

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE EXPÉRIMENTALE ET OPTIMISATION D'UN PROCÉDÉ
D'INJECTION FLEXIBLE POUR LA FABRICATION RAPIDE DES COMPOSITES

ERIC ALLARD

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE MÉCANIQUE)

NOVEMBRE 2006



Library and
Archives Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-47647-5
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-47647-5

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.

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

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

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


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ANALYSE EXPÉRIMENTALE ET OPTIMISATION D'UN PROCÉDÉ
D'INJECTION FLEXIBLE POUR LA FABRICATION RAPIDE DES COMPOSITES

Présenté par : ALLARD Eric

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

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

M. SANSCHAGRIN Bernard, D. Ing., président

M. RUIZ Eduardo, Ph.D., membre et directeur de recherche

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

M. LÉVESQUE Martin, Ph.D., membre

Je dédie ce mémoire à ma famille,
dont je serai éternellement redevable

Vis comme si tu devais mourir demain. Apprends comme si tu devais vivre toujours.
[Gandhi]

Rêve de grandes choses : cela te permettra d'en faire au moins de toutes petites.
[Jules Renard]

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord le directeur de la chaire CHP (Composites à Haute Performance) M. François Trochu pour m'avoir donné cette opportunité d'effectuer ce travail de recherche sur la fabrication des matériaux composites. À mon arrivée, il m'avait dit que si je maîtrisais le procédé Polyflex, je comprendrais plusieurs autres procédés de fabrication des composites. Bien aujourd'hui, sans dire que je les maîtrise tous, je les comprends bien en effet et cela m'a permis de fabriquer quelques pièces personnelles dont je suis maintenant fier.

J'exprime également ma reconnaissance envers mon directeur de recherche M. Eduardo Ruiz qui m'a transmis beaucoup d'idées et qui m'a généreusement fait profiter de ses vastes connaissances dans le domaine des matériaux composites.

Je tiens à remercier pour leur appui et leur aide les nombreux collègues de la chaire que j'ai côtoyés lors de ces deux ans d'étude formidables, les étudiants de maîtrise et de doctorat, les techniciens, stagiaires et associés de recherche. Tous les nommer serait vraiment long mais j'ai vraiment apprécié travailler avec ce groupe. Je n'oublierai pas la contribution de ces gens qui m'ont appuyé et aidé.

Mes remerciements vont aussi à la Chaire sur les Composites à Haute Performance (CCHP), au Conseil de la Recherche en Sciences Naturelles et Génie (CRSNG) et à General Motor (GM) pour leur appui financier. Enfin je tiens à remercier M. Bernard Sanschagrín et M. Martin Lévesque pour avoir accepté d'être membres de mon jury.

RÉSUMÉ

Le domaine de la fabrication de pièces en composites abonde de procédés différents ayant chacun leurs propres caractéristiques. Parmi ceux-ci, les procédés d'injection de résine en moule fermé sont actuellement en pleine expansion en raison de leur grande flexibilité pour la fabrication de pièces composites complexes. Le procédé RTM (« *Resin transfer molding* ») constitue la technique de fabrication par injection la plus connue et la plus répandue. L'industrie l'utilise actuellement pour réaliser des cadences de production moyenne d'environ quelques milliers de pièces par an. Un nouveau procédé de fabrication par injection flexible nommé Polyflex vise à augmenter le volume de production à environ 20 000 pièces par an. Le projet de recherche présenté dans ce mémoire consiste à étudier expérimentalement le comportement et la mise en oeuvre de ce nouveau procédé.

Le procédé Polyflex permet une imprégnation rapide du renfort à faible pression d'injection de résine dans un moule contenant deux cavités séparées par une membrane flexible. La technique consiste à injecter une quantité appropriée de résine dans la cavité inférieure du moule contenant le renfort fibreux. Ensuite, le fluide de compaction est introduit sous pression dans la cavité supérieure du moule pour favoriser l'imprégnation des fibres sèches. Lorsque le fluide de compaction a rempli la chambre supérieure, la pression est maintenue pour consolider le renfort saturé. En plus de permettre un temps de remplissage plus rapide comparé au procédé RTM (injection en moule rigide), la nouvelle technologie Polyflex permet de fabriquer des pièces aux performances améliorées grâce à la compaction du composite. En effet, la compression du composite diminue le taux de vide et permet de fabriquer des pièces avec un taux de fibres élevé.

L'objectif principal de ce projet consiste à analyser les paramètres de fabrication dans le but de minimiser le temps de remplissage et d'améliorer la qualité des pièces produites. Un second objectif a porté sur la mise en place de nouveaux systèmes d'injection de la

résine et du fluide de compaction. Les travaux menés ont aussi permis de valider expérimentalement la performance des systèmes d'injection. À cette fin, trois plans d'expérience ont été réalisés. Les paramètres de fabrication étudiés s'articulent principalement autour du fluide de compaction avec la viscosité et les profils de la pression de compaction, mais également autour des caractéristiques du moule comme l'épaisseur de la cavité. Le moule utilisé est fait de PMMA (Acrylique), un matériau transparent qui permet de suivre l'évolution de l'écoulement des deux fluides pendant l'imprégnation du renfort. Ce moule permet de fabriquer des plaques rectangulaires de 375 x 125 mm.

La vitesse d'imprégnation du renfort peut être augmentée en cyclant la pression de compaction pendant l'injection du fluide de compaction en comparaison avec des essais à pression constante. Deux modes d'écoulement se produisent selon que le renfort occupe en totalité la cavité du moule ou seulement en partie. L'impact de ces deux types d'écoulement sur le temps d'imprégnation a été étudié. On a pu vérifier que l'injection de résine à faible pression à travers un renfort de haute perméabilité plane occupant en totalité une cavité de dimension égale à environ deux fois l'épaisseur finale de la pièce produisait la meilleure performance en terme de temps de remplissage du moule.

Les expériences ont également permis de constater une diminution de l'épaisseur dans les pièces produites à partir de la ligne de croisement des fronts des deux fluides (résine et fluide de compaction) pendant la phase d'injection. Ce résultat était prévisible dans la mesure où le fluide de compaction, lorsqu'il a dépassé le front de résine, commence à compacter le renfort non imprégné. Ceci diminue la perméabilité du renfort et retarde la propagation de la résine qui polymérise avant que l'épaisseur ne soit uniformisée dans la pièce. Une augmentation de la viscosité du fluide de compaction contribue à repousser la ligne de croisement où l'épaisseur de la pièce diminue. Afin d'éliminer cette variation d'épaisseur, on a essayé de cycler la pression de compaction pour favoriser une dispersion plus uniforme de la résine. Cependant les résultats n'ont pas été concluants pour une faible fréquence de compaction.

ABSTRACT

Composite manufacturing includes many different processes with their own characteristics. Among them, resin injection processes in closed molds continue to grow due to their high degree of flexibility in the manufacturing of composite parts of all shapes, dimensions and degrees of complexity. Resin transfer molding process is one of the most known and most widespread of all injection processes. The automobile industry uses it for medium production rates up to 20,000 parts per year. A new composite manufacturing process employing flexible injection named Polyflex aims to increase production rates necessary for cost effective molding in the automobile industry market. This research project is the first evaluation of this new injection process.

The Polyflex process speed up the impregnation of the reinforcement at low resin injection pressure in a closed mold which has two chambers divided by a flexible membrane. The technique employs injecting the suitable volume of resin in the lower mold chamber containing the reinforcement. Then, the compaction fluid is injected at a higher controlled pressure into the upper mold chamber. The wave front of the fluid and the distributed pressure above the membrane cause the resin to flow across then through the reinforcement, at a much faster rate than traditional injection allows. When the compaction fluid has filled the compaction chamber, pressure is maintained to improve the consolidation of the composite part. Another advantage using the Polyflex technique is the ability to increase the fiber volume due to the increased pressure capability. The manufactured parts result in improved mechanical properties due to the increased fiber percentage achieved. Also, the high compression of the composite part decreases the void content which again will reduce the number of defects in the part and improve the mechanical properties.

The main objective of this project consists in analyzing the fabrication parameters to reduce the filling time and to improve part quality. A second objective involves

developing the injection systems for the resins and the compaction fluid and to validate their performance experimentally. With this intention, three plans of experiments were carried out. The fabrication parameters studied were: the viscosity, the pressure of the compaction fluid and the dimension of the mold cavity. The mold used was made of PMMA (Acrylic), a transparent material allowing the visualization of the flow of both fluids during the impregnation of the reinforcement. Rectangular composite plaques of 375 X 125 mm were made using this mold.

The speed at which the resin filled the mold increased by cycling the compaction pressure when the compaction fluid was injected in the mold, compared with tests conducted at constant pressure. The impact over the time of filling the mold looking at the different behavior of resin flow, which occurs according to whether the reinforcement fills the mold cavity completely or not was also studied. When the resin is injected at low pressure through a reinforcement with high permeability in the plane, the best performance in terms of mold filling time was obtained when reinforcement fill completely the mold cavity of size equal to approximately twice the final part thickness.

The tests have shown a reduction of part thickness from the crossing line of both fluid fronts (resin and compaction fluid) during the mold filling. This result was foreseeable because the compaction begins to compact the reinforcement when it crosses the resin front producing a decrease in the reinforcement permeability, thus harming the resin propagation which polymerizes before equilibrium of the resin distribution in the part. An increase in the viscosity of the compaction fluid contributes to this phenomenon moving the point where this thickness change occurs. However, the mold filling time is increased. An assumption to eliminate this thickness variation was to cycle the compaction pressure to support a uniform dispersion. However, using a low frequency of the cycle didn't confirm this assumption.

TABLE DES MATIERES

DÉDICACE	IV
REMERCIEMENTS	V
RÉSUMÉ	VI
ABSTRACT	VIII
TABLE DES MATIÈRES.....	X
LISTE DES TABLEAUX	XIV
LISTE DES FIGURES	XVI
LISTE DES SYMBOLES	XXI
LISTE DES ANNEXES.....	XXIII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE	4
1.1 INTRODUCTION.....	4
1.2 MATRICE.....	5
1.2.1 Thermoplastiques	6
1.2.2 Thermodurcissables.....	7
1.2.2.1 Polyester.....	7
1.2.2.2 Vinylester	10
1.2.2.3 Époxy et autres.....	10
1.2.3 Renforts.....	11
1.2.3.1 Verre.....	12
1.2.3.2 Carbone	13
1.2.3.3 Aramide (kevlar 49).....	14
1.2.3.4 Préformage	15

1.3	PROCÉDÉS	15
1.3.1	Drapage en autoclave («Bag molding process»).....	17
1.3.2	Pultrusion	17
1.3.3	Moulage par compression	17
1.3.4	Enroulement filamentaire.....	18
1.3.5	Moulage de composite par injection («Liquid Composite Molding»).....	18
1.3.6	Procédés manuels.....	18
1.4	MOULAGE DE COMPOSITE PAR INJECTION	19
1.5	PERMÉABILITÉ ET LOI DE DARCY	23
1.6	DISTRIBUTION DES VIDES DANS LES MATÉRIAUX COMPOSITES	25
1.7	COMPRESSIBILITÉ ET RELAXATION DES RENFORTS	30
1.7.1	Compressibilité	30
1.7.2	Relaxation	32
1.8	LOI DE TERZAGHI.....	33
CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DU PROCÉDÉ POLYFLEX		36
2.1	INTRODUCTION.....	36
2.2	ÉTAPES DE FABRICATION DU PROCÉDÉ POLYFLEX	37
2.2.1	Étapes préliminaires	38
2.2.1.1	Mise en place des composantes du moule.....	38
2.2.1.2	Mise sous vide.....	39
2.2.2	Étape 1 : injection de la résine	39
2.2.3	Étape 2 : injection du fluide de compaction.....	40
2.2.4	Étape 3 : consolidation et polymérisation du composite.....	41
2.2.5	Démoulage de la pièce fabriquée	43
2.3	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS.....	43
2.4	MODES D'ÉCOULEMENT DE LA RÉSINE	44
2.4.1	Écoulement lorsque $h_0 = H$	45
2.4.2	Écoulement lorsque $h_0 < H$	46
2.5	DESCRIPTION DU MOULE POLYFLEX 1	47

2.6	PARAMÈTRES DE FABRICATION	49
2.7	MÉTHODE DE PRÉFORMAGE	51
2.7.1	Paramètres de préformage.....	51
2.7.2	Formulation de la résine.....	52
2.7.3	Projection de la résine	52
2.7.4	Mise en forme	54
2.8	NOMENCLATURE D'IDENTIFICATION DES EXPÉRIENCES.....	55
2.9	CONCLUSION.....	56
CHAPITRE 3 : PREMIER PLAN D'EXPÉRIENCES		57
3.1	INTRODUCTION.....	57
3.2	MATÉRIAUX UTILISÉS	59
3.3	CONDITIONS D'OPÉRATION	61
3.4	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ.....	65
3.5	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS DU PLAN D'EXPÉRIENCES #1	66
3.5.1	Épaisseur moyenne et écart-type selon la direction longitudinale	67
3.5.2	Épaisseur moyenne et écart-type des plaques fabriquées dans le plan d'expériences #1	69
3.5.3	Étude de la meilleure dérive et covariance	70
3.5.4	Analyse des surfaces krigées de l'épaisseur des plaques fabriquées	74
3.5.5	Analyse des courbes krigées de l'épaisseur des plaques fabriquées	78
3.6	CONCLUSION.....	81
CHAPITRE 4 : DEUXIÈME PLAN D'EXPÉRIENCES.....		82
4.1	INTRODUCTION.....	82
4.2	MATÉRIAUX	82
4.3	CONDITIONS D'OPÉRATION	88
4.4	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ.....	93
4.5	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS DU PLAN D'EXPÉRIENCES #2.....	98

4.5.1	Influence des paramètres de compaction sur le temps d'imprégnation du renfort	100
4.5.2	Influence des paramètres de compaction sur la vitesse de la résine	101
4.5.3	Analyse de l'épaisseur finale de la pièce	107
4.6	CONCLUSION.....	112
CHAPITRE 5 : TROISIÈME PLAN D'EXPÉRIENCES.....		113
5.1	INTRODUCTION.....	113
5.2	MATÉRIAUX	113
5.3	CONDITIONS D'OPÉRATION	126
5.4	PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ.....	137
5.5	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS DU PLAN D'EXPÉRIENCES #3.....	140
5.5.1	Analyse du temps de remplissage	142
5.5.2	Présentation d'une courbe de compaction typique d'une injection Polyflex	145
5.5.3	Analyse des courbes de pression et des pertes de charge.....	146
5.5.4	Analyse du profil de la vitesse d'écoulement de la résine	154
5.5.5	Discussion	157
5.6	CONCLUSION.....	158
CONCLUSION.....		161
RECOMMANDATIONS ET TRAVAUX FUTURS		165
RÉFÉRENCES.....		167
ANNEXES		171

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Propriétés spécifiques en tension de quelques matériaux métalliques et composites structuraux [2]	5
Tableau 1.2 : Synthèse des procédés de fabrication [3] : GD pour Grande Diffusion; HP pour Haute Performance	16
Tableau 1.3 : Paramétrisation des procédés LCM [32]	21
Tableau 2.1 : Formulation de la résine polyester T-580 pour le préformage	52
Tableau 2.2 : Nomenclature d'identification des plaques fabriquées	55
Tableau 3.1 : Paramètres du plan d'expériences #1	66
Tableau 3.2 : Épaisseurs moyennes et écart-types selon les axes longitudinales $y = -45^\circ$, -15° , 15° et 45° (selon Figure 3.8)	68
Tableau 3.3 : Épaisseur moyenne et écart-type des plaques fabriquées dans le plan d'expériences #1	69
Tableau 3.4 : Validation de l'outil de mesure pour le point (228, 45) de la plaque PF1H05005	75
Tableau 4.1 : Caractéristiques des géométries fixes et des accessoires.	84
Tableau 4.2 : Spécification de la machine d'injection JJ2	90
Tableau 4.3 : Cycles de compaction étudiés dans le plan d'expériences #2	94
Tableau 4.4 : Valeur des paramètres maintenus constants lors du plan d'expériences #2	97
Tableau 4.5 : Temps d'imprégnation obtenus dans le plan d'expériences #2	99
Tableau 4.6 : Vitesse moyenne de la résine durant le stade de compaction dynamique (injection du fluide de compaction)	105
Tableau 4.7 : Vitesse moyenne de la résine pendant la consolidation	106
Tableau 4.8 : Comparaison entre l'épaisseur moyenne mesurée et l'épaisseur théorique calculée des plaques fabriquées	109
Tableau 4.9 : Comparaison entre l'épaisseur mesurée avant et après le croisement des fluides	111

Tableau 5.1 : Évolution de la formulation de la résine pour le plan d'expériences #3 ..	114
Tableau 5.2 : Viscosité de la résine pour chacune des expériences réalisées	116
Tableau 5.3 : Caractéristiques des préformes du plan d'expériences #3	118
Tableau 5.4 : Caractéristique des échantillons utilisés pour les essais de perméabilité, de compressibilité et de relaxation.....	119
Tableau 5.5 : Viscosité des huiles de silicone pour chacune des expériences	125
Tableau 5.6 : Spécifications des machines d'essai JJ1 et JJ3	127
Tableau 5.7 : Temps de polymérisation de 6 injections de résine à débits variables.....	130
Tableau 5.8 : Paramètres analysés du groupe d'essais no.1 (PF1H06056 à PF1H06067)	137
Tableau 5.9 : Viscosités désirées et obtenues de la résine et des huiles de silicone	138
Tableau 5.10 : Paramètres variables du groupe d'essais no.2 (PF1H06068 à PF1H06071)	139
Tableau 5.11 : Résumé des résultats pour les groupes d'expériences 1 et 2.....	141
Tableau 5.12 : Position du front de résine à certain moment précis pour les expériences PF1H06059, PF1H06061, PF1H06067 et PF1H06069	144
Tableau 5.13 : Pertes de pression dans le système d'injection JJ2 pour les expériences PF1H060056 à PF1H06067	149
Tableau 5.14 : Position du front de résine à certain moment précis pour les expériences PF1H06056 et PF1H06059	157
Tableau 6.1 : Impact des paramètres de fabrication sur les deux objectifs principaux de ce projet.....	162
Tableau A.1 : Propriétés du WL7400 données par le fournisseur.	172
Tableau A.2 : Propriétés du WL7400 selon les analyses en laboratoire.....	173
Tableau A.3 : Propriétés du EL78 données par le fournisseur pour un échantillon de 2mm d'épaisseur.	174
Tableau A.4 : Propriétés du EL1040T selon nos analyses.....	175
Tableau H.1 : Les paramètres d'injection et les résultats pour les 12 expériences.....	192
Tableau H.2 : Pertes de charge associées au connecteur	194

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Principaux ingrédients dans la préparation d'une matrice polyester et représentation schématique des réticulations.	9
Figure 1.2 : Les paramètres de la famille des procédés LCM.....	20
Figure 1.3 : Schéma du procédé RTM.	22
Figure 1.4 : Processus de formation de macrovides (a) et microvides (b).	26
Figure 1.5 : Courbe de compaction typique des renforts fibreux.....	31
Figure 1.6 : Courbe de relaxation typique des renforts fibreux.	33
Figure 1.7 : Relation d'équilibre de Terzaghi.	34
Figure 1.8 : Répartition de la pression totale entre les fibres et la résine.	35
Figure 2.1 : Description des différentes composantes d'un moule Polyflex.....	38
Figure 2.2 : Fermeture du moule.....	39
Figure 2.3 : Mise sous vide de la chambre d'injection.	39
Figure 2.4 : Injection de la résine dans le moule.	40
Figure 2.5 : L'injection du fluide de compaction.....	41
Figure 2.6 : Consolidation du composite.	42
Figure 2.7 : Polymérisation du composite.....	42
Figure 2.8 : Démoulage de la pièce fabriquée.....	43
Figure 2.9 : Schématisation du mode d'écoulement de la résine lorsque $h_0 = H$	45
Figure 2.10 : Schématisation du mode d'écoulement de la résine lorsque $h_0 < H$	47
Figure 2.11 : Moule transparent Polyflex comprenant des cadres d'épaisseurs différentes.....	49
Figure 2.12 : Les buses (a), le pistolet à air comprimé (b) et le réservoir de résine (c)...	53
Figure 2.13 : Schématisation d'une mauvaise (a) et d'une bonne (b) projection sur le renfort.	54
Figure 3.1 : Diminution de la vitesse d'écoulement de la résine après le croisement des fluides.....	58
Figure 3.2 : Courbe de compaction de 2 couches d'OCF8610 ($\rho_s = 450 \text{ g/m}^3$).	60

Figure 3.3 : Configuration du moule Polyflex 1 avec deux films de séparation Wrightlon Econolo 7400.	62
Figure 3.4 : Problème d'étanchéité lorsqu'une configuration à un seul film est utilisée.	62
Figure 3.5 : Pot de pression utilisé pour l'injection de la résine et du fluide de compaction.	63
Figure 3.6 : Moule transparent Polyflex 1 avec ses lignes de référence.	63
Figure 3.7 : Réservoir à vide utilisé pour l'injection de la résine dans le moule Polyflex 1.	64
Figure 3.8 : Schéma d'une plaque avec l'emplacement des points de mesure (Plan d'expériences #1).	64
Figure 3.9 : Micromètre digital à cliquet (<i>ratchet</i>) de Mitutoyo d'une étendue de mesure de 0 à 1".	65
Figure 3.10 : Plaque fabriquée par injection flexible dans le plan d'expériences #1 et les variables identifiant les dimensions importantes.	67
Figure 3.11 : Surface krigée de la plaque PF1H05001 avec une dérive quadratique et une covariance cubique.	71
Figure 3.12 : Surfaces krigées de la plaque PF1H05001 vue de dessus pour une dérive constante (a), linéaire (b) et une covariance cubique.	72
Figure 3.13 : Surfaces krigées de la plaque PF1H05001 avec une dérive linéaire et une covariance cubique (a) et logarithmique (b).	73
Figure 3.14 : Surfaces krigées de la plaque PF1H05001 vue de face avec une dérive linéaire et une covariance cubique (a) et logarithmique (b).	73
Figure 3.15 : Surface krigée de l'épaisseur de la plaque PF1H05006.	76
Figure 3.16 : Surfaces krigées de l'épaisseurs des plaques fabriquées PF1H05001 (a), PF1H05002 (b), PF1H05003 (c), PF1H05004 (d), PF1H05005 (e) et PF1H05006 (f).	77
Figure 3.17 : Courbes krigées de l'épaisseur des plaques PF1H05001, PF1H05002 et PF1H05003 selon l'axe $y = -15$	79

Figure 3.18 : Courbes krigées de l'épaisseur des plaques PF1H05004, PF1H05005 et PF1H05006 selon l'axe $y = -15$.	79
Figure 3.19 : Courbes krigées de l'épaisseur des plaques PF1H05001, PF1H05002 et PF1H05003 selon l'axe $y = 15$.	80
Figure 3.20 : Courbes krigées de l'épaisseur des plaques PF1H05004, PF1H05005 et PF1H05006 selon l'axe $y = 15$.	80
Figure 4.1 : Variation de la viscosité de la résine T-580 en fonction de la température (groupe d'expériences 1).	85
Figure 4.2 : Variation de la viscosité de la résine T-580 en fonction de la température (groupe d'expériences 2).	85
Figure 4.3 : Comparaison entre le modèle de perméabilité (Équation (3.1)) et les essais expérimentaux sur l'OCF8610 de 300 g/m^2 .	87
Figure 4.4 : Variation de la viscosité de l'huile de silicone en fonction de la température.	88
Figure 4.5 : Configuration du moule Polyflex 1 pour le plan d'expériences #2.	89
Figure 4.6 : Piston d'injection du fluide de compaction monté sur un châssis d'essai mécanique (JJ2).	90
Figure 4.7 : Vue du moule à partir de la caméra positionnée perpendiculairement au-dessus du moule.	92
Figure 4.8 : Schéma d'une plaque avec l'emplacement des points de mesure de l'épaisseur (plan d'expériences #2).	93
Figure 4.9 : Profil de pression de compaction du programme de compaction 1.	95
Figure 4.10 : Profil de pression de compaction du programme de compaction 2.	95
Figure 4.11 : Profil de pression de compaction du programme de compaction 3.	95
Figure 4.12 : Profil de pression de compaction du programme de compaction 4.	96
Figure 4.13 : Période obtenue en fonction du taux d'augmentation de la force du piston.	96
Figure 4.14 : Variation de la vitesse du front de résine durant les phases d'injection et de consolidation.	101

Figure 4.15 : Variation de la vitesse du front de résine en fonction de sa position dans le moule.....	103
Figure 4.16 : Influence de la pression moyenne de compaction et de l'amplitude de cyclage sur la vitesse moyenne de la résine pendant la phase de compaction dynamique.....	106
Figure 4.17 : Influence de la pression moyenne et de l'amplitude de cyclage sur la vitesse moyenne de la résine pendant la phase de compaction statique.	107
Figure 4.18 : Plaque fabriquée dans le plan d'expériences #2.....	108
Figure 4.19 : Épaisseur de la plaque PF1E05020 en fonction de la position sur la longueur.....	110
Figure 5.1 : Variation de la viscosité de la résine en fonction de la température.	115
Figure 5.2 : Courbes de compaction des préformes et du mat non-préformé.	120
Figure 5.3 : Courbes de relaxation des préformes après compaction.	121
Figure 5.4 : Perméabilité du renfort OCF8610 préformé et non-préformé.....	122
Figure 5.5 : Variation de la viscosité de l'huile de silicone (0,278 Pa·s) en fonction de la température.....	123
Figure 5.6 : Variation de la viscosité de l'huile de silicone (1,074 Pa·s) en fonction de la température.....	124
Figure 5.7 : Variation de la viscosité de l'huile de silicone (3,670 Pa·s) en fonction de la température.....	124
Figure 5.8 : Configuration du moule Polyflex 1 à une seule membrane.....	126
Figure 5.9 : Piston d'injection de la résine polyester T-580 promotée (a) et du catalyseur (b).	128
Figure 5.10 : Raccord en "T" servant autant à l'injection de la résine qu'au remplissage du piston.	128
Figure 5.11 : Schéma de la tête de mélange utilisée.	131
Figure 5.12 : Design et principe de fonctionnement des clapets anti-retour.....	132
Figure 5.13 : Raccord pour le nettoyage air/acétone.....	134
Figure 5.14 : Photo du circuit du fluide de compaction.....	134

Figure 5.15 : Comparaison des courbes de compaction d'une injection du fluide de compaction avec la JJ1 et avec un pot de pression.	135
Figure 5.16 : Relation entre le temps de remplissage, le numéro du cadre du moule et la viscosité du fluide de compaction.	143
Figure 5.17 : Profil typique de l'évolution de la pression de compaction (PF1H06059).	146
Figure 5.18 : Évolution de la pression de compaction dans le temps.	147
Figure 5.19 : Pression statique pendant l'injection du fluide de compaction en fonction de la viscosité du fluide et du cadre utilisé.	150
Figure 5.20 : Courbes de pression du fluide de compaction des essais PF1H06069 à PF1H06071.	151
Figure 5.21 : Courbes de pression du fluide de compaction des essais PF1H06056 et PF1H06068.	152
Figure 5.22 : Courbes de pression du fluide de compaction des expériences PF1H06059 et PF1H06069 effectués avec les mêmes paramètres de fabrication.	153
Figure 5.23 : Profil de la vitesse d'écoulement de la résine pour l'expérience PF1H06056.	154
Figure 5.24 : Profil de la vitesse d'écoulement de la résine pour l'expérience PF1H06059.	156
Figure C.1 : Représentation d'un phénomène physique.	180
Figure F.1 : Vue de dessus de la pièce avec les dimensions.	187
Figure F.2 : Schéma de la vue de côté de la cavité du moule avec les paramètres associés.	187
Figure H.1 : Profil typique de la pression statique mesuré par le capteur	191

LISTE DES SYMBOLES

A	Coefficient pour le modèle de compaction
A_{f1}	Amplitude du cyclage pendant l'étape de compaction dynamique
A_{f2}	Amplitude du cyclage pendant l'étape de compaction statique
b	Largeur du rebord du cadre
B	Coefficient pour le modèle de compaction
C	Coefficient pour le modèle de relaxation
C_z	Compressibilité du renfort
D	Coefficient pour le modèle de relaxation
d_c	Diamètre intérieur de la conduite
D_f	Débit d'injection du fluide de compaction
d_j	Diamètre du cordon de néoprène
f	Facteur de friction
f_{f1}	Fréquence du cyclage pendant l'étape de compaction dynamique
f_{f2}	Fréquence du cyclage pendant l'étape de compaction statique
h	Épaisseur du renfort
H	Épaisseur de la cavité du moule
h_0	Épaisseur initiale du renfort dans le moule avant l'injection
h_c	Épaisseur finale du composite
k_1, k_2, k_3	Perméabilité du renfort dans les trois dimensions
$[K]$	Perméabilité du renfort
K_d	Perméabilité du milieu drainant
L	Longueur totale de la plaque
L_1	Longueur de la cavité
L_c	Longueur de la conduite
n	Nombre de couches de renfort
n_f	Nombre de cycle pendant l'étape de compaction statique
P_C	Pertes de charge

ΣP_{CR}	Somme des pertes de charge réparties
ΣP_{CL}	Somme des pertes de charge localisées
P_d	Pression dynamique
P_e	Pression à l'évent
P_{f1}	Pression de compaction durant l'étape de compaction dynamique
P_{f2}	Pression de compaction pendant l'étape de compaction statique
P_h	Pression hydrostatique
P_i	Pression d'injection de la résine
P_{r_max}	Pression maximale calculée lors de l'injection de la résine
P_s	Pression statique
Q_i	Débit d'injection de la résine
t_p	Temps de remplissage du moule par le procédé Polyflex
t_r	Temps de remplissage théorique du moule par le procédé RTM
t_{r1}	Temps d'injection de la résine
V_f	Taux volumique de fibres
V_{fo}	Fraction volumique du renfort dans le moule avant l'injection
V_{fc}	Fraction volumique de fibres finale du composite
U_c	Vitesse de déplacement de la paroi du moule
W	Largeur totale de la plaque
W_1	Largeur de la cavité
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement
ϕ	Porosité du renfort
μ	Viscosité du fluide
ρ	Densité spécifique
σ_0	Pression initiale appliquée sur le renfort
σ_c	Pression transversale appliquée sur le renfort
σ_{yx}	Contrainte en cisaillement
ρ_s	Densité surfacique du renfort
ρ_v	Masse volumique du matériau

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : Propriétés des membranes de séparation

ANNEXE B : Mesures d'épaisseurs des plaques fabriquées dans le plan d'expériences

#1

ANNEXE C : Introduction au krigeage

ANNEXE D : Représentation isométrique des surfaces krigées

ANNEXE E : Courbes krigées de l'épaisseur des plaques du plan d'expériences 1 selon
les directions $y = -45$ et $y = 45$

ANNEXE F : Calcul de l'épaisseur théorique des plaques pour le plan d'expériences 2

ANNEXE G : Épaisseur des points de mesure pour les plaques PF1E05009 à
PF1E05021 (21 points de la ligne centrale longitudinale)

ANNEXE H : Calcul des pertes de charge associées au connecteur (quick disconnect)

INTRODUCTION

En ce début de 21^e siècle, les matériaux composites prennent de plus en plus d'ampleur dans l'industrie en raison notamment des contraintes grandissantes dans la conception de leurs produits. Dans certains domaines, les composites s'imposent face aux matériaux dits traditionnels comme les métaux et les céramiques. Particulièrement, les propriétés spécifiques (i.e. en rapport avec leur masse volumique) des composites à matrice polymère sont supérieures à celles des métaux ou des céramiques. Leur capacité à être façonnée en des formes complexes leur donne un attrait supplémentaire. Ainsi, les composites s'imposent dans des secteurs aussi divers que l'aéronautique, l'automobile, le nautisme, les sports, les bâtiments, le biomédical, etc.

Un matériau composite consiste en une matrice qui donne la forme à la pièce dans laquelle un renfort fibreux est incorporé. En utilisant différentes configurations de matrice et de renfort, l'ingénieur peut obtenir une vaste gamme de propriétés. Par contre, les options de ces matériaux peuvent devenir vraiment dispendieuses. La réelle limite à une utilisation à grande échelle de ces matériaux est reliée aux procédés de fabrication. La question principale qui revient généralement est : Combien de pièces est-il possible de fabriquer à un coût raisonnable?

Les polymères thermodurcissables demeurent beaucoup plus répandus que les thermoplastiques comme matrice employée dans les composites principalement en raison de leur facilité à être mis en forme. Il existe de nombreux procédés de fabrication des composites à matrice thermodurcissable dont chacun renferme ses caractéristiques propres. Gutowski [1] décrit une grande partie des procédés traditionnels. Certains sont plus adaptés aux grandes séries comme le moulage par compression (« Sheet Molding Compound ») et la pultrusion. Le premier nécessite un outillage coûteux et ne permet pas de contrôler l'orientation des fibres. Ceci limite les applications de ce procédé à la production de pièces non structurales. La pultrusion est réservée en générale à la

réalisation de pièces continues et longues de section constante. D'autres procédés présentent, à l'inverse, l'inconvénient d'avoir un temps de cycle beaucoup plus long mais la performance des pièces fabriquées est améliorée. Parmi eux, le drapage combiné à la cuisson en autoclave permettent de produire des pièces de forme complexe avec des propriétés mécaniques exceptionnelles, mais par contre le coût est très élevé. Ce type de procédé est largement répandu dans le secteur de l'aéronautique où les contraintes de poids surpassent le facteur coût. Il existe une catégorie de procédé qui poursuit son expansion en raison de leur capacité de production à moyen volume de pièces complexes montrant de bonnes performances mécaniques et à un coût raisonnable. Ce sont les procédés de moulage par injection dont le plus connu est le procédé RTM (Resin Transfer Molding).

L'objectif de ce projet consiste à analyser expérimentalement et à optimiser un nouveau procédé de fabrication d'injection flexible pour la fabrication rapide des composites. La technique Polyflex étudiée dans ce rapport permet une imprégnation rapide du renfort fibreux à faible pression d'injection de résine dans un moule contenant deux cavités séparées par une membrane flexible. D'un côté se trouve le renfort et la matrice injectée et de l'autre, un liquide de compaction contribuant à la dispersion de la résine dans le moule et à la consolidation sous pression de la pièce. Ce procédé permet de fabriquer des composites ayant un taux de fibres élevé et un bon état de surface.

Les recherches menées dans le cadre de ce mémoire s'articulent en deux volets reliés entre eux:

- 1- L'analyse et l'optimisation expérimentale du procédé.
- 2- L'étude et l'amélioration continue du système d'injection.

Trois plans d'expérience ont été réalisés dans le but d'analyser et d'optimiser ce nouveau procédé d'injection flexible. Au cours de l'évolution de ce projet, le système d'injection a été modifié pour répondre aux nouvelles exigences de cette technologie. L'objectif général de ces trois plans d'expériences vise à étudier l'influence des

paramètres de fabrication sur le temps d'imprégnation du renfort et sur la qualité des pièces produites. La pression de compaction, la viscosité du fluide de compaction et la dimension de la cavité du moule sont au nombre des paramètres de fabrication considérés. Le cadre des expériences réalisées dans ce projet consiste à injecter en isotherme des plaques de forme rectangulaire dans un moule.

Le chapitre 1 de ce mémoire comporte une revue des principales caractéristiques des matériaux composites, une description de leurs procédés habituels de mise en forme et une présentation succincte des phénomènes physiques se produisant dans les techniques de fabrication des composites par injection. Le chapitre 2 décrit le nouveau procédé d'injection flexible étudié. Ce chapitre permet au lecteur de se familiariser avec la procédure de fabrication, le moule utilisé, les paramètres de fabrication et la technique de préformage employée pour les expériences. Les chapitres 3, 4 et 5 porte sur les trois plans d'expériences réalisés. Le plan d'expériences #1, effectué pendant l'hiver 2005, a porté sur l'analyse de la variation de l'épaisseur des plaques fabriquées en fonction de deux paramètres de mise en forme, la pression de compaction et la viscosité du fluide de compaction. Le plan d'expériences #2 complété en été 2005 a permis d'étudier l'influence des variables de compaction (débit constant, pression constante, cycle de pression) sur le temps d'imprégnation du renfort et sur la variation d'épaisseur. Enfin, le troisième plan, effectué à l'hiver 2006, analyse l'influence de l'épaisseur de la cavité du moule et de la viscosité du fluide de compaction sur le temps d'imprégnation du renfort. Dans ces derniers essais, un renfort préformé d'une épaisseur plus faible que la cavité du moule a été utilisé pour la fabrication des plaques contrairement aux deux premiers plans d'expérience, où le renfort n'était pas préformé et remplissait en totalité la cavité du moule. Ces trois chapitres décrivent en même temps les particularités des systèmes d'injection utilisés pour chaque plan d'expériences. Finalement, une conclusion générale établit un bilan des analyses effectuées sur le procédé d'injection flexible, suivi de recommandations pour les travaux futurs.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Les matériaux composites à matrice polymère sont constitués de fibres ayant de fortes propriétés mécaniques (résistance et module) incorporées dans une résine organique. La combinaison de ces deux constituants produit un matériau ayant des propriétés qui ne pourraient être atteintes séparément par les constituants. En général, les fibres supportent principalement les charges, tandis que la matrice les maintient dans la position et l'orientation désirées, agit comme medium pour transférer les charges et les protège des endommagements causés par l'environnement (températures et humidité par exemple).

Plusieurs composites offrent une combinaison de résistance et de module comparable ou même meilleure que plusieurs matériaux métalliques traditionnels. Dû à leur faible densité spécifique (ρ), les rapports résistances/densité (R/ρ) et module/densité (M/ρ) des composites sont nettement supérieurs à ceux des matériaux métalliques (voir Tableau 1.1). De plus, le comportement en fatigue est excellent [2]. Le coefficient d'expansion thermique des composites est également beaucoup plus faible que celui des métaux. Contrairement aux métaux qui sont isotropes, les propriétés mécaniques et physiques des composites dépendent fortement de l'orientation des fibres. Ceci complique considérablement la conception des structures renforcées de fibres. En même temps, ceci donne une certaine flexibilité dans la conception des pièces comme le renforcement dans la direction des contraintes principales. Leur capacité d'amortissement est une autre caractéristique particulière des composites qui mène à une réduction de la transmission du bruit et des vibrations. Un autre avantage des composites est leur résistance à la corrosion. Cependant plusieurs composites à matrice polymère sont capables d'absorber l'humidité et ils doivent être protégés par une peinture ou un revêtement approprié.

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

Matériau	Densité spécifique	Module (GPa)	Résistance en tension (MPa)	M/ρ (10⁶ m)	R/ρ (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	8,2	207	1399	2,57	17,4
Fibres verre E – epoxy (UD)	1,85	39,3	965	2,16	53,2
Fibres kevlar 49 – epoxy (UD)	1,38	75,8	1378	5,60	101,8
Fibres carbone haut- module – epoxy (UD)	1,63	215	1240	13,44	77,5

1.2 Matrice

Les fonctions de la matrice dans les composites sont principalement de transférer les contraintes entre les fibres, de fournir une barrière contre les conditions environnementales défavorables, de protéger la surface des fibres de possibles abrasions et de donner la forme désirée au produit final. Certains additifs ajoutés aux matrices polymères ont pour effet d'améliorer les propriétés et la performance des matériaux composites comme les lubrifiants, colorants, stabilisants, agents antistatiques, agents de réticulation et additifs à bas retrait. Dans l'industrie actuellement, les matrices polymères sont utilisées dans environ 99% des cas [3]. La dernière part est partagée entre les matrices d'origine céramique ou métallique. Les composites à matrice polymère se divisent en deux familles aux caractéristiques distinctes : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

Le choix de la matrice influence les propriétés finales du composite comme les propriétés en cisaillement interlaminaire (pour les structures chargées en flexion) et en cisaillement dans le plan (pour les structures chargées en torsion) [2]. Elle sert également de support entre les fibres pour empêcher leur flambement lors des chargements en compression. L'interaction entre les fibres et la matrice est primordiale pour la conception de structures tolérantes aux dommages. Par ailleurs, les procédés de mise en forme des composites dépendent fortement de leurs caractéristiques physiques et thermiques comme la viscosité et la température de cuisson.

1.2.1 Thermoplastiques

La famille des thermoplastiques est caractérisée par une structure de longues chaînes moléculaires qui n'ont pas de lien chimique entre elles. Elles sont maintenues en place par de faibles liaisons secondaires tel que des liaisons de van der Waals et des liens hydrogènes. Les polymères thermoplastiques peuvent être fondus et moulés plusieurs fois. Le plus important avantage des thermoplastiques sur les thermodurcissables est leur haute résistance aux dommages et en particulier aux impacts. Le polypropylène (PP), le sulfure de polyphénylène (PPS), le polysulfone, le polyether-ether-ketone (PEEK) et les polyamides (PA) entre dans cette famille de polymères. Voici une liste des avantages et des inconvénients des polymères thermoplastiques (TP).

Avantages :

1. Vie d'entreposage illimitée à température ambiante.
2. Temps de fabrication plus court.
3. Facilité de réparation.
4. Conditions de travail propre (non-collant et sans émanation).
5. Possibilité de recyclage et réutilisation.

Inconvénients :

1. Haute viscosité (mouillabilité des renforts difficile).
2. Faible tenue en température (sauf nouveau TP).

1.2.2 Thermodurcissables

Dans la famille des thermodurcissables, les molécules sont chimiquement jointes par réticulation pour former un réseau tridimensionnel rigide. Une fois que les réticulations sont formées durant la réaction de polymérisation, les polymères thermodurcissables ne peuvent plus être fondus et réutilisés. Le polyester, le vinylester, l'époxy, les phénoliques, les polyimides et le polyuréthane font partie de cette famille de polymères. Voici la liste des avantages et des inconvénients des polymères thermodurcissables (TD).

Avantages :

1. Faible viscosité (mouillabilité des renforts aisée).
2. Meilleure tenue thermique.

Désavantages :

1. Vie d'entreposage limitée.
2. Tenue au choc limitée.
3. Non-recyclable.
4. Manipulation plus contraignante (collant et émanations de solvant).

1.2.2.1 Polyester

Le matériau d'origine des résines polyester est une molécule de polyester insaturée qui contient des liaisons double $C = C$. Celle-ci est obtenue par la réaction d'un anhydride maléique et de l'éthylène ou du glycol de propylène (Figure 1.1 a). Des acides saturés comme les acides isophtaliques ou orthophtaliques, sont aussi ajoutés pour modifier la

structure chimique entre les zones de réticulation. Le matériau liquide résultant est dissous dans un diluent réactif, le styrène (Figure 1.1 b), qui réduit la viscosité du polymère et facilite sa manipulation. Le styrène est largement utilisé puisqu'il a une faible viscosité, un haut pouvoir solvant et un faible coût. Cependant il est inflammable, extrêmement volatile et potentiellement cancérigène, lorsqu'il est inhalé en quantité excessive [4]. Ce diluant contient également des liaisons double $C = C$ et agit comme agent réticulant en établissant des ponts entre les molécules de polyester. La réaction de polymérisation est initiée par l'ajout d'une petite quantité de catalyseur (Figure 1.1 c) qui, sous l'application de la température, se décompose rapidement en radicaux libres qui réagissent avec les molécules de styrène pour briser leur liaison $C = C$. Les radicaux de styrène réticulent à leur tour avec les molécules de polyester (Figure 1.1 d). Des accélérateurs sont parfois ajoutés pour activer la décomposition du catalyseur. En général, des inhibiteurs sont inclus dans les résines polyester car ils consomment les radicaux libres et retardent le début des réactions de polymérisation. Ceci permet d'augmenter la durée de stockage des résines. Le matériau résultant est une résine polyester solide.

propriétés sont généralement inférieures à celles des résines époxy. Leur principal désavantage par rapport aux époxys est leur haut taux de retrait.

1.2.2.2 Vinylester

Une résine vinylester insaturée est produite par la réaction d'un acide carboxylique insaturé et d'une résine époxy. La résine vinylester est semblable à la résine polyester par ses doubles liaisons $C = C$ et son mélange avec un diluant comme le styrène. Cependant ses doubles liaisons se retrouvent uniquement à la fin de la molécule et les réticulations ne peuvent que se faire aux extrémités. Puisque cela produit moins de réticulations, une résine vinylester polymérisée est plus flexible que la résine polyester. Une caractéristique unique de la molécule de vinylester est son groupe OH qui forme des liens hydrogène avec des groupes similaires sur la surface des fibres de verre, ce qui résulte en une excellente mouillabilité et une bonne adhésion aux fibres de verre.

La résine vinylester possède certaines bonnes caractéristiques des résines époxy, comme une excellente résistance chimique et en tension, et des résines polyester insaturées comme une faible viscosité et un temps de polymérisation rapide. Cependant, leur taux volumique de retrait est de l'ordre de 5 – 10 %, ce qui est plus élevé que son parent époxy.

1.2.2.3 Époxy et autres

La chimie des résines époxy ne sera pas abordée ici puisqu'elles n'ont pas fait l'objet des expériences présentées plus loin dans ce mémoire. La liste suivante présente les principaux avantages et inconvénients de cette catégorie de résine très répandue dans l'industrie de l'aéronautique [2].

Avantages :

1. Grande variété de propriétés due au grand nombre de matériaux de base, d'agents réticulants, et de modifiants disponibles.
2. Aucun élément volatile lors de la cuisson.
3. Faible retrait durant la cuisson.
4. Excellente résistance aux produits chimiques et aux solvants.
5. Excellente adhésion à une grande variété de charges, fibres et autres substrats.

Inconvénients :

1. Coût relativement élevé.
2. Long temps de cuisson.

Parmi les autres polymères thermodurcissables utilisées comme matrice dans les composites, il y a les résines phénoliques, les polyimides et les polyuréthanes. Les résines phénoliques présentent une très bonne tenue au feu, d'où leur utilisation dans le domaine ferroviaire. Cependant, elles sont fragiles, sensibles à l'humidité et difficiles à mettre en œuvre. Les résines polyimides sont employées dans les composites à haute performance où une bonne stabilité en température est importante. La principale caractéristique des polyuréthanes est sa faible viscosité qui facilite un bon remplissage du moule.

1.2.3 Renforts

Les fibres reprennent la majeure portion des charges agissant sur le composite. Les fibres utilisées dans les procédés de fabrication composite sont habituellement groupées soit de façon aléatoire sous forme de fibres courtes coupées de longueur inférieure à 50 mm (2 po.) ou de fibres longues continues de longueur supérieure à 50 mm (2 po.), soit organisées en tissus bidirectionnels ou unidirectionnels [2]. Les composites conçus à partir de mats à fibres aléatoires peuvent être considérés comme isotropes, tandis que ceux fabriqués avec des tissus sont anisotropes. Les types de renfort les plus répandus

sont le verre, le carbone et l'aramide, mais il y a d'autres types de matériaux émergents comme le bore, le carbure de silicium (SiC) et l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). Les fibres naturelles pourront constituer une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur plus grande facilité de recyclage, lorsque leurs propriétés physiques seront mieux appréhendées. Une sélection adéquate du type, de la quantité et de l'orientation est très importante puisqu'elle affecte les caractéristiques suivantes du composite :

1. Densité spécifique (ρ).
2. Résistance et module en tension.
3. Résistance et module en compression.
4. Résistance en fatigue.
5. Conductivité électrique et thermique.
6. Coût.

1.2.3.1 Verre

Utilisés dans 95 % [3] des matériaux composites, les fibres de verre sont de loin les plus répandues de tous les renforts, plus particulièrement pour les produits à haute diffusion.

Avantages :

- Haute résistance en tension.
- Haute résistance chimique.
- Excellentes propriétés isolantes.
- Bonne adhérence entre fibres et résines.
- Faible coût.

Désavantages :

- Faible module en tension.
- Relativement haute densité spécifique (parmi les fibres commerciales).
- Sensible à l'abrasion lors des manipulations.
- Relativement faible résistance en fatigue.
- Haute dureté cause l'usure des moules et des outils de coupe.

1.2.3.2 Carbone

Les fibres de carbone sont principalement utilisées pour les composites à haute performance en aéronautique, en construction industrielle et dans les sports et loisirs. Leur coût élevé les a exclus jusqu'ici des applications commerciales les plus répandues.

Avantages :

- Excellent rapport résistance en tension/densité tout comme leur rapport module en tension/densité.
- Très faible coefficient d'expansion thermique (négatif dans le sens des fibres).
- Haute résistance en fatigue.

Désavantages :

- Faible résistance aux impacts.
- Allongement à la rupture faible.
- Haute conductivité électrique.
- Coût élevé.

1.2.3.3 Aramide (kevlar 49)

Tout comme les fibres de carbone, l'aramide est employé comme renfort dans plusieurs applications aérospatiales, mais également marines. En fait, la caractéristique première des fibres d'aramide est de posséder la plus basse densité parmi les renforts utilisés.

Avantages :

- Très faible densité spécifique.
- Très haut rapport résistance en tension/densité.
- Bonne résistance aux impacts.
- Faible coefficient d'expansion thermique (Négative dans le sens des fibres).
- Faible conductivité thermique.
- Très haut coefficient d'amortissement des vibrations.
- Bonne résistance chimique.
- Bonne stabilité en température.

Désavantages :

- Faible résistance en compression.
- Difficiles à couper ou usiner.
- Sensibles aux rayons ultra-violets.
- Adhérence moyenne entre les fibres et la matrice.
- Prix élevé.
- Mauvais comportement en environnement humide (absorption d'eau trop élevée).

1.2.3.4 Préformage

Les renforts peuvent être préformés pour épouser plus facilement les formes complexes du moule et faciliter leur manipulation. Il existe plusieurs méthodes de préformage. Une d'entre elles consiste à pulvériser des fibres coupées sur un écran perforé ayant la forme désirée [2]. Une pression de vide est appliquée à l'arrière de l'écran pour retenir les fibres sur la surface. Un agent liant est également pulvérisé avec les fibres pour les garder en place en conférant la forme du moule à la préforme.

Une autre opération de préformage est l'estampage et chauffage simultané du renfort par l'utilisation d'une presse et d'un moule préformé [2]. Les types de renforts le plus souvent rencontrés pour ce genre d'opération sont les mats à fibres continues. Des agents liants thermoplastiques ou thermodurcissables sont disponibles pour retenir la forme désirée après l'estampage. Cette méthode est employée pour la fabrication rapide de composites.

Pour les tissus contenant des fibres bidirectionnelles, une méthode par découpe et couture («*cut-and-sew*») est utilisée dans laquelle différentes couches de tissu sont coupées et ensuite cousus ensemble avec des fils de polyester, verre ou kevlar dans la forme désirée. La méthode «*cut-and-sew*» est surtout utilisée dans des applications aérospatiales à faible volume [1].

1.3 Procédés

Il existe plusieurs procédés pour la fabrication des pièces composites. Il est important de connaître les limites et les particularités de chacun afin de choisir le bon procédé adapté aux caractéristiques de la pièce à produire comme la complexité géométrique, les matériaux constitutifs, la taille de la production et le coût recherché. Le Tableau 1.2 présente les principales caractéristiques de chacun.

Tableau 1.2 : Synthèse des procédés de fabrication [3] : GD pour Grande Diffusion; HP pour Haute Performance

Synthèse des procédés de transformation

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 carboné, 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
Estampage TRE	GD	Plaques TRE		Matrice TP	1 mn
Compression moyenne pression TP	HP	Préimprégné		Matrice TP	
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
Pultrusion	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
		HP avec matrice TD	GD avec matrice TP	HP avec matrice TP	

1.3.1 Drapage en autoclave («*Bag molding process*»)

Le matériau de base pour les procédés de drapage en autoclave est un tissu préimprégné («*prepreg*») contenant les fibres imbibées d'une résine époxy partiellement polymérisée. Le tissu préimprégné est placé sur la surface du moule avec d'autres composantes comme des couches de purgeur («*bleeder*») qui sont utilisées pour absorber l'excédent de résine. Un sac scellé renferme le montage qui est placé sous vide avant d'être envoyé à l'intérieur d'un autoclave où une combinaison de pression et de chaleur est appliquée pour consolider le laminé en une pièce solide. Les températures de cuisson et les pressions requises pour les matériaux thermodurcissables généralement utilisés en aéronautique sont de l'ordre de 175 °C et 600 kPa [1]. Ces conditions imposent de fabriquer des autoclaves robustes, ce qui explique, avec les manipulations manuelles requises, le coût très élevé de ce procédé.

1.3.2 Pultrusion

Le procédé de pultrusion peut être considéré comme une combinaison de procédures automatisées de préformage du renfort, d'imprégnation de la préforme avec la résine et de cuisson de la préforme imprégnée en une pièce solide. Ces trois étapes sont intégrées séquentiellement sur une ligne de fabrication continue.

1.3.3 Moulage par compression

Cette catégorie de procédé consiste à former par estampage à pression élevée des mats préimprégnés (SMC – «*Sheet Molding Compound*») placés dans un moule. Le procédé est généralement automatisé, ce qui permet d'atteindre un volume de production élevé pour fabriquer des pièces de géométrie complexe. Cependant, comme la matière se positionne dans le moule sous l'effet de la haute pression, il est difficile de contrôler l'orientation des fibres. Ceci limite ce procédé aux applications de pièces non-

structurales. Un autre facteur limitant l'utilisation de ce procédé est son outillage coûteux en raison des hautes pressions requises.

1.3.4 Enroulement filamentaire

Dans le procédé d'enroulement filamentaire, une bande de monofilaments ou de mèches continues et imprégnées de résine est enroulée autour d'un mandrin rotatif et cuite pour produire des pièces axisymétriques creuses. Ce procédé nécessite une certaine automatisation pour contrôler le positionnement, la tension et l'imprégnation des fibres.

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

Cette catégorie de procédés se rapporte à la fabrication de pièces composites par injection de résine dans des moules. Des fibres préformées ou non sont placées dans un moule dans lequel une matrice polymère est injectée. Les procédés LCM utilisent surtout des résines thermodurcissables ayant une faible viscosité. En comparaison aux procédés de fabrication par autoclave ou par compression, les procédés LCM demandent moins d'investissement en outillage. Les renforts secs utilisés sont également moins dispendieux que les préimprégnés. Cependant, le coût de l'outillage tend à augmenter avec l'évolution des technologies d'injection qui nécessitent des moules plus complexes et donc plus coûteux.

1.3.6 Procédés manuels

Les procédés manuels sont utilisés pour la fabrication de pièces de grande dimension et sont assez répandus parmi les procédés de fabrication des matériaux composites. Cependant de plus en plus de normes du travail visent à contrôler la mise en œuvre manuelle, notamment en ce qui concerne les émissions de styrène [3]. Dans cette catégorie de procédés, on retrouve principalement le moulage contact, la projection simultanée et le drapage en autoclave.

1.4 Moulage de composite par injection

La famille des procédés LCM comporte beaucoup de variantes. Les procédés LCM les plus répandus se divisent en deux sous-catégories, soit l'imprégnation du renfort par injection de résine ou l'infiltration de la résine par infusion.

Injection de résine :

- RTM («*Resin Transfer Molding*»)
- RTM light («*Resin Transfer Molding 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*»)

Il est possible de décrire tous ces types de procédés avec les paramètres de la Figure 1.2, qui se divisent en quatre catégories : milieu drainant, renfort, contrôle du moule et injection. Le paramètre K_d représente la perméabilité du milieu drainant ; K et C_z symbolisent respectivement la perméabilité et la compressibilité du renfort. Les paramètres U_c et σ_z définissent respectivement la vitesse de déplacement de la paroi et la pression transversale appliquée sur le renfort. Les paramètres d'injection sont la pression d'injection P_i , le débit d'injection Q_i et la pression à l'évent P_e . Le front d'écoulement de la résine est caractérisé par sa direction longitudinale (L) ou transversale (T). L'évolution

de la position (x) du front de résine dans le temps est une fonction des paramètres introduits plus haut.

$$x = \left(K_d, \begin{bmatrix} \bar{K} \\ C_z \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} U_c \\ \sigma_z \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} P_i, Q_i \\ P_e \end{bmatrix} \right)$$

Figure 1.2 : Les paramètres de la famille des procédés LCM

Le Tableau 1.3 présente les procédés LCM précédents avec la paramétrisation correspondante. Le procédé de base relatif à l'infiltration par infusion de résine est le VARI («*Vacuum Assisted Resin Infusion*»). Celui-ci emploie, d'un côté, un moule rigide pour donner la forme à la pièce et de l'autre, une membrane souple. L'épaisseur du composite est contrôlée par le différentiel de pression créé entre les deux côtés de la membrane flexible. Tous les autres procédés d'infusion découlent du VARI par l'ajout de quelques particularités. Le LRI («*Liquid Resin infusion*») utilise une préforme au dessus du renfort principal comme milieu de dispersion pour faciliter l'écoulement de la résine. Ceci provoque un écoulement bidimensionnel longitudinal et transversal à travers le renfort. À noter que ce milieu drainant peut être soit retiré après la fabrication de la pièce, soit intégré dans le produit fini. Dans ce dernier cas, la préforme utilisée a souvent comme fonction supplémentaire de donner un fini de surface lisse, d'où le nom de voile de surface. Le SCRIMP («*Seeman Composites Resin Infusion Molding Process*») est semblable au LRI par l'utilisation d'un milieu drainant au-dessus du renfort, mais celui-

ci est plutôt sous forme de ressort hélicoïdal qui distribue la résine à la grandeur de la pièce. L'emplacement de ces tubes est particulièrement important pour assurer une imprégnation complète du renfort. Le RFI (*«Resin Film Infusion»*) ressemble aux procédés décrits précédemment en ce sens qu'il ne nécessite qu'une base de moule rigide utilisée en combinaison avec un sac à vide (*«vacuum bag»*). Cependant, la résine est introduite sous forme de films en même temps que le renfort, puis le vide est tiré à l'intérieur du sac et un cycle de température et de pression est appliqué à l'assemblage pour réduire la viscosité de la résine et initier le processus de polymérisation. Un écoulement se produit alors dans la direction de l'épaisseur, ce qui réduit la distance de parcours de la résine. Par contre, ce type de procédé nécessite un autoclave, ce qui augmente considérablement les coûts de production. Le FASTRAC (*«FAST Remotely Actuated Channeling»*) est similaire au SCRIMP, mais avec une stratégie de distribution de la résine plus raffinée. Le réseau de distribution créé par une membrane flexible avec des canaux légèrement espacés et formés à l'intérieur de celle-ci. Ces canaux peuvent s'écraser pour forcer le surplus de résine à pénétrer dans le renfort. Ceci a l'avantage de produire moins de déchets consommables que le SCRIMP. Une deuxième membrane enveloppe le tout permettant d'appliquer un différentiel de pression entre les deux chambres, ce qui facilite l'imprégnation du renfort.

Tableau 1.3 : Paramétrisation des procédés LCM [32]

Procédé	Contrôle du moule	Nature du moule	Pression évent	Pression injection	Front	Drainant
LRI	Contrainte	Souple	< 1	1	L+T	Préforme (1) (2)
VARI/VARIM	Contrainte	Souple	< 1	1	L	Aucun
SCRIMP	Contrainte	Souple	< 1	1	L+T	Filet (1)
RFI	Contrainte	Souple	1	1	T	Aucun
FASTRAC	Contrainte	2 membranes	< 1	> 1	L+T	Canal
RTM	Epaisseur fixe	Rigide	1	> 1	L	Aucun
VARTM	Epaisseur fixe	Rigide	< 1	> 1	L	Aucun
CRTM	Déplacement	Rigide	< 1	> 1	L + T	Canal
RTM Light	Contrainte	Semi-rigide	1	> 1	L	Préforme (2)

Drainant (1) Externe : consommable, (2) Interne : intégré dans le produit fini

Le RTM («*Resin Transfer Molding*») est sans doute le plus connu des procédés d'infiltration de résine par injection. Ce procédé consiste à placer un renfort préformé ou non dans un moule rigide fermé (drapage) où sera injectée une résine pré-catalysée de faible viscosité à basse pression (2 à 4 bars). Une fois l'injection terminée, la réaction de polymérisation se produit et la pièce peut ensuite être démoulée. La Figure 1.3 présente une schématisation des principales étapes de ce procédé. Au moment de l'injection, une pression de vide peut être appliquée à l'évent pour améliorer le temps d'imprégnation et réduire la présence de bulles d'air dans la pièce. Cette variante du procédé se nomme VARTM («*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*»). La partie supérieure du moule peut être mobile et son déplacement contrôlé, à ce moment, le procédé d'injection associé se nomme CRTM («*Compression Resin Transfer Molding*»). Cette mobilité permet d'injecter la résine dans une cavité plus grande que l'épaisseur finale de la pièce. Ceci détend le renfort, augmente sa perméabilité et facilite l'injection de la résine. Par ailleurs, au fur et à mesure que l'injection continue, la mise en compression par une diminution de l'épaisseur de la cavité force la résine à imprégner la partie restante du renfort. Enfin, une variante du procédé RTM appelée RTM-Light requiert des moules beaucoup moins dispendieux puisqu'ils sont moins rigides et fermés uniquement par la pression de vide appliquée en périphérie. Cependant la pression d'injection doit être plus faible que la pression de vide utilisé pour la fermeture du moule, ce qui conduit à un procédé d'injection relativement lent mais moins dispendieux que le procédé RTM.

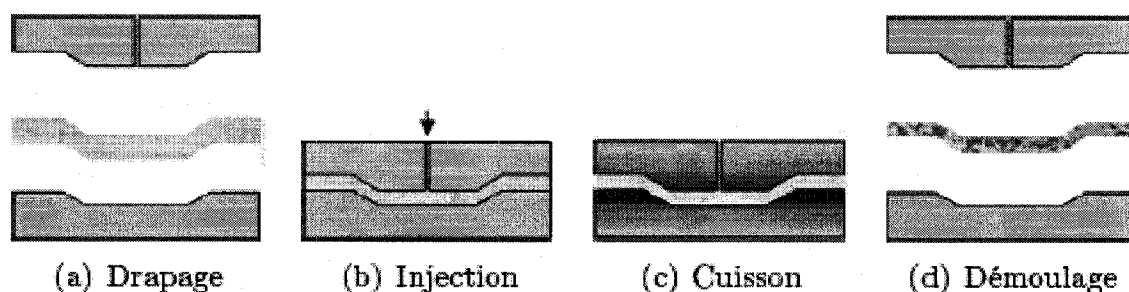


Figure 1.3 : Schéma du procédé RTM.

1.5 Perméabilité et loi de Darcy

La perméabilité est une mesure de la propriété d'un matériau poreux à permettre l'écoulement d'un fluide. Les premiers travaux sur la perméabilité des milieux poreux remontent à Henry Darcy (1803-1858) qui introduit la constante de proportionnalité K liant la vitesse de filtration au gradient de charge hydraulique dans la loi de Darcy [5]. L'écoulement d'un fluide newtonien à travers un milieu poreux peut ainsi être prédit par la loi de Darcy, qui s'écrit comme suit :

$$\vec{V} = \frac{-[K]}{\mu} \nabla P \quad (1.1)$$

où P représente le champ de pression, $[K]$ le tenseur de perméabilité, μ la viscosité de la résine et V la vitesse du front de résine. Plus la valeur de K est grande, plus la résine se propage rapidement dans le renfort fibreux. Dans le cas des tissus isotropes, comme les mats, le tenseur de perméabilité est réduit à un simple scalaire. Pour les renforts orthotropiques, en général, ils requièrent trois valeurs k_1 , k_2 et k_3 . La perméabilité dans la direction de l'épaisseur k_3 n'est pas toujours nécessaire, surtout lorsque la pièce fabriquée est mince. La perméabilité d'un renfort est déterminée expérimentalement. Ferland [6] a proposé une méthode de caractérisation de la perméabilité plane d'un renfort. La perméabilité d'un renfort est une valeur très importante pour la simulation numérique des procédés de fabrication composite par injection.

Dans un moule rectangulaire de largeur constante, l'équation de continuité dit que la vitesse demeure constante dans l'espace pour un temps donné pour les fluides incompressibles.

$$\frac{dV}{dx} = 0 \quad (1.2)$$

Cette observation, combinée avec la loi de Darcy, résulte en un gradient de pression constant. Autrement dit, la pression diminue linéairement de $P_0(t)$ au point x_0 à P_f la

pression environnante au front d'écoulement qui est à une distance $x_f(t)$ de x_0 . Cette chute de pression peut être estimée par l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dx}(t) = -\frac{(P_0(t) - P_f)}{x_f(t)} \quad (1.3)$$

Pour un écoulement unidirectionnel, le vecteur de vitesse peut s'écrire sous forme scalaire de la dérivée de la position en fonction du temps. En insérant l'équation (1.2) dans l'équation (1.1), on obtient l'expression suivante :

$$\frac{dx_f}{dt} = \frac{K(P_0(t) - P_f)}{\mu\phi x_f} \quad (1.4)$$

Le terme de porosité ϕ a été ajouté puisque la vitesse réelle du front de résine vu par un observateur extérieur sera plus élevée que la vitesse de Darcy puisque le milieu poreux diminue le volume de la cavité. Pour résoudre cette équation différentielle du premier degré, les termes doivent être réorganisés pour l'intégration,

$$\int_0^L x_f dx_f = \int_0^t \frac{K(P_0(t) - P_f)}{\mu\phi} dt \quad (1.5)$$

$$x_f^2 = \frac{2K}{\mu\phi} \int_0^t (P_0(t) - P_f) dt \quad (1.6)$$

Dans le cas d'une injection à pression constante et en réorganisant les termes, le temps nécessaire pour que le front de l'écoulement atteigne une distance x_f dans un moule rectangulaire de section constante est donné par la formule suivante :

$$t = \frac{\mu\phi \cdot x_f^2}{2K \cdot \Delta P} \quad (1.7)$$

1.6 Distribution des vides dans les matériaux composites

L'utilisation industrielle des procédés LCM est souvent limitée par la possibilité relativement élevée que de tels procédés induisent des défauts comme des zones sèches ou la présence de vides pendant le remplissage du moule. Les zones sèches sont les défauts les plus volumineux et sont les plus apparents. Les vides, plus petits, sont difficilement visibles à l'œil nu. Un bon indicateur d'un mouillage adéquat des fibres et d'un faible taux de vide est l'apparence semi-transparente des pièces produites. Il est connu que la présence de vides raccourcit la vie en fatigue d'une pièce composite en réduisant ses performances thermomécaniques et en augmentant leur sensibilité à l'environnement. Plus particulièrement, ce type de défaut a un effet drastique sur les propriétés mécaniques dominées par la matrice comme la résistance au cisaillement interlaminaire, la résistance en compression et la vie en fatigue puisque les porosités agissent comme des zones de concentration de contraintes [7].

Dans les procédés LCM, les vides peuvent être formés de différentes façons. Voici les principaux mécanismes de formation :

- 1) Emprisonnement mécanique de l'air durant le remplissage du moule.
- 2) Formation de gaz dû à la réaction chimique entre la résine et le catalyseur.
- 3) Non évacuation de l'eau ou de gaz déjà dissous dans la résine avant l'injection.

Le premier mécanisme de formation des vides énuméré plus haut provient de l'écoulement multiphase se produisant lors de l'imprégnation des fibres dans les procédés LCM. Les préformes ont deux dimensions caractéristiques de pores : la première correspond à l'espace entre les mèches tandis que la seconde est associée aux micropores entre les filaments constituant la mèche. En effet, deux types d'écoulement distincts se développent à des échelles différentes. Tout d'abord, à l'échelle macroscopique, il y a l'écoulement visqueux entre les mèches, puis, à l'échelle

microscopique, un écoulement du fluide gouverné par les forces capillaires se produit à l'intérieur des mèches. Des porosités sont créées sur le front d'écoulement de résine, lorsque ces deux types d'écoulement avancent à des vitesses différentes (Figure 1.4).

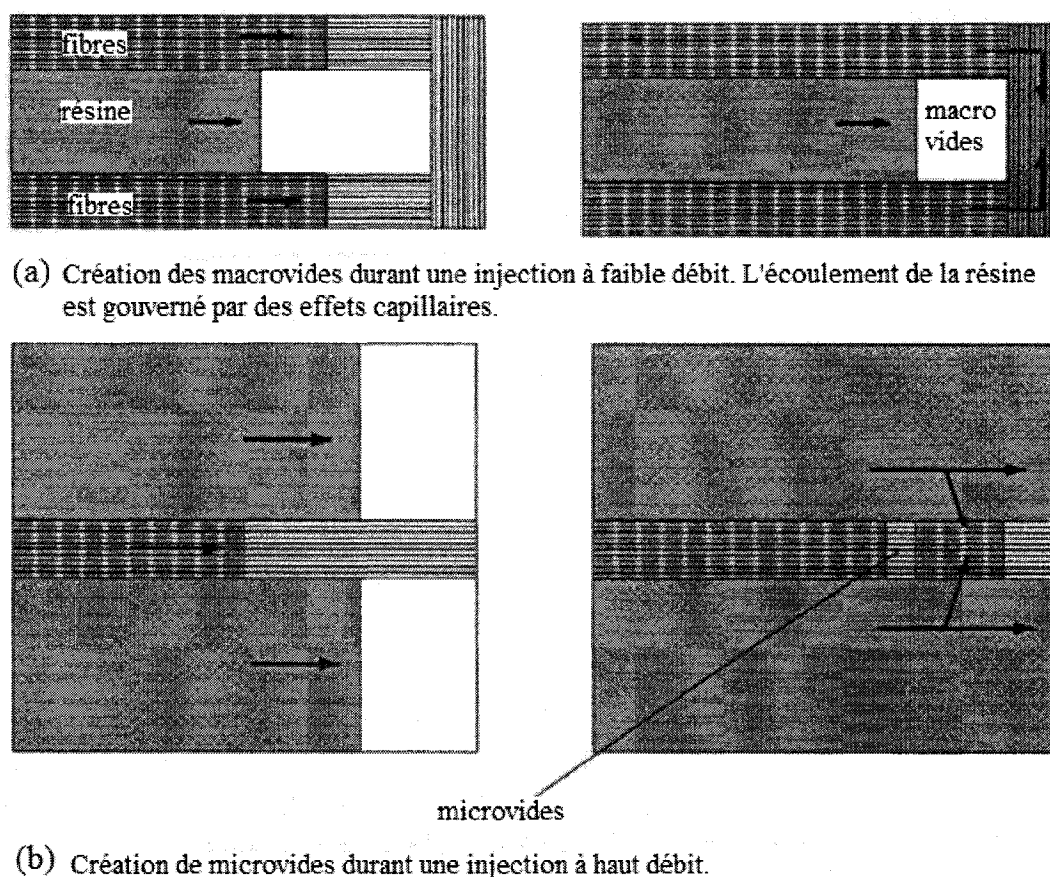


Figure 1.4 : Processus de formation de macrovides (a) et microvides (b).

Les gaz ainsi emprisonnés dans la résine s'accroîtront en diamètre ou s'affaîsseront en fonction de la variation de la température et de la pression statique de la résine. Le comportement des bulles est influencé par de tels changements en relation avec la loi des gaz parfaits. Une augmentation de température ou une diminution de la pression environnante conduira le gaz contenu dans la bulle à se dilater. Il en résultera un accroissement du diamètre de la bulle. La dimension des bulles résulte également de la diffusion des espèces mobile à travers l'interface bulle/résine, i.e. que les espèces gazeuses dans la bulle diffuseront dans la résine ou à l'inverse, les gaz dissous dans la

résine diffuseront dans la bulle. La température affecte directement le gradient de transfert de ces espèces mobiles. Cependant, une augmentation de la température augmentera aussi la vitesse de cuisson des résines thermodurcissables, ce qui réduira le temps de gel et par le fait même le temps disponible pour réduire la taille des bulles.

Les relations mathématiques de diffusion sont très analogues à celles de la théorie de conduction de chaleur pour une sphère parfaitement conductrice dans un milieu isotrope infini. Cependant, la modélisation exacte de la cinétique des bulles requiert la solution d'équations différentielles dépendantes du temps, dont on ne connaît généralement pas de solutions analytiques. De plus, plusieurs propriétés physiques ne sont pas obtenues avec suffisamment de précision pour justifier le temps de calcul excessif que requiert une modélisation complète. Heureusement, quelques hypothèses et simplifications peuvent être faites pour permettre un traitement mathématique applicable aux composites. Le développement d'un modèle analytique a été élaboré par Wood et Bader [8].

Six approches peuvent être envisagées pour réduire le taux de vide dans les pièces composites fabriquées à partir des procédés LCM.

- 1) Contrôler la vitesse d'écoulement de la résine de façon à ce que le front soit uniforme.
- 2) Injecter sous vide.
- 3) Dégazer la résine avant l'injection.
- 4) Purger la cavité avec un excès de résine suite au remplissage complet du moule.
- 5) Comprimer le composite pour augmenter la pression statique dans la résine de manière à diminuer la taille des bulles et également, de les dissoudre dans la résine.
- 6) Induire des vibrations.

1) Vitesse d'écoulement

À haut débit d'injection, l'écoulement visqueux domine l'imprégnation et des vides de forme cylindrique apparaissent surtout à l'intérieur des mèches. D'un autre côté, à débit plus faible, l'écoulement capillaire gouverne l'imprégnation et des macro-vides de forme sphérique sont créés entre les mèches. Afin de minimiser le taux de vide, il s'agit de contrôler le débit pour que la vitesse de l'écoulement capillaire soit égale à celle de l'écoulement visqueux inter-mèches. Certains chercheurs se sont penchés sur la détermination du nombre capillaire optimum pour atteindre cet objectif [9]. Cependant, obtenir de telles valeurs requiert souvent d'injecter la résine à des débits plus faibles que ceux généralement utilisés dans l'industrie [10]. Cela induit des temps de remplissage plus longs et ainsi une rentabilité du procédé moindre. Bien sûr, il est possible d'utiliser plusieurs ports d'injection, mais le contrôle du débit devient alors plus complexe avec un tel moule qui doit être nécessairement «intelligent».

2) Effet de la pression de vide

L'utilisation du vide pour assister l'injection est une autre technique fortement répandue pour diminuer le taux de vide [11]. Plusieurs auteurs ont démontré que les propriétés mécaniques et le niveau de porosité étaient améliorés dans les procédés d'injection assistés par le vide [12; 13; 14]. L'explication est que la cavité du moule étant mise sous vide avant l'injection, la pression interne devient plus basse, facilitant ainsi la dissolution des vides dans la résine et permettant aussi leur mobilité durant le remplissage. En effet, le déplacement des bulles d'air demande un gradient de pression suffisamment important pour forcer les bulles à passer à travers les interstices du renfort. Par contre, l'utilisation du vide seule n'est pas suffisante pour éliminer totalement ce type de défaut car de faibles taux de vide ne peuvent être obtenus qu'avec des équipements dispendieux et lorsqu'une pression de vide importante est appliquée. De plus, ce dernier point n'est pas possible pour certaines résines comme le polyester où le styrène, qui est un composant essentiel à la réticulation, se volatilise facilement lorsque mis sous vide. Par ailleurs, d'autres effets bénéfiques sont attribués à l'assistance de

l'injection par le vide. Entre autres, cela fournit une force supplémentaire de fermeture du moule, une compaction du renfort et une augmentation du gradient de pression lors de l'injection.

3) Dégazage

La troisième option a été étudiée par Lundstrom [15]. Il constate qu'une résine proprement dégazée accélère considérablement la dissolution des vides. Par ailleurs, il est assez évident qu'une forte teneur initiale en éléments volatiles résulte en un taux de vide plus élevé. Cependant, le dégazage de la résine n'a pas d'influence sur l'emprisonnement de bulles sur le front de résine, qui constitue la première cause de formation des vides dans les procédés LCM. Le dégazage peut être accompli soit par agitation, par centrifugation ou par l'application d'une pression de vide.

4) Saignée

Lundstrom et Gebart ont observé que la région avec la teneur en vides la plus significative est située près du port de sortie, tandis que près du port d'entrée, aucun vide n'était détecté [16]. Une solution industrielle pour éliminer la présence de ces vides a été proposée [17]. Elle consiste à poursuivre l'injection de résine à un haut débit après que le moule ait été rempli. Les forces hydrodynamiques brisent les vides en de plus petites dimensions et ensuite les transportent à l'extérieur du moule.

5) Compaction

En plus de contribuer à réduire le volume des bulles pour faciliter leur évacuation de la cavité, la pression statique peut amener une dissolution du gaz dans la résine par diffusion si cette pression excède la pression de vapeur du gaz, dans le cas bien sûr où la phase gazeuse est soluble dans la résine. Cette alternative à la réduction du taux de vide est largement répandue parmi les procédés de fabrication composites.

6) Effet des vibrations

Cette solution visant à réduire le niveau de porosité n'a pas encore été beaucoup étudiée. Song et Ayorinde [18] affirment que le taux de vide pourrait être réduit en induisant des vibrations, améliorant ainsi la consolidation et augmentant aussi la mobilité des gaz emprisonnés dans la résine. Parmi les autres bénéfices potentiels, les vibrations pourraient améliorer le mouillage des fibres et favoriser une distribution plus uniforme de la résine. Par ailleurs, les expériences de Baig et Gibson [19] ont montré qu'en forçant la résine à osciller à haute fréquence lorsqu'elle entre dans le moule en utilisant un piston vibrant, on obtient une réduction de la viscosité effective et une augmentation correspondante de la vitesse du front de résine.

1.7 Compressibilité et relaxation des renforts

1.7.1 Compressibilité

Lorsque le composite est mis en compression pendant la période de remplissage du moule, une partie de la charge sera inévitablement reprise par le renfort. La loi de compressibilité d'un renfort relie la pression appliquée sur le renfort à son épaisseur. La Figure 1.5 montre un exemple de courbe de compressibilité typique, qui peut être exprimée mathématiquement par une loi de puissance [20]. La forme générale d'une telle loi est

$$V_f = A * \sigma_c^B$$

où A et B sont des coefficients déterminés expérimentalement. Dans la Figure 1.5 la contrainte est en ordonnée et la fraction volumique est portée en abscisse plutôt que l'épaisseur du renfort. En effet, il est possible de relier l'épaisseur du renfort au taux volumique de fibres avec l'équation suivante :

$$V_f = \frac{\rho_s n}{\rho_v h} \quad (1.8)$$

où h est l'épaisseur des n couches de renfort, ρ_s est la densité surfacique du renfort et ρ_v est la masse volumique du matériau.

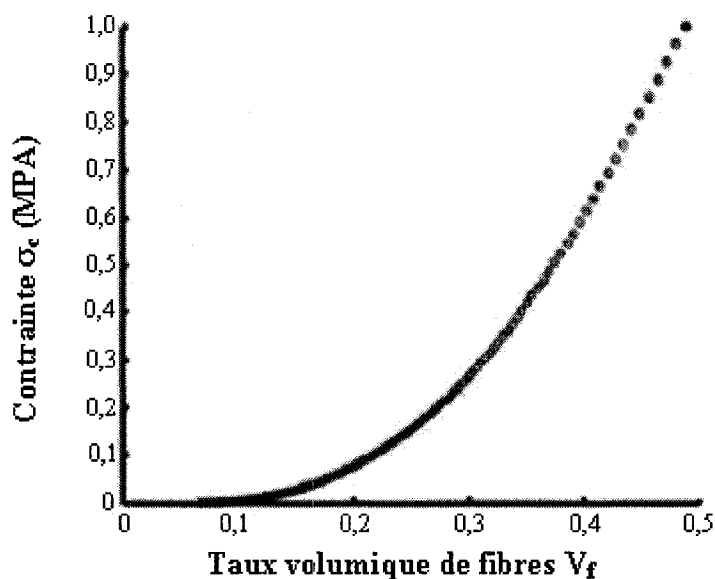


Figure 1.5 : Courbe de compaction typique des renforts fibreux.

L'observation de la courbe de compaction de la Figure 1.5 illustre le comportement général des renforts. On constate qu'au début de l'essai, la force requise pour créer une déformation demeure faible et croît lentement. En fin d'essai cependant, on décèle une augmentation plus rapide de la contrainte en fonction de la déformation ; le renfort se comporte davantage comme un solide (linéaire). Selon Robitaille et Gauvin [20], cette rigidification serait due à la transition du contact inter-fibre qui passe de ponctuel à linéaire sur une certaine longueur, la surface de contact totale augmente rapidement dans cet intervalle.

Une caractéristique particulière des renforts est l'effet d'hystérésis qu'ils présentent lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations cycliques [20]. Ceci signifie que la réponse du renfort dépend de son historique de chargement. Un renfort apparaît moins rigide lors de sa première compaction, sa rigidité augmente s'il est comprimé à répétition. Ce phénomène doit être pris en considération pour évaluer avec plus de précision la contrainte reprise par les fibres.

L'essai de compressibilité est généralement effectué sur des renforts secs, mais la résine produit un effet de lubrification observé par Kim [21] qui diminue la rigidité du renfort. Sous la même pression, un renfort lubrifié permet d'atteindre un taux volumique de fibres légèrement supérieur au renfort sec. Négliger l'effet de la lubrification surestime la contrainte reprise par les fibres dans le procédé. Il en résulte une sous-estimation de la pression statique de la résine. Dans le cas d'une analyse du taux de vide en fonction de la pression statique de la résine, négliger l'influence du pouvoir lubrifiant de la résine conduit à une prédiction conservatrice de cette pression.

1.7.2 Relaxation

Lorsqu'un renfort est maintenu en compression, il a tendance à relaxer, i.e., sa résistance à la déformation diminue avec le temps. La compréhension de ce comportement est fondamentale car il permet d'évaluer la pression reprise par les fibres à l'intérieur du moule pendant l'étape de consolidation. Les expérimentations de Robitaille et Gauvin [20] ont démontré que la relaxation peut être exprimée par l'équation suivante :

$$\frac{\sigma}{\sigma_o} = 1 - C \cdot t^{(1/D)} \quad (1.9)$$

Cette relation exprime la diminution de la pression reprise par les fibres en fonction du temps écoulé depuis l'application de la sollicitation σ_o . Les coefficients C et D sont obtenus expérimentalement. Un exemple de courbe de relaxation est présenté à la Figure 1.6.

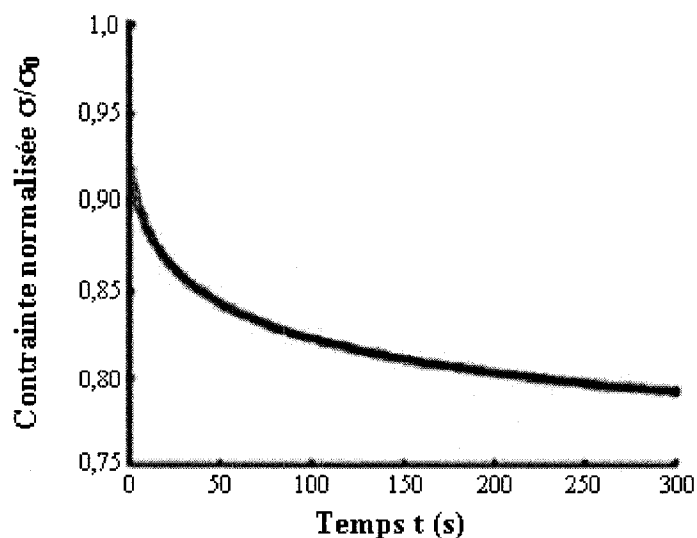


Figure 1.6 : Courbe de relaxation typique des renforts fibreux.

1.8 Loi de Terzaghi

La relation d'équilibre de Terzaghi (équation (1.10)) stipule que la pression de compaction d'un renfort déformable saturé (σ_{appl}) est égale à la somme de la contrainte reprise par les fibres (σ_{eff}) et de la pression statique de la résine ($P_{résine}$).

$$\sigma_{appl} = \sigma_{eff} + P_{résine} \quad (1.10)$$

La contrainte effective reprise par les fibres peut être déterminée à l'aide d'un essai de compressibilité tel qu'expliqué précédemment. Si la contrainte appliquée et la contrainte effective sont connues, on peut en déduire la pression statique de la résine par la relation précédente. La Figure 1.7 illustre la relation de Terzaghi.

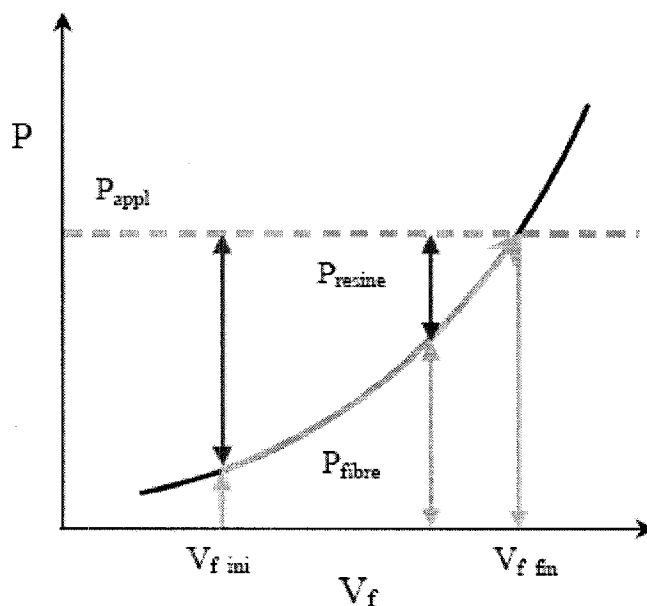


Figure 1.7 : Relation d'équilibre de Terzaghi.

La Figure 1.7 illustre la loi de Terzaghi et montre l'évolution de la pression de la résine et des fibres complémentaires. La pression statique ainsi calculée peut être validée à l'aide d'un dispositif expérimental adéquat muni de capteurs de pression.

La Figure 1.8 représente l'évolution de la répartition de la pression à l'intérieur du moule lors de la compaction à pression constante d'un composite. Au début de la compaction, la pression dans le réseau fibreux est pratiquement nulle, donc la majorité de la pression est reprise par la résine. Si la résine n'a pas complètement imprégné le renfort au moment où la compaction commence, la pression reprise par la résine se séparera en partie en une pression dynamique favorisant son écoulement. Aussitôt que le moule devient complètement saturé, la pression dynamique caractéristique du mouvement devient nulle et la pression dans la résine se transforme en pression statique. Au fur et à mesure que la déformation en compaction augmente, la contrainte reprise par les fibres devient plus importante et la pression statique dans la résine diminue. Le moule étant maintenu sous pression jusqu'à polymérisation de la pièce, l'effet de

relaxation provoque une diminution graduelle de la pression sur les fibres, d'où une augmentation de la pression statique dans la résine.

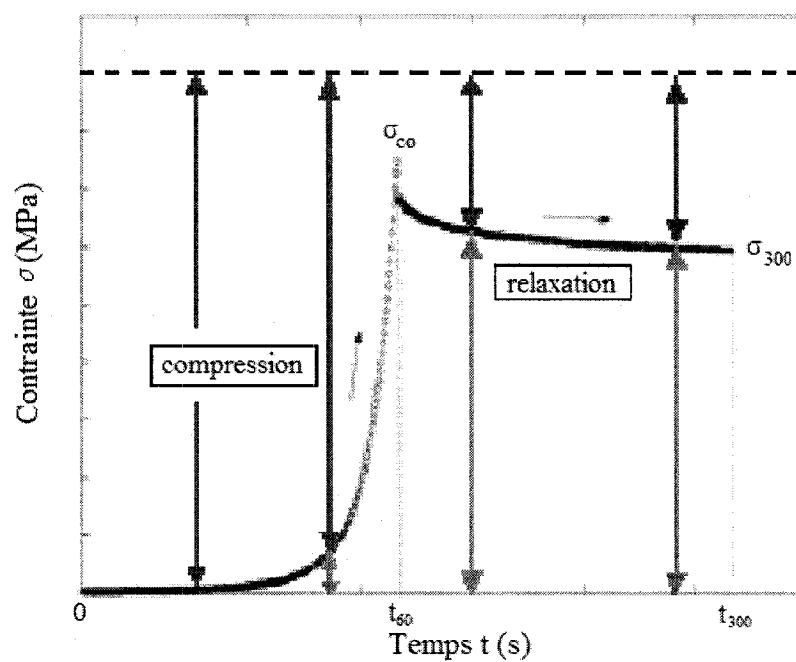


Figure 1.8 : Répartition de la pression totale entre les fibres et la résine.

CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DU PROCÉDÉ POLYFLEX

2.1 Introduction

Les matériaux composites possèdent un grand potentiel pour l'industrie de l'automobile en raison de leurs hautes propriétés spécifiques. Cependant le taux de production doit être amélioré et les coûts de fabrication réduits pour supplanter des matériaux dits traditionnels comme les métaux et en particulier l'aluminium. En ce sens, les procédés d'injection sur renfort de polymères thermodurcissables en moule fermé sont particulièrement attrayants pour cette industrie en raison de la faible énergie requise pour la fabrication ($\frac{1}{4}$ de l'énergie nécessaire à la production d'une pièce comparable en acier) et des faibles forces de fermeture du moule ($\frac{1}{40}$ de la force nécessaire pour produire un composite par compression et $\frac{1}{100}$ de la force requise pour moulage par injection des thermoplastiques [1]).

Le procédé RTM (« *Resin transfer molding* ») constitue la technique de fabrication par injection la plus connue et la plus répandue. L'industrie l'utilise actuellement pour réaliser des cadences de production moyenne d'environ quelques milliers de pièces par an. Un nouveau procédé de fabrication par injection flexible nommé Polyflex vise à augmenter le volume de production à environ 20 000 pièces par an dans le but de s'implanter dans l'industrie de l'automobile. En effet, dans cette industrie, la qualité désirée des pièces produites n'est pas du même niveau qu'en aéronautique et la motivation est davantage axée sur la fabrication rapide à faible coût. Le procédé Polyflex vise des applications structurales comme les planchers de voiture et semi-structurales comme les pièces de carrosserie. Afin d'atteindre un tel volume de production, le temps de cycle pour la fabrication de pièces composites doit être environ 6 à 8 minutes : 1 minute pour le positionnement du renfort et la fermeture du moule, 1 à 2 minutes pour l'injection, 2 à 3 minutes pour la cuisson de la pièce, 1 minute pour le démoulage et 1 minute pour le nettoyage.

Le temps de remplissage du moule est critique pour la fabrication rapide puisqu'il représente environ 25% du temps de cycle total. En comparaison avec le procédé RTM décrit dans le chapitre précédent, la technique de fabrication Polyflex possède l'avantage de réduire le temps de remplissage du moule. En effet, des expériences antérieures [25] sur ce nouveau procédé ont permis d'observer un temps de remplissage jusqu'à quatre fois plus rapide avec le procédé d'injection Polyflex par rapport au procédé RTM conventionnel pour une même pression d'injection de la résine et pour une même épaisseur de pièce finale.

Ce chapitre décrit d'abord les étapes de fabrication du procédé Polyflex. On discute ensuite des avantages et inconvénients de ce procédé avec une description des différents modes d'écoulement de la résine. Par la suite, on présente le moule Polyflex 1 qui fut utilisé pour réaliser les trois plans d'expérience de ce rapport. Enfin, on explique les paramètres du procédé et le chapitre 2 se termine par une description de la méthode de préformage employée dans le troisième plan d'expériences.

2.2 Étapes de fabrication du procédé Polyflex

Le procédé Polyflex consiste à injecter une résine thermodurcissable dans un renfort fibreux contenu dans un moule rigide dont la cavité est composée de deux chambres séparées par une membrane flexible. Le renfort et la résine se trouvent dans la chambre d'injection située dans la partie inférieure de la cavité, tandis que la chambre de compaction est remplie par un fluide dont la fonction est d'appliquer une pression uniforme sur le composite pendant l'imprégnation du renfort. Voici une description générale des différentes étapes du procédé Polyflex.

2.2.1 Étapes préliminaires

2.2.1.1 Mise en place des composantes du moule

Une particularité du procédé Polyflex consiste en la création de deux cavités grâce à un film de séparation tel que montré à la Figure 2.1. On commence par la disposition du renfort sur la surface de la cavité inférieure du moule. Le film plastique est ensuite placé sur le renfort et le moule est fermé. La Figure 2.2 montre le moule fermé. Selon l'épaisseur initiale du renfort, ce dernier peut remplir toute la cavité disponible ou non. À cette étape, l'épaisseur initiale du renfort h_0 contient une fraction volumique de fibres initiale V_{f0} .

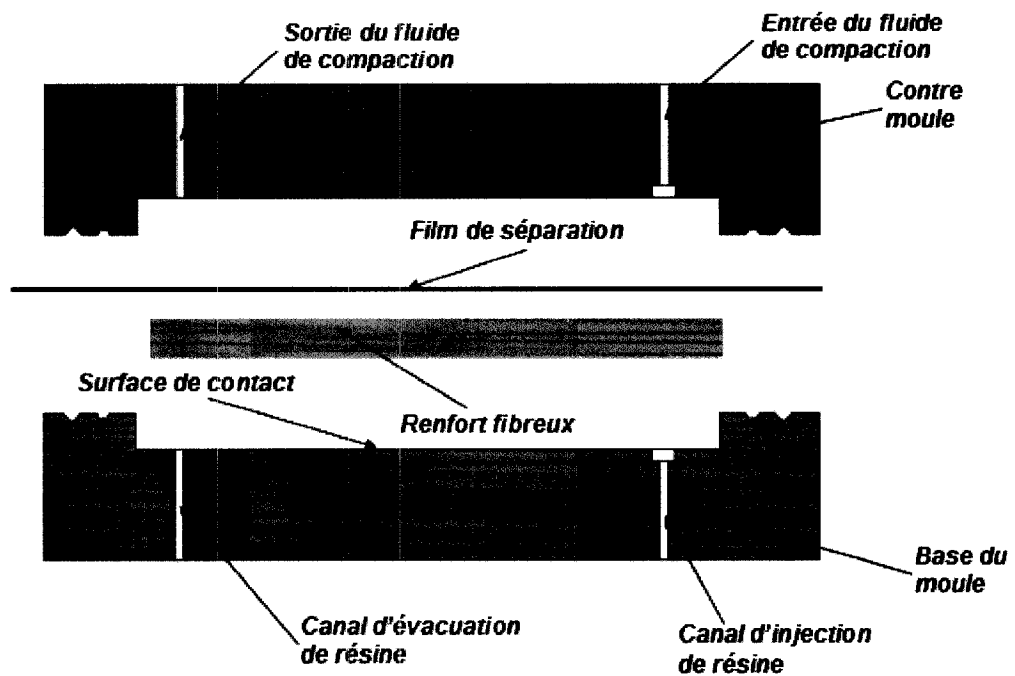


Figure 2.1 : Description des différentes composantes d'un moule Polyflex.

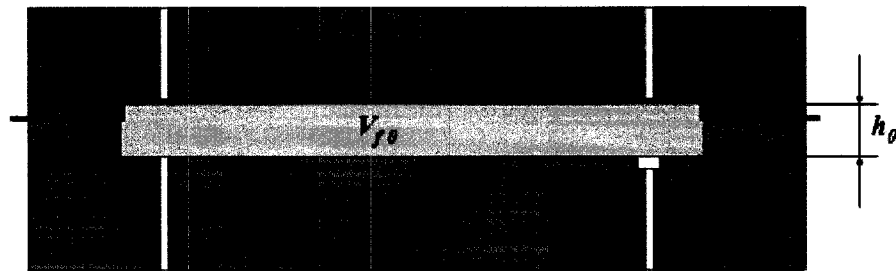


Figure 2.2 : Fermeture du moule.

2.2.1.2 Mise sous vide

Une pression de vide est appliquée à partir d'une extrémité du moule (Figure 2.3). Pour cela, le pourtour du moule doit être étanche à l'air. Une autre fonction de la membrane est de contribuer à cette étanchéité. Selon le type de renfort utilisé et la pression de vide appliquée, les fibres seront plus ou moins compactées.

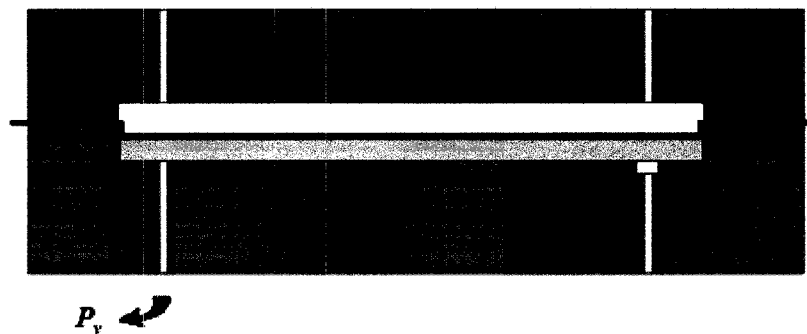


Figure 2.3 : Mise sous vide de la chambre d'injection.

2.2.2 Étape 1 : injection de la résine

La séquence de fabrication débute avec l'injection à pression ou à débit contrôlé d'une certaine quantité de résine dans la cavité inférieure du moule, tel qu'illustré à la Figure 2.4. Un contrôle précis du volume de résine injecté est nécessaire pour produire des pièces régulières puisque l'épaisseur finale du composite h_c est en partie déterminée par cette quantité. La pièce composite finale aura une épaisseur h_c plus petite que h_{θ} . Ceci

signifie que lors de cette étape, la résine remplit uniquement une fraction de la cavité du moule. Près du port d'injection de la résine, le mélange renfort-résine peut atteindre la paroi supérieure de la cavité. Ceci dépend de l'épaisseur initiale du renfort h_0 , de l'épaisseur totale de la cavité et de la pression d'injection.

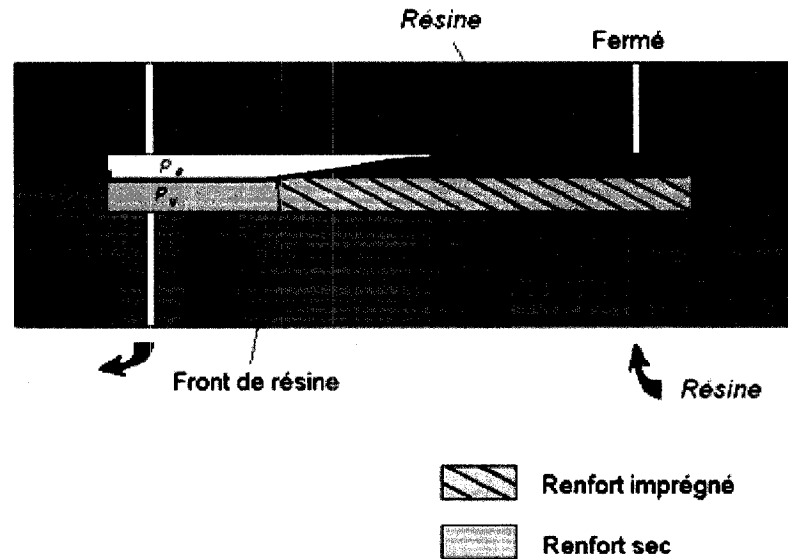


Figure 2.4 : Injection de la résine dans le moule.

2.2.3 Étape 2 : injection du fluide de compaction

Cette étape commence tout de suite après la fermeture du port d'injection de la résine. À ce moment, un fluide non réactif est injecté sous pression dans la chambre de compaction au dessus du film de séparation (Figure 2.5). Aussitôt que le fluide non réactif a rempli la chambre de compaction, son évent est fermé. Durant cette étape, le fluide de compaction en mouvement applique une pression sur la résine qui favorise son déplacement vers l'autre extrémité du moule.

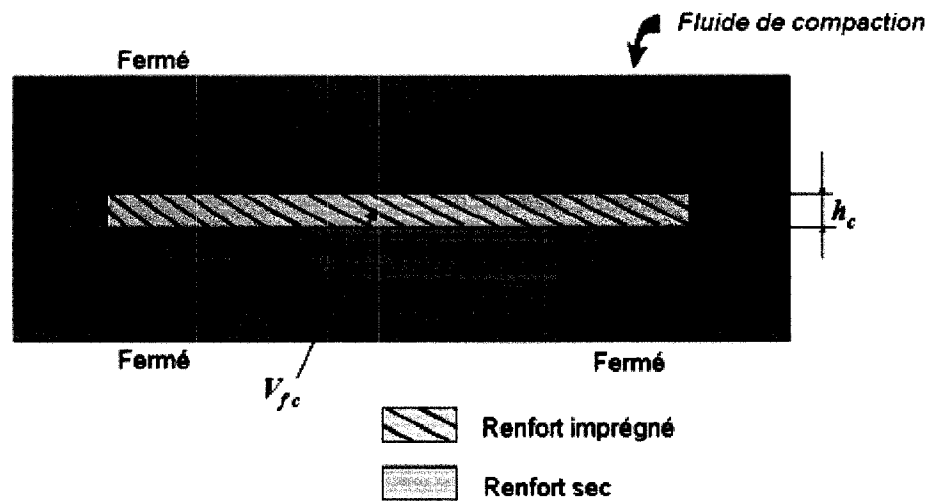


Figure 2.6 : Consolidation du composite.

Pour assurer une procédure de fabrication optimale, l'équilibre de distribution de la résine dans le moule doit être synchronisé avec le début de la polymérisation. Ce temps est déterminé par la formulation de la résine et l'apport de chaleur résultant du chauffage du moule (Figure 2.7). À la fin de l'étape de consolidation, la pièce a complètement polymérisé.

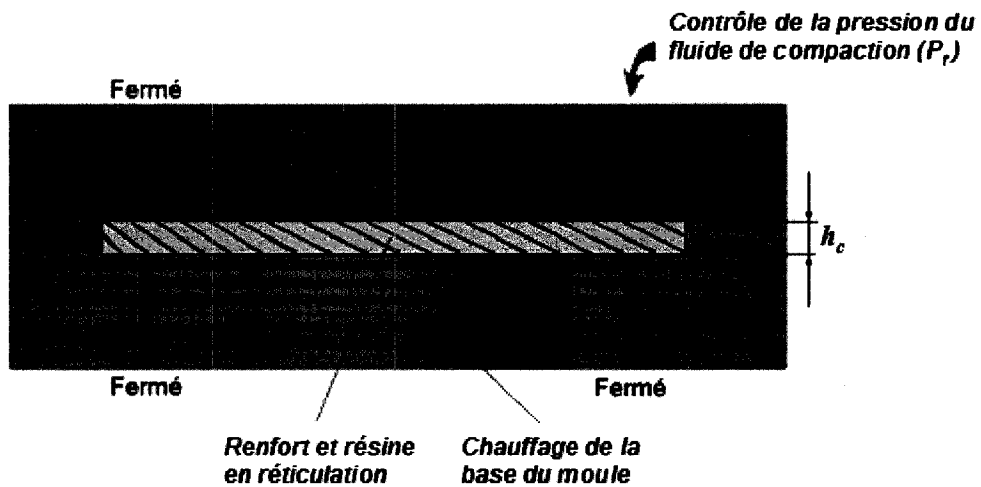


Figure 2.7 : Polymérisation du composite.

2.2.5 Démoulage de la pièce fabriquée

Après l'étape de consolidation, le fluide de compaction est évacué pendant que le moule se refroidit. Le moule est ensuite ouvert et on détache le film de séparation du composite. La pièce est finalement démoulée et la fabrication est terminée (Figure 2.8).

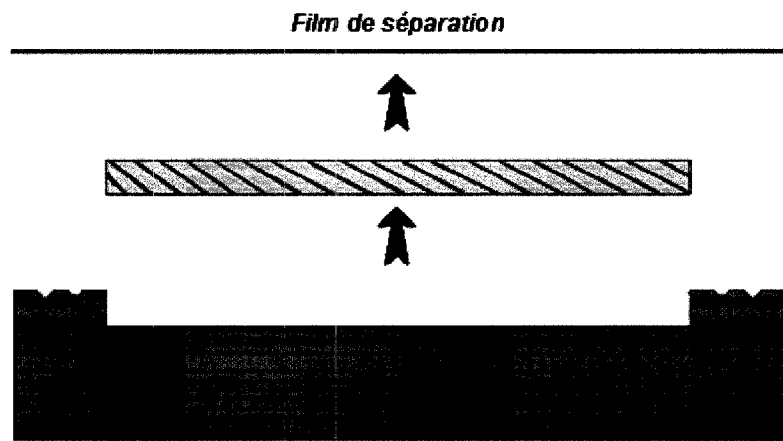


Figure 2.8 : Démoulage de la pièce fabriquée.

2.3 Avantages et inconvénients

Le procédé Polyflex combine les particularités des procédés CRTM, VARTM et VARI. En effet, le fluide de compaction permet de mettre en compression le composite pour compléter l'imprégnation du renfort et faciliter la consolidation comme la presse en CRTM. L'assistance de l'injection par une pression de vide constitue le principe de base du VARTM. Finalement, l'utilisation d'une membrane flexible pour séparer la cavité d'injection de la résine de celle du fluide de compaction est une caractéristique du procédé VARI.

Voici les principaux avantages et inconvénients du procédé Polyflex :

Avantages :

- Imprégnation rapide du renfort qui augmente la cadence de production.
- Possibilité de fabriquer des pièces de forme complexe.
- Compaction uniforme du composite facilitant la consolidation, améliorant la qualité des pièces produites et réduisant le taux de vide.
- Application du vide pendant le processus d'imprégnation ; ceci améliore la qualité des pièces produites en réduisant le taux de vide.
- Le procédé s'exécute entièrement en circuit fermé ; ceci permet de contrôler les émanations indésirables comme le styrène.

Inconvénients :

- Mauvais état de surface du côté de la membrane de la pièce fabriquée.
- L'écoulement combiné de la résine à travers le renfort et du fluide de compaction complexifie le contrôle de la répartition de la résine et peut mener à des variations d'épaisseur et du taux volumique de fibres dans la pièce fabriquée.
- Le moule, le système de contrôle et l'équipement d'injection demeurent plus dispendieux que ceux utilisés pour les procédés LCM en général.
- Nécessité d'optimiser le procédé pour réduire les déchets (membrane, excédent de résine, fluide de compaction,...)

2.4 Modes d'écoulement de la résine

Le procédé Polyflex peut faire intervenir deux modes d'écoulement différents selon que l'épaisseur initiale du renfort h_0 est égale ou inférieure à l'épaisseur de la cavité du moule H . Plusieurs caractéristiques déterminent l'épaisseur initiale du renfort. Par leur structure, les mats et les tissus n'ont pas la même épaisseur. Un renfort préformé possède une épaisseur plus faible que son épaisseur naturelle. Le nombre de couches du renfort influence également l'épaisseur initiale h_0 du renfort. Le renfort peut être

également comprimé à une valeur inférieure à la cavité du moule si une pression de vide importante est appliquée. Si l'épaisseur naturelle du renfort est supérieure à l'épaisseur H de la cavité du moule, le renfort se compacte à la fermeture du moule et son épaisseur initiale devient $h_0 = H$.

2.4.1 Écoulement lorsque $h_0 = H$

Lorsque $h_0 = H$, le type d'écoulement lors de l'injection de la résine est similaire à celui qui se produit dans le procédé RTM. L'écoulement de la résine s'effectue uniquement dans le plan (voir Figure 2.9) et la vitesse de déplacement du front de résine est régi par la loi de Darcy (équation (1.1)). La différence avec le procédé RTM provient du fait que l'épaisseur finale du composite h_c est plus faible que l'épaisseur H de la cavité du moule. En effet, dans le procédé Polyflex, la résine est injectée sur une fraction de la longueur totale du moule et le remplissage complet du moule s'effectue par l'entremise du fluide de compaction qui comprime le composite à son épaisseur finale h_c .

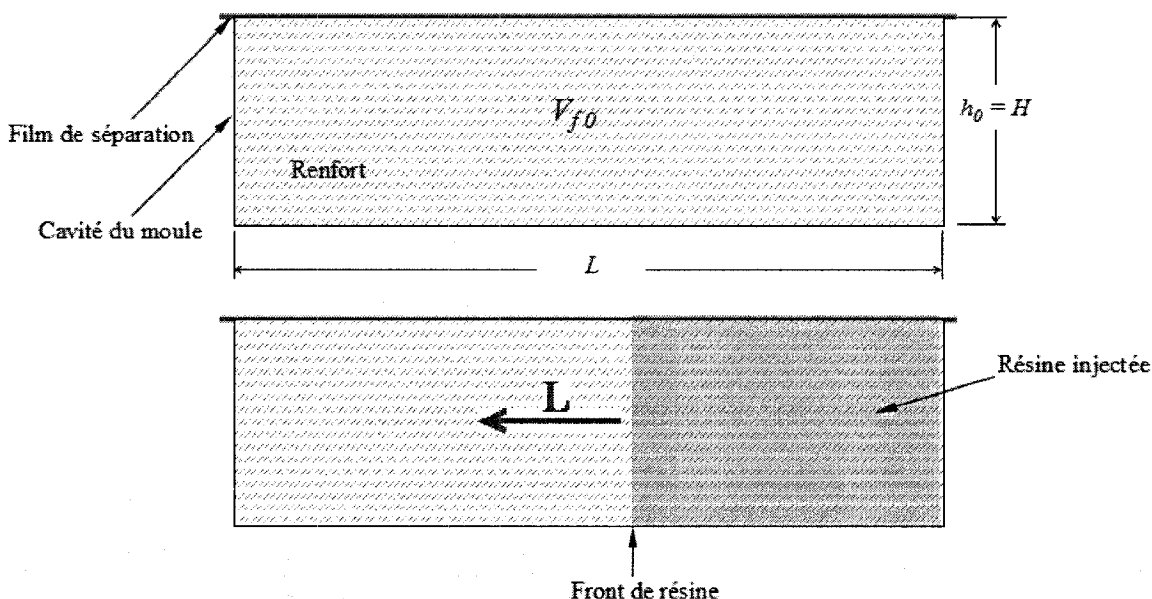


Figure 2.9 : Schématisation du mode d'écoulement de la résine lorsque $h_0 = H$.

2.4.2 Écoulement lorsque $h_0 < H$

Dans le cas où l'épaisseur initiale du renfort h_0 est plus faible que l'épaisseur de la cavité du moule H , un espace au-dessus du renfort est créé où la résine peut s'écouler tel qu'illustré à la Figure 2.10. On peut s'attendre à ce que deux fronts d'écoulement parallèles et longitudinaux de vitesses différentes soient engendrés. La résine devrait s'écouler plus facilement au-dessus du renfort, puisque c'est la zone où la perméabilité est la plus élevée. Selon le débit d'injection imposé, l'écart entre les deux fronts d'écoulement sera plus ou moins important. Cet écart entre les deux zones d'écoulement devrait produire un écoulement transverse non négligeable.

Après l'injection de la quantité de résine désirée, le fluide de compaction est introduit sous pression dans le moule. On peut s'attendre à un effet de vague : la résine au-dessus du renfort se déplace autant longitudinalement que transversalement jusqu'à ce que le front d'écoulement du fluide de compaction dépasse celui de la résine. À ce moment, la pression de compaction devrait forcer toute la résine à s'introduire dans le renfort. La fin de l'imprégnation devrait s'effectuer de façon conventionnelle dans le plan du renfort.

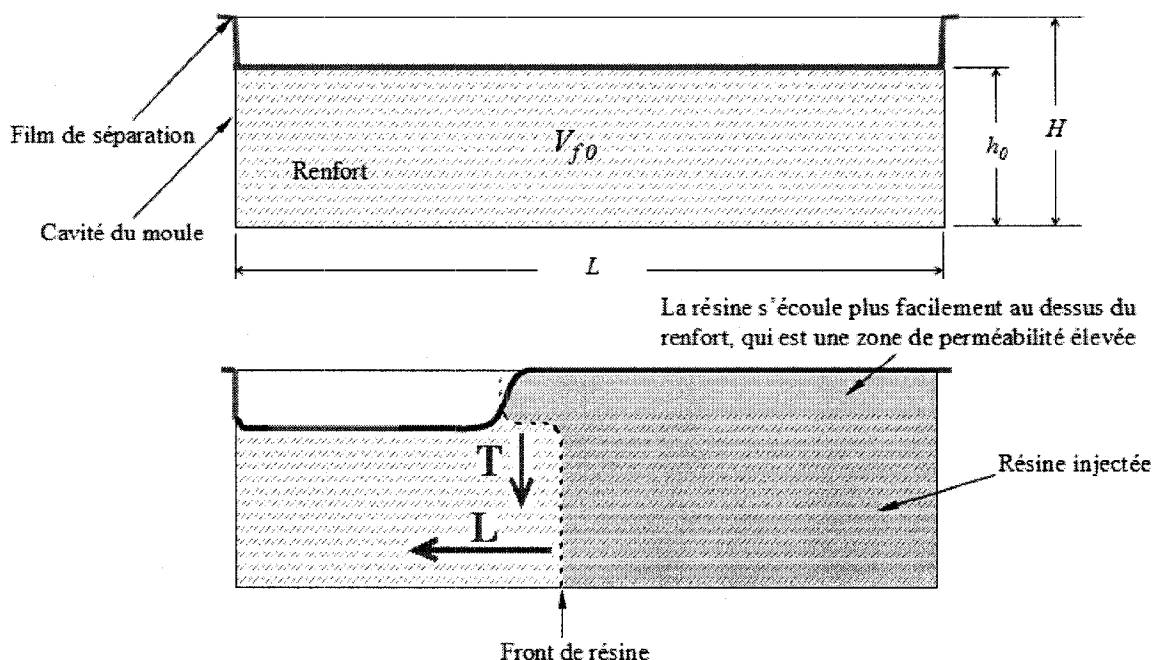


Figure 2.10 : Schématisation du mode d'écoulement de la résine lorsque $h_0 < H$.

2.5 Description du moule Polyflex 1

Tous les résultats d'expérience présentés dans ce mémoire ont été obtenus avec le moule rectangulaire et transparent Polyflex 1. Il est appelé ainsi puisque c'est le premier moule conçu pour expérimenter la technique Polyflex. Ce moule contient trois composantes principales. Comme le montre la Figure 2.11, il est composé de deux blocs identiques à parois planes, le moule et le contre-moule, au milieu desquelles est placé un cadre qui définit les dimensions de la cavité. Le contre-moule et les cadres sont faits de PMMA (polyméthylméthacrylate ou plexiglas), une matière transparente qui permet de visualiser l'écoulement de la résine et du fluide de compaction. La base du moule est fait d'aluminium 6061-T6 car le PMMA ne résiste pas bien au styrène et à l'élévation de température inévitablement engendrée par la réaction exothermique de la résine. La température maximale d'utilisation du PMMA, donc du moule Polyflex 1, est de 80 °C. Cinq cadres d'épaisseurs différentes sont disponibles pour étudier le procédé avec différentes épaisseurs de cavité. Les cadres sont numérotés de 1 à 5 et leur épaisseur est

respectivement de 3,175 mm (1/8"), 6,35 mm (1/4"), 7,938 mm (5/16"), 9,525 mm (3/8") et 15,875 mm (5/8"). Les cadres sont conçus pour la fabrication de plaques composites de 375 x 125 mm.

Le moule est muni de deux canaux d'injection de même largeur que la pièce à fabriquer. Ceci permet d'obtenir un front de résine rectiligne lors de l'injection. L'étanchéité du moule est assurée par 2 joints toriques placés entre le moule et le cadre et 2 autres entre le cadre et le contre-moule. Les joints toriques ont un diamètre de 3,175 mm (1/8"). Tel que montré à la Figure 2.11, des rainures ont été usinées dans le moule et le contre-moule pour les recevoir. Les propriétés générales du matériau utilisé pour les joints doivent répondre aux besoins recommandés pour les applications où une étanchéité au vide est désirée, c'est-à-dire une faible perméabilité au gaz, un faible poids et une bonne compressibilité [26]. Le viton, le silicone, le néoprène et le buna-n correspondent à ces recommandations. Du côté du moule, les joints sont en contact avec la résine. Le viton ou le silicone sont donc mieux appropriés car ils résistent au styrène contenu dans les résines polyester et vinylester, ce qui n'est pas le cas du néoprène ou du buna-n. Par contre, les matériaux proposés pour les joints qui sont en contact avec l'huile de silicone (le fluide de compaction employé) sont le néoprène ou le buna-n. Ces deux matériaux sont moins coûteux et résistent mieux à l'huile de silicone. Ce choix est également justifié puisque les expériences effectuées dans ce projet n'impliquent pas des conditions de température et de pression extrême. La compression des joints et la fermeture du moule sont assurées par 12 boulons de diamètre de 9,525 mm (3/8" – 16 UNC) serrés avec un couple de 17 N·m.

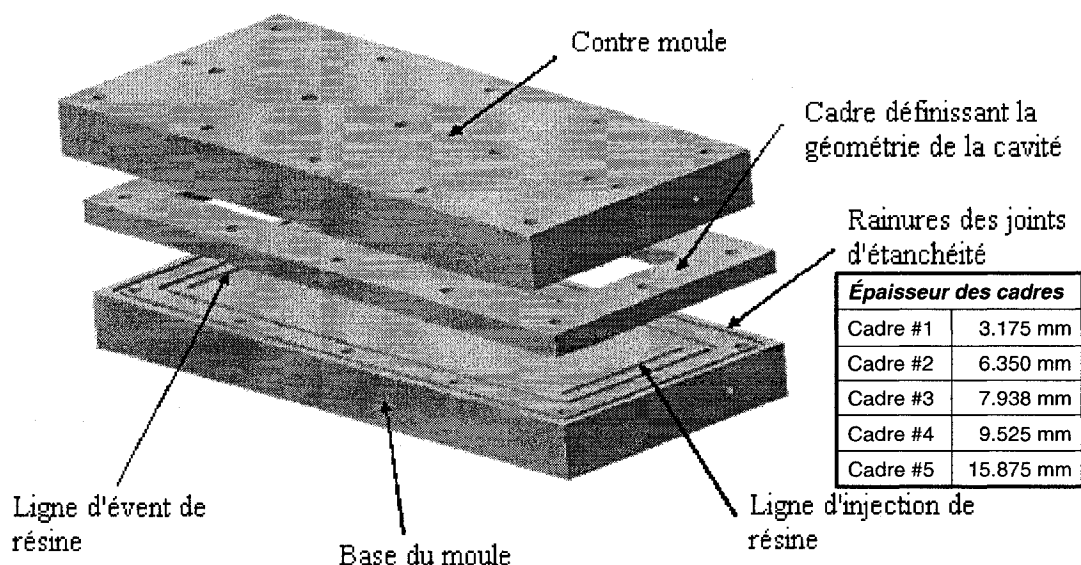


Figure 2.11 : Moule transparent Polyflex comprenant des cadres d'épaisseurs différentes.

2.6 Paramètres de fabrication

Les objectifs principaux de cette recherche sont l'optimisation du temps de remplissage du moule et la diminution de la variabilité de l'épaisseur des pièces produites. L'optimisation du temps de fabrication complet incluant la cuisson de la pièce ne faisant pas partie des objectifs, des expériences isothermes ont été effectuées à température ambiante. Ce critère permettait d'employer le moule Polyflex 1, dont la température maximale d'utilisation est de 80 °C.

Le procédé Polyflex comporte plusieurs paramètres qui gouvernent la fabrication du composite. Tout d'abord, en relation avec l'étape 1 de l'injection de la résine, on a le choix entre une injection à débit ou à pression contrôlée. Le contrôle en pression est largement utilisé dans l'industrie en raison de la simplicité des systèmes requis. Un simple et peu coûteux pot de pression permet d'accomplir cela. D'un autre côté, les systèmes d'injection à pression contrôlée possèdent généralement une moins grande

précision sur le volume injecté par rapport aux systèmes d'injection à débit contrôlé. Un autre paramètre du procédé Polyflex est la viscosité de la résine qui dépend du type de résine et de la température de fabrication. En effet, les résines époxy possèdent habituellement une viscosité plus grande que le polyester et encore plus grande que le vinylester. Le système d'injection doit être différent pour les résines époxy puisqu'ils n'ont pas le même nombre de composantes à mélanger. En effet, la réticulation des époxy nécessite l'ajout d'un durcisseur et d'un accélérateur en plus de la résine de base tandis que les résines esters ne requièrent que l'ajout d'un catalyseur pour amorcer la réaction de polymérisation.

D'un autre côté, les choix concernant le renfort influenceront le comportement du procédé. La façon dont les plis sont combinés pour former le renfort (tissu ou mat), le préformage et le nombre de couches déterminent l'épaisseur du renfort. Ceci a un impact non seulement sur le mode d'écoulement de la résine, mais aussi sur la perméabilité.

Les paramètres caractéristiques du fluide de compaction sont déterminants sur la performance du procédé Polyflex. La viscosité et la pression du fluide de compaction constituent deux paramètres importants pour l'étape de compaction. La pression de compaction peut être constante ou varier de façon cyclique autour d'une valeur moyenne. Un milieu poreux peut être placé dans la chambre de compaction pour créer une résistance à l'écoulement du fluide et ainsi augmenter la pression de compaction. Une pression de vide peut également être appliquée dans la chambre de compaction.

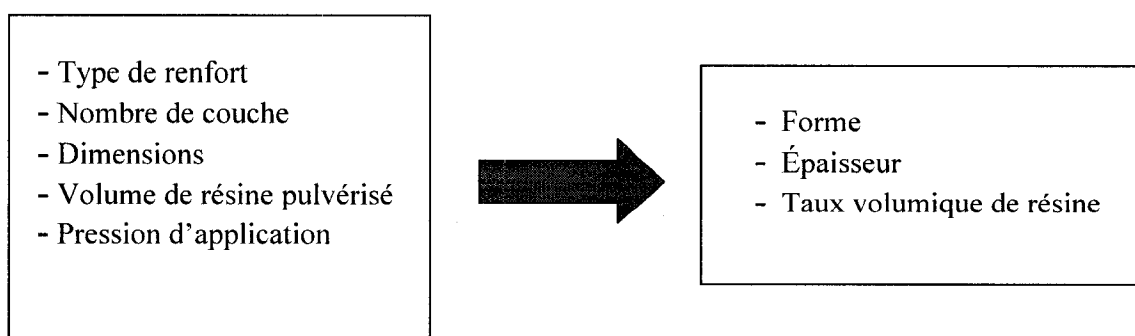
Les derniers paramètres concernent la géométrie du moule. Les épaisseurs de la cavité et la membrane de séparation constituent des choix importants. La configuration des ports d'injection et des événements et le matériau de la membrane jouent aussi un rôle.

2.7 Méthode de préformage

Une préforme représente le squelette de la pièce à fabriquer et est constitué d'un renfort qui est comprimé et maintenu par un liant dans la forme désirée. Le procédé de préformage décrit dans cette section correspond à celui qui a été utilisé pour le plan d'expériences #3 du chapitre 5. L'idée de base consiste à vaporiser une résine thermodurcissable réactive sur le renfort et d'appliquer une combinaison de température et de pression pour polymériser la résine et mettre en forme le renfort. La vaporisation est effectuée à l'aide d'un pot à gravité (« pot gun »). Le processus de compression dépend de la forme à produire.

2.7.1 Paramètres de préformage

Une méthode par essai et erreur est de mise pour obtenir une préforme aux caractéristiques précises puisqu'il existe divers types de renfort et la procédure suivante est soumise à l'expérience du manipulateur. Parmi les critères recherchés, il y a la forme, l'épaisseur et le taux volumique de résine. Les paramètres permettant de contrôler ces variables sont le type de renfort, le nombre de couche de renfort, les dimensions de la préforme, le volume de résine pulvérisé et la pression d'application.



2.7.2 Formulation de la résine

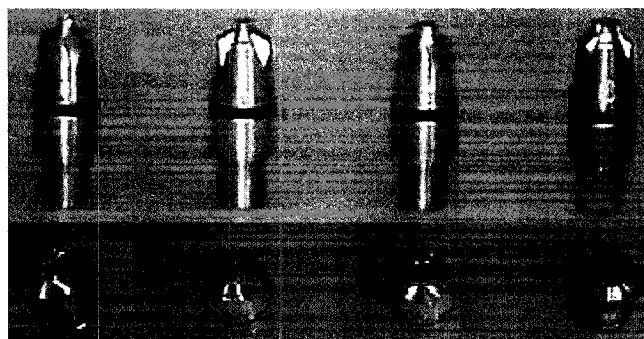
La formulation de la résine polyester T580-63 proposée au Tableau 2.1 polymérise en 2 heures à température ambiante et en 20 minutes à 75 °C.

Tableau 2.1 : Formulation de la résine polyester T-580 pour le préformage

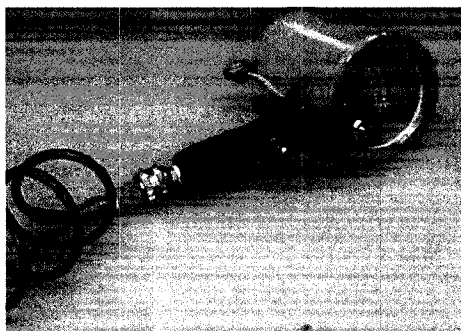
Abbréviation	Nom complet	Fabricant	Proportion
PE T-580-63	Polyester T-580-63	AOC	100
NaCo (12%)	Naphtalene de cobalt 12%	Dussek	1,1 phr
DMA	N-dimethylaniline	Buffalo Color Corporation	0,05 phr
MEKP9	Methyl ethyl ketone peroxide	NORAC	1,6 %

2.7.3 Projection de la résine

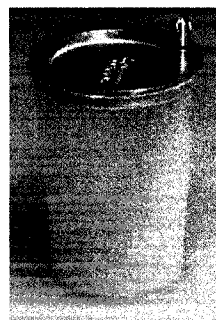
La projection de la résine s'effectue par l'entremise d'un pot à gravité qui consiste en un récipient contenant la résine auquel une buse est fixée. Le récipient est installé sur le pistolet connecté à un tuyau d'air comprimé.



(a)



(b)



(c)

Figure 2.12 : Les buses (a), le pistolet à air comprimé (b) et le réservoir de résine (c).

Lorsque le pistolet est renversé, la résine s'écoule par l'orifice de la buse. En appuyant sur le bouton du pistolet, l'air comprimé s'échappe par les rainures externes de la buse et vaporise la résine dans le milieu ambiant. La viscosité de la résine, la taille de l'orifice de la buse et la pression de l'air constituent les paramètres contrôlant le débit de résine vaporisée. La fabrication de préformes implique de petites quantités de résine, donc une faible pression d'environ 40 psi est suffisante. Selon la viscosité de la résine, il est conseillé d'utiliser la buse avec le plus petit orifice qui laisse s'écouler la résine. Cela permet d'obtenir de fines gouttelettes sans avoir un débit trop important.

Pour vaporiser la résine, il suffit de renverser le pistolet et d'appuyer sur le bouton. Ensuite, on balaie la surface à imprégner avec des mouvements constants, à une distance d'environ 10 pouces. Le jet de résine est plus concentré au centre qu'à l'extérieur. Il faut

alors entrecouper les passages pour obtenir un résultat uniforme. La Figure 2.13 montre le résultat visé. Il est important de projeter de la résine des deux côtés de chacune des couches de renforts pour que la résine imprègne bien les fibres.

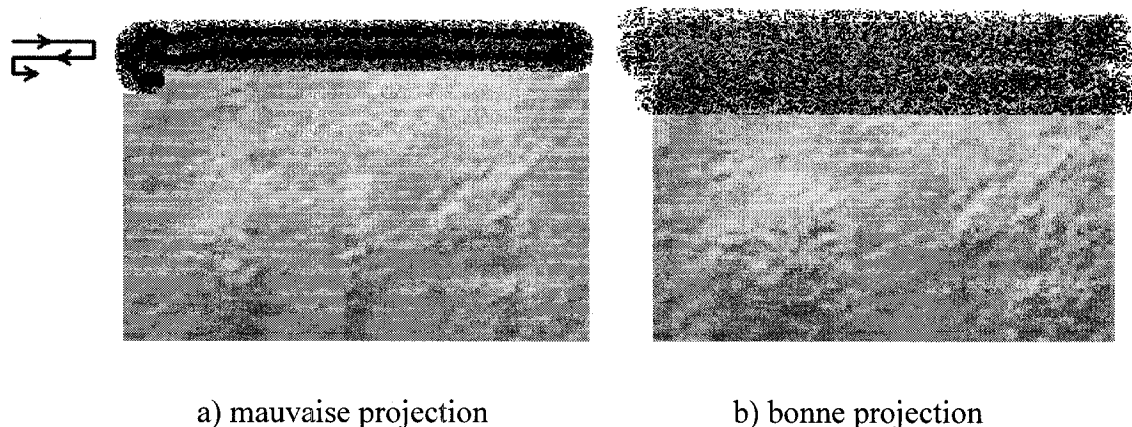


Figure 2.13 : Schématisation d'une mauvaise (a) et d'une bonne (b) projection sur le renfort.

La quantité de résine déposée varie selon la vitesse d'avance du pistolet et le débit de résine. Le contrôle de la quantité de résine déposée est donc un processus itératif. Il est conseillé de s'exercer en vaporisant des feuilles de papier pour commencer afin de vérifier la densité surfacique obtenue.

2.7.4 Mise en forme

Pour obtenir une meilleure imprégnation de la résine projetée, il est recommandé de compresser le renfort pour forcer la résine à se lier le plus possible aux fibres. La préforme désirée pour le moule Polyflex 1 possède une forme simple ; c'est un rectangle d'épaisseur constante. Le processus de mise en forme se simplifie à la mise sous presse des renforts imprégnés de résine à la pression et température désirée. Il est conseillé de compresser les couches de renforts le plus lentement possible afin d'éviter que les différentes couches ne se déplacent les unes par rapport aux autres.

Une autre possibilité pour compresser les fibres consiste à placer le renfort sur un moule représentant la forme voulue, de recouvrir la préforme d'un sac plastique étanche et

d'appliquer une pression de vide à l'intérieur. Le différence entre la pression atmosphérique et le vide créé à l'intérieur du sac comprime la préforme.

2.8 Nomenclature d'identification des expériences

La nomenclature d'identification des plaques fabriquées pour toutes les expériences présentées dans ce mémoire suit le modèle suivant, par exemple :

PF1E05001

Le Tableau 2.2 donne la signification des lettres et des chiffres identifiant chacune des plaques.

Tableau 2.2 : Nomenclature d'identification des plaques fabriquées

Abbréviation	Définition	Description	Autres possibilités
PF1	Polyflex 1	nom du moule utilisé	PF2 (Polyflex 2) PF3 (Polyflex 3)
E	été	trimestre où l'expérience a été effectué	A (Automne) H (Hiver)
05	année 2005	année de fabrication	06
001	plaque no. 1	numéro de la plaque fabriquée	jusqu'à 999

2.9 Conclusion

Ce chapitre a décrit la procédure générale de fabrication du procédé Polyflex. Ce procédé comprend trois étapes principales pour obtenir une imprégnation complète des fibres par la résine. La première étape consiste à injecter le volume de résine désiré dans le moule. Le port d'injection de la résine est ensuite fermé et l'étape 2 débute avec l'injection du fluide de compaction dans une chambre indépendante non miscible avec la résine créée par la cavité du moule et une membrane flexible. Lors de cette phase, l'écoulement du fluide de compaction contribue à la distribution de résine dans le moule. La troisième étape commence lorsque le fluide de compaction a rempli la chambre de compaction et que l'évent est fermé. À ce moment, une pression uniforme est appliquée sur le renfort favorisant l'imprégnation finale des fibres et la consolidation du renfort avec la matrice. Ce procédé combine ainsi les particularités des procédés CRTM, VARTM et VARI pour augmenter la vitesse d'imprégnation du renfort et pour améliorer la qualité des pièces produites.

Deux modes d'écoulement peuvent se produire selon l'épaisseur relative du renfort par rapport à la dimension de la cavité. Dans le cas où le renfort occupe en totalité la cavité du moule, la résine se propage dans le plan et l'écoulement suit la loi de Darcy. Par contre, lorsque le renfort possède une épaisseur plus faible que celle de la cavité, deux zones d'écoulement parallèles se produisent, une au-dessus et l'autre à travers les fibres. La progression est plus rapide au-dessus des fibres car la perméabilité est plus élevée, ce qui induit un écoulement transverse additionnel.

L'injection isotherme à température ambiante dans le moule Polyflex 1 constitue le cadre des expériences de ce projet. Le procédé Polyflex contient de nombreux paramètres qui ont une influence sur l'injection de la résine : le type de renfort, l'injection du fluide de compaction et la géométrie du moule. Ces paramètres seront repris en détail dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 3 : PREMIER PLAN D'EXPÉRIENCES

Le procédé Polyflex vs les variations d'épaisseur

3.1 Introduction

En théorie, le procédé d'injection flexible Polyflex permet une injection de résine accélérée par rapport au procédé d'injection RTM puisque la cavité du moule est supérieure à l'épaisseur finale de la pièce, ce qui n'est pas le cas dans le procédé RTM. En effet, une cavité plus grande implique que le renfort est moins comprimé à l'intérieur du moule, ce qui augmente sa perméabilité. Autrement dit, la résine rencontre une plus faible résistance à l'intérieur du moule lors de son injection. L'épaisseur finale de la pièce est obtenue par la consolidation du composite à l'aide du fluide de compaction. En revanche, les écoulements combinés de la résine à travers les fibres et du fluide de compaction ajoutent à la complexité du contrôle de l'épaisseur finale de la pièce. Un des objectifs du plan d'expériences #1 vise à évaluer l'influence de la pression de compaction et de la viscosité du fluide de compaction sur les variations d'épaisseur dans les pièces fabriquées. Dans cette étude, la pression de compaction a été maintenue à une valeur constante durant chacune des expériences. L'objectif principal demeure d'étudier la variabilité de l'épaisseur dans le sens de la longueur de la pièce et de détecter de potentielles anomalies causées par des paramètres de fabrication inappropriés.

Les hypothèses suivantes ont été formulées concernant l'impact des paramètres du procédé Polyflex tel que décrit dans le chapitre précédent sur la variabilité de l'épaisseur :

- L'épaisseur de la plaque devrait diminuer à partir du port d'injection jusqu'à l'évent. Cette pente descendante serait attribuée au fait que le fluide de compaction, après qu'il eu franchi le front d'écoulement de la résine lors de l'injection, compacterait le renfort non imprégné, diminuant du coup sa perméabilité et la facilité de la résine à l'imprégner (voir figure 3.1).
- L'épaisseur finale de la plaque devrait être indépendante de la pression de compaction puisque la matrice et les fibres sont considérées comme des matériaux incompressibles. Ceci serait valable dans la mesure où la pression de compaction est suffisamment élevée pour compacter le renfort sec à l'épaisseur finale du composite.

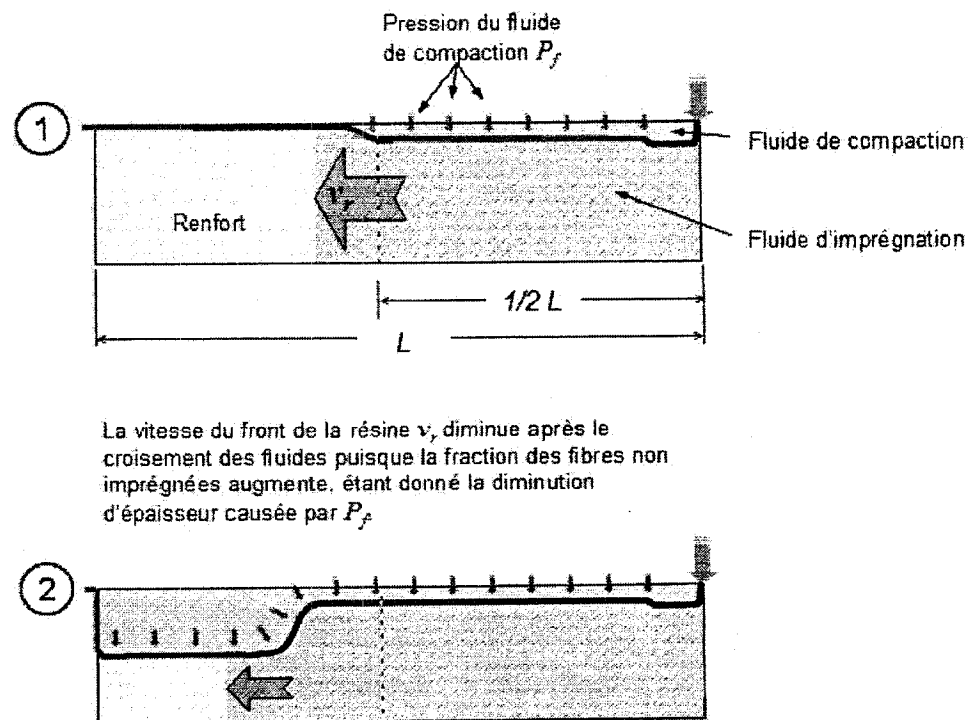


Figure 3.1 : Diminution de la vitesse d'écoulement de la résine après le croisement des fluides.

3.2 Matériaux utilisés

La résine utilisée pour chacune des expériences est composée de la résine polyester T-580 de AOC, de 1,0 phr de naphtalene de cobalt 12% (NaCo) de Dussek et de 1,5% de methyl ethyl ketone peroxide (MEKP9) de NORAC. Le promoteur NaCo est nécessaire pour polymériser des résines polyester à de basses températures car il décompose le catalyseur MEKP9 rapidement aux conditions ambiantes. Cette formulation n'a pas été optimisée pour un temps de polymérisation précis, l'objectif étant simplement d'obtenir une pièce polymérisée par jour.

Le renfort utilisé est l'OCF8610, un mat à fibres aléatoires de la compagnie Owens Corning d'une densité surfacique de 450 g/m^2 selon le manufacturier. Ce renfort a été choisi en raison de sa haute porosité qui facilite son imprégnation par la résine et également en raison de son caractère compressible, une caractéristique importante pour le procédé Polyflex. Deux couches de ce renfort ont été utilisées pour chacune des pièces fabriquées lors des essais. En raison d'une densité non homogène du renfort, une variabilité de 9.8% de la masse du renfort a été observée.

La Figure 3.2 présente la courbe de compaction du renfort utilisé dans ce plan d'expériences. Cette courbe a été obtenue expérimentalement à l'aide d'une machine servo-hydraulique d'essai mécanique du type traction-compression. La procédure de manipulation consistait en une compression à faible vitesse (2 mm/min) jusqu'à ce que la force de la machine atteigne 810 N suivie d'une décompression à la même vitesse jusqu'à 0,1 N. L'échantillon utilisé était de forme carré d'une longueur de 9 cm, constitué de 2 couches de renfort OCF8610 d'une masse totale de 6,45 g. La densité surfacique mesurée pour chaque pli d'OCF8610 est de 398 g/m^2 , ce qui ne correspond pas totalement à la valeur fournie par le manufacturier (450 g/m^2). La procédure de compression et de décompression a été répétée trois fois pour visualiser l'effet d'hystérésis.

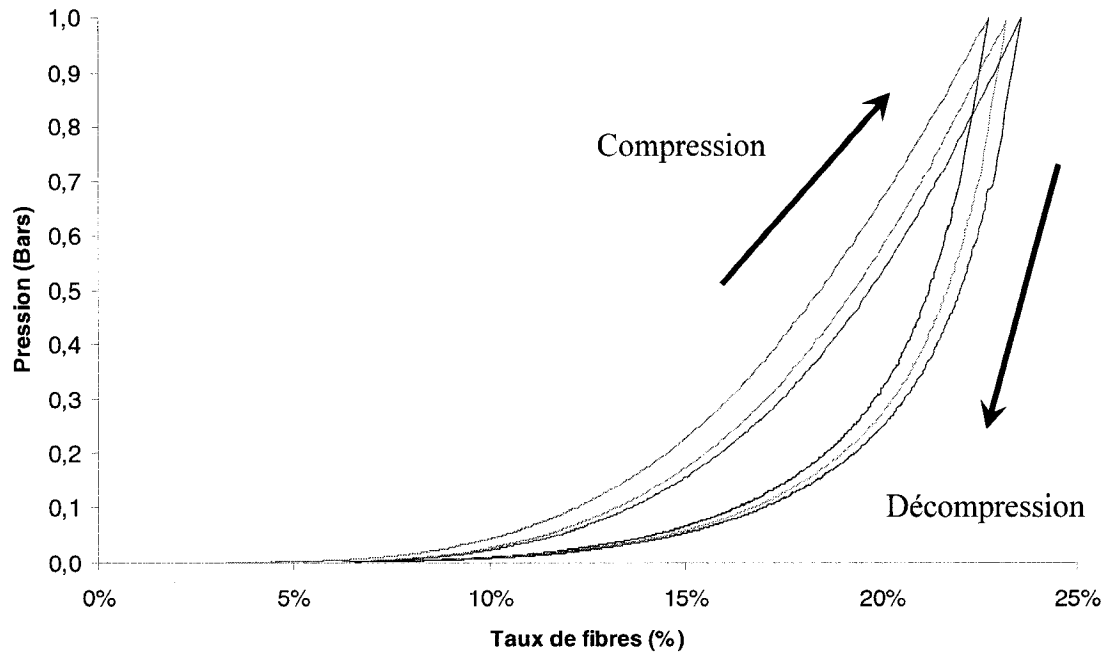


Figure 3.2 : Courbe de compaction de 2 couches d'OCF8610 ($\rho_s = 450 \text{ g/m}^2$).

L'OCF8610 a aussi été caractérisé en perméabilité. Ce renfort est considéré comme isotrope dans le plan, ce qui implique que sa perméabilité est la même dans toutes les directions dans le plan. Un modèle de perméabilité pour l'OCF8610 d'une densité surfacique de 450 g/m^2 a été déterminé expérimentalement [27] :

$$K = \left[200 + 11e^{16.8(0.5-V_f)} \right] \cdot 9.87 \times 10^{-13} \quad (3.1)$$

La perméabilité K , dont les unités sont des m^2 , est une fonction du taux de fibres V_f . Dans le procédé de fabrication Polyflex, au début de l'injection, le renfort remplit totalement la cavité du moule de 3,175 mm d'épaisseur pour un taux de fibre initial d'environ 11% tandis que le taux de fibres final (après compaction du renfort) est de 21%. Ainsi, la perméabilité du renfort varie de $7,804 \times 10^{-9}$ (pour $V_f = 11\%$) jusqu'à $1,615 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ (pour $V_f = 21\%$) pendant le processus de fabrication.

Le fluide de compaction utilisé est une huile de silicone (200® fluid) de Dow Corning. Deux huiles de viscosité différente ont été utilisées. Les valeurs de viscosité fournies par le fabricant sont de 0,1 Pa·s et 1,0 Pa·s respectivement.

La membrane de séparation des chambres d'injection et de compaction était le film plastique Wrightlon Econolo 7400 de la compagnie Airtech. Selon Briones [25], cette membrane est le choix adéquat pour les expériences en laboratoire avec la résine polyester. Il est peu dispendieux, transparent, compatible avec l'huile de silicone et possède de bonnes propriétés physiques et mécaniques. Les propriétés générales de cette membrane sont données en Annexe A.

3.3 Conditions d'opération

Une configuration du moule à deux membranes a été adoptée. La disposition illustrée à la Figure 3.3 permet un écoulement assez uniforme du fluide de compaction et diminue les effets de bords causés par le renfort dans le moule. De plus, la membrane supérieure assure une meilleure étanchéité en empêchant le fluide de compaction de se faufiler au-dessus de la membrane inférieure (voir Figure 3.4), une observation qui a été faite lors d'essais en laboratoire. Le moule demeure bien fermé par l'utilisation de boulons serrés avec un même couple de serrage de 17 N·m. L'étanchéité de la chambre d'injection du moule est assurée par le joint torique en viton comprimé, la membrane inférieure et le moule inférieur. De la même manière, l'étanchéité de la chambre de compaction est garantie par le joint torique en viton comprimé, la membrane et le moule supérieur. Le cadre no.1 a été utilisé pour l'ensemble des expériences (voir Figure 2.11), ce qui procure au moule une cavité de 3,175 mm d'épaisseur. La limite en pression a été établit à 8 bars pour l'utilisation du moule, cette limite étant fixée par l'étanchéité du moule.

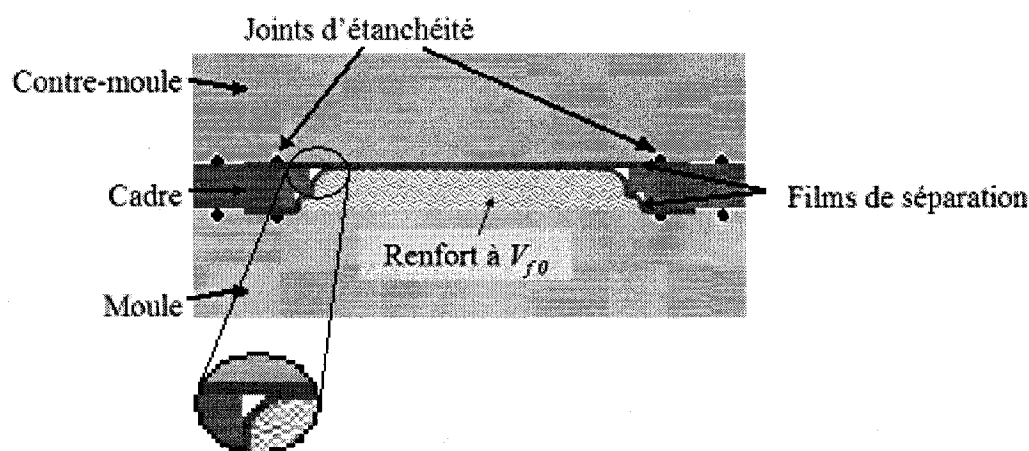


Figure 3.3 : Configuration du moule Polyflex 1 avec deux films de séparation Wrightlon Econolo 7400.

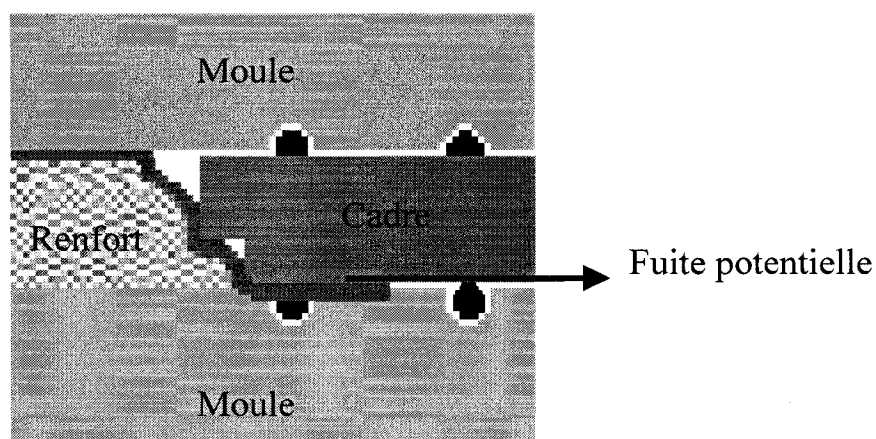


Figure 3.4 : Problème d'étanchéité lorsqu'une configuration à un seul film est utilisée.

L'injection de la résine a été effectuée à une pression constante de 1.05 bars par l'entremise d'un pot de pression (voir Figure 3.5) (pression max de 100 psi = 6,9 bars; volume de 2,5 gallons = 11 L). Il est important d'avoir un surplus de résine dans le réservoir pour éviter d'injecter de l'air dans le moule. Comme ce système d'injection est à pression contrôlée, une méthode de détermination du volume injecter doit être élaborée. Cette méthode consiste à arrêter l'injection quand le front de résine atteint une ligne spécifique sur le moule transparent Polyflex 1 (voir Figure 3.6) se situant au 13/24 de sa longueur, ce qui correspond à un volume de résine injecté d'environ 60 ml.

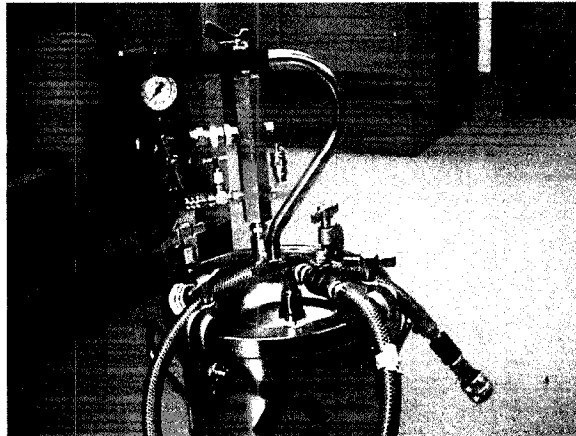


Figure 3.5 : Pot de pression utilisé pour l'injection de la résine et du fluide de compaction.

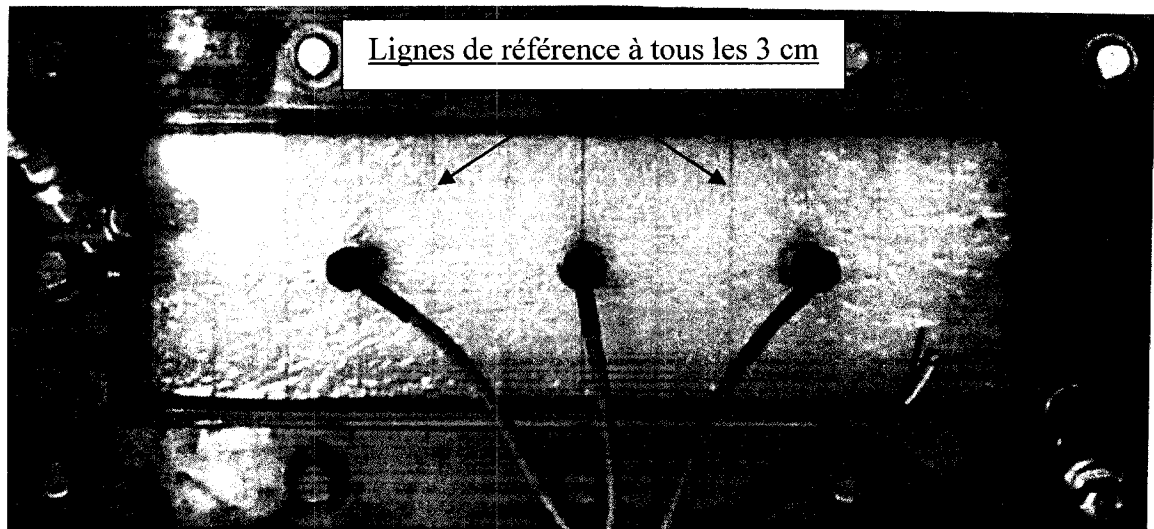


Figure 3.6 : Moule transparent Polyflex 1 avec ses lignes de référence.

Au moment où l'injection de la résine se termine, le port d'injection du fluide de compaction est ouvert manuellement. D'une manière similaire à l'injection de la résine, l'injection du fluide de compaction était effectuée à partir d'un pot de pression (voir Figure 3.5) (pression max de 100 psi = 6,9 bars; volume de 2,5 gallons = 11L). La pression de compaction était ajustée directement au pot de pression avant le début de l'injection à une valeur prédéterminée par le plan d'expériences entre 2 et 5 bars.

Une pression de vide a été appliquée dans la chambre d'injection au moyen d'un réservoir à vide (voir Figure 3.7) à une valeur de -0.25 bar, ce qui correspond à la valeur employée dans les expériences antérieures [25]. Cette valeur a été choisie de façon conservatrice pour éviter l'évaporation du styrène durant le processus d'imprégnation.

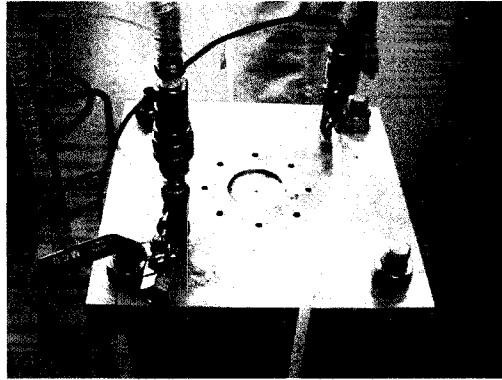


Figure 3.7 : Réservoir à vide utilisé pour l'injection de la résine dans le moule Polyflex 1.

Le sujet d'étude de ce plan d'expériences étant la variation d'épaisseur dans les pièces, une méthodologie a été définie pour la mesurer. Les pièces produites par le procédé d'injection flexible présente deux surfaces d'une qualité différente. La surface côté moule possède un excellent fini de surface en comparaison avec la surface côté membrane qui est plus rugueuse. Un quadrillage sur la surface côté moule a été tracé sur chacune des plaques fabriquées. Tel que montré à la Figure 3.8, un total de 84 points de mesure a été défini sur toute la surface des plaques fabriquées. Le centre du port d'injection a été considéré comme axe de référence ($x = 0$, $y = 0$).

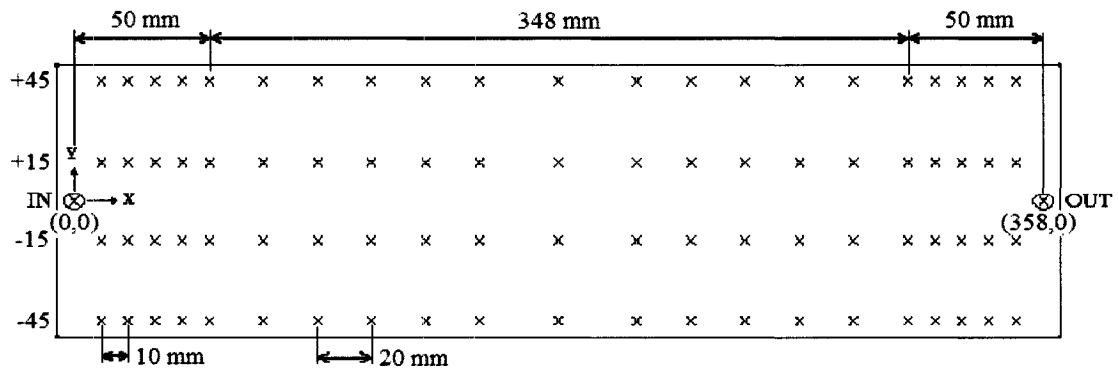


Figure 3.8 : Schéma d'une plaque avec l'emplacement des points de mesure (Plan d'expériences #1).

Le type de quadrillage sélectionné présente une densité de points de mesure supérieure dans les régions du port d'injection (IN) et de l'évent (OUT). Une plus grande précision dans la mesure de l'épaisseur est désirée dans ces régions en raison de la première hypothèse formulée au début de ce chapitre (voir section 3.1). Comme il sera expliqué plus loin, un des outils mathématiques utilisés pour l'analyse des variations d'épaisseur est le Krigage 2D qui permet de représenter les fluctuations dans l'épaisseur. Plus il y a de points de mesure, plus la précision est grande, d'où des densités de points plus élevées dans certaines régions.

L'instrument de mesure utilisé pour mesurer l'épaisseur des plaques est un micromètre digital à cliquet (*ratchet*) de Mitutoyo ayant une étendue de mesure de 0 à 1" (0 - 25,4 mm) et une précision à 0,00005" (0,001 mm) (voir Figure 3.9). La surface circulaire de 0,049 in² (31,67 mm²) du micromètre permet de mesurer une épaisseur locale de la plaque sans être affecté par les variations de rugosité créées par la densité surfacique non-homogène du mat OCF8610.

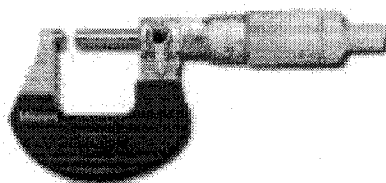


Figure 3.9 : Micromètre digital à cliquet (*ratchet*) de Mitutoyo d'une étendue de mesure de 0 à 1".

3.4 Paramètres du procédé

Dans le cadre de cette étude, la pression et la viscosité du fluide de compaction sont considérées comme les variables d'analyse. Le tableau 3.1 résume les paramètres d'analyse du plan d'expériences #1 ainsi que les valeurs mesurées de la masse et de la densité surfacique des renforts.

Tableau 3.1 : Paramètres du plan d'expériences #1

No. D'identification de l'essai (PF1H05XXX)	001	002	003	004	005	006
Pression de compaction (bars)	4,0	2,0	3,5	2,0	3,5	5,0
Viscosité du fluide de compaction (Pa·s)	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0
Masse totale des fibres (g)	41,10	41,22	41,22	42,08	40,88	40,11
Densité surfacique moy. par pli (g/m ²)	438,40	439,68	439,68	448,85	436,05	427,84

3.5 Résultats et discussions du plan d'expériences #1

La Figure 3.10 montre une photo d'une plaque fabriquée par injection flexible lors du plan d'expériences #1. Les dimensions des plaques fabriquées sont énumérées plus bas. L'Annexe B montre les mesures d'épaisseur des 84 points (voir Figure 3.8) des 6 plaques fabriquées lors du plan d'expériences #1.

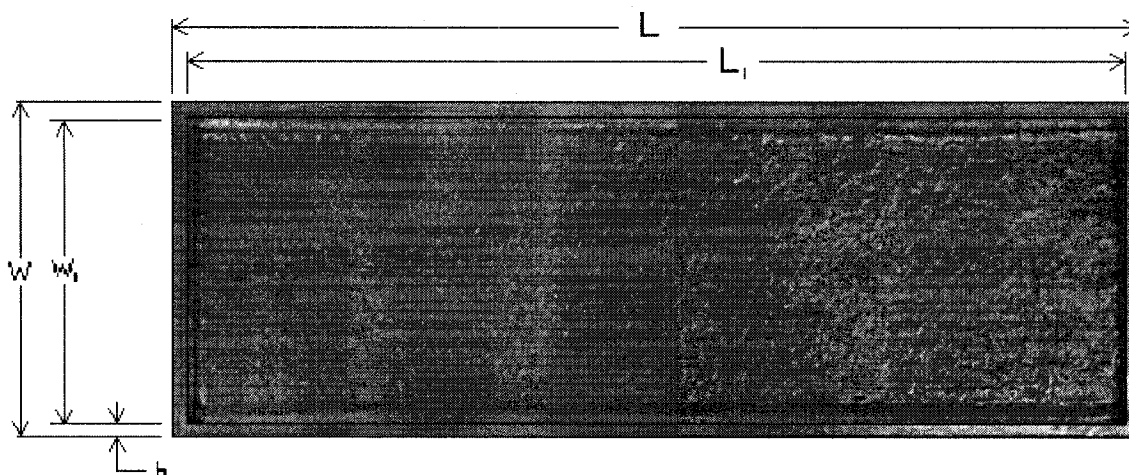


Figure 3.10 : Plaque fabriquée par injection flexible dans le plan d'expériences #1 et les variables identifiant les dimensions importantes.

L : longueur totale de la plaque = 376 mm

L_i : longueur de la cavité = 364 mm

W : largeur totale de la plaque = 126 mm

W_i : largeur de la cavité = 114 mm

b : largeur de la bordure du cadre = 6 mm

3.5.1 Épaisseur moyenne et écart-type selon la direction longitudinale

Le Tableau 3.2 montre les moyennes et les écart-types des points de mesure compris sur une même ligne longitudinale de la plaque. Les quatre axe d'étude sont les droites $y = -45, -15, 15, 45$ en référence au système de coordonné placé au port d'injection (voir Figure 3.8). L'épaisseur moyenne $\bar{h}$ mesurée le long de la direction longitudinale ainsi que l'écart-type $\bar{h}$ ont été pondérés en attribuant à chacun des points de mesure un facteur w_i correspondant à l'intervalle entre les points adjacents. Ce facteur a été ajouté en raison de la distribution non-uniforme des points de mesure (voir Figure 3.8). Les deux équations suivantes expliquent le calcul de l'épaisseur moyenne et l'écart-type respectivement.

$$\bar{h} = \frac{\sum w_i h_i}{\sum w_i} \quad (3.2)$$

$$\bar{h} = \sqrt{\frac{\sum w_i (h_i - \bar{h})^2}{\sum w_i}} \quad (3.3)$$

Tableau 3.2 : Épaisseurs moyennes et écart-types selon les axes longitudinales y = -45, -15, 15 et 45 (selon Figure 3.8)

No	PF1H05001		PF1H05002		PF1H05003		PF1H05004		PF1H05005		PF1H05006	
Y	$\bar{h}$	$\bar{\bar{h}}$	$\bar{h}$	$\bar{\bar{h}}$	$\bar{h}$	$\bar{\bar{h}}$	$\bar{h}$	$\bar{\bar{h}}$	$\bar{h}$	$\bar{\bar{h}}$	$\bar{h}$	$\bar{\bar{h}}$
-45	1,551	0,108	1,698	0,163	1,661	0,121	1,564	0,124	1,658	0,075	1,636	0,128
-15	1,602	0,233	1,827	0,175	1,661	0,141	1,626	0,109	1,741	0,143	1,664	0,100
15	1,614	0,152	1,799	0,200	1,672	0,121	1,595	0,077	1,734	0,157	1,689	0,124
45	1,534	0,136	1,769	0,206	1,606	0,187	1,520	0,113	1,498	0,118	1,658	0,156

La principale constatation observée à la vue de ces valeurs est que les épaisseurs moyennes selon les axes y = -45 et y = 45 sont tous plus faibles que celles selon les deux directions centrales longitudinales y = -15 et y = 15 pour les 6 plaques fabriquées. Même si les écart-types sont assez élevés, cette observation témoigne d'une tendance non désirée pour le procédé de fabrication d'injection flexible. Une explication raisonnable à ce phénomène proviendrait des caractéristiques du moule. La Figure 3.3 montre un schéma de l'état des fibres lorsque le moule est fermé. Les cadres qui sont utilisés définissent l'épaisseur de la cavité mais servent également à pincer le renfort sur toute la périphérie du moule par l'entremise d'une bordure en "L". Le renfort, lorsqu'il est maintenu de cette façon, crée un arrondi sur son périmètre. Cette dépression est plus ou moins importante selon l'épaisseur du cadre, la flexibilité de la membrane, l'extension initiale des fibres et le volume du renfort. Cette particularité du moule produit un effet de bord lors de l'injection du fluide de compaction. En effet, il a été observé pour tous les essais, grâce à la transparence du moule supérieur, une vitesse de l'écoulement du fluide de compaction plus élevée sur les côtés longitudinaux. Ceci aurait amené une compaction des côtés du renfort en premier, ce qui aurait repoussé un peu de résine vers le centre, d'où une plus faible épaisseur finale sur les côtés.

3.5.2 Épaisseur moyenne et écart-type des plaques fabriquées dans le plan d'expériences #1

Le Tableau 3.3 montre l'épaisseur moyenne et l'écart-type de chacune des plaques fabriquées ainsi que les paramètres de compaction utilisés dans le plan d'expériences #1. Les valeurs calculées ont été pondérées de la même façon qu'elles ont été effectuées précédemment avec les équations (3.2) et (3.3). Le taux volumique de fibres moyen a aussi été calculé à partir de l'équation (1.8). La masse volumique des fibres de verre utilisée est 2540 kg/m^3 .

Tableau 3.3 : Épaisseur moyenne et écart-type des plaques fabriquées dans le plan d'expériences #1

Paramètres compaction		No. plaque	h_{moy} (mm)	écart-type	étendue (95%)		Taux de fibres
Pression (bar)	Viscosité (Pa·s)				min	max	
2	0,1	PF1H05002	1,773	0,193	1,387	2,159	19,3%
3,5	0,1	PF1H05003	1,650	0,147	1,356	1,945	20,8%
4,04	0,1	PF1H05001	1,575	0,167	1,241	1,910	21,7%
2	1	PF1H05004	1,576	0,114	1,348	1,804	22,2%
3,5	1	PF1H05005	1,658	0,160	1,337	1,979	20,5%
5	1	PF1H05006	1,662	0,130	1,402	1,921	20,1%
		MOY	1,649	0,152	1,345	1,953	20,7%

Dans ce tableau, il est présenté également l'étendue des valeurs de l'épaisseur dans une proportion de 95%. Ce domaine se base sur la règle de la loi normale qui stipule que 68% des échantillons se retrouve dans plus ou moins une fois l'écart-type tandis que 95% des valeurs seraient dans plus ou moins deux fois l'écart-type [29]. Ceci permet de visualiser de manière approximative dans quelle plage les valeurs se situent.

La plaque dont l'épaisseur varie le moins est l'essai PF1H05004. Comme l'objectif de ce plan d'expériences est d'étudier la variabilité de l'épaisseur dans les plaques, celle-ci produit le meilleur résultat sur la base de l'écart-type. Il est aussi observé que pour une même viscosité du fluide de compaction, l'épaisseur moyenne diminue significativement lorsque la pression augmente pour une viscosité de 0.1 Pa·s (essais PF1H05001 à

PF1H05003) tandis qu'une tendance inverse se produit pour une viscosité de 1 Pa·s (essais PF1H05004 à PF1H05006). Les remarques précédentes demeurent que de simples observations des résultats mais aucune conclusion ne peut être déduite de cela puisque le volume d'information est insuffisant. Par ailleurs, comme la matrice et les fibres sont considérées comme des matériaux incompressibles, l'épaisseur finale devraient être la même pour chaque plaque en considérant que le volume de résine désiré est le même. Cependant, le contrôle du volume injecté est variable avec un système d'injection à pression contrôlée. En effet, la méthode employé consiste à fermer manuellement la valve du pot de pression lorsque le front de résine franchi une ligne spécifique sur la surface du moule, ce qui induit automatiquement une variabilité dans la procédure.

Une autre observation faite à partir de ces données est que l'étendue est très vaste en comparaison de la valeur moyenne. En effet, à partir des valeurs moyennes de toutes les plaques, en prenant la différence entre les valeurs maximale et minimale, la variabilité moyenne calculée équivaut à 38% de l'épaisseur moyenne, ce qui est considérable. L'utilisation d'un mat ayant une densité de fibres non-uniforme contribue à cette variabilité. Cependant, la variabilité générale de l'épaisseur des plaques est très importante et le procédé devra être examiné afin de réduire cette variation.

3.5.3 Étude de la meilleure dérive et covariance

Dans le but de mieux observer les variations d'épaisseur dans les plaques fabriquées, l'outil mathématique du krigeage a été employé. L'Annexe C présente une introduction à cette méthode numérique utile, entre autre, à la représentation des surfaces. Il y a deux conditions importantes à définir pour l'utilisation efficiente du krigeage, soient le type de dérive et de covariance. Plusieurs choix s'imposent pour chacun d'eux en relation avec le présent travail. Les dérives constantes, linéaires et quadratiques ainsi que les covariances logarithmiques et cubiques ont été considérées. Les mesures de la plaque

PF1H05001 ont été sélectionnées comme données de référence pour déterminer les meilleures dérivées et covariances. L'option d'utiliser la dérivée et la covariance trigonométrique a été rejetée d'emblée puisque celle-ci réfère principalement aux coordonnées circulaires et cylindriques. La covariance linéaire, quant à elle, ne permettra pas une représentation lisse de la plaque.

Une première remarque concernant les choix possibles concerne la dérivée quadratique. Comme il est montré sur la Figure suivante, la surface krigée ne représente pas bien les variations dans la plaque PF1H05001. Ce type de dérivée est donc rejeté. Les deux choix de covariance conduisent au même résultat.

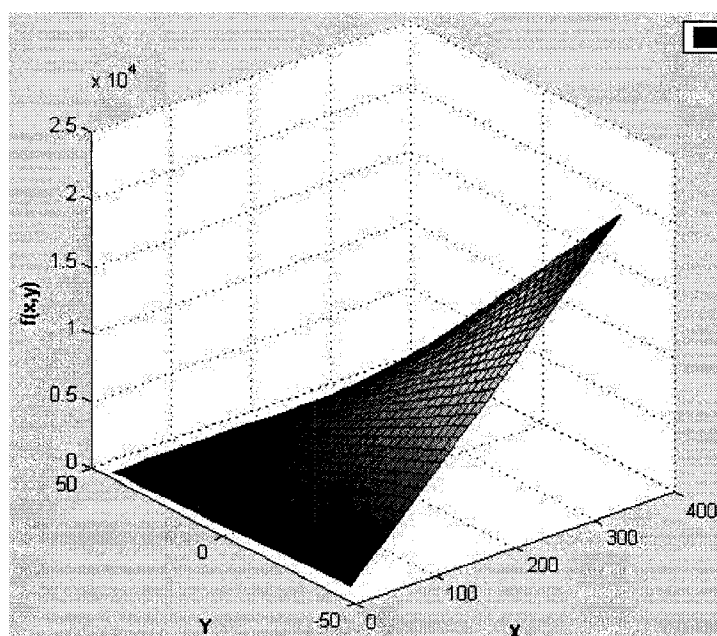


Figure 3.11 : Surface krigée de la plaque PF1H05001 avec une dérivée quadratique et une covariance cubique.

Les dérivées constantes et linéaires mènent à un krigeage identique comme on peut le voir sur la figure suivante. Compte tenu que l'épaisseur n'est pas constante dans la plaque, la dérivée linéaire a été choisie pour les études de krigeage dans les sections ultérieures. Il est important de préciser que, sur les figures présentant des surfaces

krigées, les couleurs tendent vers le rouge lorsque les valeurs sont élevées tandis qu'elles tendent vers le bleu lorsqu'elles sont basses.

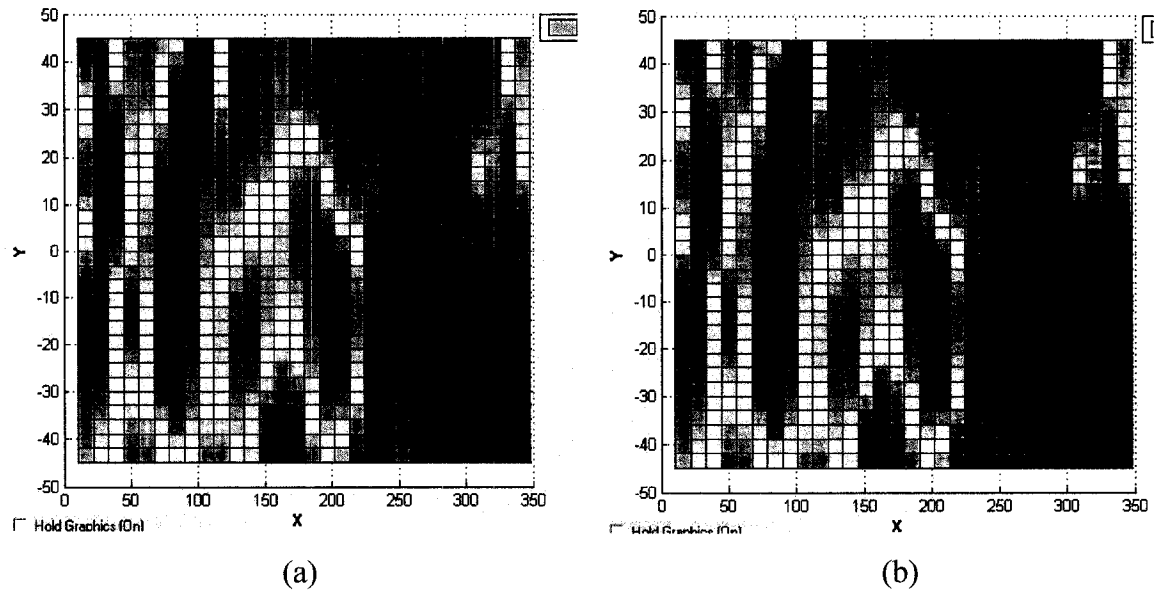


Figure 3.12 : Surfaces krigées de la plaque PF1H05001 vue de dessus pour une dérive constante (a), linéaire (b) et une covariance cubique.

La dérive linéaire étant sélectionnée, il reste à évaluer la meilleure covariance. Les surfaces krigées ainsi obtenues semblent à première vue identique comme il est montré sur les figures suivantes.

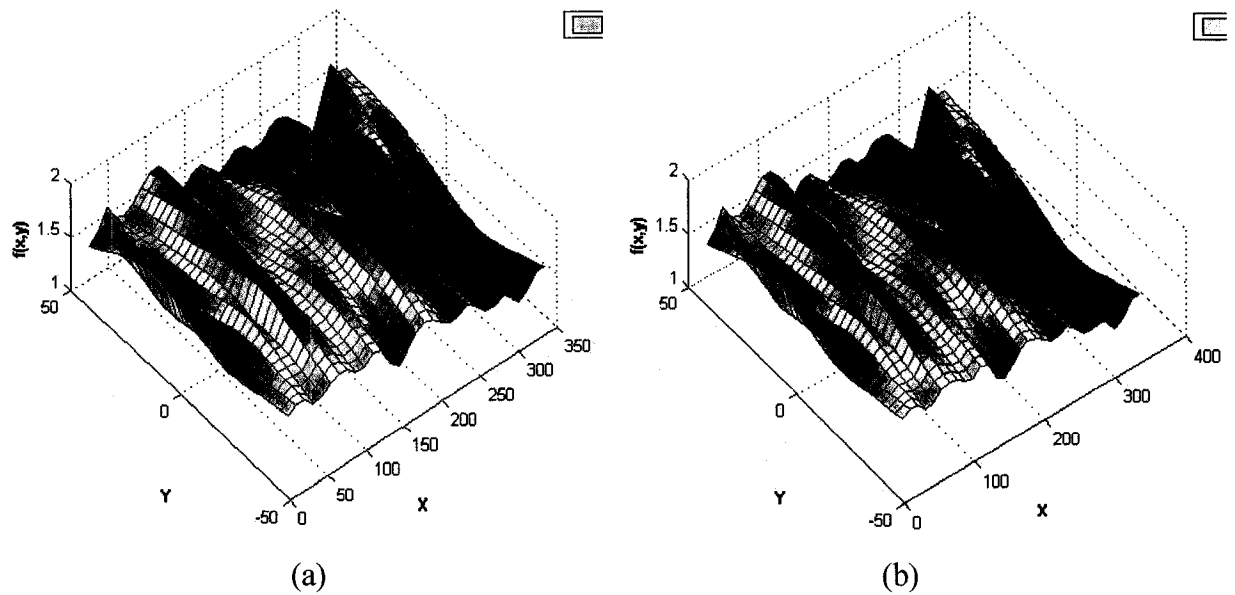


Figure 3.13 : Surfaces krigées de la plaque PF1H05001 avec une dérive linéaire et une covariance cubique (a) et logarithmique (b).

Cependant, avec une vue de face, on peut remarquer quelques différences comme on peut le voir sur les deux figures suivantes.

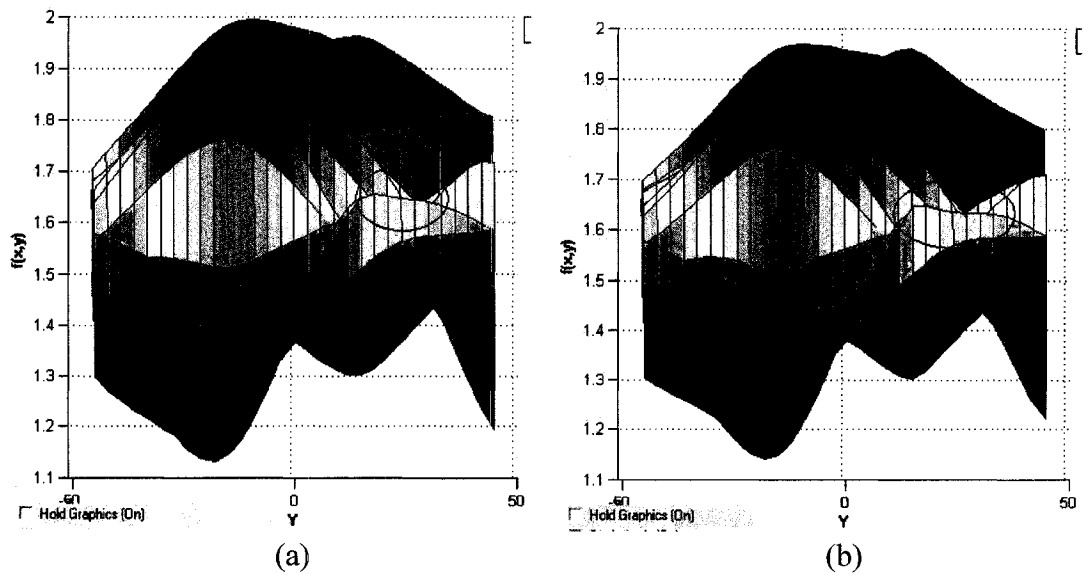


Figure 3.14 : Surfaces krigées de la plaque PF1H05001 vue de face avec une dérive linéaire et une covariance cubique (a) et logarithmique (b).

Comme le krigeage constitue une méthode d'interpolation et que les deux types de covariances passe par les valeurs mesurées, les inflexions amenées par la covariance logarithmique ne présente pas d'intérêt en comparaison avec les courbures régulières que produit une covariance cubique. Le choix de la covariance s'arrête donc sur cubique.

3.5.4 Analyse des surfaces krigées de l'épaisseur des plaques fabriquées

La représentation géométrique de la surface des plaques peut être faussée dû aux erreurs de mesure. Le krigeage permet de corriger ces incertitudes par l'intermédiaire d'un effet de pépité. Une validation préliminaire de l'outil de mesure est donc nécessaire. L'appareil employé est un micromètre Mitutoyo ayant une précision au millième de millimètre. La méthode utilisée pour valider la précision du micromètre est d'effectuer 20 mesures en un même endroit choisi de façon aléatoire sur une des plaques. L'emplacement sélectionné est la coordonnée (228, 45) sur la plaque PF1H05005 selon l'axe de référence présenté à la Figure 3.8. Voici un tableau présentant ces mesures.

Tableau 3.4 : Validation de l'outil de mesure pour le point (228, 45) de la plaque PF1H05005

mesures	h	$(h_i - h_{\text{moy}})^2$
1	1,651	0,00159
2	1,607	0,00002
3	1,608	0,00001
4	1,597	0,00020
5	1,598	0,00017
6	1,595	0,00026
7	1,64	0,00084
8	1,604	0,00005
9	1,617	0,00003
10	1,605	0,00004
11	1,604	0,00005
12	1,604	0,00005
13	1,618	0,00005
14	1,607	0,00002
15	1,609	0,00000
16	1,609	0,00000
17	1,618	0,00005
18	1,607	0,00002
19	1,611	0,00000
20	1,613	0,00000
Moy	1,611	0,00017
Variance	0,00017	
écart-type	0,013	

À la vue de ces données, on constate que la prise de mesure est relativement précise comme en témoigne la très faible variance (0,00017) malgré deux fortes déviations (mesures 1 et 7). Dans ces conditions, l'effet de pépité sera considéré comme nul dans les analyses à venir.

La Figure 3.16 montre les surfaces krigées des plaques vues de dessus tandis que la Figure 3.15 donne un aperçu isométrique de la plaque PF1H05006. L'ensemble des surfaces krigées sont montrées en vue isométrique en Annexe D. Rappelons que les valeurs élevées sont indiquées en rouge tandis que les plus basses sont en bleu.

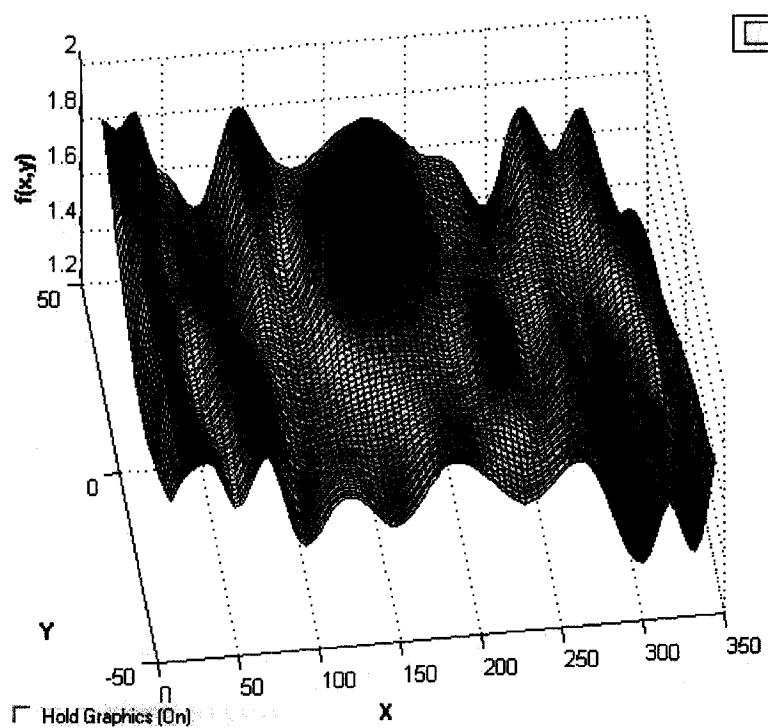
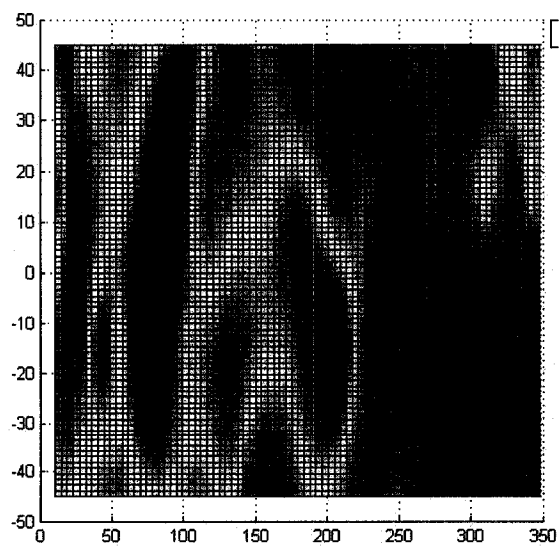
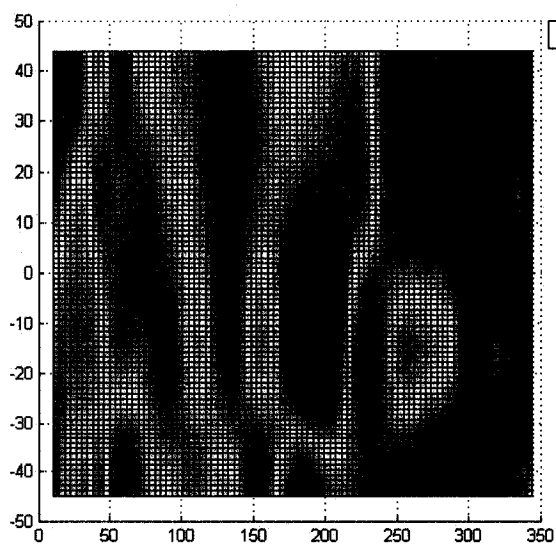


Figure 3.15 : Surface krigée de l'épaisseur de la plaque PF1H05006.



(a)



(b)

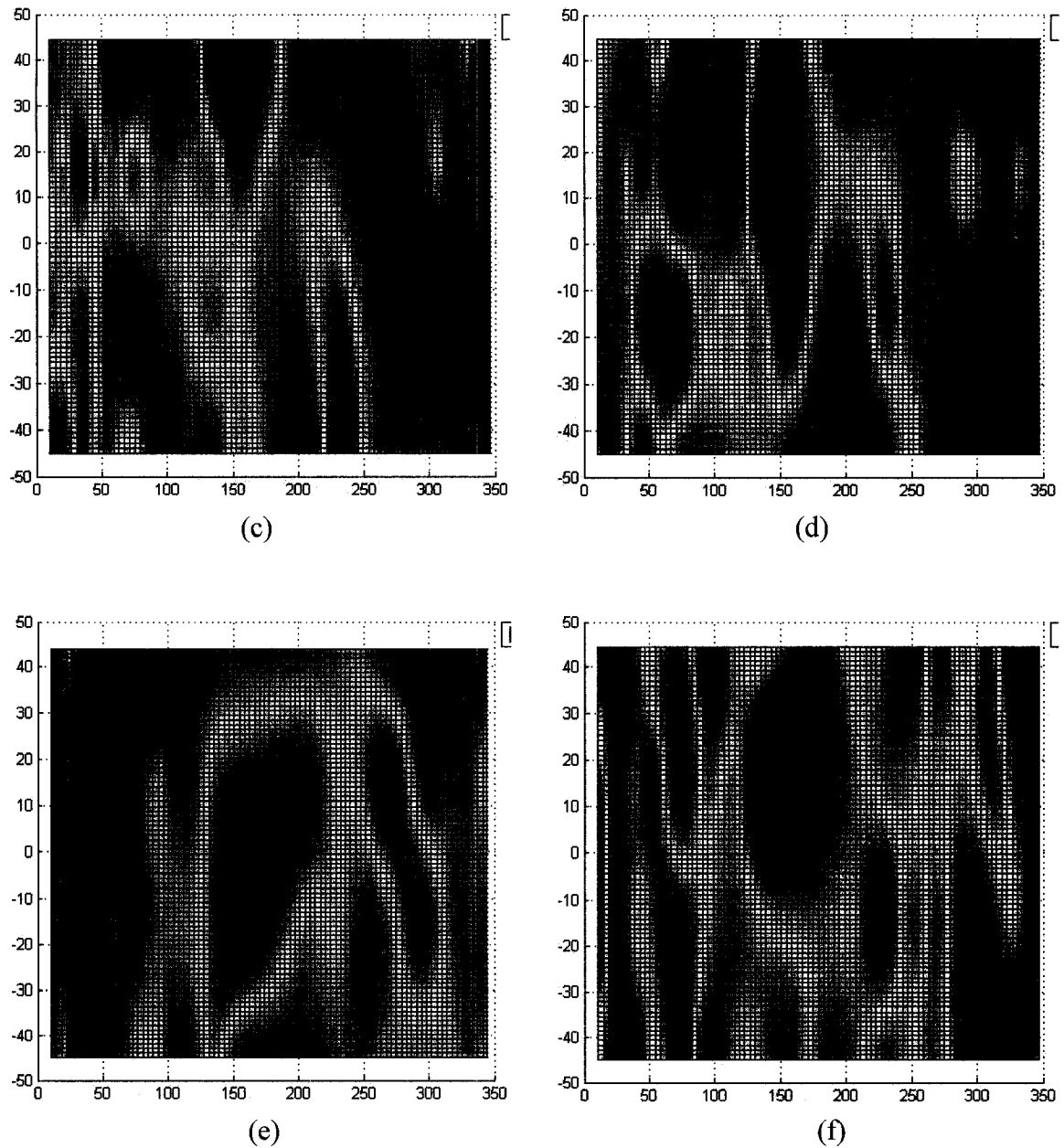


Figure 3.16 : Surfaces krigeés de l'épaisseurs des plaques fabriquées PF1H05001 (a), PF1H05002 (b), PF1H05003 (c), PF1H05004 (d), PF1H05005 (e) et PF1H05006 (f).

Une première observation est qu'à partir de 250 mm environ, l'épaisseur semble diminuer drastiquement en passant du rouge au bleu directement. Cette chute semble décalée vers l'évent (droite) à environ 300 mm pour les plaques PF1H05005 et

PF1H05006 où la viscosité et la pression du fluide de compaction étaient plus élevées lors de leur fabrication.

Une hypothèse expliquant ces diminutions d'épaisseur provient du dépassement du fluide de compaction par rapport au front de résine. En effet, la compaction en aval du front de résine nuit à la progression de la résine comme il a été suggéré en introduction. Cette hypothèse explique la chute déplacée vers l'évent pour une viscosité supérieure car la position du croisement des fluides est décalée comme tel pour une cette viscosité. En effet, cette affirmation a été observée lors des essais et est confirmée dans le mémoire de Lothar Briones [25] où il est mentionné que la position du croisement des fluides pour une viscosité de 0,1 Pa·s est de $0,74 \cdot L$ et de $0,83 \cdot L$ pour 1 Pa·s, ce qui équivaut respectivement à 265 mm et 297 mm. Ces valeurs correspondent aux chutes d'épaisseur observées à la Figure 3.16.

3.5.5 Analyse des courbes krigées de l'épaisseur des plaques fabriquées

Dans le but de vérifier les affirmations précédentes, les courbes selon les quatre directions longitudinales ($y = \pm 45$ et $y = \pm 15$) ont été tracées grâce au krigeage géométrique 1D. Les quatre Figures suivantes montrent les courbes krigées selon les axes $y = -15$ et $y = 15$ pour les deux groupes de plaques fabriquées avec des huiles de silicone de viscosité différente. Il est à noter que l'ordonnée indique le ratio de l'épaisseur locale par rapport à l'épaisseur moyenne de la plaque. Ceci a été effectué dans le but de mieux visualiser les tendances entre les plaques. L'observation de ces graphiques montre une plus grande régularité de l'épaisseur des plaques conçues à partir d'un fluide de compaction plus visqueux. Les figures 3.17 à 3.20 montrent que la viscosité du fluide de compaction influence beaucoup la variabilité de l'épaisseur qui diminue lorsque la viscosité augmente.

Le même exercice a été réalisé pour les axes $y = -45$ et $y = 45$. Une constatation similaire peut être déduite quoique moins évidente, comme quoi la distribution de l'épaisseur sur les côtés des plaques fabriquées est plus aléatoire que près de l'axe central. Il est possible de visualiser ces courbes en Annexe E.

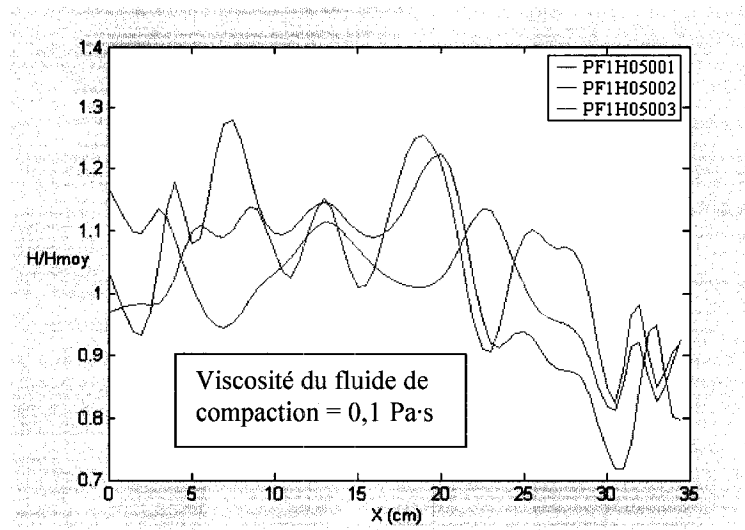


Figure 3.17 : Courbes krigées de l'épaisseur des plaques PF1H05001, PF1H05002 et PF1H05003 selon l'axe $y = -15$.

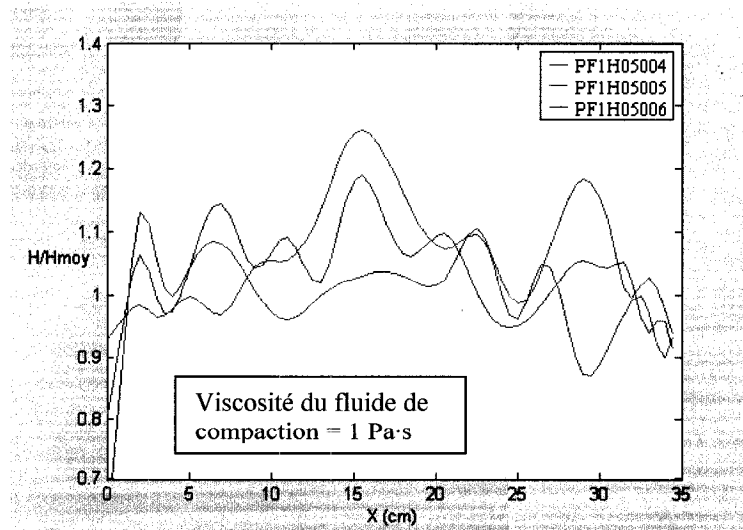


Figure 3.18 : Courbes krigées de l'épaisseur des plaques PF1H05004, PF1H05005 et PF1H05006 selon l'axe $y = -15$.

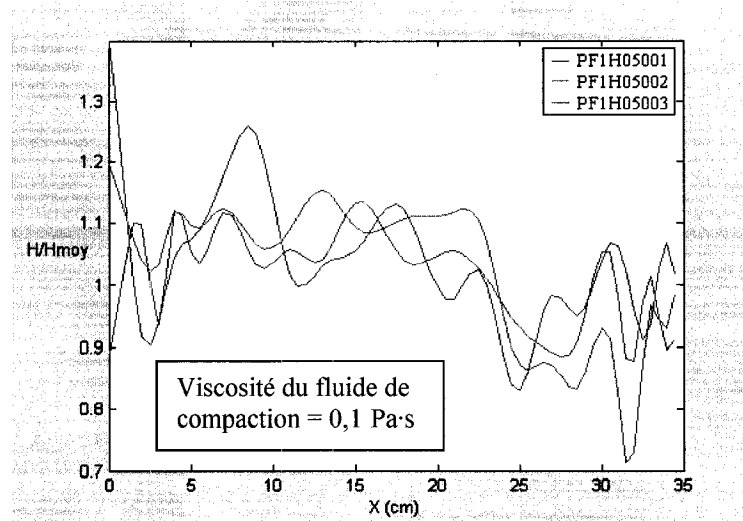


Figure 3.19 : Courbes krigées de l'épaisseur des plaques PF1H05001, PF1H05002 et PF1H05003 selon l'axe $y = 15$.

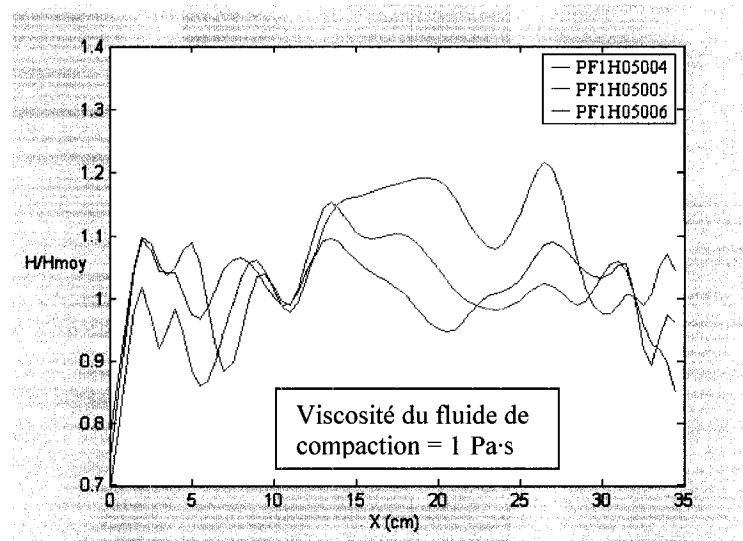


Figure 3.20 : Courbes krigées de l'épaisseur des plaques PF1H05004, PF1H05005 et PF1H05006 selon l'axe $y = 15$.

3.6 Conclusion

Dans le plan d'expériences #1 présenté dans ce chapitre, 6 plaques ont été fabriquées par le procédé Polyflex en faisant varier les paramètres de compaction, i.e., la pression et la viscosité de fluide de compaction. Ces expériences ont permis d'étudier la variation de l'épaisseur en fonction des paramètres de moulage. Des hypothèses ont été élaborées au début de ce plan d'expériences. On a supposé que l'épaisseur serait plus faible près de l'évent par rapport au port d'injection en raison de la diminution de perméabilité créée par la compaction du renfort sec avant son imprégnation. De plus, la pression de compaction ne devrait pas influencer l'épaisseur finale du composite en autant que cette pression dépasse un seuil limite déterminé par la compaction du renfort sec à cette épaisseur.

Par une analyse statistique des épaisseurs mesurées des plaques ainsi qu'avec l'aide du krigeage 2D et 1D, plusieurs conclusions ont été tirées des résultats. Premièrement, l'épaisseur de chacune des plaques est plus faible sur les bords qu'au centre. Cela serait dû à un effet de bord observé en laboratoire lors de la fabrication. Deuxièmement, la variabilité de l'épaisseur, qui est la différence de la valeur maximale et minimale par rapport à la moyenne, est très importante pour l'ensemble des plaques fabriquées de l'ordre de 38%. Troisièmement, on constate une diminution importante de l'épaisseur à partir de la ligne de croisement des fronts de résine et du fluide de compaction. Ce croisement s'effectue plus loin lorsque la viscosité du fluide de compaction augmente. On observe aussi que l'épaisseur demeure plus constante sur la longueur des plaques lorsque la viscosité du fluide de compaction augmente.

CHAPITRE 4 : DEUXIÈME PLAN D'EXPÉRIENCES

Les profils de compaction vs la performance du procédé Polyflex

4.1 Introduction

Dans le chapitre 3, une étude a été présentée sur l'impact de la pression et de la viscosité du fluide de compaction sur les variations d'épaisseur des plaques fabriquées par le procédé Polyflex. Quelques conclusions intéressantes sont ressorties concernant la qualité des pièces produites. Parmi celles-ci, on peut rappeler qu'une chute d'épaisseur se produit à partir de la ligne de croisement des fluides.

Suite à cette analyse, une étude approfondie de la compaction s'est avérée nécessaire pour évaluer la performance du procédé Polyflex. Un critère de performance a été établi pour répondre à ce besoin, soit le temps de remplissage du moule. La détermination de cette variable a été rendue possible grâce au contre-moule transparent. L'objectif principal du plan d'expériences #2 est donc d'étudier l'influence de différents profils de compaction sur le temps de remplissage. Les variations d'épaisseur ont à nouveau été considérées dans ce plan d'expériences.

4.2 Matériaux

Puisque les paramètres de compaction sont les seuls à varier dans ce plan d'expériences, toutes les propriétés des matériaux utilisés comme la résine, le renfort et le fluide de compaction doivent demeurer les plus constantes possibles afin de minimiser leur impact sur les résultats. La formulation de la résine est à base de polyester T-580 de AOC avec 1,1 phr de naphthalene de cobalt 12% (NaCo) de Dussek, 0,1 phr de N-dimethylaniline (DMA) de Buffalo Color Corporation et de 1,6% de methyl ethyl ketone peroxide (MEKP9) de NORAC. Le promoteur NaCo est nécessaire pour polymériser des résines polyester à de basses températures parce qu'il décompose le catalyseur MEKP9

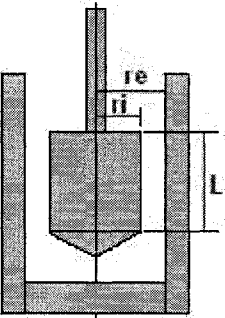
rapidement à température ambiante. Le DMA n'est pas un élément essentiel à la réaction de polymérisation. Cependant, lorsqu'il est utilisé en jonction avec le NaCo, il accélère considérablement la réaction à température ambiante. Cette formulation a été optimisée pour une polymérisation à température ambiante en 2 h 30.

La viscosité de la résine non-activée a été mesurée à intervalles réguliers pendant la période de réalisation des essais à l'aide d'un rhéomètre à contrainte contrôlée, le modèle MCR501 d'Anton Paar. Une cellule thermostatée assure le chauffage de la géométrie (cylindre concentrique de type couette) dans une plage de -20°C à 200°C. La précision de la lecture de la température est de 0.01°C. Les analyses ont toutes été réalisées en cisaillement simple ($\dot{\gamma} = 10 \text{ s}^{-1}$ constant). Pour un fluide newtonien (μ ne varie pas avec $\dot{\gamma}$), la viscosité est définie par :

$$\mu(\dot{\gamma}) = \frac{-\sigma_{yx}}{\dot{\gamma}} \quad (4.1)$$

où σ_{yx} est la contrainte en cisaillement et $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement appliqué. Les dimensions de la géométrie sont données au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Caractéristiques des géométries fixes et des accessoires.

Géométrie/ Accessoire	Caractéristiques
Géométrie couette simple CC27/Q1 	Dia. du Bob, D_e 26.673 mm Longueur de la partie cylindrique du Bob (<i>Gap length</i>), L 39.994 mm Dia. interne du Cup, D_i 28.927 mm Angle de la partie conique du Bob 120° Entrefer (entre le Bob et le Cup) 1.1270 mm Facteur de correction des effets de bouts 1.10 Volume échantillon 19 ml Longueur active (<i>Check Length</i>) 119.2 mm Longueur de position (<i>DIN Position</i>) 72.5 mm Facteur de conversion C_{SS} 18.8168 Pa/mNm Facteur de conversion C_{SR} $1.2937 \text{ s}^{-1}/\text{min}^{-1}$

Le plan d'expériences #2 a été séparé en deux groupes d'essai. Le premier comprend les expériences PF1E05009 à PF1E05023 (effectuées du 05/07/2005 au 25/07/2005), et le groupe 2 les expériences PF1E05024 à PF1E05027 (effectuées du 01/09/2005 au 12/09/2005). La viscosité pour les deux blocs d'expérience énumérés précédemment est tracée en fonction de la température dans les Figures 4.1 et 4.2. La légende indique les dates de la prise de l'échantillon.

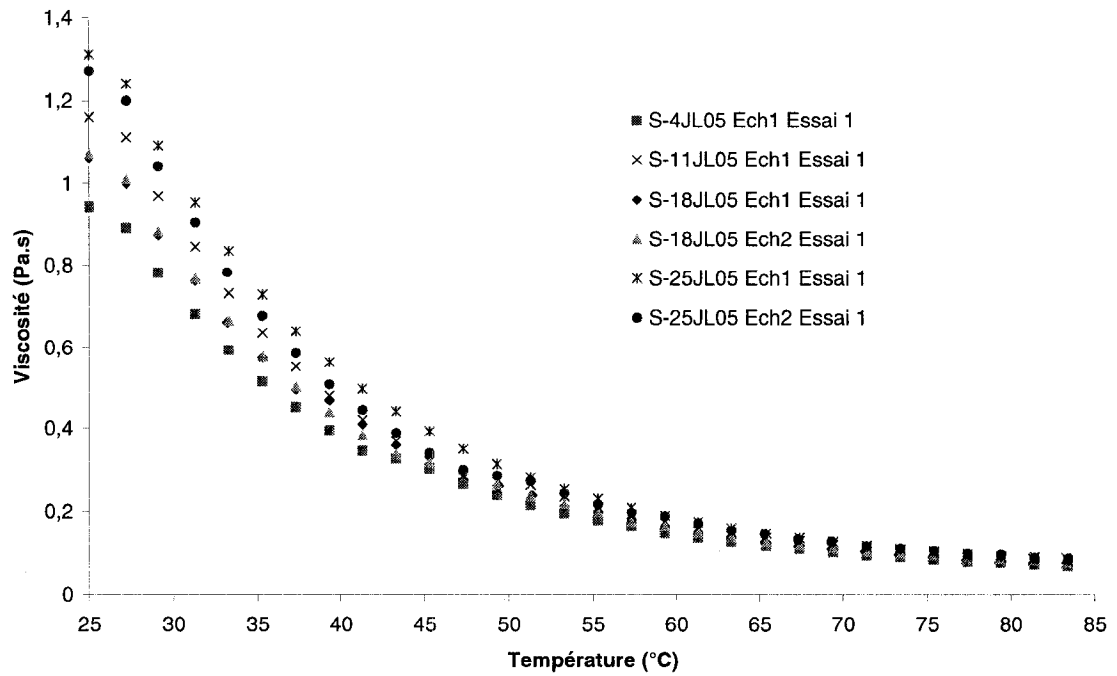


Figure 4.1 : Variation de la viscosité de la résine T-580 en fonction de la température (groupe d'expériences 1).

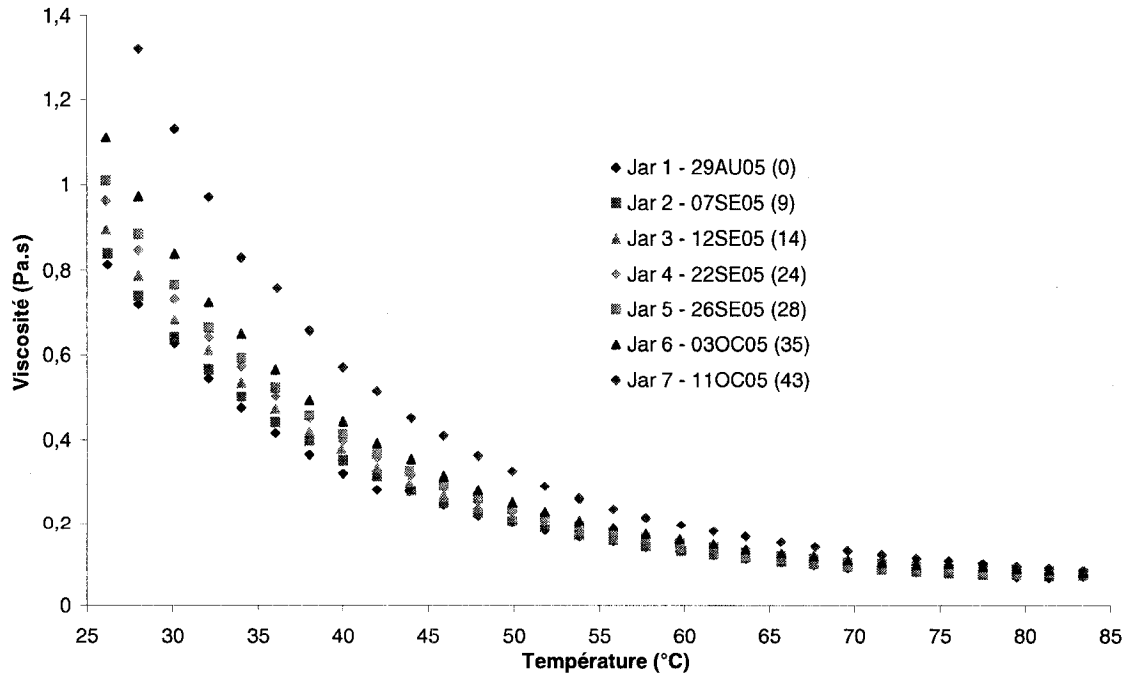


Figure 4.2 : Variation de la viscosité de la résine T-580 en fonction de la température (groupe d'expériences 2).

Un effet considérable de la température est observé sur la viscosité. Une température moyenne de 28°C et 24°C a été respectivement mesurée dans le laboratoire pendant la réalisation des groupes d'expérience 1 et 2. La viscosité moyenne de la résine correspondante à ces valeurs de température est de 1,000 Pa·s et 0,95 Pa·s respectivement. Comme on peut le remarquer dans le graphique de la Figure 4.1, la viscosité augmente du 4 au 25 juillet. Une certaine similitude est observée sur la Figure 4.2, mais la viscosité de la résine a une valeur plus faible dans la première semaine. La période d'essai du second groupe s'est étendue du 1 au 12 septembre. Cette variation de la viscosité avec le temps peut être associée avec la teneur en styrène dans la résine. En effet, chaque fois que le contenant de résine était ouvert, de petites quantités de styrène, qui est un composant très volatile, s'évaporent. Ceci entraîne une variabilité (la différence entre la valeur maximale et minimale par rapport à la moyenne) de la viscosité sur une période d'une vingtaine de jours environ, soit de 33% (21 jours) et 18% (24 jours) pour les groupes d'essai 1 et 2 respectivement. Ces changements de propriété de la résine avec le temps ont été remarqués seulement à la fin du plan d'expériences.

Le renfort utilisé est l'OCF8610, un mat à fibres aléatoires de Owens Corning d'une densité surfacique de 300 g/m² selon le manufacturier. Ce renfort est le même que celui du plan d'expériences #1, mais avec une densité surfacique différente car le rouleau à 450 g/m² n'était plus disponible au laboratoire. Trois couches de ce renfort ont été utilisées pour chacune des pièces fabriquées dans les essais. Puisque la densité du renfort n'est pas parfaitement homogène, une variabilité de 9.5% a été observée dans la masse totale des couches de fibres utilisées.

Des essais ont été effectués dans le moule de perméabilité de l'École Polytechnique [6] pour valider le modèle de perméabilité de l'OCF8610 (Équation (3.1)) mais pour une densité surfacique de 300 g/m². La Figure 4.3 montre les résultats pour différents taux de fibre ainsi que le modèle de perméabilité. On voit que le modèle concorde, bien qu'il fut élaboré avec une densité surfacique différente.

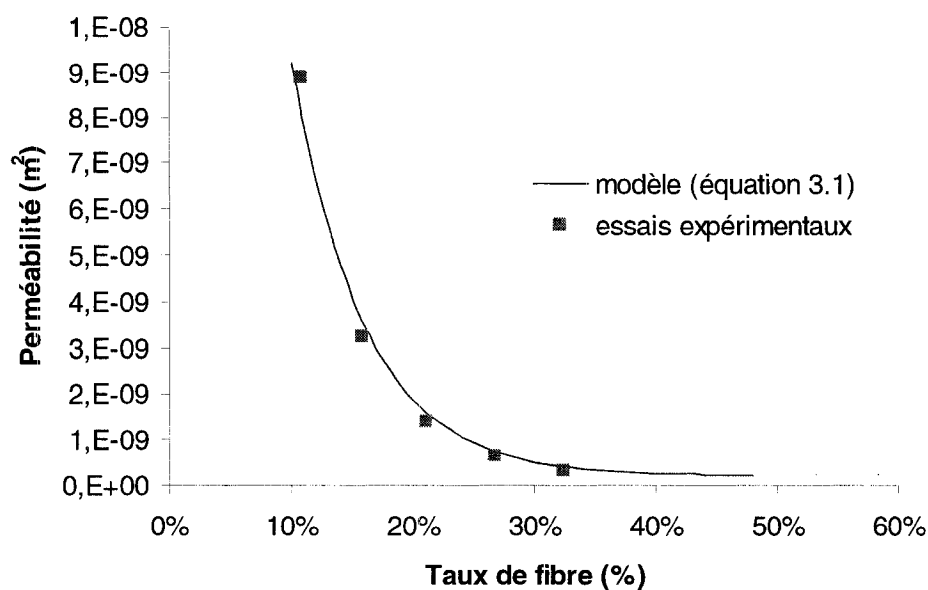


Figure 4.3 : Comparaison entre le modèle de perméabilité (Équation (3.1)) et les essais expérimentaux sur l'OCF8610 de 300 g/m².

Le fluide de compaction utilisé est une huile de silicone (200® fluid) de Dow Corning. La viscosité est représentée graphiquement en fonction de la température à la Figure 4.4. Pour les températures moyennes de 28°C and 24°C mesurées dans le laboratoire pour les groupes 1 et 2 respectivement, la viscosité moyenne de l'huile de silicone peut être estimée entre 0,91 Pa.s et 0,96 Pa.s.

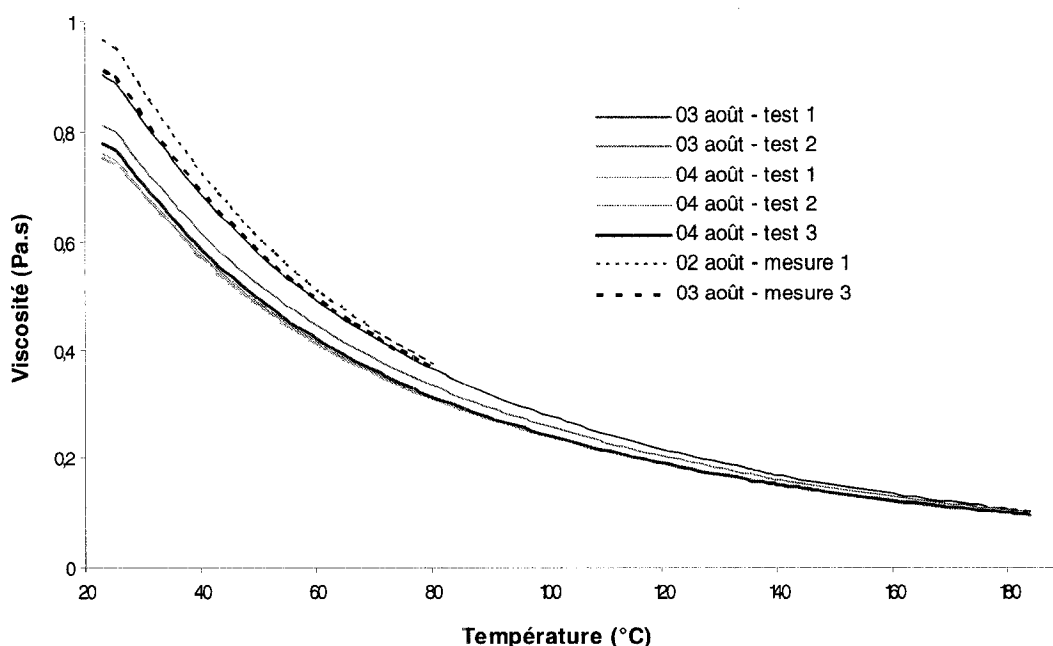


Figure 4.4 : Variation de la viscosité de l'huile de silicone en fonction de la température.

La membrane de séparation des chambres d'injection et de compaction était le film plastique Wrightlon Econolo 7400 de Airtech. C'est le même matériau que celui utilisé dans le plan d'expériences #1. Les propriétés générales de cette membrane sont données en Annexe A.

4.3 Conditions d'opération

Une configuration du moule à deux membranes a été adoptée (voir Figure 4.5). Dans le plan d'expériences #1, un effet de bord se produit dans l'écoulement du fluide de compaction, contribuant ainsi à diminuer l'épaisseur sur les côtés. Pour pallier à cet effet indésirable, deux tiges circulaires en viton de même dimension que les joints d'étanchéité ont été placées sur toute la longueur de la cavité comme le montre la Figure 4.5. Le moule demeure bien fermé par l'utilisation de boulons serrés avec un même couple de serrage de 17 N.m. L'étanchéité de la chambre d'injection du moule est assurée par le joint torique comprimé, la membrane inférieure et le moule inférieur. De

la même manière, l'étanchéité de la chambre de compaction garantie par le joint torique comprimé, la membrane et le moule supérieur. La limite en pression a été établie à 8 bars pour l'utilisation du moule, cette limite étant fixée par l'étanchéité du moule.

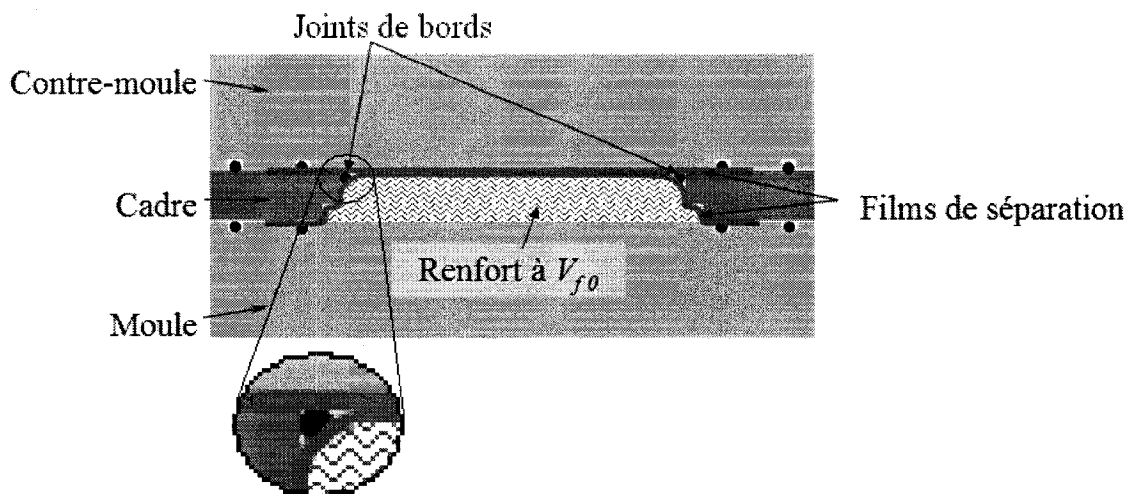


Figure 4.5 : Configuration du moule Polyflex 1 pour le plan d'expériences #2.

L'injection de la résine a été effectuée à une pression constante de 1.05 bars par l'utilisation d'un pot de pression (voir Figure 3.5) (pression max de 100 psi = 6,9 bars; volume de 2,5 gallons = 11 L). Une pression de vide a été appliquée dans la chambre d'injection au moyen d'un réservoir à vide (voir Figure 3.6) à une valeur de -0.25 bar. Comme dans le plan d'expériences #1, l'injection de la résine est arrêtée quand le front de l'écoulement atteint une ligne spécifique sur le moule se situant au 13/24 de sa longueur.

La pression et/ou le débit du fluide de compaction ont été contrôlés par le logiciel Poly-J au moyen d'un piston (Parker) monté sur un banc d'essai de test mécanique communément appelé JJ. Les spécifications du système sont présentées dans le Tableau 4.2 et la Figure 4.6 montre une photo du système.

Tableau 4.2 : Spécification de la machine d'injection JJ2

Force max (kN)	50
Vitesse max (mm/s)	11,7
Accélération max (mm²/s)	82,5
Cellule de charge (kN)	30
Diamètre du piston (mm)	82,55
Course max du piston (mm)	406,4
Matériau du piston	Acier inoxydable
Pression max du piston (bar)	17,2
Matériau des joints	Buna
Matériau contenu	Huile de silicone



Figure 4.6 : Piston d'injection du fluide de compaction monté sur un châssis d'essai mécanique (JJ2).

Le logiciel Poly-J permet d'instaurer des régimes de compaction différents pour les étapes 2 et 3 du procédé Polyflex (voir la section 2.2) :

- (1) un mode de compaction dynamique durant l'injection du fluide de compaction;
- (2) un mode de compaction statique durant la consolidation.

Trois différents régimes de compaction dynamique ont été étudiés : débit constant, pression constante et pression cyclique. Pendant la phase de compaction statique ou de consolidation, le profil de pression était soit constant ou incluait un certain nombre de cycles après lesquels la pression de compaction était maintenue constante.

Les valeurs de pression et de débit ont été calculées à partir des informations provenant des JJ. En effet, une cellule de charge (30 kN) montée à l'extrémité du piston a permis de connaître la force appliquée en tout moment. À partir de cette valeur, une pression a été évaluée à partir du rapport de la force appliquée avec l'aire de la surface du piston. La pression déterminée de cette manière est un peu surévaluée puisque les calculs ne tiennent pas compte de la friction dans le piston et des pertes de charge. Cette négligence n'a cependant pas d'impact sur l'analyse comparative qui suit. D'un autre côté, le débit a pu être évalué d'une façon assez précise puisque les machines de traction utilisées possèdent une excellente précision sur la position du piston (0,125 μm). Le volume est déduit du changement de position et, pour une injection à vitesse constante, un débit de résine précis est injecté.

Les données concernant l'évolution du front d'écoulement de résine dans le temps ont été obtenues grâce à l'utilisation d'une caméra vidéo placé perpendiculairement au-dessus du contre-moule transparent. Des lignes, placées à tous les 30 centimètres, ont été tracées sur la surface du contre-moule afin de procurer une meilleure précision sur la détermination de la position du front de résine. Un chronomètre a également été disposé bien en vue de la caméra pour connaître précisément le temps. La Figure 4.7 montre une image prise par la caméra.

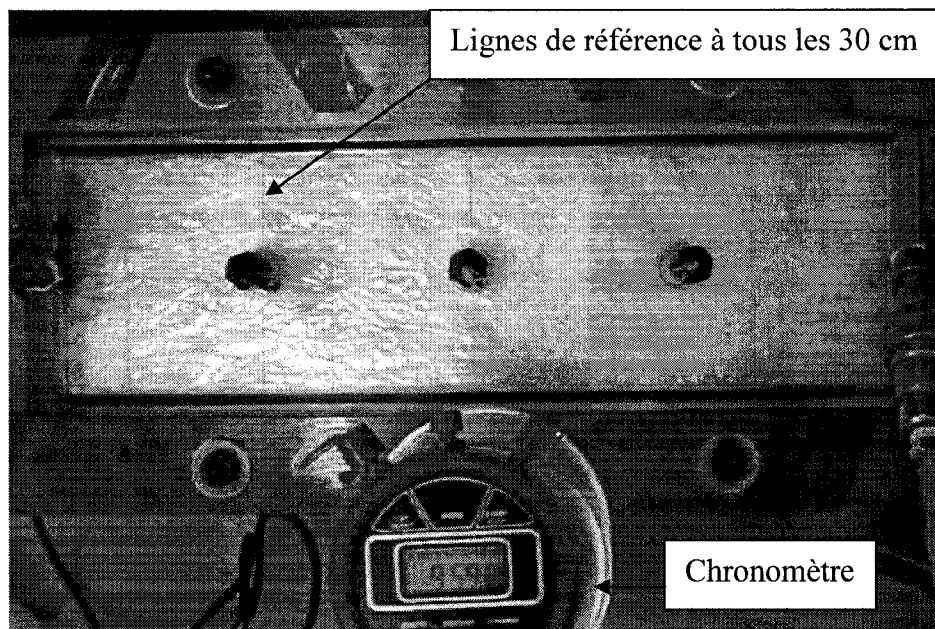


Figure 4.7 : Vue du moule à partir de la caméra positionnée perpendiculairement au-dessus du moule.

La méthode employée pour mesurer l'épaisseur des plaques fabriquées est similaire à celle utilisée dans le plan d'expériences #1. L'épaisseur de chaque plaque moulée a été mesurée en 21 points localisés sur une ligne joignant les ports d'entrée et de sortie. La Figure 4.8 montre la position des points de mesure sur un schéma de la plaque. Noter qu'il y a une plus grande densité de points près de l'évent (OUT), le plan d'expériences précédent ayant révélé une chute de l'épaisseur dans cette région.

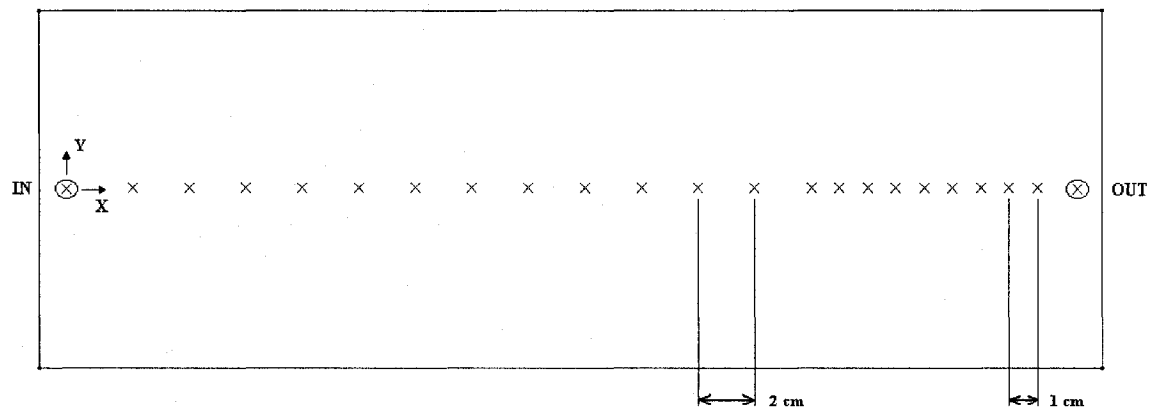


Figure 4.8 : Schéma d'une plaque avec l'emplacement des points de mesure de l'épaisseur (plan d'expériences #2).

4.4 Paramètres du procédé

Seuls les paramètres du fluide de compaction ont varié dans ce plan d'expériences. Pour les injections à débit constant, le seul paramètre de contrôle est le débit D_f qui varie entre 2 et 5 ml/s. Pour les injections à pression constante, le paramètre de contrôle est la pression notée P_{f1} et P_{f2} pour les compactions dynamique et statique respectivement et comprises entre 2 et 6 bars dans les deux étapes du procédé.

Les pressions cycliques sont définies par trois paramètres :

- la pression moyenne entre 2 et 6 bars notée P_{f1} et P_{f2} pour la compaction dynamique et statique respectivement;
- l'amplitude entre 2 et 4 bars notée A_{f1} and A_{f2} pour la compaction dynamique et statique respectivement;
- La fréquence constante à 0.8 Hz notée f_{f1} and f_{f2} pour la compaction dynamique et statique respectivement.

Une restriction sur les cycles de compaction porte sur la pression maximale qui ne doit pas dépasser 8 bars, cette valeur étant la limite d'étanchéité du moule. Si la pression cyclique est appliquée durant la compaction dynamique, le programme contrôle le

cyclage jusqu'à ce que le fluide remplisse la cavité de compaction. Par contre, durant la phase de consolidation qui débute lorsque l'évent est fermé, un nombre spécifique de cycles (n_f) est imposé, puis une pression constante de 4 bars est maintenue jusqu'à ce que la résine polymérise. Le Tableau 4.3 donne un sommaire des différents programmes de compaction qui ont été exécutés lors de ces expériences. Les paramètres appropriés sont spécifiés pour chacune des deux étapes de compaction du procédé.

Tableau 4.3 : Cycles de compaction étudiés dans le plan d'expériences #2

	Compaction dynamique (injection du fluide de compaction)	Compaction statique (consolidation)
programme 1	Débit constant (D_f)	Pression constante (P_{f2})
programme 2	Pression constante (P_{f1})	Pression constante (P_{f2})
programme 3	Pression constante (P_{f1})	Pression cyclique ($P_{f2}, A_{f2}, f_{f2}, n_f$) suivie par pression constante (4 bars)
programme 4	Pression cyclique (P_{f1}, A_{f2}, f_{f2})	Pression constante (P_{f2})

Des exemples de profils de pression correspondant aux programmes 1 à 4 sont montrés dans les Figures 4.9 à 4.12. La flèche 1 indique la fin de l'injection de la résine et le début de la phase de compaction dynamique (injection du fluide de compaction). La flèche 2 marque la fin de la compaction dynamique et le commencement de la compaction statique (consolidation).

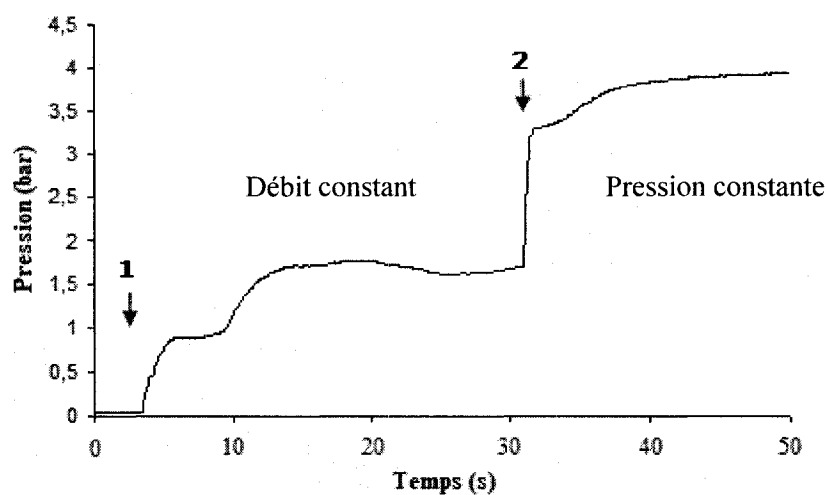


Figure 4.9 : Profil de pression de compaction du programme de compaction 1.

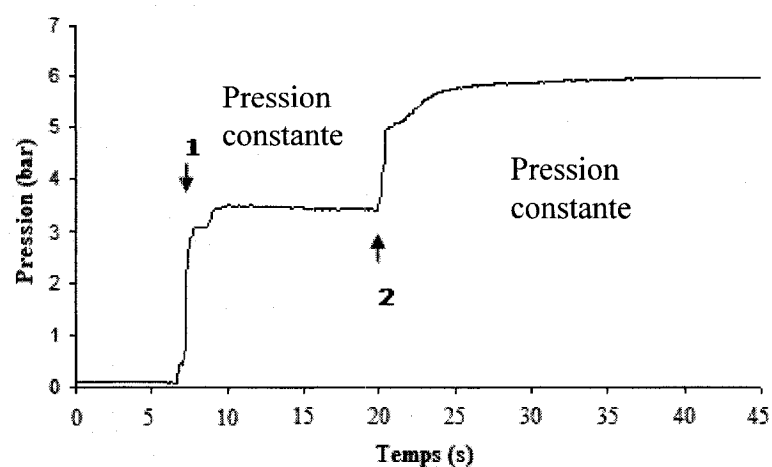


Figure 4.10 : Profil de pression de compaction du programme de compaction 2.

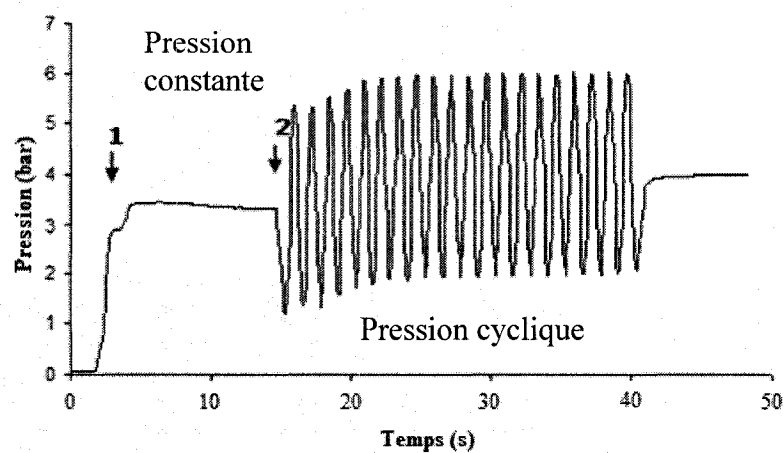


Figure 4.11 : Profil de pression de compaction du programme de compaction 3.

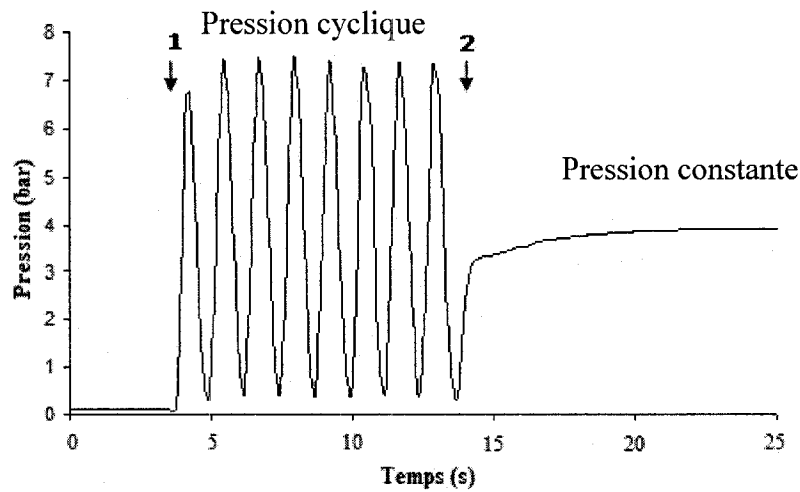


Figure 4.12 : Profil de pression de compaction du programme de compaction 4.

La fréquence a été fixée à 0,8 Hz puisque c'est la valeur maximale qui a été atteinte par la machine JJ2. Les accélérations et décélérations mécaniques du système lors des cycles sont responsables de ce plafonnement. La Figure 4.13 présente la période (T) du cycle de pression obtenue en fonction du taux d'augmentation de la force du piston. On observe qu'autour de 9000 N/s, la période atteint une valeur seuil d'environ 1,2 s. Comme la fréquence ($f = 1/T$) maximale est assez basse à 0,8 Hz, aucune autre valeur n'a été étudiée lors de ce plan d'expériences.

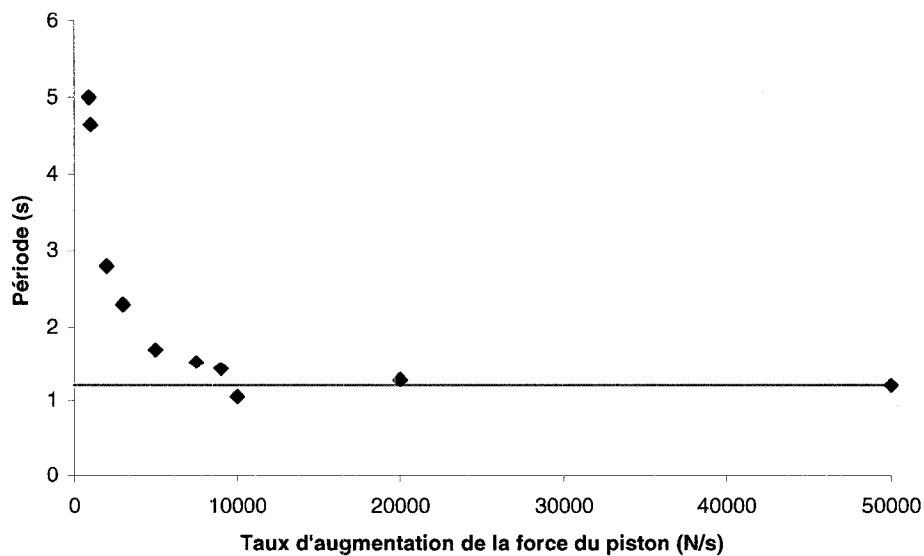


Figure 4.13 : Période obtenue en fonction du taux d'augmentation de la force du piston.

De manière à analyser l'influence des paramètres de compaction sur les performances du procédé, tous les autres paramètres du procédé sont demeurés constants aux valeurs énumérées dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Valeur des paramètres maintenus constants lors du plan d'expériences #2

Matrice	T-580-63
Viscosité de la résine	1,00 Pa·s (PF1E05009 à PF1E05023) 0,95 Pa·s (PF1E05024 à PF1E05027)
Température d'injection	28°C (PF1E05009 à PF1E05023) 24°C (PF1E05024 à PF1E05027)
Température de polymérisation	28°C (PF1E05009 à PF1E05023) 24°C (PF1E05024 à PF1E05027)
Pression d'injection de la résine	1,05 bars
Pression de vide appliquée dans la chambre d'injection	-0.25 bar
Position maximum du front de résine	13/24 de la longueur totale de la cavité
Renfort	OCF-8610 (300 g/m ²)
Nombre de plis	3
Viscosité du fluide de compaction	0,91 Pa·s (PF1E05009 à PF1E05023) 0,96 Pa·s (PF1E05024 à PF1E05027)
Hauteur de la cavité	3,175 mm

4.5 Résultats et discussions du plan d'expériences #2

Seize (16) expériences ont été effectuées pour les quatre programmes de compaction étudiés avec des valeurs différentes des paramètres de compaction. Les expériences ont été réalisées dans un ordre aléatoire afin de limiter l'influence des variables externes comme la viscosité de la résine et la température du laboratoire. Le Tableau 4.5 présente les valeurs des paramètres du procédé pour les 16 expériences ainsi que le temps total d'imprégnation du renfort t_p et le rapport t_p/t_r , où t_r est le temps de remplissage théorique du procédé RTM obtenu avec l'équation (1.5). Les expériences sont classées par ordre croissant en fonction du temps d'imprégnation expérimental t_p . Les paramètres des cycles de pression sont présentés sous la forme de $P_{min} = P_f - A_f/2$, $P_{max} = P_f + A_f/2$, où P_f est la pression moyenne de compaction et A_f l'amplitude. Le paramètre D_f note le débit du fluide de compaction. La fréquence des cycle de pression est de 0.8 Hz et un nombre total de 20 cycles ont été effectués lors des cycles de pression compaction statique (consolidation). Les expériences PF1E05009 et PF1E05023 ont été réalisées avec exactement les mêmes paramètres du procédé pour vérifier la reproductibilité des expériences. Les temps totaux d'imprégnation sont similaires, ce qui démontre la stabilité du procédé.

Tableau 4.5 : Temps d'imprégnation obtenus dans le plan d'expériences #2

No. d'expérience (Date de démoulage)	Programme No.	Injection du fluide de compaction	Consolidation	(1)	(2)
PF1E05017 (20/07/05)	4	$P_{min,1} = 4$ bars, $P_{max,1} = 8$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	33,1	12,2
PF1E05015 (18/07/05)	4	$P_{min,1} = 0$ bar, $P_{max,1} = 8$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	35,0	12,9
PF1E05020 (22/07/05)	3	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{min,2} = 4$ bars, $P_{max,2} = 8$ bars	35,3	13,0
PF1E05024 (01/09/05)	2	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{f2} = 6$ bars	37,7	14,6
PF1E05027 (09/09/05)	2	$P_{f1} = 6$ bars	$P_{f2} = 6$ bars	38,6	14,9
PF1E05013 (13/07/05)	3	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{min,2} = 2$ bars, $P_{max,2} = 6$ bars	38,6	14,2
PF1E05009 (07/07/05)	2	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	39,7	14,6
PF1E05023 (25/07/05)	2	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	41,5	15,3
PF1E05021 (22/07/05)	3	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{min,2} = 0$ bar, $P_{max,2} = 8$ bars	42,2	15,5
PF1E05016 (19/07/05)	4	$P_{min,1} = 2$ bars, $P_{max,1} = 6$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	43,2	15,9
PF1E05011 (11/07/05)	1	$D_f = 5$ ml/s	$P_{f2} = 4$ bars	44,0	16,2
PF1E05012 (12/07/05)	4	$P_{min,1} = 0$ bar, $P_{max,1} = 4$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	46,0	16,9
PF1E05014 (13/07/05)	3	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{min,2} = 0$ bar, $P_{max,2} = 4$ bars	53,1	19,5
PF1E05018 (21/07/05)	1	$D_f = 2$ ml/s	$P_{f2} = 4$ bars	54,2	19,9
PF1E05025 (07/09/05)	2	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{f2} = 2$ bars	82,8	32,0
PF1E05026 (08/09/05)	2	$P_{f1} = 2$ bars	$P_{f2} = 2$ bars	84,9	35,7

(1) Temps de remplissage t_p (s) ; (2) Temps de remplissage Polyflex / RTM $\frac{t_p}{t_r}$ (%)

4.5.1 Influence des paramètres de compaction sur le temps d'imprégnation du renfort

Le Tableau 4.5 montre que les meilleurs résultats en terme de temps d'imprégnation total du renfort sont obtenus lorsque des cycles de pression sont appliqués durant la compaction dynamique (injection du fluide de compaction). En effet, en comparant les expériences réalisées avec une même pression moyenne (par exemple PF1E05015 avec PF1E05009 ou PF1E05023), on observe qu'une variation de pression autour de cette valeur améliore fortement la performance du procédé.

D'un autre côté, les cycles de pression durant la compaction statique (consolidation) ne semblent pas avoir d'effet comme on peut le constater en comparant le temps d'imprégnation des paires d'expérience suivantes : PF1E05020 avec PF1E05024, PF1E05013 avec PF1E05009 et PF1E05021 avec PF1E05023. Cependant, comme les cycles de pression devraient aider à évacuer l'air emprisonné dans les pièces, il est probable que la qualité des pièces fabriquées par ce procédé soit améliorée en terme de taux de vide. Cette hypothèse pourrait faire l'objet d'une future analyse.

Pour la même pression imposée durant la phase de compaction statique, les injections à débit contrôlé durant la compaction dynamique produisent des temps d'imprégnation légèrement plus longs que ceux obtenus à pression constante et beaucoup plus longs que les essais avec des cycles de pression. En effet, les valeurs des débits étudiés dans le plan d'expériences #2 n'améliorent pas le procédé.

Finalement, le temps d'imprégnation est plus court lorsque la pression moyenne de compaction augmente. Ceci peut être constaté dans les deux phases de compaction. Des réductions du temps d'imprégnation par un facteur de 8 ont été obtenus par rapport au temps d'imprégnation théorique du procédé RTM.

4.5.2 Influence des paramètres de compaction sur la vitesse de la résine

La position du front de résine durant toute la période d'imprégnation peut être évaluée en utilisant les lignes parallèles tracées sur le moule transparent Polyflex 1 (voir Figure 4.7). À partir de ces points, la vitesse instantanée peut être déterminée par une méthode classique d'interpolation numérique [31] :

$$V(t_i) = \frac{1}{2} \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} + \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) \quad (4.2)$$

La Figure 4.14 montre les variations de la vitesse du front de résine pendant une injection flexible typique. Tel qu'expliqué à la section 4.4, la flèche 1 correspond à la fin de l'injection de la résine et au début de la compaction dynamique (injection du fluide de compaction). La flèche 2 marque la fin de la compaction dynamique et le début de la compaction statique (consolidation). La position du croisement des fronts de résine et du fluide de compaction est également identifiée entre les flèches 1 et 2.

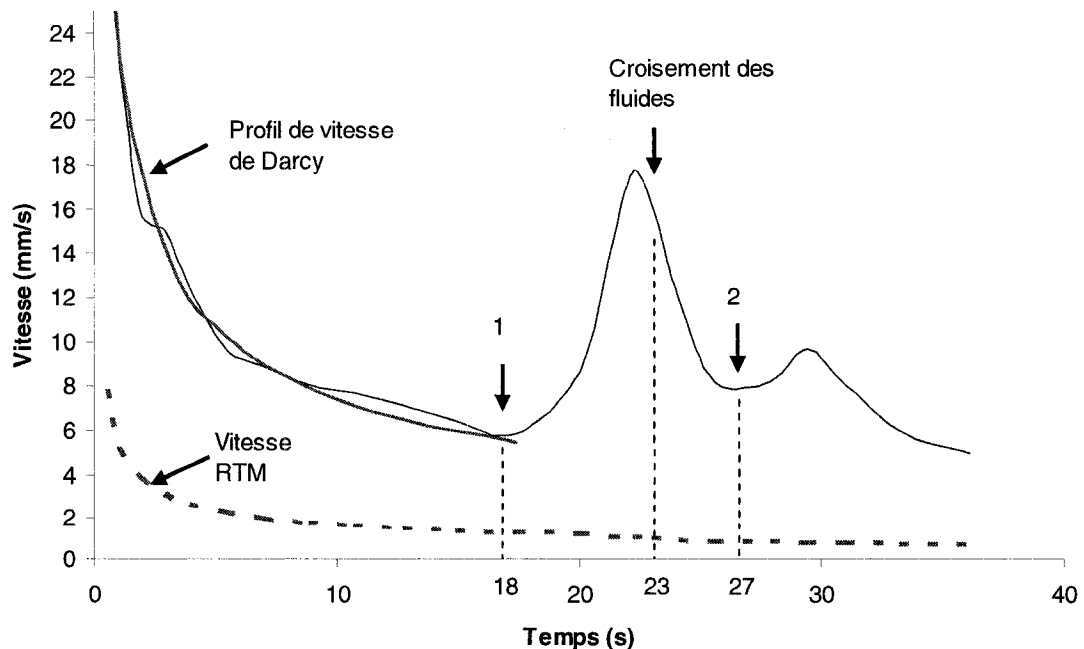


Figure 4.14 : Variation de la vitesse du front de résine durant les phases d'injection et de consolidation.

Il est observé que pendant la phase de l'injection de la résine qui prend environ 18 secondes, la vitesse de la résine diminue rapidement jusqu'à 6 mm/s. Cette diminution de la vitesse de la résine est typique d'un écoulement en milieu poreux pour une injection à pression constante. Le profil de vitesse du front de résine durant cette étape suit la loi de Darcy (Équation (1.4)) comme on peut le voir à la Figure 4.14. On peut voir aussi sur cette figure l'évolution de la vitesse du front de résine pour la fabrication d'une pièce identique de même épaisseur et à même pression d'injection de la résine avec le procédé RTM. La vitesse RTM a également été calculée à partir de l'équation (1.4) avec les valeurs suivantes : $K = 0,0014 \text{ mm}^2$ (calculé à partir de l'équation (3.1) avec $V_f = 21,9\%$), $P_0 = 105\,000 \text{ Pa}$, $P_f = -25\,000 \text{ Pa}$, $\mu = 1,00 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ et $\phi = 0,781$.

Durant la compaction dynamique, soit entre les flèche 1 et 2, le port d'injection de la résine est fermé et le fluide de compaction est injecté dans la chambre de compaction. Le front de résine accélère rapidement grâce à l'injection du fluide de compaction mais il atteint un maximum légèrement avant le croisement des fronts à 23 secondes. Une fois que le front du fluide de compaction a dépassé celui de la résine, la vitesse de la résine diminue jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur seuil à la fin du stade de compaction dynamique à 27 secondes.

Finalement, la vitesse de la résine durant la compaction statique (à partir de 27 s) montre un profil similaire à celui de la compaction dynamique mais avec un pic plus faible. La vitesse augmente aussitôt que l'évent du fluide de compaction est fermé puisque le gradient de pression appliqué par le fluide de compaction est momentanément très élevé et produit un effet marqué sur la progression du front de résine. Cependant, la vitesse du front de résine diminue graduellement après que ce pic ait été atteint. Ceci est dû en grande partie à la pression du fluide de compaction sur le renfort en aval du front de résine qui diminue la perméabilité du renfort, d'où une résistance à l'écoulement plus grande. Si la résine doit parcourir une longue distance pour se rendre jusqu'à la fin de la

cavité pendant la compaction statique, l'avantage général de l'injection flexible peut être perdu en comparaison avec le RTM.

La complexité du procédé d'injection flexible rend nécessaire une dissociation des phases de compaction dynamique (entre les flèches 1 et 2) et statique (après la flèche 2) pour évaluer la performance des programmes de compaction (voir Tableau 4.3). En effet, l'écoulement de la résine se comporte différemment dans ces deux étapes. Un critère d'évaluation de la performance a donc été créé à partir de l'évolution de la position du front de résine dans le temps. Ce critère nommé «vitesse moyenne de la résine», constitue le rapport de la distance parcourue par la résine sur le temps pendant les deux phases de compaction. La Figure 4.15 illustre la distance parcourue (d) par la résine pendant la phase de compaction dynamique. Le temps (t) associé à cette phase correspond à la différence entre les flèches 1 et 2 de la Figure 4.14. Le quotient de la distance parcourue par le temps donne le critère de performance de la vitesse moyenne ($V_{moy} = d/t$).

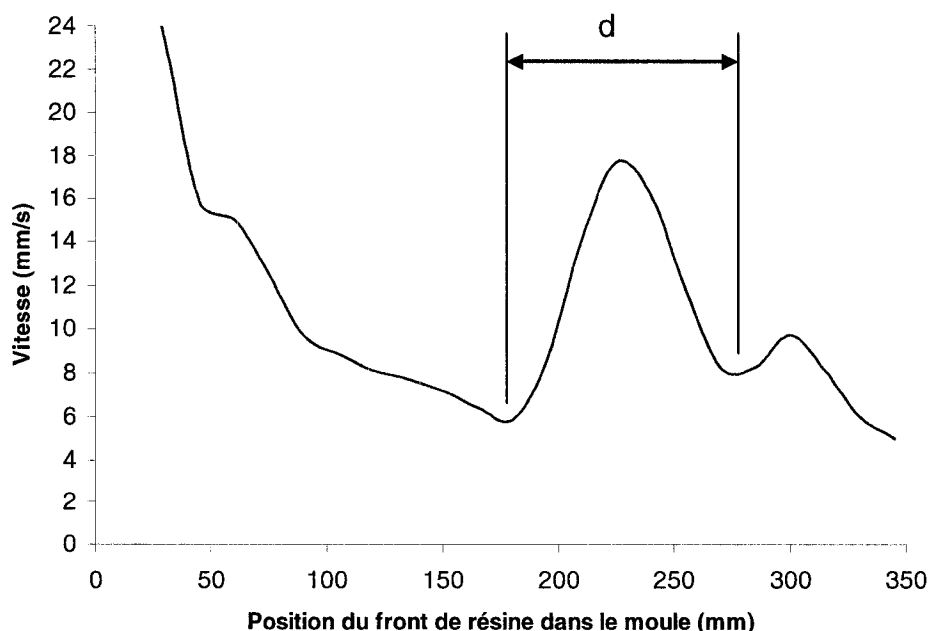


Figure 4.15 : Variation de la vitesse du front de résine en fonction de sa position dans le moule.

Le Tableau 4.6 montre la vitesse moyenne de la résine pendant l'étape de compaction dynamique (injection du fluide de compaction). Les résultats sont présentés par ordre décroissant du critère de performance. Les meilleurs résultats sont obtenus pour les cycles de pression, puis pour les pressions constantes de 6 et 4 bars. Finalement, les injections du fluide de compaction à débits contrôlés et sous une pression constante de 2 bars produisent les plus basses valeurs de la vitesse moyenne du front de résine. La Figure 4.16 présente la vitesse moyenne de la résine en fonction de la pression de compaction moyenne et de l'amplitude du cycle.

À partir de ce graphique et du Tableau 4.5, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. La vitesse moyenne du front de résine durant la compaction dynamique augmente avec la pression moyenne du fluide de compaction.
2. Pour une même pression moyenne d'injection, les cycles de pression autour de cette valeur augmentent la vitesse moyenne du front de résine en comparaison avec une pression constante du fluide de compaction.

Pour étudier les effets des paramètres du procédé sur la vitesse moyenne de la résine pendant la consolidation, seules les expériences ayant un profil de compaction dynamique à pression constante de 4 bars ont été sélectionnées. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.7 et sont ordonnés en ordre décroissant de la vitesse du front de résine.

Tableau 4.6 : Vitesse moyenne de la résine durant le stade de compaction dynamique (injection du fluide de compaction)

Numéro de l'expérience	Programme No.	Compaction dynamique	Compaction statique	Vitesse moyenne de la résine (mm/s)
PF1E05017	4	$P_{min,1} = 4$ bars, $P_{max,1} = 8$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	17,2
PF1E05015	4	$P_{min,1} = 0$ bar, $P_{max,1} = 8$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	12,4
PF1E05016	4	$P_{min,1} = 2$ bars, $P_{max,1} = 6$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	11,0
PF1E05027	2	$P_{f1} = 6$ bars	$P_{f2} = 6$ bars	11,0
PF1E05020	3	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{min,2} = 4$ bars, $P_{max,2} = 8$ bars	9,8
PF1E05014	3	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{min,2} = 0$ bar, $P_{max,2} = 4$ bars	9,7
PF1E05024	2	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{f2} = 6$ bars	8,8
PF1E05021	3	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{min,2} = 0$ bar, $P_{max,2} = 8$ bars	8,5
PF1E05009	2	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	8,5
PF1E05013	3	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{min,2} = 2$ bars, $P_{max,2} = 6$ bars	8,3
PF1E05023	2	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	8,3
PF1E05011	1	$D_f = 5$ ml/s	$P_{f2} = 4$ bars	7,5
PF1E05025	2	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{f2} = 2$ bars	6,7
PF1E05012	4	$P_{min,1} = 0$ bar, $P_{max,1} = 4$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	6,0
PF1E05018	1	$D_f = 2$ ml/s	$P_{f2} = 4$ bars	3,7
PF1E05026	2	$P_{f1} = 2$ bars	$P_{f2} = 2$ bars	2,8

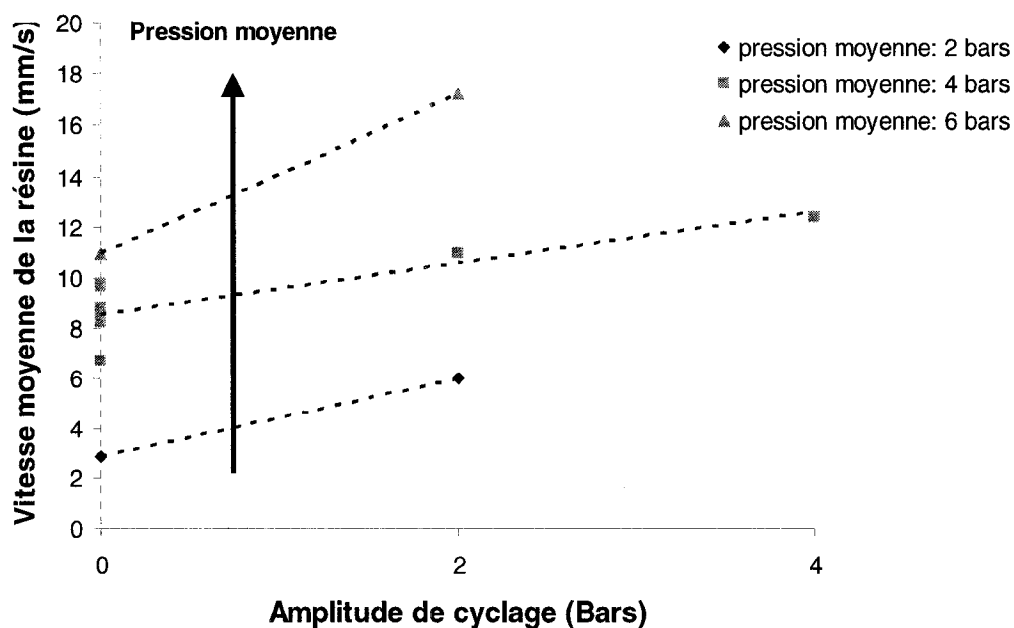


Figure 4.16 : Influence de la pression moyenne de compaction et de l'amplitude de cyclage sur la vitesse moyenne de la résine pendant la phase de compaction dynamique.

Tableau 4.7 : Vitesse moyenne de la résine pendant la consolidation

Numéro de l'expérience	Programme no.	Compaction dynamique	Compaction statique (consolidation)	Vitesse moyenne de la résine (mm/s)
PF1E05024	2	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{f2} = 6$ bars	9,3
PF1E05020	3	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{min,2} = 4$ bars, $P_{max,2} = 8$ bars	9,0
PF1E05013	3	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{min,2} = 2$ bars, $P_{max,2} = 6$ bars	6,9
PF1E05023	2	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	6,0
PF1E05009	2	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{f2} = 4$ bars	5,9
PF1E05021	3	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{min,2} = 0$ bar, $P_{max,2} = 8$ bars	5,3
PF1E05014	3	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{min,2} = 0$ bar, $P_{max,2} = 4$ bars	3,2
PF1E05025	2	$P_{f1} = 4$ bars	$P_{f2} = 2$ bars	2,0

La Figure 4.17 présente le critère de performance en fonction de la pression moyenne et de l'amplitude du cycle pour le stade de compaction statique. Comme dans le cas de la compaction dynamique, un effet marqué de la pression moyenne de compaction est observé, autant pour une pression constante ou un cycle de pression. Par contre, les cycles de pression durant la consolidation ne semblent pas procurer vraiment d'amélioration sur la vitesse du front de résine, une observation consistante avec celle tirée des résultats sur le temps d'imprégnation.

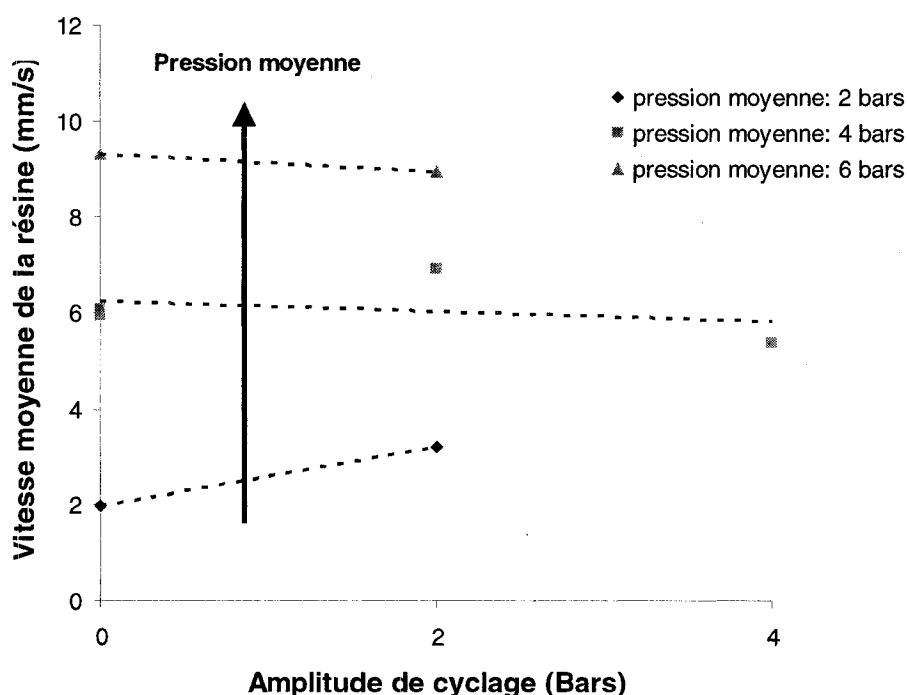


Figure 4.17 : Influence de la pression moyenne et de l'amplitude de cyclage sur la vitesse moyenne de la résine pendant la phase de compaction statique.

4.5.3 Analyse de l'épaisseur finale de la pièce

La Figure 4.18 montre une photo d'une plaque fabriquée lors de ce plan d'expériences.

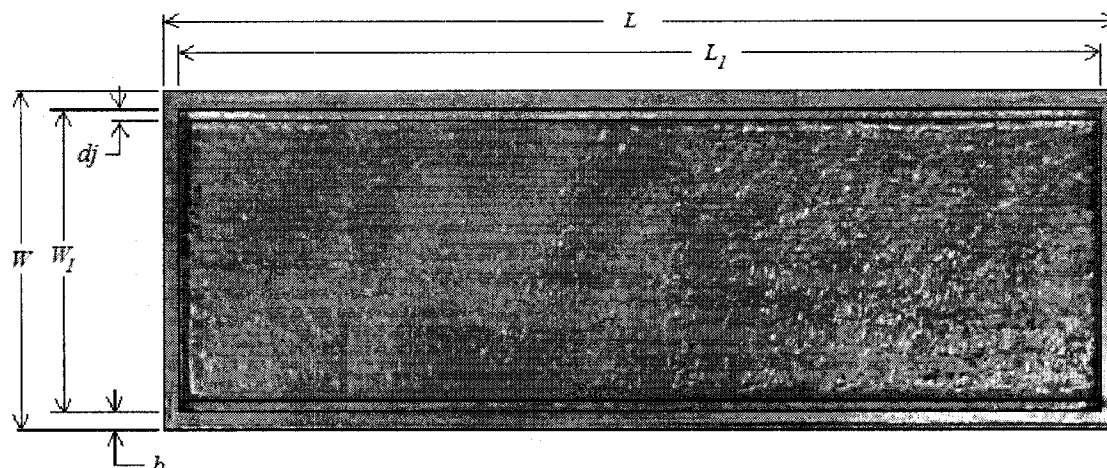


Figure 4.18 : Plaque fabriquée dans le plan d'expériences #2.

Les dimensions de ces plaques sont les suivantes :

L : longueur totale de la plaque = 376 mm

L_1 : longueur de la cavité = 364 mm

W : largeur totale de la plaque = 126 mm

W_1 : largeur de la cavité = 114 mm

b : largeur du rebord du cadre = 6 mm

dj : diamètre du cordon de néoprène utilisé pour limiter les effets de bord = 4,5 mm

Une épaisseur moyenne a été calculée pour douze (12) plaques en utilisant les 21 points de mesure (voir Figure 4.8). Le Tableau 4.8 donne la valeur moyenne mesurée en comparaison avec une valeur théorique de l'épaisseur calculée en prenant en considération la conservation du volume de résine dans la cavité. Les détails de ces calculs sont fournis à l'Annexe F. L'épaisseur moyenne mesurée le long de la plaque ainsi que l'écart-type ont été pondérés en attribuant à chacun des points de mesure un facteur correspondant à la demi-distance entre le point visé et les points adjacents. Ce facteur a été ajouté en raison de la distribution non-uniforme des points de mesure (voir Figure 4.8). Les deux équations suivantes expliquent le calcul de l'épaisseur moyenne et l'écart-type. Les détails sur toutes les épaisseurs mesurées sont donnés à l'Annexe G.

$$\bar{h} = \frac{\sum w_i h_i}{\sum w_i} \quad (4.3)$$

$$\bar{\bar{h}} = \sqrt{\frac{\sum w_i (h_i - \bar{h})^2}{\sum w_i}} \quad (4.4)$$

Le taux volumique de fibres moyen a aussi été calculé à partir de l'équation (1.6). La masse volumique des fibres de verre considérée est 2540 kg/m³.

Tableau 4.8 : Comparaison entre l'épaisseur moyenne mesurée et l'épaisseur théorique calculée des plaques fabriquées

Numéro de l'expérience	Épaisseur moyenne mesurée (mm)	Écart-type	Épaisseur théorique (mm)	Erreur (%)	Taux de fibres
PF1E05009	1,609	0,144	1,629	1,2%	21,9%
PF1E05011	1,633	0,130	1,628	-0,3%	21,5%
PF1E05012	1,651	0,167	1,633	-1,1%	21,8%
PF1E05013	1,680	0,116	1,644	-2,2%	22,6%
PF1E05014	1,724	0,178	1,627	-6,0%	20,3%
PF1E05015	1,611	0,087	1,630	1,2%	22,0%
PF1E05016	1,618	0,134	1,657	2,4%	22,6%
PF1E05017	1,577	0,146	1,645	4,1%	22,3%
PF1E05018	1,565	0,097	1,674	6,5%	23,2%
PF1E05019	1,682	0,165	1,667	-0,9%	22,0%
PF1E05020	1,654	0,141	1,639	-0,9%	21,7%
PF1E05021	1,638	0,200	1,644	0,4%	21,8%

Les valeurs données par le modèle correspondent bien aux épaisseurs mesurées avec une différence de 1 à 7 %. De plus, l'épaisseur moyenne pour tous les essais est égale à 1.64 ± 0.05 mm. La moyenne de la variabilité (la différence des valeurs maximales et

minimales par rapport à la moyenne) de l'épaisseur des plaques est de 35%. Cette valeur correspond à la valeur trouvée dans le plan d'expériences #1 qui était de 38%. Une telle variabilité dans l'épaisseur reste tout de même considérable, mais tel que mentionné dans le chapitre précédent, l'utilisation d'un mat contribue à augmenter la variation d'épaisseur. Une analyse de la variabilité des plaques avec un tissu comme renfort au lieu d'un mat pourrait être effectuée pour vérifier l'impact du type de renfort utilisé.

La Figure 4.19 montre un profil typique de la variation d'épaisseur des plaques fabriquées. La ligne verticale à environ 270 mm du port d'entrée correspond au croisement des fluides. Il est évident sur ce graphique que la chute d'épaisseur se produit après le croisement des fluides. De plus faibles variations sont aussi observées avant cette ligne avec une amplitude limitée à moins de 15% de l'épaisseur moyenne. Cela est du même ordre de grandeur que la variation de la densité superficielle du mat à fibres aléatoires utilisé comme renfort. Ceci peut expliquer les variations observées dans l'épaisseur avant le croisement des fluides.

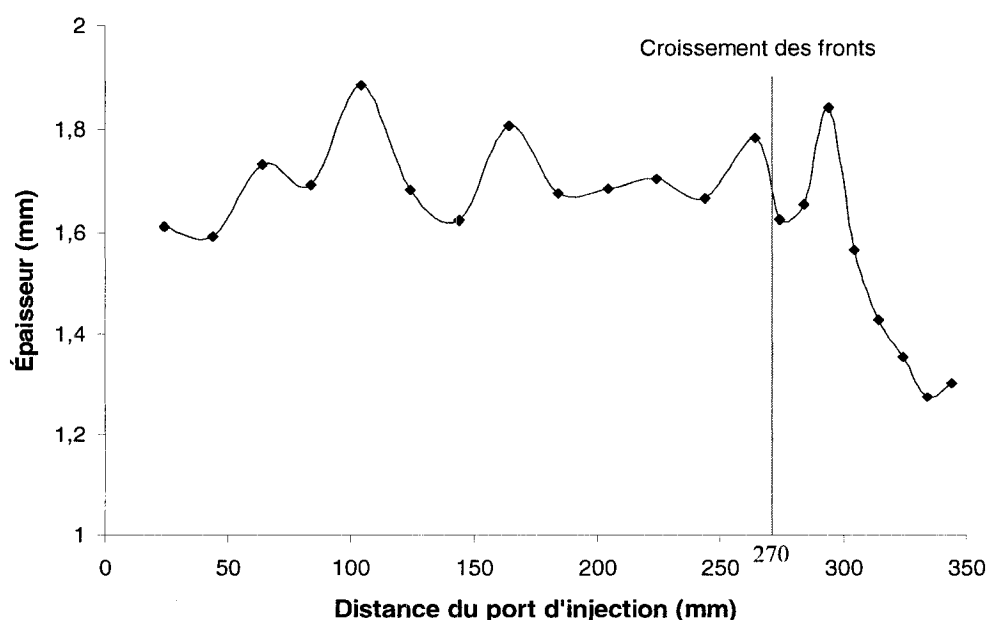


Figure 4.19 : Épaisseur de la plaque PF1E05020 en fonction de la position sur la longueur.

Le Tableau 4.9 présente une comparaison entre l'épaisseur moyenne avant et après le croisement des fluides. La colonne "Différence" est positive dans tous les cas à l'exception d'un seul essai faiblement négatif. Ceci confirme que la chute de l'épaisseur est significative et corrélée avec le croisement des fluides, car la différence entre l'épaisseur avant et après croisement est supérieure à l'écart-type moyen pour toutes les expériences effectuées. Différentes manières de repousser le croisement des fluides devront être étudiées dans un prochain programme de recherche.

Tableau 4.9 : Comparaison entre l'épaisseur mesurée avant et après le croisement des fluides

Numéro de l'expérience	Programme No.	Épaisseur moy. avant croisement des fluides (mm)	Écart-type	Épaisseur moy. après croisement des fluides (mm)	Écart-type	Écart (%)
PF1E05009	2	1,642	0,136	1,502	0,112	8,5%
PF1E05011	1	1,681	0,104	1,482	0,070	11,8%
PF1E05012	4	1,707	0,148	1,473	0,093	13,7%
PF1E05013	3	1,710	0,093	1,587	0,132	7,2%
PF1E05014	3	1,798	0,091	1,489	0,183	17,2%
PF1E05015	4	1,623	0,070	1,566	0,121	7,5%
PF1E05016	4	1,632	0,136	1,582	0,125	3,1%
PF1E05017	4	1,634	0,085	1,431	0,166	12,5%
PF1E05018	1	1,551	0,100	1,583	0,080	-2,0%
PF1E05019	1	1,743	0,116	1,528	0,170	12,3%
PF1E05020	3	1,701	0,079	1,506	0,185	11,4%
PF1E05021	3	1,704	0,178	1,428	0,097	16,2%

4.6 Conclusion

Lors du plan d'expériences #2 présenté dans ce chapitre, des plaques composites ont été fabriquées selon le procédé Polyflex pour différents paramètres et stratégies de compaction :

- débit constant, pression constante et cycle de pression durant l'étape de compaction dynamique (injection du fluide de compaction) ;
- pression constante et cycle de pression durant l'étape de compaction statique (consolidation).

Seize (16) expériences ont été réalisées en deux groupes différents. L'objectif principal était d'évaluer l'influence des paramètres de compaction sur le temps de remplissage du moule. Un deuxième sujet d'analyse était d'analyser l'impact des paramètres du procédé sur les variations d'épaisseur des plaques fabriquées.

L'analyse des résultats a mené à quelques conclusions importantes. Premièrement, un cycle de pression pendant l'étape de compaction dynamique (injection du fluide de compaction) améliore la performance du procédé en terme de temps d'imprégnation par rapport au cas d'une pression moyenne constante. De plus, une augmentation de l'amplitude du cycle améliore aussi la performance du procédé pendant cette étape. D'une manière assez prévisible, une augmentation de la pression moyenne, autant pendant l'étape de compaction dynamique que statique, diminue le temps d'imprégnation du renfort. Aucune contribution significative d'un cycle de pression n'a été observée pendant la phase de compaction statique (consolidation).

En ce qui concerne les mesures d'épaisseur, des résultats concordant avec le plan d'expériences #1 ont été observés en terme de variabilité totale de l'épaisseur. Une chute d'épaisseur dans les plaques fabriquées a été remarquée après le croisement des fluides. Ceci confirme la conclusion principale du plan d'expériences #1. Le procédé devra être réexaminé afin de réduire cet effet.

CHAPITRE 5 : TROISIÈME PLAN D'EXPÉRIENCES

Épaisseur de la cavité du moule et viscosité du fluide de compaction vs la performance du procédé Polyflex

5.1 Introduction

Dans le plan d'expériences #2, l'injection de la résine s'effectuait à travers le renfort qui occupait entièrement la cavité du moule. La résine rencontrait ainsi une résistance à l'écoulement inversement proportionnelle à la perméabilité du renfort. Un des objectifs de ce troisième plan d'expériences est d'évaluer la performance du procédé d'injection flexible dans le cas où le renfort ne remplit pas en totalité la cavité du moule. Un écoulement triphasé devrait se produire (voir Figure 2.10), soit un écoulement plan au-dessus du renfort, un écoulement plan à l'intérieur du renfort et un écoulement transversal au plan du renfort. Dans le but d'évaluer la performance de cette nouvelle méthode, deux variables principales ont été étudiées : la viscosité du fluide de compaction et l'épaisseur de la cavité du moule. Par ailleurs, afin de vérifier si cette version du procédé d'injection flexible est plus performante que la version du plan d'expériences #2, un essai de référence a été effectué. Finalement, quelques essais complémentaires ont été réalisés pour évaluer l'influence de l'application d'une pression de vide et de l'incorporation d'un milieu poreux dans la cavité de compaction. Ces deux nouvelles caractéristiques ont été incluses dans le procédé lors de ce plan d'expériences.

5.2 Matériaux

La résine utilisée dans le plan d'expériences #3 est la Polyester T-580 de AOC avec 1,1 phr de naphthalene de cobalt (NaCo) 12% de Dussek, de 0,15 à 0,2 phr de N-dimethylaniline (DMA) de Buffalo Color Corporation et de 1,6 à 2 % de methyl-ethyl-ketone peroxide (MEKP9) de NORAC. Le promoteur NaCo est nécessaire pour faire polymériser des résines polyester à basse température parce qu'il décompose le

catalyseur MEKP9 rapidement à température ambiante. Le DMA n'est pas un élément essentiel à la réaction de polymérisation. Cependant, lorsqu'il est utilisé en jonction avec le NaCo, il accélère considérablement la réaction à température ambiante. Les proportions de DMA et de MEKP9 ont varié au cours du plan d'expériences dans le but d'optimiser le temps de polymérisation à moins de 3h. Ce temps a été choisi dans le but d'effectuer deux injections par jour. Une démarche consistant en des modifications graduelles de la formulation a été adoptée pour ne pas endommager le système d'injection par une polymérisation trop hâtive. Dans un premier temps, seul le pourcentage de catalyseur changeait, passant de 1,7 à 2% pour 0,15 phr de DMA. Comme le temps de polymérisation avec 2% de catalyseur était encore supérieur à 3 h, la proportion de DMA est passée de 0,15 à 0,2 phr et le pourcentage de catalyseur de 2% à 1,6 % et le temps de polymérisation était de moins de 3 h. Cette formulation a été conservée pour les derniers essais. Le Tableau 5.1 montre l'évolution de la formulation de la résine pour chacun des essais. Comme le temps de polymérisation était relativement long dans tous les cas, l'évolution des propriétés de la résine n'a pas eu d'impact sur le remplissage du moule.

Tableau 5.1 : Évolution de la formulation de la résine pour le plan d'expériences #3

No. essai	De PF1H06056 à PF1H06059	De PF1H06060 à PF1H06062	De PF1H06063 à PF1H06066	De PF1H06067 à PF1H06071
Résine (phr)	100	100	100	100
NaCo (phr)	1,1	1,1	1,1	1,1
DMA (phr)	0,15	0,15	0,15	0,2
MEKP9 (%)	1,7	1,8	2	1,6
Temps de polymérisation (h)	+ de 4	+ de 4	3,5	- de 3

La viscosité de la résine non-réactive a été mesurée en trois occasions pendant la période de réalisation des essais à l'aide d'un rhéomètre à contrainte contrôlée, le modèle MCR501 d'Anton Paar. Les spécifications de l'analyse rhéologique sont les mêmes que

celles présentées dans le chapitre 4 et la procédure employée est identique pour la résine et pour l'huile de silicone. La Figure 5.1 montre la dépendance de la viscosité avec la température pour ces trois échantillons. La légende indique la date de la prise de l'échantillon.

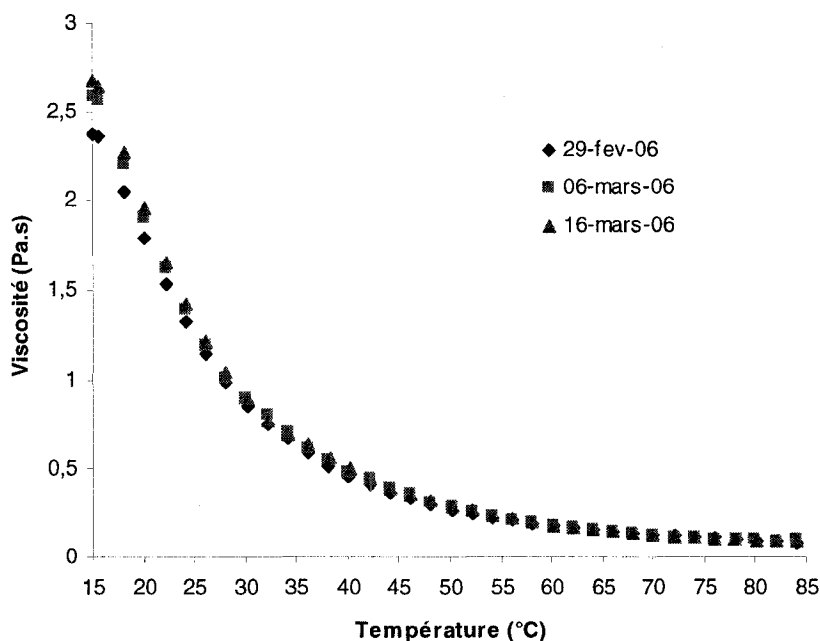


Figure 5.1 : Variation de la viscosité de la résine en fonction de la température.

Il a été constaté que la température affecte exponentiellement la viscosité de la résine polyester utilisée. En comparaison avec les courbes obtenues pour cette même résine dans le plan d'expériences #2, une plus faible variabilité de la viscosité de la résine dans le temps est observée. La raison provient d'une utilisation différente de la résine dans les deux plans d'expérience. Tel que mentionné dans le chapitre 4, le contenant de résine était ouvert à chaque essai et la variation de la viscosité fut attribuée aux pertes de styrène par évaporation lors de la préparation de la quantité de résine nécessaire à chaque essai. Dans les présentes expériences, la résine était entreposée dans le cylindre d'injection, séparément du catalyseur. Ceci permettait d'effectuer au moins quatre injections avant de remplir le cylindre. Afin de connaître précisément la viscosité de la résine, la température du laboratoire a été notée pour chacune des injections. La viscosité et la température de chacune des expériences ainsi que la date de leur réalisation sont

présentées dans le Tableau 5.2 en relation avec les courbes de la Figure 5.1. La courbe de l'échantillon pris le 29 février 2006 a été utilisée pour déterminer la viscosité de la résine pour les expériences PF1H06056 à PF1H06067, tandis que les deux autres courbes ont servi à approximer la viscosité de la résine pour les essais PF1H06068 à PF1H06071. La moyenne de la viscosité de la résine pour l'ensemble des essais est $1,757 \pm 0,073$ et la variabilité (la différence entre la valeur maximale et minimale par rapport à la moyenne) est 12% (16 jours) La température moyenne à laquelle l'ensemble des essais ont été effectués est de $20,7^{\circ}\text{C}$. La variabilité de la viscosité de la résine pour une période d'environ 20 jours a diminué par rapport au plan d'expériences présenté dans le chapitre 6 où elle s'établissait à 33% (21 jours) et 18 % (24 jours) respectivement pour les deux groupes d'expérience.

Tableau 5.2 : Viscosité de la résine pour chacune des expériences réalisées

Expérience no.	Température ($^{\circ}\text{C}$)	Viscosité (Pa·s)	Date de fabrication
PF1H06056	20,9	1,688	13-02-06
PF1H06058	20,6	1,725	15-02-06
PF1H06059	20,4	1,749	16-02-06
PF1H06060	20,1	1,786	17-02-06
PF1H06061	20,1	1,786	20-02-06
PF1H06063	20,8	1,700	22-02-06
PF1H06064	20,9	1,688	23-02-06
PF1H06065	20,9	1,688	23-02-06
PF1H06066	20,9	1,688	24-02-06
PF1H06067	21,0	1,676	28-02-06
PF1H06068	20,9	1,816	10-03-06
PF1H06069	20,8	1,848	14-03-06
PF1H06070	20,6	1,880	15-03-06
PF1H06071	20,6	1,885	16-03-06

Le renfort utilisé est l'OCF8610, un mat à fibres aléatoires de Owen Corning d'une densité surfacique moyenne de 300 g/m^2 selon le manufacturier, auquel a été ajouté une

faible quantité de résine polyester T-580 pour la mise en forme. Trois couches de ce mat ont été utilisées dans la fabrication des plaques moulées du plan d'expériences. Celles-ci ont été découpées en rectangle de dimension 390 mm x 530 mm avant d'être fixées sous presse par un liant thermodurcissable selon la méthode décrite dans le chapitre 1. Des préformes de 364 mm x 125 mm ont ensuite été découpées. La quantité de résine projetée étant connue uniquement pour la grande préforme, il a fallu pondérer cette valeur selon la surface des échantillons pour évaluer la masse de la résine dans les préformes employées pour les expériences. La masse moyenne de résine dans les préformes était de $2,39\text{g} \pm 0,19\text{g}$.

L'épaisseur des préformes a été mesurée avec un vernier de hauteur Mitutoyo sur une plaque de marbre en douze points sur leur surface, ce qui a permis d'en tirer une valeur moyenne de l'épaisseur. L'épaisseur moyenne de l'ensemble des préformes utilisées pour les expériences est de $4,16 \pm 0,38$ mm. En connaissant les dimensions de chacune des préformes ainsi que la quantité de résine ajoutée, il est possible de déduire la fraction volumique de résine et de fibres dans les préformes, qui sont d'environ 1% et 8,5% respectivement. Le tableau 5.3 présente les caractéristiques des préformes pour l'ensemble des plaques fabriquées dans ce plan d'expériences. La densité de la résine utilisée pour les calculs est de $1,21 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$.

Tableau 5.3 : Caractéristiques des préformes du plan d'expériences #3

No. Essai	Masse Totale (g)	Masse de résine (g)	Masse des fibres (g)	Épaisseur (mm)	Taux volumique de résine (%)	Taux volumique de fibres (%)
PF1H06058	42,29	2,58	39,71	4,31	1,0	8,0
PF1H06059	43,66	2,58	41,08	4,31	1,0	8,3
PF1H06060	43,30	2,61	40,69	4,46	1,0	7,9
PF1H06061	42,47	2,61	39,86	4,47	1,0	7,8
PF1H06063	41,00	2,61	38,39	4,81	1,0	6,9
PF1H06064	43,90	2,32	41,58	3,85	1,0	9,4
PF1H06065	42,80	2,32	40,48	3,71	1,0	9,5
PF1H06066	43,30	2,32	40,98	3,73	1,0	9,6
PF1H06067	42,29	2,32	39,97	3,78	1,0	9,2
PF1H06069	43,95	2,14	41,81	-----	-----	-----
PF1H06070	43,95	2,14	41,81	-----	-----	-----
PF1H06071	43,95	2,14	41,81	-----	-----	-----
MOYENNE	43,07	2,39	40,68	4,16	1,0	8,5
ÉCART-TYPE	0,89	0,19	0,97	0,38	0,0	0,89

Trois préformes supplémentaires 530 mm x 390 mm ont été fabriquées pour déterminer expérimentalement leur réponse en compressibilité et en perméabilité. La masse de résine dans ces préformes était la suivante :

- préforme no. 27 : 15,85 g,
- préforme no. 28 : 15,16 g,
- préforme no. 30 : 9,34 g.

Le Tableau 5.4 présente les caractéristiques des échantillons qui ont été découpés dans ces préformes. Les densités de la matrice et du renfort employées dans les calculs du taux volumique sont respectivement de 1210 kg/m³ et de 2540 kg/m³.

Tableau 5.4 : Caractéristique des échantillons utilisés pour les essais de perméabilité, de compressibilité et de relaxation

No. de plaque	27		28				30		
No. de l'échantillon	2	3	1	2	7	8	1	4	5
Longueur (mm)	380	380	380	380	50	50	380	50	50
Largeur (mm)	100	100	100	100	50	50	100	50	50
Masse (g)	38,72	39,49	38,16	38,49	2,39	2,59	36,8	2,57	2,58
Masse de résine pondérée (g)	2,91	2,91	2,79	2,79	0,18	0,18	1,72	0,11	0,11
Épaisseur moyenne (mm)	3,19	----	3,72	3,77	----	----	3,80	----	----
Taux volumique de fibres (%)	11,6	----	9,8	9,8	----	----	9,6	----	----
Taux volumique de résine	2,0	----	1,6	1,6	----	----	1,0	----	----
Type de test	P	P	P	P	C	R	P	C	R

P : Perméabilité; C : Compressibilité; R : Relaxation

La Figure 5.2 présente la courbe de compaction de deux échantillons de préforme, soit le 28 (7) et le 30 (4) et du renfort non-préformé. Les données relatives à l'OCF8610 sont les mêmes que celles présentées à la Figure 3.2. Les courbes de compaction des préformes ont été obtenues expérimentalement à l'aide d'une machine servo-hydraulique d'essai mécanique de traction-compression. La procédure de manipulation consistait en une compression à vitesse faible (2 mm/min) jusqu'à ce que la pression atteigne 900 N et une décompression à la même vitesse jusqu'à 0,1 N. L'échantillon utilisé était de forme carré d'une longueur de 5 cm. La procédure a été répétée trois fois pour visualiser l'effet d'hystérésis.

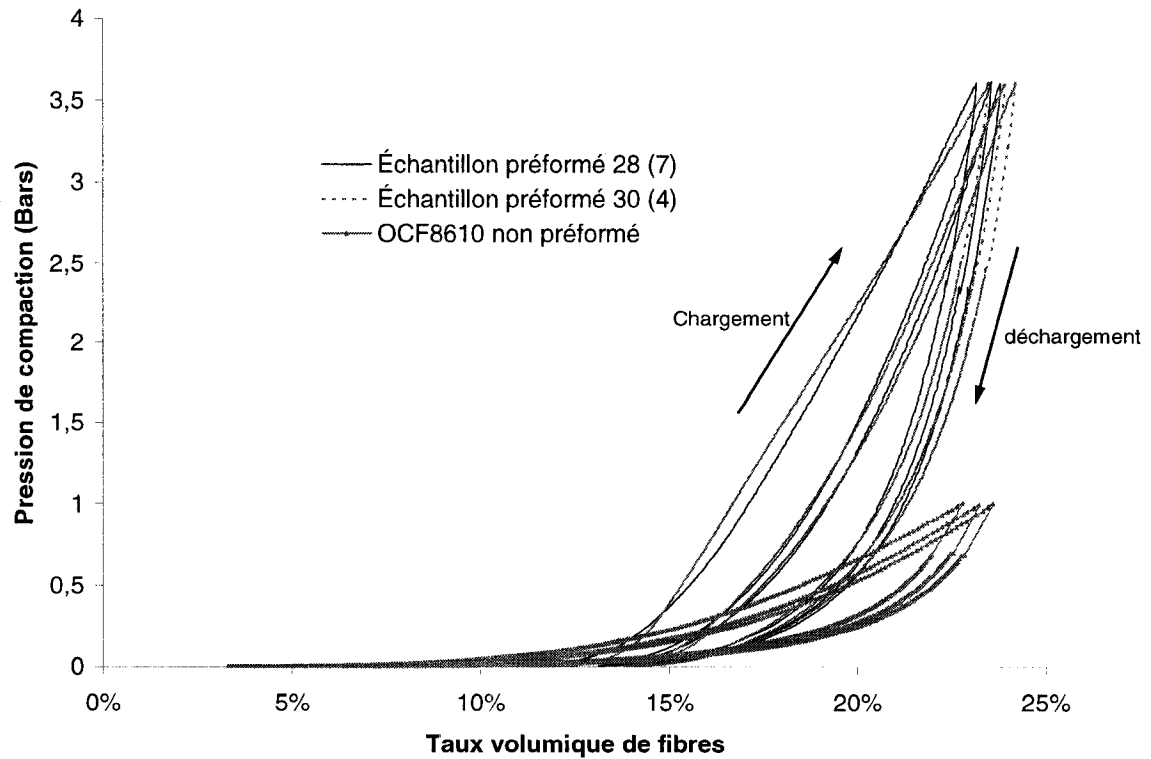


Figure 5.2 : Courbes de compaction des préformes et du mat non-préformé.

À la vue de ce graphique, on constate que la pression nécessaire pour compacter le renfort à un taux de fibres d'environ 23% est de beaucoup plus grande s'il est préformé que non préformé (environ 3,5 fois supérieur). Comme les plaques fabriquées dans ce plan d'expériences possèdent environ ce taux de fibres, une pression minimale de 3,5 bars doit être appliquée dans l'étape de la consolidation pour assurer une qualité raisonnable de la pièce en terme de porosité.

Les préformes ont également été caractérisées en relaxation. La Figure 5.3 montre le comportement des celles-ci lorsqu'elles sont soumises à une compaction jusqu'à 1,6 mm d'épaisseur à un rythme de 2 mm/min suivies d'un maintien à cette épaisseur pendant 300 s.

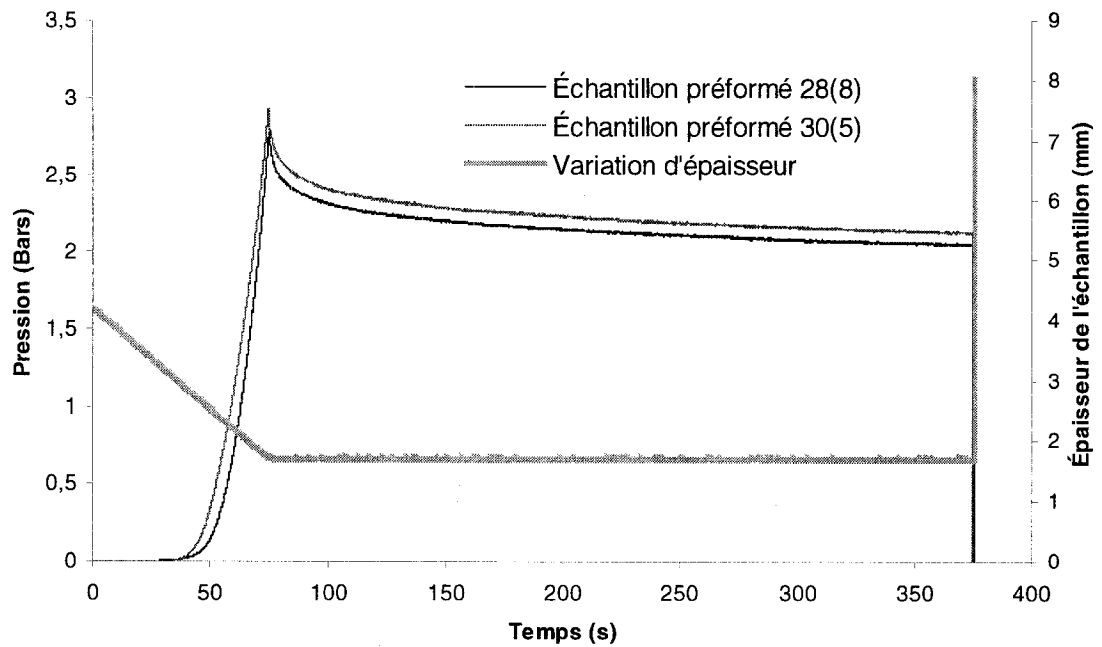


Figure 5.3 : Courbes de relaxation des préformes après compaction.

Les préformes ont aussi été caractérisées en perméabilité. L'objectif de cette caractérisation était d'évaluer l'influence du liant sur la perméabilité. La Figure 5.4 montre le modèle de perméabilité de l'OCF8610 introduit au chapitre 3 (équation (3.1)) ainsi que les résultats expérimentaux sur les préformes obtenus grâce au moule de perméabilité de l'École Polytechnique de Montréal [6].

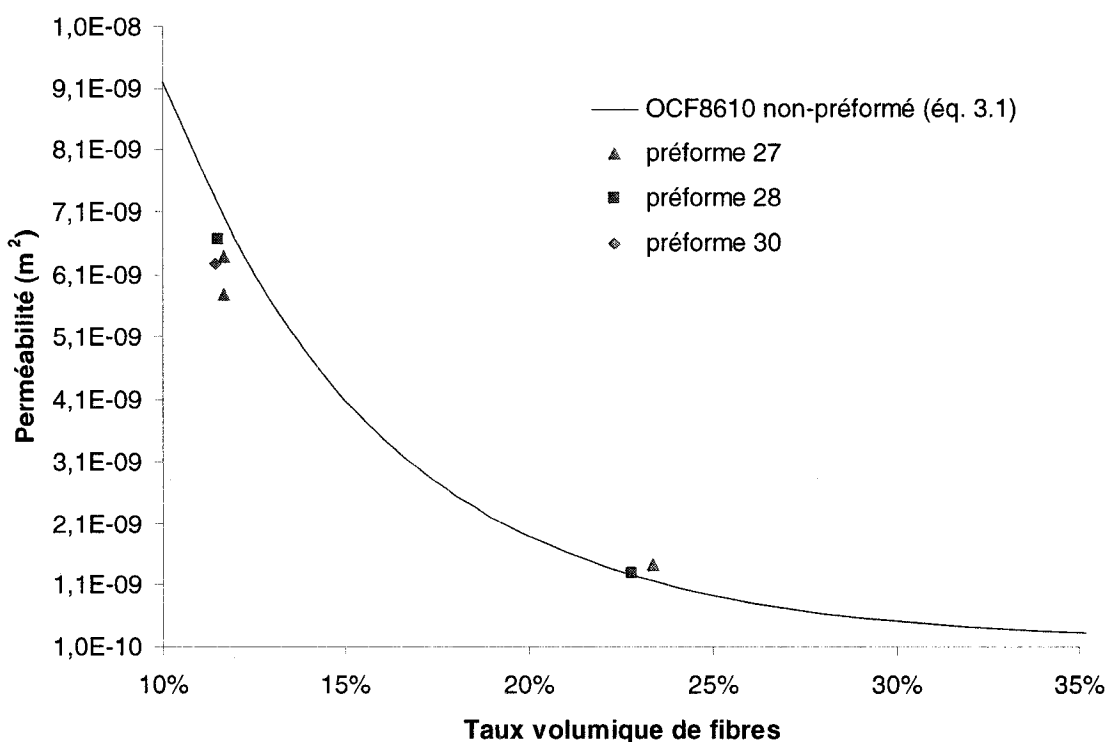


Figure 5.4 : Perméabilité du renfort OCF8610 préformé et non-préformé.

On observe bien une baisse de la perméabilité de la préforme à un taux de fibres d'environ 11,5%. Cette différence devient négligeable lorsque le taux de fibres augmente à 23%. Cependant, les écarts ne sont pas assez importants pour conclure à une influence significative du liant sur la perméabilité du mat. Davantage d'essais à des taux volumiques différents seraient nécessaires pour construire un modèle de perméabilité précis des préformes.

Trois cavités du moule ont été utilisées dans ce plan d'expériences. Celles-ci sont déterminées par l'épaisseur des cadres employés. Les épaisseurs des cadres utilisés sont 6,35 (1/4"), 7,94 (5/16") et 9,53 (3/8") mm pour respectivement les cadres 2 à 4.

Un milieu poreux a été placé dans la cavité de compaction pour les essais PF1H06058 à PF1H06067. Parmi les caractéristiques recherchées, le matériau ne devait pas être trop dense pour empêcher d'observer l'évolution de l'écoulement de la résine à partir de la

caméra placée au-dessus du moule. Le matériau sélectionné est un pli d'OCF8610, le même mat à fibres aléatoires utilisé dans la fabrication des plaques du plan d'expériences. Comme l'épaisseur des cavités du moule étaient variables, l'épaisseur initiale (avant le début de l'injection) du milieu poreux changeait, ce qui signifie par le fait même que sa perméabilité variait d'un essai à l'autre.

Le fluide de compaction utilisé est une huile de silicone (200® fluid) de Dow Corning. L'objectif de ce plan d'expériences était d'évaluer, entre autres, l'influence de la viscosité du fluide de compaction sur la performance du procédé. Trois huiles de silicone ont ainsi été utilisées. Les Figures 5.5 à 5.7 présentent la courbe de viscosité en fonction de la température pour ces trois huiles placées par ordre croissant de viscosité.

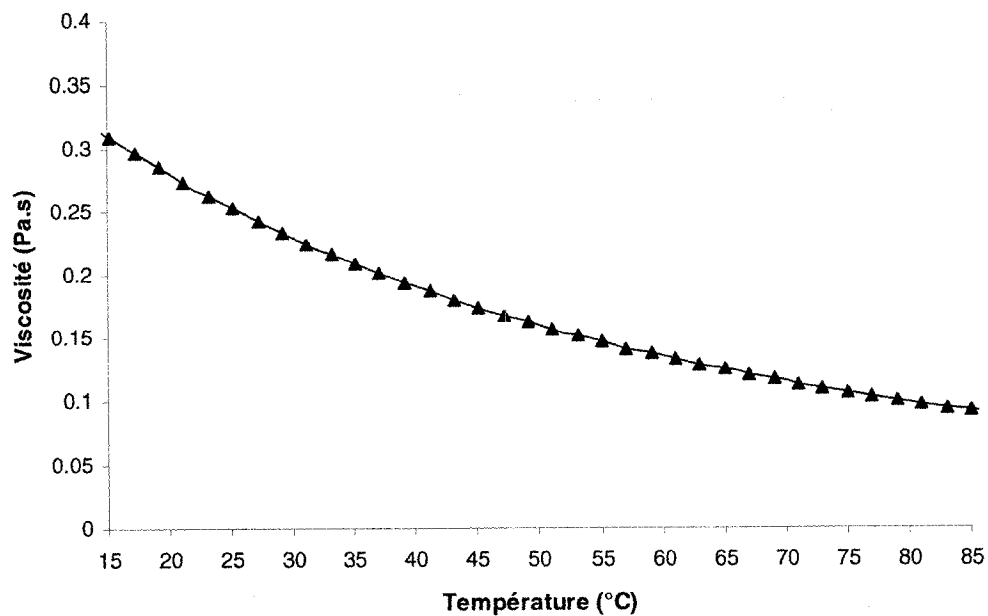


Figure 5.5 : Variation de la viscosité de l'huile de silicone (0,278 Pa.s) en fonction de la température.

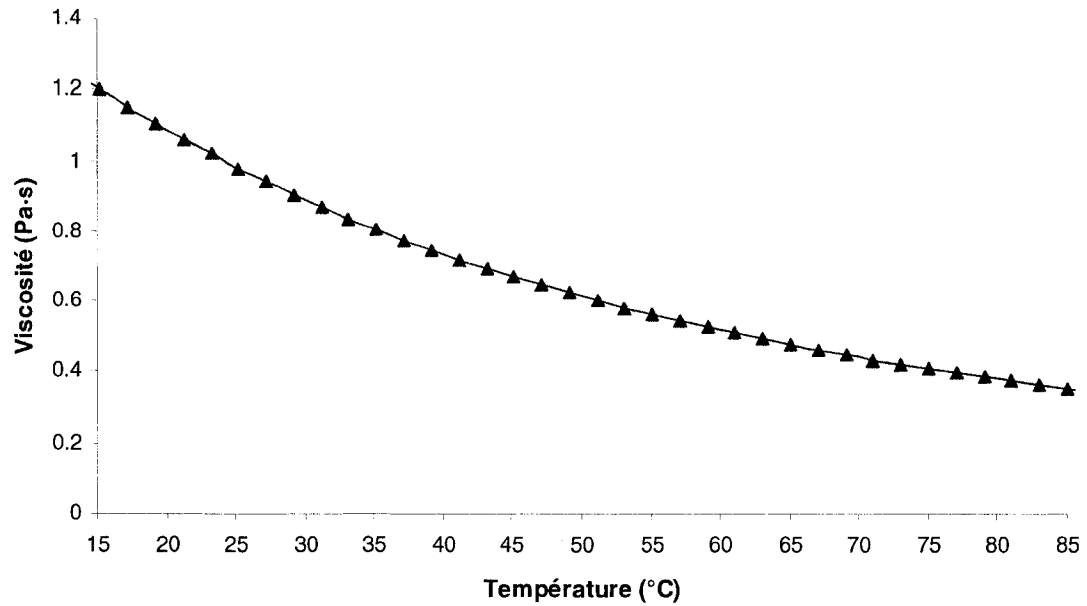


Figure 5.6 : Variation de la viscosité de l'huile de silicone (1,074 Pa.s) en fonction de la température.

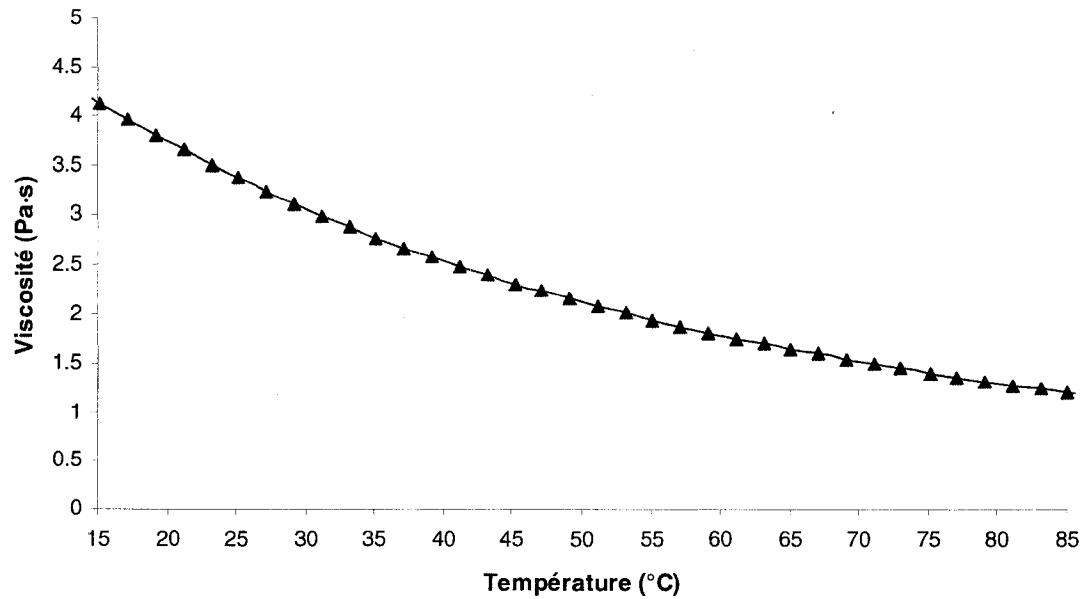


Figure 5.7 : Variation de la viscosité de l'huile de silicone (3,670 Pa.s) en fonction de la température.

Le Tableau 5.5 montre les viscosités des huiles utilisées pour chacune des expériences calculées à partir des données des graphiques des Figures 5.5 à 5.7 et de la température du laboratoire au moment de l'injection. La moyenne des viscosités pour les trois huiles

utilisées est, par ordre croissant, 0,3, 1,1 et 3,7 Pa.s. Ces valeurs serviront à l'identification des trois huiles comme il a été effectué dans le titre des Figures 5.5 à 5.7.

Tableau 5.5 : Viscosité des huiles de silicone pour chacune des expériences

Expérience no.	Température (°C)	Viscosité (Pa.s)
PF1H06056	20,9	1,067
PF1H06058	20,6	1,074
PF1H06059	20,4	1,078
PF1H06060	20,1	1,085
PF1H06061	20,1	0,281
PF1H06063	20,8	0,277
PF1H06064	20,9	0,276
PF1H06065	20,9	3,673
PF1H06066	20,9	3,673
PF1H06067	21,0	3,665
PF1H06068	20,9	1,067
PF1H06069	20,8	1,069
PF1H06070	20,6	1,074
PF1H06071	20,6	1,074

La membrane de séparation des chambres d'injection et de compaction était la EL1040T de Torr Technologies. Cette membrane de silicone d'épaisseur de 1/16'' est transparente, une propriété importante pour pouvoir visualiser l'écoulement des fluides. Les propriétés générales de cette membrane sont données à l'Annexe A.

5.3 Conditions d'opération

Pour ce plan d'expériences, une configuration du moule à une seule membrane a été adoptée (voir Figure 5.8). Une deuxième membrane n'était pas nécessaire puisque l'étanchéité du moule était assurée par la compression des joints toriques ainsi que la compression de la membrane elle-même. Une injection pour valider l'étanchéité du moule a été effectuée et le moule est demeuré étanche au fluide de compaction pendant 24h à une pression de 8 bars. Le moule demeure bien fermé par l'utilisation de boulons serrés avec un même couple de serrage de 17 N.m. L'étanchéité de la chambre d'injection du moule est assurée par le joint torique comprimé, la membrane inférieure et la base du moule. L'étanchéité de la chambre de compaction est aussi garantie par le joint torique comprimé, la membrane comprimée, le cadre et le moule supérieur.

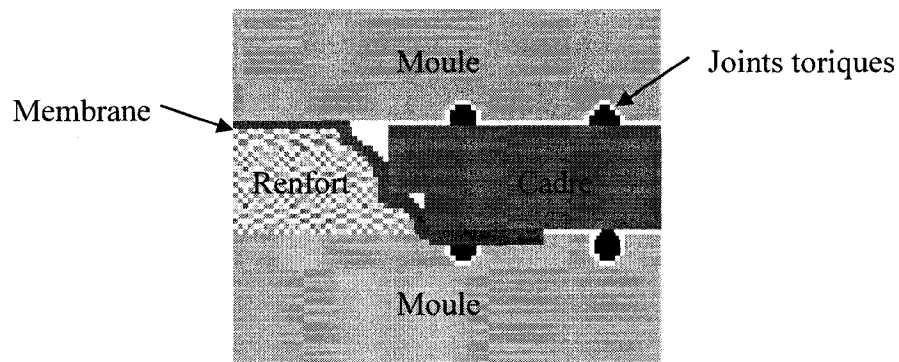


Figure 5.8 : Configuration du moule Polyflex 1 à une seule membrane.

La résine est injectée dans le moule par l'entremise de deux pistons montés sur une machine d'essais mécaniques communément appelée JJ. La machine JJ1 (voir Figure 5.9 (a)) a été utilisée pour l'injection de la résine, tandis que la JJ3 (voir Figure 5.9 (b)) a servi à l'injection du catalyseur. Le Tableau 5.6 montre les spécifications de ces deux machines.

Tableau 5.6 : Spécifications des machines d'essai JJ1 et JJ3

	JJ1	JJ3
Force max (kN)	50	10
Vitesse max (mm/s)	11,7	8,3
Accélération max (mm ² /s)	82,5	61,5
Cellule de charge (kN)	30	20
Diamètre du piston (mm)	82,55	28,58
Course max du piston (mm)	406,4	127
Matériau du piston	Acier inoxydable	Acier inoxydable
Pression max du piston (bar)	17,2	17,2
Matériau des joints	Viton	Viton
Matériau contenu	Résine polyester	Catalyseur MEKP9
Matériau des tubes	PVC renforcé	Acier inoxydable
Pression max des tubes (bar)	17,2	206,8

La résine promotée (polyester insaturé + styrène + promoteur NaCo + accélérateur DMA) est conservée dans le premier piston, tandis que le second piston contient le catalyseur MEKP9. Le diamètre du piston contenant la résine est de 82,55 mm (3 ¼”) et la course maximale est de 406,4 mm (16”). Ceci donne un volume maximal de 2175 ml de résine dans la chambre du piston. Comme chaque injection nécessitait environ 200 ml (130 ml pour remplir la tête de mélange et les lignes et 70 ml pour l’injection de la pièce), un réservoir rempli du piston permettait d’effectuer environ 10 essais. La Figure 5.10 montre un raccord en T à la sortie du piston. La conduite du bas sert au remplissage du piston tandis que celle du haut mène à la tête de mélange. Un clapet anti-retour a été ajouté pour contrôler la direction de l’écoulement. Lorsque le piston monte, le clapet s’ouvre. Ceci permet à la résine de remplir le cylindre du piston. Lorsque le piston descend, le clapet se ferme. La résine contenue dans le cylindre est donc forcée de s’écouler vers la tête de mélange.

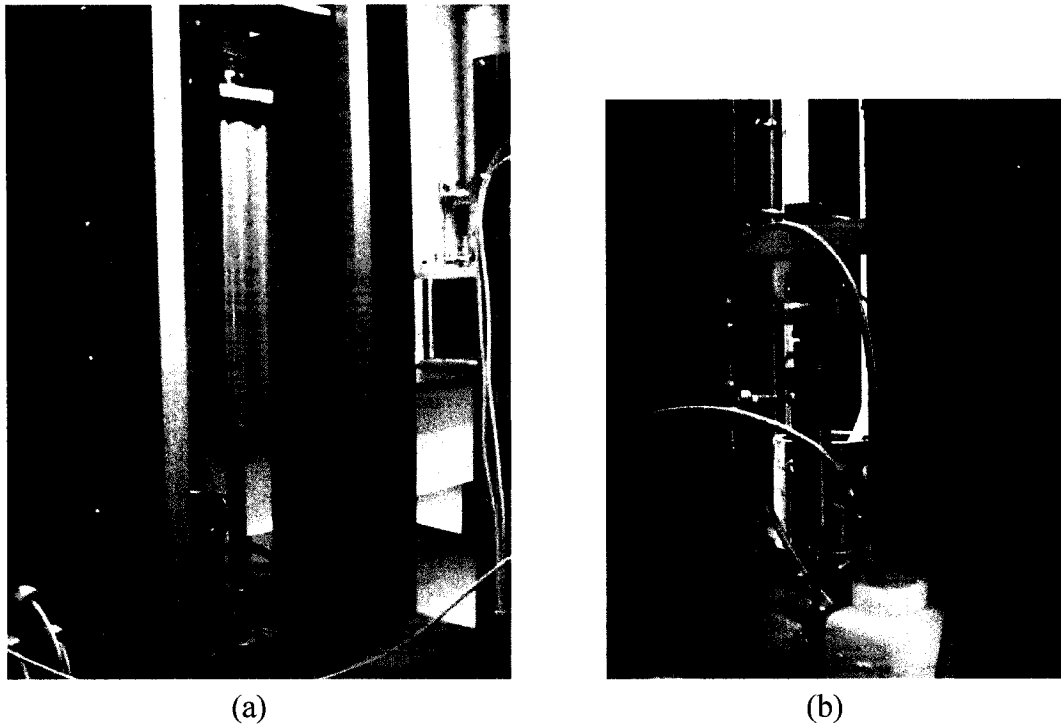


Figure 5.9 : Piston d'injection de la résine polyester T-580 promotée (a) et du catalyseur (b).

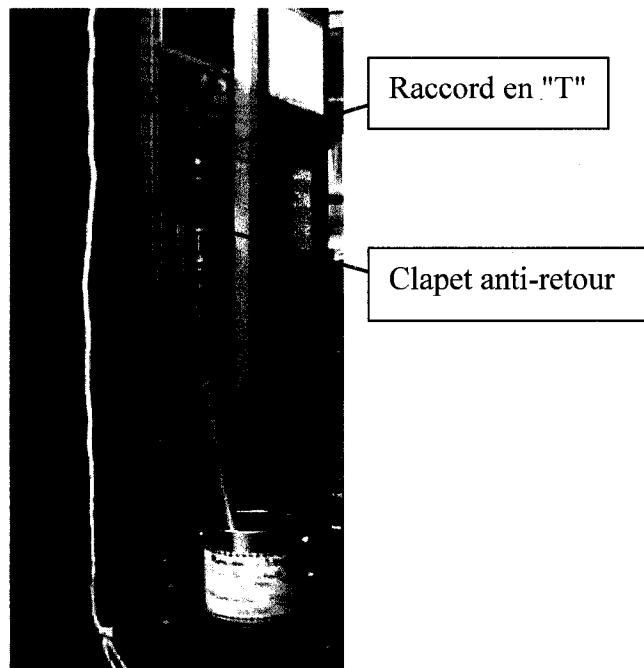


Figure 5.10 : Raccord en "T" servant autant à l'injection de la résine qu'au remplissage du piston.

Le diamètre du piston du catalyseur est de 28,58 mm (1 1/8") et la course maximale est de 127 mm. Ceci donne un volume maximal de 81,5 ml de résine dans la chambre du piston. Comme le montre la Figure 5.9 (b), la jonction à l'entrée du cylindre du catalyseur est identique à celle de la résine. L'ajout d'un réservoir constamment relié à l'entrée du cylindre permet de créer un circuit de recirculation du catalyseur. Ainsi, avant le début de l'injection, il est possible de faire recirculer le catalyseur dans les conduites pour en purger l'air. Cette étape est particulièrement importante car les quantités injectées de catalyseur sont faibles et doivent être très précises puisqu'elles contrôlent la réaction de polymérisation.

Les deux pistons sont contrôlés par ordinateur par l'entremise du logiciel Poly-J. Le contrôle peut se faire soit en force ou en position. La cellule de charge joignant le piston à la JJ procure la force appliquée sur le piston, ce qui permet de déduire la pression appliquée sur le fluide. Cependant la valeur de la pression calculée n'est pas très représentative de la pression réelle dans le fluide en raison des nombreuses pertes de charge par frottement dans le cylindre et dans les conduites. C'est pourquoi un contrôle en pression n'est pas idéal avec ce système. D'un autre côté, la valeur obtenue peut être utilisée comme limite conservatrice pour le système. Par ailleurs, comme le contrôle en position est extrêmement précis (0,125 μm pour les machines JJ1 et JJ3), ce système d'injection permet de contrôler les volumes injectés de façon très précise (précision de 0,01 ml) dans l'hypothèse où les conduites sont exempts d'air, d'où l'importance de bien « saigner » le circuit avant les injections. De plus, la position dans le temps étant très bien connue, il est possible d'injecter avec ce système un débit constant avec une bonne précision. Les vitesses de déplacement des deux pistons sont synchronisées selon les débits et le rapport de catalyseur souhaités.

L'injection de toutes les pièces du plan d'expériences a été effectuée à un débit constant de 10 ml/s. Cette valeur a été choisie pour assurer d'une part un mélange résine-catalyseur homogène et d'autre part pour respecter les limites de vitesse des JJ. En effet,

une analyse de la polymérisation en fonction du débit a démontré qu'un débit minimum de 7 ml/s était nécessaire pour assurer une stabilisation du temps de polymérisation des pièces. Le Tableau 5.7 présente les résultats d'une série d'injections qui ont été effectuées à différents débits d'injection. Le temps de polymérisation a été mesuré pour chacun des échantillons.

Tableau 5.7 : Temps de polymérisation de 6 injections de résine à débits variables

No. échantillon	Volume (en ml)	Débit (ml/s)	Temps de polymérisation
Échantillon 1	100	1	Non polymérisé
Échantillon 2	100	3	5h32
Échantillon 3	100	5	4h30
Échantillon 4	100	7	3h28
Échantillon 5	100	9	3h18
Échantillon 6	100	11	3h

Par ailleurs, un débit assez important était recherché dans le plan d'expériences puisque l'objectif, lors de l'injection de la résine, était de créer un écoulement au-dessus du renfort. Un débit de 10 ml/s a été choisi puisqu'il répondait à ce critère tout en n'induisant pas une pression trop grande dans les conduites et dans le piston dont les pressions maximales sont 250 psi. Les points suivants présentent les avantages et inconvénients du système d'injection utilisé pour le plan d'expériences #3.

Avantages :

- Moins de manipulation de résine grâce au réservoir du piston qui permet d'effectuer 10 essais avant d'être réapprovisionné. Ceci implique également une variation moindre des propriétés de la résine comme la viscosité par exemple.
- Contrôle précis des volumes de résine et de catalyseur injectés.
- Le contrôle du déplacement du piston du catalyseur permet de varier l'apport de catalyseur pendant l'injection.

Inconvénients :

- Lors du remplissage du cylindre de résine, de l'air s'introduit à l'intérieur. Une purge est donc requise avant de pouvoir injecter.
- Le remplissage du cylindre de la résine se fait par aspiration, i.e., par la création d'un différentiel de pression entre la pression atmosphérique du contenant de résine et la pression plus faible à l'intérieur du cylindre créée par la montée du piston. Ce processus de remplissage demande un certain temps qui est fortement relié à la viscosité de la résine, ce qui ne serait pas idéal dans le cas d'un procédé industriel.

Un schéma de la tête de mélange utilisée («*Liquid Control Corporation*») pour ajouter le catalyseur à la résine est montré à la Figure 5.11. Le principe consiste à injecter séparément la résine et le catalyseur qui se combinent dans le mélangeur statique.

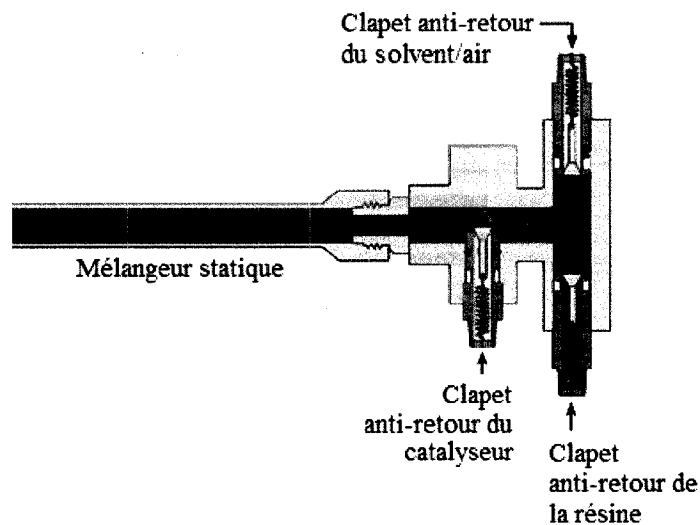


Figure 5.11 : Schéma de la tête de mélange utilisée.

Avec ce type de système, il a été jugé préférable de placer le clapet anti-retour du catalyseur en aval de l'écoulement. En effet, ce concept a réglé un problème antérieur de mélange où le catalyseur ne s'introduisait pas bien dans l'écoulement de la résine. Les clapets anti-retours employés possèdent une tête plane qui s'ouvre sous un gradient de

pression positif du fluide. La Figure 5.12 montre une représentation schématique de la valve et illustre son principe de fonctionnement.

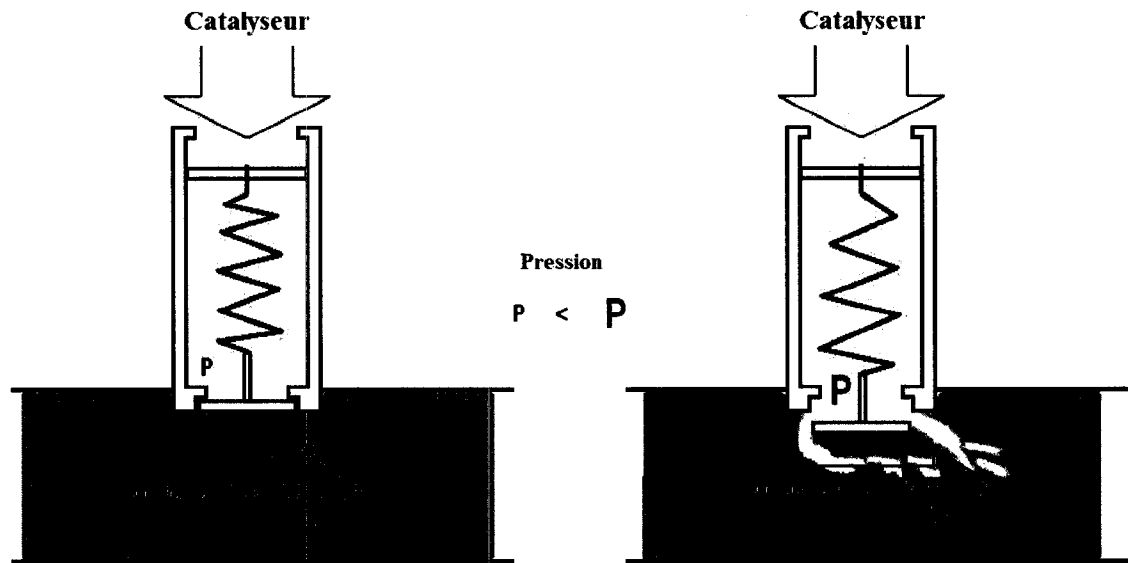


Figure 5.12 : Design et principe de fonctionnement des clapets anti-retour.

La troisième valve sert au nettoyage de la tête de mélange lorsque l'injection est terminée. Elle est reliée à un pot de pression contenant de l'acétone, qui est un solvant pour la résine. Un raccord à trois branches muni de valves manuelles permet d'alterner la procédure de nettoyage entre l'air et l'acétone comme il est exposé à la Figure 5.13.

Le dispositif de mélange statique consiste en des éléments hélicoïdaux en polyacétal (POM) pour résister à la résine, au catalyseur et à l'acétone. Sa longueur est fixée en fonction du nombre de Reynolds. Le fournisseur suggère une longueur de 12 éléments de mélange si le nombre de Reynolds se situe entre 500 et 1000 et de 6 éléments s'il est au-dessus de 1000.

$$Re = 3157 \frac{Q_i \rho}{\mu d_c} \quad (5.1)$$

Q_i : débit = 1,585 gallons par minute (10 ml/s)

ρ : densité spécifique = 1,2

μ : viscosité = 1000 centipoise à 25 °C

d_c : diamètre intérieur de la conduite = 0,25 po

Ces paramètres d'injection donnent un nombre de Reynolds de 24. Comme le nombre de Reynolds est inférieur à 500, on a supposé que 24 éléments seraient suffisants.

Pour chaque expérience, une pression de vide a été appliquée dans la chambre d'injection au moyen d'un réservoir à vide à une valeur de -0.25 bar de la même manière que dans les deux plans d'expérience précédents (voir Figure 3.7).

Contrairement au plan d'expériences #2 où la JJ2 était utilisée pour injecter le fluide de compaction, un pot de pression a été utilisé dans le présent plan d'expériences. La Figure 5.14 montre le circuit emprunté par le fluide de compaction à partir du pot de pression jusqu'au moule. Un capteur (GP :50; modèle 211B; 0-5 volt; 0,5% d'erreur) placé directement à l'entrée du moule a procuré des lectures précises de la pression de compaction. Ce capteur était surtout nécessaire pour connaître la pression statique pendant la phase d'injection du fluide de compaction. Un tube en chlorure de polyvinyle (PVC) renforcé de 1/2" de diamètre intérieur et un connecteur d'accouplement ISO-B («*quick disconnect*») en acier de 1/4" NPTF ont également été utilisés dans le circuit.

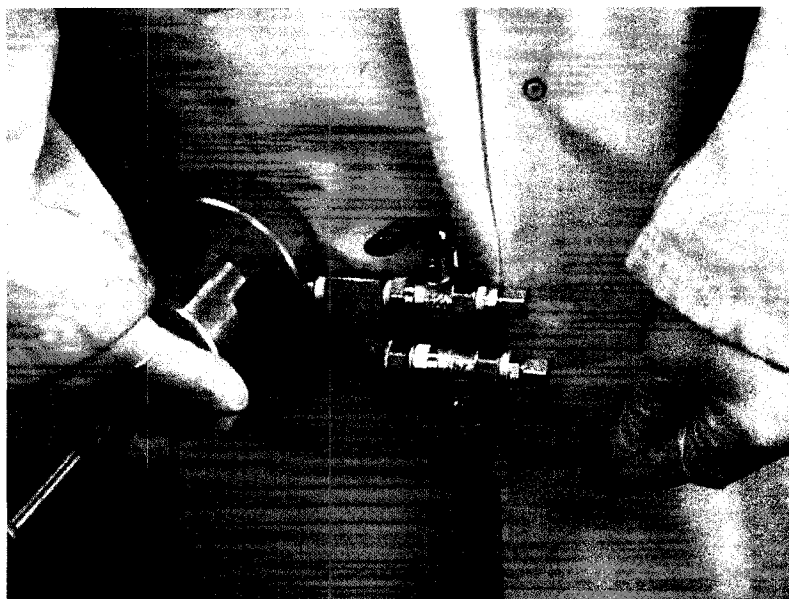


Figure 5.13 : Raccord pour le nettoyage air/acétone.

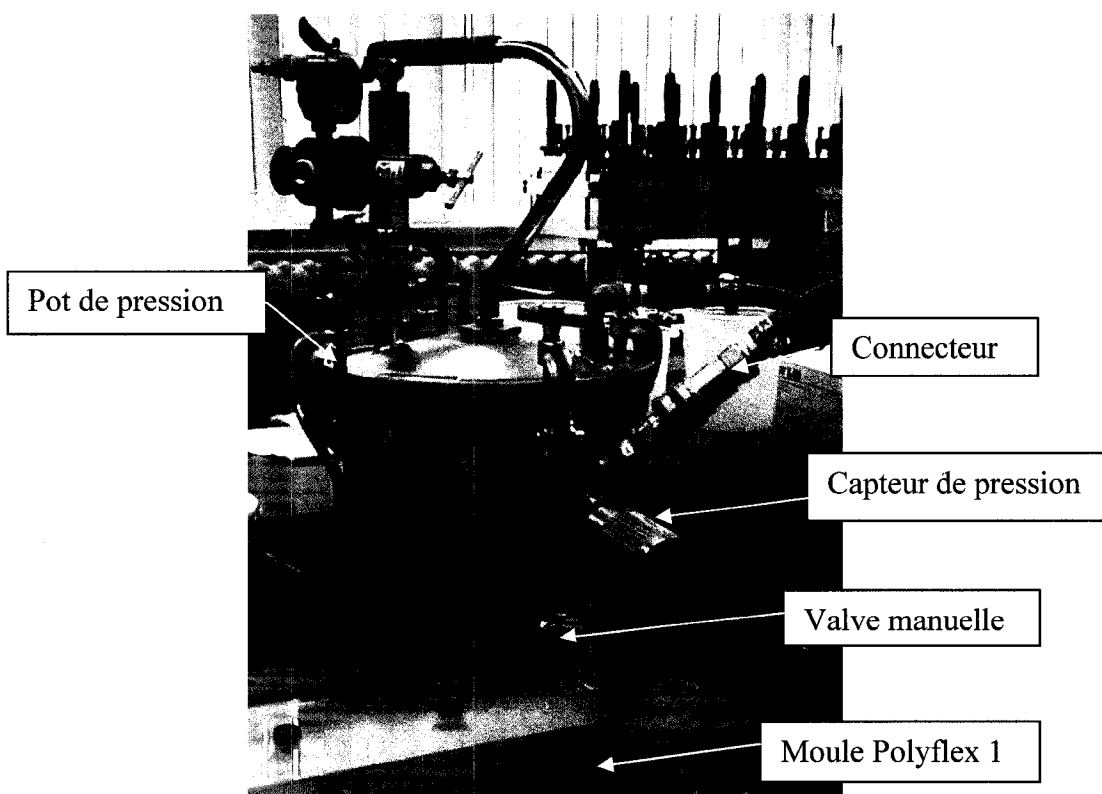


Figure 5.14 : Photo du circuit du fluide de compaction.

La Figure 5.15 montre une comparaison entre la pression statique lue par le capteur à l'entrée du moule lors d'une injection du fluide de compaction avec la JJ1 et celle obtenue avec le pot de pression pour une même pression de compaction visée de 6 bars. Les flèches 1 indiquent le début de la phase de compaction dynamique (injection du fluide de compaction) et les flèches 2 pointent le moment de la fermeture de l'évent et le début de la compaction statique (consolidation). Le système d'injection avec piston produit une montée en pression qui est limitée par l'accélération de l'appareil. L'injection avec pot de pression produit un effet inverse, i.e., que le fluide est déjà sous pression et chute à l'ouverture de la valve (cette valve est située juste après le capteur). La pression lue par le capteur atteint une valeur qui dépend de la viscosité du fluide et de la résistance à l'écoulement dans le moule. Le cadre 1 et une huile de silicone d'une viscosité d'environ 1 Pa.s ont été utilisés pour ces deux expériences.

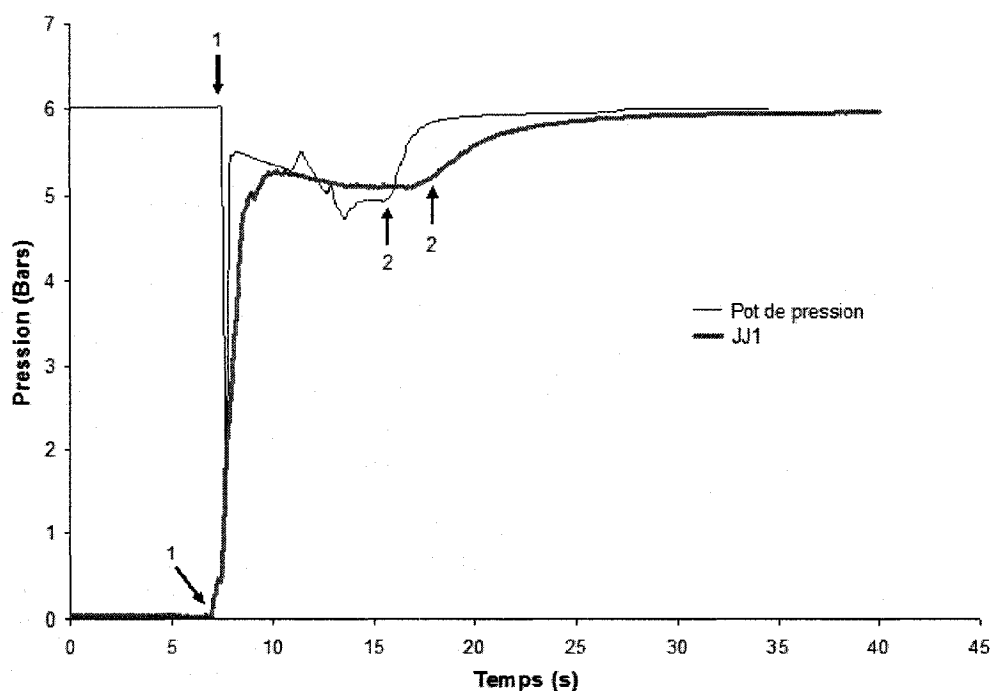


Figure 5.15 : Comparaison des courbes de compaction d'une injection du fluide de compaction avec la JJ1 et avec un pot de pression.

L'objectif du procédé développé dans ce plan d'expériences est de créer une bulle de résine au-dessus du renfort et de la pousser ensuite jusqu'à l'extrémité du moule pour accélérer l'imprégnation du renfort. L'effet produit par le pot de pression est plus avantageux dans ces circonstances puisque le fluide de compaction est injecté directement sous pression, contrairement à l'injection avec une JJ qui entraîne un certain délai dû à l'accélération du piston. La pression statique appliquée sur la bulle de résine dépend en partie de la résistance à l'écoulement du moule. Ainsi une grande cavité mène à une plus faible restriction dans le moule, ce qui implique que la vitesse d'écoulement du fluide sera plus grande, et donc la pression statique plus faible. Suivant l'affirmation précédente, l'ajout d'un milieu poreux dans la cavité de compaction est jugé préférable pour augmenter la résistance à l'écoulement. Selon la loi de Darcy, l'écoulement en milieu poreux produit un différentiel de pression qui va en diminuant vers le front d'écoulement. Cet effet est avantageux pour le procédé puisque la pression statique dans le renfort saturé est également plus grande à l'entrée du moule qu'au front d'écoulement. L'impact de l'ajout d'un milieu poreux dans la cavité de compaction est étudié plus loin dans ce document.

De manière à faciliter la création d'une bulle de résine au-dessus du renfort, une pression de vide a été appliquée dans la cavité de compaction pour aspirer la membrane vers le haut. Cette alternative présente l'avantage de diminuer la résistance à l'écoulement de la résine, ce qui facilite la création d'une bulle au-dessus du renfort. À cette fin, la pression de vide dans la cavité de compaction doit être plus importante que celle appliquée dans la cavité de la résine. Une valeur de -75 kPa a été choisie puisqu'elle correspond au maximum atteint avec le système utilisé. Cette modification au procédé est également analysée plus loin.

La mesure du temps de remplissage est réalisée par l'intermédiaire d'une caméra placée perpendiculairement au-dessus du moule. Le moule supérieur transparent permet le visionnement des deux fronts d'écoulement. Un chronomètre est placé dans le champ de

vision de la caméra. Des lignes parallèles tracées à tous les 3 cm permettent de connaître les distances parcourues. Cette méthode est la même que celle utilisée dans le plan d'expériences #2.

5.4 Paramètres du procédé

Dans ce plan d'expériences, deux paramètres ont varié dans le but d'évaluer leur influence : l'épaisseur de la cavité du moule et la viscosité du fluide de compaction. Le Tableau 5.8 donne la valeur de ces variables pour chacune des expériences du groupe 1 (PF1H06056 à PF1H06067). Noter que les expériences PF1H06057 et PF1H06062 ont été rejetées en raison d'erreurs de manipulation. L'expérience PF1H06056 constitue un essai complémentaire relatif au procédé tel que défini dans le plan d'expériences #2 où le renfort n'était pas préformé.

Tableau 5.8 : Paramètres analysés du groupe d'essais no.1 (PF1H06056 à PF1H06067)

Expérience no.	Cadre no. (épaisseur de la cavité du moule en mm)	Viscosité du fluide de compaction (Pa-s)
PF1H06056	1 (3,18)	1,067
PF1H06058	3 (7,94)	1,074
PF1H06059	2 (6,35)	1,078
PF1H06060	4 (9,53)	1,085
PF1H06061	2 (6,35)	0,281
PF1H06063	4 (9,53)	0,277
PF1H06064	3 (7,94)	0,276
PF1H06065	4 (9,53)	3,673
PF1H06066	3 (7,94)	3,673
PF1H06067	2 (6,35)	3,665

Plus précisément, on s'intéressera dans ce plan d'expériences à l'étude de l'effet du rapport de l'épaisseur du renfort sur celle de la cavité et du rapport de la viscosité du fluide de compaction sur celle de la résine. Pour le premier facteur, la procédure de mise en forme des fibres par projection de résine est difficilement ajustable pour obtenir une épaisseur de renfort précise en raison de la difficulté de contrôler la quantité et la répartition de la résine, mais aussi à cause de la variabilité de la densité locale du renfort. De plus, le retour élastique de la préforme varie d'un essai à l'autre. Pour ces raisons, une procédure de préformage constante a été visée avec un objectif raisonnable d'atteindre un taux volumique de résine dans le renfort de moins de 3%.

Pour le second facteur énuméré précédemment, l'épaisseur de la cavité est aisément modifiée en utilisant des cadres d'épaisseurs différentes. Comme il est montré à la Figure 5.8, l'épaisseur du cadre correspond exactement à l'épaisseur de la cavité. Trois cadres ont été utilisés dans ce plan d'expériences, soient les cadres 2, 3 et 4 qui ont respectivement une épaisseur de 6,35 (1/4''), 7,94 (5/16'') et 9,53 (3/8'') mm. Des rapports de la viscosité du fluide de compaction sur celle de la résine de l'ordre de 1/5, 1/1 et 5/1 étaient initialement visés. Cependant, en raison de certains impondérables comme la variation de température du laboratoire, des rapports différents ont été utilisés. Le Tableau 5.9 montre les valeurs désirées et obtenues des viscosités de la résine et des différentes huiles de silicone qui ont servi de fluide de compaction. Les rapports réels obtenus sont donc 0,16, 0,61 et 2,09.

Tableau 5.9 : Viscosités désirées et obtenues de la résine et des huiles de silicone

	Résine Polyester	Huile de silicone no.1	Huile de silicone no.2	Huile de silicone no.3
Viscosité désirée (Pa·s)	1,000	0,200	1,000	5,000
Viscosité obtenue (Pa·s)	1,757	0,278	1,074	3,670

Un deuxième groupe d'expériences (PF1H06068 à PF1H06071) a été ajouté pour étudier l'influence de certaines modifications apportées au procédé. En effet, un milieu poreux a été placé dans la chambre de compaction, et une pression de vide appliquée. L'essai PF1H06068 réalisé avec le cadre 2 fait référence au procédé du plan d'expériences #2 où le renfort n'était pas préformé. Le Tableau 5.10 résume les principales caractéristiques du groupe d'expériences 2. Dans cette série d'essais, la viscosité du fluide de compaction et l'épaisseur de la cavité sont demeurées constantes à respectivement 1,07 Pa.s et 6,35 mm (cadre 2). À remarquer que dans l'expérience PF1H06071, un grillage très mince a été placé dans la chambre de compaction pour empêcher la membrane de boucher l'évent.

Tableau 5.10 : Paramètres variables du groupe d'essais no.2 (PF1H06068 à PF1H06071)

No. de l'essai	PF1H06068	PF1H06069	PF1H06070	PF1H06071
Chambre de la résine	Renfort non préformé	Préforme	Préforme	Préforme
Chambre de compaction	Rien	Milieu poreux	Rien	Grillage
Pression de vide dans la chambre de compaction (kPa)	0	-75	0	-75

5.5 Résultats et discussions du plan d'expériences #3

Le plan d'expériences a été séparé en deux séries d'essais. Le premier groupe (PF1H06056 à PF1H06067) contient un total de 10 expériences. L'expérience PF1H06056 constitue un essai de référence réalisé comme dans le plan d'expériences #2 (chapitre 4) où le renfort n'est pas préformé et occupe toute la cavité du moule. Les neuf autres expériences (PF1H06058 à PF1H06067) suivent l'approche précédemment décrite où seules l'épaisseur de la cavité du moule et la viscosité du fluide de compaction varient. Le deuxième groupe d'expérience (PF1H06068 à PF1H06071) contient 4 essais. Tout comme l'expérience PF1H06056, l'essai PF1H06068 fut effectué avec un renfort non préformé occupant entièrement la cavité délimitée par le cadre 2. L'expérience PF1H06069 a été réalisée avec les mêmes paramètres de fabrication que l'essai PF1H06059 dans le but de vérifier la reproductibilité des résultats. Les expériences PF1H06070 et PF1H06071 ont été effectuées dans le but d'étudier l'influence de deux conditions d'opération propres au présent plan d'expériences, soit l'incorporation d'un milieu poreux et l'application d'une pression de vide dans la chambre de compaction. Le Tableau 5.11 présente le temps d'injection de la résine (t_{r1}), la pression maximale calculée lors de l'injection de la résine (P_{r_max}) et le temps de remplissage total du moule (t_p) pour toutes les expériences mentionnées précédemment. Les paramètres étudiés pour les groupes d'essais sont également montrés dans ce tableau. La pression maximale calculée est la valeur de la force maximale mesurée par la cellule de charge de la JJ1 divisée par la surface du piston (diamètre de 3 1/4"). Cette pression calculée constitue une estimation conservatrice de la pression hydrostatique de la résine. La limite en pression des conduites étant de 17,2 bars (250 psi), cette pression calculée permet de protéger le système. Cette valeur est une approximation par excès car le frottement dans le cylindre et dans les conduites provoque des pertes de charge qui diminuent la pression réelle dans le circuit.

Tableau 5.11 : Résumé des résultats pour les groupes d'expériences 1 et 2

	Expérience no.	Paramètres d'analyse	t_{r1} (s)	P_{r_max} (bars)	t_p (s)
Groupe 1	PF1H06056	Cadre 1; Viscosité huile = 1,067 Pa.s	14,2	16,4	25,5
	PF1H06058	Cadre 3; Viscosité huile = 1,074 Pa.s	7,2	12,3	41,9
	PF1H06059	Cadre 2; Viscosité huile = 1,078 Pa.s	7,3	11,6	25,1
	PF1H06060	Cadre 4; Viscosité huile = 1,085 Pa.s	7,2	12,5	39,0
	PF1H06061	Cadre 2; Viscosité huile = 0,281 Pa.s	7,2	13,0	28,0
	PF1H06063	Cadre 4; Viscosité huile = 0,277 Pa.s	7,5	12,7	35,1
	PF1H06064	Cadre 3; Viscosité huile = 0,276 Pa.s	7,5	13,0	31,7
	PF1H06065	Cadre 4; Viscosité huile = 3,673 Pa.s	7,4	12,3	47,4
	PF1H06066	Cadre 3; Viscosité huile = 3,673 Pa.s	7,3	12,7	45,3
	PF1H06067	Cadre 2; Viscosité huile = 3,665 Pa.s	7,5	13,1	33,1
Groupe 2	PF1H06068	Milieu poreux : non; Vide comp.: non	14,3	9,8	80,0
	PF1H06069	Milieu poreux : oui; Vide comp.: oui	7,4	13,2	35,2
	PF1H06070	Milieu poreux : non; Vide comp.: non	7,3	13,0	38,1
	PF1H06071	Milieu poreux : non; Vide comp.: oui	7,2	12,9	36,5

t_{r1} : temps d'injection de la résine

P_{r_max} : pression maximale calculée lors de l'injection de la résine

t_p : temps de remplissage total du moule

Le temps d'injection de la résine n'est pas le même pour tous les essais effectués. En effet, la résine a été injectée à un débit de 5 ml/s dans les expériences PF1H06056 et PF1H06068 au lieu de 10 ml/s pour les autres. Une raison explique cette différence de débits : pour valider l'essai de référence PF1H06056, des essais préliminaires effectués à 10 ml/s et à 7 ml/s ont montré que la pression maximale dépassait la limite de 16,5 bars fixée par mesure de sécurité. Comme il est montré dans le Tableau 5.11, la pression

atteinte lors de l'essai PF1H06056 est de 16,4 bars, très proche de la limite permise. Comme l'expérience PF1H06068 est également un essai de référence, des conditions d'injection identiques à l'expérience PF1H06056 ont été recherchées, la seule différence étant le cadre utilisé (cadre 2). Cependant, la pression maximale atteinte n'est que de 9,8 bars, ce qui indique que l'injection de résine aurait pu se faire à un débit plus élevé.

Pour toutes les autres expériences, les paramètres d'injection de résine que sont le débit, la viscosité de la résine et le volume de résine sont exactement les mêmes. Le Tableau 5.11 montre que le système d'injection est assez constant puisque les écart-types du temps moyen d'injection et de la pression maximale sont assez faibles, les valeurs étant respectivement de $7,3 \pm 0,1$ s et $12,7 \pm 0,4$ bars.

5.5.1 Analyse du temps de remplissage

La Figure 5.16 montre un graphique du temps de remplissage en fonction du cadre utilisé et de la viscosité du fluide de compaction pour toutes les expériences à l'exception de quatre essais complémentaires (PF1H06056, PF1H06068, PF1H06070 et PF1H06071), ces quatre expériences n'ayant pas été réalisées dans les mêmes conditions.

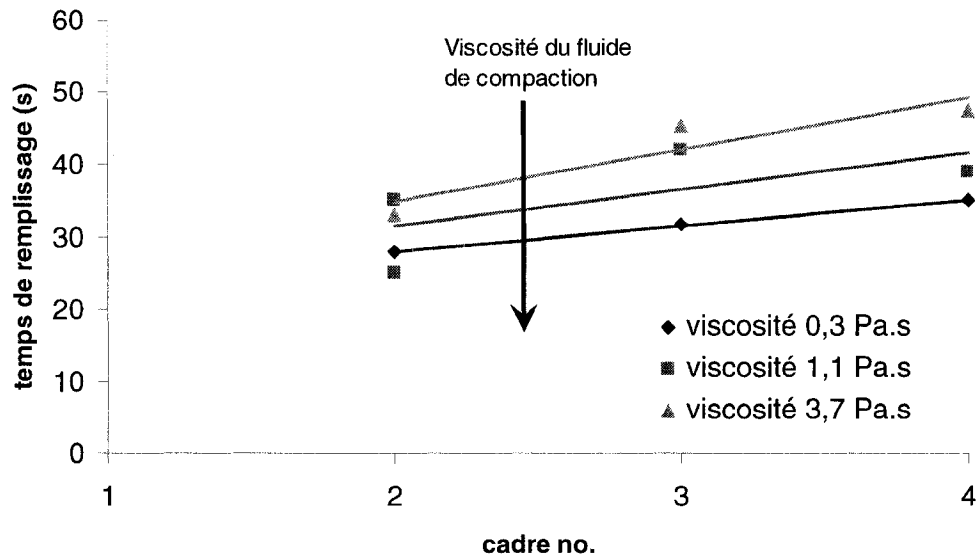


Figure 5.16 : Relation entre le temps de remplissage, le numéro du cadre du moule et la viscosité du fluide de compaction.

Une courbe de tendance linéaire a été tracée pour les résultats obtenus avec la même viscosité du fluide de compaction. Des droites représentent bien les tendances pour les viscosités de 0,278 et 3,670 Pa.s, mais la corrélation est faible pour la viscosité de 1,074 Pa.s. En fait, les deux expériences réalisées avec le cadre 2 et une viscosité de 1,074 Pa.s du fluide de compaction ne produisent pas le même temps de remplissage. Une explication sera donnée plus loin dans ce chapitre.

Deux tendances générales sont observées sur ce graphique. Premièrement, le temps de remplissage diminue avec l'épaisseur de la cavité, les expériences réalisées avec le cadre 2 produisant les meilleurs résultats pour une même viscosité du fluide de compaction. En effet, il a été observé que plus grande est la cavité du moule, plus la résine demeure près du port d'injection. Lorsque la pression est appliquée par le fluide de compaction, la résine est forcée rapidement à pénétrer dans le renfort conduisant à un écoulement dans le plan du renfort. Cependant, lorsque la cavité du moule est plus petite, la résine est distribuée au-dessus du renfort sur une plus longue distance pendant l'étape 1 (injection de la résine), réduisant ainsi l'écoulement plan à travers le renfort.

Deuxièmement, une faible viscosité du fluide de compaction semble produire de meilleurs résultats en terme de temps de remplissage du moule que les expériences à haute viscosité. Afin de vérifier cette dernière observation, l'évolution de la position du front de résine dans le temps pour les expériences réalisées avec le cadre 2 a été décomposée dans le Tableau 5.12 selon les différentes étapes du procédé. Noter que les expériences PF1H06059 et PF1H06069 ont été réalisées avec les mêmes paramètres.

Tableau 5.12 : Position du front de résine à certain moment précis pour les expériences PF1H06059, PF1H06061, PF1H06067 et PF1H06069

No. de l'essai	PF1H06059	PF1H06061	PF1H06067	PF1H06069
Viscosité du fluide de compaction (Pa·s)	1,1	0,3	3,7	1,1
Position du front de résine à la fin de l'étape 1 (mm)	120 à 7,6 s	117 à 7,4 s	129 à 6,9 s	125 à 7,2 s
Position du front de la résine lors du croisement des fluides (mm)	204 à 9,5 s	165 à 8 s	280 à 17,1 s	217 à 9,8 s
Position du front de la résine à la fin de l'étape 2 (mm)	265 à 12,9 s	222 à 9,7 s	299 à 23,1 s	242 à 12,5 s
Position finale (mm)	360 à 25,1 s	360 à 28 s	360 à 33,1 s	360 à 35,4 s

La position à la fin de l'étape 1 est assez semblable pour les quatre expériences. Cependant, le croisement des fluides ne se fait pas au même endroit, ni au même moment. On remarque que les positions du front de résine au croisement des fluides et à la fin de l'étape 2 augmentent avec la viscosité du fluide de compaction. De plus, tel que remarqué dans le chapitre précédent, l'étape de compaction statique (consolidation) est de loin la plus lente, ce qui peut nuire à la performance du procédé si le croisement ne s'effectue pas assez loin comme on peut le voir avec l'expérience PF1H06061.

Le préformage du renfort à une épaisseur plus faible que la cavité avait pour objectif initial de favoriser la création d'un écoulement de résine au-dessus du renfort. Grâce à la caméra, il a été possible de visualiser le processus d'imprégnation du renfort. Ce type de comportement a été clairement observé lors des trois injections avec le fluide de compaction d'une viscosité de 3,7 Pa.s.

5.5.2 Présentation d'une courbe de compaction typique d'une injection Polyflex

Les résultats précédents montrent l'importance du choix de l'épaisseur de la cavité du moule et de la viscosité du fluide de compaction sur la performance du procédé Polyflex. Ceci est particulièrement vrai dans ce plan d'expériences puisque l'injection de la résine a été effectuée dans les mêmes conditions de débit et de volume injecté. Afin de mieux comprendre l'impact de ces deux paramètres, l'évolution de la pression durant l'étape de l'injection du fluide de compaction sera maintenant sondée. La Figure 5.17 montre un profil typique de l'évolution de la pression statique du fluide de compaction mesurée par un capteur placé à l'entrée du moule. Lorsque l'injection du fluide de compaction débute (flèche 1), la pression chute subitement pour ensuite se stabiliser grossièrement à une certaine valeur (flèche 2). La chute de pression pointée par la flèche 3 est reliée au déplacement du milieu poreux dans la cavité de compaction. En effet, grâce à la caméra placée directement au-dessus du moule, il a été remarqué que le mouvement du milieu poreux correspondait exactement à cette chute de pression. Ce phénomène ne s'est pas produit à toutes les expériences. Finalement, lorsque l'évent de la cavité de compaction est fermé, l'étape d'injection du fluide de compaction se termine (flèche 4) et la pression remonte jusqu'à sa valeur initiale (6 bars dans le présent plan d'expériences).

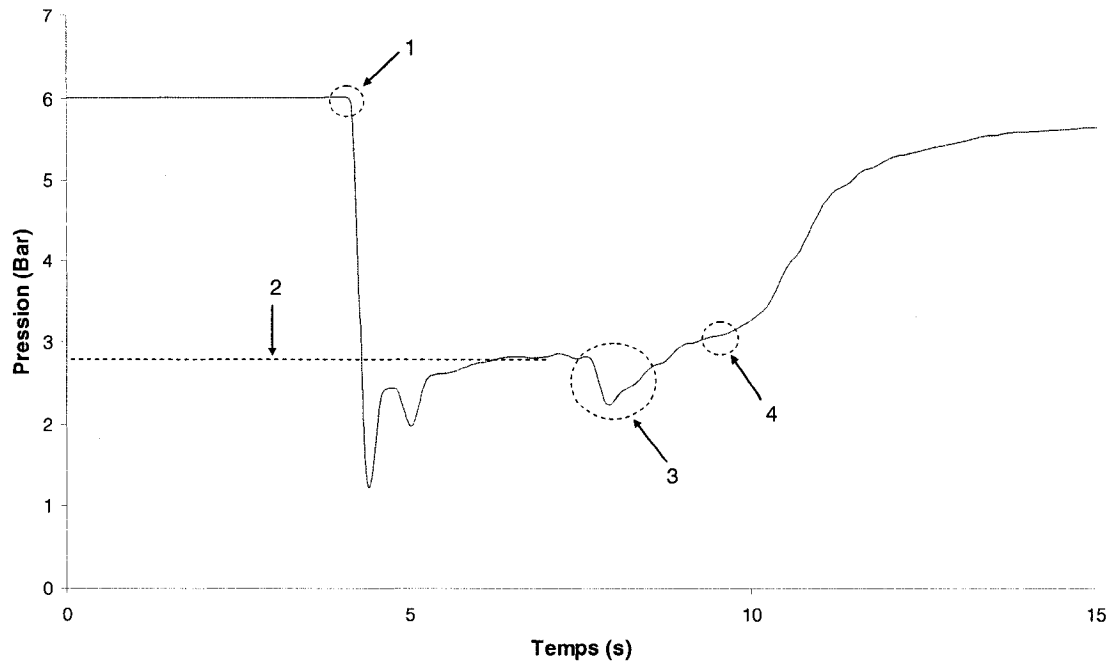


Figure 5.17 : Profil typique de l'évolution de la pression de compaction (PF1H06059).

5.5.3 Analyse des courbes de pression et des pertes de charge

La Figure 5.18 présente quelques courbes de pression du fluide de compaction obtenues dans le plan d'expériences #3. Seules les expériences PF1H06058 à PF1H06067 ont été sélectionnées, puisqu'elles ont été effectuées dans les mêmes conditions à l'exception des paramètres de viscosité du fluide de compaction et d'épaisseur du cadre. On constate que le choix de la viscosité de l'huile influence beaucoup le profil de pression dans le moule. Plus la viscosité est faible, plus l'étape d'injection du fluide de compaction est rapide et plus élevée est la pression stabilisée. La même observation peut être tirée de ce graphique lorsque l'épaisseur de la cavité diminue pour une même viscosité du fluide de compaction.

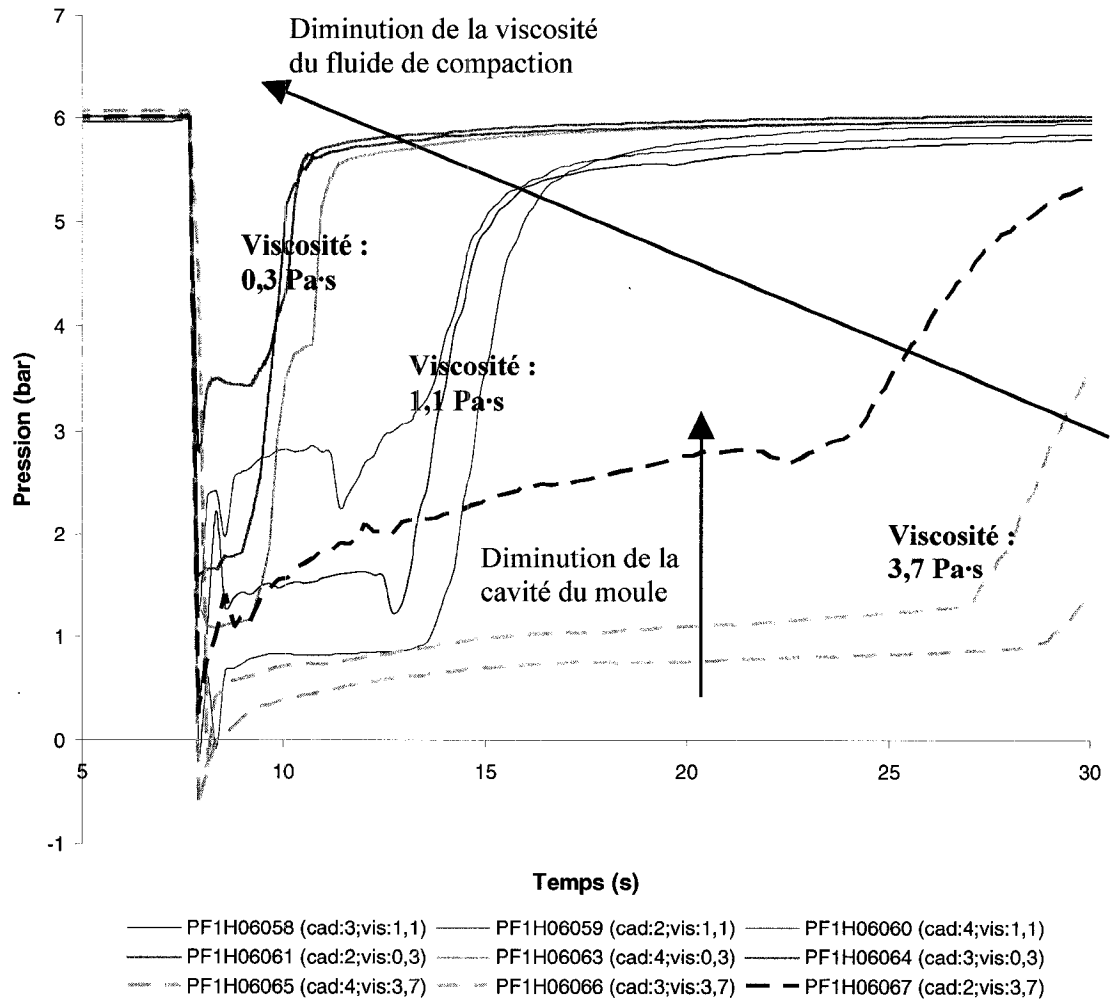


Figure 5.18 : Évolution de la pression de compaction dans le temps.

L'écoulement dans les conduites est régi par l'équation de Bernouilli [22, 23] dont la forme générale s'écrit :

$$\int_1^2 \frac{\partial V}{\partial t} ds + \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) = 0 \quad (5.2)$$

où V est la vitesse moyenne d'écoulement, p est la pression statique dans le fluide, ρ est la densité du fluide, z l'élévation, s la longueur et g l'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m/s}^2$). Pour un fluide incompressible en écoulement permanent sans frottement, l'équation de Bernouilli prend la forme suivante :

$$\frac{1}{\rho}(p_2 - p_1) + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) = 0 \quad (5.3)$$

ou encore

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho g z = \text{constante} \quad (5.4)$$

La pression p réfère souvent à la pression statique, tandis que le terme $1/2\rho V^2$ est appelé pression dynamique. Le terme restant, $\rho g z$, appelé pression hydrostatique, représente le changement dans la pression statique avec l'élévation du fluide. La somme des trois termes réfère à la pression totale.

Lorsqu'un fluide circule dans une conduite, un raccord ou toute autre composante rattachée, il subit des pertes de charge. Ces pertes de charge sont imputables à la consommation d'énergie nécessaire au maintien du débit. Ces pertes de charge se divisent en deux catégories : les pertes réparties et les pertes localisées. Les pertes dans les conduites sont dites réparties parce que la baisse de pression a lieu progressivement le long de la conduite. Les pertes additionnelles provenant des autres composantes du système, comme les raccords, les coudes et les valves, sont appelées pertes localisées. Si l'on ajoute ces deux types de perte à l'équation (5.3), on obtient une balance d'énergie entre deux points d'un système :

$$\left(p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g z_1 \right) - \left(p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g z_2 \right) = \sum P_{CR} + \sum P_{CL} = P_c \quad (5.5)$$

où $\sum P_{CR}$, $\sum P_{CL}$ et P_c réfèrent respectivement à la somme des pertes de charge réparties, à la somme des pertes de charge localisées et aux pertes de charge totales. D'une façon générale, la pression initiale ajustée au pot de pression (P_i) se transforme, à l'ouverture de la valve, en une pression statique moyenne (P_s), une pression dynamique (P_d), une pression hydrostatique (P_h) et en pertes de charge (P_c) comme le montre la formule suivante :

$$P_i = P_s + P_d + P_h + P_c \quad (5.6)$$

La pression hydrostatique (P_h) est minime en comparaison avec les autres termes de pression, puisqu'il n'y a pas de variation d'élévation significative (moins de 0,5 m équivaut à $P_h = 0,05$ bar). La pression dynamique (P_d) est également négligeable tel que démontré à l'Annexe H.

Le Tableau 5.13 présente un résumé des résultats pour les expériences PF1H06058 à PF1H06067. La pression initiale (P_i) se situe autour de 6 bars; c'est la pression avant le début de l'injection du fluide de compaction. La pression statique (P_s) a été déterminée par la moyenne des mesures durant l'étape de l'injection du fluide de compaction. La valeur ainsi calculée représente la pression de stabilisation indiquée par la flèche 2 de la Figure 5.17. La différence entre la pression initiale (P_i) et la pression statique (P_s) équivaut aux pertes de charge (P_c) selon l'équation (5.6).

Tableau 5.13 : Pertes de pression dans le système d'injection JJ2 pour les expériences PF1H060056 à PF1H06067

No de l'essai	Cadre	Viscosité du fluide (Pa.s)	P_i (bar)	P_s (bar)	P_c (bar)	Temps d'injection du fluide de compaction (s)	Déplacement du milieu poreux
PF1H06058	3	1,074	5,97	1,50	4,44	5,5	Fort
PF1H06059	2	1,078	6,01	2,75	3,26	5,5	Fort
PF1H06060	4	1,085	6,01	0,82	5,19	5,7	Nul
PF1H06061	2	0,281	6,01	3,45	2,56	1,5	Nul
PF1H06063	4	0,277	6,01	1,12	4,89	1,5	Nul
PF1H06064	3	0,276	6,01	1,74	4,27	1,3	Nul
PF1H06065	4	3,673	6,06	0,70	5,36	21,2	Nul
PF1H06066	3	3,673	5,99	1,00	4,99	19,5	Nul
PF1H06067	2	3,665	6,01	2,40	3,61	16,6	Faible

Le colonne du temps d'injection du fluide de compaction est un bon indicateur de la vitesse d'écoulement dans la chambre de compaction. Une diminution de la viscosité entraîne un remplissage plus rapide de la chambre de compaction. La dernière colonne indique si un déplacement important ou non du milieu poreux dans la chambre de compaction a été observé lors de l'injection du fluide avec la caméra placée au-dessus du moule. Dans trois expériences, le milieu poreux dans la chambre de compaction se déplace ; ceci correspond à la chute de pression observée à la Figure 5.18. La Figure 5.19 confirme les deux observations mentionnées plus haut : une diminution de l'épaisseur de la cavité et une diminution de la viscosité de l'huile de compaction augmentent la pression statique.

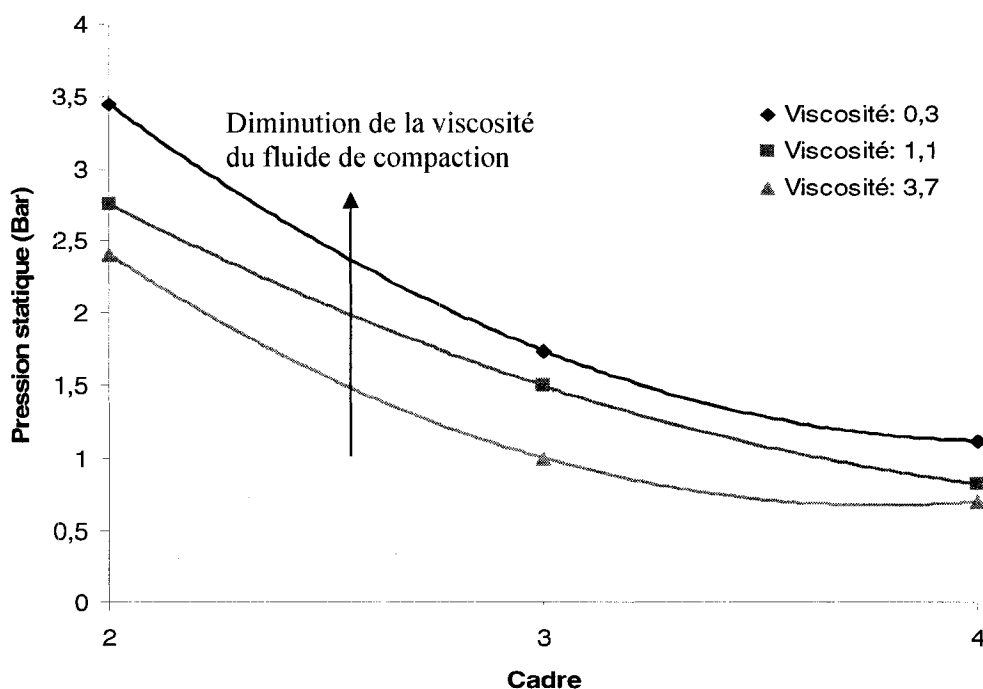


Figure 5.19 : Pression statique pendant l'injection du fluide de compaction en fonction de la viscosité du fluide et du cadre utilisé.

Une haute pression statique pendant l'injection du fluide de compaction est un critère particulièrement important qui gouverne la performance du procédé. C'est pourquoi le phénomène de pertes de charge revêt une importance particulière. Les pertes de charge associées au connecteur (voir Figure 5.14) ont été évaluées à l'Annexe H dans un plan

d'expériences spécial. Une conclusion tirée de cette analyse est qu'un connecteur moins restrictif aurait permis d'atteindre des pressions statiques beaucoup plus grandes que celles présentées à la Figure 5.19.

L'incorporation d'un milieu poreux et l'application du vide dans la chambre de compaction visaient justement à augmenter cette pression. La Figure 5.20 expose les courbes de compaction associées aux expériences PF1H06069 à PF1H06071. On remarque que l'application du vide augmente légèrement la pression pendant l'injection du fluide de compaction (PF1H06071 par rapport à PF1H06070). Ceci se traduit par une diminution du temps de remplissage (Tableau 5.11). Cet effet est dû à l'aspiration de la membrane flexible sur la paroi supérieure de la cavité qui crée une résistance à l'écoulement. En comparant les expériences PF1H06069 et PF1H06071, l'incorporation d'un milieu poreux dans la chambre de compaction produit un effet bénéfique sur la pression statique, mais ralentit l'écoulement du fluide de compaction.

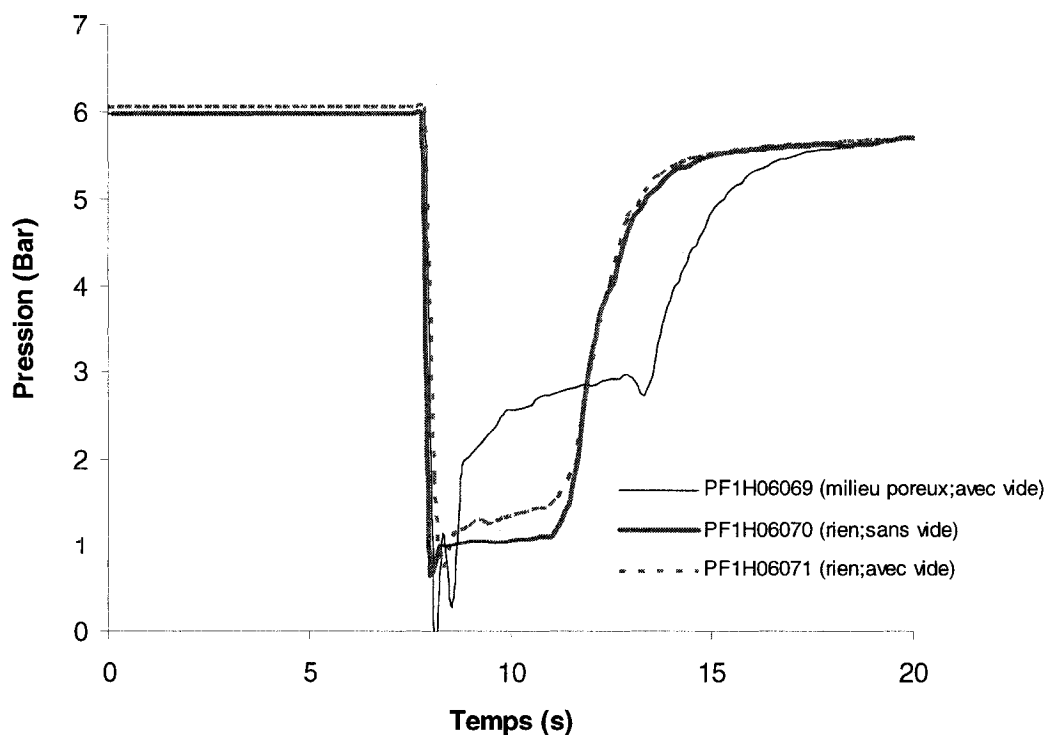


Figure 5.20 : Courbes de pression du fluide de compaction des essais PF1H06069 à PF1H06071.

L'importance de créer une forte pression statique pendant l'injection du fluide de compaction est également applicable au cas des expériences PF1H06056 et PF1H06068, où le renfort n'est pas préformé et occupe complètement la cavité du moule. Le seul paramètre différent entre ces deux essais est l'épaisseur de la cavité du moule. La Figure 5.21 montre les courbes de compaction tirées de ces deux expériences. Avec le cadre 1, les pertes de charge sont très faibles en comparaison avec l'utilisation du cadre 2. Ceci se répercute sur la performance du procédé tel qu'illustré dans le Tableau 5.11. Le temps d'injection du fluide de compaction est plus long pour l'essai PF1H06056, mais la pression de stabilisation est beaucoup plus élevée.

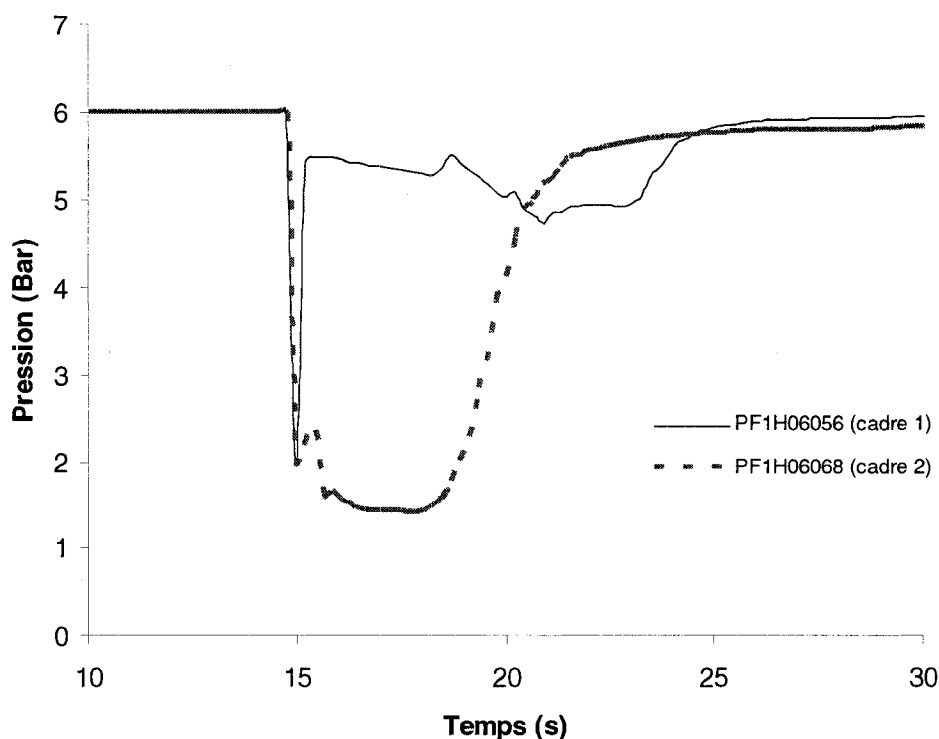


Figure 5.21 : Courbes de pression du fluide de compaction des essais PF1H06056 et PF1H06068.

La Figure 5.22 montre les courbes de pression du fluide de compaction des expériences PF1H06059 et PF1H06069 qui ont été effectuées avec exactement les mêmes paramètres. On observe que les courbes de pression ne sont pas totalement identiques pendant la phase d'injection du fluide de compaction. De plus, les chutes de pression

marquées par le déplacement du milieu poreux ne sont pas aussi importantes dans les deux cas. En effet, les vidéos de ces deux expériences ont montré un déplacement beaucoup plus marqué du milieu poreux dans l'essai PF1H06059. Il semblerait que le comportement du milieu poreux influence considérablement la performance du procédé (voir les Tableaux 5.11 et 5.13), ce qui n'est pas idéal pour un procédé répétitif. Une meilleure façon de maintenir le tissu en place devra être appliquée pour obtenir une meilleure répétitivité des expériences.

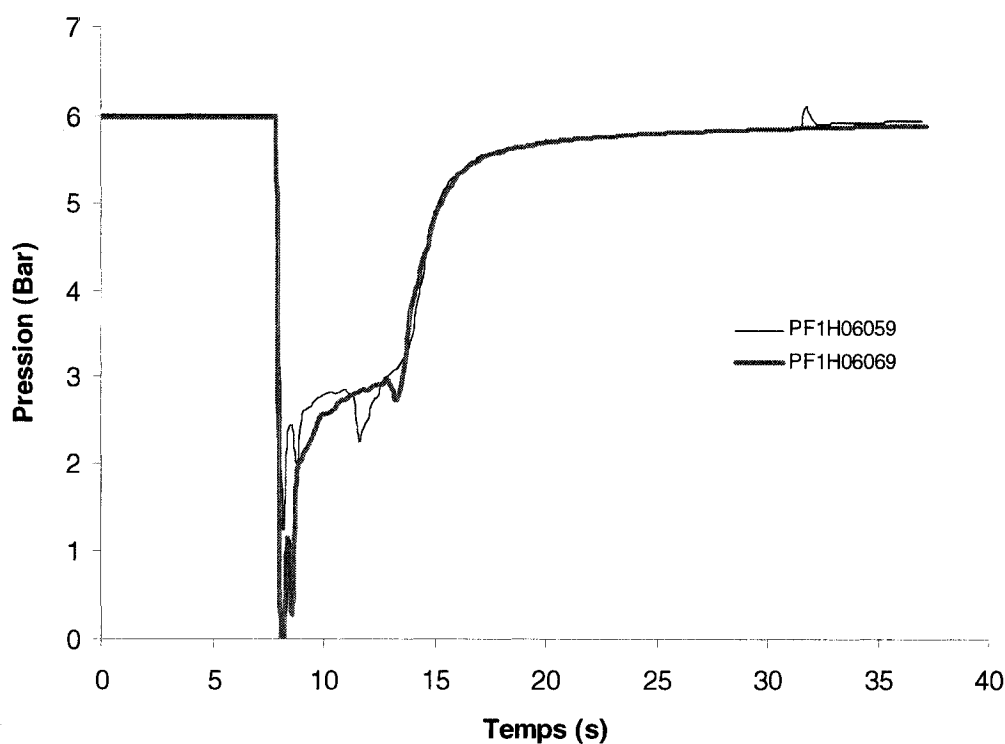


Figure 5.22 : Courbes de pression du fluide de compaction des expériences PF1H06059 et PF1H06069 effectués avec les mêmes paramètres de fabrication.

5.5.4 Analyse du profil de la vitesse d'écoulement de la résine

La position du front de la résine peut être évaluée durant toute la période d'imprégnation en utilisant les lignes parallèles tracées sur le contre moule transparent. À partir de ces points, la vitesse instantanée peut être déterminée par l'équation (4.2). La Figure 4.14 représente un profil d'écoulement typique du procédé Polyflex lorsque la résine est injectée à pression constante dans un moule où un renfort remplit en totalité la cavité de 3,175 mm (cadre 1). Cette configuration a été reprise dans le présent plan d'expériences avec l'essai de référence (PF1H06056). Cependant, dans cette expérience, la résine a été injectée à débit constant contrairement au plan d'expériences #2 où la résine était injectée à pression constante. La Figure 5.23 montre le profil de la vitesse d'écoulement du front de résine. La flèche 1 indique la fin de l'étape d'injection de la résine et marque le début de l'injection du fluide de compaction. La flèche 2 indique la fin de l'injection du fluide de compaction et le début de l'étape de consolidation. Le moment du croisement des fluides est également indiqué.

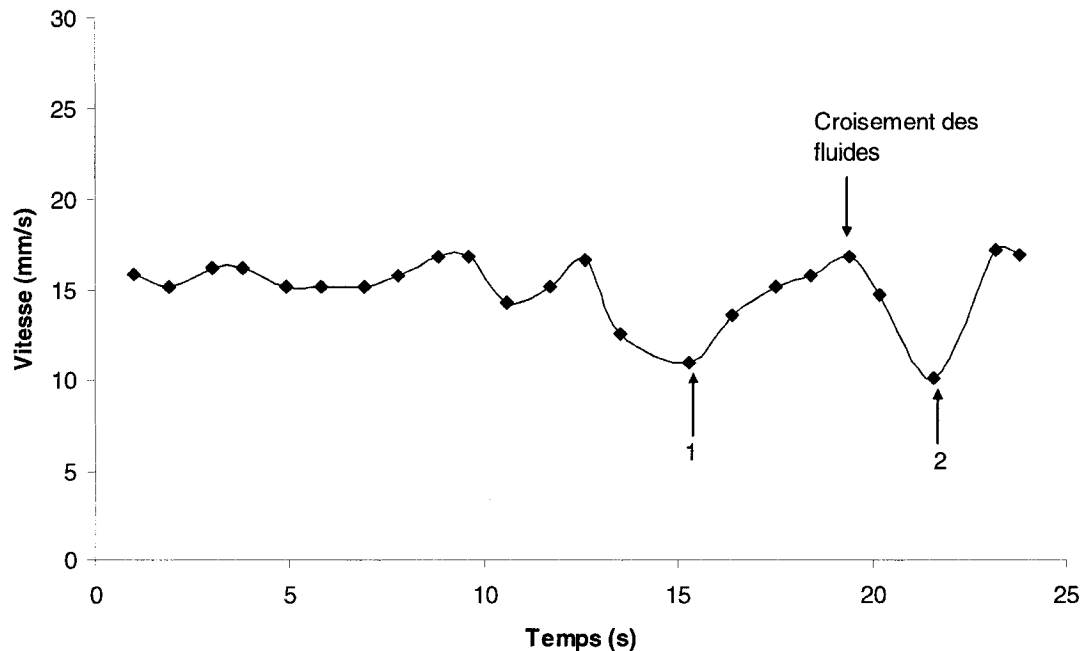


Figure 5.23 : Profil de la vitesse d'écoulement de la résine pour l'expérience PF1H06056.

Durant l'étape d'injection de la résine, la vitesse d'écoulement est sensiblement constante à environ 15,5 mm/s, un comportement attendu car l'injection est réalisée à débit constant. Lors de l'étape de compaction dynamique (injection du fluide de compaction), la vitesse atteint un pic de 16,9 mm/s au moment où l'huile de silicone croise le front de résine pour ensuite redescendre à 10 mm/s. Finalement, dès que le fluide de compaction a rempli sa cavité, l'évent est fermé et la vitesse de la résine atteint un nouveau pic.

La Figure 5.24 présente le profil de la vitesse d'écoulement du front de résine pour l'expérience PF1H06059 qui constitue l'essai ayant produit les meilleurs résultats (voir Tableau 5.11). Tout comme le graphique de la Figure 5.23, la vitesse a été calculée à partir de la position du front de résine dans le temps visualisée avec la caméra positionnée au-dessus du moule. Il est important de noter que pour ce type d'injection où la préforme ne remplit pas en totalité la cavité, deux modes d'écoulement longitudinaux se produisent. En effet, la résine se propage plus rapidement au-dessus de la préforme en raison de la différence de perméabilité entre les deux milieux. Ces deux modes d'écoulement évoluent en parallèle jusqu'à ce que le front du fluide de compaction dépasse celui de la résine. À partir de ce moment, seul l'écoulement de Darcy persiste, la bulle de résine initialement créée au-dessus du renfort s'étant introduite transversalement dans le renfort.

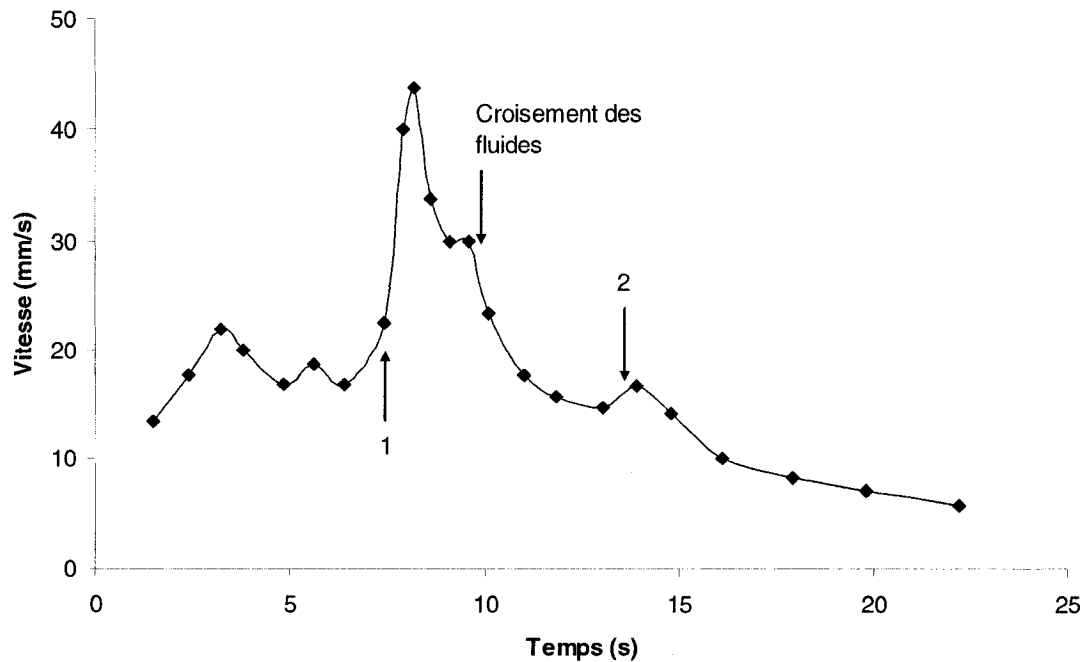


Figure 5.24 : Profil de la vitesse d'écoulement de la résine pour l'expérience PF1H06059.

Le profil de vitesse de la résine de l'expérience PF1H06059 est beaucoup plus irrégulier que celui de la Figure 5.23. La vitesse moyenne durant l'injection de la résine est 18,5 mm/s, une valeur supérieure au graphique précédent en raison de la non homogénéité du front de résine. Lors de l'injection du fluide de compaction, la vitesse atteint un pic très élevé (43,8 mm/s) puisque l'imprégnation du renfort est facilitée par l'espace au-dessus de la préforme. Lorsque le front du fluide de compaction a dépassé celui de la résine, la vitesse diminue progressivement avec un léger saut lors de la fermeture de l'évent.

Le Tableau 5.14 montre les particularités de l'évolution de l'écoulement de la résine dans le temps pour ces deux expériences. On constate qu'à la fin de l'étape 1, le front de résine est environ deux fois plus loin pour l'essai PF1H06056, ce qui est prévisible car la cavité est deux fois plus mince. Cependant, un débit d'injection plus faible a été nécessaire pour l'injection de la résine comme il a été expliqué précédemment. On remarque également que l'écoulement de la résine au-dessus de la préforme améliore la performance jusqu'à la fin de l'injection du fluide de compaction. Cependant, comme il

reste une distance importante à parcourir pendant l'étape de consolidation, tout le gain obtenu auparavant est perdu.

Tableau 5.14 : Position du front de résine à certain moment précis pour les expériences PF1H06056 et PF1H06059

No. essai	PF1H06056	PF1H06059
Position du front de résine à la fin de l'étape 1 (mm)	225 à 15,3 s	120 à 7,6 s
Position du front de la résine lors du croisement des fluides (mm)	287 à 19,5 s	204 à 9,5 s
Position du front de la résine à la fin de l'étape 2 (mm)	340 à 23,6 s	265 à 12,9 s
Position finale (mm)	360 à 25,5 s	360 à 25,1 s

5.5.5 Discussion

Dans ce plan d'expériences, deux modes d'imprégnation du renfort ont été étudiés. Tout d'abord, lorsque les fibres occupent toute l'espace de la cavité du moule avant l'injection, l'imprégnation de la résine s'effectue uniquement de façon longitudinale à travers les fibres et l'écoulement est de type Darcy. D'un autre côté, lorsque le renfort possède une épaisseur inférieure à la cavité du moule, deux types d'écoulement longitudinaux se développent parallèlement : un écoulement de Darcy à travers les fibres et un écoulement newtonien au-dessus du renfort. Comme la perméabilité de l'air est très supérieure à celle des renforts, une vitesse d'écoulement plus grande de la résine au-dessus du renfort a été observée qui se traduit par un troisième mode d'imprégnation transversal. La question suivante se pose alors : «quelle approche choisir pour le procédé?» À partir des résultats précédents, la première technique présente les avantages suivants :

- 1) Le procédé est plus simple ; ceci facilite la prévision de son comportement.
- 2) La vitesse d'écoulement de la résine est plus constante pour un temps de remplissage semblable.
- 3) Il présente un seul mode d'écoulement, ce qui risque moins d'emprisonner des bulles d'air lors de l'imprégnation en comparaison à la deuxième méthode où l'écoulement est triphasé.
- 4) Il engendre moins de contraintes de fabrication puisque le préformage n'est pas nécessaire.

Tous ces avantages sont admissibles dans le cadre du présent plan d'expériences où un mat était employé comme renfort. Mais ces avantages sont-ils toujours présents lorsque le renfort possède un taux de fibres élevé comme un tissu bidirectionnel par exemple? Les tissus bidirectionnels possèdent la particularité d'être moins compressible et moins perméable que les mats. Dans ces conditions, une injection longitudinale à travers le renfort n'est pas idéale. L'utilisation d'une cavité de dimension supérieure à l'épaisseur du tissu risque d'être une solution intéressante. En effet, comme la perméabilité plane des tissus est faible, le phénomène de vague serait accentué, menant davantage à une imprégnation transverse que longitudinale, diminuant ainsi le temps de remplissage. De plus, puisque la résine n'est pas directement injectée dans les fibres, un débit d'injection plus élevé peut être obtenu tel qu'observé dans le présent plan d'expériences (voir Tableau 5.11). Ce principe a déjà été validé par Larsen et Cairns [28] dans un procédé similaire à Polyflex, mais cette question devra tout de même être approfondie dans le cadre d'un plan d'expériences ultérieur.

5.6 Conclusion

Une nouvelle méthode d'injection flexible a été étudiée d'une manière plus approfondie dans ce nouveau plan d'expériences. Contrairement à la technique présentée au chapitre 4, le renfort n'occupe pas totalement la cavité du moule. Ceci libère un espace propice à la propagation de la résine lors de l'injection. Deux paramètres principaux du procédé

ont fait l'objet de cette analyse : la viscosité du fluide de compaction et l'épaisseur de la cavité du moule. Ce nouveau plan d'expériences inclut l'utilisation d'un milieu poreux et l'application du vide dans la chambre de compaction. Des essais complémentaires ont été effectués pour évaluer l'impact de ces facteurs sur la performance du procédé.

Pour conserver une base de comparaison avec la méthode d'injection à travers le renfort évaluée au chapitre 4, les mêmes matériaux et le même moule ont été utilisés. Une technique de préformage consistant à pulvériser de la résine polyester sur le mat OCF8610 a été employée pour mettre en forme le renfort avec une épaisseur uniforme. L'injection de la matrice polyester a été effectuée à débit constant par l'entremise de deux machines d'essai mécanique contrôlées par le logiciel Poly-J, sur lesquelles deux pistons contenant séparément la résine non-activée et le catalyseur ont été montés. Les deux composantes passaient par un mélangeur statique avant d'être injectées à l'intérieur du moule. Le fluide de compaction a été injecté à pression constante avec un pot de pression.

Le temps de remplissage du moule a été analysé pour chacune des expériences réalisées. Certaines tendances ont été tirées de ces résultats. Premièrement, la plus mince des trois épaisseurs de cavité a produit les meilleurs temps de remplissage. L'explication de ce comportement provient d'une distribution plus étendue de la résine lors de l'étape d'injection qui diminue l'écoulement plan à travers le renfort. L'impact de la viscosité du fluide de compaction est plus subtile car elle engendre des phénomènes différents. Pour une faible viscosité, le processus d'imprégnation est davantage marqué par un écoulement plan à travers le renfort et l'étape de compaction statique (consolidation) domine l'imprégnation du renfort. Cependant, dans le cas d'une viscosité élevée, trois types d'écoulement sont observés et l'étape de compaction dynamique (injection du fluide de compaction) domine.

L'analyse de ces deux variables a été poussée plus loin avec les courbes de compaction obtenues grâce au capteur de pression placé à l'entrée du moule. Les résultats montrent que la pression statique lors de l'injection du fluide de compaction est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la cavité et à la viscosité du fluide de compaction. Ces deux paramètres influencent donc grandement les pertes de charge. L'étude du circuit d'injection du fluide de compaction a permis de découvrir que le connecteur était responsable de la moitié de ces pertes. Celui-ci devra être changé afin d'améliorer la performance du procédé.

L'application du vide et l'incorporation d'un milieu poreux dans la chambre de compaction contribuent à augmenter la pression statique dans le fluide de compaction. Cependant, le milieu poreux utilisé n'est pas idéal pour un procédé répétitif car son déplacement est imprévisible d'un essai à l'autre. L'application du vide dans la chambre de compaction lors de l'injection de la résine est une solution intéressante puisqu'elle détend la membrane et facilite la distribution de la résine au-dessus du renfort.

Finalement, l'analyse comparative des deux méthodes d'injection flexible a permis de conclure que l'injection de la résine à débit constant à travers le renfort est la meilleure technique lorsque le renfort utilisé est hautement compressible et perméable comme un mat. Une cavité du moule d'environ deux fois l'épaisseur finale de la pièce donne alors les meilleurs résultats. Cependant, lorsque le renfort possède un taux volumique de fibres élevé comme dans le cas des tissus bidirectionnels, une cavité de dimension supérieure à l'épaisseur de la préforme semble être la meilleure technique. Cette hypothèse devra être approfondie dans un plan d'expériences ultérieur.

CONCLUSION

Dans ce mémoire de maîtrise, un nouveau procédé d'injection flexible en moule fermé pour la fabrication rapide de composites a été étudié sur le plan expérimental. Ce procédé comprend une membrane flexible qui sépare la cavité du moule en deux chambres indépendantes. La technique consiste à injecter la résine à faible pression dans la chambre inférieure contenant le renfort fibreux. Ensuite, un fluide de compaction est injecté sous pression dans la chambre supérieure pour poursuivre l'imprégnation des fibres sèches. Lorsque ce fluide a rempli la chambre de compaction, la pression est maintenue pour compléter la consolidation du renfort saturé par la résine. Le premier objectif de ce travail consiste à optimiser les paramètres de fabrication pour minimiser le temps de remplissage du moule et augmenter la régularité de l'épaisseur des pièces. Le second objectif porte sur l'amélioration et la validation expérimentale des systèmes d'injection de la résine et du fluide de compaction.

Trois plans d'expériences ont été réalisés pour analyser l'influence des paramètres de fabrication sur le temps de remplissage du moule et la variation d'épaisseur des plaques fabriquées avec le moule Polyflex 1. Le premier plan d'expériences a étudié la variabilité de l'épaisseur dans le sens de la longueur des pièces. Il a permis de détecter les anomalies potentiellement causées par la pression de compaction et la viscosité du fluide de compaction. En effet, les écoulements combinés de la résine à travers les fibres et du fluide de compaction ajoutent une complexité au contrôle de l'épaisseur finale de la pièce. Un second plan d'expériences a été mis en place dans le but d'analyser la performance du procédé pour différents profils de compaction (pression constante, débit constant et cyclage de pression). Les variations d'épaisseur ont à nouveau été mesurées dans cette série d'essais. Enfin, le troisième et dernier plan d'expériences a permis d'évaluer un nouveau processus d'imprégnation des fibres provoqué par une épaisseur du renfort plus faible que la cavité du moule. La viscosité du fluide de compaction,

l'application du vide et l'incorporation d'un milieu poreux dans la chambre de compaction ont également fait l'objet d'analyses particulières.

Toutes ces expériences ont permis de tirer quelques conclusions relatives aux deux objectifs principaux de ce projet, soit la minimisation du temps de remplissage du moule et l'amélioration de la qualité des pièces produites. Le Tableau 6.1 énumère la liste des paramètres de fabrication étudiés dans ces trois plans d'expérience et leur degré d'impact sur les objectifs précédents. Les paramètres ont été groupés selon les deux modes d'écoulement étudiés pour la résine, soit lorsque le renfort occupe initialement toute la cavité du moule (mode 1) ou seulement en partie (mode 2).

Tableau 6.1 : Impact des paramètres de fabrication sur les deux objectifs principaux de ce projet

	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.
	L'application du vide dans la chambre de compaction vs pression atmosphérique	+	N.D.
	L'incorporation d'un milieu poreux	+	-

Une première constatation importante sur le procédé d'injection flexible concerne la ligne de croisement des fronts de résine et du fluide de compaction, qui indique la position à partir de laquelle l'épaisseur des plaques fabriquées diminue. Une viscosité plus élevée du fluide de compaction repousse cet emplacement, contribuant ainsi à diminuer les variations d'épaisseur des pièces. Cependant, les pertes de charge engendrées par une grande viscosité diminuent la pression effective du fluide de compaction sur la résine, réduisant du même coup la performance du procédé en terme de temps de remplissage.

Une autre conclusion intéressante porte sur le cyclage de la pression de compaction pendant la compaction dynamique (injection du fluide de compaction). Le cyclage de pression de compaction induit une vitesse d'imprégnation plus élevée qu'une pression constante équivalente. En outre, une augmentation de la pression moyenne et de l'amplitude du cyclage réduisent encore davantage le temps de remplissage. En revanche, le cyclage de la pression pendant l'étape de la compaction statique (consolidation) n'a pas amélioré la performance du procédé. En ce qui a trait au second mode d'écoulement, la plus mince des cavités analysées (6,35 mm) a produit de façon évidente les meilleurs résultats en terme de temps de remplissage du moule. L'application du vide et l'incorporation d'un milieu poreux dans la chambre de compaction ont contribué à augmenter la pression statique du fluide de compaction lors de son injection, un paramètre important pour accélérer l'imprégnation du renfort. Cependant, le déplacement potentiel du milieu poreux a créé des irrégularités dans la mise en œuvre, d'où un effet final négatif sur la répartition de la résine dans la pièce.

Le troisième plan d'expériences a permis de constater que le second mode d'écoulement n'était pas plus avantageux que le premier lorsque le renfort employé est un mat à fibres aléatoires. Finalement, un cadre d'une épaisseur double de celle de la pièce finale constitue la meilleure approche. En particulier, il n'est pas nécessaire de préformer le

renfort à une épaisseur inférieure à celle de la cavité. Cette affirmation est valable pour les expériences réalisées, i.e., pour l'injection d'une résine à faible pression à travers un mat à fibres aléatoires possédant une perméabilité plane importante. Le taux volumique de fibres final des pièces fabriquées est d'environ 20%.

Suite à la réalisation de ce projet, plusieurs questions concernant le procédé Polyflex demeurent sans réponse. Quel est le meilleur mode d'écoulement pour l'injection à travers un renfort à haut taux de fibres et à faible perméabilité plane comme un tissu bidirectionnel? Quel est l'impact d'un cyclage à haute fréquence sur la performance en terme de temps de remplissage du moule, de variation d'épaisseur et de taux de vide? Ces questions trouveront une réponse dans les travaux futurs, mais il est d'ores et déjà établi que le procédé Polyflex possède un potentiel considérable pour la fabrication rapide de composites par injection. Ce projet a permis de montrer que le procédé Polyflex pouvait atteindre des temps de remplissage du moule jusqu'à 8 fois inférieurs au procédé RTM conventionnel pour la même pression d'injection. Des travaux en cours portent sur la modélisation, le contrôle de l'injection et l'optimisation des paramètres de fabrication pour améliorer ce résultat.

RECOMMANDATIONS ET TRAVAUX FUTURS

Recommandations

- Le type de connecteur d'accouplement ISO-B («*quick connect*») ne doit plus être employé dans le circuit d'injection du fluide de compaction. Les pertes de charge engendrées par les restrictions de section de ce type de connecteur sont trop importantes et constituent un handicap pendant l'étape de compaction dynamique du procédé Polyflex.
- La conception des prochains moules Polyflex devra inclure une méthode pour maintenir le renfort en place dans le moule différente de celle conçue pour le moule Polyflex 1, qui consistait à pincer le renfort avec une bordure en "L".

Travaux futurs

- Étudier les variations d'épaisseur des plaques fabriquées par Polyflex possédant un renfort de plus faible perméabilité et ayant un taux de fibre plus élevé comme un tissu bidirectionnel par exemple.
- Utiliser une résine de plus faible viscosité.
- Rechercher des façons de repousser la ligne de croisement des fluides car ce phénomène gouverne la qualité des pièces fabriquées.
- Optimiser le procédé Polyflex avant l'étape d'injection du fluide de compaction. Cette étape engendre une plus grande complexité du procédé et complique le contrôle de l'épaisseur des pièces fabriquées. Pourquoi ne pas introduire le fluide de compaction avant d'injecter la résine et contrôler sa pression pendant le remplissage du moule ?
- Étudier l'impact de fréquences élevées de compaction sur la performance du procédé, les variations d'épaisseur et le taux de vide.

- Analyser plus en profondeur l'influence de la pression de vide dans la chambre de compaction.
- Étudier l'influence de la pression de vide dans la chambre d'injection sur le taux de vide des pièces produites.

RÉFÉRENCES

- [1] GUTOWSKI T.G., Advanced composites manufacturing, John Wiley and Sons Inc., New York, 1997.
- [2] MALLICK P.K., Fiber-reinforced composites, 2^e édition, Marcel Dekker Inc., New York, 1993.
- [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. 129 p.
- [4] VODIČKA P. et al., 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.
- [5] DARCY H., Les Fontaines publiques de Dijon Anonymous, Dalmont, 1856.
- [6] FERLAND P., GUITTARD D. ET TROCHU F., Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer molding, *Polymer composites*, Vol. 17, No.1, février 1996, p. 149-158.
- [7] JEONG H., *Effects of voids on the mechanical strength and ultrasonic attenuation of laminated composites*, Journal of composite materials, Vol. 31, No. 3, 1997, p.276-292.
- [8] WOOD, J. R., BADER, M. G., *Void control for polymer-matrix composites (1): theoretical and experimental methods for determining the growth and collapse of gas bubbles*, Composites manufacturing, Vol. 5, no. 3, sept. 1994, p. 139-147.

- [9] ROHATGI, V., PATEL, N., LEE, L.J., *Experimental investigation of flow-induced microvoids during impregnation of unidirectional stitched fibreglass mat*, Polymer composites, Vol. 17, no.2, april 1996, p. 161-170.
- [10] BARRAZA, H.J., HAMIDI, Y.K., AKTAS, L., O'REAR, E.A. and ALTAN, M.C., *Porosity reduction in the high-speed processing of glass-fiber composites by resin transfer molding (RTM)*, Journal of composite materials, Vol.38, No.3, 2004, p. 195-226.
- [11] IKEGAWA, N., HAMADA, H., MAEKAWA, Z., *Effects of compression process on void behavior in structural resin transfer molding*, Polymer engineering and science, Vol. 36, No. 7, avril 1996, p. 953- 962.
- [12] HAYWARD J.S. et HARRIS B., *The effect of vacuum assistance in resin transfer molding*, Composite Manufacturing, Vol. 1, No.3, septembre 1990, p. 161-166.
- [13] LUNDSTROM T.S. et GEBART B.R., *Influence from process parameters on void formation in resin transfer molding*, Polymer composites, Vol.15, no.1, février 1994, p. 25-33.
- [14] HAYWARD J.S. et HARRIS B., *Processing factors affecting the quality of resin transfer moulded composites*, Plastics and rubber processing and applications, Vol.11, no. 4, 1989, p. 191-198.
- [15] LUNDSTROM T.S., *Measurement of void collapse during resin transfer molding*, Composites – Part A: Applied science and manufacturing, vol. 28, no.3, 1997, p.201-214.

- [16] LUNDSTROM T.S., void formation in RTM, Journal of reinforced plastics and composites, Vol. 12, no. 12, décembre 1993, p. 1339-1349.
- [17] LABAT L., BRÉARD J., PILLUT-LESVRE S. ET BOUQUET G., Void fraction prevision in LCM parts, EPJ Applied Physics, V. 16, no. 2, novembre 2001, p. 157-164.
- [18] SONG F. ET AYORINDE E.O., Model development in the simulation of vibration assisted liquid composite moulding, Proceedings of the 11th Advanced Composites Conference, Dearborn, Michigan, USA, November 6-9 1995, p. 203-212.
- [19] BAIG B.S. ET GIBSON R.F., Vibration Assisted Liquid Composite Moulding, Proc 11th Annual ESD Advanced Composites Conference, November 6-8 1995, Dearborn, Michigan, USA, p. 645.
- [20] ROBITAILLE, F., GAUVIN, R., *Compaction of textile reinforcements for composite manufacturing. 1: Review of experimental results*, Polymer composites, vol. 19, no. 2, Apr. 1998, p. 198-216.
- [21] KIM, Y. R. et McCARTHY, S.P., *Resin flow through fiber reinforcements during composite processing*, SAMPE Quarterly, Vol. 22, no. 3, Apr. 1991, p. 16-22.
- [22] SHAUGHNESSY E.J., KATZ I.M. ET SCHAFFER J.P., Introduction to fluid mechanics, Oxford University press, New York, 2005.
- [23] WHITE F. M., Fluid mechanics, 4e edition, The McGraw-Hill companies, Boston, 1999.
- [24] LABONVILLE R., Conception des circuits hydrauliques, une approche énergétique, édition corrigée, Presses internationales Polytechnique, Montréal, 1999.

- [25] 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.
- [26] Apple Rubber Products. Seal Design Catalog. 95. (GENERIC)
- [27] TROCHU, F., RUIZ, E., and DEMARÍA, C., Rapport interne CCHP, École Polytechnique de Montréal (Québec), Canada, Déc 2000.
- [28] LARSEN E., CAIRNS D., MANDELL J. and SAMBORSKY D., Investigation of a two-stage injection process to reduce the effects of in plane resin flow, AIAA-2002-26 2002 ASME Wind Energy Symposium; AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 40th, Collection of Technical Papers, Reno, NV, Jan. 14-17, 2002
- [29] OSTLE, B., TURNER, Jr, K.V., HICKS, C.R. et McELRATH, G.W., Engineering statistics, Wadsworth Publishing Co., Belmont, 1996.
- [30] TROCHU F., Krigeage en CAO et FAO, notes de cours MEC6310, 2e édition, École Polytechnique de Montréal, septembre 2003.
- [31] KREYSIG E. E., Advanced Engineering Mathematics, 5th Edition, Wiley, 1987.
- [32] TROCHU F., Fabrication des composites par injection, notes de cours MEC6318, École Polytechnique de Montréal, hiver 2006.

ANNEXES

Annexe A: Propriétés des membranes de séparation

Une caractérisation des membranes utilisées dans les plans d'expérience présentés dans les chapitres 3 à 5 a été effectuée dans les laboratoires de l'École Polytechnique de Montréal. Cette caractérisation a nécessité l'usage de trois types d'appareils : un analyseur thermo-gravimétrique pour évaluer la température de dégradation, un calorimètre à balayage différentiel pour déterminer la température de fusion et un analyseur mécanique dynamique pour analyser le module d'élasticité et le pourcentage d'élongation avant rupture à température ambiante et à 150 °C. Des tests qualitatifs de résistance chimique ont également été réalisés.

Résultats et observations du WL7400

La membrane WL7400 fait partie de la famille des membranes de Nylon « Wrightlon » de Airtech. Cette catégorie est reconnue pour son pourcentage d'élongation élevé. Ses propriétés données par le fournisseur sont :

Tableau A.1 : Propriétés du WL7400 données par le fournisseur.

Pourcentage d'élongation à la rupture	350 %
Résistance à la traction	55 MPa
Température maximale d'utilisation	204°C
Point de fusion	215 °C

Les propriétés obtenues des analyses en laboratoire sont énumérées dans le Tableau A.2.

Tableau A.2 : Propriétés du WL7400 selon les analyses en laboratoire.

	Unité	Échantillon WL7400	Commentaires
T°(à 5% Dégradation)	°C	440	Début de dégradation à 400 °C
T°(Fusion)	°C	215	Test de DSC ambiguë donc on utilise la température de fusion du fabricant
T°(Perte du module)	°C	N/A	Diminution du module à partir de 90 °C, le fabricant mentionne 204 °C comme température maximale d'utilisation
E(initiale) (30°C)	Mpa	560	
E(50%) (30°C)	Mpa	4,52	
E(100%) (30°C)	Mpa	12,44	
E(200%) (30°C)	Mpa	N/A	Rupture avant 200%
E(300%) (30°C)	Mpa	N/A	
E(finale) (30°C)	Mpa	0,73	
% (30°C) Avant rupture	%	130	
E(initiale) (150°C)	MPa	147	
E(50%) (150°C)	MPa	3,67	
E(100%) (150°C)	MPa	0,37	
E(200%) (150°C)	MPa	3,97	
E(300%) (150°C)	MPa	3,36	
E(finale) (150°C)	MPa	N/A	
% (150°C) Avant rupture	%	N/A	Rupture non atteinte, supérieure à 345%
Résistance au Styrène	--	Ok	Bonne décohésion, bon fini de surface, force nulle

On constate que le pourcentage d'élongation donné par le fournisseur (350%) est bien supérieur aux résultats obtenus en laboratoire (130%). L'un des phénomènes pouvant expliquer cette différence est l'humidité absorbée par la membrane. Le nylon est un matériau très sensible à l'humidité et dépendamment dans quelles conditions le manufacturier effectue ses tests, il peut obtenir des résultats très différents des nôtres. On observe également que le module initial est grand, ce qui n'est pas désirable afin de bien épouser les formes du moule complexe.

Résultats et observations du EL1040T

La membrane EL1040T d'un blanc translucide est produite par Torr Technology. Les propriétés données par le fournisseur sont montrées au Tableau A.3.

Tableau A.3 : Propriétés du EL78 données par le fournisseur pour un échantillon de 2mm d'épaisseur.

Pourcentage d'élongation à la rupture	1300 %
Résistance à la traction	12.8 MPa
Module 25%	0.4 MPa
Module 50%	0.7 MPa
Module 100%	1 MPa
Module 300%	2.1 MPa

Les propriétés obtenues des analyses en laboratoire sont énumérées dans le Tableau A.4.

Tableau A.4 : Propriétés du EL1040T selon nos analyses.

	Unité	Échantillon EL1040T	Commentaires
T°(à 5% Dégradation)	°C	460	Début de dégradation à 275°C
T°(Fusion)	°C	N/A	Pas de température de fusion car matériau thermdurcissable
T°(Perte du module)	°C	310	Chute importante du module à 300°C
E(initiale) (30°C)	Mpa	1,21	
E(50%) (30°C)	Mpa	0,85	
E(100%) (30°C)	Mpa	0,64	
E(200%) (30°C)	Mpa	0,57	
E(300%) (30°C)	Mpa	0,48	
E(finale) (30°C)	Mpa	N/A	Aucune rupture observée
% (30°C) Av. rupture	%	N/A	Supérieure à 360%
E(initiale) (150°C)	MPa	1,34	
E(50%) (150°C)	MPa	0,78	
E(100%) (150°C)	MPa	0,55	
E(200%) (150°C)	MPa	0,46	
E(300%) (150°C)	MPa	0,39	
E(finale) (150°C)	MPa	N/A	Rupture non atteinte
% (150°C) Av. rupture	%	N/A	Supérieure à 360%
Résistance au Styrène	--	Ok	Bonne décohésion, force nulle, fini de surface rugueux

Cette membrane a un pourcentage d'élongation avant rupture théorique supérieur à tous les autres échantillons testés.

**Annexe B : Mesures d'épaisseurs des plaques fabriquées dans le plan
d'expériences #1**

Plaque no: PF1H05001				Plaque no: PF1H05002				
IN				IN				X
-45	-15	15	45	-45	-15	15	45	Y
1,628	1,513	1,777	1,474	1,618	1,716	1,952	1,965	10
1,657	1,459	1,434	1,533	1,888	1,724	1,823	2,084	20
1,675	1,633	1,472	1,728	1,727	1,723	1,809	1,923	30
1,602	1,841	1,635	1,625	1,945	1,796	1,960	1,723	40
1,579	1,690	1,679	1,555	1,624	1,923	1,920	1,968	50
1,682	1,991	1,839	1,637	1,730	1,910	1,969	1,803	70
1,675	1,792	1,952	1,801	1,837	1,988	1,867	1,898	90
1,603	1,723	1,592	1,727	1,909	1,796	1,905	1,941	110
1,685	1,793	1,613	1,460	1,788	2,017	2,023	2,009	130
1,440	1,721	1,651	1,578	2,012	1,773	1,916	1,923	150
1,613	1,783	1,758	1,395	1,574	2,138	1,939	1,841	179
1,597	1,851	1,526	1,511	1,746	1,969	1,955	1,903	208
1,512	1,455	1,586	1,387	1,664	1,581	1,904	1,831	228
1,577	1,471	1,297	1,517	1,597	1,897	1,543	1,515	248
1,425	1,379	1,530	1,499	1,407	1,883	1,534	1,675	268
1,421	1,327	1,492	1,328	1,433	1,785	1,478	1,436	288
1,408	1,115	1,674	1,264	1,601	1,480	1,532	1,458	308
1,264	1,257	1,545	1,598	1,635	1,739	1,223	1,412	318
1,400	1,502	1,432	1,712	1,595	1,506	1,664	1,417	328
1,489	1,283	1,663	1,572	1,722	1,567	1,626	1,498	338
1,489	1,266	1,508	1,585	1,607	1,618	1,813	1,488	348
OUT				OUT				

Plaque no: PF1H05003

IN			
-45	-15	15	45
1,537	1,836	1,702	1,591
1,581	1,797	1,800	1,682
1,879	1,862	1,538	1,664
1,772	1,784	1,840	1,760
1,665	1,662	1,727	1,509
1,798	1,551	1,832	1,372
1,541	1,652	1,694	1,454
1,632	1,735	1,734	1,418
1,608	1,828	1,707	1,967
1,789	1,758	1,859	1,932
1,613	1,663	1,709	1,849
1,569	1,731	1,731	1,368
1,964	1,865	1,669	1,570
1,744	1,681	1,539	1,555
1,624	1,571	1,467	1,483
1,640	1,491	1,528	1,648
1,598	1,362	1,675	1,560
1,478	1,524	1,412	1,588
1,632	1,367	1,666	1,721
1,465	1,432	1,490	1,412
1,572	1,556	1,540	1,490

OUT

Plaque no: PF1H05004

IN				X	Y
-45	-15	15	45		
1,358	1,499	1,484	1,588	10	
1,323	1,661	1,712	1,646	20	
1,423	1,556	1,631	1,678	30	
1,589	1,523	1,627	1,545	40	
1,497	1,628	1,521	1,542	50	
1,530	1,790	1,635	1,671	70	
1,345	1,629	1,629	1,718	90	
1,520	1,709	1,551	1,615	110	
1,533	1,594	1,705	1,628	130	
1,565	1,846	1,658	1,538	150	
1,688	1,670	1,576	1,327	179	
1,807	1,710	1,480	1,512	208	
1,642	1,544	1,564	1,507	228	
1,569	1,483	1,600	1,394	248	
1,618	1,558	1,704	1,540	268	
1,710	1,648	1,636	1,491	288	
1,436	1,635	1,636	1,394	308	
1,674	1,625	1,616	1,382	318	
1,540	1,473	1,394	1,375	328	
1,585	1,508	1,510	1,401	338	
1,434	1,369	1,473	1,434	348	

OUT

Plaque no: PF1H05005

IN			
-45	-15	15	45
1,605	1,572	1,450	1,290
1,674	1,605	1,662	1,645
1,489	1,576	1,503	1,498
1,494	1,595	1,606	1,381
1,547	1,629	1,447	1,540
1,720	1,584	1,545	1,290
1,739	1,706	1,734	1,381
1,572	1,724	1,596	1,567
1,801	1,852	1,815	1,578
1,636	2,050	1,898	1,592
1,598	1,910	1,935	1,583
1,617	1,754	1,909	1,599
1,682	1,781	1,776	1,637
1,658	1,617	1,832	1,649
1,724	1,732	1,982	1,497
1,703	1,931	1,689	1,466
1,725	1,776	1,606	1,320
1,715	1,627	1,647	1,403
1,660	1,679	1,623	1,369
1,706	1,620	1,747	1,408
1,645	1,493	1,659	1,310

OUT

Plaque no: PF1H05006

IN				X
-45	-15	15	45	Y
1,708	1,513	1,593	1,874	10
1,799	1,869	1,813	1,838	20
1,833	1,743	1,740	1,891	30
1,799	1,648	1,732	1,710	40
1,666	1,723	1,801	1,653	50
1,842	1,786	1,461	1,534	70
1,526	1,667	1,710	1,865	90
1,625	1,587	1,636	1,726	110
1,644	1,651	1,889	1,638	130
1,545	1,697	1,829	1,728	150
1,742	1,706	1,823	1,784	179
1,686	1,712	1,685	1,640	208
1,588	1,818	1,626	1,586	228
1,661	1,589	1,643	1,452	248
1,714	1,738	1,691	1,788	268
1,462	1,457	1,640	1,611	288
1,387	1,543	1,752	1,745	308
1,547	1,625	1,693	1,513	318
1,410	1,632	1,546	1,362	328
1,400	1,489	1,503	1,372	338
1,754	1,599	1,344	1,228	348

OUT

Annexe C : Introduction au krigeage

Cette section présente le krigeage, une méthode numérique d'interpolation et de modélisation géométrique. La méthodologie développée ici pour modéliser une surface à partir d'un nuage de points est une variante du krigeage appelée krigeage dual [30]. Cet outil a été utilisé pour représenter les variations d'épaisseur dans les pièces.

Le krigeage est une méthode statistique permettant de construire le meilleur estimateur linéaire sans biais d'une fonction aléatoire à référence spatiale, c'est-à-dire définie sur un espace géométrique. Le krigeage est issu d'une discipline appelée géostatistique, qui a été développée à l'origine pour évaluer la teneur en minerai des gisements miniers. Le premier à avoir développé cette approche est D.C. Krige en Afrique du sud en 1951 pour évaluer les ressources d'une mine d'or.

On peut montrer que le krigeage est équivalent aux splines, aux courbes et surfaces de *Bézier* et même, dans certains cas, aux éléments finis. Le krigeage constitue aussi une généralisation des méthodes d'approximation par moindres carrés. Le krigeage présente l'avantage de permettre à la fonction interpolée de passer par les points de mesure, ce qui n'est pas le cas d'habitude pour les méthodes de moindres carrés. Ceci correspond à une interpolation par krigeage avec erreur de mesure nulle. Enfin, quand on tient compte des erreurs de mesure au moyen de l'effet de pépité, on peut retrouver les méthodes de moindres carrés classiques comme un cas limite du krigeage.

Un phénomène physique peut la plupart du temps être représenté par la somme d'une valeur moyenne $a(x)$ appelée dérive et d'une fluctuation aléatoire $W(x)$:

$$U(x) = a(x) + W(x) \quad (C.1)$$

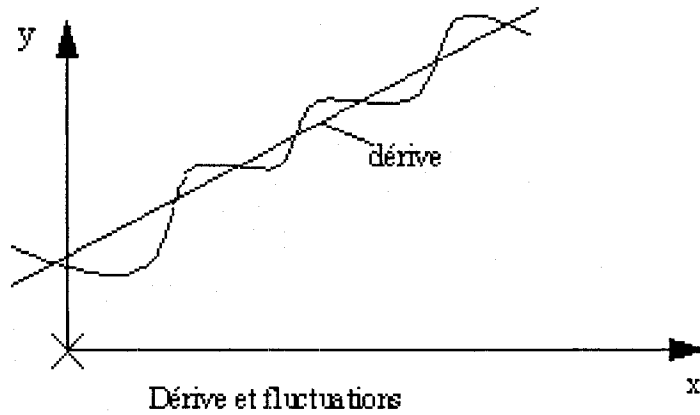


Figure C.1 : Représentation d'un phénomène physique.

L'expression de la fonction krigée est donnée par la relation suivante:

$$u(x) = a(x) + \sum_{j=1}^N b_j \cdot K(|x - x_j|) \quad (C.2)$$

où $a(x)$ est la dérive, $K(h)$ est la fonction de covariance généralisée et x_j , $1 \leq j \leq N$, sont les positions de N points où la fonction est connue. On suppose que la dérive est linéaire de la forme $a(x) = a_0 + a_1 \cdot x$. La covariance est de la forme $K(h) = K(|x - y|)$, où $|x - y|$ est la habituellement distance euclidienne entre x et y . Les coefficients a_i et b_j sont solution du système linéaire suivant :

$$\begin{bmatrix} & & & 1 & x_1 \\ & K(|x_i - x_j|) & & \cdot & \cdot \\ & & 1 & x_N \\ 1 & \cdot & & 0 & 0 \\ x_1 & \cdot & x_N & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ \cdot \\ b_N \\ a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \cdot \\ u_N \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (C.3)$$

Le choix de la dérive se fait parmi les fonctions suivantes :

$a(x) = a_0$	dérive constante
$a(x) = a_0 + a_1 \cdot x$	dérive linéaire
$a(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2$	dérive quadratique
$a(x) = a_0 + a_1 \cdot \cos(\omega x) + a_2 \cdot \sin(\omega x)$	dérive trigonométrique

Pour que l'interpolation soit la plus précise possible, on doit choisir une expression de la dérive qui représente le plus fidèlement le phénomène ou la forme. Une interpolation acceptable est obtenue quel que soit le type de dérive à cause de l'ajustement produit par le terme de correction qui fait intervenir la covariance.

La covariance est choisie parmi les principales fonctions suivantes:

$K(h) = h$	covariance linéaire
$K(h) = h^3$	covariance cubique
$K(h) = h^2 \cdot \ln h$	covariance logarithmique
$K(h) = \sin(\omega h)$	covariance sinusoïdale

La fonction krigée passe toujours par les points de mesure, mais il existe des cas où les points de mesure peuvent présenter un certain degré d'incertitude. Dans ce cas, la fonction krigée peut être lissée en introduisant un effet de pépité.

Quand la position des points est connue avec un certain degré d'incertitude, on introduit la notion de l'effet de pépité:

$$u'(x) = u(x) + \varepsilon(x) \quad (C.4)$$

où $u(x)$ est la fonction qui décrit le phénomène, $u'(x)$ représente la fonction aléatoire et $\varepsilon(x)$ est l'erreur de mesure. Avec la même fonction krigée (Équation (C.2)), les coefficients a_i et b_i sont solution du système linéaire suivant :

$$\begin{bmatrix} K(0) + \sigma_1^2 & \dots & K(|x_1 - x_N|) & 1 & x_1 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K(|x_N - x_1|) & \dots & K(0) + \sigma_N^2 & 1 & x_N \\ 1 & \vdots & 1 & 0 & 0 \\ x_1 & \vdots & x_N & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_N \\ a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_N \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (C.5)$$

On vérifie que la courbe krigée ne passe plus par les points de mesure en calculant la *i*-ième ligne du système (Équation (C.5)) :

$$a_0 + a_1 \cdot x + \sum_{j=1}^N b_j \cdot K(|x_i - x_j|) + \sigma_i^2 \cdot b_i = u_i \quad (C.6)$$

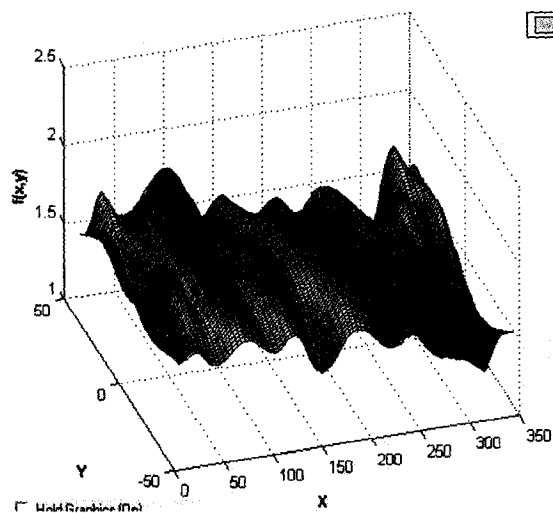
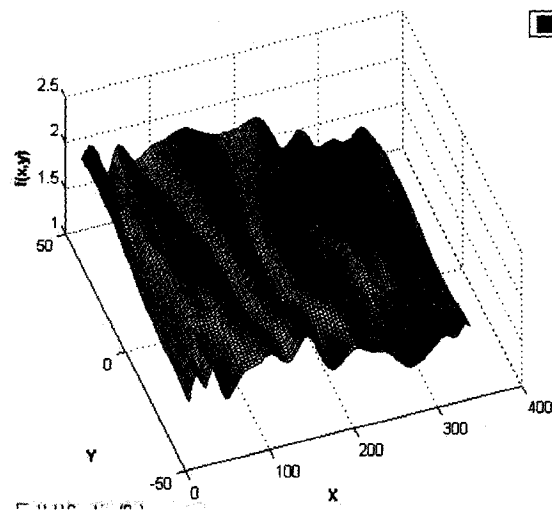
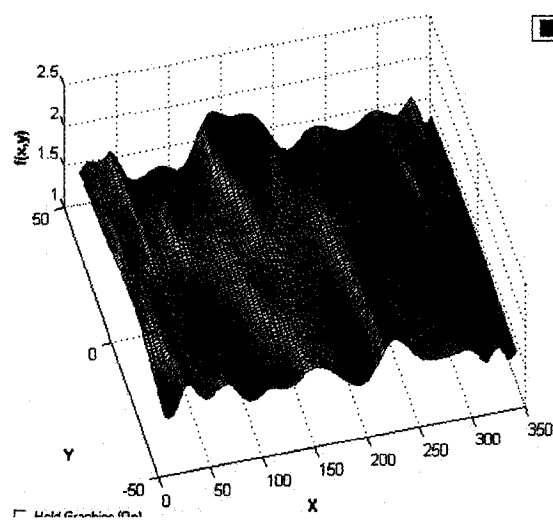
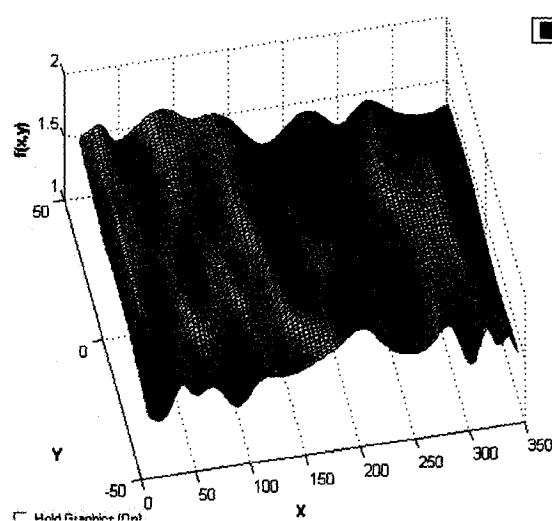
En chaque point de mesure, il y a un écart Δ_i :

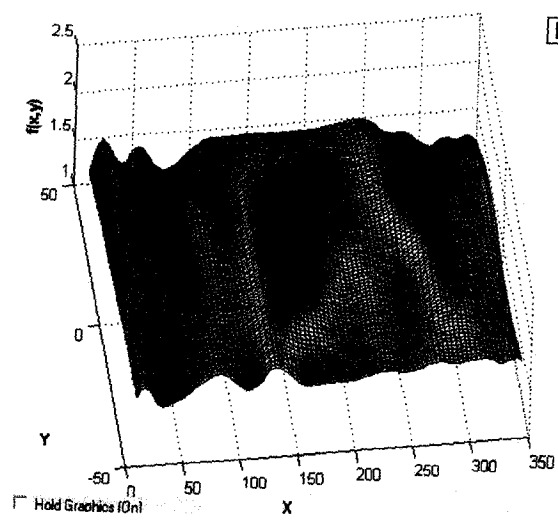
$$\Delta_i = u_i - u(x_i) = \sigma_i^2 \cdot b_i \quad (C.7)$$

D'habitude la variance de l'erreur σ_i en chacun des points de mesure n'est pas connue, mais sa valeur peut être estimée si l'on impose une distance maximale entre la valeur mesurée et la valeur réelle :

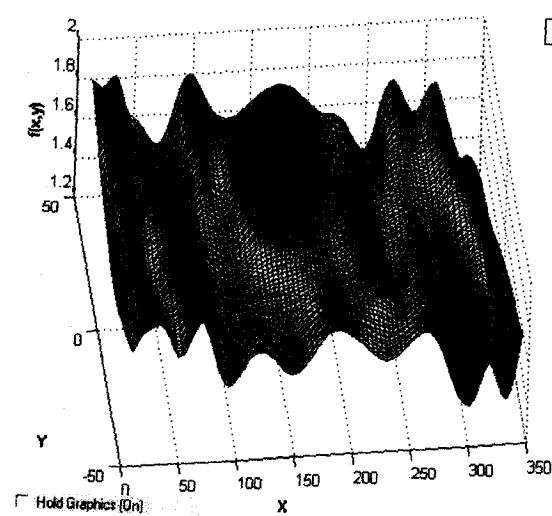
$$|u_i - u(x_i)| = |\Delta_i| \leq \Delta_{i,\max} \quad (C.8)$$

Annexe D : Représentation isométrique des surfaces krigées

**PF1H05001****PF1H05002****PF1H05003****PF1H05004**

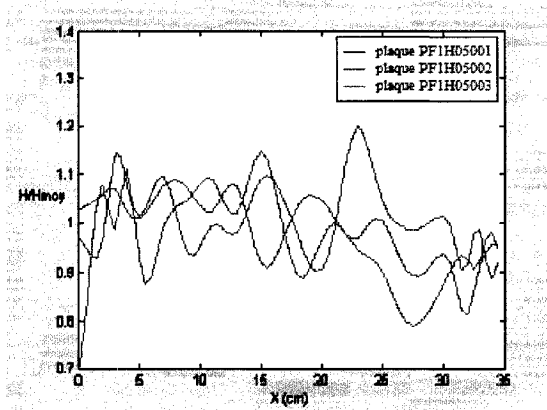


PF1H05005

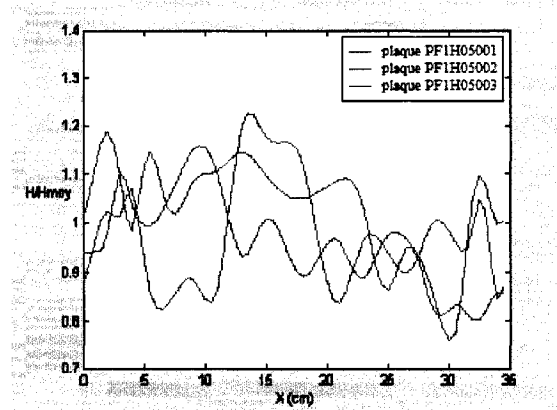


PF1H05006

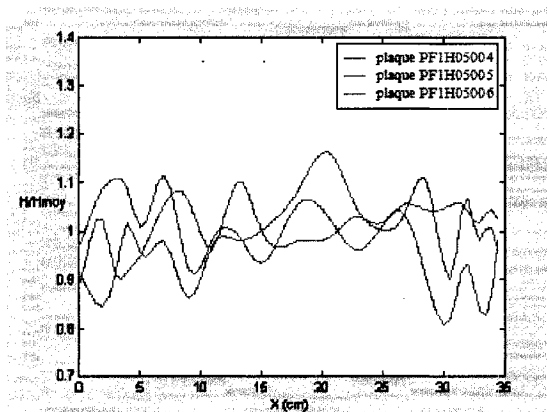
**Annexe E : Courbes krigées de l'épaisseur des plaques du plan
d'expériences 1 selon les directions $y = -45$ et $y = 45$**



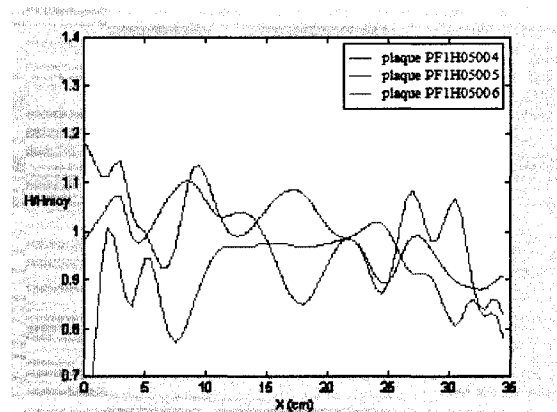
L'axe $y = -45$



L'axe $y = 45$



L'axe $y = -45$



L'axe $y = 45$

Annexe F : Calcul de l'épaisseur théorique des plaques pour le plan d'expériences 2

Une méthode de calcul de l'épaisseur théorique des plaques en composite fabriquées par le procédé Polyflex a été développée en se fondant sur la conservation du volume de résine. Les hypothèses posées sont les suivantes :

- La pression de compaction est suffisante pour comprimer le renfort à l'épaisseur finale.
- Les fibres et la résine sont considérées comme des matériaux incompressibles dans le présent domaine d'utilisation.
- Le taux de vide n'influence pas de façon significative le volume total de la pièce.

La pression de compaction peut être calculée en utilisant le modèle empirique suivant caractérisant les renforts en compression [20].

$$V_{fc} = AP_c^B \quad (F.1)$$

Dans cette équation, P_c désigne la pression de compaction nécessaire pour obtenir un taux de fibre V_{fc} dans la pièce. Le coefficient A correspond à la fraction de fibres obtenue pour une pression de compaction de 1 Pa tandis que le coefficient B représente l'indice de rigidité qui dépend des caractéristiques du renfort. Les coefficients A et B sont obtenus expérimentalement par la caractérisation en compaction du renfort étudié. Dans le cas présent, pour 3 couches de OCF8610 ayant une densité surfacique de 300 g/m², les valeurs de ces coefficients sont 0.00514 et 0.327 pour respectivement A et B . L'équation (F.1) est valide dans le cas d'un renfort sec seulement. En utilisant cette équation, comme la fraction volumique de fibre finale est d'environ 22%, la pression de compaction nécessaire est d'environ 1 bar. La pression de consolidation utilisée dans le plan d'expériences #3 était de 4 bars et donc, la première hypothèse est vérifiée.

En se fondant sur la conservation du volume des fluides, la quantité de résine à la fin de l'injection de la résine et à la fin de la compaction lorsque tout le renfort a été imprégné

doit être la même. Dans les calculs ci-dessous, seule la résine injectée dans la cavité est prise en considération ; par exemple, la résine contenue dans le tube du port d'injection à la fin du remplissage du moule n'apparaît pas dans la balance d'équation.

Le volume de résine V_{rI} à la fin de l'étape de l'injection de la résine est donné par l'équation suivante :

$$V_{rI} = D_r L_1 (W_1 - 2d_j) H (1 - V_{f0}) \quad (F.2)$$

où D_r est la fraction de la longueur injectée, L la longueur de la cavité, W_1 la largeur de la cavité, d_j le diamètre du cordon de néoprène utilisé pour réduire les effets de bord, H est la hauteur de la cavité du moule et V_{f0} est le taux volumique de fibres au repos au début de l'étape d'injection.

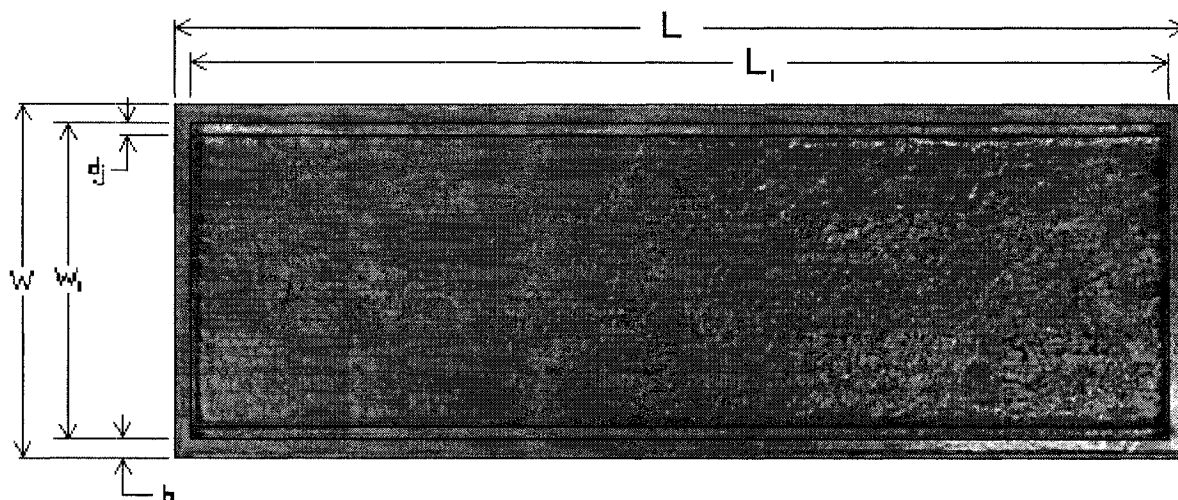


Figure F.1 : Vue de dessus de la pièce avec les dimensions.

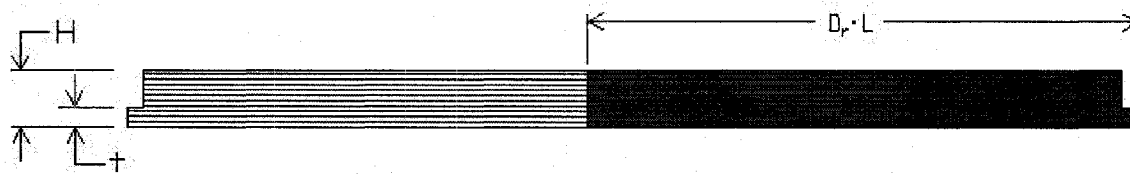


Figure F.2 : Schéma de la vue de côté de la cavité du moule avec les paramètres associés.

À la fin de l'étape de compaction, le composite à une épaisseur h_c et le volume V_{r2} est donné par l'équation suivante :

$$V_{r2} = L(W_1 - 2d_j)h_c(1 - V_{fc}) + (2(1 - D_r)L + W) \cdot (b + d_j)t(1 - V_{fr}) + V_r + V_R \quad (F.3)$$

où V_{fc} est la fraction volumique de fibres final, V_{fr} la fraction volumique de fibres dans les bordures, W la largeur totale de la plaque b la largeur des bordures, V_r est le volume de résine dans la rainure et V_R est le volume de résidus de résine. À noter que t est égal au tiers de l'épaisseur totale de la cavité H . C'est l'épaisseur de la bordure utilisée pour maintenir en place le renfort, i.e. pour prévenir le lavage (*washout*) des fibres durant l'injection.

Les taux de fibre des équations précédentes sont directement reliés à l'épaisseur du renfort par l'équation suivante :

$$v_f = \frac{\rho_s n}{\rho_v h} \quad (F.4)$$

où n est le nombre de plis, ρ_v la densité des fibres, h l'épaisseur du renfort et ρ_s la densité surfacique. Finalement, la conservation du volume $V_{r1} = V_{r2}$ donne l'épaisseur théorique finale de la plaque fabriquée :

$$h_c = D_r H + \frac{\rho_s n}{\rho_v} (1 - D_r) - \frac{(2(1 - D_r)L + W) \cdot (b + d_j) \left(t - \frac{\rho_s n}{\rho_v}\right) + V_r + V_R}{L(W_1 - 2d_j)} \quad (F.5)$$

**Annexe G: Épaisseur des points de mesure pour les plaques PF1E05009
à PF1E05021 (21 points de la ligne centrale longitudinale)**

Distance from inlet (mm)	Weight factor	Measured thicknesses (mm)					
		PF1E05009	PF1E05011	PF1E05012	PF1E05013	PF1E05014	PF1E05015
24	2	1,529	1,626	1,689	1,829	1,810	1,540
44	2	1,670	1,597	1,591	1,631	1,663	1,540
64	2	1,593	1,751	1,816	1,735	1,770	1,664
84	2	1,856	1,778	1,863	1,608	1,638	1,636
104	2	1,528	1,569	1,627	1,791	1,848	1,494
124	2	1,799	1,598	1,911	1,878	1,752	1,617
144	2	1,718	1,562	1,697	1,668	1,931	1,548
164	2	1,567	1,527	1,593	1,683	1,838	1,731
184	2	1,877	1,804	1,613	1,749	1,790	1,593
204	2	1,538	1,749	1,946	1,673	1,887	1,689
224	2	1,637	1,869	1,776	1,561	1,953	1,688
244	2	1,391	1,749	1,593	1,792	1,751	1,702
264	1,5	1,642	1,671	1,405	1,603	1,721	1,675
274	1	1,492	1,477	1,408	1,635	1,735	1,601
284	1	1,543	1,499	1,478	1,783	1,567	1,684
294	1	1,673	1,390	1,615	1,487	1,559	1,669
304	1	1,495	1,554	1,609	1,663	1,713	1,518
314	1	1,635	1,544	1,458	1,726	1,500	1,675
324	1	1,490	1,495	1,485	1,553	1,357	1,609
334	1	1,367	1,544	1,328	1,491	1,204	1,467
344	1	1,322	1,351	1,405	1,356	1,273	1,337

Distance from inlet (mm)	Weight factor	Measured thicknesses (mm)					
		PF1E05016	PF1E05017	PF1E05018	PF1E05019	PF1E05020	PF1E05021
24	2	1,517	1,682	1,437	1,706	1,612	1,534
44	2	1,531	1,632	1,593	1,623	1,592	1,48
64	2	1,513	1,671	1,478	1,62	1,73	1,603
84	2	1,704	1,717	1,37	1,937	1,691	1,814
104	2	1,487	1,662	1,656	1,719	1,884	1,76
124	2	1,66	1,432	1,512	1,899	1,682	1,932
144	2	1,813	1,589	1,418	1,677	1,623	2,059
164	2	1,853	1,679	1,592	1,754	1,806	1,722
184	2	1,699	1,63	1,648	1,621	1,675	1,872
204	2	1,631	1,54	1,649	1,72	1,683	1,52
224	2	1,768	1,776	1,665	1,953	1,704	1,759
244	2	1,404	1,602	1,597	1,684	1,665	1,529
264	1,5	1,673	1,56	1,681	1,701	1,783	1,526
274	1	1,694	1,546	1,648	1,749	1,624	1,442
284	1	1,759	1,625	1,566	1,42	1,654	1,637
294	1	1,38	1,604	1,563	1,331	1,841	1,463
304	1	1,519	1,486	1,722	1,49	1,567	1,399
314	1	1,705	1,232	1,59	1,59	1,429	1,459
324	1	1,493	1,253	1,577	1,725	1,355	1,303
334	1	1,448	1,331	1,575	1,272	1,276	1,408
344	1	1,519	1,173	1,419	1,383	1,304	1,316

Annexe H : Calcul des pertes de charge associées au connecteur (quick disconnect)

Un groupe de 12 expériences a été effectué dans le but d'évaluer les pertes de charge associées au système d'injection du fluide de compaction et plus particulièrement au connecteur. La Figure 5.14 montre une photo des différentes composantes du circuit. La méthodologie consiste à injecter des huiles de silicone de diverses viscosités à différentes pressions dans un verre au moyen d'un pot de pression. En fait, il s'agit de simuler une injection telle qu'effectuée dans le plan d'expériences #3 mais sans le moule. Un profil typique de la pression statique mesuré par le capteur est présenté à la Figure H.1. On voit que lorsqu'il y a écoulement, la pression se stabilise à une valeur inférieure à la pression initiale.

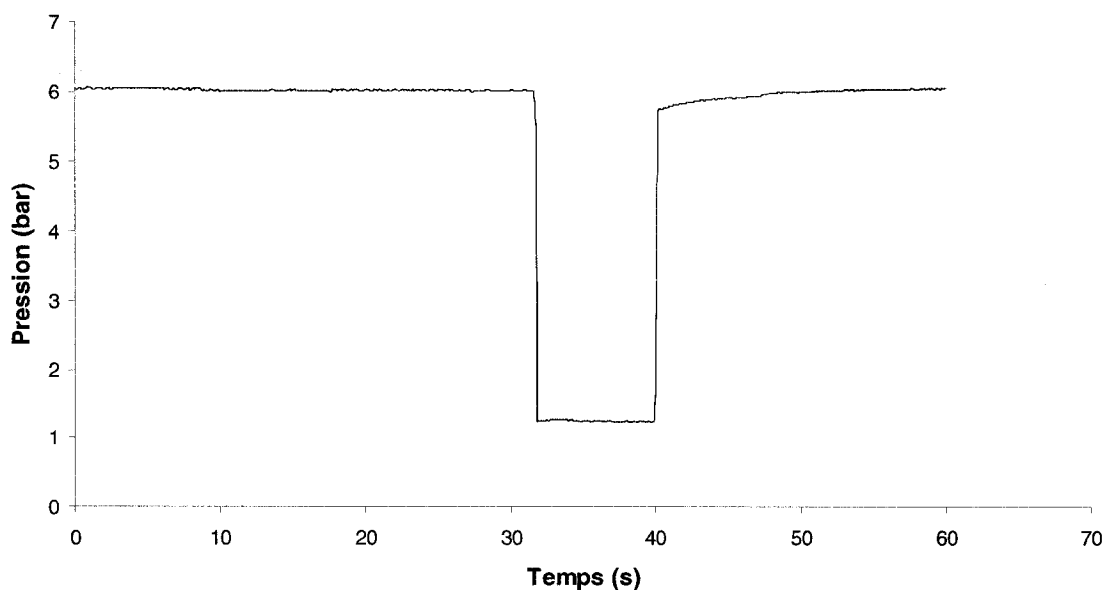


Figure H.1 : Profil typique de la pression statique mesuré par le capteur

Au chapitre 5, la formule générale suivante a été introduite où P_i est la pression initiale ajustée au pot de pression, P_s et P_d sont respectivement la pression statique et la pression dynamique durant l'injection du fluide et P_c est la pression associée aux pertes de charges. La pression hydrostatique relative au changement d'élévation a été négligée

puisque les expériences ont été effectuées sensiblement au même niveau. Le Tableau H.1 montre les paramètres d'injection et les résultats pour les 12 expériences. La masse volumique de l'huile de silicone est 970 kg/m^3 et le diamètre de la conduite à l'emplacement du capteur est 11,2 mm.

$$P_i = P_s + P_d + P_c \quad (\text{H.1})$$

Tableau H.1 : Les paramètres d'injection et les résultats pour les 12 expériences

Numéro de l'essai	1	2	3	4	5	6
Pression au pot (bar)	5,95	5,9	6,02	6,03	6,03	6,03
Viscosité du fluide (Pa.s)	3,52	3,52	3,52	3,52	0,315	0,315
Avec ou sans connecteur	avec	avec	sans	sans	avec	avec
Masse injecté (kg)	0,318	0,263	0,419	0,162	0,348	0,554
Volume injecté (ml)	328	271	432	167	359	571
Temps d'injection (s)	13,9	12,3	8,3	5,0	1,8	2,8
Débit (ml/s)	23,6	22,0	52,1	33,3	199,4	203,9
Vitesse d'écoulement (m/s)	0,24	0,22	0,53	0,34	2,02	2,07
Pression statique moy (bar)	0,51	0,50	1,25	1,27	0,44	0,43
Pression dynamique (bar)	0,0003	0,0002	0,0014	0,0006	0,0199	0,0208
Pertes de charge (bar)	5,44	5,40	4,77	4,76	5,57	5,58

Numéro de l'essai	7	8	9	10	11	12
Pression au pot (bar)	1,93	2,01	2	6,08	1,99	2,03
Viscosité du fluide (Pa.s)	0,315	0,315	0,309	0,309	3,45	3,45
Avec ou sans connecteur	avec	avec	sans	sans	sans	avec
Masse injecté (kg)	0,084	0,349	0,462	0,385	0,215	0,171
Volume injecté (ml)	87	359	476	397	222	176
Temps d'injection (s)	1,2	4,5	2,8	1,0	10,0	23,2
Débit (ml/s)	72,2	80,0	167,6	405,3	22,3	7,6
Vitesse d'écoulement (m/s)	0,73	0,81	1,70	4,11	0,23	0,08
Pression statique moy (bar)	0,13	0,12	0,35	1,01	0,34	0,14
Pression dynamique (bar)	0,0026	0,0032	0,0140	0,0821	0,0002	0,0000
Pertes de charge (bar)	1,80	1,89	1,64	4,99	1,65	1,89

En comparant entre eux les essais 1 et 2, les essais 3 et 4, les essais 5 et 6 et les essais 7 et 8, on constate que la procédure possède une excellente répétabilité. Une première constatation à partir de ces résultats est que la pression dynamique est très faible pour l'ensemble des expériences. La quasi-totalité de la pression initiale se transforme donc

en perte de charge lorsque la valve est ouverte. Il est intéressant de comparer les essais qui ont la même pression d'injection et la même viscosité de l'huile selon l'utilisation ou non du connecteur. Par exemple, en comparant les essais 1 et 2 avec les essais 3 et 4, on réalise que le fait d'utiliser ce type de connecteur entraîne une baisse de la vitesse effective de l'écoulement du fluide et une diminution de la pression statique. Comme il a été expliqué dans le chapitre 5, les pertes de charge se divisent en deux catégories, soient les pertes de charge réparties (P_{CR}) et localisées (P_{CL}). Les pertes de charges réparties peuvent être calculées par l'expression suivante [22, 23, 24]:

$$P_{CR} = f \frac{\rho L_c}{d_c} \frac{V^2}{2} \quad (\text{H.2})$$

Où f correspond à un facteur de friction, L_c et d_c à la longueur et au diamètre de la conduite et V à la vitesse moyenne du fluide. Le coefficient f est fonction du régime d'écoulement à l'intérieur de la conduite. C'est à l'aide du nombre de Reynolds ($Re = \rho V d_c / \mu$) qu'on détermine la nature du régime. Il est généralement admis que le régime d'écoulement est presque toujours turbulent lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 2500 et qu'il est laminaire lorsque ce nombre est inférieur à 2000. Entre ces deux valeurs, le régime d'écoulement est dit critique [24]. Pour un écoulement laminaire, ce qui est généralement le cas pour les fluides incompressibles, le coefficient f équivaut à $64/Re$ [22, 23, 24]. Considérant les deux catégories de pertes de charge, l'équation (H.1) pour être reformulée comme suit :

$$P_{CL} = P_i - P_s - P_{CR} \quad (\text{H.3})$$

Comme le montre le Tableau H.1, la pression dynamique est négligeable par rapport aux autres termes de l'équation, c'est pourquoi elle n'apparaît pas dans l'équation (H.3). Le Tableau H.2 montre les pertes de charge engendrées par le connecteur calculées à partir de l'équation (H.3). La longueur effective moyenne calculée à partir de l'équation (H.2) et des pertes de charges réparties obtenues dans les essais 3, 4, 9, 10 et 11 où le connecteur n'était pas utilisé est 1,23 m. Cette valeur a été employée pour déterminer les

pertes de charges réparties du circuit d'injection du fluide de compaction présentées dans le Tableau suivant.

Tableau H.2 : Pertes de charge associées au connecteur

Numéro de l'essai	1	5	8	12
Facteur de friction	86,7	0,9	2,3	263,9
Pression au pot (bar)	5,95	6,03	2,01	2,03
Pression statique (bar)	0,51	0,44	0,12	0,14
Pertes de charge dans le circuit (bar)	2,64	2,00	0,80	0,83
Pertes de charge dans le connecteur (bar)	2,80	3,57	1,08	1,06

L'expérience 5 a produit un temps d'injection relativement court (1,8 s), ce qui nuit à la précision du calcul de la vitesse effective du fluide, un paramètre des plus important dans le calcul de la perte de charge dans la conduite puisqu'il est au carré. Ainsi, si l'on fait exception de l'essai 5, on constate que les pertes de charge associées au connecteur sont d'environ 1,05 fois la pression perdue dans la conduite. Cette valeur est énorme compte tenu de l'importance de la pression statique du fluide de compaction dans le procédé Polyflex. Un connecteur différent devra être employé à l'avenir pour ne pas compromettre l'efficacité du fluide de compaction dans le procédé Polyflex.