la perméabilité du renfort et à la longueur de la pièce.

La limite inférieure de l'épaisseur de la chambre de compaction fixe un volume minimum de résine à injecter. En effet, pour obtenir d'une pièce de bonne qualité, il faut remplir le volume fixé par les dimensions de la chambre de compaction. Cela démontre qu'il existe un taux de fibres maximum.

6.6 Conclusion

Le plan d'expérience #3 souligne le rôle de la loi de Terzhagi dans le procédé d'injection flexible. En effet, la phase de compaction du procédé d'injection flexible est gouvernée par la pression du fluide de compaction. La loi de Terzhagi montre que la pression du fluide de compaction est reprise à la fois par le renfort fibreux et la résine. La répartition dépend du taux de fibres. Dans le cas du procédé d'injection flexible, plus le taux de fibres est élevé, plus la pression de la résine est faible. Par ailleurs, la pression de la résine est importante pour assurer l'imprégnation du renfort et diminuer le taux de vide.

Le plan d'expérience #3 devait mettre en évidence une possible dégradation de la qualité des pièces avec l'augmentation du taux de fibres. Toutefois, même si une mauvaise imprégnation du renfort est apparue sur toute la longueur des pièces E07PH29 et E07PH31, il n'est pas possible de mettre en cause ici l'augmentation du taux de fibres.

L'autre conclusion du plan d'expérience #3 concerne l'influence de la position du front de résine après son injection sur la formation d'une zone sèche. Pour obtenir une pièce de bonne qualité, il faut que, lors de l'injection de la résine, cette dernière recouvre toute la surface du renfort. À cette fin, il est possible de diminuer l'épaisseur de la chambre de compaction. Cependant, le chapitre 5 a montré que, dans le cas du développement d'un procédé pour la production de série, il existe une épaisseur minimum de la chambre de compaction. Pour amener le front de résine proche de l'évent, cette épaisseur minimale implique donc nécessairement l'injection d'une certaine quantité de résine. Il existe donc un taux de fibres maximal. Cependant, l'augmentation de la pression du fluide de compaction doit permettre de réduire cette valeur.

CHAPITRE 7 : PRESSION DE VIDE DANS LA CHAMBRE D'INJECTION

7.1 Introduction

Le plan d'expérience #1, décrit au chapitre 4, a montré la formation de zone sèche lors d'une injection flexible. L'épaisseur du cadre de compaction et la pression de vide partiel appliquée dans la chambre d'injection ont été mises en cause pour expliquer la concentration d'air dans la préforme. Une solution simple pour améliorer la qualité des pièces composites serait de prévenir la présence d'air dans le moule. L'augmentation de la pression de vide dans la chambre d'injection semble être une solution efficace. À travers la réalisation d'un plan d'expérience #4, ce chapitre tente de vérifier l'influence de la pression de vide dans la chambre d'injection sur la qualité des pièces produites. Le chapitre 5 a montré que l'épaisseur de la chambre de compaction influence le mode d'imprégnation du composite. Pour cette raison l'épaisseur de la chambre de compaction a également été étudiée dans le plan d'expérience #4.

La chambre d'injection est la cavité où le renfort est déposé et dans laquelle la résine est injectée. La Figure 7.1 représente les chambres d'injection et de compaction situées de part et d'autre de la membrane. Cette figure montre également l'évent par lequel la pression de vide de la chambre d'injection est appliquée.

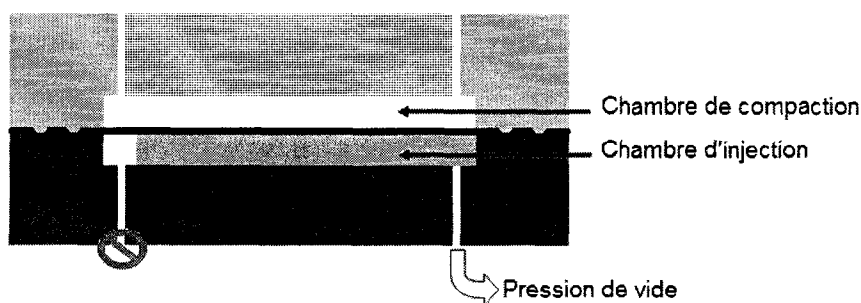


Figure 7.1 Schémas d'un moule d'injection flexible avec les chambres d'injection et de compaction.

7.2 Conditions expérimentales

7.2.1 Matériaux

Les renforts utilisés restent inchangés : préformes de 4 plis de tissu bidirectionnel [-45/+45] en fibres de verre Roviply (CP 097). La masse surfacique de ce tissu a été déterminée pour cette batterie de mesure comme étant d'environ 810 g/m².

On utilise une résine vinylester de la compagnie DERAKANE, la vinylester 411-350. Pour le plan d'expérience #4, l'injection s'effectue grâce à un pistolet d'injection. Dans ce cas, la résine est formulée, puis introduite dans la cartouche du pistolet. Le Tableau 7.1 donne les proportions des constituants qui permettent la polymérisation de la résine.

Tableau 7.1 Proportion des additifs ajoutés à la résine vinylester DERAKANE 411-350 utilisée avec le pistolet d'injection

Additifs	PHR (pour 100g de résine)
NaCo 12 %	0.15
DMA	0.2
MEKP 925 H	1.5

Le fluide de compaction utilisé est une huile silicone de la compagnie (200® fluid) DOW CORNING. Dans ce plan d'expérience, l'huile d'une viscosité 1000 cSt est utilisée.

Pour permettre une observation des écoulements de la résine et du fluide de compaction, la membrane qui sépare les deux chambres d'injection et de compaction est en silicone transparent. La membrane EL1040T provient de la firme TORR-TECHNOLOGIE et a une épaisseur de 0.061 pouces (1.5 mm).

7.2.2 Conditions d'opération

Le matériel est identique à celui employé dans les plans d'expérience précédents. L'injection du fluide de compaction est effectuée à l'aide du pistolet d'injection décrit au chapitre 5. Un pot de pression est affecté à l'injection du fluide de compaction et deux

pots de vide servent à l'application de la pression de vide dans les chambres d'injection et de compaction. Pour faciliter la préparation de l'ensemble des travaux, 100 g de résine sont formulés. Cette quantité de résine permet d'obtenir un taux de fibres d'environ 46% et une épaisseur théorique de 2.77 mm. L'ensemble des paramètres fixes du plan d'expérience #4 est récapitulé dans le Tableau 7.2.

Tableau 7.2 Paramètres fixes du plan d'expérience #5

Paramètres	Valeurs
Viscosité du fluide de compaction	1000 cSt
Pression de vide de la chambre de compaction	1 bar
Pression du fluide de compaction	6 bars
Pression d'injection de la résine	1 bar
Taux de fibres visé	46 %

Pour mener à bien le plan d'expérience #4, 12 injections ont été réalisées. L'épaisseur de la chambre de compaction et la pression de vide de la chambre d'injection représentent les paramètres étudiés. Deux épaisseurs sont utilisées (0.05 et 0,14 po) et trois valeurs de pression de vides ont été imposées (0.25, 0.5 et 1 bar). Pour chaque couple de paramètres, deux pièces sont fabriquées. Le Tableau 7.3 présente les codes d'identifications de chaque injection.

Tableau 7.3 Détail du plan d'expérience

Épaisseur de la chambre de compaction (po)	Pression de vide (bar)		
	0.25	0.5	1
0.05	E07PH08	E07PH10	E07PH04
	E07PH30	E07PH19	E07PH16
0.14	E07PH06	E07PH11	E07PH09
	E07PH32	E07PH17	E07PH15

7.3 Résultats et discussion

L'objectif du plan d'expérience #4 est de mettre en évidence le rôle de la pression de vide de la chambre d'injection sur la qualité des pièces produites. Les plans d'expérience #2 et #3 ont montrés que, dans certaines conditions, le mode d'imprégnation du renfort entraîne la formation d'une zone sèche. L'augmentation de la pression de vide, en limitant la quantité d'air présent dans le moule, devrait permettre la réduction des zones sèches. Toutefois, la qualité des pièces produites ne se limite pas à l'imprégnation du renfort. L'homogénéité de l'épaisseur a également une importance sur la qualité visuelle et mécanique du composite.

7.3.1 Information générale sur les pièces obtenues

Pour comparer une donnée telle que l'épaisseur des pièces, il faut s'assurer de la répétabilité des injections. Le Tableau 7.4 présente la quantité de résine injectée pour chaque essai, afin de comparer la consigne d'injection à la réalité. À l'aide des masses du renfort sec et de la résine injectée, un taux de fibres est également calculé. Ce taux de fibres ne prend pas en compte l'hétérogénéité de l'épaisseur de la pièce. Le Tableau 7.4 indique que, pour la majorité des pièces, le taux de fibres approche 46 %. Les légères variations du taux de fibres s'expliquent par les pertes variables de résine dans le moule.

Tableau 7.4 Tableau récapitulatif de données sur les pièces du plan d'expérience #4

Identification	Poids Préforme (g)	Poids final (g)	Masse résine (g)	Taux de fibres global (%)
E07PH08	146.82	218.07	71.25	46.79
E07PH30	148.26	221.25	72.99	46.41
E07PH10	143.38	217.73	74.35	45.11
E07PH19	150.68	222.49	71.81	47.24
E07PH04	146.63	218.17	71.54	46.66
E07PH16	149.14	223.47	74.33	46.09
E07PH06	150.57	217.92	67.35	48.88
E07PH32	149.03	222.35	73.32	46.43
E07PH11	142.79	215.02	72.23	45.75
E07PH17	149.13	222.19	73.06	46.53
E07PH09	143.58	217.88	74.3	45.16
E07PH15	149.01	223.55	74.54	46.00

7.3.2 Amélioration de l'imprégnation : élimination de la zone sèche

L'objectif du plan d'expérience #4 est d'améliorer la qualité des pièces produites en l'augmentant de la pression de vide de la chambre d'injection. Le plus gros défaut rencontré jusqu'ici reste la formation d'une zone sèche dans le renfort. Ce défaut d'imprégnation s'explique par le déroulement de l'injection et la présence d'air dans le moule. L'augmentation de la pression de vide dans la chambre d'injection devrait donc en partie remédier à la mauvaise imprégnation du renfort.

Pour chaque couple de paramètres étudiés, la photographie d'une des pièces est présentée aux Tableau 7.2 et Figure 7.3. Les Tableau 7.5 et Tableau 7.6 décrivent la présence de zones sèches et l'accumulation de résine. Ils fournissent ainsi une appréciation visuelle de la qualité générale de la pièce.

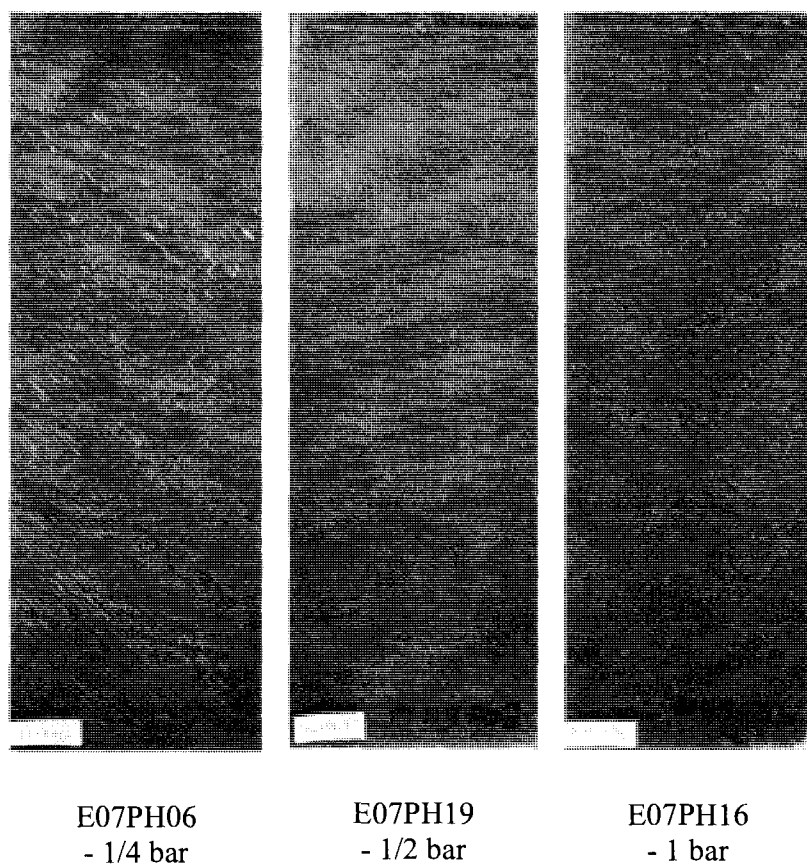


Figure 7.2 Photographies côté moule des pièces du plan d'expérience #4 pour une épaisseur du cadre de compaction de 0.05po.

Cet ensemble de photographies montre que l'augmentation de la pression de vide dans la chambre d'injection a un impact important sur l'imprégnation, aussi bien pour un cadre de compaction fin qu'épais. Dans le cas du cadre de 0.05 po, même si le seul fait d'utiliser un cadre fin diminue et répartit l'air emprisonné, l'imposition d'une pression de vide totale améliore l'imprégnation du renfort. Pour un cadre de 0.14 po, l'amélioration de l'imprégnation est nette. Toutefois, une pression de vide totale ne permet pas une imprégnation parfaite du renfort. En effet, un certain nombre de micro-porosités sont visibles (Figure 7.4). Nous verrons plus loin que ces micro-porosités semblent provenir du déroulement de l'injection.

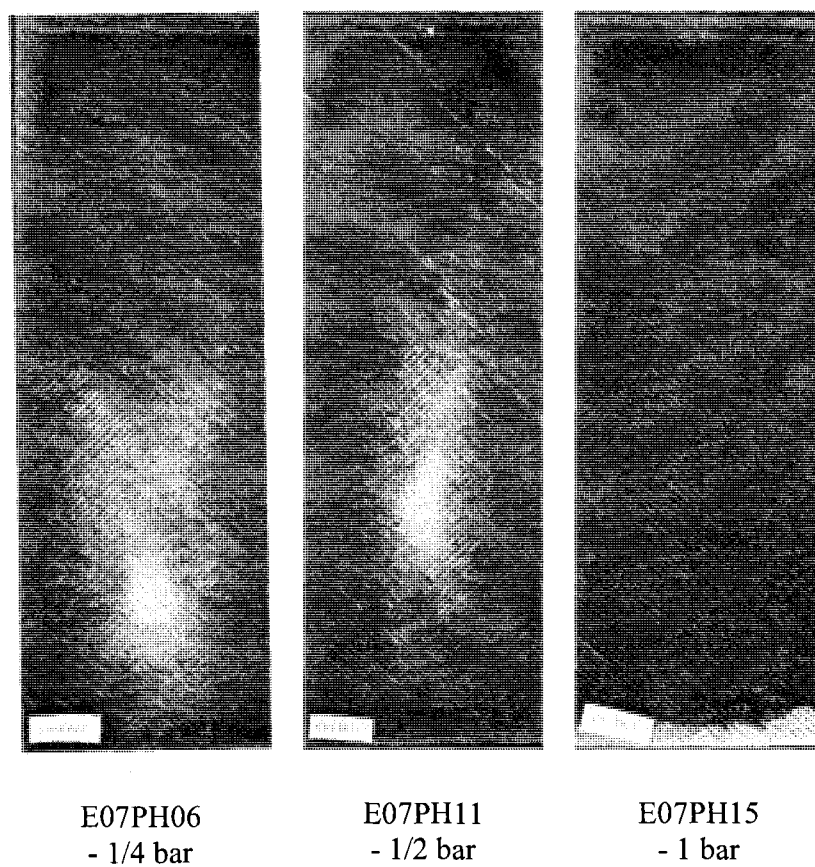


Figure 7.3 Photographies côté moule des pièces du plan d'expérience #4 pour une épaisseur du cadre de compaction de 0.14po.

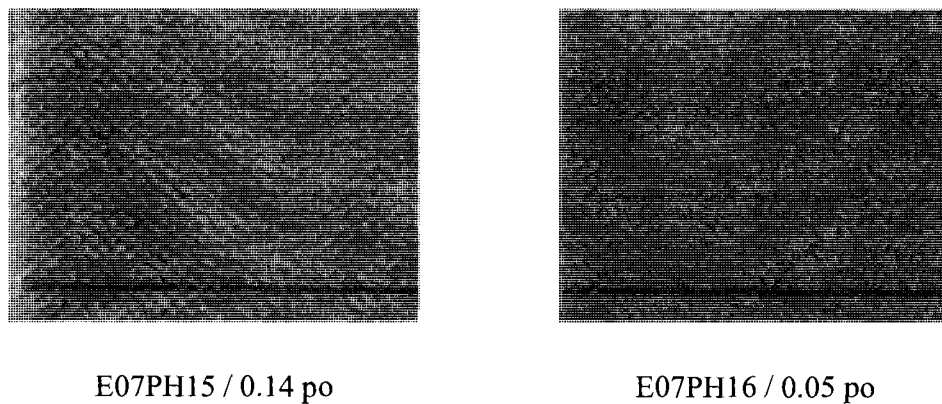


Figure 7.4 Vue rapprochée des pièces E07PH15 et E07PH16 réalisée avec une pression de vide de 1 bar : microporosité.

Tableau 7.5 Analyse visuelle des pièces du plan d'expérience #4 pour une épaisseur de la chambre de compaction de 0.14 po.

Pression de vide	Qualité de l'imprégnation	Zones sèches	Accumulation de résine
0.25 bar	très mauvaise	très importante, très concentrée : 7 cm de l'entrée	grosse accumulation
0.5 bar	mauvaise	importante, concentrée : 10 cm de l'entrée	grosse accumulation
1 bar	bonne	faible, dispersée	grosse accumulation

Tableau 7.6 Analyse visuelle des pièces du plan d'expérience #4 pour une épaisseur de la chambre de compaction de 0.05 po.

Identification	Qualité de l'imprégnation	Zones sèches	Accumulation de résine
0.25 bar	bonne	faible, dispersée	faible, accumulation
0.5 bar	très bonne	très faible, dispersée	pas d'accumulation
1 bar	très bonne	quasi inexistante	pas d'accumulation

L'observation visuelle des pièces produites permet de conclure que l'imposition d'un vide total améliore considérablement l'imprégnation du renfort. Cependant, dans le cas d'un cadre épais, l'augmentation de la pression de vide ne semble pas améliorer l'homogénéité de l'épaisseur des pièces.

Suite au chapitre 5 sur le rôle de l'épaisseur de la chambre de compaction sur la qualité des pièces produites, le plan d'expérience #4 semble indiquer que l'épaisseur de la chambre de compaction reste un paramètre crucial dans le cas d'une injection à température ambiante. Selon le niveau de la présence d'air dans le moule lors de l'injection, le mode d'écoulement à travers les renforts tissés nécessite une épaisseur de chambre de la compaction appropriée.

7.3.3 Influence combinée de la pression de vide et de l'épaisseur de la chambre de compaction sur le déroulement de l'injection

L'augmentation de la pression de vide dans la chambre d'injection modifie la différence de pression entre les deux chambres. Dans les précédents plans d'expérience, c'est cette différence de pression qui induisait la formation d'un interstice entre le renfort et la membrane (Figure 7.5).

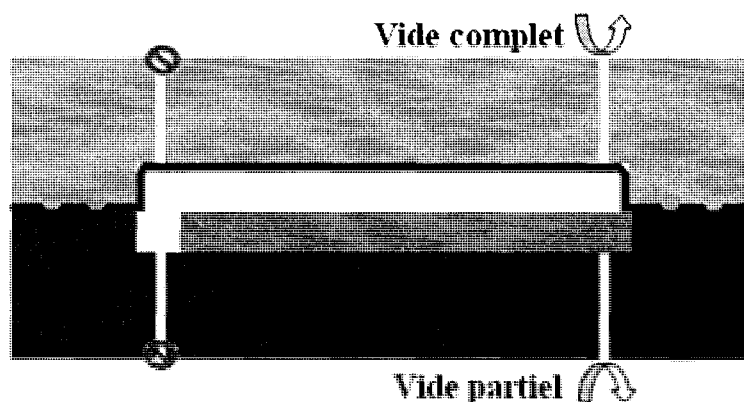


Figure 7.5 Mise sous vide des deux chambres du moule d'injection flexible.

Dans le cas de l'application d'une pression de vide total dans les deux chambres, la membrane n'a pas de position bien définie. La position de la membrane est alors fonction de sa déformation et de l'épaisseur de la chambre de compaction. En effet, si la membrane a déjà été utilisée (légèrement déformée) et que le cadre de la chambre de compaction est épais, la membrane aura alors pour effet de contribuer à la formation de vagues dans la membrane avant l'injection (Figure 7.6).

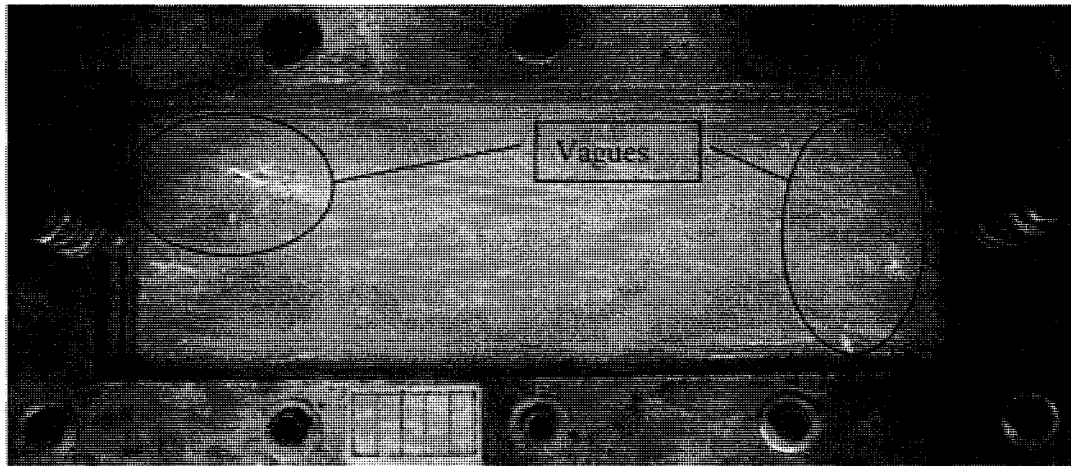


Figure 7.6 Vagues formées par la membrane en fonction de son usure et de l'épaisseur de la chambre de compaction.

Dans le cas de l'utilisation d'un cadre épais, l'application d'une pression de vide élevée dans la chambre d'injection induit un écoulement perturbé de la résine. Les deux essais, réalisés avec le cadre de 0.14 po et une pression de vide de 1 bar, montrent une entrée chaotique de la résine dans le moule. L'ensemble de captures photographiques de la Figure 7.7 illustre bien les perturbations de l'écoulement de la résine.

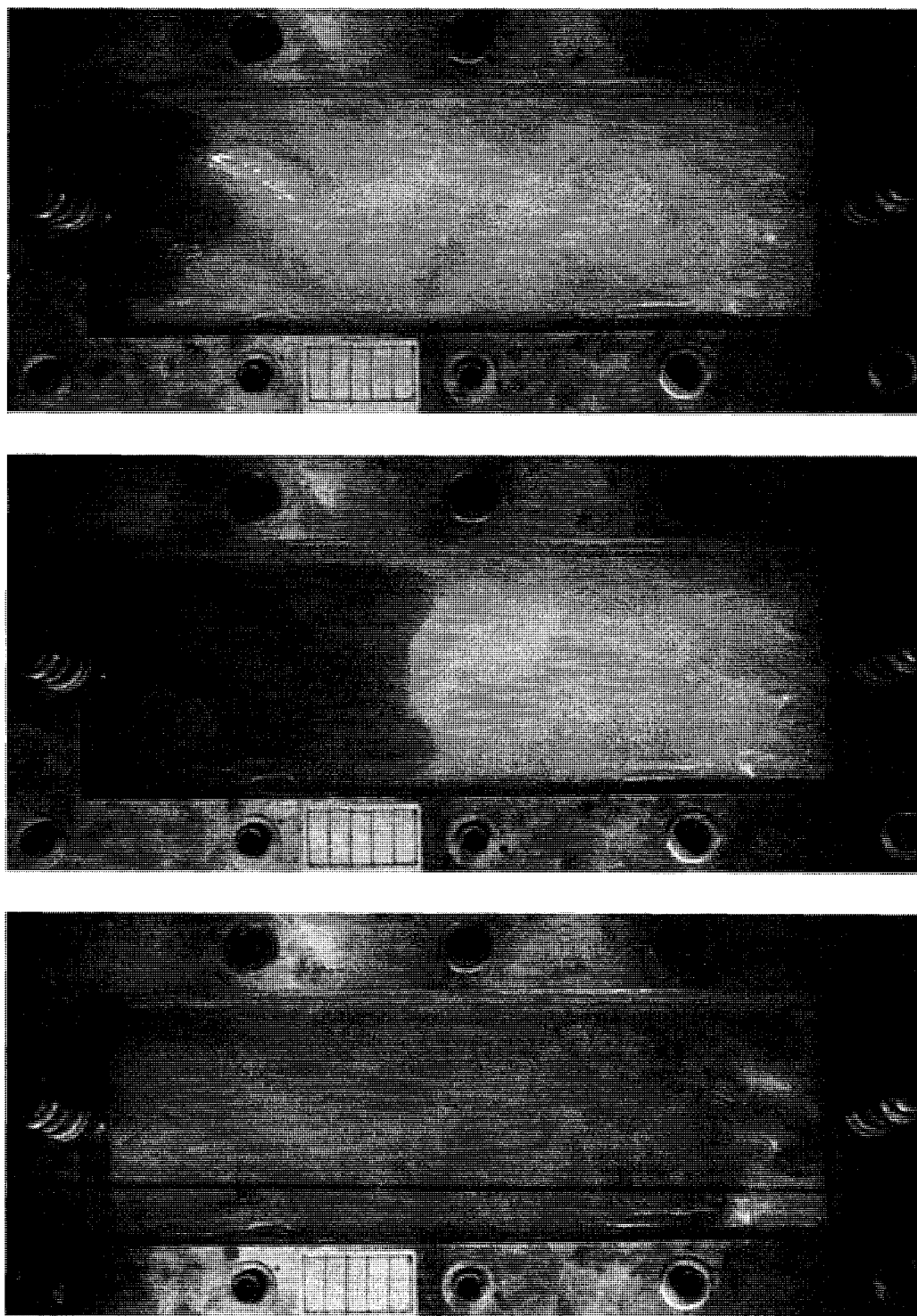


Figure 7.7 Écoulement perturbé de la résine dans le cas d'un cadre de 0.14 po.

La raison de cet écoulement perturbé n'est pas claire. Il peut être dû à une mauvaise étanchéité au niveau du port d'entrée de la résine ou de la cartouche d'injection. Dans le premier cas, la bague de compression pourrait laisser passer l'air, qui est très peu visqueux, et empêcher la fuite de la résine plus visqueuse. Il pourrait en être de même au niveau du piston de la cartouche du pistolet d'injection de la résine, bien que ce phénomène ne se produise pas lors de l'utilisation d'un cadre de compaction fin. Notons que cet écoulement perturbé de la résine semble être à l'origine de la présence de microporosités dans la pièce finale (Figure 7.4)

Bien que l'écoulement de la résine soit modifié par l'augmentation de la pression de vide de la chambre d'injection, le mode d'imprégnation du renfort par la résine reste le même. En effet, lors de l'injection du fluide de compaction, la résine est déplacée vers l'extrémité du moule, laissant une grande partie du renfort non imprégnée. Une fois la résine arrivée à l'extrémité du moule, elle imprègne le renfort transversalement, puis s'écoule à travers le renfort. Les enregistrements vidéo montrent l'écoulement de Darcy qui se produit à la fin de l'imprégnation du renfort. La Figure 7.8 présente le déroulement de l'imprégnation du renfort après fermeture de l'évent de la chambre d'injection. Cet ensemble de photographies montre que le vide complet appliqué dans la chambre d'injection permet une imprégnation totale de la zone du renfort non imprégnée pendant l'injection du fluide de compaction.

Dans le cas d'un cadre de compaction fin (0.05 po), la résine étant proche de l'évent dès son entrée, l'injection du fluide de compaction provoque immédiatement l'imprégnation transversale du renfort (Figure 7.9). Notons également que l'imprégnation est orientée, c'est à dire qu'elle débute du port d'entrée pour finir à l'évent.

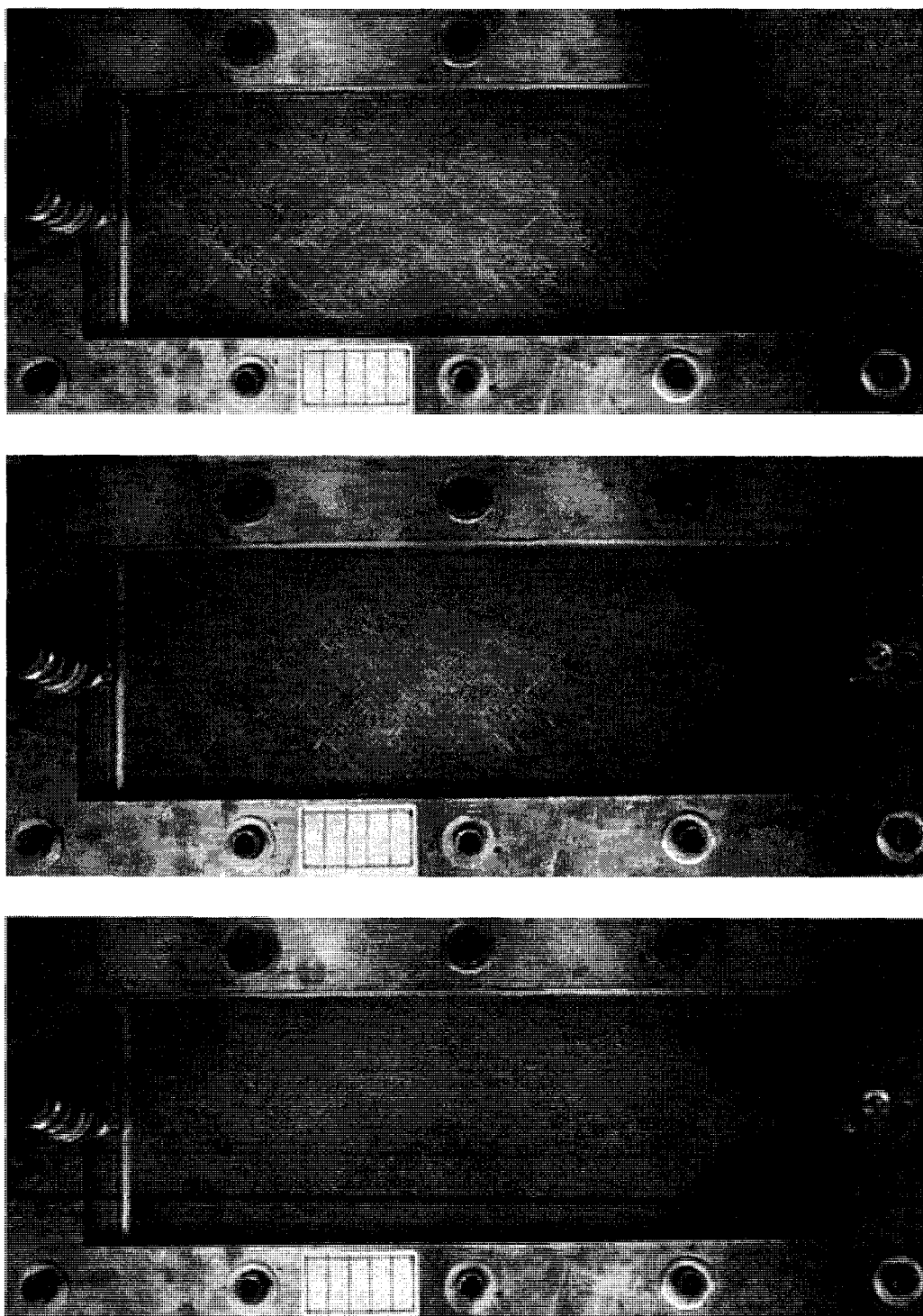


Figure 7.8 Imprégnation du renfort après fermeture de l'évent de la chambre d'injection pour un cadre de 0.14 po.

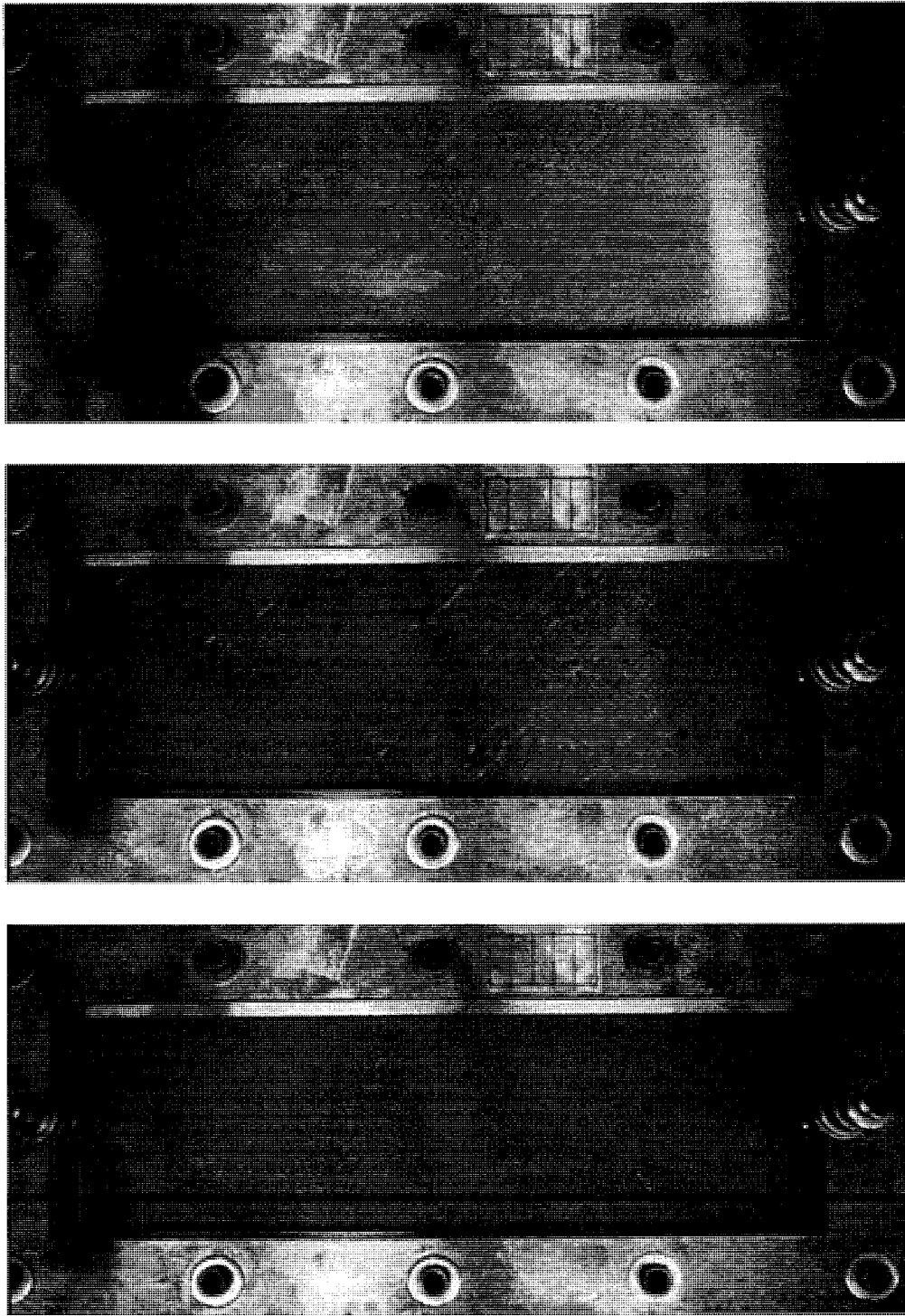


Figure 7.9 Imprégnation du renfort après fermeture de l'évent de la chambre d'injection pour un cadre de 0.05 po.

L'augmentation de la pression de vide dans la chambre de compaction présente le grand avantage d'éliminer les zones sèches. Toutefois, la position du front de résine exerce la même influence sur le mode d'écoulement que dans les plans d'expérience #2 et 3 (chapitres 5 et 6). Dans le cas d'un cadre de la chambre de compaction épais, l'augmentation de la pression de vide cache, mais ne résout pas le problème d'imprégnation lié au mode d'écoulement de la résine, qui est à l'origine de la formation d'une zone sèche. Il est donc important d'utiliser une épaisseur de la chambre de compaction, qui limite le déplacement de la résine lors de l'injection du fluide de compaction. Dans le cas d'une augmentation de la pression de vide dans la chambre d'injection, l'épaisseur de la chambre de compaction optimale évoquée au chapitre 5 reste un aspect important du procédé d'injection flexible.

7.3.4 Analyse de l'épaisseur des pièces

Jusqu'ici, nous avons décrit l'influence de la pression de vide sur la formation de zones sèches, mais les propriétés mécaniques d'un composite dépendent également de la régularité de son épaisseur. En effet, lorsque le composite est soumis à un effort, une variation de sa section peut engendrer des concentrations de contraintes qui affaiblissent ou modifient son comportement mécanique.

À l'aide d'un micromètre analogique, une série de 80 mesures ont été effectuées sur la surface de chaque pièce. L'ensemble des données est présenté à l'annexe C. Pour faciliter leur analyse, seules les valeurs situées sur la ligne centrale des pièces se retrouvent dans la Figure 7.10 et la Figure 7.11.

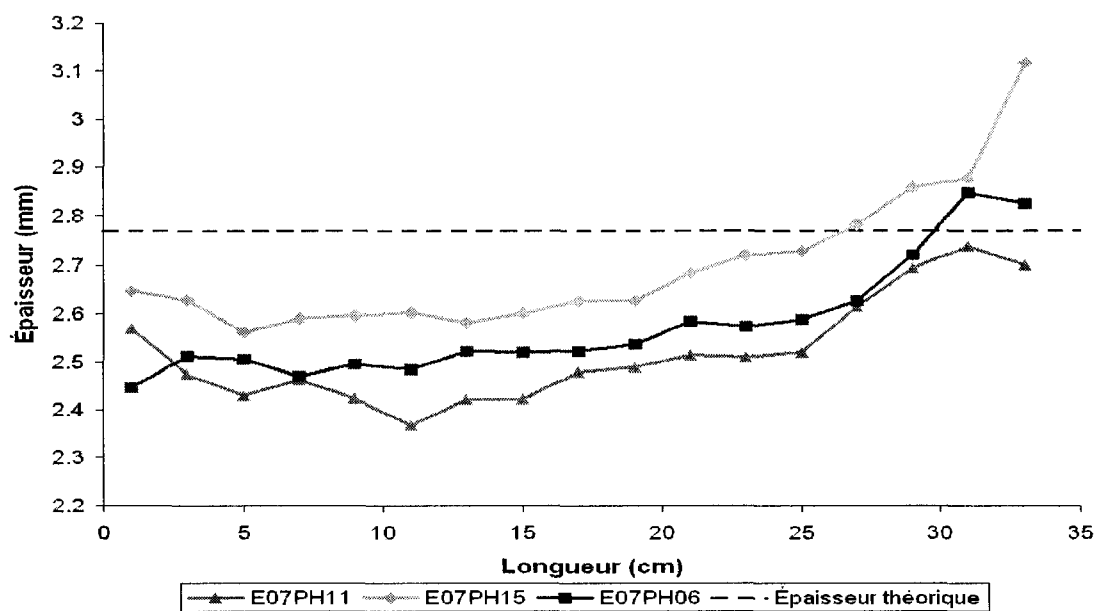


Figure 7.10 Épaisseur médiane des pièces du plan d'expérience #4 pour une épaisseur de la chambre de compaction de 0.14 po.

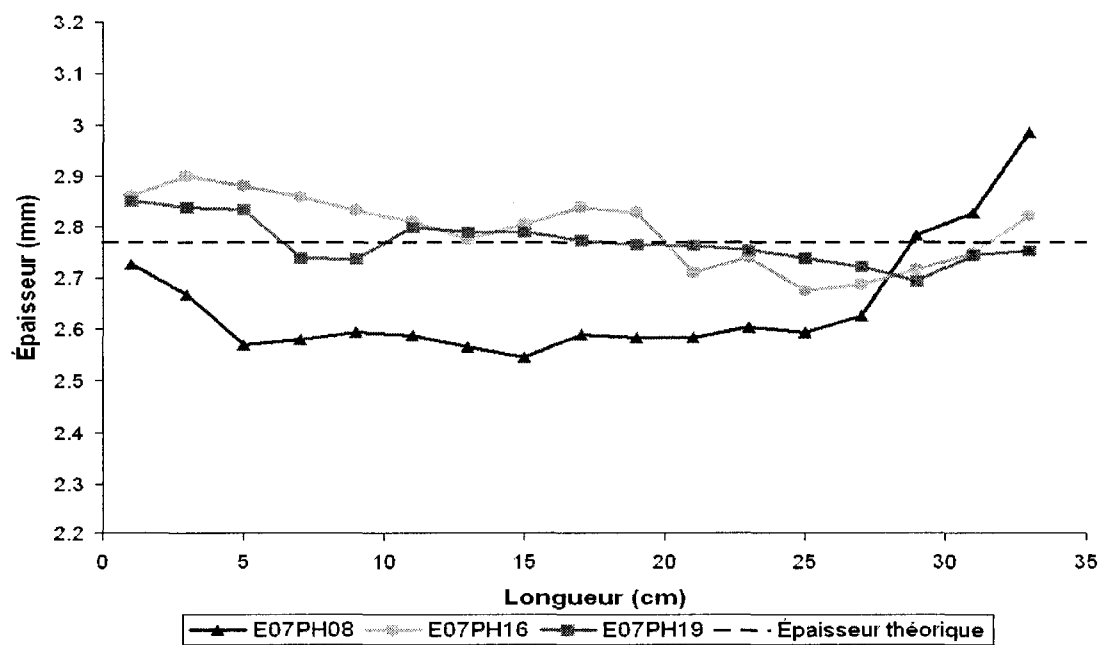


Figure 7.11 Épaisseur médiane des pièces du plan d'expérience #4 pour une épaisseur de la chambre de compaction de 0.05 po.

Ces deux figures démontrent que selon l'épaisseur de la chambre de compaction l'augmentation de la pression de vide de la chambre d'injection n'a pas le même impact sur l'épaisseur des pièces composites. Pour un cadre épais, l'augmentation de la pression de vide semble améliorer l'homogénéité de la pièce. Cependant, à l'extrémité de la pièce, une accumulation de résine se produit pendant l'injection. Dans le cas de l'utilisation d'un cadre fin, l'augmentation de la pression de vide élimine l'accumulation de résine et rend l'épaisseur de la pièce plus homogène. Ce phénomène s'explique par le fait que la pression de vide favorise l'écoulement de Darcy. La membrane ne libérant pas un espace aussi important que dans les plans d'expérience précédents, la résine circule moins facilement au dessus du renfort, ce qui favorise l'écoulement à travers le renfort. Cette courte analyse sur l'épaisseur des composites renforce l'importance du choix de l'épaisseur de la chambre de compaction. Au regard de l'homogénéité de l'épaisseur du composite, l'utilisation d'une pression de vide totale dans la chambre d'injection permet une amélioration, mais uniquement lorsque l'épaisseur du cadre de compaction limite le déplacement de la résine lors de l'injection du fluide de compaction.

7.3.5 Influence de la pression de vide dans la chambre d'injection sur le temps d'injection

Dans le cas d'un cadre épais, l'écoulement perturbé de la résine ne donne pas un temps d'injection exact. Cependant, l'augmentation de la pression de vide de la chambre d'injection ne peut que faciliter l'entrée de la résine dans le moule. Le gradient de pression du système augmentant de 1.25 bar à 2 bars, la vitesse, et donc le débit de la résine, augmente.

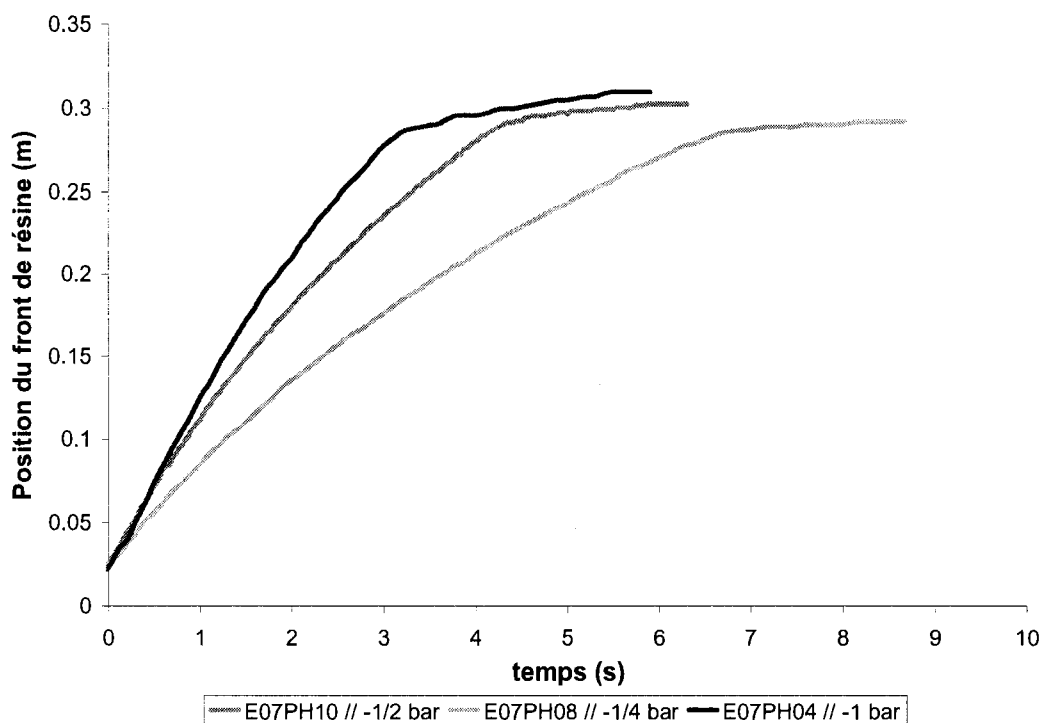


Figure 7.12 Position du front de résine des pièces du plan d'expérience #4 pour un cadre de compaction de 0.05 po.

Dans le cas d'un cadre fin (0.05 po), la Figure 7.12 montre que le temps d'entrée de la résine diminue avec l'augmentation de la pression de vide. Il passe de 6.5 s pour une pression de vide de 0.25 bar à 3 s pour une pression de 1 bar. Le temps total d'injection est également réduit par la diminution du temps d'imprégnation. En effet, l'absence d'air dans le renfort rend plus rapide l'imprégnation après l'obstruction de l'évent de la chambre d'injection. Les enregistrements vidéo montrent une imprégnation quasi instantanée pour l'utilisation d'un cadre de 0.05 po et de quelques secondes pour un cadre plus épais.

7.4 Conclusion

Le plan d'expérience #4 a mis en évidence un paramètre essentiel qui gouverne la qualité des pièces composites produites à l'aide du procédé d'injection flexible. La pression de vide de la chambre d'injection influence directement la quantité d'air présente dans le moule en fin d'injection. De ce fait, l'imposition d'un vide complet dans la chambre d'injection prévient la formation de zones sèches, et cela quelque soit l'épaisseur du cadre de la chambre de compaction.

Toutefois, l'augmentation de la pression de vide de la chambre d'injection ne modifie pas le mode d'imprégnation. Comme les chapitres 5 et 6 l'ont démontré, si le cadre de la chambre de compaction est trop épais, le déplacement de la résine empêche l'imprégnation d'une partie du renfort lors de l'injection du fluide de compaction. Même si, dans le cas d'une pression de vide totale de la chambre d'injection, la résine finit par imprégner tout le renfort, la qualité de l'imprégnation et l'homogénéité de l'épaisseur du composite en sont affectées. Ce plan d'expérience montre également que pour un cadre épais, un écoulement perturbé de la résine produit des microporosités dans la pièce composite. D'autre part, l'utilisation du même cadre (0.14 po) induit la formation d'une accumulation de résine à l'extrémité des pièces quelle que soit la valeur de la pression de vide dans la chambre d'injection. Cette accumulation produit une variation d'épaisseur dans toute la pièce et modifie ainsi les propriétés mécaniques du composite.

Par contre, dans le cas de l'utilisation d'un cadre dont l'épaisseur est proche de la valeur optimale, indiquée au chapitre 5, la qualité des pièces produites est considérablement améliorée. L'imprégnation est très bonne et l'épaisseur devient plus uniforme.

Finalement, l'augmentation de la pression de vide dans la chambre d'injection réduit le temps d'injection total. En effet, les temps d'injection de la résine et d'imprégnation sont réduits : pour le premier, en raison de l'augmentation du gradient de pression dans la résine; et pour le second, par l'absence d'air dans le renfort. Aussi, la pression de vide impose une légère pré-compaction du renfort, ce qui limite leurs influences.

CHAPITRE 8 : VISCOSITÉ DU FLUIDE DE COMPACTION

8.1 Introduction

Ce chapitre traite de l'influence de la viscosité du fluide de compaction sur le comportement du procédé d'injection flexible. En réalité, deux paramètres principaux gouvernent l'écoulement du fluide de compaction : la viscosité du fluide et la pression d'injection. L'influence de ce dernier paramètre ne sera pas décrite dans le chapitre 8. Une étude plus complète se trouve dans le rapport de stage d'Antoine [30].

La viscosité est le paramètre qui caractérise la plus ou moins grande facilité à mettre un fluide en écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force. Elle est déterminée par la capacité de transfert de quantité de mouvement que possède une couche du fluide en mouvement relatif par rapport aux couches adjacentes.

La définition de la viscosité amène à poser une hypothèse sur l'impact de la viscosité du fluide de compaction sur le positionnement de la membrane relativement aux deux fluides. Le caractère élastique de la membrane lui permet de prendre diverses positions entre le fluide de compaction et la résine. Pour que la membrane prenne localement une position verticale entre les deux fluides tel qu'illustré à la Figure 8.1, il faut lui appliquer une force suffisante. Pour un fluide de compaction peu visqueux, il est plus facile de se frayer un chemin entre le contre-moule et la membrane que de déformer cette dernière et pousser la résine vers l'évent comme sur la Figure 8.1.

En fonction de la viscosité, la position de la membrane devrait donc varier entre une position verticale (Figure 8.1) et une position presque horizontale (Figure 8.2). Plus précisément l'augmentation de la viscosité devrait s'accompagner d'un redressement de la membrane. D'autre part, plus le cadre de la chambre de compaction est épais, plus le redressement de la membrane nécessite une force importante pour la déformer. Pour un

fluide de basse viscosité, l'épaisseur de la chambre de compaction doit donc favoriser plutôt une position horizontale de la membrane (Figure 8.2).

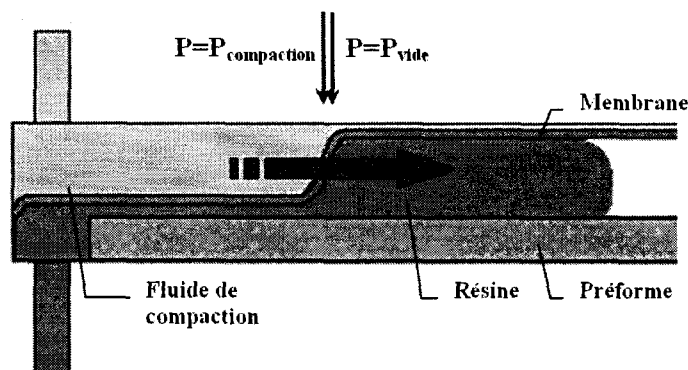


Figure 8.1 Compaction avec un fluide de haute viscosité.

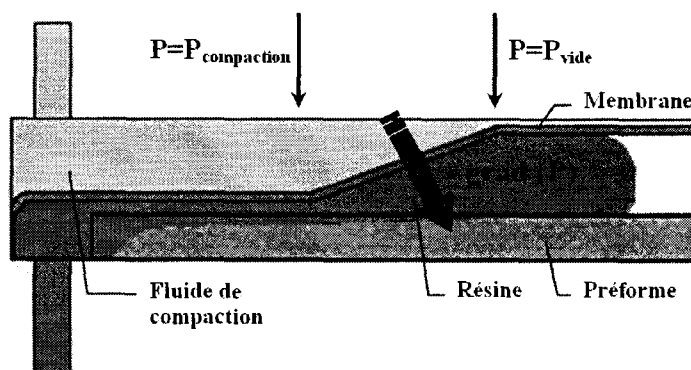


Figure 8.2 Compaction avec un fluide de faible viscosité.

Les Figure 8.1 et 8.2 illustrent l'influence que peut avoir la position de la membrane sur l'imprégnation du renfort. Dans le cas où la membrane forme une cloison verticale entre le fluide de compaction et la résine, le gradient de pression résultant est horizontal, ceci déplace la résine vers l'extrémité du moule. Dans le cas où la membrane décrit une pente

douce, l'orientation du gradient de pression est modifiée, car une partie du fluide de compaction se trouve au dessus de la résine. Le gradient de pression est alors davantage dirigé vers le renfort, ce qui favorise une imprégnation plus régulière de celui-ci pendant l'injection du fluide de compaction. Finalement, une diminution de la viscosité devrait améliorer la répartition de la résine au cours de l'injection et donc améliorer l'imprégnation du composite.

Au vu de cette hypothèse, une étude couplée de l'effet de la viscosité et de l'épaisseur du cadre semble pertinente. Dans le plan d'expérience #5, les paramètres d'injection sont la viscosité du fluide de compaction et l'épaisseur de la chambre de compaction. Ce chapitre s'efforce donc de valider l'hypothèse précédente sur le comportement du procédé d'injection flexible en fonction de la viscosité du fluide de compaction. Cependant, pour pouvoir vérifier cette hypothèse, les données recueillies à l'aide du moule transparent imposent une démarche particulière. Dans un premier temps, il faut évaluer de manière théorique l'impact de la variation de la viscosité du fluide de compaction sur la valeur du capteur de pression situé à l'entrée du moule. La position du capteur correspond à la fin de la conduite reliant le pot de pression au moule transparent. Ces valeurs de pressions théoriques seront ensuite comparées aux valeurs de pressions récupérées lors des injections du plan d'expérience #5. Une concordance de ces deux types de données validerait l'hypothèse sur le positionnement de la membrane en fonction de la viscosité du fluide de compaction.

8.2 Conditions expérimentales

8.2.1 Matériaux

Dans ce plan d'expérience, le tissu utilisé est le même que dans le plan d'expérience #1 présenté au chapitre 4. Le renfort SAERUni fabriqué par Saertex est un tissu quasi-unidirectionnel. Pour permettre une meilleure tenue du tissu, quelques fibres transversales sont cousues au dos du renfort à 90 ° (Figure 4.2). Ce tissu a été utilisé dans ce plan d'expérience en raison du manque de tissu Roviply de CHOMARAT. La

masse surfacique de ce tissu a été déterminée pour plusieurs échantillons comme étant d'environ 970 g/m^2 (Tableau 4.5).

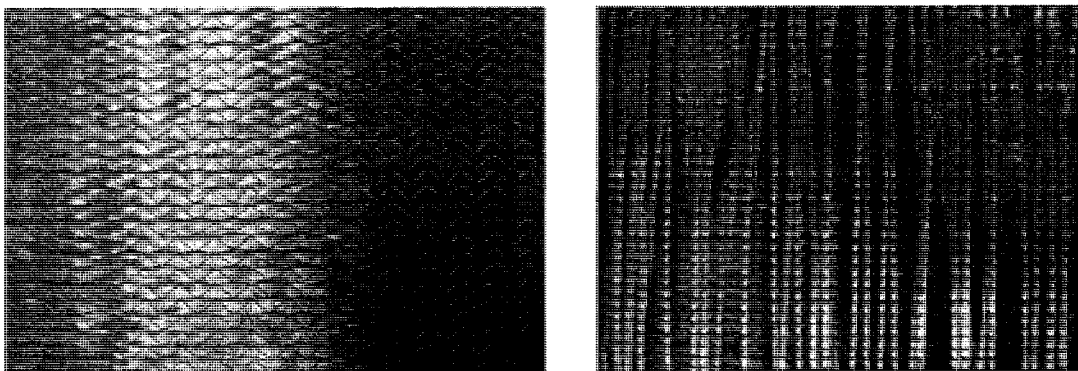


Figure 8.3 Photographie des deux côtés du tissu Saertex.

Tableau 8.1 Masse surfacique du renfort de Saertex

Longueur (mm)	Largeur (mm)	Poids (g)	Masse surfacique (g/m^2)
102	103	10.16	967
101	99	9.76	976
100	104	10.10	971

La formulation reste identique à celle des plans d'expérience précédents. La résine utilisée est une résine vinylester de la compagnie DERAKANE, la vinylester 411-350. Cette résine a une viscosité de 0.35 cSt. Pour ce plan d'expérience, l'injection est réalisée grâce à un pistolet d'injection. Dans ce cas la résine est formulée, puis introduite dans la cartouche du pistolet. Le naphtalène de cobalt 12 % (NaCo) de la compagnie Dussek est le promoteur. Ce dernier est nécessaire pour initier la polymérisation à température ambiante. Un accélérateur est ajouté, le N-dimethylaniline (DMA). Le Tableau 4.6 donne les proportions des éléments, qui permettent la polymérisation de la résine.

Tableau 8.2 Proportion des additifs ajoutés à la résine vinylester DERAkANE 411 - 350 pour utilisation avec le pistolet d'injection

additifs	PHR (pour 100g de résine)
NaCo 12 %	0.15
DMA	0.2
MEKP 925 H	1.5

Le fluide de compaction est l'huile de silicone Dow Corning 200 Fluide. Nous disposons d'un gallon de viscosité 100 cSt et un de 1000 cSt. Un gallon de 500 cSt et un autre de 2500 cSt sont obtenus par mélange d'huiles de 100, 1000 et 10000 cSt. Toutes les valeurs de viscosité ont été vérifiées à l'aide d'un viscosimètre rotationnel.

Le viscosimètre rotationnel mesure le couple nécessaire à la rotation d'un plongeur en immersion dans le liquide. La mesure se fait par compensation du moment des forces de frottement. Un moteur transmet au plongeur un mouvement de rotation par l'intermédiaire d'un ressort calibré. Les forces de frottement imposées par le fluide au plongeur sont reprises par le ressort. Ce phénomène produit un déphasage, entre les axes du moteur et du plongeur. C'est ce déphasage qui indique la viscosité du fluide. Notons que la taille du contenant et la hauteur du liquide doivent être suffisantes pour négliger les effets de bord. La Figure 8.4 montre l'appareil utilisé au laboratoire. Les valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau 8.3.

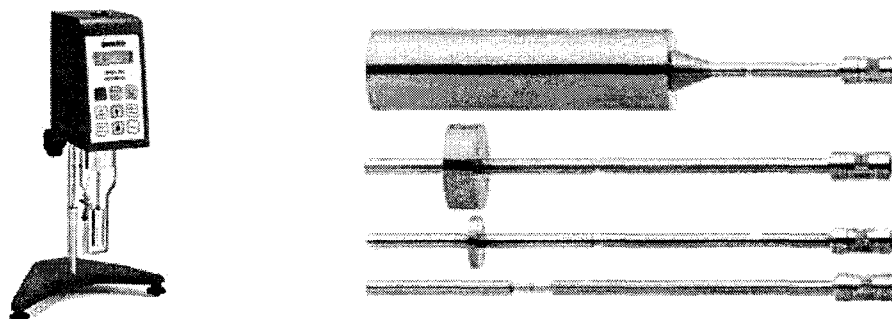


Figure 8.4 Viscosimètre rotationnel digital Brookfield DV-II et ses plongeurs.

Tableau 8.3 Viscosités mesurées au viscosimètre Brookfield DV-II

Viscosité indiquée (cSt)	Viscosité mesurée (cSt)	Plongeur // vitesse (RPM)
100	87,0	LV1 // 50
500	492,8	LV2 // 50
1000	944,0	LV2 // 20
2500	2560,0	LV3 // 30

La membrane qui sépare les chambres d'injection et de compaction est en silicone transparent afin d'observer les écoulements de la résine et du fluide de compaction. La membrane EL1040T provient de la firme TORR-TECHNOLOGIE et possède une épaisseur de 0.061 pouces (1.5 mm). Ses propriétés d'étanchéité et de compatibilité avec l'huile silicone en font une très bonne membrane.

8.2.2 Conditions d'opération

Le matériel utilisé est identique à celui utilisé dans les autres plans d'expérience. L'injection du fluide de compaction est effectuée à l'aide du pistolet d'injection décrit au chapitre 5. Un pot de pression sert à l'injection du fluide de compaction et deux pots de vide d'appliquer une pression de vide dans les chambres d'injection et de compaction. Pour faciliter la préparation de l'ensemble des travaux, 100 g de résine sont formulés. Cette quantité de résine permet d'obtenir un taux de fibres d'environ 50% et une épaisseur théorique de 3.06 mm. L'ensemble des paramètres fixes du plan d'expérience #5 est récapitulé dans le Tableau 7.2.

Tableau 8.4 Paramètres fixes du plan d'expérience #5

Paramètres	Valeurs
Pression de vide de la chambre de compaction	1 bar
Pression de vide de la chambre d'injection	0.5 bar
Pression du fluide de compaction	6 bars
Pression d'injection de la résine	1 bar
Taux de fibres visé	50 %

Dans le plan d'expérience #5, la pression de vide de la chambre d'injection est fixée volontairement à 0.5 bar. Le plan d'expérience #4 du chapitre 7 a montré qu'une augmentation de la pression de vide améliore considérablement la qualité des pièces produites. Cependant, pour comprendre l'influence de la diminution de la viscosité du fluide de compaction sur le comportement du procédé d'injection flexible, il est préférable de choisir des paramètres d'injection permettant d'observer une possible amélioration de l'imprégnation.

Le plan d'expérience est constitué de 24 injections. Les paramètres qui entrent en jeu sont la viscosité et l'épaisseur de la chambre de compaction. Deux injections sont réalisées pour chaque couple de paramètres. Le Tableau 8.5 présente les caractéristiques de chaque injection.

Tableau 8.5 Détails du plan d'expérience

Épaisseur (po)	Viscosité (cSt)			
	100	500	1000	2500
0.05	E07V23	E07V21	E07V01	E07V28
	E07V24	E07V22	E07V03	E07V29
0.08	E07V25	E07V07	E07V05	E07V18
	E07V26	E07V08	E07V06	E07V27
0.14	E07V15	E07V09	E07V02	E07V17
	E07V16	E07V10	E07V04	E07V19

8.3 Résultats et discussion

Au fil de l'analyse des résultats, nous mettrons en évidence le comportement de la membrane en fonction de la viscosité du fluide de compaction. L'impact de ce comportement sur l'imprégnation du renfort sera également décrit.

8.3.1 Données générales sur les pièces

Les informations générales obtenues sur les pièces polymérisées sont récapitulées dans le Tableau 8.6. Le taux de fibres visé de 50%, est quasiment atteint pour toutes les pièces. Les pièces, pour lesquelles le taux de fibres est éloigné de 50%, n'ont pas été correctement préformées.

Tableau 8.6 Données générales sur les pièces produites

Pièce	Poids préforme (g)	Poids final (g)	Taux de fibres (global) (%)	Quantité de résine (g)
E07V01	171,36	243,53	50,32	72,17
E07V02	171,56	245,69	49,66	74,13
E07V03	172,4	245,96	49,98	73,56
E07V04	171,21	244,9	49,76	73,69
E07V05	172,63	246,32	49,97	73,69
E07V06	171,05	240,07	51,43	69,02
E07V07	172,7	247	49,76	74,30
E07V08	174,06	247,21	50,36	73,15
E07V09	174,39	244,54	51,49	70,15
E07V10	169,92	249,29	47,65	79,37
E07V15	176,16	247,4	51,35	71,24
E07V16	175,24	251,38	51,72	69,87
E07V17	172,81	245,11	50,34	72,71
E07V18	171,39	245,52	49,63	74,13
E07V19	168,46	245,4	48,24	76,94
E07V21	173,94	245,53	50,90	71,59
E07V22	172,75	243,1	51,18	70,35
E07V23	174,38	248,35	50,12	73,97
E07V24	174,77	249,3	49,98	74,53
E07V25	174,14	248,39	49,99	74,25
E07V26	169,02	240,65	50,17	71,63
E07V27	177,6	252,42	50,28	74,82
E07V28	177,87	252,42	50,41	74,55
E07V29	177,06	251,2	50,44	74,14

8.3.2 Analyse du temps d'injection

Les temps d'injection relevés sur les enregistrements vidéo sont repris dans le Tableau 8.7. Comme il est décrit dans le chapitre 5, le temps d'injection est défini par la somme du temps d'injection dans le moule et du temps de fin du remplissage. La valeur sur fond gris correspond à une injection dans laquelle la pression d'injection est trop faible. Les valeurs en gras sont les moyennes des valeurs du tableau (la case grisée n'est pas prise en compte).

Tableau 8.7 Temps d'injection (s)

Épaisseur (po)	Viscosité (cSt)				
	100	500	1000	2500	moyenne
0.05	5,74	8,142	5,705	10,711	7,746
	10,378	8,876	6,807	8,242	
0.08	3,871	5,606	4,905	8,109	5,694
	4,438	4,972	6,74	6,908	
0.14	4,405	4,839	6,54	10,176	6,603
	4,438	5,405	7,074	9,943	
moyenne	4,578	6,307	6,295	9,015	

Le Tableau 8.7 traduit une diminution du temps d'injection quand la viscosité du fluide de compaction décroît. Le chapitre 2 a montré que pour les huiles silicones utilisées, la pression dynamique est négligeable, c'est-à-dire que les pertes de charge du système sont constantes et égales à la différence de pression entre les pots de pression et de vide. L'équation (5.1) a montré que l'expression des pertes de charge est fonction de la viscosité et de la vitesse. L'équation suivante présente cette fois la vitesse en fonction des pertes de charge :

$$V = \frac{D^2}{32 \cdot \mu \cdot L} \Delta P \quad (8.1)$$

L'équation (8.1) met en évidence la variation de la vitesse en fonction de la viscosité du fluide. Plus la viscosité du fluide de compaction est faible, plus le temps d'injection sera court. Ceci concorde avec les résultats du plan d'expérience #5.

Pour toutes les valeurs de viscosité, la diminution de l'épaisseur du cadre de la chambre de compaction a le même impact sur le temps d'injection que celui décrit au chapitre 5, c'est-à-dire une diminution entre l'utilisation d'un cadre de 0.14 et de 0.08 po, puis une augmentation pour le cadre de 0.05 po. À partir d'une certaine valeur la diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction augmente les pertes de charge dans l'interstice.

Ceci favorise l'écoulement de Darcy au travers du renfort et donc diminue la vitesse d'avancement du front de résine.

8.3.3 Observations visuelles

L'observation visuelle des pièces polymérisées et de leurs photographies permet de déterminer la qualité de l'imprégnation. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 8.8.

Tableau 8.8 Analyse visuelle des pièces produites

Épaisseur (po)	Viscosité (cSt)	Qualité de l'imprégnation	Zone sèche (type et position)	Accumulation
0.05	100	très bonne	dispersée	aucune
	500	excellente	dispersée	aucune
	1000	bonne	dispersée, faible concentration L=3/4	faible
	2500	bonne	dispersée, faible concentration L=3/4	aucune
0.08	100	moyenne	dispersée	aucune
	500	mauvaise	dispersée, faible concentration L=1/2	importante
	1000	mauvaise	dispersée, concentration moyenne L=1/3	faible
	2500	moyenne	dispersée, faible concentration L=1/2	aucune
0.14	100	très mauvaise	dispersée	aucune
	500	mauvaise	dispersée, concentration moyenne L=1/2	aucune
	1000	mauvaise	dispersée, concentration importante L=1/4	très importante
	2500	moyenne	dispersée	aucune

Plusieurs remarques peuvent être tirées du Tableau 8.8. Tout d'abord, la diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction améliore l'imprégnation quelque soit la viscosité du fluide de compaction utilisée. Cette remarque concorde avec les résultats obtenus au chapitre 5. Pour les cadres de la chambre de compaction de 0.05 et 0.08 po, à partir de 1000 cSt, la diminution de la viscosité améliore l'imprégnation du composite. Cette observation va dans le sens de l'hypothèse évoquée plus haut. Cependant, le passage du fluide de compaction d'une viscosité de 1000 à 2500 cSt améliore également l'imprégnation. Dans le cas du cadre de 0.14 po, la diminution de la viscosité ne fait que dégrader l'état du composite.

Dans la suite de cette étude, nous verrons que ces résultats, a priori contradictoires, s'expliquent d'un côté par le positionnement de la membrane et d'un autre par l'effet combiné de la quantité d'air présent dans le moule et de la vitesse de l'injection.

8.3.4 Positionnement de la membrane en fonction de la viscosité du fluide de compaction

Cette section a pour objectif de valider l'hypothèse de l'introduction et de montrer son impact sur l'imprégnation du composite. À cette fin, nous allons dans un premier temps expliciter l'hypothèse formulée. Ensuite, le comportement de la membrane en fonction de la viscosité du fluide de compaction sera démontré en comparant les valeurs théoriques et expérimentales de la pression du fluide de compaction à l'interface moule/conduite où se situe le capteur de pression.

8.3.4.1 Hypothèse sur le positionnement de la membrane en fonction de la viscosité du fluide de compaction

Une hypothèse a été avancée dans l'introduction de ce chapitre sur le comportement de la membrane en fonction de la viscosité du fluide de compaction. La diminution de la viscosité permet au fluide de compaction de se positionner entre le contre-moule et la membrane en se retrouvant à l'aplomb d'une partie de la résine (Figure 8.2). L'augmentation de la viscosité du fluide de compaction tend à redresser la membrane jusqu'à former une cloison quasi verticale entre le fluide de compaction et la résine

(Figure 8.1). Pour conférer à la membrane une position verticale, il faut une plus grande force de déformation quand le cadre de la chambre de compaction est plus épais. Pour un cadre plus épais la diminution de la viscosité joue donc en la faveur d'une position plus horizontale de la membrane.

Par la suite, en considérant cette hypothèse valide, nous allons déterminer l'évolution théorique de la pression du fluide de compaction en fin de conduite, c'est-à-dire comme le montre la Figure 3.17 à l'interface entre le moule transparent et le tuyau de conduite. La comparaison de l'évolution de la pression théorique à la réalité du plan d'expérience #5 validera le comportement de la membrane en fonction de la viscosité du fluide de compaction.

8.3.4.2 Observation de la démarcation entre les fronts

Pendant la phase de compaction, un fluide peu visqueux se fraye plus facilement un chemin entre le contre-moule et la résine (membrane). Ce phénomène s'observe sur les enregistrements vidéo. La Figure 8.5 montre la démarcation entre les fronts de résine et de fluide de compaction pour deux viscosités et un cadre de 0.14 po. Dans le cas d'un fluide peu visqueux, la démarcation est moins nette que dans le cas de l'injection d'un fluide plus visqueux. Ce phénomène semble s'expliquer par une inclinaison de la membrane. L'aspect est similaire pour les cadres de 0.08 et 0.05 po.

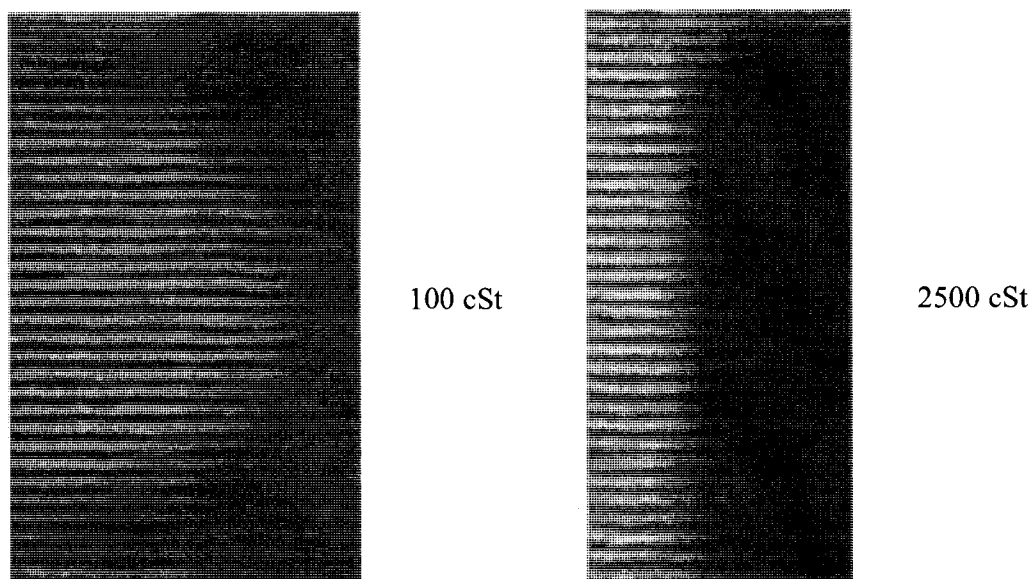


Figure 8.5 Limite entre les fronts de résine et du fluide de compaction pour le cadre de la chambre de compaction de 0.14 po.

8.3.4.3 Viscosité et pression statique

Pour comparer les valeurs théoriques et expérimentales de la pression du fluide de compaction à l'interface moule/conduite, il faut déterminer l'évolution théorique de la pression du fluide de compaction en fonction de sa viscosité. Pour comprendre l'influence de la viscosité sur cette pression, nous allons, à l'aide d'un cas simplifié du moule transparent, étudier le comportement des pertes de charge dans le moule et la conduite en fonction de la viscosité. C'est en effet le rapport entre les pertes de charge du moule et de la conduite qui détermine la valeur de la pression du fluide de compaction à leur interface. À partir de là, il sera possible de comprendre l'influence du déroulement du procédé d'injection flexible sur l'évolution de la pression à l'interface moule/conduite.

Cas simplifié :

La Figure 8.6 schématise très simplement le moule transparent. Pour l'instant, nous considérons que le moule est une cavité rectangulaire où il n'y a pas de résine, ni de

membrane. Nous traitons ici uniquement du cas d'un écoulement permanent du fluide de compaction à travers la conduite et le moule. Ce schéma inclue le pot de pression du fluide de compaction, la conduite cylindrique le reliant à la chambre de compaction rectangulaire du moule et le capteur de pression situé à l'interface conduite/moule.

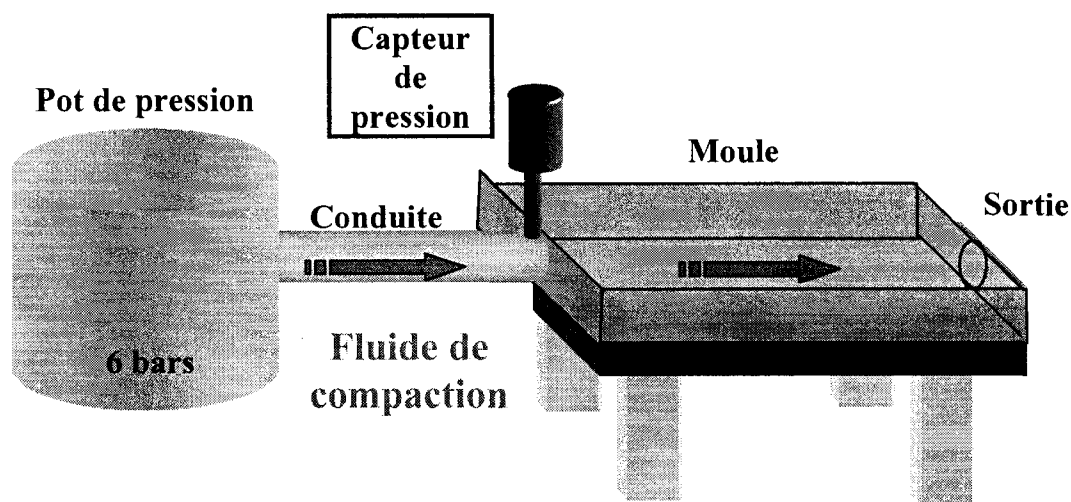


Figure 8.6 Écoulement du fluide de compaction pour un cas sans résine.

Le chapitre 2 a montré que la différence de pression entre les pots de pression et de vide correspond aux pertes de charge du système, en ce sens que la pression dynamique est négligeable. Pour une conduite de section constante, les pertes de charge augmentent linéairement avec la distance parcourue. Dans le cas du moule transparent nous pouvons considérer qu'il y a deux sections constantes : la conduite entre le pot de pression et le moule et la cavité du moule. La différence de pression entre les pots de pression et de vide (ΔP_T) s'exprime alors par la somme des pertes de charge de chaque section.

$$\Delta P_T = \Delta P_C + \Delta P_M \quad 8.2$$

où ΔP_C sont les pertes de charge dans la conduite et ΔP_M celles du moule.

Comme le montre l'équation suivante, les pertes de charge de chacune de ces sections peuvent être exprimées en fonction du débit du fluide de compaction, qui est le même dans tout le système.

$$\Delta P = \frac{128 \cdot \mu \cdot L \cdot Q}{\pi \cdot D^4} \quad 8.3$$

où ΔP sont les pertes de charge, μ la viscosité, L la longueur de la section, Q le débit du fluide de compaction et D le diamètre équivalent de la conduite (cf. chapitre 2). La Figure 8.7 montre l'évolution de la pression du fluide de compaction entre les pots de pression et de vide lorsque l'écoulement est en régime permanent.

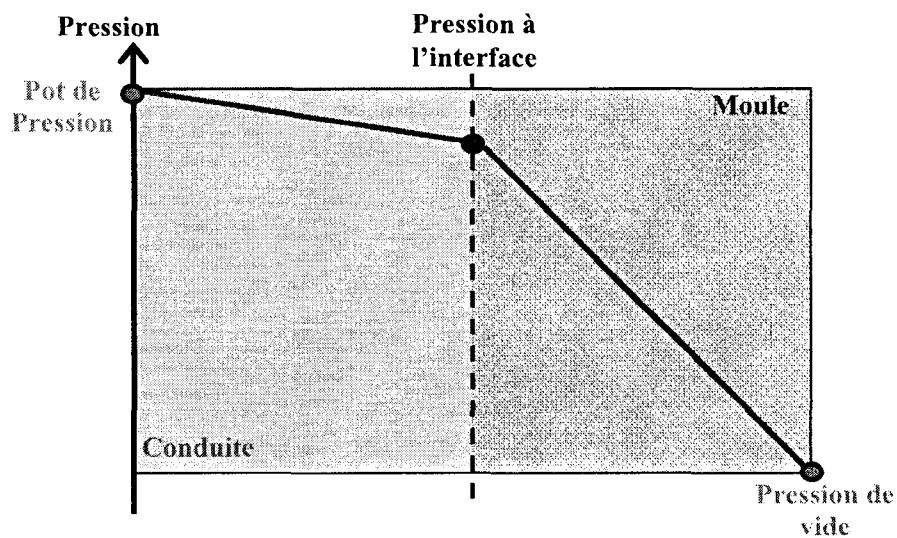


Figure 8.7 Évolution de la pression statique à l'interface dans le cas simplifié.

Pour obtenir la valeur de la pression à l'interface, il faut connaître la répartition des pertes de charge. L'équation suivante donne la proportion p_m des pertes de charge dans le moule.

$$p_m = \frac{\Delta P_M}{\Delta P_C + \Delta P_M} \quad 8.4$$

À l'aide de la proportion de pertes de charge dans le moule et de la valeur de la pression imposée par le pot de vide, il est possible d'obtenir la pression du fluide de compaction à l'interface. L'équation suivante en donne l'expression :

$$P_I = \Delta P_T \cdot p_m + P_V \quad 8.5$$

où P_I est la pression à l'interface et P_V la pression de vide. La combinaison des équations (8.3) et (8.5) permet d'exprimer la pression du fluide de compaction de la manière suivante :

$$P_I = \Delta P \cdot \frac{L_M \cdot D_C^4}{L_C \cdot D_M^4 + L_M \cdot D_C^4} + P_V \quad 8.6$$

où L_M et L_C sont les longueurs respectives de la cavité du moule et de la conduite et D_M et D_C les diamètres équivalents dans mêmes éléments. Cette équation montre que la pression du fluide de compaction à l'interface moule/conduite est indépendante de la viscosité. Elle n'est fonction que des paramètres géométriques des deux sections et des pressions délivrées par les pots de pression et de vide.

Pour la suite du raisonnement il faut bien comprendre l'influence de la conduite et du moule sur la pression du fluide de compaction. Le chapitre 2 nous a permis de montrer que le gradient de pression entre les pots de pression et de vide est transformé en pertes de charge. Une partie de la perte de charge se produit dans la conduite et le reste dans le moule. Dans le cas simplifié de la Figure 8.6, la proportion de pertes de charge dans le moule dont nous venons de parler, dépend uniquement de facteur géométrique. Si d'autres facteurs venaient à rendre plus difficile l'écoulement du fluide de compaction dans le moule, cette proportion de pertes de charge augmenterait. À partir de là, comme le montre l'équation (8.5), la pression en fin de conduite augmenterait également.

Quelque soit les paramètres d'injection, la conduite ne subit aucune modification. En ce qui concerne le moule, nous allons voir dans les deux autres étapes de la démarche que

la présence de résine et la position de la membrane ont un impact sur la proportion des pertes de charge dans le moule et cela en fonction de la viscosité du fluide de compaction.

Rôle de la résine

Dans le cas d'une injection flexible la résine représente un obstacle pour le fluide de compaction, car pour ce dernier en plus de progresser dans l'interstice, il doit faire avancer la résine. En effet, les essais réalisés avec le moule transparent ont montré que, sous l'effet de la pression du fluide de compaction, la résine était repoussée à l'extrémité du moule. En outre, plus la viscosité du fluide de compaction est faible, plus il est difficile pour le fluide de déplacer la résine dont la viscosité est inchangée. Dans un premier temps, la proportion de pertes de charge dans le moule semble augmenter avec la diminution de la viscosité du fluide de compaction.

D'après l'équation (8.5) une augmentation de la proportion de pertes de charge dans le moule à pour effet d'augmenter la pression à l'interface moule/conduite. Comme l'illustre la Figure 8.8, pour une position du front du fluide de compaction dans le moule, la diminution de la viscosité aurait pour influence d'augmenter la pression à l'interface moule/conduite.

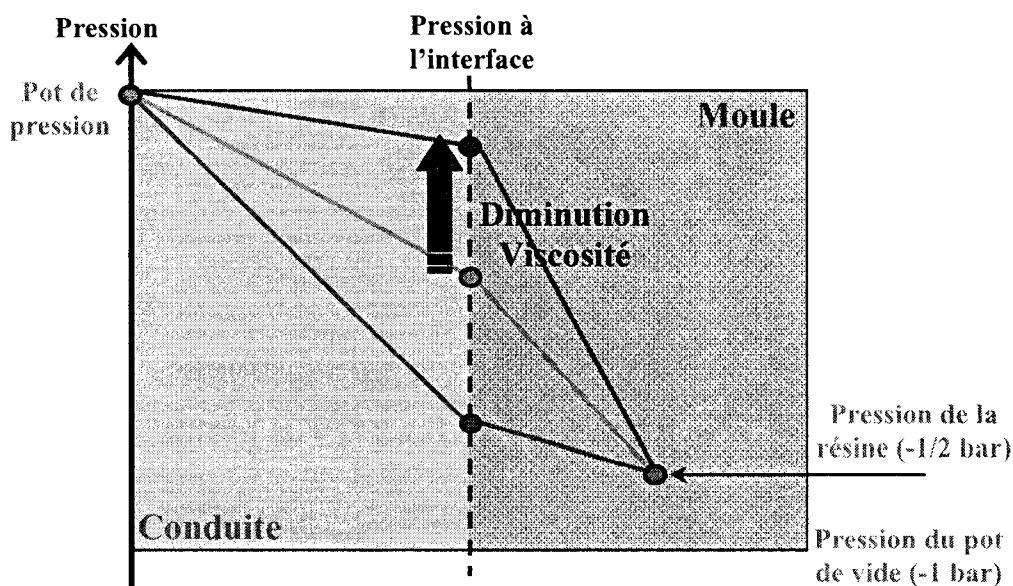


Figure 8.8 Évolution de la pression statique à l'interface en fonction de la viscosité pendant le déplacement de la résine dans le moule.

Influence de la position de la membrane

Nous avons évoqué l'hypothèse que selon laquelle la diminution de la viscosité tend à incliner horizontalement la membrane et cela, d'autant plus que le cadre de la chambre de compaction est épais. Dans ce cas, l'effet bloquant de la résine est réduit car le fluide de compaction progresse plus facilement entre la membrane et le contre-moule. La proportion de pertes de charge diminue donc quand l'épaisseur de la chambre de compaction augmente et que la viscosité du fluide de compaction diminue.

Observations expérimentales :

Il n'y a pas de moyen de quantifier l'influence de ces deux phénomènes sur la pression à l'interface, car les paramètres impliqués sont trop nombreux. Toutefois, nous pouvons vérifier ces hypothèses en étudiant les pressions à l'interface moule/conduite lors de l'entrée du fluide de compaction.

Au cours des injections, la pression du fluide de compaction est mesurée à l'aide d'un capteur placé juste après la valve d'entrée du fluide de compaction. Le chapitre 3 a permis de définir les différents paliers du fluide de compaction pendant son injection. Pour vérifier l'hypothèse posée ici, il faut se concentrer sur le premier palier qui correspond à la pression nécessaire pour que la résine atteigne l'extrémité du moule. Pour l'ensemble des essais réalisés, cette pression a été enregistrée. La Figure 8.9 présente l'ensemble des valeurs obtenues.

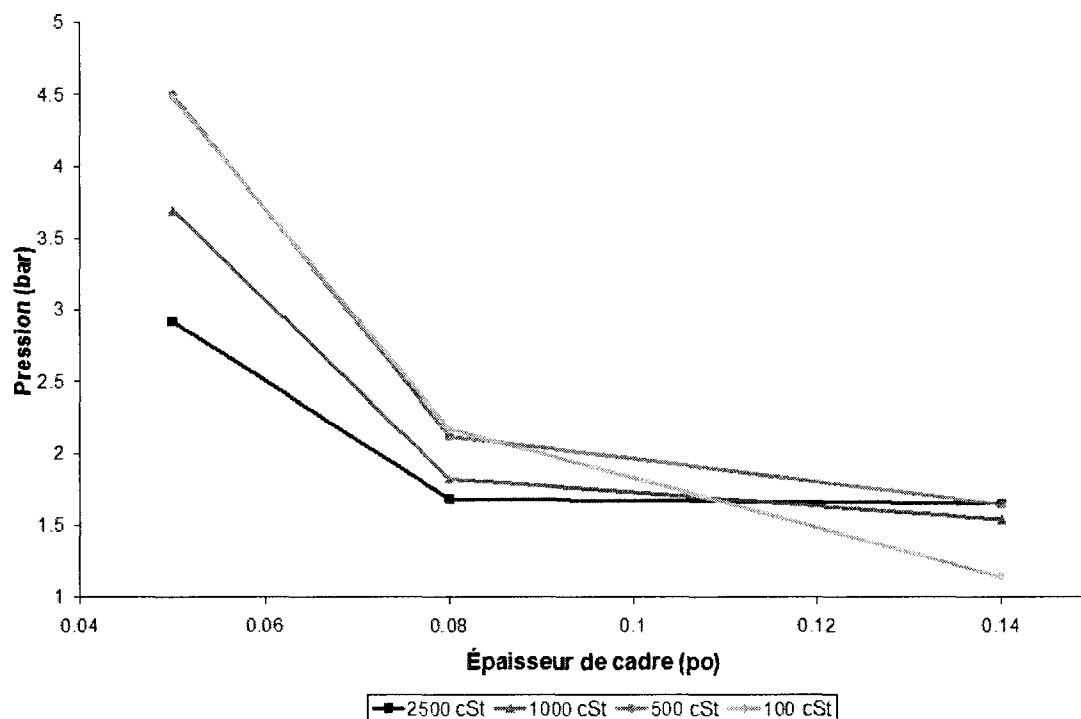


Figure 8.9 Évolution de la pression du fluide de compaction en fonction de sa viscosité et de l'épaisseur du cadre.

Pour un cadre fin (0.05 po), les pressions sont plus élevées. Ceci concorde avec l'analyse faite sur les vitesses d'entrée de la résine. En effet, plus le cadre est fin, plus il est difficile de faire progresser la résine et le fluide de compaction dans les cavités du moule, ce qui impose une proportion de pertes de charge plus élevée dans le moule. On observe également que la pression augmente lorsque la viscosité du fluide de

compaction diminue. Ce phénomène s'explique par le rôle de la résine qui ralentit l'écoulement du fluide de compaction. Par ailleurs, la pression est pratiquement la même pour les fluides de 500 et 100 cSt. Ce phénomène s'explique par la position horizontale que prend la membrane pour une viscosité faible.

Lorsque l'épaisseur de cadre de la chambre de compaction augmente, on observe une diminution importante de la pression pour les fluides de plus basse viscosité. Ceci est également vrai pour les fluides de plus haute viscosité, mais cet effet est moins marqué. Il semble que, comme décrit plus haut, une augmentation de l'épaisseur du cadre de la chambre de compaction tend à incliner la membrane et donc facilite d'autant plus l'écoulement que le fluide est peu visqueux. Le Tableau 8.9 illustre l'augmentation de la variation de pression entre les épaisseurs de cadre de 0.08 po et 0.14 po avec la diminution de la viscosité du fluide de compaction. Les variations de pressions indiquées dans ce tableau correspondent à la pente de la partie droite des courbes de la Figure 8.9.

Tableau 8.9 Variation de la pression avec la viscosité entre les cadres 0.08 et 0.14 po

Viscosité (cSt)	100	500	1000	2500
Variation pression (bar/po)	17,16	8	4,66	0,5

Dans ce tableau, nous remarquons que moins le fluide est visqueux, plus grande est la chute de la pression entre 0.08 po et 0.14 po. L'hypothèse d'un changement de position de la membrane entre les deux liquides semble donc confirmée.

8.3.4.4 Positionnement de la membrane et imprégnation

Un positionnement plus horizontal de la membrane devrait améliorer la répartition de la résine dans le renfort lors de l'injection du fluide de compaction. En effet, cette position de la membrane oriente le gradient de pression davantage en direction du renfort.

Les pièces produites ont montré que, dans le cas des cadres de 0.05 et 0.08 po, et pour des fluides d'une viscosité de 100 à 1000 cSt, ce comportement est vérifié. Dans ces cas,

la diminution de la viscosité améliore l'imprégnation. Cependant, pour ces mêmes cadres, le passage à une viscosité encore plus élevée améliore également l'imprégnation du composite. D'autre part, dans le cas de la fabrication de pièces avec le cadre de la chambre de compaction de 0.14 po, la diminution de la viscosité dégrade l'imprégnation du composite.

Ces deux derniers points semblent aller à l'encontre de l'hypothèse sur l'influence de la position de la membrane. Pour mieux comprendre ces phénomènes, il faut prendre en compte l'impact sur l'imprégnation du renfort de l'augmentation de la vitesse d'injection avec la diminution de la viscosité du fluide de compaction.

8.3.5 Taux d'air

La section 5.3.5 du chapitre 5 a montré que la présence de l'air dans la chambre de compaction a une grande influence sur la qualité des pièces obtenues. En effet, dans le cas d'une injection flexible où la chambre d'injection n'est pas sous une pression de vide totale, l'air présent dans le moule lors de l'injection du fluide de compaction n'est pas entièrement expulsé, car le renfort et l'évent de sortie agissent comme une restriction. Pour faire sortir l'air à un certain débit, il faut mettre en place un gradient de pression entre le moule et la conduite amenant au pot de vide. Notons que plus le débit est important, plus la différence de pression entre le moule et la conduite doit être élevée.

La vitesse d'écoulement du fluide de compaction et donc de la résine, ont une influence sur la quantité d'air expulsée. La diminution de la viscosité du fluide de compaction augmente sa vitesse d'écoulement, donc entraîne une augmentation de la pression de l'air et par suite de la concentration d'air dans le renfort. D'autre part, l'accroissement de la vitesse d'injection produit une obstruction rapide de l'évent. Finalement, une plus grande quantité d'air est emprisonnée plus rapidement.

Dans le cas d'un cadre épais (0.14 po) où la quantité d'air initiale est importante, ce phénomène explique la dégradation de l'imprégnation avec la diminution de la viscosité

du fluide de compaction. Le même phénomène s'observe également pour des viscosités du fluide de compaction élevées.

8.4 Conclusion

Ce plan d'expérience a apporté une meilleure compréhension sur le comportement du procédé d'injection flexible en fonction de la viscosité du fluide de compaction et de l'épaisseur de la chambre de compaction. Il a permis à la fois de vérifier l'hypothèse sur la forme prise par la membrane, de comprendre les conséquences d'un tel comportement de la membrane sur la qualité de l'imprégnation et finalement, de montrer les conséquences de l'application d'un vide partiel dans la chambre d'injection.

Pour comprendre l'influence de la diminution de la viscosité du fluide de compaction sur le comportement du procédé d'injection flexible, on a volontairement choisi d'utiliser une pression de vide partiel dans la chambre d'injection. Ainsi, il a été possible d'analyser l'impact de la viscosité du fluide de compaction combiné avec l'épaisseur de la chambre de compaction sur la qualité de l'imprégnation des renforts, c'est-à-dire sur la présence et la répartition de zones sèches dans le composite. Deux phénomènes ont pu être mis en cause : tout d'abord, la quantité d'air présent dans le moule avant l'injection et la position de la membrane qui est fonction de la viscosité du fluide de compaction.

Le chapitre 7 a montré que la pression de vide dans la chambre d'injection a un grand impact sur la qualité des composites. Le chapitre 8 a montré qu'une diminution de la viscosité du fluide de compaction cause une accélération de l'écoulement de la résine se qui à pour effet diminuer la quantité d'air expulsé. Aussi, l'impact de ce phénomène sur la qualité des pièces augmente avec la quantité d'air présent dans le moule avant l'injection du fluide de compaction et donc avec l'épaisseur de la chambre de compaction.

Ce chapitre a tenté de mettre en lumière le comportement de la membrane lors d'une injection flexible. La membrane déformable peut prendre diverses positions. En comparant les pressions théoriques et expérimentales, on a pu établir que la diminution

de la viscosité du fluide de compaction amène la membrane à avoir un positionnement plus horizontal. Lors de l'injection du fluide de compaction, ce phénomène implique une meilleure répartition de la résine et donc une amélioration de l'imprégnation des renforts.

La diminution de la viscosité du fluide de compaction produit, d'une part l'augmentation de la quantité d'air emprisonné et d'autre part améliore la répartition de la résine dans le renfort. Ces deux phénomènes sont en concurrence et ne peuvent pas être quantifiés facilement. Toutefois, la présence d'air résiduel dans la chambre d'injection reste bien sûr la principale raison de la formation de zones sèches.

CONCLUSION

Dans ce mémoire, l'étude expérimentale du nouveau procédé d'injection flexible permet de bien comprendre son comportement lors de la fabrication de composite à renfort fibreux tissés et à matrice thermodurcissable. Ce procédé utilise une membrane flexible séparant la cavité du moule en deux chambres. Le renfort fibreux est déposé dans la chambre inférieure où la résine est injectée à faible pression. Une fois la résine introduite, un fluide de compaction est injecté dans la chambre supérieure, ceci pour poursuivre l'imprégnation du renfort.

L'objectif du nouveau procédé d'injection flexible est de diminuer le cycle de fabrication des composites. Le présent mémoire cherche à vérifier cet objectif dans le cas de l'utilisation de renforts tissés. L'étude réalisée s'attarde également sur la qualité des composites produits avec le procédé d'injection flexible. L'ensemble des paramètres gouvernant le procédé sont analysés pour déterminer les conditions optimales d'injection et définir plus précisément son domaine d'utilisation.

Pour analyser l'impact des différents paramètres du procédé d'injection flexible sur le temps d'injection et la qualité des pièces produites, cinq plans d'expérience ont été réalisés. Le premier plan d'expérience analysé au chapitre 4 présente la première utilisation du procédé d'injection flexible sur des renforts tissés. Le plan d'expérience #2 du chapitre 5 présente l'analyse de l'épaisseur de la chambre supérieure où est injecté le fluide de compaction. Cette cavité est appelée chambre de compaction. Le plan d'expérience #3 du chapitre 6 est complémentaire au chapitre 5 car il permet de définir le rôle de la position du front de résine après la phase d'injection. Dans le plan d'expérience #6 la quantité de résine est diminuée pour réduire l'avance de la résine lors de son injection mais également pour déterminer l'impact de l'augmentation du taux de fibres sur la qualité de l'imprégnation. Le chapitre 7 dans lequel est analysé le plan d'expérience #4, traite de l'influence de la pression de vide de la chambre inférieure (chambre d'injection). Enfin, le plan d'expérience #5 analysé au chapitre 8, traite de l'influence de la viscosité du fluide de compaction sur la qualité du composite.

Chacun des plans d'expérience ont apportés leurs lots de résultats, mais pour synthétiser les résultats il est préférable de les regrouper par thème. Seuls les principaux résultats sont repris dans ce résumé.

Mode d'imprégnation

Grâce aux enregistrements vidéo, l'ensemble des plans d'expérience a montré un mode d'imprégnation particulier dans le cas de l'utilisation de renforts tissés. Les premières études sur le procédé d'injection flexible, effectuées sur des renforts de mats à fibres aléatoires, ont montrés un comportement radicalement différent que dans le cas de renforts tissés. Cette modification du mode d'imprégnation est due à la perméabilité du renfort utilisé.

Dans le cas de l'utilisation de mats à fibres aléatoires, la résine injectée imprègne le renfort dans la longueur, c'est seulement lors de l'injection du fluide de compaction que la résine rejoint l'évent. En ce qui concerne l'utilisation de renforts tissés, leur faible compressibilité impose la formation d'un interstice entre le renfort et la membrane. Lors de son injection, la résine transite plus facilement par cette espace que par le renfort, l'imprégnation ne se fait donc pas directement dans le renfort. La résine n'imprègne que légèrement le début du renfort et le pli supérieur. Il se crée un amas de résine au dessus du renfort qui est repoussé au fond du moule lors de l'injection du fluide de compaction. Une fois que la résine atteint l'extrémité du moule elle imprègne transversalement le renfort et obstrue l'évent de sortie très rapidement. La résine alors en grande partie située à l'extrémité du moule ne peut, sous la pression imposée par le fluide de compaction, imprégner le renfort que par son extrémité et finalement se déplacer par écoulement de Darcy à travers le renfort.

Le plan d'expérience #1 du chapitre 4 a montré que ce mode d'imprégnation et d'écoulement produit une zone sèche en début de pièce. Ce même chapitre a mis en lumière que ce phénomène est progressif et fonction de l'épaisseur du composite. En

effet, pour de faible épaisseur de pièce la résine imprègne bien le renfort dès la phase d'injection.

Temps d'injection

Dans ce mémoire le temps d'injection correspond à la somme des temps d'entrée de résine et de fin de remplissage, c'est-à-dire le temps nécessaire au fluide de compaction pour amener la résine jusqu'à l'évent de sortie. Cette définition du temps d'injection ne prend pas en compte le temps mort correspondant à la fermeture du port d'entrée de résine et l'ouverture de la conduite du fluide de compaction. Par ailleurs, un temps d'imprégnation doit donc être ajouté au temps d'injection. Ce temps correspond au temps nécessaire à la résine pour transiter à travers le renfort après la fermeture de l'évent de sortie.

La diminution du temps d'injection par rapport au procédé RTM est l'objectif premier du procédé d'injection flexible. Les plans d'expériences #1 et #2 ont montré que dans le cas de l'utilisation de renforts tissés il est possible d'obtenir des temps d'injection jusqu'à 35 fois plus rapidement avec le nouveau procédé.

Ces deux plans d'expériences nous ont montrés que la perméabilité du renfort tissé n'influe que très peu le temps d'une injection flexible. Dans les mêmes conditions d'injection, l'utilisation du tissu SAERUni d'une perméabilité 5 fois supérieure à celle du renfort Roviply ne modifie pas le temps d'injection. Ceci revient à dire que l'utilisation du procédé d'injection flexible est moins adaptée à l'utilisation de renforts tissés de faible perméabilité. Toutefois, dans le cas du plan d'expérience #2 où le tissu Roviply est utilisé, les temps d'injections réalisés avec le procédé d'injection flexible sont jusqu'à 14 fois plus rapides qu'avec le procédé RTM.

Ces très bons résultats ont été dans les premiers temps accompagnés d'une mauvaise imprégnation des composites. En effet, comme nous l'avons décrit précédemment dans

certaine condition d'injection le mode d'imprégnation produit la formation d'une zone sèche.

Position du front de résine

Les plans d'expérience #2 et #3 ont permis de montrer le rôle de la position du front de résine avant l'injection du fluide de compaction. Ces deux plans d'expériences ont mis en lumière l'intérêt de faire en sorte qu'après la phase d'injection, le front de résine se retrouve le plus proche possible de l'évent de sortie. Dans ce cas, la résine se trouve d'ores et déjà à l'extrémité du moule et sous l'action du fluide de compaction ne peut donc qu'imprégner transversalement le renfort. La zone sèche produite par le déplacement de la résine à l'extrémité du moule et de l'imprégnation du renfort par son extrémité est alors réduite à son minimum.

Épaisseur optimale de la chambre de compaction

Par l'analyse de plan d'expérience #2, le chapitre 5 a montré qu'une épaisseur limite de la chambre de compaction existe. En effet, si l'épaisseur du cadre de la chambre de compaction descend en dessous d'une certaine valeur, il devient presque aussi difficile pour la résine de passer par l'interstice, alors réduite, qu'au travers du renfort. Ce phénomène a pour effet d'améliorer la qualité de l'imprégnation du composite, mais également de réduire le temps d'injection. L'objectif du procédé d'injection flexible étant une réduction du cycle de production, la question de l'épaisseur de la chambre d'injection est importante.

Pression de vide la chambre d'injection

La question de la pression de vide de la chambre d'injection est traitée au chapitre 7 à travers le plan d'expérience #4. Cependant, l'ensemble des plans d'expérience de ce mémoire sont concernés par la conséquence d'une tel pression, c'est-à-dire par la quantité d'air présent dans le moule lors de l'injection du fluide de compaction.

L'augmentation de la pression de vide de la chambre d'injection a conduit à une nette amélioration de l'imprégnation des composites et cela qu'elle que soient les paramètres d'injections. L'apparition de zones sèches s'explique par le fait que le mode d'injection a pour effet d'emprisonner une certaine quantité de l'air présent dans le moule avant l'injection du fluide de compaction. Aussi, s'il n'y a pas d'air dans le moule, il ne peut pas y avoir de zone sèche. L'augmentation de la pression de vide de la chambre d'injection résout le problème de zone sèche mais ne modifie pas le mode d'écoulement. En effet, si l'épaisseur de la chambre de compaction est trop importante la résine imprégnera le renfort par son extrémité, ce qui favorise la formation d'une accumulation de résine en fin de pièce. Les enregistrements vidéo montrent bien ce phénomène, la zone sèche apparaît puis disparaît car l'écoulement de la résine à travers le renfort lui permet de prendre la place du vide formant la zone sèche.

Pour améliorer l'injection flexible, même si l'augmentation de la pression de vide a un impact très important, il est nécessaire de déterminer l'épaisseur de la chambre de compaction optimale.

Viscosité du fluide de compaction

Le dernier plan d'expérience traité au chapitre 8 démontre le rôle de la viscosité du fluide de compaction sur la position de la membrane lors de l'injection et donc de la répartition de la résine dans le renfort lors de l'injection du fluide de compaction. Dans certain cas, lorsque la viscosité du fluide de compaction diminue l'imprégnation est améliorée. Cependant, ce phénomène est en concurrence avec la rapidité d'injection. Plus le fluide est visqueux et plus l'injection est lente, ce qui laisse le temps à l'air présent dans le moule d'être expulsé lors de l'injection du fluide de compaction et ainsi d'améliorer la qualité de l'imprégnation.

Au travers des cinq plans d'expérience réalisés pour ce mémoire plusieurs conclusions ont pu être tirées sur le comportement du procédé d'injection flexible pour la fabrication à température ambiante de composites à renforts tissés. Toutefois certaines questions

reste en suspens. L'influence de la viscosité de la résine et l'influence de la taille des pièces à produire sont des exemples. Les conclusions de cette étude montrent qu'il est important de trouver un moyen de repousser le front de résine à l'extrémité du moule avant l'injection du fluide de compaction, tous en diminuant la quantité de résine injectée. Dans cette optique il serait intéressant d'étudier plus en détail la forme de la chambre de compaction. L'étude présentée à l'annexe E donne des pistes quant à l'utilisation d'une chambre de compaction à section variable. Cependant, ce travail, présenté dans un rapport de stage, a d'autres objectifs que celui de repousser le front de résine et doit donc être complété. Le développement de ce nouveau procédé d'injection flexible n'est donc pas fini et beaucoup de travail reste à accomplir.

RECOMMANDATIONS ET TRAVAUX FUTURS

Recommandation

Pour permettre une répétabilité de l'injection flexible, seule la face supérieure du renfort ne devrait pouvoir être en contact avec la résine lors de son injection.

Travaux futurs

- Étudier la possibilité de purger une partie de la résine une fois l'injection terminée, c'est-à-dire ouvrir l'évent de sortie pour permettre l'évacuation d'une quantité de résine. Ceci dans le but d'éliminer les accumulations de résine et d'augmenter le taux de fibres.
- Étudier le rôle de la perméabilité équivalente en fonction du type de renfort.
- Réaliser un moule d'injection flexible plat de plus grande dimension. Un tel moule permettrait nous en apprendre plus sur la capacité du procédé. En effet, de plus grande dimension peuvent être plus adaptée au procédé car il ne semble pas t'en dépendre de la perméabilité du renfort que de l'interstice situé entre le renfort et la membrane.
- Utiliser une membrane plus rigide, ce qui rendrait plus difficile sa déformation et donc orienter l'action du fluide de compaction.
- Travailler sur la forme de la chambre de compaction pour permettre d'amener le front de résine le plus proche de l'évent sans diminuer le temps d'injection ou augmenter la quantité de résine. Une diminution de l'épaisseur de la chambre de compaction à l'extrémité du moule est une piste.
- Poursuivre l'automatisation du procédé d'injection flexible.

RÉFÉRENCES

- [1] GUTOWSKI, T.G.P., Advanced composites manufacturing John Wiley & Sons ed. 1997: Wiley-Interscience. 581.
- [2] MALLICK, Fiber-reinforced composites. Marcel Dekker Inc., 1993, 2e edition.
- [3] DIGITIP, L'industrie française des matériaux composites - des enjeux prioritaires pour un développement durable. Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, 2002: p. 129.
- [4] BOUKHILI, R., Design, production et applications des matériaux composites. École Polytechnique de Montréal, Septembre 2006.
- [5] VODICKA, P., An evaluation of styrene genotoxicity using several biomarkers in a 3-yr follow-up study of hand-lamination workers. Mutation research 445, 1999: p. 205-224.
- [6] BREARD, J., et al. Numerical modeling of liquid composite molding processes for large-size composite parts. 2005. Long Beach, CA, United States: Soc. for the Advancement of Material and Process Engineering, Covina, CA 91724-3748, United States.
- [7] WALSH, S.M., Improvements in vacuum assisted resin infusion. Materials Technology, 2001, p. 179-181.
- [8] WALSH, S.M., et al. Minimizing cycle time and part mark-off in the FASTRAC process. 2001. Seattle, WA: Soc. for the Advancement of Material and Process Engineering.
- [9] TROCHU, F., Fabrication des composites par Injection, note de cours MEC6318. École Polytechnique de Montréal, septembre 2005.

- [10] LABONVILLE, R., Conception des circuits hydrauliques, une approche énergétique. Presses internationales Polytechnique, Montréal, 1999.
- [11] SHAUGHNESSY E.J., K.I.M.E.S.J.P., Introduction to fluid mechanics. Oxford University press, 2005.
- [12] WHITE, F.M., Fluid Mechanics, 4e edition. The McGraw-Hill companies, 1999, Boston.
- [13] POISEUILLE, J.L.M., Experimental investigations upon flow of liquids in tubes of very small diameter. Rheological Memoirs, 1940, p. 101.
- [14] DARCY, H., Les fontaines publiques de la ville de Dijon. 1856: Dalmont.
- [15] BREARD, J., Matériaux composites à matrice polymère : Modélisation numérique de la phase de remplissage du procédé RTM et détermination expérimentale de la perméabilité d'un renfort fibreux. PhD. thesis, Université du Havre, 1997.
- [16] FERLAND, P., D. GUITTARD, and F. TROCHU, Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer molding. Polymer Composites, 1996, p. 149-158.
- [17] HAMMAMI, A., Étude expérimentale et modélisation des perturbations de l'écoulement pour le procédé de moulage par transfert de résine. PhD. thesis, École Polytechnique de Montréal, 1996.
- [18] HOES, K., et al., New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM. Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002. 33(7): p. 959-969.
- [19] HAMMAMI, A., R. GAUVIN, and F. TROCHU, Modeling the edge effect in liquid composites molding. Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing, 1998. 29(5-6): p. 603-609.

- [20] FONG, L. and L.J. LEE, Preforming analysis of thermoformable fiber mats - preforming effects on mold filling. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1994, p. 637-663.
- [21] FONG, L., J. XU, and J.L. LEE, Preforming analysis of thermoformable glass fiber mats-deformation modes and reinforcement characterization. *Polymer Composites*, 1994, p. 134-146.
- [22] ADAMS, K.L., W.B. RUSSEL, and L. REBENFELD, Radial penetration of a viscous liquid into a planar anisotropic porous medium. *International Journal of Multiphase Flow*, 1988, p. 203-15.
- [23] ROBITAILLE, F. and R. GAUVIN, Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. I: Review of experimental results. *Polymer Composites*, 1998, p. 198-216.
- [24] ROBITAILLE, F. and R. GAUVIN, Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. III: Reorganization of the fiber network. *Polymer Composites*, 1999, p. 48-61.
- [25] ROBITAILLE, F. and R. GAUVIN, Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. II: Compaction and relaxation of dry and H₂O-saturated woven reinforcements. *Polymer Composites*, 1998, p. 543-557.
- [26] TERZAGHI, Theoretical soil mechanics. *Theoretical Soil Mechanics*. 1943. 510.
- [27] ALLARD, E., Analyse expérimentale et optimisation d'un procédé d'injection flexible pour la fabrication rapide des composites. École Polytechnique de Montréal, Novembre 2006.
- [28] BRIONES, L.R., Injection flexible dans un moule isotherme : conception et analyse d'un nouveau procédé de fabrication de composites, mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal, mars 2005.

- [29] CARREAU, D. KEE, and CHHABRA, Rheology of Polymeric Systems: principles and applications. Hanser, 1997.
- [30] LEBEL, F., Développement et automatisation du système à pistons « double-action ». Rapport interne au CCHP, Juillet 2006.
- [31] LUPIEN, A., Géométrie de la chambre de compaction variable sur Polyflex 1. École Polytechnique de Montréal, Septembre 2006.

Annexe A : Calcul des pertes de charges et pression dynamique dans la conduite

Un ensemble de 12 essais a été réalisé avec Allard pour déterminer l'influence d'un connecteur rapide sur les pertes de charges dans une conduite. Ces essais ont également permis de mettre en évidence la négligeabilité de la pression dynamique dans la configuration des injections flexibles réalisées dans ce mémoire, c'est-à-dire dans le cas de l'utilisation d'une huile silicone visqueuse.

Le pot de pression et la conduite utilisée dans l'ensemble des injections flexibles réalisées pour ce mémoire, ont été reprises pour déterminer la vitesse d'écoulement de différents fluides et ainsi retrouver la valeur de la pression dynamique associée. À cette fin, la conduite est ouverte pendant un certain temps, l'huile est alors récupérée puis pesée. La densité du type d'huile utilisé étant de 970 kg/m³, il est possible de retrouver la vitesse d'écoulement.

Le T présente 4 de ces essais dont la pression au pot est voisine de 6 bars et utilisant un connecteur. Il donne les vitesses et les pressions dynamiques et totales. Le nombre de Reynolds déterminé par l'équation suivante est également indiqué :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d_c}{\mu} \quad (A.1)$$

où ρ est la masse volumique du fluide, V sa vitesse, μ sa viscosité et d_c le diamètre de la conduite.

Numéro de l'essai	1	2	3	4
Pression au pot (bar)	5.95	5.9	6.03	6.01
Viscosité du fluide (Pa.s)	3.52	3.52	0.315	0.315
Masse injectée (kg)	0.318	0.263	0.348	0.554
Temps d'injection (s)	13.9	12.3	1.8	2.8
Débit (mL/s)	23.6	22.0	199.4	203.9
Vitesse d'écoulement	0.24	0.22	2.02	2.07
Pression dynamique (bar)	0.0003	0.0002	0.019	0.0208
Proportion de pression dynamique (%)	0.0050	0.0034	0.3151	0.3461
Nombre de Reynolds	0.74	0.68	69.67	71.39

Annexe B : Détermination de l'épaisseur curviligne des composites à l'aide d'une MMT

Pour déterminer l'épaisseur curviligne du composite sur une ligne, il faut effectuer deux balayages, un de chaque côté de la pièce. Pour chaque balayage réalisé à l'aide de la machine de mesure tridimensionnelle, les données recueillies se retrouvent dans des fichiers TEXT différents. Le nombre de mesure changeant à chaque balayage, il est nécessaire de redimensionner les fichiers pour que les balayages de chaque côté de la pièce aient le même nombre de point de mesure. À cette fin, les deux fichiers de mesures de point, nommées « front » et « arr » dans le code MATHLAB, sont comparés et modifiés. Chaque fichier comporte trois colonnes correspondant aux trois dimensions de l'espace. Cependant les balayages étant réalisés suivant une ligne, il n'y a donc que deux colonnes importantes : la longueur et la hauteur. Dans un premier temps un ensemble de points de mesure sont effacés pour que leurs valeurs correspondants aux positions extrêmes dans la longueur de chaque balayage soit voisines. Ensuite, le fichier du balayage comportant le moins de point de mesure est pris comme référence. Pour chacun des points de mesure du fichier référence, le code permet de rechercher le point de mesure sur la face opposée, dont la position en longueur est la plus proche. Toutefois, le point n'est pris en compte que si l'écart entre les deux longueurs est inférieur à une certaine valeur définie par l'utilisateur. La fonction principale permet d'enregistrer les points de mesures sélectionnés ainsi que l'épaisseur curviligne dans un fichier MATHLAB data file. Le fichier est alors traité pour obtenir un graphique en trois dimensions ainsi que la droite des moindres carrées et son coefficient directeur.

function [forme,f] = fonction(front,arr)

```
q=size(front);
r=size(arr);
q=q(1);
r=r(1);
```

```

arr=arr(:,1:2);
front=front(:,1:2);

% Ranger par ordre croissant les matrices par rapport à la première colonne
[front,arr]=croissant(front,arr,q,r);

if front(1,1)<arr(1,1)
    j=1;
    while front(j,1)<arr(1,1)
        j=j+1;
    end
    front=front(j:end,:);

else
    j=1;
    while arr(j,1)<front(1,1)
        j=j+1;
    end
    arr=arr(j:end,:);
end

q=size(front);
r=size(arr);
q=q(1);
r=r(1);

if front(q,1)<arr(r,1)
    j=r;
    while front(q,1)<arr(j,1);
        j=j-1;
    end
    arr=arr(1:j,:);
else
    j=q;
    while arr(r,1)<front(j,1)
        j=j-1;
    end
    front=front(1:j,:);
end

q=size(front);
r=size(arr);
q=q(1);

```

```

r=r(1);
e=1;

% Entré du critère de difference
prompt2;
dlg_title2 = 'Rentrer le critère';
num_lines2 = 1;
def2 = {'0.01'};
reponse2 = inputdlg(prompt2,dlg_title2,num_lines2,def2);
difference=str2num(char(reponse2(1)));

if q<r
    for i=1:q
        for k=1:r
            d=abs(front(i,1)-arr(k,1));
            if d<difference
                forme(e,1)=(front(i,1)+arr(k,1))/2;
                forme(e,2)=front(i,2);
                forme(e,3)=arr(k,2);
                forme(e,4)=abs(forme(e,2)-forme(e,3));
                forme(e,5)=d;
                e=e+1;
            end
        end
    end
end

if q>r
    for i=1:r
        for k=1:q
            d=abs(front(i,1)-arr(k,1));
            if d<difference
                forme(e,1)=(front(i,1)+arr(k,1))/2;
                forme(e,2)=front(i,2);
                forme(e,3)=arr(k,2);
                forme(e,4)=abs(forme(e,2)-forme(e,3));
                forme(e,5)=d;
                e=e+1;
            end
        end
    end
end

% Enregistrement du fichier

```

```

prompt3 = nio;
dlg_title3 = 'Rentrer les noms de fichier';
num_lines3 = 1;
def3 = {'Epaisseur_', 'figure_'};
reponse3 = inputdlg(prompt3,dlg_title3,num_lines3,def3);
dlnmwrite(char(reponse3(1)),forme,'delimiter', '\t')

```

```

% Figures : face supérieur / face inférieur / epaisseur
figure;
subplot(3,1,1);
plot(front(:,1),front(:,2))
subplot(3,1,2);
plot(arr(:,1),arr(:,2))
subplot(3,1,3);
plot(forme(:,1),forme(:,4))
hgsave(char(reponse3(2)))
end

```

function [piece,table_fitting]=moindre carre(data)

```

temppiece(:,1)=data(:,1);
temppiece(:,2)=data(:,4);
s=size(temppiece);

if s(1)<1000
    n=1;
    while temppiece(n,1)<30
        n=n+1;
    end
    min=n;

    m=s(1);
    while temppiece(m,1)> 95
        m=m-1;
    end
    max=m;

    piece(:,1)=temppiece(min:max,1);
    piece(:,2)=temppiece(min:max,2);
else
    piece(:,1)=temppiece(:,1);
    piece(:,2)=temppiece(:,2);

```

```

end

%coefficient de fitting
p=polyfit(piece(:,1),piece(:,2),1);
Apiece=p(1);
Bpiece=p(2);
str_Apiece=num2str(Apiece);
str_Bpiece=num2str(Bpiece);

%fonction de fitting
x=piece(:,1);
Fit=piece;
Fit(1:end,2)=(Apiece*x(1:end)+Bpiece);
Fit(1:end,1)=x(1:end);
q=size(Fit);

plot(piece(:,1),piece(:,2),'-',Fit(:,1),Fit(:,2),'o')

%coefficient de fiabilité
Rpiece=1-((sum(((piece(:,2)-Fit(:,2)).^2)./(piece(:,2)).^2))/q(1))^(1/2);
str_Rpiece=num2str(Rpiece);

%donnee de la courbe de fitting
table_fitting(1)=Apiece;
table_fitting(2)=Bpiece;
table_fitting(3)=Rpiece;

prompt3 = {'nom de la piece ':'nom de la courbe fitting ':'parametres fitting ':'};
dlg_title3 = 'Rentrer les noms de fichier';
num_lines3 = 1;
def3 = {'Piece ','Fitting ','Parametre_Fit_'};
reponse3 = inputdlg(prompt3,dlg_title3,num_lines3,def3);

dlmwrite(char(reponse3(1)),piece,'delimiter','\t')
dlmwrite(char(reponse3(2)),Fit,'delimiter','\t')
dlmwrite(char(reponse3(3)),table_fitting,'delimiter','\t')

end

function [piece15]=graph(piece15,piece61,piece107)

%réarranger piece15
S15=size(piece15);
piece15(:,1)=6-piece15(:,1);

```

```

piece15(:,3)=15;

%réarranger piece61
S61=size(piece61);
piece61(:,1)=354+piece61(:,1);
piece61(:,3)=61;

%réarranger piece107
S107=size(piece107);
piece107(:,1)=354+piece107(:,1);
piece107(:,3)=107;

%entré le nom de la piece
prompt2 = {'nom de la piece : '};
dlg_title2 = 'Rentrer le nom de la piece';
num_lines2 = 1;
def2 = {'';};
reponse2 = inputdlg(prompt2,dlg_title2,num_lines2,def2);
nom=str2num(char(reponse2(1)));

% Create figure
figure1 = figure('Color',[1 1 1]);

% Create axes
axes('Parent',figure1,'ZGrid','on','YGrid','on',...
    'Color',[0.8706 0.9216 0.9804],'fontsize',20);
view([-23.5 22]);
hold('all');

% Create plot3
plot3(piece15(:,1),piece15(:,3),piece15(:,2),'LineWidth',3);
% Create plot3
plot3(piece61(:,1),piece61(:,3),piece61(:,2),'LineWidth',3);
% Create plot3
plot3(piece107(:,1),piece107(:,3),piece107(:,2),'LineWidth',3);

% Create xlabel
xlabel('Longueur (mm)','fontsize',20);
% Create ylabel
ylabel('Largeur (mm)','fontsize',20);
% Create zlabel
zlabel('Épaisseur (mm)','fontsize',20);

end

```

Annexe C : Mesure de l'épaisseur des composites à l'aide d'un micromètre analogique

		Mesures d'épaisseur de la pièce E07PH05 (mm)																	
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	
Distance de l'entrée (mm) Position de la ligne de mesure (mm)	22	2.774	2.838	2.824	2.81	2.791	2.805	2.784	2.844	2.813	2.838	2.859	2.806	2.815	2.756	2.826	2.75	2.658	
	42	2.751	2.71	2.763	2.792	2.774	2.783	2.823	2.786	2.843	2.828	2.826	2.839	2.785	2.799	2.801	2.611	2.622	
	62	2.763	2.856	2.781	2.78	2.795	2.8	2.789	2.803	2.824	2.869	2.788	2.784	2.807	2.734	2.721	2.657	2.632	
	82	2.757	2.731	2.777	2.791	2.778	2.786	2.792	2.779	2.824	2.819	2.826	2.822	2.781	2.746	2.722	2.705	2.687	
	102	2.976	2.772	2.774	2.787	2.775	2.755	2.806	2.804	2.778	2.787	2.749	2.781	2.78	2.768	2.762	2.735	2.641	

Distance de l'entrée (mm) Position de la ligne de mesure (mm)		Mesures d'épaisseur de la pièce E07PH06 (mm)																	
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	
22		2.51	2.505	2.505	2.507	2.489	2.481	2.507	2.505	2.559	2.562	2.495	2.538	2.544	2.685	2.727	5.719	6.109	
42		2.402	2.551	2.499	2.491	2.522	2.544	2.472	2.486	2.489	2.551	2.541	2.54	2.556	2.649	2.767	2.804	2.789	
62		2.446	2.511	2.506	2.471	2.496	2.484	2.522	2.52	2.521	2.536	2.583	2.573	2.588	2.627	2.72	2.847	2.826	
82		2.473	2.546	2.589	2.552	2.519	2.529	2.532	2.519	2.534	2.506	2.549	2.583	2.682	2.735	2.843	2.894	2.906	
102		2.545	2.613	2.599	2.561	2.521	2.569	2.505	2.512	2.507	2.513	2.536	2.597	2.659	2.736	3.549	6.281	6.708	

Distance de l'entrée (mm) Position de la ligne de mesure (mm)		Mesures d'épaisseur de la pièce E07PH07 (mm)																	
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	
22		2.52	2.44	2.389	2.441	2.452	2.462	2.461	2.489	2.456	2.457	2.526	2.504	2.55	2.707	3.361	3.048	3.093	
42		2.671	2.536	2.446	2.498	2.486	2.487	2.436	2.436	2.545	2.57	2.437	2.563	2.601	2.698	2.824	5.223	3.219	
62		2.597	2.593	2.56	2.478	2.479	2.519	2.486	2.483	2.509	2.532	2.521	2.537	2.617	2.749	2.921	3.282	4.714	
82		2.664	2.539	2.489	2.443	2.493	2.504	2.538	2.487	2.49	2.609	2.502	2.581	2.619	3.438	2.875	2.928	2.946	
102		2.684	2.617	2.571	2.498	2.49	2.528	2.506	2.469	2.496	2.499	2.533	2.529	2.666	2.864	4.346	4.374	5.087	

Distance de l'entrée (mm) Position de la ligne de mesure (mm)		Mesures d'épaisseur de la pièce E07PH08 (mm)																	
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	
	22	2.651	2.661	2.611	2.605	2.588	2.558	2.556	2.543	2.535	2.577	2.519	2.565	2.536	2.65	2.667	2.908	3.604	
	42	2.684	2.626	2.601	2.6	2.594	2.561	2.538	2.552	2.562	2.575	2.599	2.575	2.59	2.627	2.73	2.804	2.977	
	62	2.727	2.667	2.57	2.58	2.584	2.568	2.565	2.544	2.59	2.583	2.605	2.594	2.607	2.763	2.829	2.985		
	82	2.634	2.639	2.594	2.572	2.582	2.561	2.613	2.557	2.577	2.598	2.571	2.562	2.654	2.667	2.723	2.978	3.94	
	102	2.675	2.69	2.661	2.687	2.585	2.58	2.58	2.571	2.627	2.559	2.608	2.606	2.631	2.663	2.687	2.9	3.636	

		Mesures d'épaisseur de la pièce E07PH25 (mm)																
Distance de l'entrée (mm)		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340
Position de la ligne de mesure (mm)																		
22		2.501	2.482	2.455	2.562	2.574	2.589	2.516	2.516	2.563	2.556	2.478	2.428	2.474	2.498	2.483	2.523	2.652
42		2.539	2.533	2.565	2.526	2.566	2.483	2.562	2.563	2.509	2.501	2.471	2.403	2.478	2.497	2.478	2.462	2.634
62		2.554	2.581	2.588	2.578	2.586	2.555	2.542	2.551	2.551	2.521	2.482	2.361	2.432	2.46	2.479	2.549	2.504
82		2.617	2.566	2.647	2.576	2.599	2.496	2.485	2.552	2.45	2.479	2.481	2.482	2.42	2.45	2.496	2.472	2.491
102		2.548	2.578	2.531	2.521	2.488	2.519	2.489	2.472	2.45	2.466	2.428	2.414	2.501	2.522	2.536	2.453	2.508

		Mesures d'épaisseur de la pièce E07PH26 (mm)																
Distance de l'entrée (mm)		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340
Position de la ligne de mesure (mm)																		
22		2.38	2.336	2.397	2.323	2.301	2.394	2.311	2.318	2.358	2.305	2.267	2.316	2.315	2.4	2.353	2.357	2.414
42		2.428	2.416	2.369	2.403	2.373	2.325	2.365	2.326	2.302	2.301	2.245	2.324	2.317	2.355	2.351	2.383	2.361
62		2.403	2.411	2.452	2.413	2.355	2.395	2.423	2.422	2.35	2.296	2.297	2.328	2.321	2.399	2.373	2.449	2.362
82		2.469	2.394	2.436	2.345	2.314	2.392	2.407	2.333	2.323	2.314	2.346	2.28	2.344	2.359	2.398	2.398	2.412
102		2.413	2.346	2.363	2.365	2.35	2.338	2.325	2.337	2.334	2.367	2.278	2.271	2.342	2.323	2.325	2.339	2.361

		Mesures d'épaisseur de la pièce E07PH31 (mm)																
Distance de l'entrée (mm)		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340
Position de la ligne de mesure (mm)																		
22		2.241	2.27	2.307	2.298	2.27	2.242	2.249	2.266	2.199	2.238	2.199	2.175	2.228	2.211	2.24	2.221	2.321
42		2.255	2.314	2.261	2.239	2.23	2.185	2.149	2.232	2.208	2.195	2.111	2.195	2.144	2.18	2.231	2.263	2.274
62		2.282	2.219	2.213	2.216	2.21	2.204	2.156	2.17	2.249	2.139	2.209	2.133	2.164	2.166	2.208	2.322	2.276
82		2.213	2.224	2.232	2.185	2.189	2.179	2.228	2.149	2.142	2.181	2.164	2.14	2.164	2.176	2.202	2.266	2.251
102		2.2	2.178	2.215	2.152	2.193	2.215	2.15	2.116	2.161	2.168	2.12	2.215	2.218	2.207	2.232	2.216	2.308

		Mesures d'épaisseur de la pièce 50/P115 (mm)																
Distance de l'entouree (mm)		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340
Position de la ligne de mesure (mm)																		
	22	2.546	2.511	2.506	2.471	2.487	2.465	2.412	2.428	2.456	2.5	2.502	2.584	2.648	2.665	2.691	5.809	3.276
	42	2.522	2.428	2.476	2.461	2.401	2.449	2.467	2.437	2.446	2.473	2.528	2.525	2.486	2.584	2.697	2.719	2.72
	62	2.568	2.475	2.43	2.462	2.423	2.368	2.421	2.422	2.479	2.488	2.514	2.51	2.519	2.613	2.694	2.738	2.699
	82	2.557	2.534	2.526	2.456	2.497	2.426	2.428	2.495	2.487	2.521	2.5	2.502	2.559	2.595	2.645	2.72	2.689
	102	2.664	2.555	2.566	2.493	2.48	2.464	2.502	2.488	2.481	2.485	2.52	2.556	2.619	2.611	3.05	5.632	3.365

		Mesures d'épaisseur de la pièce 50/P115 (mm)																
Distance de l'entree (mm)		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340
Position de la ligne de mesure (mm)																		
22		2.710	2.620	2.616	2.645	2.643	2.610	2.644	2.632	2.641	2.661	2.675	2.744	2.777	2.739	2.861	2.880	2.889
42		2.718	2.611	2.582	2.617	2.652	2.629	2.693	2.614	2.603	2.640	2.646	2.728	2.802	2.718	2.843	2.891	2.875
62		2.646	2.628	2.561	2.590	2.595	2.601	2.582	2.599	2.626	2.627	2.683	2.720	2.726	2.781	2.858	2.876	3.116
82		2.695	2.656	2.623	2.702	2.696	2.576	2.632	2.541	2.608	2.713	2.719	2.771	2.720	2.762	2.865	2.928	2.835
102		2.737	2.615	2.607	2.715	2.740	2.577	2.642	2.531	2.625	2.727	2.745	2.773	2.734	2.787	2.890	2.975	2.826

		Mesures d'épaisseur de la pièce 50/P115 (mm)																	
Distance de l'entouree (mm)		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	
Position de la ligne de mesure (mm)																			
22		2.853	2.937	2.878	2.905	2.844	2.752	2.755	2.777	2.788	2.843	2.685	2.681	2.689	2.681	2.734	2.731	2.904	
42		2.902	2.967	2.832	2.926	2.835	2.706	2.737	2.801	2.752	2.835	2.653	2.724	2.652	2.689	2.745	2.709	2.946	
62		2.862	2.899	2.881	2.859	2.833	2.81	2.775	2.806	2.839	2.828	2.711	2.74	2.675	2.686	2.716	2.75	2.822	
82		2.868	2.905	2.890	2.861	2.812	2.833	2.793	2.850	2.790	2.816	2.759	2.745	2.701	2.664	2.670	2.701	2.868	
102		2.840	2.936	2.864	2.848	2.809	2.820	2.745	2.820	2.745	2.832	2.769	2.731	2.743	2.632	2.677	2.699	2.830	

		Mesures d'épaisseur de la pièce 50/P115 (mm)																
Distance de l'entouree (mm)		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340
Position de la ligne de mesure (mm)																		
22		2.859	2.870	2.818	2.740	2.766	2.835	2.815	2.778	2.794	2.720	2.765	2.800	2.757	2.755	2.651	2.721	2.730
42		2.881	2.876	2.789	2.766	2.807	2.799	2.775	2.812	2.777	2.733	2.717	2.810	2.736	2.740	2.651	2.721	2.684
62		2.852	2.839	2.834	2.738	2.737	2.800	2.790	2.789	2.774	2.766	2.764	2.756	2.739	2.722	2.693	2.745	2.754
82		2.875	2.881	2.876	2.778	2.774	2.767	2.793	2.806	2.765	2.776	2.743	2.743	2.780	2.754	2.730	2.755	2.709
102		2.853	2.902	2.893	2.794	2.804	2.785	2.777	2.794	2.808	2.766	2.732	2.780	2.767	2.770	2.726	2.732	2.697

Annexe D : Code MATHLAB destiné à la visualisation 3D de l'épaisseur des composites

Les mesures de chaque pièce sont enregistrées dans un fichier MATHLAB data file qui est récupéré dans le code sous le symbole Z. Le code permet alors de représenter l'ensemble de point sous une forme tridimensionnelle.

```
% quadrillage
X=[1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23,25,27,29,31,33];
Y=[1,3,5,6,8,5,11];

% Importer Z
uiopen('load')

% style de couleur
figure('Color',[1 1 1]);
colormap('summer');

% taille des axes
axes1=axes('FontSize',16);

%figure
meshz(X,Y,Z),hold on
surf(X,Y,Z),hold off
% limite de l'axe Z
ZLIM([2 4]);
ZL=ZLIM;

% veiw
az=-20;
el=32;
view(az,el);

% Create xlabel
xlabel('Longueur (cm)','FontSize',18);
% Create ylabel
ylabel('Largeur (cm)','FontSize',18);
% Create zlabel
zlabel('épaisseur (mm)','FontSize',18);
```

Annexe E : Étude de la géométrie de la chambre de compaction

RAPPORT DE STAGE
RÉSEAU CCHP

Géométrie de la chambre de compaction variable sur PolyFlex 1

par

Alexandre Lupien
Département de génie mécanique

Présenté à

M. François Trochu
M. Eduardo Ruiz

Septembre 2006

SOMMAIRE

Des essais préliminaires à ce plan d'expérience ont été réalisés et ont montré que le comportement de la résine dans le procédé d'injection flexible dépendait du type de renfort utilisé. En effet, avec l'utilisation de renforts à fibres aléatoires (mats), la résine a tendance à bien imprégner les fibres dès son entrée à l'intérieur du moule. Inversement, avec des tissus, dont la perméabilité est beaucoup plus faible, la résine a tendance à s'écouler au-dessus des fibres. En ce sens, lorsque le fluide de compaction est injecté dans la double paroi, la résine est déplacée en grande partie vers l'extrémité du moule, laissant la première partie de la pièce moins bien imprégnée. Ces observations ont mené à l'élaboration d'un plan d'expérience visant à forcer l'imprégnation des fibres uniformément sur toute la pièce en modifiant la géométrie de la chambre de compaction. Trois types d'obstacle ont été testés à l'intérieur de la chambre de compaction, soit l'obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur toute la longueur du moule, l'obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur la première section du moule et l'obstacle rectangulaire placé dans la seconde moitié du moule. Pour chacune des géométries insérées à l'intérieur de la chambre de compaction, deux injections ont été réalisées. Le temps d'injection et les caractéristiques physiques des pièces ont été enregistrés afin de tirer des conclusions sur l'effet de ces différentes géométries sur l'imprégnation des fibres.

Les résultats ont démontré que la géométrie qui a obtenu les meilleurs résultats au niveau du temps d'injection et de l'imprégnation uniforme des fibres est l'obstacle de section verticale triangulaire avec une pente linéaire sur toute la longueur du moule. En effet, le temps d'injection avec cette géométrie est 15% plus court que lors des essais réalisés sans aucune géométrie à l'intérieur de la chambre de compaction. De plus, les pièces fabriquées avec cet obstacle à l'intérieur de la chambre de compaction ne présentent pratiquement aucunes zones sèches, ni aucune accumulation de résine importante.

INTRODUCTION

Plusieurs observations sur le comportement des fluides en interaction dans le procédé d'injection flexible (résine et fluide de compaction) ont montré qu'après la rencontre des fronts de résine et du fluide de compaction se produit un ralentissement de l'avancée du front de résine. Une des solutions envisagées pour accélérer le procédé est de repousser le moment de la rencontre des deux fronts. Par contre, lors d'expérimentations avec les tissus, ce phénomène ne s'est pas produit. Un comportement bien différent a été observé. En effet, comme la perméabilité des tissus est plus faible que celle des mats, la résine ne tend pas à imprégner le renfort dès son entrée, mais plutôt à s'écouler au-dessus. En ce sens, le fluide de compaction, à son entrée dans le moule, entraîne une quantité importante de résine dans le fond du moule en laissant une zone sèche à une extrémité de la pièce.

Ces observations sur les tissus ont amené à établir un plan d'expérience visant à modifier la géométrie de la chambre de compaction. En effet, en y insérant différents obstacles, il sera possible d'étudier leur influence sur l'imprégnation du renfort. Dans un premier temps, des expériences réalisées avec des tissus auront pour objectif de forcer l'imprégnation du renfort au début de la pièce en insérant différentes géométries dans la chambre de compaction. Ensuite, les caractéristiques physiques des pièces seront analysées pour vérifier si les modifications de géométrie de la chambre de compaction ont une influence sur l'imprégnation des échantillons.

Chapitre 1 UTILISATION DE RENFORTS TISSÉS

La décision d'utiliser des renforts tissés dans ce plan d'expérience a été motivée par ces différentes observations : Il est nécessaire d'utiliser un cadre épais à l'intérieur du moule afin de laisser assez d'espace à l'intérieur de la chambre de compaction pour l'utilisation des différentes géométries. De plus, en augmentant le taux de fibre pour éviter que l'injection ne soit trop rapide, 15 couches de mats par préforme auraient été nécessaires pour effectuer ce plan d'expérience. Suite à ces observations, il a été convenu d'utiliser les renforts tissés de la compagnie Chomarat.

1.1 Objectif détaillé du projet

Les expériences ont montré qu'avec l'utilisation des tissus, la résine avait tendance à s'accumuler au-dessus du renfort fibreux, et avec l'injection du fluide de compaction, à se déplacer complètement à l'extrémité du moule, laissant le début de la pièce mal imprégné. Les quatre schémas des Figures 1 à 4 suivant illustrent ce phénomène :

- La Figure 1 montre le moule de profil et décrit ses composantes.
- La Figure 2 montre la résine qui entre dans la cavité. On peut observer que la résine s'écoule au dessus des fibres et pénètre très lentement à travers le renfort.
- Dans la Figure 3, l'injection du fluide de compaction vient comprimer toute la résine à l'extrémité du moule. Encore une fois, la résine imprègne très peu les fibres. Les zones riches en résine profitent d'une meilleure imprégnation.
- Dans la Figure 4, le fluide de compaction sort du moule et la résine se répartit sur toute la surface de la pièce. Par contre, on observe un surplus de résine à la fin du moule car la celle-ci ne peut se déplacer vers l'amont. Cet effet est principalement causé par la poussée du fluide de compaction. On peut apercevoir la zone sèche causée par le mouvement rapide de la résine vers la fin du moule.

On constate qu'aux extrémités du moule, les fibres sont bien imprégnées, car la résine y est restée plus longtemps. Environ au tiers de la pièce, la résine s'est déplacée rapidement, principalement à cause de la poussée du fluide de compaction, ne laissant pas de temps nécessaire pour l'imprégnation des fibres. Noter que les dimensions sur les schémas sont exagérées en épaisseur pour mieux illustrer les phénomènes mis en jeu.

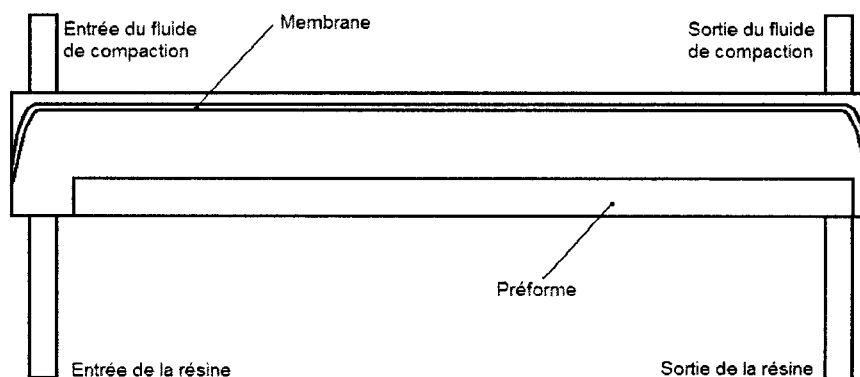


Figure 1 : État initial du moule d'injection flexible.

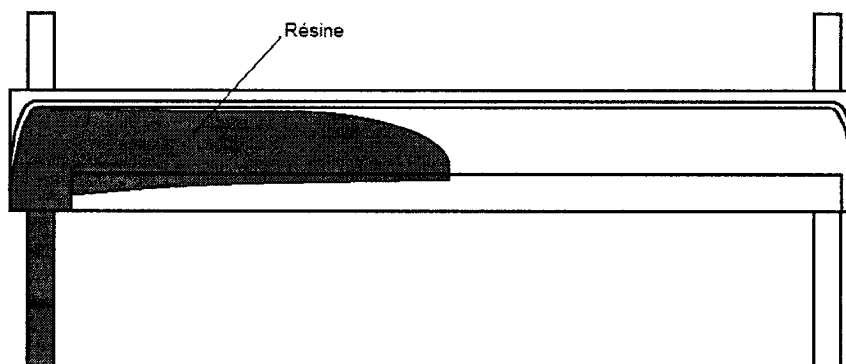


Figure 2 : Injection de la résine.

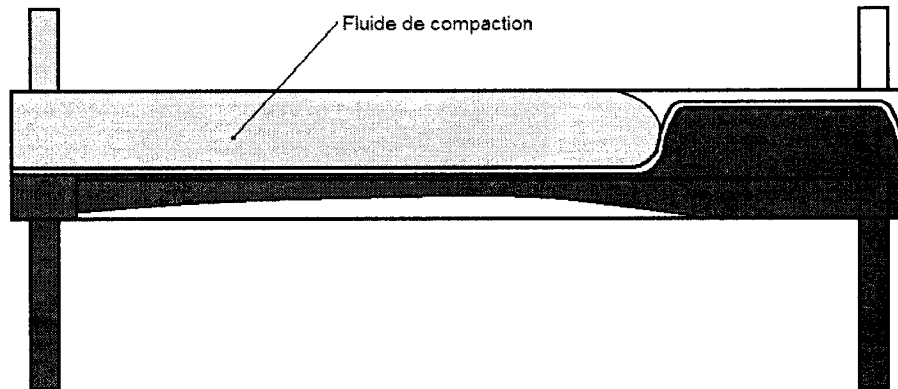


Figure 3 : Injection du fluide de compaction.

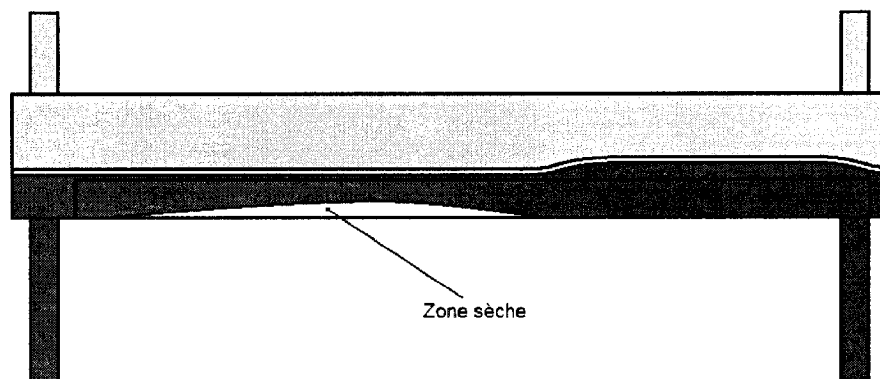


Figure 4 : Évacuation du fluide de compaction.

L'objectif détaillé de ce plan d'expérience a été déterminé suite à ces observations. Il s'agit de réussir l'imprégnation complète et uniforme des fibres en utilisant différentes géométries placées à l'intérieur de la chambre de compaction. Les obstacles à l'intérieur de la chambre de compaction seront utilisés pour forcer l'imprégnation de la préforme par la résine là où c'est nécessaire. L'effet des différentes géométries sera étudié pour déterminer leur influence sur l'imprégnation du renfort fibreux à l'intérieur du moule.

1.2 Matériaux et méthodes

1.2.1 Moule

Le moule utilisé dans ce plan d'expérience est construit pour la fabrication de pièces par injection flexible. La Figure 5 montre une représentation 3D du moule PolyFlex 1 suivie d'une photo du moule à la Figure 6.

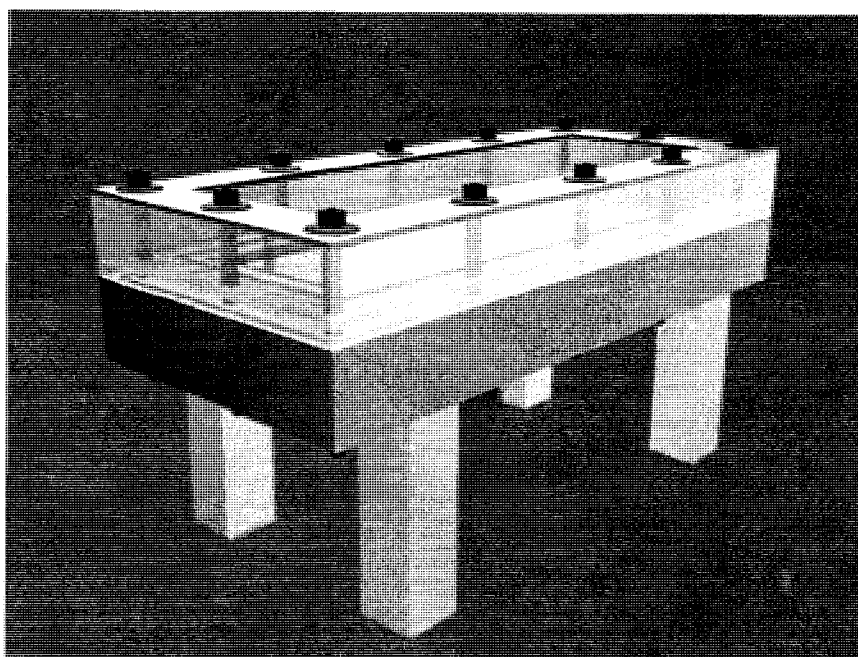


Figure 5 : Représentation 3D du moule PolyFlex 1.

Une des caractéristiques principales du moule réside dans la transparence de sa plaque supérieure qui permet de voir toutes les étapes de l'injection. La Figure 7 montre les différentes composantes du moule utilisé. Le cadre #4 de 3/8 de pouce d'épaisseur est utilisé pour ce plan d'expérience.

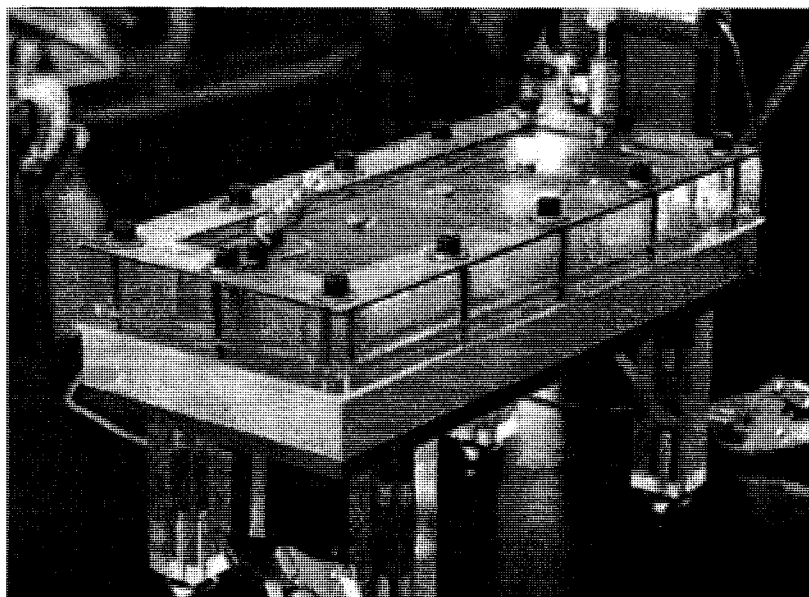


Figure 6 : Photo du moule PolyFlex 1.

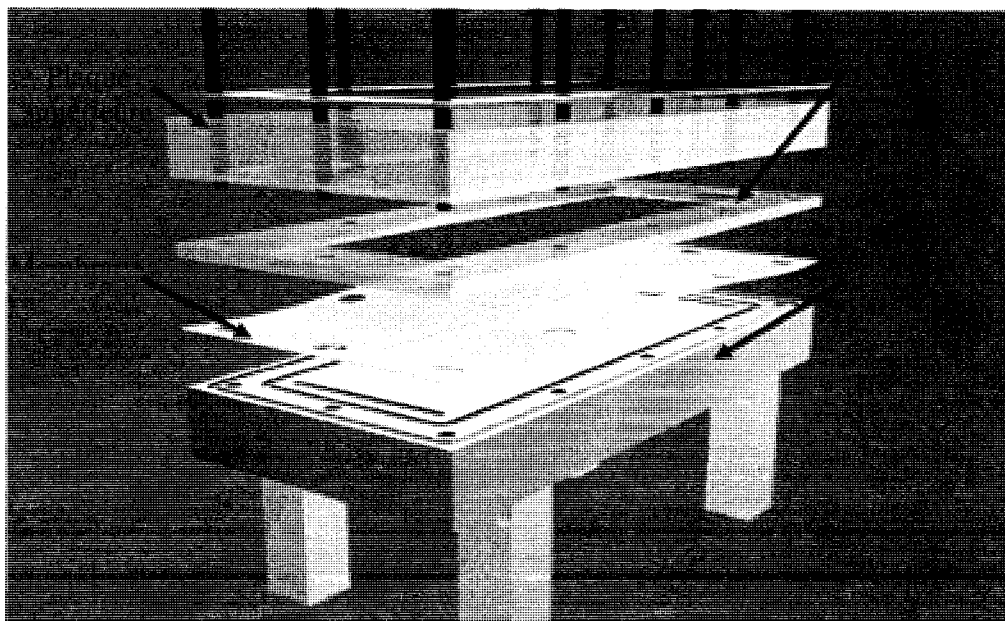


Figure 7 : Composantes du moule PolyFlex 1.

La fermeture du moule est effectuée manuellement à l'aide de 12 boulons selon un ordre préétabli pour être certain de l'étanchéité et assurer un serrage le plus uniforme possible. Chaque boulon doit être serré avec un couple de 17 N.m. La Figure 8 montre l'ordre utilisé ici pour serrer les boulons.

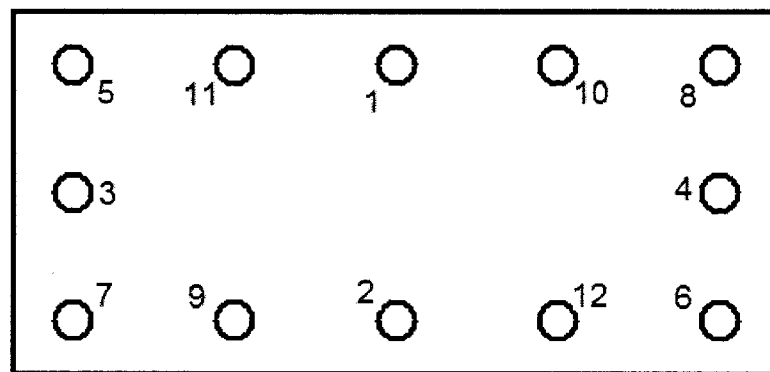


Figure 8 : Ordre de boulonnage.

1.2.2 Membrane

La membrane utilisée dans ce moule est une membrane translucide de silicone d'une épaisseur de 1.6 mm de la compagnie Torr Technologies. Les propriétés physiques de cette membrane sont disponibles à l'annexe D. La membrane est découpée dans une grande feuille de silicone selon les dimensions requises (450mm x 200 mm). Par la suite, la membrane est percée avec un poinçon aux endroits nécessaires. La Figure 9 montre une photo de la membrane.

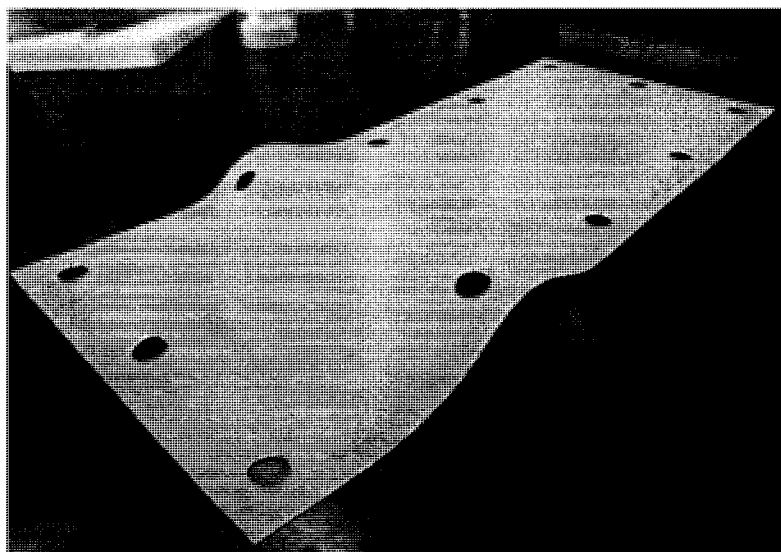


Figure 9 : Membrane utilisée dans le moule PolyFlex 1.

1.2.3 Agent démoulant

L'agent démoulant utilisé pour ce plan d'expérience est le Frekote 700-NC de la compagnie Loctite. Les informations techniques sur ce produit sont disponibles à l'annexe E. Aucune recherche n'a été faite pour utiliser un autre agent démoulant. Son rendement acceptable a été suffisant pour les essais effectués.

1.2.4 Résine

La résine utilisée dans ce plan d'expérience est une résine vinylester de la compagnie Derakane. Il s'agit de la Derakane 411-350 Epoxy Vinyl Ester. Les informations techniques sur ce produit sont disponibles à l'annexe A. La formulation de la résine utilisée dans ce plan d'expérience est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Formulation de la résine pour l'injection

Promoteur	NaCo 12%	0.1 phr
Accélérateur	DMA	0.05 phr
Inhibiteur	2,4P	0.075 phr
Catalyseur	MEKP9-25	1.25 phr

1.2.5 Fluide de compaction

Le fluide de compaction utilisé pour ce plan d'expérience est une huile de silicone de viscosité 1000 cst. L'huile de silicone utilisée est translucide pour éviter de tacher la membrane et les autres composantes du moule. Les informations relatives à cette huile de silicone sont disponibles en annexe.

1.2.6 Renfort

Le renfort est un tissu de fibres de verre de la compagnie Chomarat. La Figure 10 montre le renfort de fibre de verre. Les informations techniques sur ce tissu sont disponibles en annexe. Ce tissu est légèrement imprégné de résine époxy qui, une fois chauffée, permet de maintenir les différents plis ensemble. Par contre, un préformage avec pulvérisation de résine sur les différents plis a été utilisé dans ce plan d'expérience pour assurer une bonne cohésion entre les différents plis.

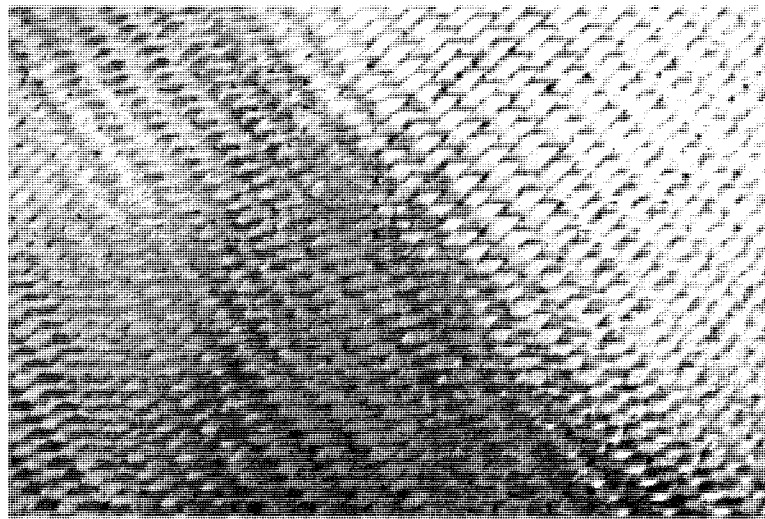


Figure 10 : Renfort de fibre de verre de la compagnie Chomarar.

1.2.7 Préforme

La préforme utilisée dans ce plan d'expérience comprend 5 plis de fibre de verre (voir section 1.2.6). La Figure 11 montre la préforme découpée selon les dimensions requises (121 mm x 354 mm). Les 5 plis sont maintenus ensemble par la résine époxy déjà présente dans le renfort, mais aussi par une légère pulvérisation de résine vinylester sur chaque côté de chaque pli. La formulation utilisée pour la pulvérisation des préformes est présentée dans le Tableau 2.

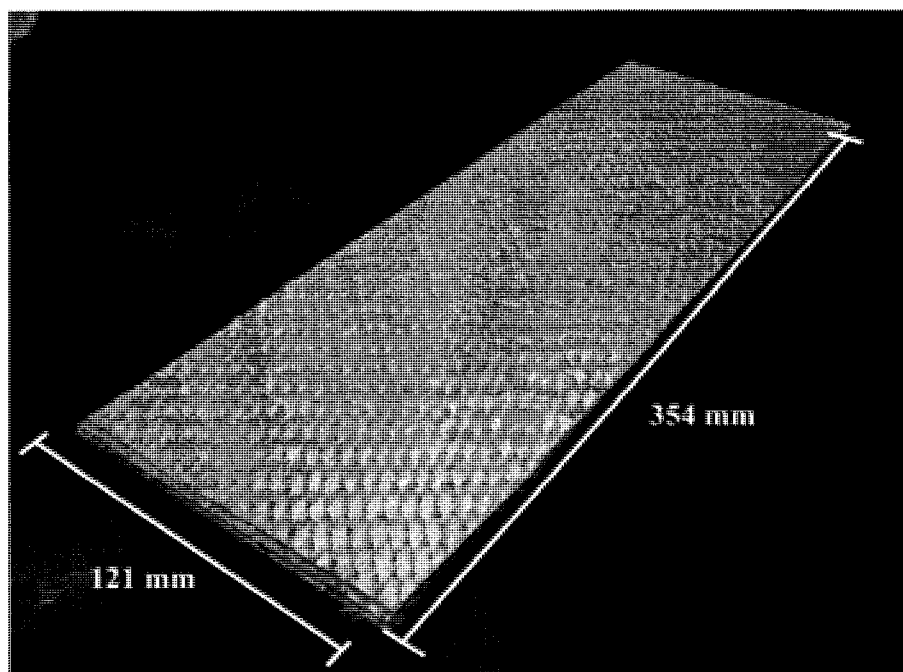


Figure 11 : Préforme découpée aux dimensions requises.

Tableau 2: Formulation de résine pour la fabrication de préforme

Promoteur	NaCo 12%	0.1 phr
Accélérateur	DMA	0.05 phr
Inhibiteur	2,4P	0.075 phr
Catalyseur	MEKP9-25	1.25 phr
Pigment	Noir	0.5 phr

Pour accélérer le processus, une grande plaque de 360 mm par 375 mm est fabriquée et sera découpée ultérieurement pour former 3 préformes de 354 mm par 121 mm. Pour

une plaque de 5 plis, une quantité de 50 à 75 grammes de résine est préparée selon la formulation présentée au Tableau 2. La Figure 12 montre la grande plaque qui sera découpée ultérieurement pour former les préformes.

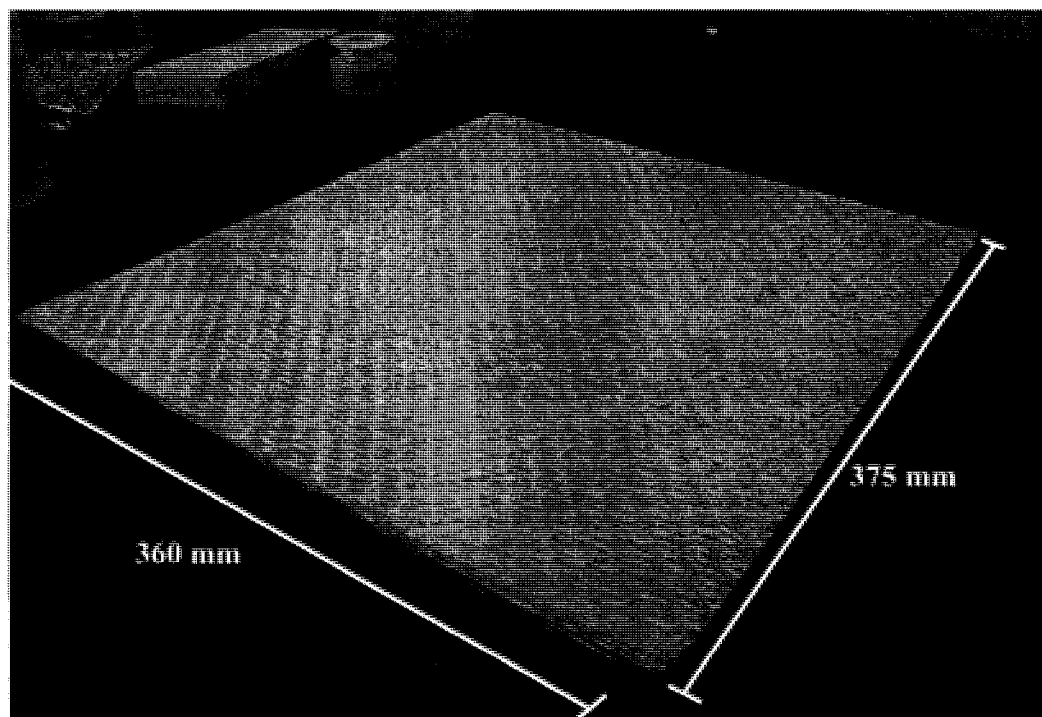


Figure 12 : Grande plaque dans laquelle seront découpées les préformes.

Une fois pulvérisée de chaque côté, les cinq plis sont déposés à l'intérieur d'une presse chauffante munie d'un cadre de 5 mm d'épaisseur pendant 15 minutes. La presse Enerpac est utilisée. La température de la presse a été fixée à 90°C pour la fabrication des préformes. Une fois ceci complété, la plaque est retirée de la presse et déposée sur une surface plane pour la laisser refroidir à l'air ambiant. Une fois à la température ambiante, la plaque est découpée sur une table de découpe selon les dimensions requises (354 mm x 121 mm).

1.2.8 Obstacles

Trois types d'obstacles seront utilisés à l'intérieur de la chambre de compaction pour ce plan d'expérience :

- un obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur toute la longueur du moule;
- un obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur la première moitié du moule;
- un obstacle rectangulaire placé dans la seconde moitié du moule.

La Figure 13 montre une représentation 3D de ces 3 types d'obstacles. À gauche il s'agit de l'obstacle de section verticale triangulaire qui crée une pente linéaire sur toute la longueur du moule. Au centre, l'obstacle de section verticale triangulaire créant une pente sur la première moitié du moule est présenté, tandis qu'à l'extrême droite apparaît l'obstacle rectangulaire qui sera placé dans la seconde moitié du moule.

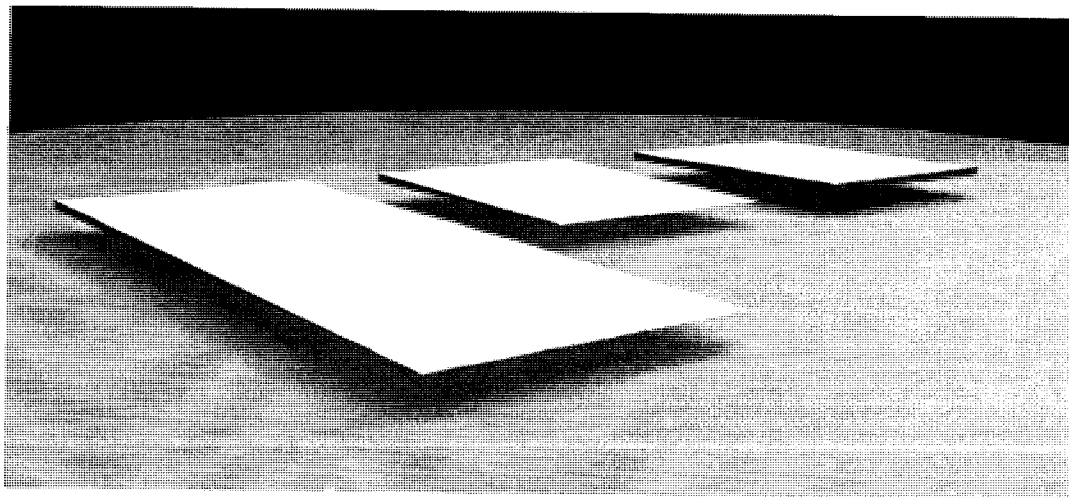


Figure 13 : Représentation 3D des obstacles.

Les obstacles ajoutés à l'intérieur de la chambre de compaction sont fabriqués à partir de la résine époxy Vitra-Laque de la compagnie Omer Deserres. Deux moules ont été fabriqués pour la fabrication de ces différentes géométries. Le premier moule mesure 115 mm par 368 mm. Il a été conçu pour fabriquer l'obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur toute la longueur du moule. Ce moule est présenté dans la Figure 14. Le deuxième moule mesure 110 mm par 180 mm. Il a été conçu pour fabriquer l'obstacle rectangulaire et l'obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur la première moitié du moule. Ce moule est présenté à la Figure 15. Il est moins long que le précédent, car il sera utilisé pour fabriquer des obstacles plus courts.

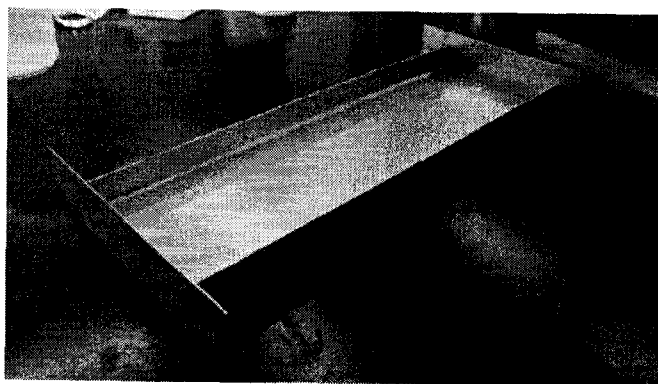


Figure 14 : Moule (1) utilisé pour la fabrication des obstacles long.

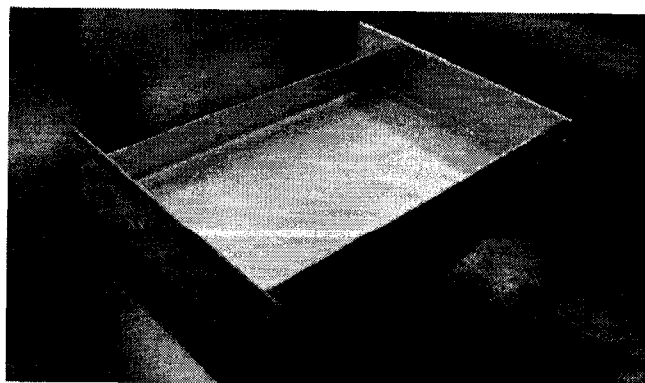


Figure 15 : Moule (2) utilisé pour la fabrication des obstacles courts.

L'obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur toute la longueur du moule est fabriqué de la manière suivante : Le moule de la Figure 14 est déposé sur une surface plane pour s'assurer qu'il est bien à niveau. Le fond et les côtés du moule sont enduits d'agent démoulant (voir section 1.2.3). Ensuite, une pile de feuilles d'épaisseur d'environ 4 mm est déposée sous une des extrémités du moule de façon à ce qu'il soit incliné selon un angle de plus ou moins 1 degré. Avec un niveau à bulle, on s'assure que la pente est bien uniforme sur toute la longueur et qu'il n'y a pas un côté surélevé. Dans ce cas, on corrige en ajoutant de petites épaisseurs de papier d'un côté ou de l'autre (voir Figure 16). Une fois le moule mis en place, la formulation de l'époxy est préparée selon les recommandations du fabricant.

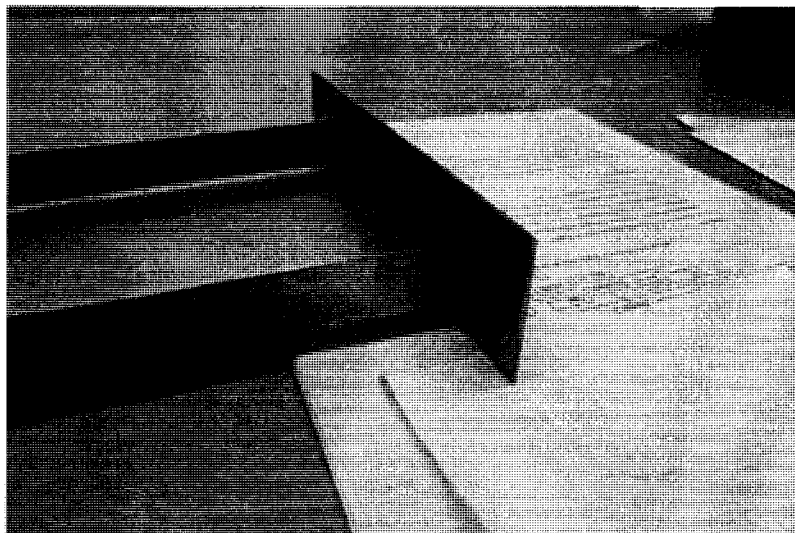


Figure 16 : Mise à niveau du moule pour la fabrication des obstacles.

Lors de la préparation de l'époxy, il est nécessaire d'agiter très lentement le mélange pour prévenir la formation de bulles à l'intérieur de celui-ci. Ensuite, l'époxy est lentement versé à l'intérieur du moule en assurant une déposition uniforme sur toute la surface. Après 24h de séchage, l'obstacle est démoulé.

La fabrication de l'obstacle à section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur la première moitié du moule demande un ajustement. Le moule utilisé est présenté dans la Figure 15. Ce moule plus court permet de fabriquer des obstacles de plus petite dimension. Le procédé reste le même que pour la fabrication de l'obstacle à section verticale triangulaire créant une pente sur toute la longueur du moule. L'époxy est préparé selon la même formulation et versé lentement à l'intérieur du moule. L'obstacle est ensuite démoulé après 24 h de séchage.

Pour la fabrication de l'obstacle rectangulaire, le même moule est utilisé (Figure 15). Il est déposé sur une surface plane et enduit d'agent démoulant, mais il n'est pas surélevé d'aucun côté. L'époxy est préparé selon la même formulation et versé lentement à l'intérieur du moule. L'obstacle est ensuite démoulé après 24 h de séchage.

Ces obstacles sont ensuite insérés à l'intérieur de la chambre de compaction. Pour s'assurer de leur stabilité à l'intérieur de la cavité, ils sont collés avec du ruban adhésif double face sur la plaque supérieure. Le ruban adhésif est appliqué sur toute la surface de l'obstacle. La Figure 17 montre une représentation 3D de l'obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur toute la surface du moule collé sur la plaque supérieure.

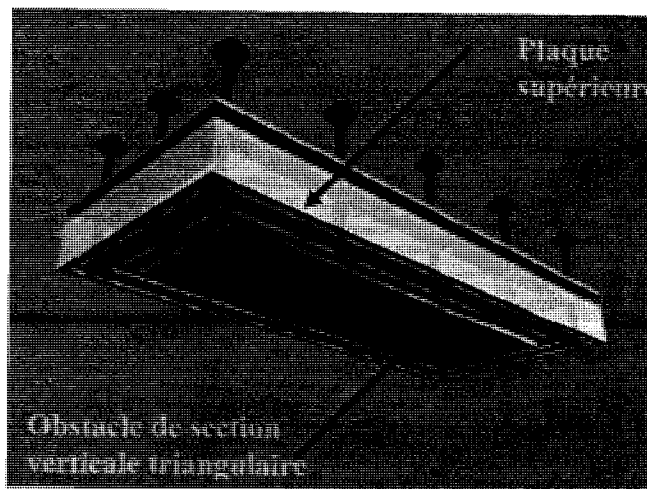


Figure 17 : Insertion d'un obstacle dans la chambre de compaction.

1.2.9 Injection

La fabrication des échantillons composites dans ce plan d'expérience est réalisée par injection flexible. L'injection pour ce plan d'expérience se fera à pression constante. Pour injecter la résine et le fluide de compaction, des pots de pression seront utilisés. La Figure 18 et la Figure 19 montrent les pots de pression. La Figure 18 montre le pot de pression servant à l'injection de la résine, et la Figure 19 montre le pot de pression utilisé pour l'injection du fluide de compaction.

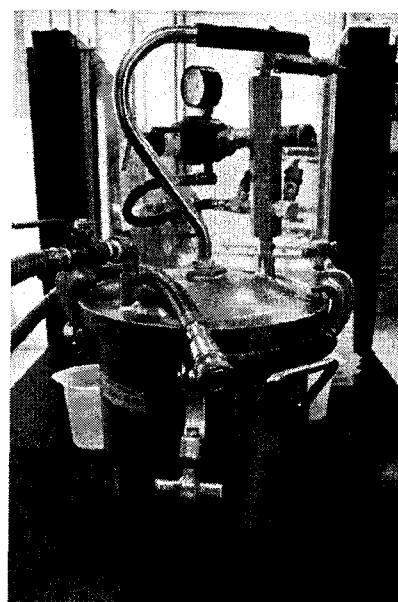


Figure 18 : Pot de pression utilisé pour l'injection de la résine et du fluide de compaction.

1.2.9.1 Nettoyage

Le nettoyage du moule et des différentes composantes est très important avant et après les injections. Il faut respecter la procédure de nettoyage pour éviter d'endommager le moule.

Pour nettoyer la plaque inférieure en aluminium, on doit d'abord gratter à l'aide d'un grattoir en plastique tout résidu de résine. Ensuite, mettre la plaque inférieure de côté et

à l'aide d'un alésoir de 5/16 de pouces, refaire les alésages du port d'injection et d'évacuation de la résine. S'assurer de toujours utiliser l'alésoir dans le sens horaire pendant toute cette opération. L'utilisation de l'alésoir dans le sens anti-horaire pourrait endommager ce dernier. Ensuite, il faut nettoyer à l'aide d'un chiffon de la compagnie WypAll et du produit nettoyant Frekote PMC de la compagnie Loctite toute la surface de la plaque inférieure. S'assurer de bien nettoyer aussi toutes les rainures.

Pour nettoyer la plaque supérieure et le cadre, on doit d'abord éponger à l'aide d'un chiffon, s'il y a lieu, tout résidu d'huile de silicone. Ensuite, à l'aide d'un autre chiffon enduit d'acétone, nettoyer toute la surface de la plaque supérieure et du cadre en s'assurant de ne pas oublier les rainures ni les trous.

Pour nettoyer la membrane, on doit d'abord la déposer sur un cabaret couvert d'un chiffon pour éviter qu'elle ne s'endommage. Ensuite, éponger à l'aide d'un chiffon tout résidu d'huile de silicone sur la surface de la membrane. Finalement, de l'autre côté de la membrane, gratter à l'aide d'un grattoir en plastique tout résidu de résine présent sur la membrane. Faire très attention de ne pas endommager la membrane pendant son nettoyage.

Pour nettoyer les joints toriques, on doit utiliser un chiffon enduit d'acétone pour enlever tout résidu de résine. Faire bien attention pendant cette opération à ne pas sectionner le joint torique à l'endroit où il a été collé. Une fois nettoyés, les déposer sur le cabaret avec la membrane.

1.2.9.2 Préparation du moule

La première étape de préparation du moule consiste à fixer les tuyaux d'injection et d'évacuation de la résine. Ces tuyaux en polypropylène ont d'un diamètre intérieur de ¼ de pouces. À cette fin, on doit d'abord couper un tuyau d'une longueur de 38 cm et un autre de 15 cm. Le plus long sera utilisé pour le port d'injection de résine, et l'autre pour le port d'évacuation de la résine. Enduire de graisse «*high vacuum*» de la compagnie

Dow Corning chaque extrémité des tuyaux sur une longueur d'environ 7 cm. Les informations relatives à cette graisse sont disponibles à l'annexe F. Glisser ensuite la bague de compression sur le tuyau. La Figure 19 montre cette étape. On peut voir que la partie la plus large de la bague de compression est dirigée vers le bas. Pour faciliter les opérations de positionnement du port d'injection et d'évacuation, placer la plaque inférieure sur la tranche avec le dessous vers soi. Glisser le plus long tuyau à l'intérieur du trou prévu pour l'injection de la résine en s'assurant qu'il soit environ à 4mm du fond de la rainure. La Figure 20 illustre cette étape. On voit que le tuyau n'est pas totalement inséré dans le trou. Ensuite, insérer l'écrou sur le tuyau et le serrer à l'aide d'une clé hexagonale de 9/16 de pouce. Effectuer les mêmes opérations pour le tuyau d'évacuation de la résine.

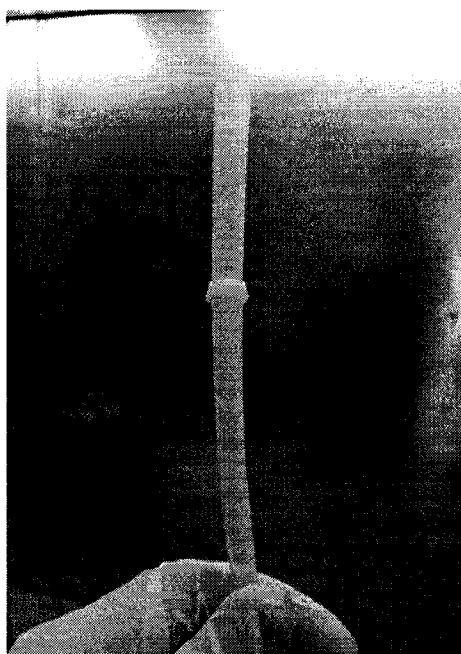


Figure 19 : Tuyau de polypropylène avec bague de serrage.

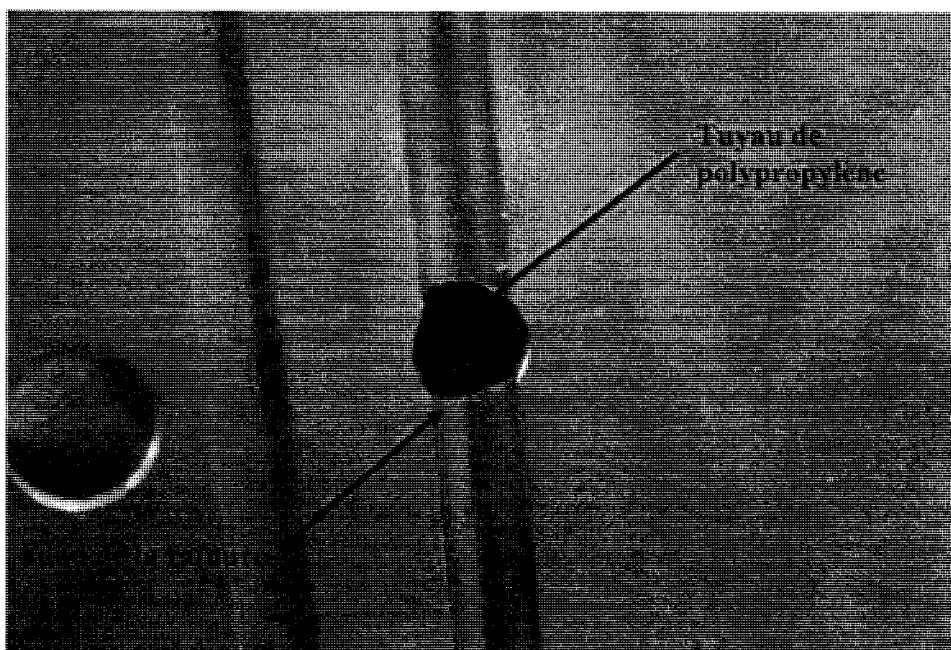


Figure 20 : Tuyau de polypropylène à l'intérieur du port d'injection de la résine.

Replacer la plaque inférieure dans sa position initiale en s'assurant de bien faire passer les tuyaux à l'intérieur de la plate-forme du moule. Enduire la surface de la plaque inférieure d'agent démoulant (voir section 1.2.3). Pour s'assurer que l'agent démoulant soit appliqué de façon uniforme, faire des cercles avec un chiffon en se déplaçant d'une extrémité à une autre. Attendre une dizaine de minutes et rappliquer de la même manière une deuxième couche sur toute la surface de la plaque inférieure.

Enduire les joints toriques de graisse «*high vacuum*» de la compagnie Dow Corning en s'assurant qu'il n'y ait pas d'excédant sur le joint torique. Insérer les joints toriques dans leurs rainures respectives sur la plaque inférieure sans trop les faire toucher à la surface de la plaque inférieure. Si c'est le cas, essuyer légèrement les marques de graisse sur la surface de la plaque inférieure à l'aide d'un chiffon et appliquer une autre couche d'agent démoulant si nécessaire.

Déposer la préforme sur la surface de la plaque inférieure. La préforme doit cacher le port d'évacuation de la résine, mais doit laisser le port d'injection libre. La Figure 21

montre cette étape. On peut voir que la préforme ne touche pas à la rainure du port d'injection de la résine. S'assurer que la préforme est relativement centrée en largeur sur la plaque inférieure. Déposer ensuite la membrane sur la préforme. S'assurer que les trous de la membrane soient bien alignés avec ceux de la plaque inférieure. Déposer le cadre sur la membrane en s'assurant encore une fois de bien aligner les trous du cadre avec ceux de la membrane et de la plaque supérieure. De plus, en déposant le cadre, s'assurer que la préforme soit bien centrée dans le cadre pour éviter de la pincer d'un côté ou de l'autre. Finalement, déposer la plaque supérieure sur le cadre en s'assurant que les trous soient bien alignés et que le port d'injection du fluide de compaction (celui qui possède une valve) est bien du côté du port d'injection de la résine.

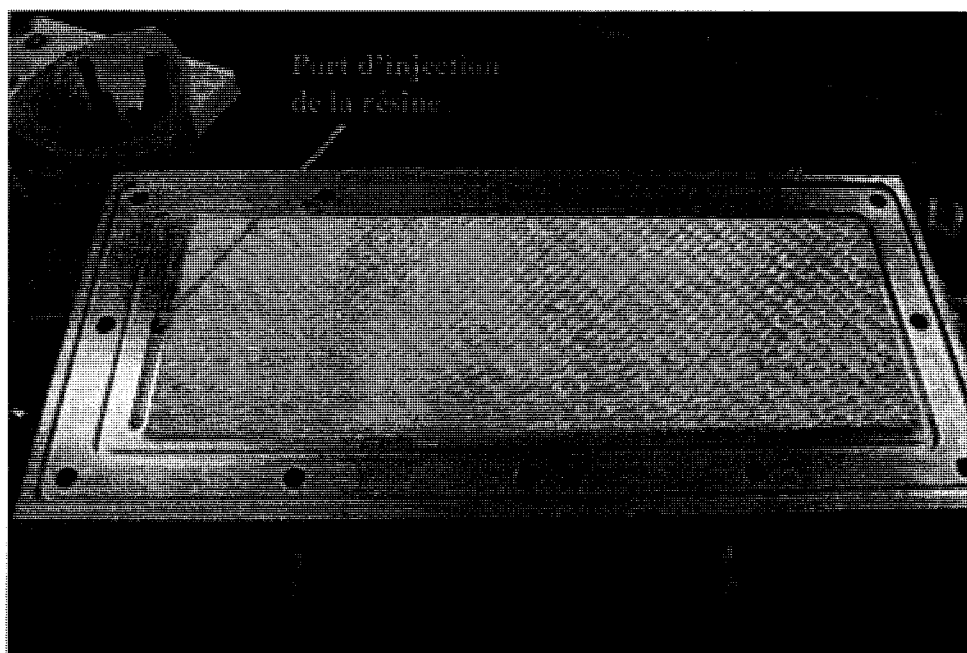


Figure 21 : Préforme déposée sur la plaque inférieure.

Une fois toutes ces opérations complétées, il reste à fermer le moule à l'aide des 12 boulons. L'ordre de boulonnage a déjà été présenté à la section 1.2.1. Vérifier à deux reprises que les boulons ont bien été serrés avec le couple requis de 17 N.m.

1.2.9.3 Préparation de l'injection

Une fois le moule préparé et prêt pour l'injection, il est nécessaire d'installer les autres composantes. On dépose d'abord les deux pots de pression sur la table et on les relie au moule. Le pot de pression pour le fluide de compaction se connecte au port d'injection du fluide de compaction (celui qui possède une valve) avec un embout à connexion rapide, tandis que le pot de pression pour la résine se fixe au port d'injection à partir d'un embout barbelé. Vérifier l'étanchéité du pot de pression du fluide de compaction en élevant la pression à l'intérieur de celui-ci à 6 bars (87 psi).

Installer les deux «*catchpots*» sur la table et les connecter au moule. Les «*catchpots*» utilisés pour ce plan d'expérience sont montrés à la Figure . Le «*catchpot*» pour le fluide de compaction est relié avec un embout à connexion rapide au port d'évacuation du fluide de compaction. Le «*catchpot*» pour la résine est fixé au port d'évacuation de la résine à partir d'un embout barbelé. Connecter les deux «*catchpots*» au vide. Le «*catchpot*» utilisé pour le fluide de compaction est mis au vide complet et celui utilisé pour la résine est connecté à un vide partiel. Fixer les pressions à l'intérieur de chaque «*catchpot*» aux valeurs présentées dans le Tableau 3 (voir section 1.2.9 1.2.9.5 . Finalement, déposer à côté de chaque tuyau de polypropylène une pince pour bloquer l'entrée ou la sortie de la résine. La Figure montre le type de pince utilisé dans le plan d'expérience.

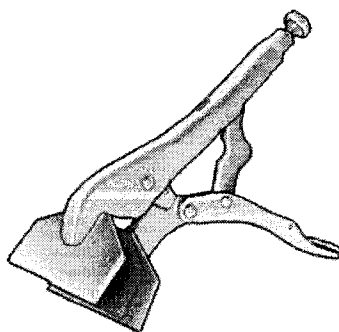


Figure 23 : Pince pour bloquer l'entrée et la sortie de la résine.

Source : www.mcmaster.com

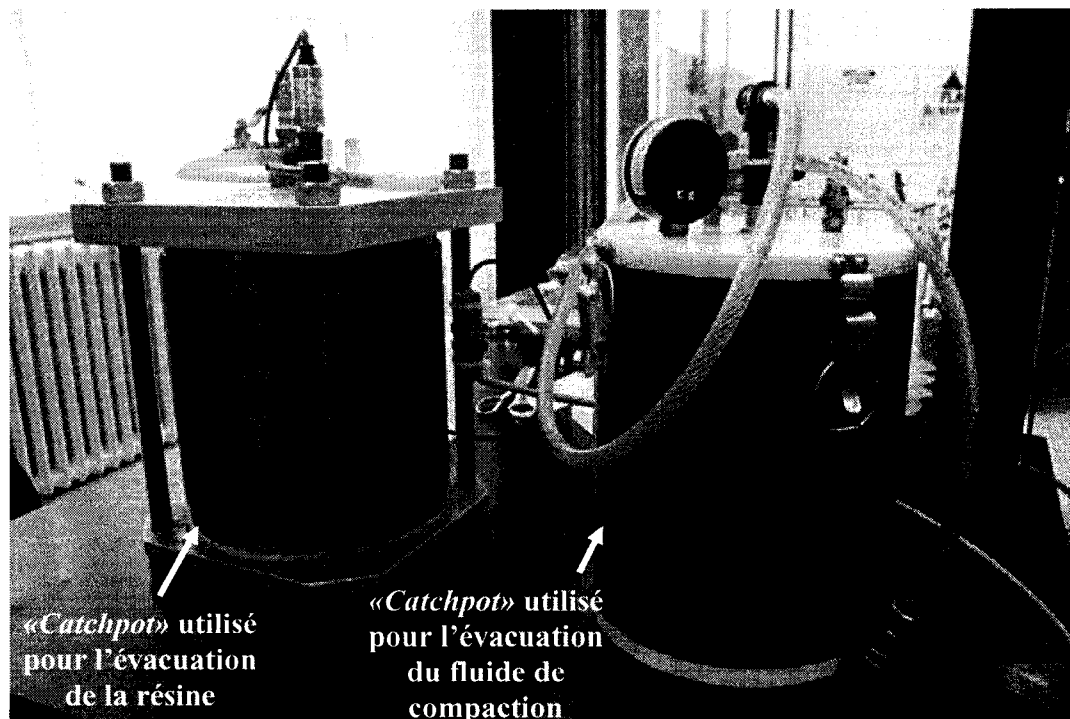


Figure 24 : «Catchpots» utilisés pour l'évacuation de la résine et du fluide de compaction.

1.2.9.4 Enregistrement de l'injection sur vidéo

Pour enregistrer l'injection, placer un trépied et la caméra sur la table de façon à pouvoir positionner la lentille de la caméra parallèlement au moule. Ajuster le zoom de la caméra pour cadrer le moule dans toute sa largeur. Ajouter un chronomètre dans le cadre de la caméra en s'assurant que le temps soit bien visible sur l'écran de la caméra. Ce chronomètre permettra d'obtenir des informations sur les vitesses des fronts, le débit des fluides et le temps d'injection. Juste avant le début de l'injection, mettre la caméra en fonction en positionnant la roulette de sélection sur le mode PScan. Lancer l'enregistrement en appuyant sur Record.

1.2.9.5 Injection

Tableau 3 : Caractéristiques de l'injection.

Pression du pot de pression de la résine	3 bars (44 psi)
Pression du pot de pression du fluide de compaction	6 bars (87 psi)
Vide du « <i>catchpot</i> » de la résine	-0.25 bar (-3.6 psi)
Vide du « <i>catchpot</i> » du fluide de compaction	-0.75 bar (-11 psi)
Résine utilisée	Derakane 411-350
Catalyseur utilisé	MEKP9-25
Taux de fibre visé	48% (4mm)

Le Tableau 3 montre les différentes caractéristiques de l'injection. Une fois que tout est mis en place et vérifié à deux reprises, préparer la formulation de résine. La formulation utilisée dans ce plan d'expérience est présentée dans le Tableau 1 de la section 1.2.4 . La masse de résine nécessaire pour la fabrication des pièces pour ce moule et le taux fibres visé est d'environ 260 gr. Cette quantité tient compte de la masse de résine perdue dans le fond du récipient à l'intérieur du pot de pression et à l'intérieur de la tuyauterie. Il est donc important de respecter la longueur de 38 cm pour le tuyau de polypropylène utilisé au port d'injection de la résine (voir section 1.2.9 b). Une fois la résine préparée, déposer le récipient à l'intérieur du pot de pression en le plaçant à l'intérieur du pot métallique disposé à l'intérieur du pot de pression. Fermer le pot de pression avec les attaches prévues et vérifier son étanchéité en élevant la pression à l'intérieur à 3 bars (44 psi). S'assurer pendant cette opération que la valve du pot de pression est bien fermée. Descendre la pression à 1 bar (15 psi) et ouvrir tranquillement la valve du pot de pression pour amener la résine jusqu'au début du moule. Fermer la valve, élever la pression à l'intérieur du pot de pression à 3 bars (44 psi). S'assurer que la pression à l'intérieur du pot de pression du fluide de compaction est bien à 6 bars (87 psi) et que la valve du moule est fermée. Ouvrir la valve du pot de pression du fluide de compaction afin que le fluide se rende jusqu'à la valve du moule. Lancer l'enregistrement et débiter l'injection.

Deux opérateurs sont nécessaires pour réaliser l'injection. Le premier (A) est responsable des ports d'injection (résine et fluide de compaction), et le second (B) s'occupe des ports d'évacuation (résine et fluide de compaction). L'opérateur A a une main sur la valve du port d'injection du fluide de compaction et l'autre sur la pince pour couper l'arrivée de résine à l'intérieur du moule. L'opérateur B observe le port d'évacuation de la résine en ayant une main sur la pince pour couper la sortie de résine au port d'évacuation. L'injection se déroule selon les étapes suivantes :

- L'opérateur A ouvre la valve du pot de pression de la résine.
- L'opérateur A se concentre sur la résine et pince le tuyau de polypropylène lorsqu'il aperçoit la première bulle à l'intérieur du tuyau.
- L'opérateur A ouvre la valve au port d'injection du fluide de compaction.
- L'opérateur A ferme la valve du pot de pression de la résine.
- L'opérateur B se concentre sur le port d'évacuation de la résine et pince le tuyau de polypropylène dès que la résine apparaît.
- L'opérateur B déconnecte le tuyau au port d'évacuation du fluide de compaction.

L'injection s'effectue très rapidement, il est donc nécessaire de bien connaître toutes ces étapes avant de débiter l'injection. Une fois l'injection terminée, maintenir la pression sur le fluide de compaction pendant un minimum de 4 h en s'assurant de ne jamais laisser le moule en pression toute une nuit.

1.2.9.6 Démoulage

Il est nécessaire d'attendre un minimum de 6 h avant de démouler la pièce. À l'aide du «*catchpot*» prévue pour évacuer le fluide de compaction, retirer le maximum d'huile de silicone de la chambre de compaction. Ensuite, déboulonner les boulons dans le même ordre selon lequel ils ont été boulonnés (voir section 1.2.1). Ouvrir le moule et éponger légèrement les différentes composantes pour enlever le maximum d'huile de silicone. Tourner la plaque inférieure sur le côté et retirer les tuyaux de polypropylène aux ports d'injection et d'évacuation. À l'aide d'un tournevis, pousser dans le port d'évacuation de

la résine pour tenter de démouler la pièce. Ne pas utiliser d'outil en acier sur la surface de la plaque inférieure pour ne pas endommager la surface du moule. Une fois la pièce démoulée, la déposer sur une surface propre et nettoyer les composantes du moule selon la procédure présentée à la section 1.2.9 a.

Essais expérimentaux

Tel qu'annoncé plus tôt, l'objectif des expériences est de forcer l'imprégnation des fibres pendant l'injection de la résine en y ajoutant les géométries suivantes à l'intérieur de la chambre de compaction :

- un élément de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur toute la longueur du moule,
- un élément de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur la première moitié du moule,
- un obstacle rectangulaire placé dans la seconde moitié du moule.

Chacune de ces géométries influencera de manière différente l'imprégnation des renforts.

1.2.10 Hypothèses initiales

1.2.10.1 Forme triangulaire sur toute la longueur du moule

Ajouter une forme triangulaire sur la longueur du moule à l'intérieur de la chambre de compaction vise à utiliser le déplacement du fluide de compaction pour forcer l'imprégnation transversale des fibres par la résine.

- La Figure 22 montre les différentes informations pertinentes à la compréhension des autres schémas. Les ports d'injection et d'évacuation des deux fluides sont identifiés. De plus, noter la forme que prend la membrane flexible selon la géométrie qui est introduite dans la chambre de compaction.

- La Figure 23 montre l'injection de la résine dans le moule. La forme triangulaire permet de réorienter le mouvement de la résine vers la préforme. Lorsqu'il n'y a aucun obstacle dans la chambre de compaction, le mouvement est plutôt parallèle aux fibres.
- La Figure 24 montre l'injection du fluide de compaction à l'intérieur du moule. La forme triangulaire permet aussi d'orienter l'écoulement du fluide de compaction. De plus, la forme triangulaire empêche l'accumulation de résine à la fin du moule.
- Finalement, la Figure 25 montre l'évacuation du fluide de compaction et après injection de la pièce. Noter que le temps d'injection devrait être plus rapide étant donné que l'espace à remplir est presque diminué de moitié.

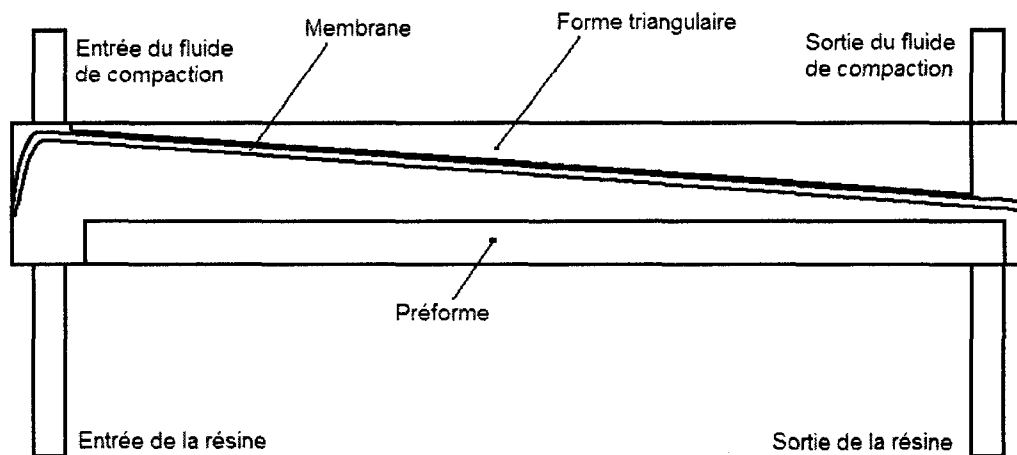


Figure 22 : Forme triangulaire : état initial.

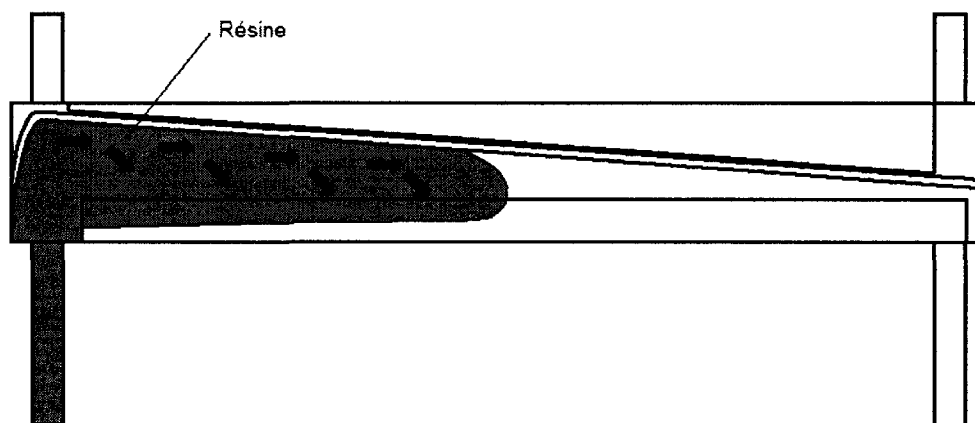


Figure 23 : Forme triangulaire : injection de la résine.

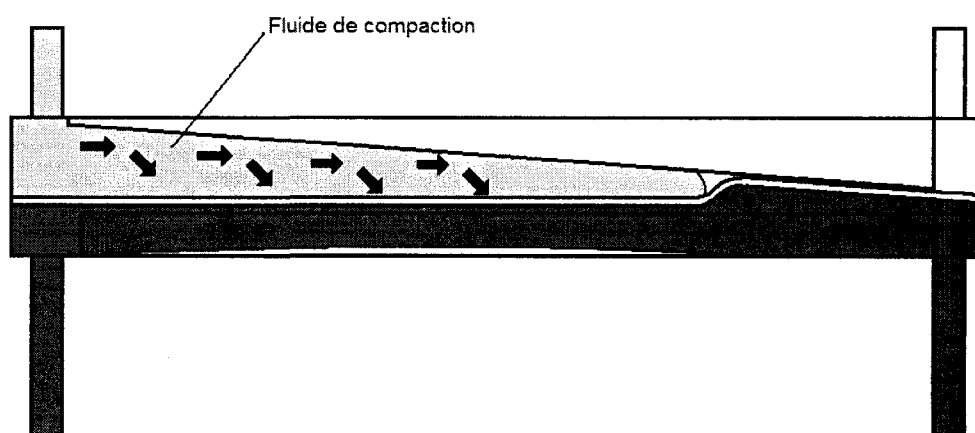


Figure 24 : Forme triangulaire : injection du fluide de compaction.

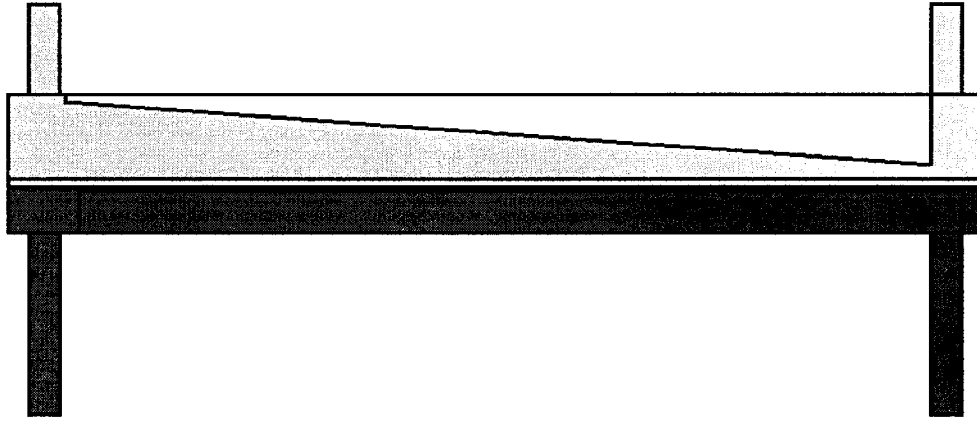


Figure 25 : Forme triangulaire : évacuation du fluide de compaction.

1.2.10.2 Forme triangulaire dans la première moitié du moule

Une autre façon de prévenir l'apparition de la zone sèche dans la première moitié du moule serait d'ajouter une forme triangulaire dans cette section. Ainsi, l'effet produit serait concentré sur la première moitié de la pièce. De cette façon, le problème de zone sèche en début de moule pourrait être réglé. Par contre, il est possible qu'un surplus de résine apparaisse alors à la fin de la pièce. Le temps d'injection sera plus rapide que dans le procédé initial, mais plus lent que lorsque la forme triangulaire est répartie sur toute la longueur du moule. Les schémas suivants illustrent cette idée.

- Dans la Figure 26, on peut voir les différentes caractéristiques du moule. Noter qu'on voit le moule de profil et que les dimensions sont encore une fois exagérées en épaisseur pour mieux schématiser le procédé.
- Dans la Figure 27, la résine est injectée dans le moule. L'écoulement transversal de la résine est très important, favorisant ainsi l'imprégnation de la première moitié de la pièce.

- La Figure 28 montre l'injection du fluide de compaction à l'intérieur du moule. Encore une fois, la forme triangulaire dévie le fluide de compaction qui exerce ainsi une pression sur la résine et de ce fait, sur la préforme. Un léger surplus de résine à l'extrémité du moule est causé principalement par la reprise dans cette section du moule de l'écoulement de la résine parallèle aux fibres.
- La Figure 29 montre l'évacuation du fluide de compaction du moule après injection de la pièce.

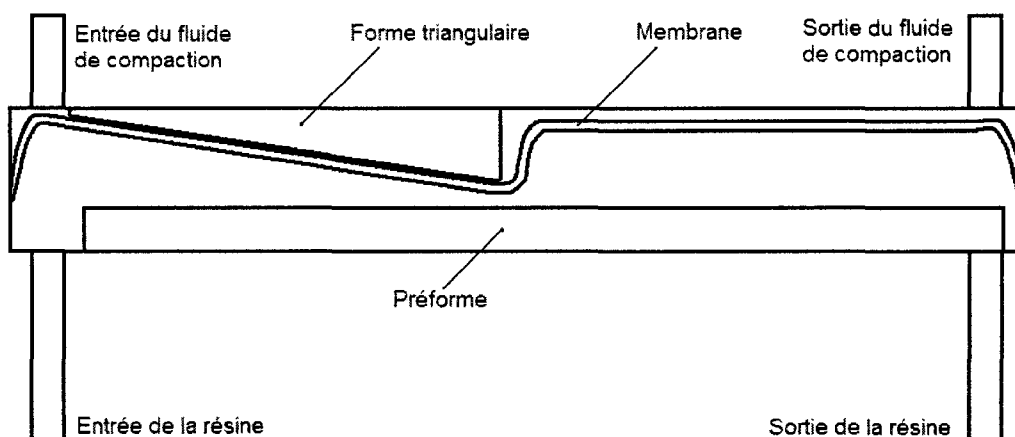


Figure 26 : Forme triangulaire dans la première moitié du moule : état initial.

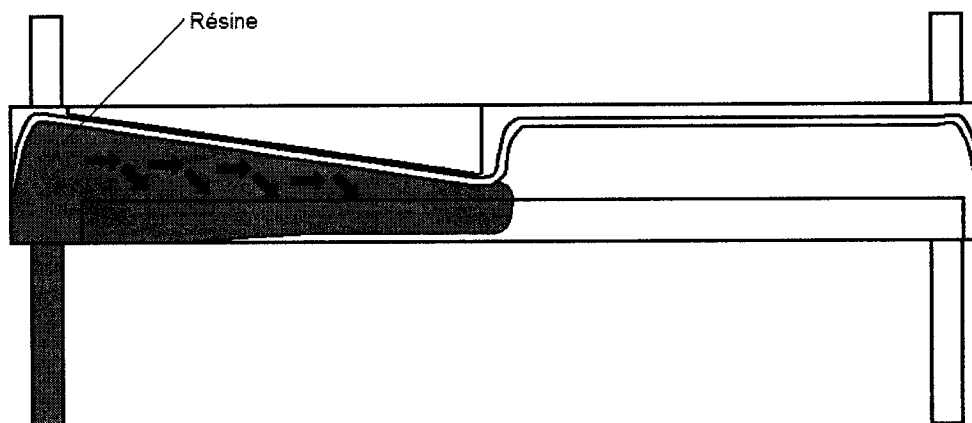


Figure 27 : Forme triangulaire dans la première moitié du moule : injection de la résine.

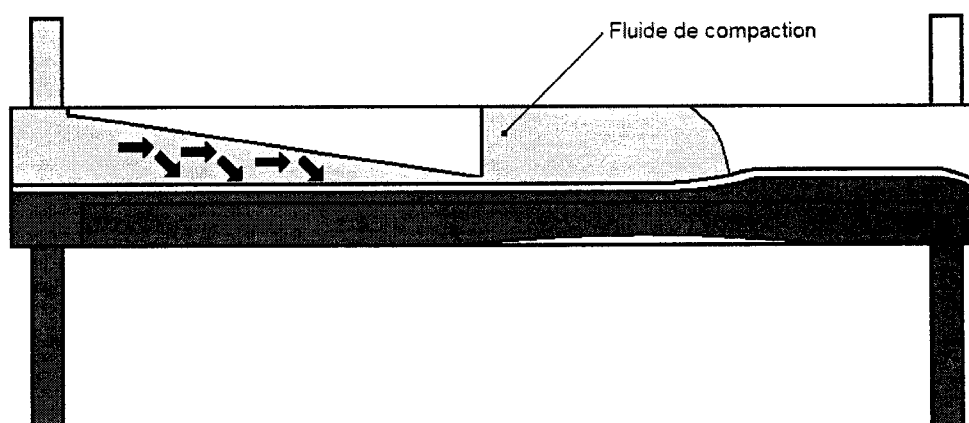


Figure 28 : Forme triangulaire dans la première moitié du moule : injection du fluide de compaction.

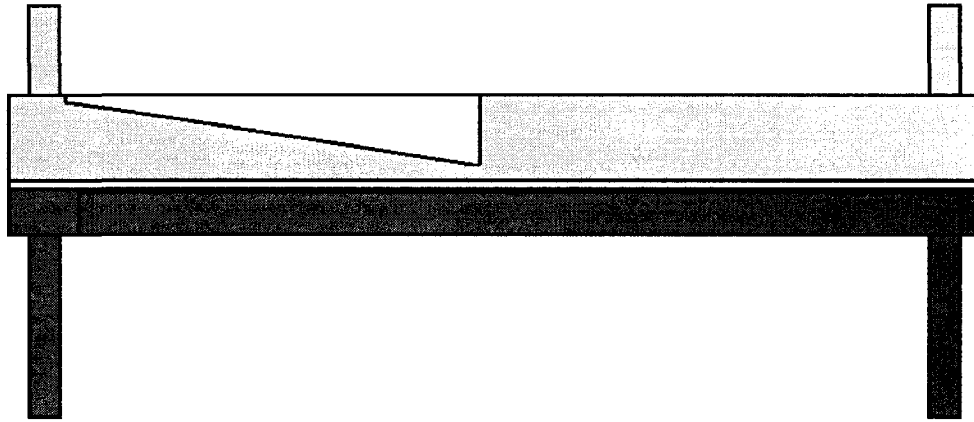


Figure 29 : Forme triangulaire dans la première moitié du moule : évacuation du fluide de compaction.

1.2.10.3 Obstacle rectangulaire

La troisième idée pour empêcher la formation de la zone sèche dans la première partie de la pièce consiste à ajouter un obstacle rectangulaire à l'intérieur de la chambre de compaction dans la dernière partie du moule. Théoriquement, en ajoutant un tel obstacle, l'écoulement de la résine, une fois injectée, sera ralenti dans la première section du moule. De plus, cet obstacle devrait permettre d'éviter l'accumulation de résine à l'extrémité du moule. Au niveau du temps d'injection, l'insertion de cette géométrie dans la chambre de compaction devrait accélérer le procédé. Par contre, étant donné l'espace restreint à l'extrémité du moule, il est possible qu'une zone sèche se forme à l'extrémité du moule. Les schémas qui suivent illustrent cette idée.

- La Figure 30 présente les différentes caractéristiques du montage.
- La Figure 31 montre l'injection de la résine à l'intérieur du moule. L'écoulement de la résine est ralenti par la présence de l'obstacle dans la deuxième moitié du

moule. Ceci favorise une meilleure imprégnation du renfort dans la première partie de la cavité.

- La Figure 32 montre l'Injection du fluide de compaction à l'intérieur du moule, dont l'écoulement est aussi ralenti par l'obstacle. Ceci aide à l'imprégnation du renfort dans cette partie de la cavité.
- Finalement, la Figure 33 montre l'évacuation du fluide de compaction du moule après l'injection. Noter qu'encore une fois, les dimensions des composantes du schéma sont exagérées en épaisseur.

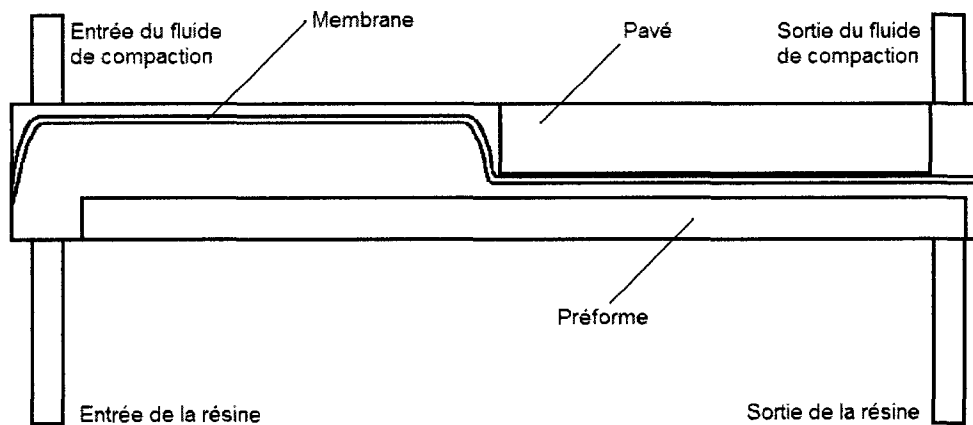


Figure 30 : Obstacle rectangulaire : état initial.

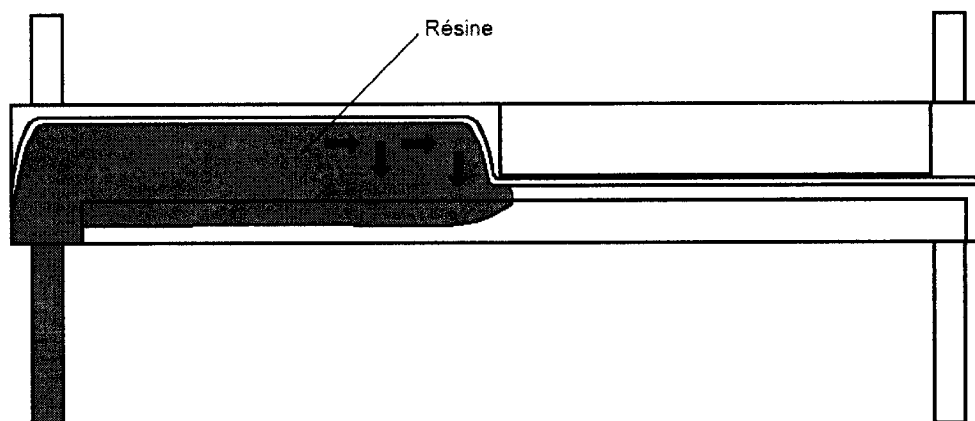


Figure 31 : Obstacle rectangulaire : injection de la résine.

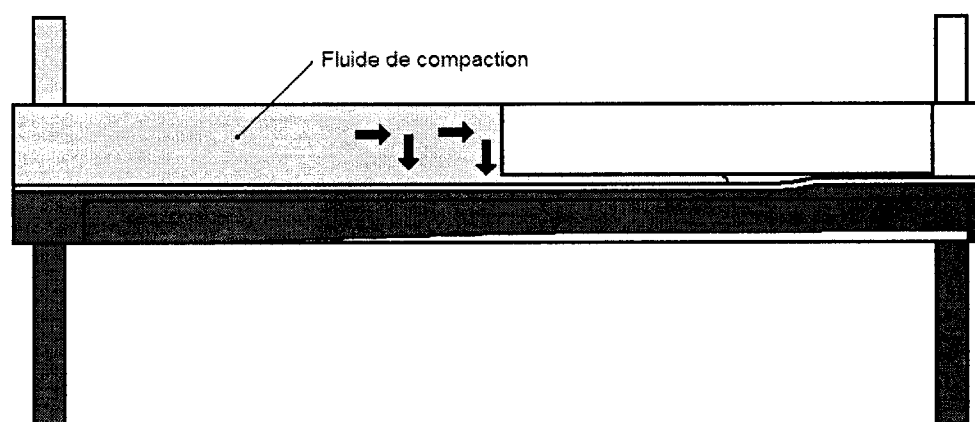


Figure 32 : Obstacle rectangulaire : injection du fluide de compaction.

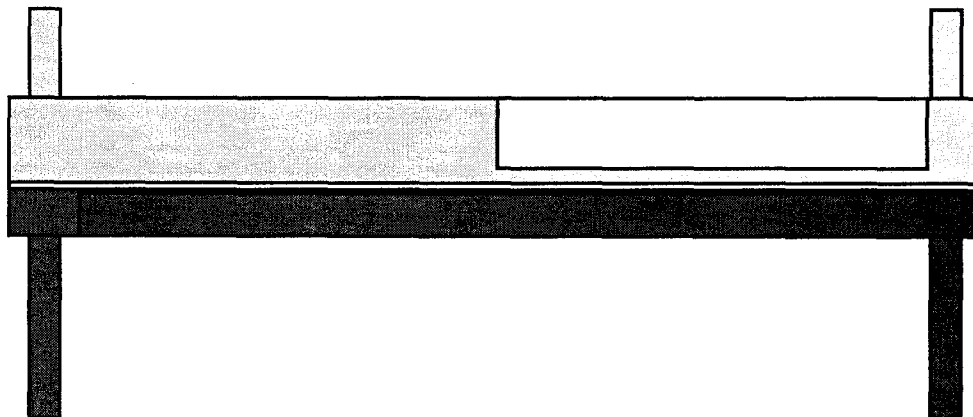


Figure 33 : Obstacle rectangulaire : évacuation du fluide de compaction.

1.2.11 Plan d'expérience

Pour valider ces différentes hypothèses, chaque géométrie sera testée à l'intérieur du moule. Pour chaque géométrie, deux essais seront effectués. De plus, deux essais supplémentaires seront réalisés avec le moule original sans obstacle dans la chambre de compaction pour fins de comparaison. Le plan d'expérience prévu est le suivant :

- 2 essais sans obstacle;
- 2 essais avec l'obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur toute la longueur du moule;
- 2 essais avec l'obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur la première moitié du moule;
- 2 essais avec l'obstacle rectangulaire.

Chacun des essais sera effectué pour les mêmes conditions d'injection (cf. Tableau 3 à la section 1.2.9 1.2.9.5 .

Une fois démoulée, les pièces seront observées pour remarquer les différentes caractéristiques perceptibles à l'œil nu telles que les zones sèches ou les accumulations

de résine. Ensuite, les pièces seront découpées en 3 sections pour déterminer précisément leur épaisseur en plusieurs points. Toutes ces informations seront rassemblées dans des tableaux pour analyser l'imprégnation et la qualité des pièces en fonction de la géométrie présente dans la chambre de compaction.

1.2.12 Résultats

1.2.12.1 Caractéristiques des injections

Comme mentionné dans la section 1.2.9 d, toutes les injections ont été enregistrées sur vidéo. Ces vidéos permettent de dégager certaines observations sur les injections qui seront résumées dans le Tableau 4. Le Tableau 5 présente des caractéristiques quantitatives comme les temps d'injection et les quantités de résine injectée. Les abréviations suivantes seront utilisées à l'intérieur des tableaux pour faciliter la compréhension :

AU : aucune géométrie;

TR : obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur toute la longueur du moule;

PTR : obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur la première moitié du moule;

OR : obstacle rectangulaire placé dans la seconde moitié du moule.

Tableau 4 : Observations sur les injections réalisées

No.	Référence	Géométrie	Observations
2	E06PF1_ga02	AU	Rien de particulier.
3	E06PF1_ga03	TR	Rien de particulier.
4	E06PF1_ga04	TR	Nouvelle membrane.
5	E06PF1_ga05	PTR	L'écoulement de la résine devient très lent à la fin de la géométrie à section triangulaire. Lorsque le fluide de compaction dépasse la géométrie de section triangulaire, de la turbulence est observée en raison du changement brusque de section.
6	E06PF1_ga06	PTR	Idem que pour la pièce no. 5. Par contre, les fronts de la résine et du fluide de compaction ne sont pas rectilignes.
7	E06PF1_ga07	OR	Front de la résine non rectiligne. Préforme légèrement plus courte (121 mm x 350 mm).
8	E06PF1_ga08	OR	Nouvelles préformes.
9	E06PF1_ga09	AU	Trop de résine injectée à l'intérieur du moule.

Tableau 5 : Caractéristiques quantitatives des injections

N°	Référence	Géo.	Temps d'injection	Poids de la préforme	Poids de la pièce	Résine injectée	Résine dans la pièce
			s	g	g	g	g
2	E06PF1_ga02	AU	12,1	214,02	325,22	250	111,2
3	E06PF1_ga03	TR	10,6	210,89	331,31	260	120,42
4	E06PF1_ga04	TR	9,8	211,47	327,83	260	116,36
5	E06PF1_ga05	PTR	14,8	209,32	328,74	260	119,42
6	E06PF1_ga06	PTR	16,0	213,18	338,14	260	124,96
7	E06PF1_ga07	OR	11,2	210,72	321,01	260	110,29
8	E06PF1_ga08	OR	11,8	210,55	334,18	260	123,63
9	E06PF1_ga09	AU	13,0	209,45	351,00	260	141,55

1.2.12.2 Caractéristiques visuelles des pièces

Tableau 6 : Caractéristiques visuelles des pièces

No	Référence	Géo.	Caractéristiques visuelles
2	E06PF1_ga02	AU	Zone sèche importante à 40 mm du port d'injection de la résine. La zone sèche s'étend sur 70 mm et n'est apparente que sur le dessous de la pièce. Accumulation de résine au port d'évacuation de la résine de taille approximative 10 x 110 x 3 mm.
3	E06PF1_ga03	TR	Aucune zone sèche importante. Les deux côtés de la pièce ont par contre été moins bien imprégnés. Accumulation de résine au port d'évacuation de la résine de taille approximative 7 x 110 x 5 mm.
4	E06PF1_ga04	TR	Zone sèche mineur au centre droit de la pièce sur le dessous. Aucune accumulation de résine au port d'évacuation.
5	E06PF1_ga05	PTR	Zone sèche à 90 mm du port d'évacuation de la résine. Cette zone sèche est apparente des deux côtés de la pièce, mais moins sur le dessus que sur le dessous. La zone sèche est décalée vers la droite de la pièce et a une dimension de 30mm par 45mm. Accumulation de résine au port d'évacuation de la résine de taille approximative 10 x 60 x 4 mm.
6	E06PF1_ga06	PTR	Zone sèche à 90 mm du port d'évacuation de la résine. Cette zone sèche est surtout apparente sur le dessous de la pièce mais peut être décelée au dessus. Cette zone sèche a une dimension de 118 mm par 30 mm. Aucune accumulation de la résine au port d'évacuation.
7	E06PF1_ga07	OR	Aucune zone sèche apparente. Accumulation de résine au port d'injection de taille approximative 10 mm x 110 mm x 2 mm. Accumulation de résine au port d'évacuation qui s'étend sur les côtés de la pièce sur une longueur de 150 mm.
8	E06PF1_ga08	OR	Légère zone sèche à 70 mm du port d'injection de la résine et a une dimension de 30 mm par 40 mm. Accumulation de résine au port d'injection à l'évent et sur les côtés de la pièce.
9	E06PF1_ga09	AU	Effet de vague sur la seconde moitié de la pièce causée probablement par la membrane qui est devenue trop molle. Trop de résine injectée.

Chaque pièce a été observée et manipulée pour analyser ses différentes caractéristiques perceptibles à l'œil nu. La présence de zones sèches, d'accumulation de résine ou autres points particuliers a été documentée et regroupées dans le Tableau 6. Noter que la pièce 9 est la seconde pièce fabriquée sans obstacle dans la chambre de compaction. La fatigue de la membrane et le fait qu'une trop grande quantité de résine a été injectée à l'intérieur de la cavité empêche d'utiliser cette pièce dans l'analyse des résultats. Par contre, lors d'essais préliminaires qui n'ont pas été documentés, les résultats étaient sensiblement identiques à ceux obtenus avec la pièce E06PF1_ga02 sans obstacle dans la chambre de compaction. Des photos des pièces ont été incluses dans ce rapport.

1.2.12.3 Photos des pièces

Les photos qui suivent présentent les zones sèches de chaque pièce fabriquée lors de ce plan d'expérience. Le contraste et la luminosité des photos ont été augmentés afin de mieux voir les zones sèches. Les pièces sur les photos sont toujours positionnées avec le port d'injection de la résine à gauche de la photo.

Aucune géométrie

Pièce : E06PF1_ga02

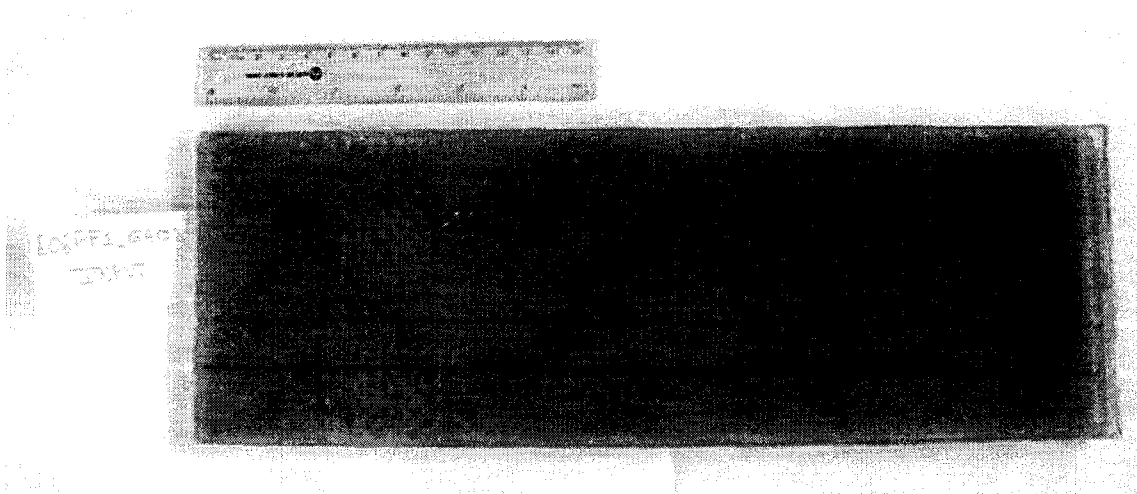


Figure 34 : Photo pièce E06PF1_ga02.

Pente linéaire sur toute la longueur du moule

Pièces : E06PF1_ga03 et E06PF1_ga04

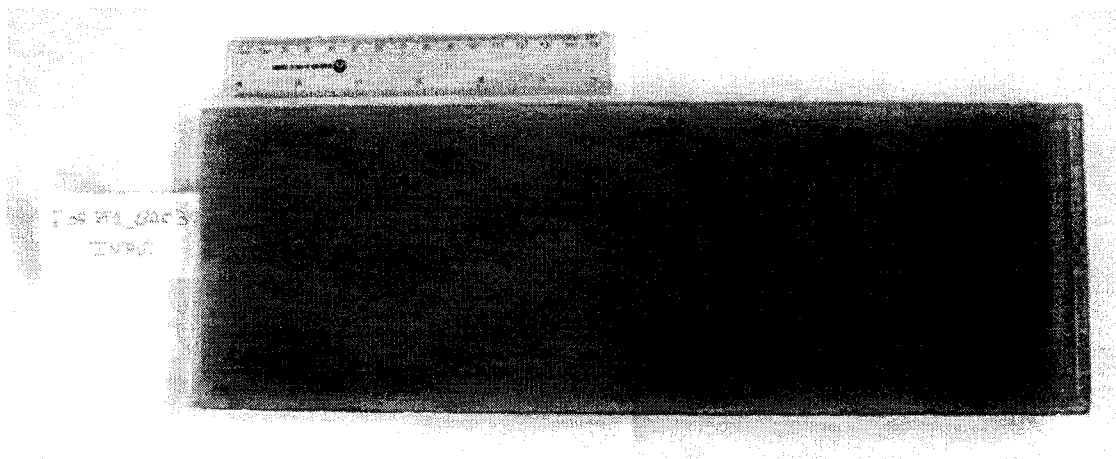


Figure 35 : Photo pièce E06PF1_ga03.

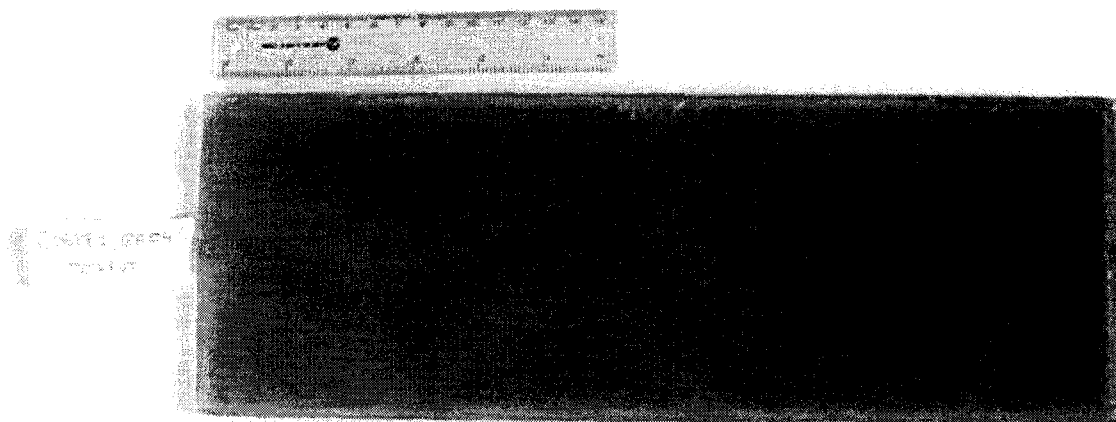


Figure 36 : Photo pièce E06PF1_ga04.

Pente linéaire sur la première moitié du moule

Pièces : E06PF1_ga05 et E06PF1_ga06

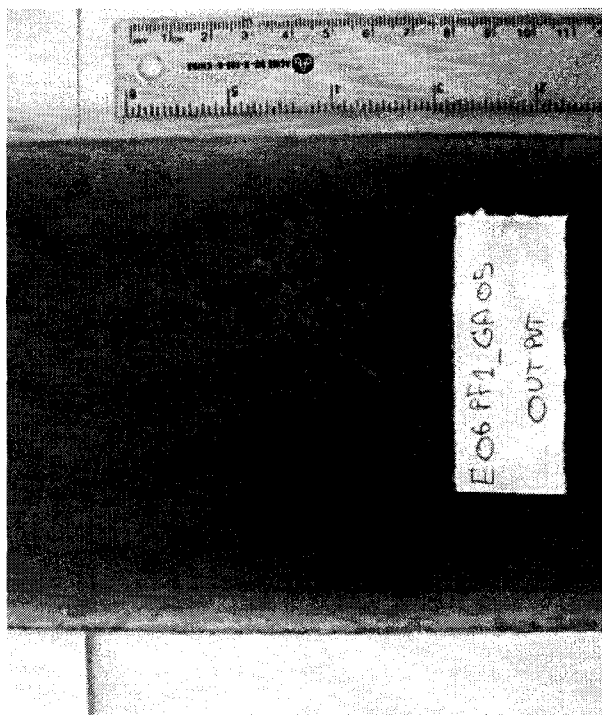


Figure 37 : Photo pièce E06PF1_ga05.

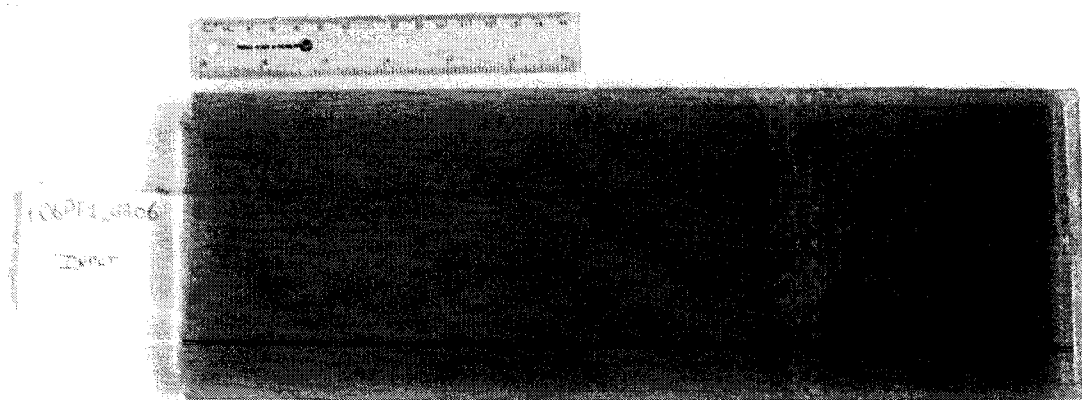


Figure 38 : Photo pièce E06PF1_ga06.

Obstacle rectangulaire dans la seconde moitié du moule

Pièces : E06PF1_ga07 et E06PF1_ga08

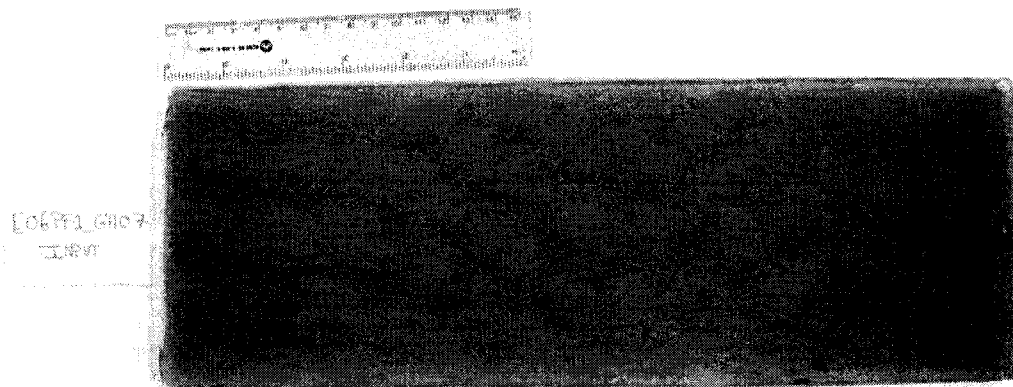


Figure 39 : Photo pièce E06PF1_ga07.

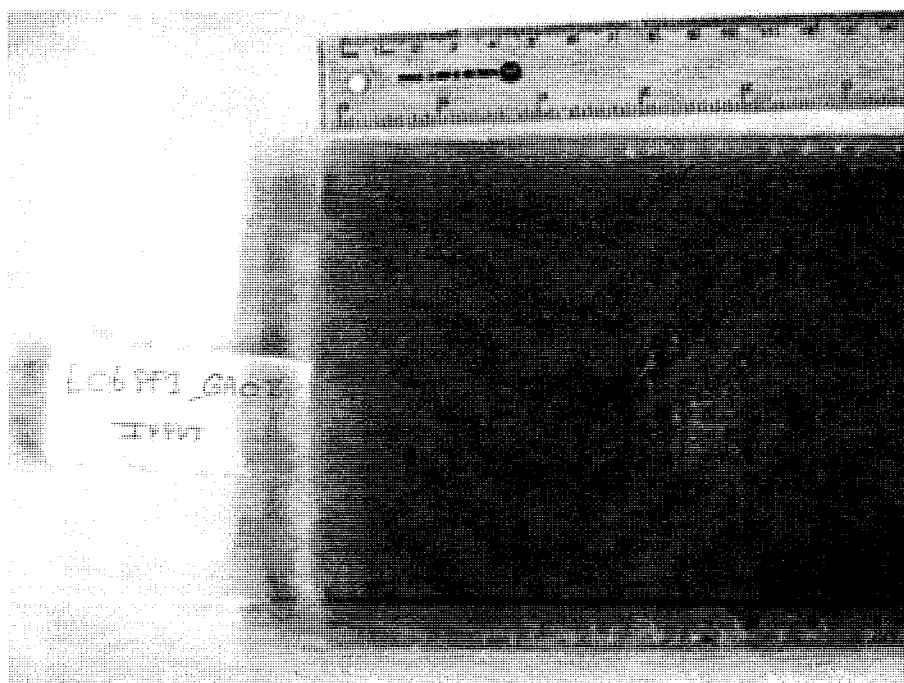


Figure 40 : Photo pièce E06PF1_ga08.

1.2.12.4 Mesure de l'épaisseur des pièces

Les pièces ont été découpées en 3 segments pour mesurer précisément leur épaisseur en plusieurs points de la surface. En tout, l'épaisseur de la pièce a été prise en 90 points de la surface. La Figure 41 montre comment les pièces ont été découpées et où les mesures d'épaisseur ont été prises. À partir de ce patron, des points ont été marqués au crayon sur les pièces et, à l'aide d'un micromètre, l'épaisseur de la pièce a été relevée en tous ces points. Ces résultats ont été compilés, et les valeurs extrêmes dues aux imperfections du port d'injection et d'évacuation de la résine rejetées. Les résultats des moyennes d'épaisseur et des écarts type d'épaisseur de chaque pièce sont regroupés dans le Tableau 7.

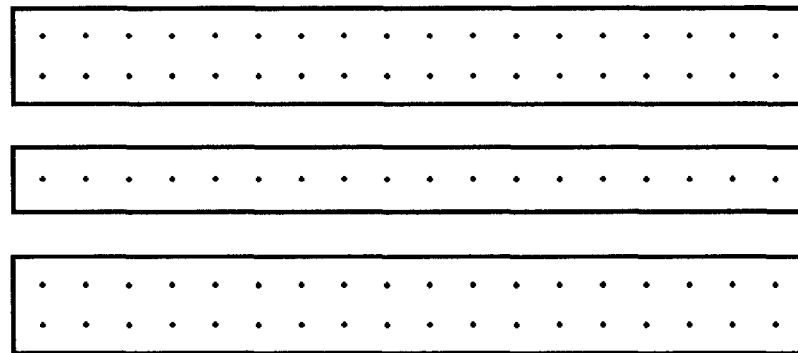


Figure 41 : Pièce segmentée pour prise de mesures d'épaisseur.

Tableau 7 : Épaisseur des pièces

No.	Référence	Géométrie	Moyenne d'épaisseur	Écart type
			mm	mm
2	E06PF1_ga02	AU	4,35	0,083
3	E06PF1_ga03	TR	4,47	0,069
4	E06PF1_ga04	TR	4,47	0,059
5	E06PF1_ga05	PTR	4,51	0,151
6	E06PF1_ga06	PTR	4,69	0,224
7	E06PF1_ga07	OR	4,69	0,641
8	E06PF1_ga08	OR	4,85	0,569

Les résultats des épaisseurs des pièces mesurées en 90 points de la surface ont ensuite été transférés sur des graphiques pour représenter les changements d'épaisseur. Les 7 figures qui suivent (Figure 42, Figure 43, Figure 44, Figure 45, Figure 46, Figure 47, Figure 48) illustrent les surfaces des pièces. Les dimensions ont été exagérées en épaisseur pour mieux représenter les zones riches en résine et les zones plus sèches. Noter que les figures sont positionnées avec le port d'injection de la résine à gauche de la figure.

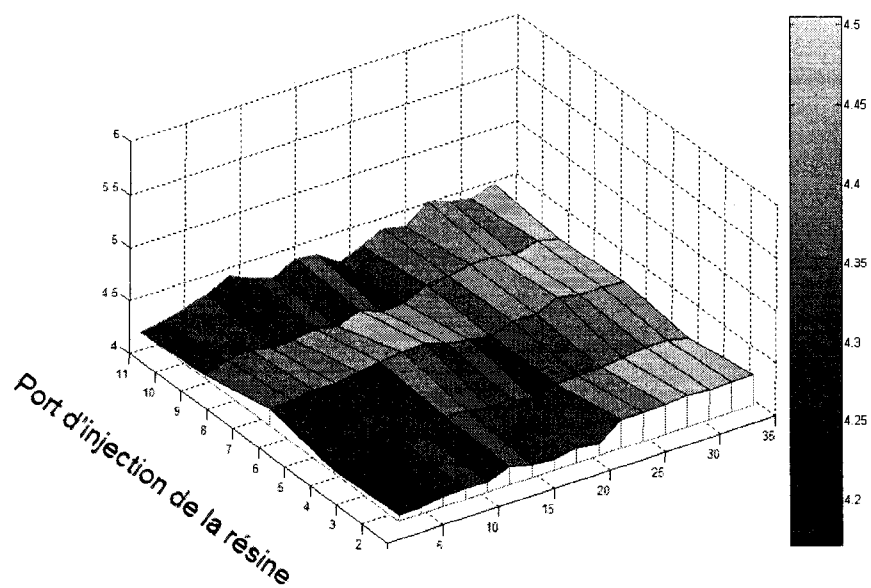


Figure 42 : Surface de la pièce E06PF1_ga02.

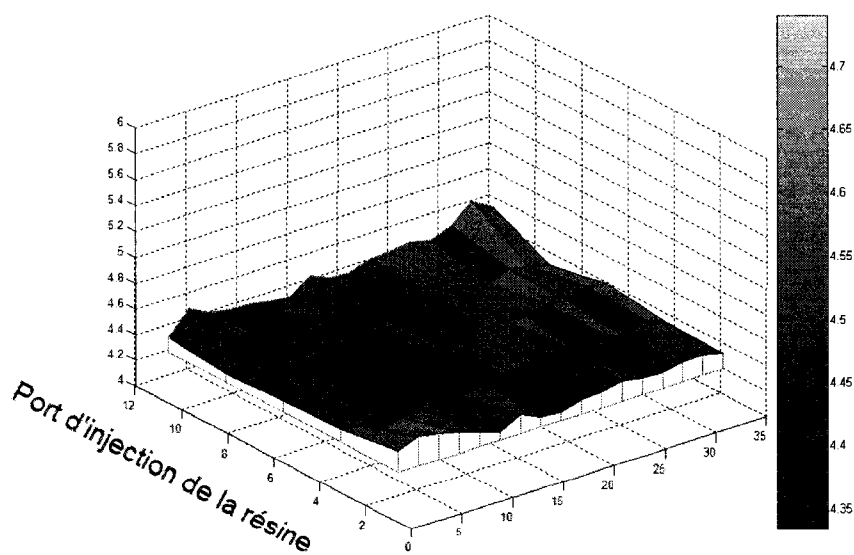


Figure 43 : Surface de la pièce E06PF1_ga03.

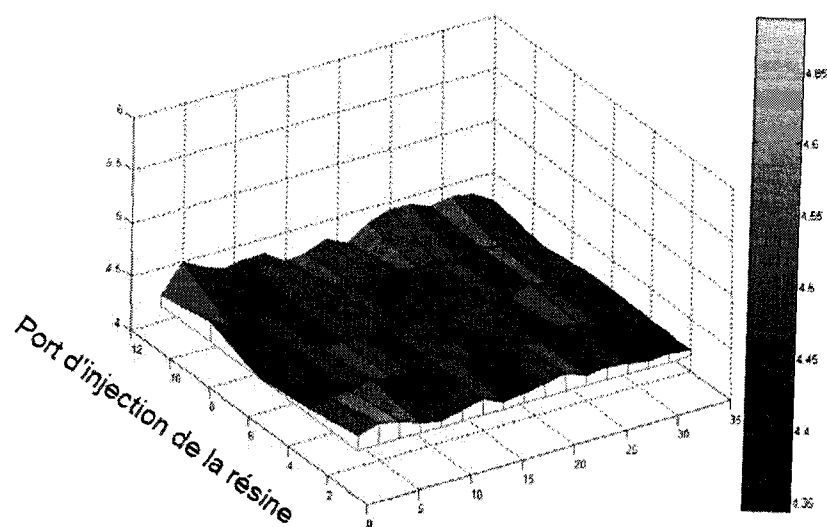


Figure 44 : Surface de la pièce E06PF1_ga04.

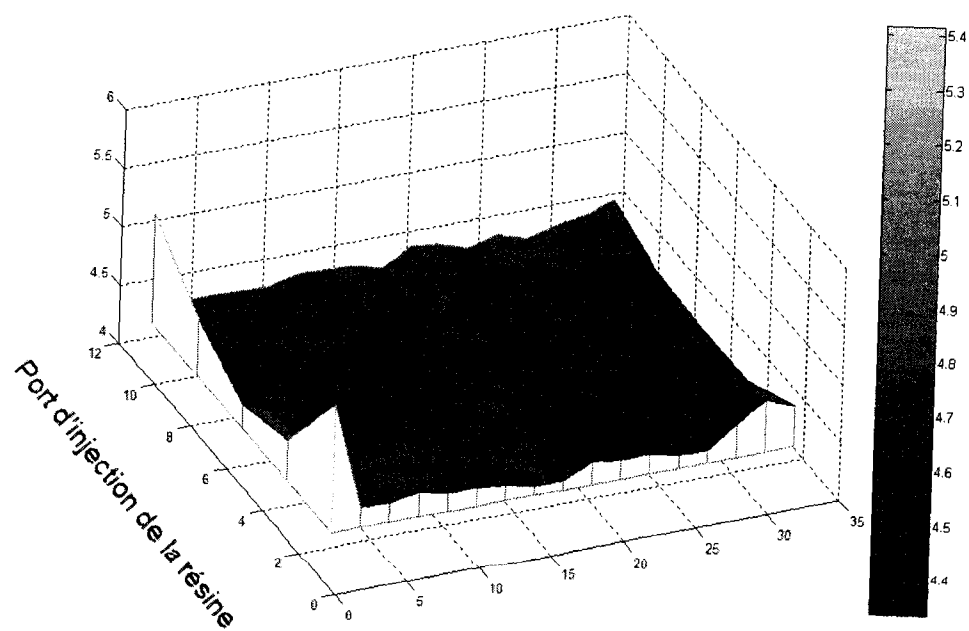


Figure 45 : Surface de la pièce E06PF1_ga05.

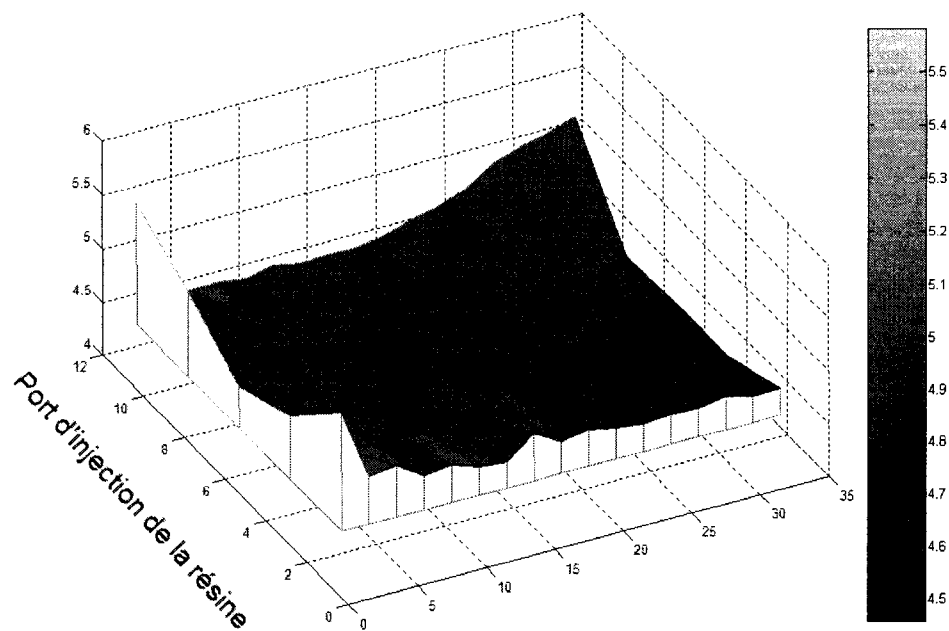


Figure 46 : Surface de la pièce E06PF1_ga06.

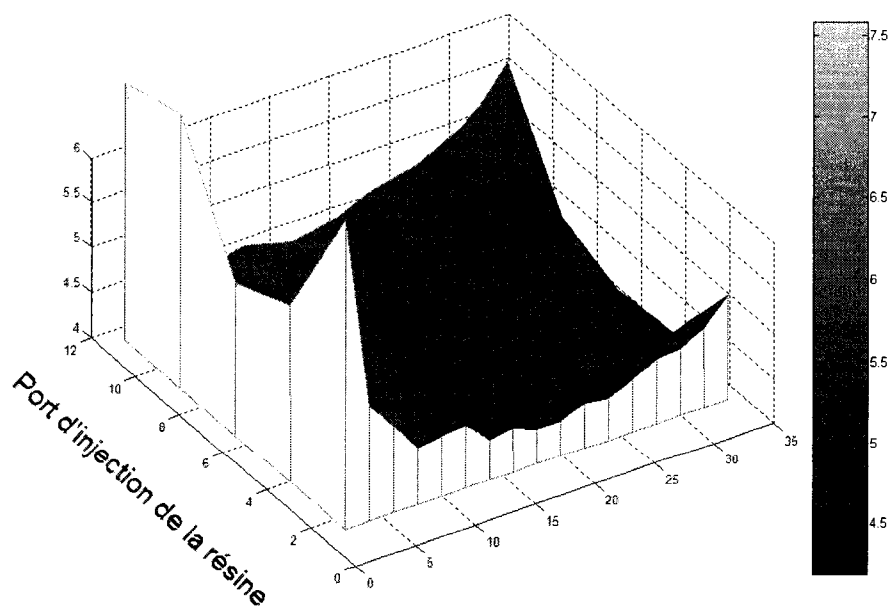


Figure 47 : Surface de la pièce E06PF1_ga07.

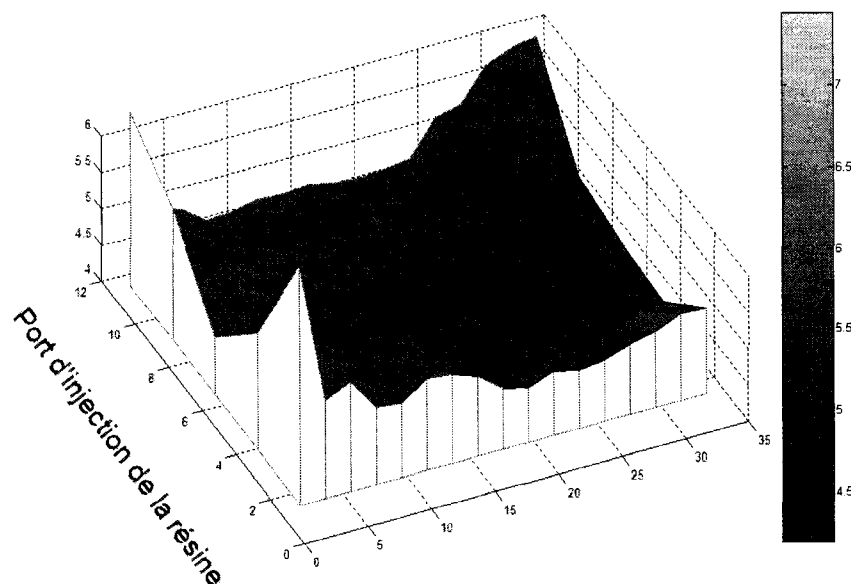


Figure 48 : Surface de la pièce E06PF1_ga08.

1.3 Analyse

1.3.1 Imprégnation

De façon générale, il est possible de remarquer que la géométrie de la chambre de compaction a un impact sur l'imprégnation des pièces. Les résultats obtenus ont démontré que pour chaque obstacle présent dans la chambre de compaction, la résine avait tendance à imprégner le renfort d'une façon différente. De plus, en répétant les expériences 2 fois pour chaque type d'obstacle, on constate que les résultats sont sensiblement identiques. L'analyse de l'imprégnation du renfort pour chaque type d'obstacle étudié sera effectuée maintenant.

1.3.1.1 Aucun obstacle

Dans le cas général où aucune géométrie n'est présente dans la chambre de compaction, les résultats correspondent à nos prédictions. Par contre, un seul essai a fourni les résultats pertinents. Le second essai sans obstacle à l'intérieur de la chambre de

compaction ne possède pas les mêmes caractéristiques que les autres. En effet, une trop grande quantité de résine a été injectée à l'intérieur du moule et la membrane a présenté un comportement inhabituel en créant des vagues sur la surface de la pièce. Ce comportement de la membrane est sûrement dû au fait qu'elle ne possédait plus les mêmes propriétés mécaniques que lors des essais précédents.

En examinant les caractéristiques visuelles de la pièce E06PF1_ga02, on peut remarquer que la zone sèche présente dans la première section de la pièce correspond à l'hypothèse énoncée à la section 1.1 . En effet, lors de l'injection du fluide de compaction à l'intérieur du moule, toute la résine a été transportée à l'extrémité du moule, laissant la première section de la pièce moins bien imprégnée. De plus, les résultats présentés dans la Figure 42 montrent qu'il y a une légère accumulation de résine sur toute la seconde moitié de la pièce.

L'écart type des données d'épaisseur montre par contre qu'il n'y pas un gros écart entre les données, même si les résultats présentent une légère accumulation de résine en fin de moule.

1.3.1.2 Obstacle rectangulaire créant une pente linéaire sur toute la longueur du moule

Cet obstacle présente les meilleurs résultats à tous les niveaux. En effet, c'est lors des essais avec cet obstacle présent dans la chambre de compaction, que les résultats sur l'imprégnation des fibres, le temps d'injection et l'épaisseur des pièces ont été les meilleurs.

Le temps d'injection moyen pour les deux essais effectués avec cet obstacle a été d'environ 10 secondes, environ 15% plus court que lors de l'essai sans aucune géométrie à l'intérieur de la chambre de compaction.

Aucune zone sèche n'est apparente sur aucune des deux pièces. Une zone sèche est présente dans la pièce E06PF1_ga04 mais d'une taille minimale comparativement à la surface totale de la pièce. Elle est sûrement due à un mauvais positionnement de la membrane ou à un défaut à l'intérieur de la préforme. Il faudrait répéter les expériences avec cet obstacle à l'intérieur de la chambre de compaction pour vérifier si cette zone sèche est reliée à cet obstacle où s'il ne s'agit que d'une anomalie ponctuelle.

La Figure 43 et la Figure 44 montrent que l'épaisseur de la pièce semble être assez uniforme et ne présente pratiquement aucune accumulation locale de résine. L'écart type de ces mesures le confirme.

En général, les hypothèses présentées dans la section 1.2.10 a sont confirmées par les expériences. Il serait intéressant de tester cette géométrie avec différentes pentes pour vérifier si on peut obtenir de meilleurs résultats au niveau du temps d'injection et/ou de l'imprégnation des fibres.

1.3.1.3 Obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur la première moitié du moule

Les résultats obtenus avec l'obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur la première moitié du moule n'ont pas été concluants. L'épaisseur finale de l'obstacle était trop importante, presque égale à celle de la chambre de compaction. Ceci a pour effet de ralentir considérablement la résine et le fluide de compaction à cet endroit. Pour cette raison, les résultats ne sont peut-être pas associés à la géométrie de l'obstacle, mais plutôt à cet effet particulier créé par l'épaisseur trop importante de l'obstacle.

Le temps d'injection moyen des deux essais réalisés avec cet obstacle est d'environ 15 à 16 secondes. Ce temps environ 25% plus long que lors des essais sans aucune géométrie dans la chambre de compaction est principalement dû au ralentissement de la résine et du fluide de compaction.

Au sujet de la zone sèche dans la seconde moitié de la pièce, ceci est probablement causé par un effet de turbulence lorsque la résine et le fluide de compaction rencontrent le changement brusque de section causé par l'obstacle. Dans les deux essais, cette zone sèche se trouve exactement à la même position sur la pièce. Elle est par contre moins visible dans la première pièce (E06PF1_ga05). Il faudrait refaire plusieurs essais avec cette géométrie pour vérifier si ce résultat est répétable.

Au niveau de l'épaisseur de la pièce, on remarque une accumulation de résine en début du moule. Ceci résulte peut-être de la membrane qui perd ses propriétés mécaniques après un certain nombre d'injections. La membrane a été changée avant la pièce E06PF1_ga04. Ceci explique peut-être l'accumulation de résine au port d'injection dans les pièces E06PF1_ga05 à E06PF1_ga08. De plus, l'accumulation importante de résine du côté gauche de la seconde section de la pièce E06PF1_ga06 explique peut-être pourquoi la zone sèche présente dans cette pièce est plus importante que dans la pièce E06PF1_ga05.

1.3.1.4 Obstacle rectangulaire

En ce qui concerne les pièces réalisées avec l'obstacle rectangulaire, les résultats obtenus ne sont pas dans le sens des objectifs du projet. Les pièces réalisées présentent des accumulations de résine en plusieurs zones et les temps d'injection sont semblables à ceux des pièces réalisées sans obstacle.

Par contre, aucune zone sèche importante ne s'est formée à l'intérieur des pièces. Une légère zone sèche s'est créée en début de moule pour la pièce E06PF1_ga08, mais il faudrait faire d'autres essais avec cette géométrie pour vérifier s'il s'agit d'un cas isolé. Par contre, plusieurs microbulles se sont formées sur l'ensemble des deux pièces. La présence de ses bulles comparativement aux autres pièces du plan d'expérience s'explique peut-être par le fait que pour ces deux pièces, de nouvelles préformes ont dû être fabriquées. Ces préformes n'ont peut-être pas exactement la même composition ou

les mêmes caractéristiques que les autres, même si elles ont été fabriquées de la même manière.

Les temps d'injection de ces pièces sont semblables à ceux des pièces réalisées sans aucune géométrie à l'intérieur de la chambre de compaction. En moyenne, pour les deux essais, le temps d'injection est d'environ 11.5 secondes.

Les pièces présentent dans les deux cas une accumulation de résine au niveau de la seconde moitié de la pièce sur les deux côtés. La Figure 47 et la Figure 48 montrent cette particularité. La présence de ces accumulations de résine s'explique sûrement par le fait que l'obstacle n'était pas aussi large que la chambre de compaction. L'espace libre était d'environ 3 mm à 4 mm. Cette légère différence a peut-être causé ces accumulations de résine. Il se peut aussi que cet effet soit causé par les nouvelles préformes fabriquées pour ces pièces.

CONCLUSION

Les essais préliminaires ont montré que le comportement de la résine dans un procédé d'injection flexible était bien différent selon le type de renfort utilisé. En effet, avec l'utilisation des renforts à fibres aléatoires, la résine a tendance à bien imprégner les fibres dès son entrée dans le moule. Par contre, avec l'utilisation des tissus, la résine s'écoule au-dessus des fibres. Lorsque le fluide de compaction est injecté à l'intérieur du moule, la résine se déplace en grande partie dans la dernière section du moule, laissant la première partie du renfort moins bien imprégnée. Dans ce dernier cas, un plan d'expérience a été établi afin d'utiliser différentes géométries à l'intérieur de la chambre de compaction pour forcer l'imprégnation des fibres uniformément sur toute la longueur de la cavité.

Trois types d'obstacles ont été utilisés, soit un obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur toute la longueur du moule, un obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur la première moitié du moule et un obstacle rectangulaire placé dans la seconde moitié du moule. Deux pièces par géométrie ont été fabriquées avec les mêmes conditions d'injection. Les temps d'injection et les caractéristiques physiques des pièces ont été notés pour tirer des conclusions sur l'imprégnation des pièces selon les différents types de géométrie insérées dans la chambre de compaction. L'obstacle qui a donné les meilleurs résultats pour tous les points considérés est l'obstacle de section verticale triangulaire créant une pente linéaire sur toute la longueur du moule. Le temps d'injection est environ 15% plus court que les essais réalisés sans aucune géométrie à l'intérieur de la chambre de compaction. De plus, l'imprégnation est uniforme sur toute la pièce et ne présente pratiquement aucune accumulation de résine en aucun point de la surface. Les autres géométries donnent aussi de bons résultats sur lesquels on peut tirer des conclusions intéressantes, mais les essais devraient être poursuivis en améliorant la qualité des obstacles pour vérifier l'influence véritable de la géométrie de l'obstacle sur l'imprégnation des fibres.

RECOMMANDATIONS

Comme mentionné à plusieurs reprises lors de l'analyse des résultats, les essais avec chaque géométrie devraient être recommencés à plusieurs reprises pour confirmer l'effet de chaque géométrie sur l'imprégnation des pièces. Dans plusieurs cas, les deux pièces fabriquées avec la même géométrie ne présentaient pas exactement les mêmes résultats. Il était donc difficile d'affirmer si les résultats obtenus dans une pièce ou dans l'autre étaient vraiment représentatifs de l'obstacle inséré dans la chambre de compaction.

Les obstacles devraient être fabriqués d'une façon plus précise afin d'éliminer le plus possible les sources d'erreur provenant de leur géométrie. Par exemple, les obstacles pourraient être usinés dans un verre d'acrylique afin de mieux contrôler les différents paramètres comme l'épaisseur, la largeur ou la pente des obstacles.

L'injection des pièces de ce plan d'expérience devrait être réalisée à débit constant plutôt qu'à pression constante afin de mieux contrôler la quantité de résine injectée et la vitesse du front de résine. Ceci permettrait d'avoir des résultats plus homogènes au niveau des épaisseurs moyennes afin pouvoir tirer des conclusions plus systématiques.

PERSPECTIVES

Des travaux devraient être effectués sur le comportement de la membrane à l'intérieur du moule. Dans plusieurs cas, les expériences ont montré que le type de membrane et ses caractéristiques physiques ont une importance capitale sur les résultats.

