

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**INJECTION FLEXIBLE DANS MOULE ISOTHERME : CONCEPTION ET
ANALYSE D'UN NOUVEAU PROCÉDÉ DE FABRICATION DE COMPOSITES**

**LOTHAR R. BRIONES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
MARS 2005**



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: 978-0-494-47653-6
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-47653-6

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 :

**INJECTION FLEXIBLE DANS MOULE ISOTHERME :
CONCEPTION ET ANALYSE D'UN NOUVEAU PROCÉDÉ DE
FABRICATION DE COMPOSITES**

présenté par : BRIONES Lothar R.

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

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

M. VADEAN Aurelian, Doct., président

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

Mme. ROSS Annie, Ph.D., membre

*a mis padres, Ivonne y Roberto,
que siempre me han incitado
a alcanzar nuevas metas.*

*mojej narzeczonej Monice
za jej miłość i
nieustanne wsparcie.*

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mon directeur de recherche M. François Trochu pour m'avoir donné l'opportunité de travailler dans son équipe, pour ses encouragements tout au long de cette expérience et pour m'avoir transmis de l'énergie afin d'accomplir ce projet. J'apprécie beaucoup sa disponibilité, sa motivation et son désir de former les étudiants à relever des défis.

J'aimerais exprimer ma gratitude à un des co-inventeurs avec le professeur F. Trochu du nouveau procédé analysé dans ce travail, le professeur Dr. Edu Ruiz, pour m'avoir donné l'occasion de mettre en œuvre ses idées et pour la généreuse contribution de ses connaissances techniques et son savoir-faire. Je tiens à remercier également M. Vincent Achim, qui s'est montré toujours intéressé par mes recherches et qui m'a aidé à comprendre les phénomènes physiques sous-jacents aux méthodes de fabrication par injection flexible.

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

Mes remerciements vont également au Centre de recherche appliquée sur les polymères (CRASP) de l'École Polytechnique, au Conseil de la recherche en sciences naturelles et génie (CRSNG) et au Fonds québécois pour la recherche sur la nature et la technologie (FQRNT) pour leur soutien financier. Enfin, je tiens à remercier M. Aurelian Vadean et Mme Annie Ross pour avoir accepté d'être membres de mon jury.

RÉSUMÉ

Ce projet de recherche consiste à étudier une nouvelle technique d'injection de résine sur renforts fibreux dont l'objectif essentiel est d'augmenter les cadences et donc d'abaisser le coût de la fabrication en série de composites à haute performance.

Ce nouveau procédé, appelé Polyflex, se caractérise principalement par l'utilisation d'un moule rigide à l'intérieur duquel la cavité est divisée en deux chambres étanches séparées par un film plastique. Le principe est le suivant : dans la chambre inférieure, qui contient le renfort, une quantité donnée de résine est injectée, puis la chambre supérieure est remplie d'un fluide dont le rôle est de faciliter l'imprégnation de la résine à travers le renfort encore sec et de compacter le composite. En plus d'assurer un temps de cycle réduit par rapport à d'autres procédés d'injection, le procédé Polyflex permet de contrôler le taux volumique de fibres de la pièce finale en fonction de la quantité de résine injectée.

L'objectif du projet consiste à concevoir un premier moule Polyflex et à analyser le procédé expérimentalement dans le cas d'injections isothermes. Les pressions d'injection et de compaction seront constantes et la fabrication se fera à la température ambiante. Plus précisément, le but de ce travail consiste à déterminer l'influence de cinq paramètres de fabrication sur le temps de remplissage et sur la vitesse d'imprégnation des fibres. Les cinq paramètres de fabrication retenus pour cette première analyse sont la pression de compaction, la pression d'injection de la résine, la viscosité du fluide de compaction, le volume de résine injecté et le taux volumique de fibres. Un moule transparent a été construit dans lequel la cavité rectangulaire est réglable pour différentes épaisseurs. Le fluide utilisé pour l'imprégnation du renfort et pour la compaction du composite est de l'huile de silicone pour différentes viscosités

calibrées. Un mat de fibres continues a été choisi comme renfort. Un plan d'expériences factoriel à deux niveaux a été construit en vue d'analyser les résultats.

Le paramètre qui gouverne la diminution du temps de remplissage est la pression du fluide de compaction. Pour une pression de compaction élevée, la vitesse d'imprégnation du renfort augmente au début de l'étape de compaction et décroît après que le front de résine est dépassé par le front du fluide de compaction. Par rapport au procédé RTM (« *Resin Transfer Moulding* »), on a observé une réduction de trois quarts sur le temps de remplissage d'une plaque composite dont l'épaisseur calculée est de 1,76 mm avec un taux de fibres de 20%.

Le procédé Polyflex possède un potentiel considérable pour la fabrication rapide de composites à haute performance pour des applications à haut volume, comme dans l'industrie automobile, par exemple. Des travaux en cours portent sur la modélisation du procédé et sur l'optimisation de la fabrication.

ABSTRACT

This research project involves the study of a novel technique of liquid composite moulding (LCM), in which the main goal is to perform mass production of high performance composites.

This new process, called Polyflex, is mainly characterized by the use of a rigid mould in which the cavity is divided into two sealed chambers separated by a plastic film. This new approach works as follows: in the lower chamber, where the fibrous reinforcement is located, a given quantity of resin is injected, then the upper chamber is filled up with a fluid that is used to facilitate the filling of the lower cavity and compact the composite. Besides reducing manufacturing cycle times compared to other LCM processes, Polyflex technology makes it possible to control the fibre volume fraction by monitoring the volume of resin injected.

The objective of this work consists of designing a Polyflex mould and analyzing the effects of the various process parameters with a series of experiments. Injection pressures are kept constant and the manufacturing process is isothermal. More precisely, the goal of this research is to determine the influence of five manufacturing parameters on the total filling time and resin flow velocity. The compaction pressure, injection pressure, compaction fluid viscosity, injected resin volume, and fibre volume fraction. A transparent mould was designed and built in which the rectangular cavity could be adjusted for different thicknesses. The fluid used for fibre filling and as compaction liquid has been silicone oil, for various gauged viscosities. A continuous filament mat was selected as reinforcement. A two-level factorial experimental design was built in order to analyze the results.

The pressure of the compaction fluid is the most important parameter that governs the total filling time. A higher compaction pressure results in faster resin flow at the beginning of the compaction stage. Just after the compaction fluid flow front overpasses the resin flow front, the resin flow velocity starts to decrease. Compared to the RTM ("*Resin Transfer Moulding*") process, a significant reduction of filling time (76%) can be observed for the fabrication of a composite plate of thickness 1,76 mm and 20% fibre content. This new process brings about a considerable potential of improvement in order to reduce manufacturing cycle time for the production of high performance composites. This is especially welcome for automotive applications, in which composite parts must be produced in high volume to be competitive. Future work involves process modeling and optimization of the various manufacturing parameters that govern mould filling.

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ.....	vi
ABSTRACT.....	viii
TABLE DES MATIÈRES.....	x
LISTE DES FIGURES	147
LISTE DES TABLEAUX	xix
LISTE DES SYMBOLES	xxi
LISTE DES ANNEXES.....	xxiii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
1.1 Introduction.....	4
1.2 Les procédés LCM.....	5
1.3 RTM.....	7
1.3.1 Moules industriels	9
1.3.2 Résines.....	12

1.3.3	Renforts fibreux	15
1.3.4	Préformage.....	19
1.3.5	Perméabilité	20
1.3.6	Modèle d'écoulement de résine	21
1.4	VARI	22
1.4.1	Compaction des renforts	24
1.5	Dernières technologies d'injection	26
1.6	Conclusion.....	28
CHAPITRE 2 : LE PROCÉDÉ POLYFLEX.....		29
2.1	Introduction.....	29
2.2	Description du procédé	30
2.2.1	Étapes préliminaires.....	30
2.2.2	Étape 1 : Injection de la résine.....	30
2.2.3	Étape 2 : Compaction du composite	31
2.2.4	Consolidation et polymérisation du composite.....	31
2.2.5	Démoulage de la pièce finie.....	31
2.3	Avantages et inconvénients	36
2.4	Modes d'écoulement de la résine	36
2.5	Notations pour le type de procédé Polyflex étudié.....	40
2.6	Conception d'un moule Polyflex.....	43
2.6.1	Matières premières des plaques analysées.....	44
2.6.2	Parois du moule	45
2.6.3	Dimensions du cadre	48
2.6.4	Joint d'étanchéité.....	50
2.6.5	Capteurs de pression	53

2.6.6	Analyse finale	55
2.7	Conclusion	58
CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE		61
3.1	Introduction	61
3.2	Matières premières	61
3.2.1	Résine	61
3.2.2	Fluide de compaction	62
3.2.3	Renfort	63
3.2.4	Film de séparation	66
3.3	Outils utilisés dans les manipulations	69
3.3.1	Débitmètre pour la mesure du débit du fluide de compaction	69
3.3.2	Moule Polyflex muni de capteurs qui mesurent la pression dans la cavité	70
3.3.3	Réservoirs sous pression	71
3.3.4	Caméra pour la mesure de la vitesse d'écoulement de la résine	72
3.4	Montage	73
3.5	Conclusion	76
CHAPITRE 4 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE		77
4.1	Introduction	77
4.2	Paramètres expérimentaux de fabrication	78
4.2.1	Taux volumique de fibres initial	78
4.2.2	Position finale du front L_r de la résine injectée	79
4.2.3	Viscosité du fluide de compaction η_f	82
4.2.4	Pression de la résine	82
4.2.5	Pression du fluide de compaction	85

4.3	Résumé sur les paramètres de fabrication	87
4.4	Résultats à analyser.....	88
4.5	Planification d'expériences.....	89
4.6	Observations en laboratoire	93
4.6.1	Pression sur les capteurs	99
4.6.2	Débit du fluide de compaction D_f	108
4.6.3	Vitesse du front de résine	111
4.7	Conclusion.....	113
CHAPITRE 5 : PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS.....		116
5.1	Introduction.....	116
5.2	Résultats du plan d'expériences.....	117
5.3	Analyse du temps de remplissage.....	121
5.3.1	Influence de la pression de compaction P_f sur le temps de remplissage t_p	123
5.3.2	Influence du taux de fibres initial V_{f0} sur le temps de remplissage t_p	126
5.3.3	Influence de la position finale du front de la résine injectée L_r sur le temps t_p	128
5.3.4	Influence de la viscosité du fluide de compaction η_f sur le temps t_p	128
5.3.5	Influence de la pression d'injection de la résine P_r sur le temps t_p	130
5.4	Analyse du rapport R_2	131
5.4.1	Influence de la pression du fluide de compaction P_f sur le rapport R_2	134
5.4.2	Influence de la viscosité du fluide de compaction η_f sur le rapport R_2	135
5.4.3	Influence de la pression d'injection de la résine P_r sur le rapport R_2	136
5.5	Conclusion.....	137
CONCLUSION.....		140
RECOMMANDATIONS ET TRAVAUX FUTURS		144

RÉFÉRENCES	147
------------------	-----

ANNEXES.....	147
--------------	-----

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Schéma procédé SCRIMP [44]	7
Figure 1.2 Schéma du procédé RTM	8
Figure 1.3 Angles de dépouille permis dans les moules RTM [7]	12
Figure 1.4 Exemples d'un bon est d'un mauvais rayon de courbure dans un moule RTM [7]	12
Figure 1.5 Réaction de polymérisation [39].....	15
Figure 1.6 Module d'élasticité d'un composite verre-époxyde pour différents taux de fibres [16]	16
Figure 1.7 Armure des tissus bidirectionnels : a) armure toile ou taffeta ; b) armure tissée 3 x 1; c) armure tissée 2 x 2; d) satin à 5 mailles [34]	17
Figure 1.8 Mat à fibres aléatoires et continues	18
Figure 1.9 Types de préformage : a) par coupe et couture [25] ; b) par thermoformage [38].....	19
Figure 1.10 Principe du procédé VARI	22
Figure 1.11 Diminution de la main d'œuvre par le procédé Fastrac [31]	27
Figure 1.12 Exemples de fabrication par infusion sans déchets [20]	28
Figure 2.1 Description des différentes composantes d'un moule Polyflex.....	32
Figure 2.2 Mise en place des composantes et fermeture du moule	32
Figure 2.3 Mise sous vide du renfort.....	33
Figure 2.4 Étape 1 : Injection de la résine dans la cavité	33
Figure 2.5 Étape 2 : Injection du fluide de compaction	34
Figure 2.6 Compaction homogène des fibres imprégnées.....	34
Figure 2.7 Étape 3 : Consolidation et polymérisation du composite	35

Figure 2.8 Démoulage de la pièce finie	35
Figure 2.9 Écoulement de type RTM à l'étape d'injection.....	40
Figure 2.10 Écoulement de type VARI à l'étape d'injection.....	39
Figure 2.11 Moule transparent Polyflex comprenant des cadres d'épaisseurs différentes.	49
Figure 2.12 Choix proposés du type et de l'emplacement du joint d'étanchéité	51
Figure 2.13 Position initiale du joint d'étanchéité pour une pression interne dans un joint boulonné.....	52
Figure 2.14 Capteurs choisis pour le moule Polyflex	54
Figure 2.15 Plaque inférieure du moule conçu pour évaluer le procédé Polyflex.....	56
Figure 2.16 Déformation amplifiée de la plaque en Plexiglas® due à une pression de compaction de 6 bars sur sa surface interne	57
Figure 2.17 Déformation amplifiée de la plaque en Plexiglas® avec un cadre d'acier due à une pression de compaction de 8 bars sur la surface interne que.....	58
Figure 3.1 Débitmètre Endress & Hauser.....	70
Figure 3.2 Disposition des capteurs de pression absolue du moule Polyflex.....	71
Figure 3.3 Réservoirs sous pression utilisés	72
Figure 3.4 Lignes de référence marquées selon la longueur du moule et du contre-moule.....	73
Figure 3.5 Disposition initiale des films qui divisent la cavité du moule	74
Figure 3.6 Montage des expériences pour l'évaluation du procédé Polyflex.....	75
Figure 4.1 Compaction finale de la pièce fabriquée par le procédé Polyflex.....	79
Figure 4.2 Temps nécessaire pour remplir la moitié du moule en fonction de la pression P_r d'injection imposée au réservoir de résine	84
Figure 4.3 Processus de planification d'essais	89

Figure 4.4 Étape 1 - Injection de la résine : le front de résine progresse dans la cavité	95
Figure 4.5 Étape 2a – Début de l’injection du fluide de compaction : le fluide de compaction pénètre dans la chambre de compaction jusqu’au niveau de la résine	96
Figure 4.6 Étape 2b - Fin de l’injection du fluide de compaction : après avoir dépassé la résine, le fluide de compaction finit de remplir la chambre de compaction	97
Figure 4.7 Étape 2c - Fin de l’imprégnation du renfort : la résine finit d’imprégner le renfort	98
Figure 4.8 Distribution de pression dans les chambres de compaction (a) et d’injection (b)	100
Figure 4.9 Chute de pression sur les capteurs de la chambre de compaction à l’étape 2a.....	102
Figure 4.10 Diminution de la vitesse d’écoulement de la résine après le croisement des fluides	104
Figure 4.11 Distribution de pression dans le moule à l’étape 2c	106
Figure 4.12 Transmission de la pression exercée sur les fibres P_c aux capteurs.....	107
Figure 4.13 Débit du fluide de compaction selon sa viscosité	109
Figure 4.14 Vitesse du front de résine pour deux pressions du fluide de compaction P_f	112
Figure 5.1 Influence des paramètres sur le temps total d’imprégnation t_p	122
Figure 5.2 Temps de remplissage final en fonction du rapport des pressions de compaction	125
Figure 5.3 Pression du fluide de compaction nécessaire pour compacter le renfort OCF-8610 selon le modèle de compaction de [32]	126
Figure 5.4 Influence du taux de fibres initial V_{f0} sur le temps de remplissage t_p	127
Figure 5.5 Position de croisement de la résine et du fluide de compaction pour les essais 39 et 40 où tous les paramètres de fabrication sont fixes sauf la viscosité η_f du fluide de compaction. La pression du fluide de compaction est $P_f = 2,75 P_{c\ max} = 3,3$ bars.	129
Figure 5.6 Influence des paramètres sur la vitesse de la résine après l’injection.....	133

Figure 5.7 Rapport R_2 en fonction de la pression P_f du fluide de compaction, pour les différentes combinaisons des paramètres viscosité η_f du fluide de compaction et pression P_r d'injection de la résine	135
---	-----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Caractéristiques des moules fabriquées pour le procédé RTM [30].....	10
Tableau 1.2 Caractéristiques des procédés RTM et VARI [10].....	22
Tableau 2.1 Propriétés physiques, mécaniques, thermiques et optiques du PMMA, du PC et du verre, adapté [6, 27].....	46
Tableau 2.2 Contraintes pour le dimensionnement des parois du moule Polyflex.....	47
Tableau 2.3 Dimensions principales du moule et chargement maximal.....	48
Tableau 2.4 Fraction volumique de fibres du renfort OCF-8610 en fonction de l'épaisseur du cadre et du nombre de couches de renfort.....	50
Tableau 2.5 Longueur des joints d'étanchéité du moule.....	53
Tableau 2.6 Caractéristiques essentielles des capteurs de pression à utiliser dans le moule.....	53
Tableau 2.7 Caractéristiques des capteurs choisis.....	55
Tableau 2.8 Caractéristiques du moule Polyflex.....	58
Tableau 2.9 Caractéristiques des composants du moule Polyflex.....	60
Tableau 3.1 Caractéristiques des fluides utilisés pour les expériences du procédé Polyflex.....	63
Tableau 3.2 Caractéristiques du renfort OCF-8610.....	66
Tableau 3.3 Fraction de fibres V_{f0} du OCF-8610 en fonction du nombre de couches.....	66
Tableau 3.4 Propriétés des différentes couches de séparation.....	67
Tableau 4.1 Résultats de compaction des plaques fabriquées par le procédé Polyflex pour les conditions de fabrication déterminées et pour une cavité du moule $H = 3,175$ mm.....	82

Tableau 4.2 Valeurs extrêmes de la pression P_f d'injection du fluide de compaction déterminées pour les manipulations en laboratoire	87
Tableau 4.3 Valeurs extrêmes des paramètres de fabrication utilisées dans la planification d'essais en laboratoire pour l'évaluation du procédé Polyflex	88
Tableau 4.4 Plan d'expériences pour un taux de fibres initial $V_{f0} = 11,2\%$	91
Tableau 4.5 Plan d'expériences pour un taux de fibres initial $V_{f0} = 16,7\%$	92
Tableau 5.1 Résultats du plan d'expériences pour un taux de fibres initial $V_{f0} = 11.2\%$ (2 couches du renfort OCF-8610).....	119
Tableau 5.2 Résultats du plan d'expériences pour un taux de fibres initial $V_{f0} = 16.7\%$ (3 couches du renfort OCF-8610).....	120
Tableau 5.3 Ordre d'influence des paramètres de fabrication.....	139

LISTE DES SYMBOLES

A	Coefficient pour le modèle de compaction de fibres
B	Coefficient pour le modèle de compaction de fibres
D_f	Débit du fluide de compaction
D_m	Débit massique
D_v	Débit volumique
D_z	Débit massique au point zéro de stabilité (« <i>zero point stability</i> »)
e	Erreur de mesure du débitmètre Endress & Hauser 83F15
H	Épaisseur de la cavité du moule
h_0	Épaisseur initiale du renfort avant l'injection de résine
h_c	Épaisseur finale du composite après la fabrication
k	Constante de Kozeny
$[K]$	Tenseur de perméabilité du renfort
L_r	Position finale du front de la résine à l'étape 1 d'injection
n	Nombre de couches du renfort dans le moule
P_{atm}	Pression atmosphérique
P_c	Pression de compaction exercée sur les fibres
$P_{c\ max}$	Pression nécessaire pour que le fluide de compaction compacte le renfort jusqu'à la fraction de fibres V_{fc} .
P_f	Pression exercée par le fluide de compaction
P_r	Pression exercée par la résine
$P_{r,0}$ ou $P_{f,0}$	Pressions mesurées par les capteurs au port d'entrée des fluides injectés (résine, fluide de compaction)
$P_{r\ L/4}$ ou $P_{f\ L/4}$	Pressions mesurées à $L/4$ de la longueur totale de la cavité
$P_{r\ L/2}$ ou $P_{f\ L/2}$	Pressions mesurées à $L/2$ sur la longueur de la cavité

$P_{r\ 3L/4}$ ou $P_{f\ 3L/4}$	Pressions mesurées à $\frac{3L}{4}$ sur la longueur de la cavité
R_2	Rapport des vitesses d'écoulement de la résine à l'étape 2 de compaction. $R_2 = v_{r\ max} / v_{r0}$
t	Durée de temps
t_1	Durée de l'étape 1 d'injection du procédé Polyflex
t_2	Durée de l'étape 2 de compaction du procédé Polyflex
T_m	Température de fusion
t_p	Temps total d'imprégnation des fibres
t_r	Temps de remplissage du procédé RTM
$\vec{v}$	Vitesse superficielle d'un fluide
v_f	Vitesse d'écoulement du fluide de compaction
v_r	Vitesse d'écoulement de la résine
v_{r0}	Vitesse initiale de la résine à l'étape 2 de compaction
$v_{r\ max}$	Vitesse maximale de la résine à l'étape 2 de compaction
V_f	Taux volumique de fibres
V_{f0}	Taux volumique de fibres initial avant l'injection de résine
V_{fc}	Taux volumique de fibres final du composite après la fabrication
V_{cc}	Volume final de la chambre de compaction après la fabrication
V_{r1}	Volume nécessaire de résine injectée à l'étape 1 d'injection
V_{r2}	Volume de résine final après la fabrication
ΔP	Gradient de pression de la résine
ϕ	Porosité du renfort
η_f	Viscosité du fluide de compaction
η_r	Viscosité de la résine
ρ_f	Masse volumique d'un fluide
ρ_s	Masse surfacique d'un renfort
ρ_v	Masse volumique du verre

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Dessins techniques du moule Polyflex fabriqué pour les expériences réalisées en laboratoire.....	148
Annexe B : Calcul de l'erreur de mesure du débitmètre Endress & Hauser.....	158
Annexe C : Calcul de la compaction d'une plaque composite fabriquée par le procédé Polyflex.....	162
Annexe D : Calcul du couple de serrage des boulons.....	164

INTRODUCTION

De nos jours, les matériaux composites à renfort fibreux sont de plus en plus utilisés dans l'industrie. Avec une rigidité et résistance comparables à celles des métaux, les composites présentent des avantages comme une masse volumique plus faible à performance équivalente et une bonne résistance à la corrosion. C'est pourquoi les composites sont de plus en plus employés dans les industries aéronautique, automobile, navale et sportive.

Un composite à matrice polymère thermodurcissable peut être renforcé par des fibres de verre, carbone ou kevlar. La matrice polymère thermodurcissable est généralement une résine polyester insaturé, vinylester ou époxyde. La matrice donne sa consistance au renfort, transmet les charges mécaniques et protège les fibres de l'environnement. Le rôle du renfort est de supporter la charge mécanique appliquée sur la pièce.

Les procédés de mise en œuvre des matériaux composites sont variés. Le procédé étudié appartient à la classe des méthodes de fabrication par injection de résine sur renfort fibreux ou LCM (« *Liquid Composite Moulding* »). Une des méthodes les plus développées est le moulage par transfert de résine ou RTM (« *Resin Transfer Moulding* »). Le principe du procédé RTM consiste à imprégner une préforme de renforts fibreux dans un moule fermé dans lequel une résine polymère est injectée sous pression. Au cours des dernières années la fabrication de pièces composites par RTM a connu un essor dans les industries aéronautique et automobile pour la fabrication des composites à haute performance en petite et moyenne séries. Toutefois, la fabrication de pièces de géométrie complexe par le procédé RTM n'est pas encore économique pour des séries dépassant environ 20 000 pièces par an. Le procédé RTM doit donc être modifié et adapté à cette fin.

L'objectif de ce projet consiste à évaluer une nouvelle méthode d'injection de résine thermodurcissable sur renfort fibreux qui a pour but d'augmenter la cadence de production des pièces composites fabriquées par RTM. La technique Polyflex (en demande de brevet par Univalor) permet une imprégnation rapide et à faible pression de résine dans un moule flexible. À la fin de l'injection, la pièce sera compactée afin d'atteindre un taux de fibres élevé et d'assurer un bon état de surface. Les recherches menées dans le cadre de ce mémoire s'articulent en deux volets principaux :

1. Conception et fabrication d'un moule transparent.
2. Analyse expérimentale du procédé Polyflex.

Ces deux volets sont destinés à valider la diminution du temps d'injection d'une pièce par rapport au procédé RTM pour des pressions constantes d'injection et de compaction. L'injection sera réalisée à température ambiante et l'analyse du procédé dans le cas isotherme.

La conception d'un moule transparent et plat a été réalisée afin de visualiser l'imprégnation d'un renfort par le procédé Polyflex. L'objectif de cette partie consiste à justifier le choix des matériaux employés, à préciser les limites d'utilisation du moule et à produire des dessins techniques pour sa fabrication.

Un plan d'expérience est réalisé dans le but d'analyser expérimentalement le procédé Polyflex à l'aide du moule fabriqué. L'objectif du deuxième volet de la recherche est de déterminer l'influence des paramètres de fabrication sur le temps d'imprégnation du renfort et sur la vitesse d'écoulement de la résine.

Après une étude bibliographique dans le chapitre 1, le chapitre 2 décrit les étapes du procédé Polyflex. Les différents modes d'imprégnation du renfort par la résine sont expliqués avant de préciser les notations générales utilisées dans ce travail. La deuxième partie du chapitre est consacrée à la conception du moule fabriqué pour l'analyse expérimentale du procédé Polyflex. Le but de ce chapitre est de présenter au

lecteur les différentes caractéristiques du procédé Polyflex et du moule utilisé pour sa validation expérimentale.

Le but du chapitre 3 est de présenter les matériaux et l'équipement utilisé pour les expériences avec le procédé Polyflex. La planification et les observations principales des expériences sont expliquées au chapitre 4. Les paramètres de fabrication sont étudiés dans cette section afin de définir leurs plages de valeurs pour l'analyse expérimentale du procédé. Il s'agit ici de la pression d'injection de la résine, de la pression du fluide de compaction, de la viscosité du fluide de compaction, de la quantité de résine injectée et de la fraction de fibres initiale. Le but du chapitre 5 est de présenter et analyser les résultats obtenus sur le temps total d'imprégnation du renfort et sur le rapport entre la vitesse maximale d'écoulement de la résine et la vitesse de la résine initiale pendant l'étape de compaction de la pièce.

Enfin, une conclusion résume les conditions de fabrication nécessaires afin de mettre en œuvre le procédé Polyflex. Les perspectives orientant le travail de recherche à suivre sont aussi discutées. Les Annexes A, B et C contiennent respectivement les dessins techniques du moule Polyflex utilisé, la détermination de l'erreur de mesure du débitmètre employé en laboratoire et le calcul de la compaction d'un composite fondé sur le principe de conservation du volume.

CHAPITRE 1 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Les matériaux composites sont généralement constitués de fibres de haute résistance enrobées dans une matrice polymère. Ces matériaux possèdent des propriétés remarquables pour les fabricants et les consommateurs [24]. Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans de multiples applications industrielles, comme l'aéronautique, l'automobile, l'industrie sportive, etc. Grâce à leur rigidité élevée, leur faible poids et leur bonne résistance à la corrosion, ils remplacent de plus en plus les matériaux longtemps utilisés dans l'industrie, comme les métaux et le bois. Deux exemples de tels remplacements dans le domaine automobile sont fournis par les ressorts à lame et les arbres d'entraînement [34].

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

Les procédés de fabrication des composites sont divers tels que décrits par Mallick [24] par exemple. Certains procédés de fabrication des composites sont adaptés aux grandes séries, comme le « Sheet Moulding Compound » (SMC) ou la pultrusion. Le SMC peut être utilisé pour fabriquer des pièces de géométrie complexe. Il consiste à former par étampage à pression élevée (environ 30 bars) un composite à base de fibres et d'une résine thermodurcissable. Le coût relativement élevé de l'outillage en raison

des pressions importantes requises et la difficulté de contrôler l'orientation des fibres ont limité les applications du SMC à la production de pièces non- structurales [34]. La pultrusion est utilisée pour la fabrication continue de profilés de section constante. Ce procédé consiste à faire passer des fibres imprégnées de résine dans une filière chauffée où la polymérisation a lieu. La pultrusion est limitée à la production de pièces de section constante. Contrairement aux deux procédés précédents, la fabrication de composites par injection de résine sur renfort fibreux permet de produire à bon compte des pièces de géométrie complexe.

Ce chapitre contient une description des différentes méthodes, des moules industriels et des matériaux utilisés pour fabriquer des composites à haute performance par injection de résine. Le modèle d'écoulement unidirectionnel de la résine dans un moule rectangulaire sera aussi introduit à la fin du chapitre.

1.2 Les procédés LCM

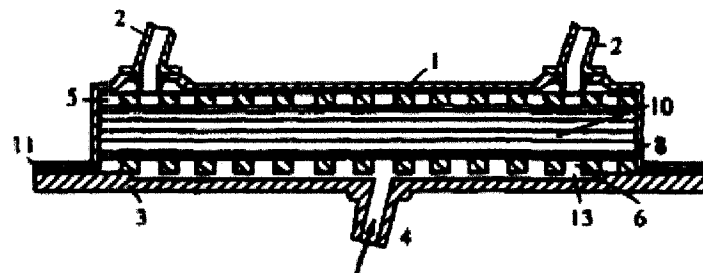
L'injection de résine sur renfort fibreux (« *Liquid Composite Moulding* », ou LCM) désigne un procédé de fabrication des matériaux composites dans lequel on place des fibres préformées dans un moule pour renforcer la structure de la pièce à fabriquer, puis on injecte une matrice polymère dans la cavité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

L'histoire des procédés LCM remonte aux années 40, où la méthode Marco [26] propose l'un de premiers procédés commerciaux de fabrication de composites en fibres de verre [22]. Ce procédé d'infusion à l'aide d'un moule flexible était désigné à fabriquer des coques de bateaux. D'autres travaux [17,37] améliorent ce procédé.

Dans les années 60, des travaux ont été effectués sur l'injection sous pression de résines à travers un renfort fibreux disposées dans un moule rigide [30].

Le procédé RTM (« *Resin Transfer Moulding* ») est sans doute la méthode LCM la plus couramment utilisé par l'industrie. La fabrication de pièces utilisant comme renfort des mats de fibres aléatoires a commencé dans les années 70 [9]. Le procédé RTM continue d'être employé pour produire des pièces avec une meilleure répétitivité et des qualités géométriques comparées aux procédés d'injection à moule flexible. La fabrication de composites à haute performance par le procédé RTM commence dans les années 80 avec la fabrication de composantes aéronautiques comme les pales de moteurs à propulsion [28].

Le besoin de produire plus rapidement des composites par injection a conduit au développement de résines de plus basse viscosité et de renforts de porosité élevée qui conviennent plus aux procédés LCM. Au début des années 90, une nouvelle méthode d'infusion de résine sous un film plastique a été brevetée sous le nom de SCRIMP (« *Seeman Composites Resin Infusion Moulding Process* ») [36]. Ce procédé permet de produire des pièces de grande taille, de bonne qualité et de taux volumique de fibres élevé. Cependant ce procédé reste lent, même si le temps de remplissage a pu être amélioré grâce à un dispositif de distribution de résine. La Figure 1.1 illustre le procédé SCRIMP breveté en Europe.



1	Vacuum bag	8,9	Porous peel ply
2	Vacuum connection	10	Fabric
3	Rigid tool	11,12	Tape
4	Resin inlet	13	Mould space
5,6,7	Resin distribution media	14	Helical spring

Figure 1.1 Schéma procédé SCRIMP [44]

Il existe plusieurs variantes de procédés LCM, dont les plus courants sont le RTM (« *Resin Transfer Moulding* ») et le VARI (« *Vacuum Assisted Resin Infusion* »). Les paragraphes suivants décrivent brièvement ces procédés LCM, ainsi que quelques nouvelles variantes destinées à augmenter la vitesse de production des composites

1.3 RTM

Le principe du procédé RTM est décrit à la Figure 1.2. À l'intérieur d'un moule rigide, on place un renfort préformé (par exemple, un tissu en fibres de verre). Cette opération est appelée drapage. L'injection de résine de faible viscosité se fait à basse pression (2 à 4 bars). Une fois l'injection terminée, la polymérisation (ou cuisson) a lieu avant le démoulage de la pièce.

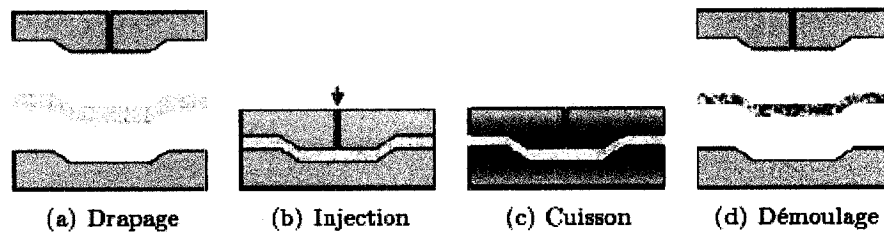


Figure 1.2 Schéma du procédé RTM

À l'étape d'injection, une pression de vide peut être appliquée à l'évent afin de diminuer le temps de remplissage et de réduire la présence de bulles d'air dans la pièce.

Le procédé RTM est avantageux pour les raisons suivantes :

- la cadence de production peut être adaptée pour plus de 10 000 pièces par année ;
- la réalisation de pièces de géométrie complexe ;
- les émissions de styrène sont limitées puisque la fabrication se fait à moule fermé ;
- les propriétés mécaniques sont uniformes étant donné un taux de fibres fixe dans un moule rigide ;
- la qualité de surface des pièces peut reproduire celle du moule ;
- le coût du renfort est faible comparé aux préimprégnés.

Comparé aux procédés de fabrication des composites à grande série comme le SMC, le procédé RTM demande moins d'investissement en outillage [7]. Le coût d'un moule et des outillages varient selon le taux de production des pièces. Au fur et à mesure que la technologie RTM se développe, on conçoit des moules RTM de plus en plus coûteux et adaptés pour les grandes séries [4].

Dans la production de composites à base de résine polyester insaturé, les émanations de styrène sont très nocives pour les opérateurs. Le procédé RTM, qui utilise un moule rigide, améliore la sécurité au travail et respecte les normes environnementales. Cependant, il faut mentionner que le procédé RTM ne permet pas de produire facilement et assez rapidement des pièces structurelles dont le taux volumique de fibres est élevé (de l'ordre de 40% à 60%).

1.3.1 Moules industriels

Le procédé RTM permet de fabriquer des pièces de géométrie complexe et d'une taille limitée par la résistance du moule. Le moule doit supporter la pression de fermeture (pression exercée par le renfort fibreux compacté) et la pression d'injection (de la résine qui remplit la cavité). Comme l'injection de résine dans les procédés LCM est effectuée à basse pression, les moules sont peu coûteux. Les moules RTM sont relativement simples et d'un coût beaucoup plus faible que les moules pour l'injection des thermoplastiques par exemple.

Il existe différents types de moules dans le procédé RTM :

- moules en polymère coulé [3],
- moules en plastique renforcé de fibres,
- moules avec surface électroformée,
- moules en céramique,
- moules en aluminium,
- moules en acier,
- moules en fonte.

Le choix du moule dépend des paramètres suivants [30] :

- type de résine injectée,
- tolérances géométriques et dimensionnelles de la pièce à fabriquer,

- aspect mécanique des pièces,
- qualité de surface des pièces,
- pression de fermeture du moule et de la résine,
- température de polymérisation,
- quantité de pièces à fabriquer.

Le Tableau 1.1 mentionne quelques caractéristiques des moules RTM.

Tableau 1.1 Caractéristiques des moules fabriquées pour le procédé RTM [30]

Types de moules	Résistance	Finis de surface	Durée de vie	Température maximale d'utilisation	Taille des pièces
Moules en polymère coulé	Résistants aux faibles impacts. Les arêtes sont sensibles au piquage (chipping).	Pas aussi bon que les moules polis en métal.	Utilisés surtout pour le prototypage, donc pour une courte durée de vie.	Utilisés surtout pour des températures inférieures à 100°C.	La plupart des moules sont usinés et sont de petite taille.
Moules en plastique renforcé de fibres	Ils peuvent être très robustes.	Peuvent utiliser du gel coat, donc le fini de surface peut être excellent.	Varie selon l'utilisation, mais en général les moules font plus de 200 cycles.	Dépend de la résine utilisée. En général pour températures inférieures à 60°C. Moules en fibre de carbone et résine époxyde supportent 180°C.	Peuvent produire des pièces de grande taille, mais il faut faire attention aux déformations du moule.
Moules avec surface électroformée	Très résistants aux endommagements.	Excellent.	Durée de vie très longue.	Au dessus de la température de cuisson des résines utilisées en RTM.	En général la taille maximale est de l'ordre de grandeur d'une baignoire.
Moules en céramique	Résistants aux égratignures, mais peu résistants aux impacts.	Certains moules utilisent du gel coat ou des polymères sur la peau.	La durée de vie est uniquement limitée par l'endommagement par impact.	Au dessus de la température de cuisson des résines utilisées en RTM.	Le poids excessif est une limitation à la production de grands moules.
Moules en aluminium	Matériau très ductile, susceptible aux égratignures.	Ils peuvent être polis et procurer un bon fini de surface.	Le moule ne s'use pas mais il doit être poli constamment.	Au dessus de la température de cuisson des résines utilisées en RTM.	Limitées à la taille des machines d'usinage.
Moules en acier	Très bonne résistance mais le moules sont très chers.	Excellent fini de surface, mais le matériau est susceptible à l'humidité.	Pratiquement infinie.	Au dessus de la température de cuisson des résines utilisées en RTM.	Similaire à celles des moules en aluminium.
Moules en fonte	Excellente résistance.	Pas aussi bon que les moules en aluminium.	Durée de vie très longue.	Au dessus de la température de cuisson des résines utilisées en RTM.	Le poids excessif est une limitation pour produire de grands moules.

Le procédé RTM permet de fabriquer des pièces de géométrie complexe est il peut en effet intégrer des inserts métalliques et des structures sandwich. Cependant, le procédé RTM doit respecter la forme des pièces à fabriquer. La Figure 1.3 montre qu'une dépouille d'au moins 2 % au niveau de l'axe moyen permet un démoulage sans difficulté [7]. De plus, les rayons de courbure très faibles (inférieurs à 2 mm) entraînent une mauvaise répartition du renfort, ce qui crée des zones de concentration de contraintes dans la pièce (Figure 1.4).

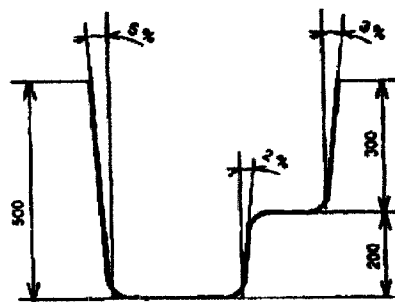


Figure 1.3 Angles de dépouille permis dans les moules RTM [7]

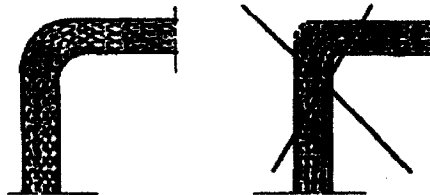


Figure 1.4 Exemples d'un bon est d'un mauvais rayon de courbure dans un moule RTM [7]

1.3.2 Résines

Les résines les plus utilisées par le procédé RTM sont :

- polyester insaturé,

- vinylester.
- époxyde.
- bismaleimide.

Toutes ces résines sont thermodurcissables, c'est-à-dire que le durcissement (réticulation) des résines se produit à température élevée par une réaction exothermique. La résine la plus utilisée par les procédés LCM est le polyester insaturé, et pour des applications aéronautiques, la résine époxyde [34]. Les polyesters insaturés sont très utilisés grâce à leur faible coût, leur haute résistance en traction, leur facilité de mise en forme et leur bonne résistance à la corrosion [5]. Cependant ces résines sont inflammables et ne supportent pas bien la chaleur humide. Les époxydes sont très utilisées comme revêtement de surfaces, comme adhésifs et pour la fabrication de composites à haute performance. C'est une résine qui coûte environ quatre fois le prix d'une résine polyester, mais possède de meilleures propriétés mécaniques et thermiques [34]. Les époxydes sont des résines de viscosité plus élevée, mais elles sont à faible taux de retrait (environ 3 %) comparé au 8 % des résines polyesters [24].

Les résines utilisées dans le procédé RTM doivent remplir les exigences suivantes :

- faible viscosité et temps de gel assez long pour permettre l'imprégnation totale des fibres,
- bonnes caractéristiques de polymérisation pour obtenir un temps de cycle raisonnable,
- bonnes propriétés mécaniques en fonction du cahier de charges.

Résine polyester insaturé

Les résines polyesters insaturés (UP : Unsaturated Polyester) sont des polymères obtenus par une réaction de polycondensation entre un di-acide et un di-alcool [45]. Le résultat de cette polycondensation forme le polyester insaturé et de l'eau. Le polyester

est ensuite dissous en général à un taux entre 20 et 50 % dans une solution de styrène, utilisé comme agent de réticulation peu coûteux.

Il existe plusieurs types de polyester insaturés :

- orthophtaliques : usage courant (piscines, réservoirs)
- isophtaliques : possède de bonnes propriétés mécaniques (meilleure tenue aux chocs)
- « *low profile* » : résines à bas taux de retrait

La réticulation est assurée par l'apport d'un système catalytique approprié. Les systèmes catalytiques sont composés de catalyseurs, accélérateurs et inhibiteurs. Les catalyseurs assurent que la réticulation ou polymérisation, ait lieu. Les accélérateurs activent la décomposition des catalyseurs. Les inhibiteurs retardent le temps de polymérisation.

a) Polymérisation

C'est à cette étape que la résine est durcie dans le moule [24]. Sous l'effet de l'accélérateur, le catalyseur se décompose en radicaux libres qui possèdent un électron libre sur un atome donné. Par des mécanismes de réduction, le taux de réaction augmente avec l'augmentation de radicaux libres. Les radicaux libres se décomposent après avoir consommé l'inhibiteur pour réagir avec le monomère de styrène. Ensuite, le styrène réagit avec la résine polyester pour former des liaisons de telle sorte qu'un réseau tridimensionnel de réticulation est formé. La Figure 1.5 décrit la réaction de polymérisation.

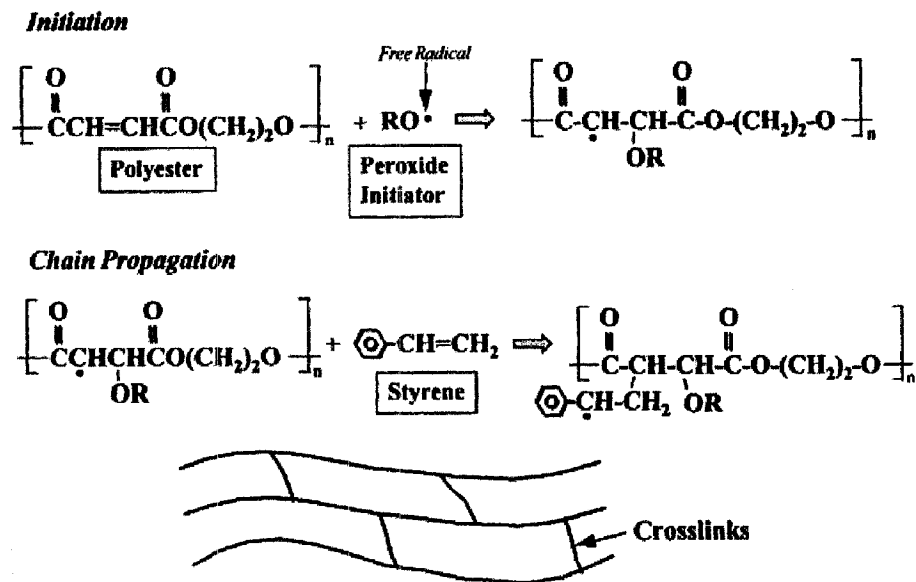


Figure 1.5 Réaction de polymérisation [39]

1.3.3 Renforts fibreux

Il existe différents types de matériaux pour les renforts fibreux : le verre, le carbone et l'aramide sont les plus souvent utilisés par les procédés LCM. Sans doute le plus fréquemment rencontré est le verre en raison de son bas prix. Les caractéristiques des renforts sont variées :

- renforts à fibres unidirectionnelles (UD),
- renforts à fibres bidirectionnelles (tissus),
- mats à fibres coupées,
- mats à fibres continues (par exemple, l'OCF-8610).

Le choix du type de renfort se fait en fonction de différents critères :

- dimension de la pièce à fabriquer,
- fraction volumique de fibres (V_f),
- préformage du renfort,
- propriétés mécaniques,
- aspect de surface,
- viscosité de la résine,
- aspect économique.

La Figure 1.6 montre la résistance longitudinale d'un composite verre-époxyde pour différents taux volumiques de fibres, selon les types de renfort utilisés.

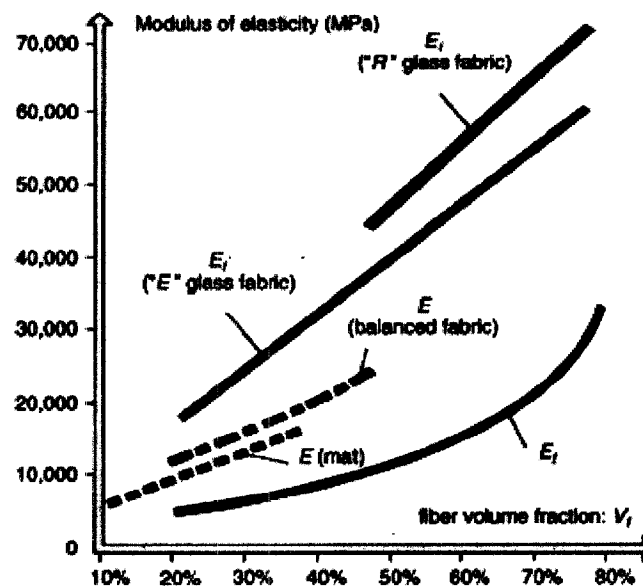


Figure 1.6 Module d'élasticité d'un composite verre-époxyde pour différents taux de fibres [16]

a) Tissus toile

Le tissu à fibres bidirectionnelles est constitué d'un enroulement de mèches (« *roving* ») et composé d'une chaîne (fils placés dans le sens de la longueur du tissu) et d'une trame (fils placés dans la largeur du tissu). La chaîne et la trame s'entrecroisent alternativement. Les tissus bidirectionnels les plus utilisés sont décrits à la Figure 1.7.

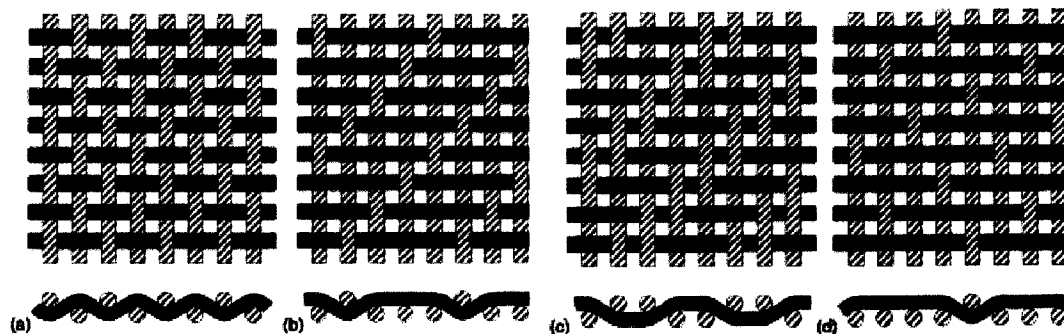


Figure 1.7 Armures des tissus bidirectionnels : a) armure toile ou taffeta ; b) armure tissée 3 x 1; c) armure tissée 2 x 2; d) satin à 5 mailles [34]

Les composites renforcés par des tissus bidirectionnels peuvent atteindre des fractions volumiques de fibres V_f d'environ 60 % [23]. Il existe aussi des tissus à armure unidirectionnelle. Ce type de tissu est facile à fabriquer et permet d'augmenter le taux d'injection de la résine dans la direction de la chaîne [30].

b) Mats à fibres coupées

Les mats à fibres coupées sont composés de fibres de longueur variant entre 5 et 10 cm [16]. Les fibres sont déposées aléatoirement dans le plan et maintenues en place par un liant [24]. Les composites à mats de fibres coupées ne sont pas aussi résistants que ceux renforcés par des tissus de type toile, mais ils présentent en général l'avantage d'être isotropes.

c) Mats à fibres continues

Les mats à fibres continues (Figure 1.8) sont constitués de longs fils disposés de façon aléatoire et agglomérés par un agent liant. Ce sont des renforts à bas prix. La résine peut être injectée rapidement dans ce type de renfort en raison de sa porosité élevée. Une fraction de fibres V_f de l'ordre de 30 % est couramment rencontrée pour les composites à haute performance renforcés par mats de verre à fibres continues.

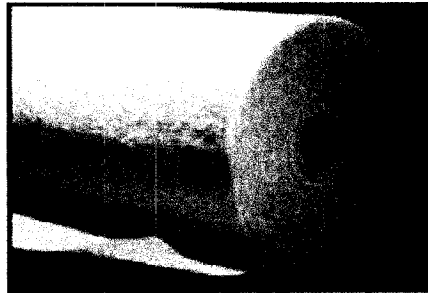


Figure 1.8 Mat à fibres aléatoires et continues

Agents liants

Les renforts sont « *préformés* » à l'aide d'agents liants qui permettent de tenir le renfort en place pour qu'il reste facile à manipuler pour ensuite le placer dans les moules. Les deux types d'agents les plus utilisés sont les suivants [30] :

1. Agents collants (« *tackifiers* »). Ils sont utilisés dans les procédés de fabrication manuelle dits de contact (« *hand lay-up* »). Ce sont en général des résines époxydes.
2. Liants thermoplastiques. Ces liants se fondent à haute température et sont solides à température ambiante. Les proportions de ces agents liants varient entre 4 et 8 % du poids des fibres [25].

1.3.4 Préformage

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

La préforme découpée et cousue (Figure 1.9a) est surtout utilisée dans l'industrie aéronautique, où les coutures du tissu sont définies préalablement par une analyse par éléments finis [25]. Cette approche est employée surtout pour les prototypes car elle s'avère très coûteuse en termes de temps de préparation.

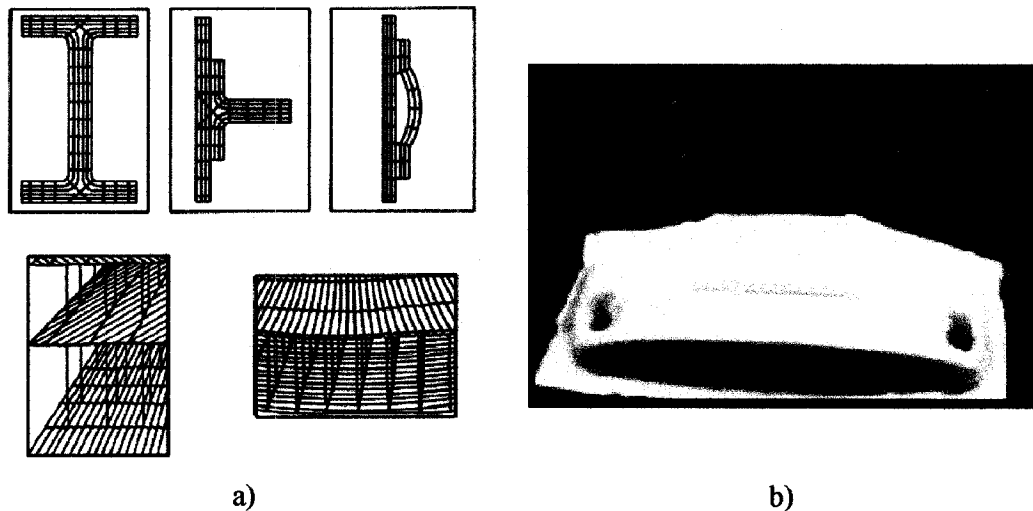


Figure 1.9 Types de préformage : a) par coupe et couture [25] ; b) par thermoformage [38]

La technique de préformage à chaud, ou *thermoformage* (Figure 1.9b), est employée pour la fabrication rapide de composites. Le renfort le plus fréquemment rencontré est le mat à fibres continues. Le thermoformage consiste à chauffer un renfort et à le compacter par estampage à l'aide d'une presse et d'un moule ayant la forme de la pièce. Un agent liant thermoplastique recouvre les fibres et retient la nouvelle forme du renfort après refroidissement. La température de formage pour consolider un

composite thermoplastique est légèrement inférieure à celle de fusion T_m du polymère [24]. Pour ce qui est du mat de fibres continues Unifilo U750 (Vetrotex, France), amplement utilisé pour le préformage et la fabrication des composites par le procédé RTM, la température de formage peut varier entre 190 et 230°C. Remarquer que la température de fusion T_m de l'agent liant utilisé dans le mat U750 est d'environ 265°C. La pression appliquée sur la presse peut varier entre 0.5 et 8 bars. Les variations de pression et de température dépendent du volume de fibres à compacter, ainsi que de la géométrie de la pièce.

1.3.5 Perméabilité

La perméabilité est une mesure de la propriété d'un matériau poreux de permettre l'écoulement d'un fluide. Les premiers travaux sur la perméabilité des milieux poreux sont attribués à Henry Darcy (1803-1858) qui a défini la constante de proportionnalité K liant la vitesse de filtration au gradient de charge hydraulique et établit ainsi la loi de Darcy en 1856 [11]. Dans la dernière décennie, plusieurs chercheurs ont consacré leurs travaux sur la recherche analytique et expérimentale de la perméabilité dans le domaine de l'écoulement de la résine dans un milieu poreux. Bien qu'elle soit considérée constante dans le cas des renforts isotropes, la perméabilité est représentée en général par un tenseur dans les trois directions principales orthogonales.

Le modèle analytique de perméabilité le plus répandu a été développé en 1927 pour déterminer l'écoulement de l'eau dans un groupe de canaux dont la section variait. Le modèle de perméabilité de Kozeny-Carman est de nos jours très utilisé pour modéliser la perméabilité de tissus et de renforts de fibres unidirectionnelles [35] :

$$K = k \cdot \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \quad (1.1)$$

où k est la constante de Kozeny. Cette équation repose sur un grand nombre d'hypothèses et ne permet pas de modéliser avec précision la perméabilité des milieux anisotropes. Par contre, ce modèle peut être justifié dans le cas unidimensionnel. La constante de Kozeny est déterminée expérimentalement et le modèle n'est valide que pour une gamme étroite de fractions de fibres V_f .

Par conséquent, on a recours à la détermination expérimentale de la perméabilité. Une méthode de caractérisation de la perméabilité plane des renforts a été proposée [13]. La perméabilité selon les trois directions principales a été aussi caractérisée expérimentalement [15]. La perméabilité d'un renfort reste une valeur très importante dans la simulation numérique des procédés de fabrication de matériaux composites par injection de résine.

1.3.6 Modèle d'écoulement de résine

L'injection de la résine est gouverné par la loi de Darcy, qui décrit l'écoulement d'un fluide en milieu poreux. La loi de Darcy précise que la vitesse superficielle $\vec{v}$ (appelée vitesse de Darcy) d'un fluide est proportionnelle au gradient de pression ∇P entre l'entrée et le front de résine :

$$\vec{v} = -\frac{[K]}{\eta} \nabla P \quad (1.2)$$

La constante de proportionnalité est $\frac{[K]}{\eta}$, où $[K]$ est le tenseur de perméabilité du renfort et η est la viscosité newtonienne de la résine. À cette équation, il faut associer une loi de conservation de la masse de résine pendant l'écoulement :

$$\nabla \vec{v} = 0 \quad (1.3)$$

L'équation de conservation de masse pour un écoulement unidirectionnel devient :

$$\frac{dv_x}{dx} = 0 \quad (1.4)$$

Pour un écoulement unidirectionnel, la résine aura une vitesse réelle v_r , qui tient compte de la porosité ϕ du milieu :

$$v_r = \frac{v_x}{\phi} = -\frac{K}{\phi \eta} \frac{dp}{dx} \quad (1.5)$$

1.4 VARI

Dans le procédé VARI (« *Vacuum Assisted Resin Infusion* »), un seul côté du moule est rigide et le renfort est recouvert par une bâche plastique. Les fibres sèches sont placées sur la matrice (ou poinçon) rigide du moule, puis on recouvre la préforme avec la bâche plastique et on applique une pression du vide de façon à ce que la résine injectée puisse imprégner les fibres par infusion (Figure 1.10). L'injection est réalisée à basse pression et la résine pénètre le renfort grâce au gradient de pression entre la pression atmosphérique du réservoir de résine et la pression du vide tiré par la pompe.

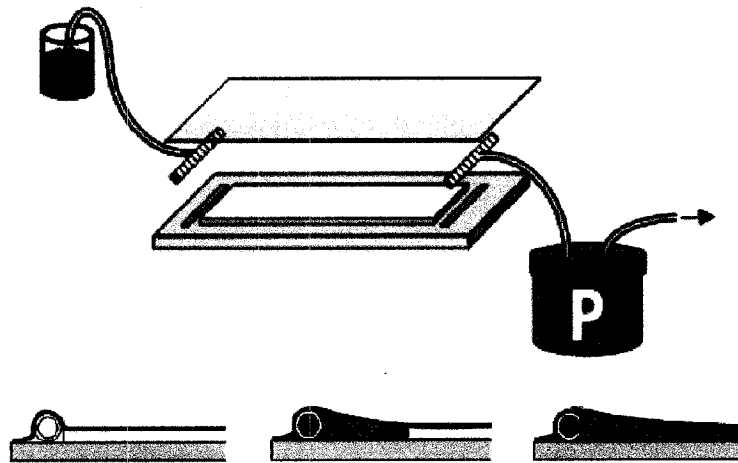


Figure 1.10 Principe du procédé VARI

L'infusion sous vide ou VARI (encore appelé VARTM, RIFT, VI) est utilisée pour la fabrication de composites de grande taille, mais les cadences restent faibles. Par rapport au procédé RTM, le coût de l'outillage est très faible. Le temps de remplissage est en général très lent comparé au procédé RTM parce que la pression de vide est le seul moyen permettant de faire avancer la résine. Plusieurs nouveaux procédés de fabrication à moule flexible ont été développés en vue d'offrir de meilleurs temps de remplissage, comme le procédé SCRIMP par exemple. Un inconvénient majeur de cette méthode d'injection réside notamment dans la variabilité de l'épaisseur de la pièce finale. L'épaisseur de la pièce, et par conséquent le taux volumique de fibres, dépendent de la compressibilité et la relaxation du renfort sous pression et de son interaction avec la bâche plastique [43]. Le Tableau 1.2 décrit quelques avantages et inconvénients comparés des procédés RTM et VARI.

Comparé aux procédés LCM à moule rigide, le procédé VARI possède les avantages suivants [41] :

- On peut utiliser les moules utilisés dans le moulage à la main (« *hand lay-up* ») avec des ajustements mineurs.
- Peu d'investissements sont requis pour l'équipement.
- On peut fabriquer des pièces de très grande taille.

Tableau 1.2 Caractéristiques des procédés RTM et VARI [10]

Procédé LCM	Avantages	Inconvénients
RTM Classique	Production de pièces de géométrie complexe Procédé sécuritaire : pas de contact de résine étant donné un moule rigide fermé Les deux faces de la pièce à fabriquer possèdent un bon fini de surface	Nécessite beaucoup de temps de préparation Généralement limité à la fabrication de pièces de taille petite et moyenne Injection lente à taux de fibres élevé
VARI	Procédé moins cher que le RTM classique : Fabrication d'une seule paroi du moule avec une rigidité plus faible Fabrication de pièces de grande taille Nécessite moins de temps de préparation que le procédé RTM	Potentiel de variation d'épaisseur Injection lente Difficile de contrôler la pression de vide

1.4.1 Compaction des renforts

La compaction des renforts a été analysée afin de déterminer l'épaisseur finale des pièces dans les procédés LCM à parois flexible [44]. La modélisation de l'écoulement de la résine dans les procédés de type VARI (« *Vacuum Assisted Resin Infusion* ») tient compte maintenant de la compaction ainsi que de la perméabilité et la saturation des fibres [1, 47]. Les effets de compaction en fonction de la fraction de fibres ont été étudiés par plusieurs chercheurs [18,8]. Un modèle empirique fondé sur une loi de

puissance peut être employé pour évaluer la fraction de fibres d'un renfort pour une pression de compaction donnée [32] :

$$V_f = AP_c^B \quad (1.6)$$

où P_c correspond à la pression de compaction exercée sur le renfort et V_f la fraction volumique de fibres résultante. 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 d'un renfort spécifique. Noter que pour les procédés d'infusion flexible, la pression P_c représente la différence locale entre la pression atmosphérique et la pression de la résine :

$$P_c = P_{atm} - P_r \quad (1.7)$$

Pour un nombre n de couches dans la cavité du moule, la fraction volumique V_f de fibres peut être calculée de la façon suivante :

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

où ρ_s correspond à la masse surfacique [kg/m^2] d'une couche de renfort poreux et ρ_v à la masse volumique [kg/m^3] de la fibre à 0 % de porosité. À partir des équations (1.6) et (1.8), on peut en déduire l'épaisseur h du renfort comprimé en fonction de la pression P_c de compaction :

$$h = \frac{\rho_s}{\rho_v} \frac{n}{AP_c^B} \quad (1.9)$$

1.5 Dernières technologies d'injection

L'industrie demande de plus en plus d'augmenter les cadences de production des matériaux composites. De nouvelles résines de basse viscosité et de nouveaux renforts fibreux ont été développés pour satisfaire les besoins des fabricants. Les nouvelles techniques d'injection sont parfois complexes et leur mise en oeuvre s'avère difficile. Dans la plupart des cas, l'injection ou l'infusion est réalisée sous une paroi flexible. Le contrôle du taux volumique de fibres représente donc un aspect très important. Remarquer que Larsen et al. proposent des exemples de caractérisation du taux de fibres pour une variante du procédé SCRIMP [21]. Les caractéristiques les plus recherchées dans les nouvelles technologies d'injection sont :

- l'imprégnation rapide des fibres,
- la possibilité de fabriquer des composites à taux volumique de fibres élevé,
- la réduction du coût de l'outillage,
- la réduction du temps de préparation (et de la main d'œuvre en général),
- la réduction des déchets de matériaux non recyclables.

La fabrication des moules RTM avec un outillage modulaire continue d'attirer l'industrie aéronautique afin de produire pièces de géométrie différente avec une seule game d'outillage [12]. Selon l'auteur de cet article, le coût d'investissement des moules peut être réduit de 60 % par cette approche.

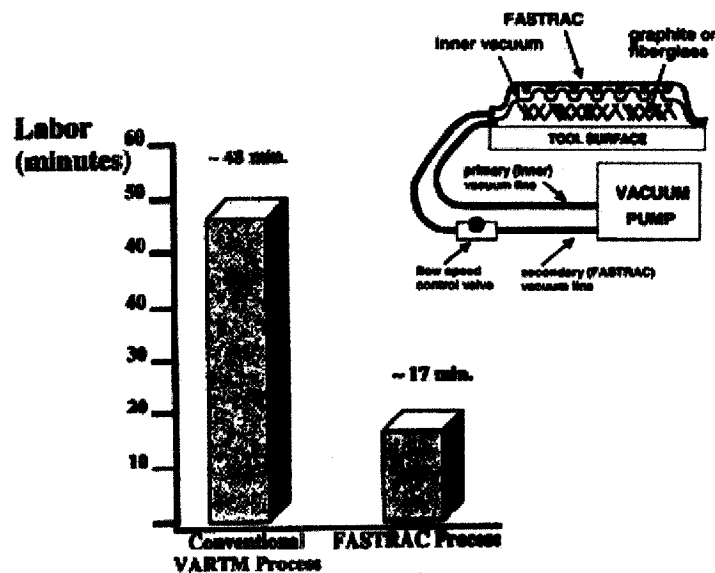


Figure 1.11 Diminution de la main d'œuvre par le procédé Fastrac [31]

Un autre aspect important de réduction des coûts réside dans le temps de préparation. Pour citer un exemple, une technique d'injection est développée au Centre aérospatial allemand dans le but de réduire le temps de préparation et le coût des matériaux utilisés pour les composites à haute performance fabriqués en autoclave [19]. Une autre technique développée par l'armée américaine, appelée Fastrac, est montrée à la Figure 1.11. Ce procédé d'infusion propose une réduction de la main d'œuvre comparée au procédé VARI, en plus de réduire les temps de cycle et les déchets de matériel périssable [31].

L'aspect environnemental doit être pris en considération dans le but d'éviter des déchets comme les bâches plastiques, les lignes d'injection (et d'évent) ou les dispositifs de distribution qui sont saturés de résine durcie après la fabrication de chaque pièce. Il existe de nouvelles techniques dans lesquelles des milieux de distribution sont incorporés de manière astucieuse dans le moule [46,20]. En plus de réduire les déchets causés par les dispositifs de distribution de résine, des milieux de

distribution (Figure 1.12) incorporés aux moules permettent d'imprégner rapidement le renfort et d'éviter les coûts liés aux frais de brevet pour le procédé SCRIMP. Par exemple, des technologies comme l'infusion avec deux parois flexibles a démontré la capacité de fabriquer de façon répétitive des pièces de bonne qualité avec une réduction de coût de 24% comparé au procédé SCRIMP [40].

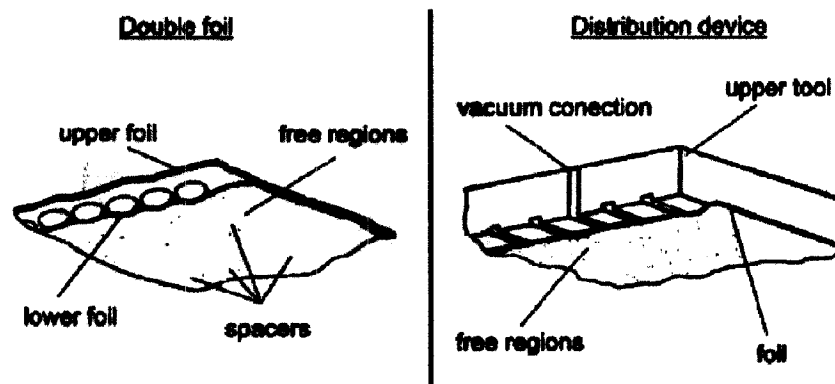


Figure 1.12 Exemples de fabrication par infusion sans déchets [20]

1.6 Conclusion

On a présenté quelques procédés de fabrication de composites par injection de résine sur renfort fibreux. On remarque que le procédé RTM, ou injection en moule rigide, est très utilisé par l'industrie, mais vite limité par la taille des pièces et par le temps de fabrication qui augmente avec le taux de fibres du composite. Plusieurs techniques d'injection ont été développées dernièrement afin de produire plus rapidement des pièces à taux volumique de fibres élevé. Le but de ce travail consiste à évaluer une nouvelle méthode d'injection flexible permettant d'imprégner rapidement un renfort à taux de fibres élevé et adaptée pour la fabrication à grande échelle de pièces composites à haute performance.

CHAPITRE 2 : LE PROCÉDÉ POLYFLEX

2.1 Introduction

Ce chapitre décrit le nouveau procédé d'injection flexible, appelé Polyflex, qui permet de fabriquer des matériaux composites à haute performance constitués d'une matrice polymère renforcée par des fibres en verre, carbone, kevlar, etc..

Le procédé Polyflex vise à améliorer la productivité des composites fabriqués par injection sur renforts. Les avantages de ce procédé par rapport au procédé RTM (« *Resin Transfer Moulding* ») sont les suivants :

- réduction du temps de remplissage,
- contrôle du taux volumique des fibres (et de l'épaisseur du composite).

Cette nouvelle technologie permet de réduire le temps de fabrication en appliquant une pression uniforme sur la pièce pendant le remplissage des fibres. On envisage de contrôler l'épaisseur du composite en injectant une certaine quantité de résine et en ajustant la pression appliquée sur la pièce durant la fabrication. Le procédé Polyflex, dont l'étude préliminaire fait l'objet de ce travail, sera mis en oeuvre afin d'atteindre les objectifs mentionnés ci-haut. Les étapes du procédé Polyflex sont décrites ci-dessous.

Après la description générale des différentes étapes du procédé, on explique d'abord les deux types d'écoulement de résine qui entrent en jeu dans l'imprégnation des fibres. Les notations utilisées pour décrire le procédé sont présentées. La fin du chapitre 2 traite sur la conception du moule utilisé pour l'évaluation préliminaire du procédé Polyflex.

2.2 Description du procédé

Le procédé Polyflex consiste à injecter une résine thermodurcissable à travers un renfort fibreux contenu dans un moule rigide dont la cavité est composée de deux chambres séparées par un film plastique. Le renfort et la résine se trouvent dans la chambre d'injection dans la partie inférieure de la cavité tandis que la chambre de compaction est remplie par un fluide qui sert à appliquer une pression uniforme sur le composite pendant l'imprégnation du renfort. Une description plus détaillée des différentes étapes du procédé Polyflex est donnée ci-dessous.

2.2.1 Étapes préliminaires

Mise en place des composantes du moule

Tel que montré à la Figure 2.1, le renfort est disposé dans la cavité du moule, puis un film plastique est placé sur le renfort et le moule est fermé. On remarque à la Figure 2.2 que lorsque le moule est fermé, l'épaisseur initiale du renfort h_0 contient une fraction volumique de fibres initiale V_{f0} .

Mise sous vide

Ensuite, une pression de vide est appliquée à partir d'une extrémité du moule, tel que décrit par la Figure 2.3. À l'aide du film de séparation, qui assure l'étanchéité de la cavité, le vide appliqué entraîne une compaction du renfort fibreux.

2.2.2 Étape 1 : Injection de la résine

Dans la première étape de la séquence de fabrication, une certaine quantité de résine est injectée sous pression dans la cavité du moule, tel qu'indiqué à la Figure 2.4. Puisque la pièce composite finale aura une épaisseur h_c plus petite que h_0 , la résine remplit uniquement une fraction de la cavité du moule. On fait l'hypothèse que, près

du port d'injection de résine, le mélange renfort-résine atteint l'épaisseur de la cavité, même si la pression du vide entraîne une compaction du renfort.

2.2.3 Étape 2 : Compaction du composite

Cette étape commence tout de suite après fermeture du port d'injection de résine où un fluide non réactif est injecté sous pression dans la chambre de compaction au dessus du film de séparation. Lorsque le fluide non réactif remplit la chambre de compaction, son évent est fermé pour faciliter la compaction homogène du renfort. L'étape 2 de compaction se termine lorsque tout le renfort est imprégné de résine. Cette opération a pour effet de favoriser l'imprégnation du renfort qui n'est pas encore imprégné (Figure 2.5), en plus de compacter le mélange renfort-résine (Figure 2.6) afin de contrôler la fraction de fibres finale V_{fc} .

2.2.4 Consolidation et polymérisation du composite

Lorsque le renfort est totalement imprégné, l'évent de la résine est fermé et la période de consolidation commence. L'étape de consolidation comprend le temps nécessaire pour assurer un équilibre de la pression et obtenir une épaisseur uniforme sur toute la surface du composite. Entre-temps, le moule peut être chauffé et la résine polymérise.

2.2.5 Démoulage de la pièce finie

Après l'étape de réticulation, le fluide de compaction est évacué pendant que le moule se refroidit. On ouvre ensuite le moule et on détache le film de séparation du composite. La fabrication du composite se termine par le démoulage de la pièce finie.

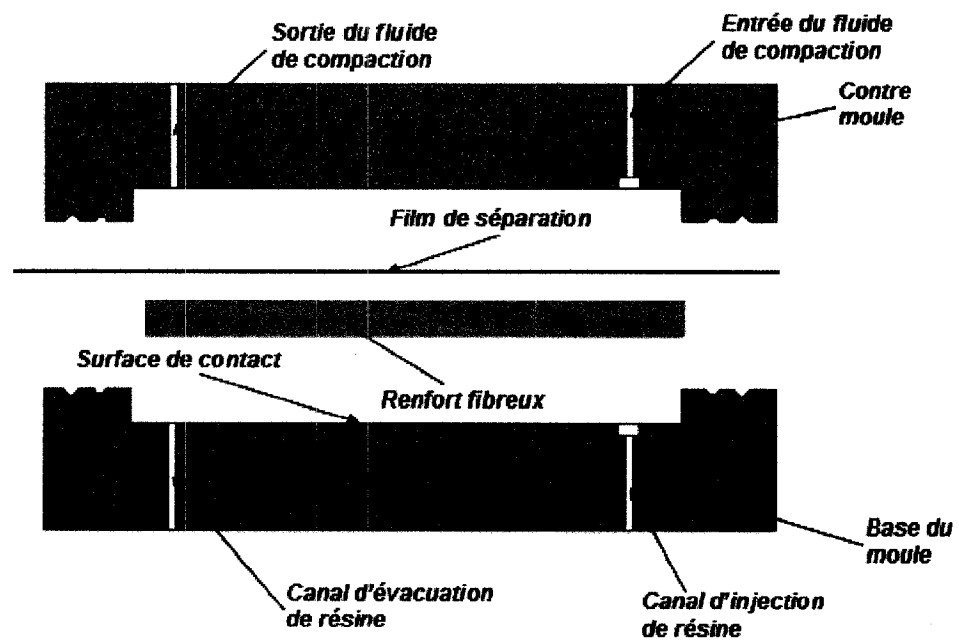


Figure 2.1 Description des différentes composantes d'un moule Polyflex

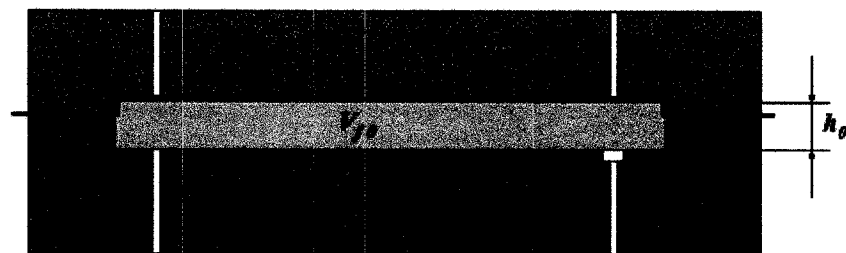


Figure 2.2 Mise en place des composantes et fermeture du moule

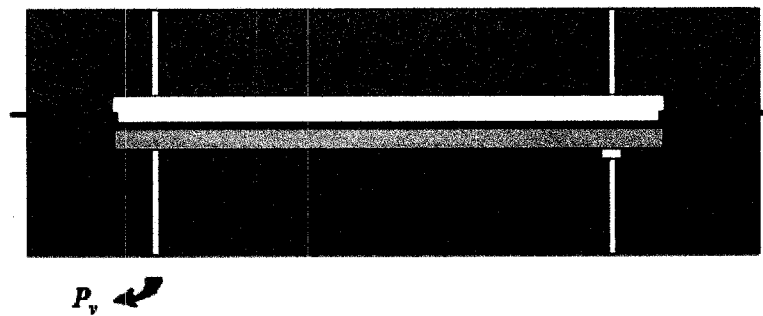


Figure 2.3 Mise sous vide du renfort

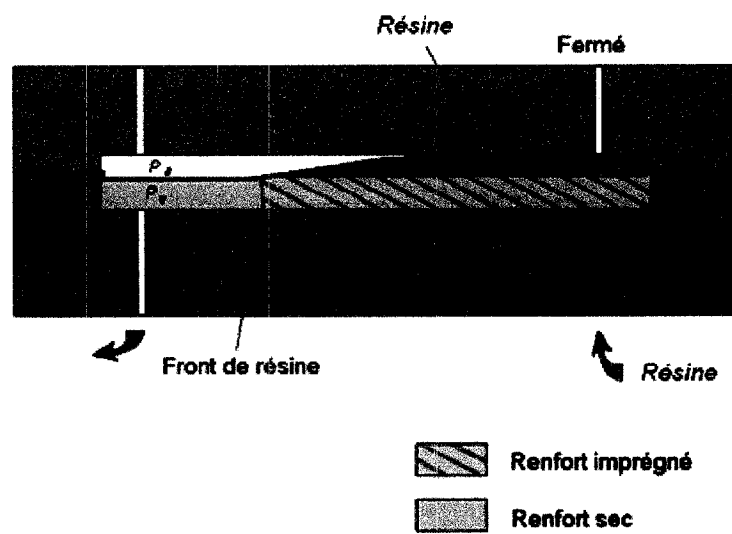


Figure 2.4 Étape 1 : Injection de la résine dans la cavité

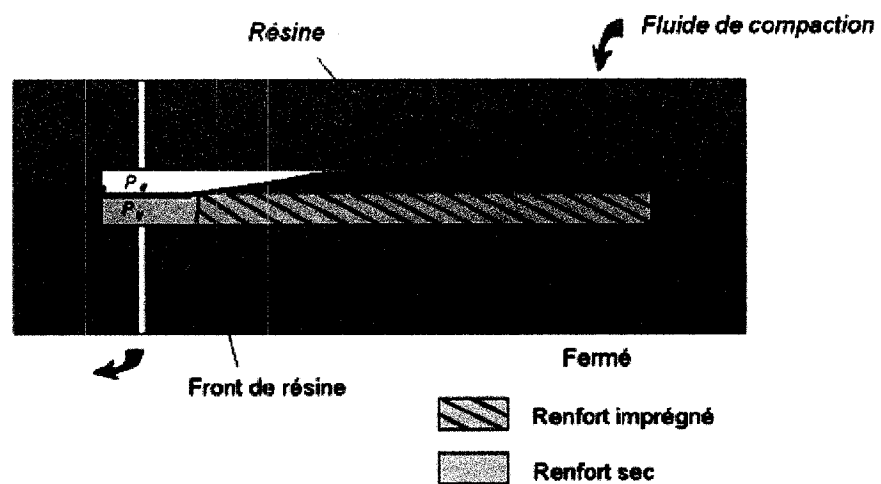


Figure 2.5 Étape 2 : Injection du fluide de compaction

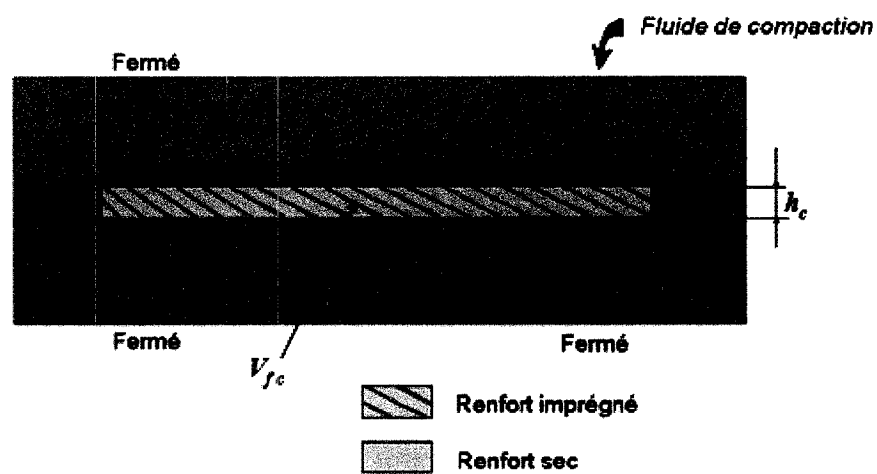


Figure 2.6 Compaction homogène des fibres imprégnées

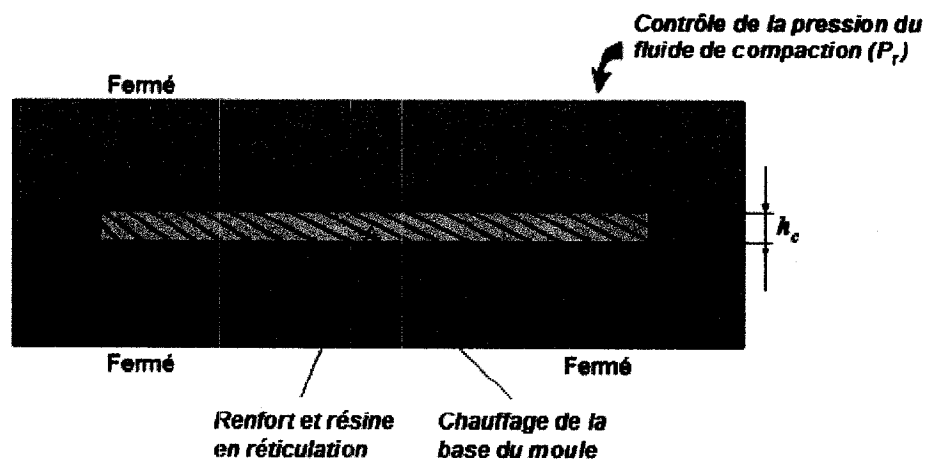


Figure 2.7 Étape 3 : Consolidation et polymérisation du composite

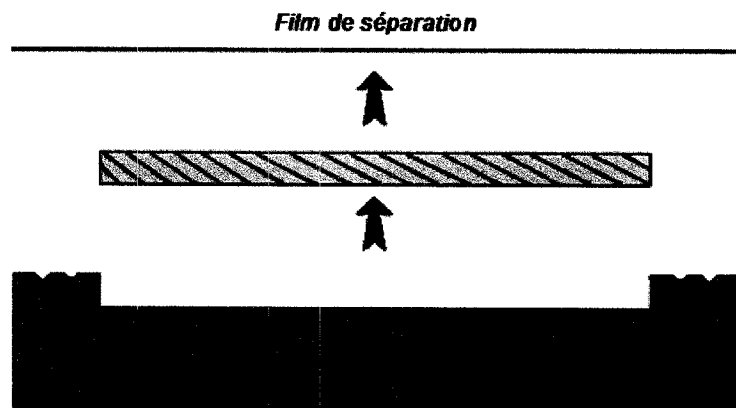


Figure 2.8 Démoulage de la pièce finie

2.3 Avantages et inconvénients

Voici les principaux avantages et inconvénients du procédé Polyflex :

Avantages

- Injection très rapide, qui permet d'augmenter la cadence de production.
- Contrôle du taux volumique des fibres et de l'épaisseur du composite.
- Compaction uniforme du composite.
- Diminution des inclusions de bulles d'air grâce à l'application du vide.

Inconvénients

- Équipement requis plus coûteux comparé aux autres procédés d'injection flexible.
- Mauvais état de surface sur la surface du composite qui est en contact avec le film de séparation.
- Nécessité d'optimiser le procédé pour réduire les déchets (membrane, résine...).

De façon globale, ce procédé possède un grand potentiel en vue de produire des composites à grande échelle. Bien que le coût des outils est élevé comparé aux procédés utilisant un demi-moule comme le VARI (« *Vacuum Assisted Resin Infusion* ») par exemple, le procédé Polyflex permet une fabrication très rapide à moule rigide qui évite les émanations de styrène pour la fabrication avec des résines polyester.

2.4 Modes d'écoulement de la résine

À l'étape d'injection de résine du procédé Polyflex, le taux volumique de fibres initial du renfort est V_{f0} . 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 $h_0 = H$. Dans le cas où l'épaisseur naturelle est inférieure à H , l'épaisseur initiale du renfort non compacté est $h_0 < H$ après la fermeture du moule. Avant l'injection et lorsque le vide est tiré dans la chambre d'injection, le renfort peut se compacter davantage selon la pression de vide appliquée. Dans le cas où le renfort est compacté par le vide, son épaisseur devient $h_0 < H$ avant que la fabrication ne démarre. Si la pression du vide est faible, le renfort occupe toute l'épaisseur de la cavité et son épaisseur demeure $h_0 = H$.

Lorsque l'épaisseur initiale du renfort est inférieure à l'épaisseur de la cavité du moule, $h_0 < H$, l'écoulement de la résine dans le moule sera de type VARI. Si $h_0 = H$ l'écoulement de la résine sera de type RTM. Une description schématique des types d'écoulement de la résine du procédé Polyflex est donnée à la Figure 2.10 et à la Figure 2.9.

Écoulement de type RTM

Un écoulement de type RTM a lieu lorsque l'épaisseur du renfort h_0 dans le moule est égale à l'épaisseur de la cavité H avant l'étape de compaction. Dans ce cas, le comportement de l'écoulement de résine à l'étape d'injection est le même que pour le procédé RTM. À l'étape de compaction, le port d'injection de résine est fermé tandis qu'un fluide non miscible est rempli à pression dans la chambre de compaction. La pression qui est appliquée par ce fluide aide à imprégner tout le renfort ainsi qu'à sa compaction. On estime que cette méthode de fabrication est plus performante que la fabrication par le procédé RTM pour une pièce de même épaisseur ayant le même taux de fibres final.

Écoulement de type VARI

Ce type d'écoulement de résine a lieu lorsque l'épaisseur du renfort h_0 au début de l'étape d'injection est inférieure à l'épaisseur H de la cavité. Pendant l'injection, la

résine s'écoule plus facilement au dessus du renfort puisque c'est l'endroit où la perméabilité est le plus élevée. On suppose donc que l'imprégnation du renfort se réalise davantage à travers l'épaisseur du renfort que dans son plan. Cependant, l'injection de la résine ne se comporte pas tout à fait comme les procédés d'injection flexible comme le VARI à partir du moment où la résine injectée occupe l'épaisseur H de la cavité. Ceci aurait pour effet de limiter la dispersion des fibres causée par une injection flexible de résine. À l'étape de compaction, lorsque la quantité de résine requise pour obtenir le taux volumique de fibres final V_{fc} a été injectée, la résine s'écoule rapidement dans le renfort produisant un effet de vague jusqu'à ce que le front du fluide de compaction devance celui de la résine. Après que les deux fronts se trouvent à la même position dans le moule, la pression de compaction appliquée sur le front de résine force la résine à s'écouler à travers le renfort.

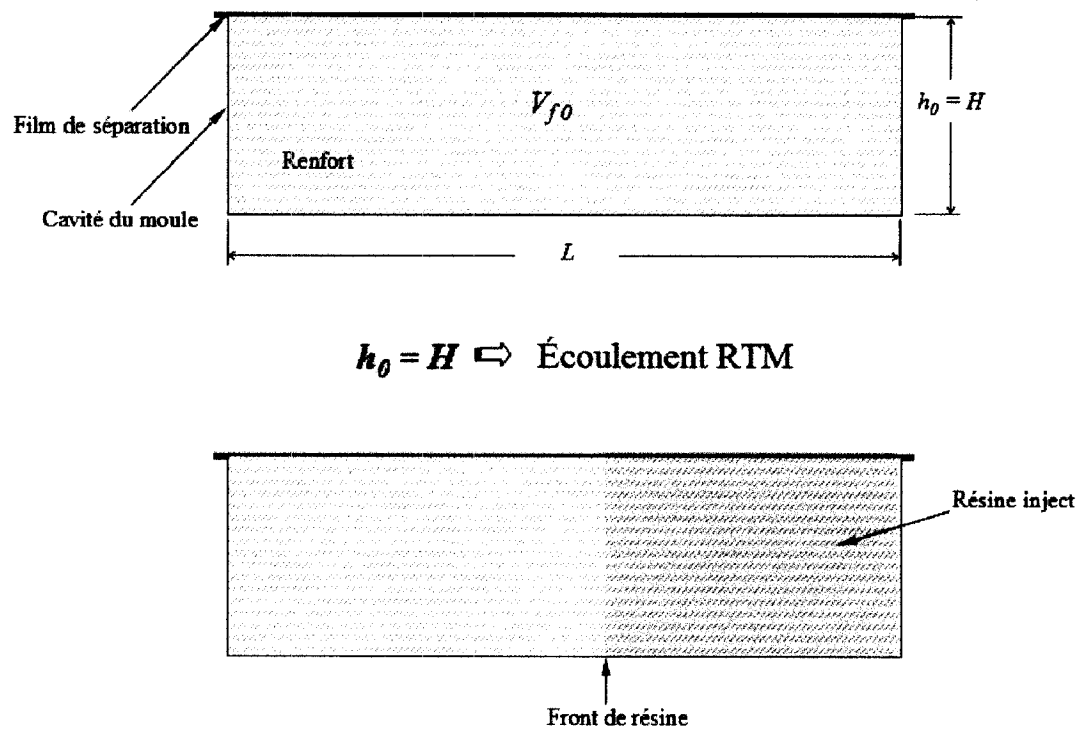


Figure 2.9 Écoulement de type RTM à l'étape d'injection

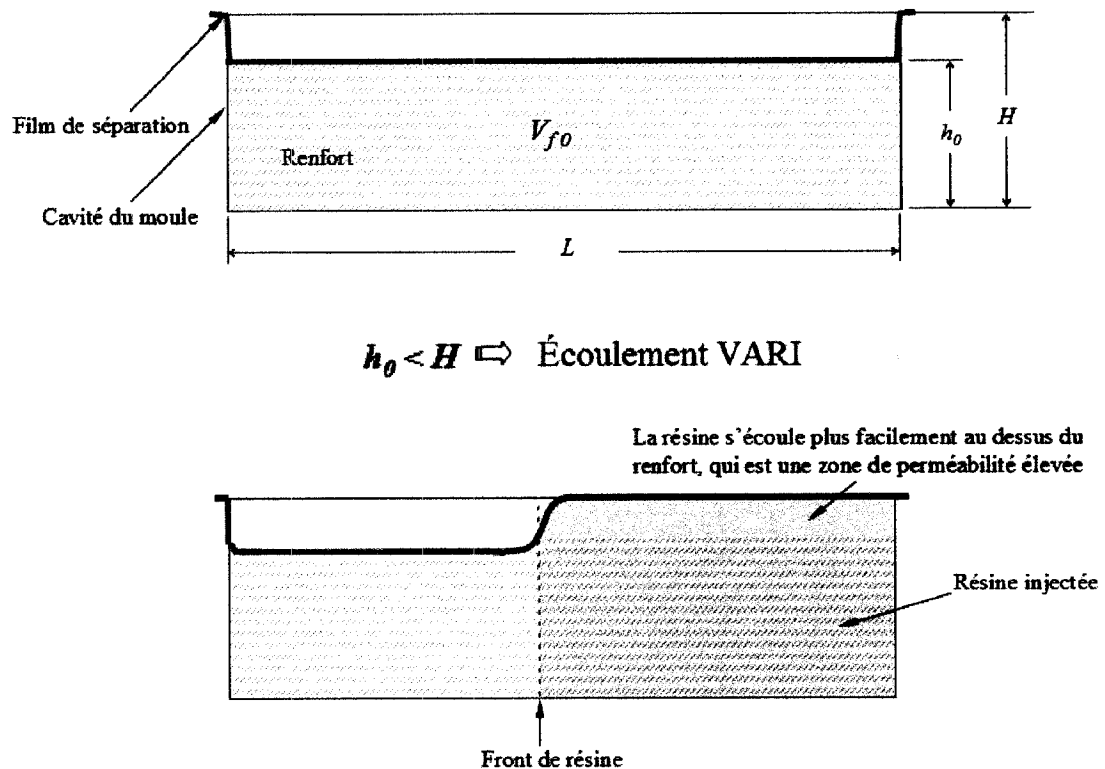


Figure 2.10 Écoulement de type VARI à l'étape d'injection

2.5 Notations pour le type de procédé Polyflex étudié

L'étude préliminaire du procédé Polyflex consiste à déterminer l'influence des paramètres de fabrication sur la vitesse du front de résine et sur le temps d'imprégnation du renfort. Ce procédé sera étudié pour l'injection de la résine et du fluide de compaction à pression constante. Les étapes du procédé Polyflex analysées sont notamment les étapes d'injection et de compaction. On remplace la résine thermodurcissable par de l'huile de silicone afin de contrôler plus facilement la viscosité, de réaliser des manipulations de façon rapide et d'éviter ainsi le gaspillage et les problèmes environnementaux liés à l'utilisation de résine à base de styrène.

Cependant, pour faciliter l'écriture, on utilise le terme « résine » dans le texte, même s'il s'agira d'huile de silicone dans cette étude.

Afin de faciliter la lecture, les notations des termes utilisés dans la suite sont explicitées ci-dessous.

Fraction volumique de fibres V_f

La fraction volumique de fibres V_f d'un composite correspond au rapport du volume du constituant fibreux sur le volume total du composite. Dans le cas d'un renfort non imprégné placé dans la cavité du moule, la fraction volumique de fibres V_f correspond au rapport du volume du constituant fibreux sur le volume total de la cavité.

La fraction volumique de fibres initiale V_{f0} correspond au taux de fibres au début de l'étape d'injection de résine. La fraction de fibres finale est représentée par V_{fc} et détermine le taux de fibres final après l'étape de compaction.

Viscosité

Le procédé Polyflex utilise une résine et un fluide de compaction non miscible pour la fabrication des composites. Dans cette étude préliminaire du procédé, la viscosité de la résine est représentée par η_r , tandis que celle du fluide de compaction est symbolisée par η_f .

Pression

Un moule transparent a été conçu pour l'évaluation du procédé Polyflex. La description de ce moule est détaillée dans la section suivante. Il comporte 8 capteurs qui mesurent la pression à plusieurs positions sur la longueur de la chambre d'injection (partie inférieure de la cavité) et de la chambre de compaction (partie

supérieure de la cavité). De façon générale, la pression de la résine est représentée par P_r , tandis que la pression du fluide de compaction est P_f . La nomenclature de la pression obtenue par les capteurs est analogue pour P_r et pour P_f :

P_{r0} ou P_{f0} : pressions mesurées au port d'entrée des fluides injectés (résine, fluide de compaction),

$P_{rL/4}$ ou $P_{fL/4}$: pressions mesurées à $L/4$ de la longueur totale de la cavité,

$P_{rL/2}$ ou $P_{fL/2}$: pressions mesurées à $L/2$,

$P_{r3L/4}$ ou $P_{f3L/4}$: pressions mesurées à $3L/4$.

La pression de compaction exercée sur les fibres est représentée par P_c . À l'équilibre de pressions, c'est-à-dire à la fin de l'étape de compaction lorsque le renfort est totalement imprégné, la pression du fluide de compaction P_f est égale à la somme de la pression relevée de la résine P_r et de la pression exercée sur les fibres P_c :

$$P_f = P_r + P_c \quad (2.1)$$

Débit

Tel qu'expliqué dans le chapitre sur la méthodologie expérimentale, le moule utilisé pour évaluer le procédé Polyflex est accompagné d'un débitmètre qui mesure le débit D_f du fluide de compaction. Le comportement du fluide qui remplit la chambre de compaction sera analysé à l'aide du débit D_f .

Vitesse d'écoulement

La vitesse du front de résine v_r , ainsi que la vitesse du front du fluide de compaction v_f sont des facteurs importants qui aident à analyser le comportement du procédé Polyflex en vue de diminuer le temps d'imprégnation du renfort.

Lors des observations en laboratoire, on observe que la vitesse du front de résine varie considérablement à l'étape 2 de compaction selon les différents paramètres de fabrication utilisés. Les termes suivants ont été créés afin de décrire le comportement de la vitesse d'écoulement de la résine à l'étape 2 de compaction :

$$R_2 = \frac{v_{r \max}}{v_{r0}} \quad (2.2)$$

où R_2 correspond au rapport de la vitesse maximale du front de résine $v_{r \max}$ sur la vitesse initiale v_{r0} de la résine au début de l'étape 2 de compaction.

Position finale du front de la résine injectée

Pendant l'étape 1 d'injection, un volume déterminé de résine remplit une fraction de la cavité du moule. Puisque le moule Polyflex utilisé est de forme rectangulaire et possède une rainure transversale au port d'entrée, le front de résine est rectiligne et peut donc être modélisé pour un remplissage unidirectionnel. Un des paramètres de fabrication étudiés est la position finale du front de la résine injectée, représentée par la notation L_r .

Temps d'imprégnation du renfort

Le temps d'imprégnation du renfort dans le procédé Polyflex est noté t_p . Il s'agit du temps requis pour imprégner tout le renfort. Le temps t_p est la somme de la durée t_1 de l'étape 1 d'injection et de la durée t_2 de l'étape 2 de compaction :

$$t_p = t_1 + t_2 \quad (2.3)$$

2.6 Conception d'un moule Polyflex

Le procédé Polyflex est mis en œuvre afin d'analyser l'influence des paramètres de fabrication sur la vitesse du front de résine v_r et sur le temps de remplissage finale t_p .

Un moule rectangulaire et transparent a été fabriqué dans lequel le remplissage de la résine et du fluide de compaction peut être visualisé. Le moule doit être muni de lignes d'injection de même largeur que le composite. Ceci permet d'obtenir un remplissage unidirectionnel avec un front de résine rectiligne. Le moule doit permettre des injections à température ambiante et à pression constante sans produire des déformations importantes tout en assurant l'étanchéité de deux chambres séparées par le film plastique. L'échauffement du moule n'est pas prévu, puisque l'injection de résine est isotherme à température ambiante. L'étape de polymérisation, où une réaction exothermique de la résine a lieu, n'est pas étudiée. Par conséquent, les expériences ne produisent pas de plaques composites. Le contrôle du taux de fibres, qui est un des objectifs principaux du procédé Polyflex, ne sera donc pas analysé dans cette étude.

Le moule est composé de deux parois planes au milieu desquelles est placé un cadre qui définit les dimensions de la cavité. Le cadre est conçu pour la fabrication de plaques composites de 125 x 375 mm. Cinq cadres de différentes épaisseurs permettront dans l'avenir d'évaluer le procédé Polyflex en changeant l'épaisseur de la cavité. L'épaisseur totale du cadre utilisé est de 3,175 mm et celle du produit final des manipulations réalisées varie entre $h_c = 1,8$ et 2,5 mm. Cette section justifie le choix des matériaux employés pour la conception du moule Polyflex, dont la modélisation, l'analyse et la création des dessins techniques ont été réalisées à l'aide des logiciels CATIA et Patran.

2.6.1 Matières premières des plaques analysées

La conception du moule tient compte des caractéristiques du renfort et de la résine utilisés dans les expériences. Pour simuler la basse viscosité d'une résine thermodurcissable chauffée, on emploie l'huile de silicone 200® Fluid, (Dow Corning) qui a une viscosité bien calibrée à température ambiante.

Le renfort fibreux choisi est l'OCF-8610 (Owens Corning), qui est un mat isotrope en fibres de verre. On a choisi ce type de renfort puisque sa masse surfacique et volumique, ainsi que sa perméabilité et son comportement en compaction ont été soigneusement caractérisés au laboratoire de l'École Polytechnique. Une brève description des propriétés du renfort et de l'huile de silicone est donnée dans le chapitre sur la méthodologie expérimentale.

2.6.2 Parois du moule

a) Matériaux

Afin de pouvoir observer l'écoulement de la résine et du fluide de compaction dans le moule, un moule transparent a été conçu et fabriqué. Les matériaux transparents considérés pour les parois du moule sont le verre, le polycarbonate (PC) et le PMMA (Polyméthylméthacrylate ou Plexiglas®). Le choix des matériaux est effectué en fonction des propriétés mécaniques, de la durabilité et de l'usinabilité. Le Tableau 2.1 donne les propriétés des trois matériaux retenus pour la fabrication du moule Polyflex.

Tableau 2.1 Propriétés physiques, mécaniques, thermiques et optiques du PMMA, du PC et du verre, adapté [6, 27]

	PMMA (Plexiglas®)	Polycarbonate (PC)	Verre (96% Silice)
Densité (gr/cm³)	1.18	1.20 à 1.25	2.18
Transmission de lumière pour une épaisseur de 3 mm (%)	92	88	92
Indice de réfraction	1.493	1.583	1.458
Module de flexion (GPa)	3.3	2.3	68
Coefficient de Poisson	0.4	0.39	0.161
Contrainte / Allongement à la rupture en traction (MPa / %)	65 à 75 / 6	64 / 98	--
Contrainte / Allongement au seuil élastique en traction (MPa / %)	76 / 4	62 / 6	50 à 110 / --
Dureté Rockwell M	95	71	--
Conductivité thermique λ (W/m.K)	0.17	0.2	1.38
Température max d'utilisation (°C)	80 à 90	135	> 1000

Le PMMA possède une très bonne résistance au vieillissement, une excellente stabilité dimensionnelle et une transparence se conservant longtemps [29]. Le polycarbonate (PC) est élastique, ductile et résiste bien aux chocs. Il est moins résistant aux intempéries que le PMMA [33]. De fines craquelures sur la surface résultent de l'usinage des pièces en PC. Le verre est un matériau transparent très résistant mais fragile. Il ne se déforme pas plastiquement et peut se briser à de faibles sollicitations en flexion en raison des imperfections superficielles [14].

Parmi les trois matériaux transparents décrits ci-haut, on a choisi le **PMMA** puisque son usinage comporte moins de difficultés que le polycarbonate (PC) ou le verre. Ce matériau est très résistant au vieillissement, en plus d'offrir de bonnes propriétés mécaniques et optiques.

b) Analyse par éléments finis

On cherche à définir les dimensions des parois du moule au milieu duquel est placé un cadre qui détermine l'épaisseur de la cavité. On impose une déflexion maximale résultant d'une pression uniforme exercée dans le moule équivalent à 10% de l'épaisseur de la cavité la plus mince. Puisque l'épaisseur d'une pièce mince en composite utilisée dans l'industrie automobile est d'environ 3 mm, l'épaisseur du cadre le plus mince est imposée à 3,175 mm, qui équivaut à 1/8 po. Cette contrainte est imposée afin d'obtenir un écoulement de résine injectée où la perméabilité des fibres ne varie pas de façon importante. Une seule paroi du moule doit donc supporter une pression telle que la déformation maximale correspond à la moitié de 0,3175 mm, soit 0,159 mm. On vise aussi un facteur de sécurité $FS > 1,5$ dans les calculs. De façon à bien examiner les différentes étapes de fabrication, un moule rectangulaire des dimensions minimales de 450 x 100 mm est requis. On impose aussi une épaisseur de plaque en PMMA de 38,1 mm (1,5 po) qui correspond à l'épaisseur la plus grande qui est couramment disponible sur le marché. Le Tableau 2.2 résume les contraintes de l'analyse par éléments finis effectuée afin de trouver des dimensions critiques d'une plaque en PMMA répondant à ces critères.

Tableau 2.2 Contraintes pour le dimensionnement des parois du moule Polyflex

Matériau de la plaque :	PMMA
Épaisseur fixée :	38,1 mm
Dimensions minimales :	450 x 100 mm
Déf. max due à une pression	0,159 mm
Limite d'élasticité du PMMA :	65 Mpa
Facteur de sécurité (F.S.) :	> 1,5

L'analyse par éléments finis a été réalisée pour une plaque en PMMA encadrée aux extrémités et sollicitée en pression constante sur la surface supérieure. Après avoir fait varier les dimensions de la plaque ainsi que les charges maximales à appliquer, on a trouvé qu'une plaque de 450 x 200 x 38,1 mm est capable de supporter une pression

uniforme sur la surface supérieure de 6 bars. Une étude de convergence a été effectuée à l'aide du logiciel Patran. Cette étude établit que la déformation maximale au centre de la plaque est de 0,150 mm. Le facteur de sécurité (F.S.) se calcule par le rapport de la limite d'élasticité du matériau sur la contrainte maximale de Von Mises obtenue par l'analyse. On a ainsi obtenu un facteur de sécurité $F.S. = 65 / 6,34 \text{ MPa} = 10,2$. Le Tableau 2.3 résume les dimensions principales du moule ainsi que le chargement maximal autorisé.

Tableau 2.3 Dimensions principales du moule et chargement maximal.

Dimensions des parois du moule :	450 x 200 x 38,1 mm
Épaisseur minimal de la cavité :	3,175 mm
Pression maximale dans le moule :	6 bars
Déf. max de la cavité due à la pression :	0,30 mm
Facteur de sécurité (F.S.) :	10,2

2.6.3 Dimensions du cadre

L'épaisseur minimale du cadre de 3,175 mm (1/8") a été définie précédemment. On propose ensuite différentes épaisseurs de cadre pour les expériences envisagées. Les cinq épaisseurs de cadre proposées correspondent à des dimensions standard en unités impériales. La Figure 2.11 montre le moule Polyflex utilisé pour les expériences, ainsi que la valeur des différentes épaisseurs des cadres qui définissent la géométrie de la cavité.

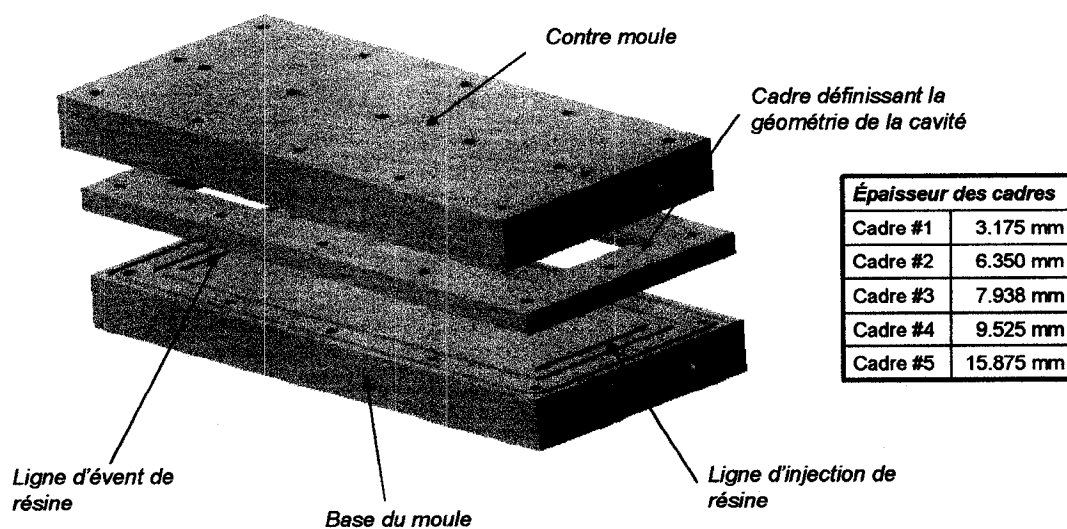


Figure 2.11 Moule transparent Polyflex comprenant des cadres d'épaisseurs différentes.

Étant donné un renfort OCF-8610, le Tableau 2.8 donne le nombre de couches ainsi que la fraction volumique de fibres obtenue pour chaque cadre considéré. La largeur des bords sera de 47 mm pour tous les cadres, qui seront aussi fabriqués en PMMA de façon à profiter de la transparence du matériau.

Tableau 2.4 Fraction volumique de fibres du renfort OCF-8610 en fonction de l'épaisseur du cadre et du nombre de couches de renfort

Épaisseur		Fraction de fibres [%]				
		1 couche	2 couches	3 couches	4 couches	5 couches
3.175 mm	(1/8")	5.6	11.2	16.7	22.3	27.9
6.350 mm	(1/4")	2.8	5.6	8.4	11.2	14.0
7.938 mm	(5/16")	2.2	4.4	6.7	8.9	11.1
9.525 mm	(3/8")	1.9	3.8	5.6	7.5	9.4
15.875 mm	(5/8")	1.1	2.2	3.3	4.4	5.5

2.6.4 Joint d'étanchéité

a) Matériau

Les expériences envisagées comprennent l'utilisation d'huile de silicone et l'application du vide dans le moule. Le choix d'un joint d'étanchéité en silicone pour l'étanchéité d'un fluide de silicone est recommandé pour un fluide de viscosité cinématique élevée ($> 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$) et pour des températures maximales de 150°C [2]. Comme le fluide utilisé sera de faible viscosité ($< 0,001 \text{ m}^2/\text{s}$), on rejette la silicone comme matériau d'étanchéité. Dans les applications où le vide est réalisé, un matériau d'étanchéité ayant une faible perméabilité au gaz, un faible poids et une bonne compressibilité est recommandé [2]. Les matériaux d'étanchéité pour des opérations où le vide est appliqué sont le fluorocarbène, le néoprène et le butyle. Le matériau avec le meilleur rapport qualité/prix est le **néoprène**. Le choix du néoprène est justifié étant donné que la réalisation d'expériences ne comporte pas des températures ou des pressions extrêmes.

b) Joint d'étanchéité

La Figure 2.12 montre les choix proposés pour le joint d'étanchéité ainsi que de son emplacement. L'utilisation d'une garniture de section rectangulaire et de même largeur que le cadre peut être envisagée. Cependant, un choix plus judicieux doit être

considéré afin d'éviter le déplacement du joint causé par la pression appliquée. La fuite du fluide sous pression peut être évitée au moyen d'un joint torique dans une rainure. Étant donné que l'épaisseur des cadres à fabriquer est mince, **il est suggéré d'usiner les rainures sur les plaques inférieure et supérieure du moule**. Il est possible de placer soit un seul joint sous le bord intérieur du cadre, soit deux joints : un sous le bord intérieur et l'autre sous le bord extérieur afin d'assurer l'étanchéité du moule et une symétrie autour des joints boulonnés. Deux joints toriques parcourant le cadre semblent constituer le meilleur choix.

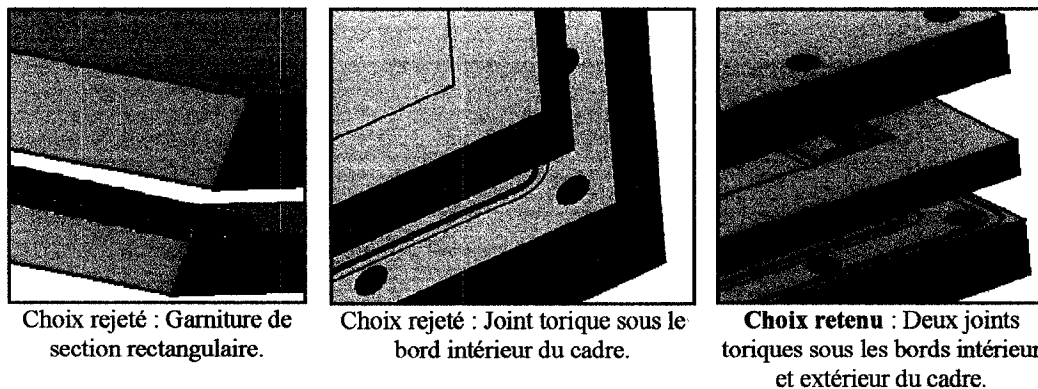


Figure 2.12 Choix proposés du type et de l'emplacement du joint d'étanchéité

Compte tenu de la largeur du cadre et des différentes grandeurs de section standards pour le joint d'étanchéité, les tailles possibles de la section du joint torique sont les suivantes : 1/16", 3/32", 1/8" et 3/16". De façon à laisser de la place pour des boulons sans compromettre l'étanchéité du moule, le choix adopté est un joint torique de diamètre de section de 3,175 mm (1/8"). Selon la description d'un joint torique commercial (McMaster-Carr, Atlanta, GA), la corde de néoprène de section circulaire 3,175 mm a un diamètre réel de $3,53 \pm 0,188$ mm.

c) Conception des rainures

Selon un fabricant de rainures [2], pour une section de 3,53 mm, la profondeur de rainure doit être de 2,540 – 2,794 mm (0,100 – 0,110”) et la largeur de 4,953 ± 0,127 mm (0,195 ± 0,005”) pour un écrasement de joint de 18,5 à 30%.

d) Longueur totale des joints d’étanchéité

De façon à réduire le mouvement et l’usure qui résultent sur le joint d’étanchéité lors de l’application de pression, ce dernier doit toujours s’appuyer sur le coté basse pression de la rainure, comme le montre la Figure 2.5. La longueur des joints intérieur et extérieur pour chacune des plaques du moule est donnée au Tableau 2.9. Cette information permet de couper et de coller les cordes de néoprène pour former des boucles étanches.

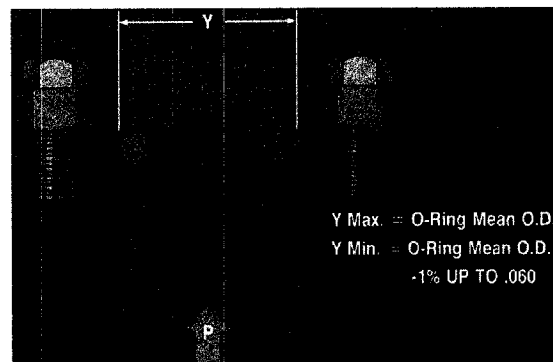


Figure 2.13 Position du joint d’étanchéité pour une pression interne dans un joint boulonné [2]

Tableau 2.5 Longueur des joints d'étanchéité du moule

Joint intérieur :	1043 mm
Joint extérieur :	1219 mm

2.6.5 Capteurs de pression

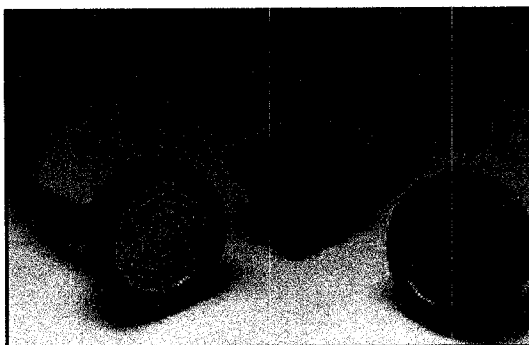
Étant donné la nature des fluides utilisés et la pression maximale de 6 bars dans le moule, les contraintes à prendre en considération pour le choix des capteurs sont décrites au Tableau 2.6. Il est conseillé de placer **trois capteurs** distribués dans la ligne médiane de chaque plaque en Plexiglas® afin d'évaluer correctement le comportement des deux fluides à l'intérieur du moule. Deux autres capteurs de pression, placés aux ports d'injection des fluides, sont aussi souhaitables pour vérifier la pression imposée sur les réservoirs sous pression contenant les fluides à injecter.

Tableau 2.6 Caractéristiques essentielles des capteurs de pression à utiliser dans le moule

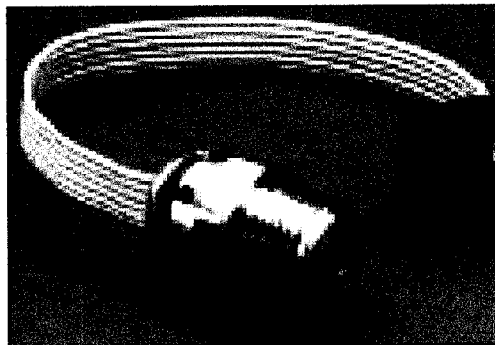
Type de membrane :	Affleurante (Flush)
Grandeur souhaitée :	Miniature
Étendue de mesure :	0 à 7 bars
Signal de sortie :	0 à 10 Volts
Erreur globale :	< 0.3%
Température d'utilisation :	Ambiant

La membrane affleurante empêche le fluide de pénétrer et de nuire au capteur. Elle permet aussi aux capteurs d'être placés sur la surface des parois du moule pour assurer une prise rapide des mesures. De toute la gamme des capteurs de pression étudiés, six capteurs 82-100-A-C (Durham Instruments, Toronto) ont été choisis et installés sur les surfaces de la cavité. Les caractéristiques de ces capteurs sont mentionnées au Tableau

2.13. La description des capteurs utilisés pour relever la pression aux ports d'injection est aussi indiquée sur le même tableau. La Figure 2.14 montre des photographies des capteurs installés dans le moule Polyflex et la Figure 2.15 schématise l'emplacement des capteurs dans une plaque du moule.



Modèle 82-100-A-C



Modèle 96-100-A-4-C

Figure 2.14 Capteurs choisis pour le moule Polyflex

Tableau 2.7 Caractéristiques des capteurs choisis

	Modèle	
	82-100-A-C (Durham Instruments)	96-100-A-4-C (Durham Instruments)
Quantité requise pour le moule :	6	2
Diamètre de la surface de mesure :	19 mm	15 mm
Type de serrage :	Pression avec joint	1/4" NPT
Type de membrane :	Affleurante (Flush)	
Connexion :	Câble avec connecteur	
Étendue de mesure :	0 à 7 bars (0 à 100 psi) Pression absolue	
Amplification :	Capteur non amplifié	
Signal de sortie :	0 à 100 mV	
Erreur globale :	± 0,1 %	
Température d'utilisation :	Ambiant	

2.6.6 Analyse finale

Une vérification du calcul par la méthode d'éléments finis est nécessaire afin de s'assurer que la déformation du moule due à la pression interne n'entraîne pas de fuites de fluide à travers les joints d'étanchéité. Le serrage du moule est fait à l'aide de boulons de diamètre 9,525 mm (3/8 – 16 UNC), dont le calcul du couple de serrage est obtenu à l'Annexe D. Sur chaque plaque, 12 trous de 9,525 mm de diamètre ont été modélisés. Les trous sont distribués uniformément entre les deux rainures sur lesquelles seront installés les joints d'étanchéité. La Figure 2.15 illustre la plaque du moule Polyflex étudiée dans cette analyse statique.

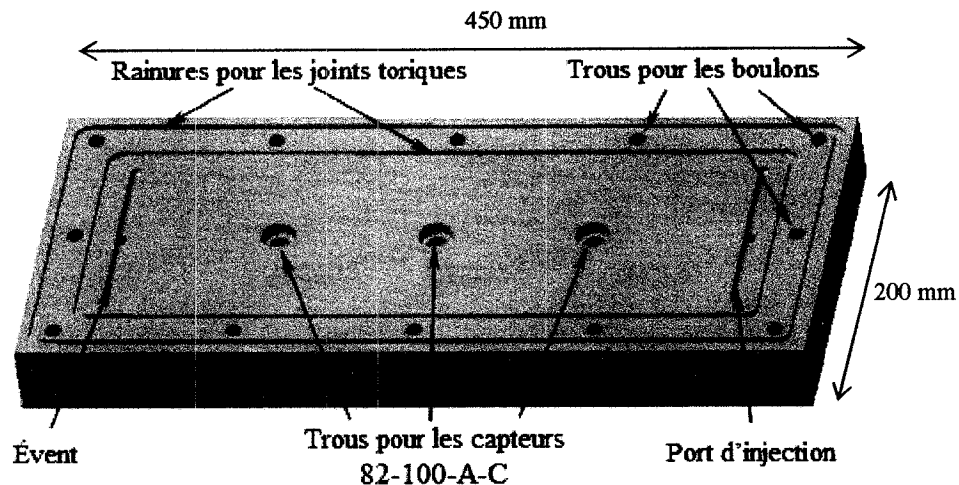


Figure 2.15 Plaque inférieure du moule conçu pour évaluer le procédé Polyflex

On a identifié précédemment une tolérance d'écrasement entre 18,5 et 30 % pour un joint torique de diamètre réel 3,53 mm. Si on suppose que le joint est écrasé de seulement 20 % au serrage du moule, la marge serait alors de 1,5 % (20 – 18,5 %). Sous l'application d'une pression interne, la déformation maximale du moule à la rainure intérieure doit rester inférieure à $0,015 \times 3,53$ mm, soit 0,05 mm.

Pour l'analyse structurale réalisée à l'aide de CATIA, on a appliqué une pression de 6 bars sur une des faces du moule avec une condition limite d'encastrement aux nœuds qui se trouvent aux bords de chaque trou. Ces conditions d'analyse donnent comme résultat une déflexion maximale de 0,162 mm au milieu de la plaque. La déformation maximale à la rainure intérieure de la plaque est de 0,069 mm. On illustre à la Figure 2.16 la pièce déformée dans les conditions mentionnées ci-haut. Un cadre d'acier d'épaisseur 3,175 mm (1/8 po), placé sur la plaque en Plexiglas, protège le couvercle et lui confère une rigidité plus élevée. Une analyse avec CATIA dans les mêmes conditions (encastrement aux trous des deux pièces, pression uniforme de 6 bars sur une surface de la plaque et maillage de contact entre les deux pièces) donne comme résultat une déformation maximale de 0,104 mm au milieu de la plaque et de 0,035

mm sur la rainure intérieure. En rappelant que les déformations maximales permises sont :

- 0,32 mm dans le moule, soit 0,16 mm sur une plaque,
- 0,05 mm au droit de la rainure intérieure de la plaque,

on constate qu'il est possible d'appliquer davantage de pression dans le moule. La pression maximale autorisée pour rester en deçà des déformations permises est donc de 8 bars. Ceci donne une déformation maximale sur la plaque de 0,146 mm et de 0,047 mm sur le bord de la rainure intérieure. La Figure 2.17 illustre les pièces déformées pour une pression uniforme de 8 bars sur toute la surface.

Puisque l'étendue de mesure des capteurs est de -1 à 6 bars, la pression maximale dans le moule ne doit pas dépasser 6 bars. Avec une pression relative de 6 bars, la contrainte maximale pour le critère de Von Mises est de 9,35 MPa, le facteur de sécurité est donc $F.S. = 6,95$. Le Tableau 2.8 résume les limitations à prendre en considération pour la conception du moule.

$\delta_{\max} = 0,162 \text{ mm}$
 $\delta_{\max, \text{rainure}} = 0,069 \text{ mm}$

$\delta_{\max}$ est obtenu au
 centre de la plaque

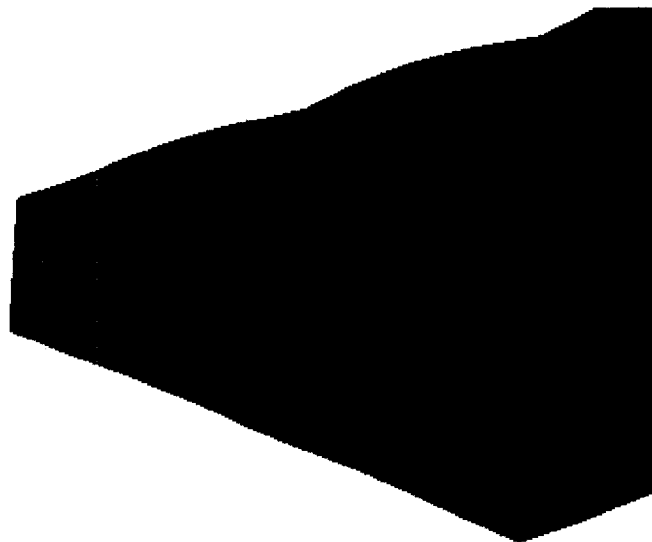


Figure 2.16 Déformation amplifiée de la plaque en Plexiglas® due à une pression de compaction de 6 bars sur sa surface interne

$\delta_{\max} = 0,146 \text{ mm}$
 $\delta_{\max_{\text{rainure}}} = 0,047 \text{ mm}$

$\delta_{\max}$ est obtenu au
 centre de la plaque

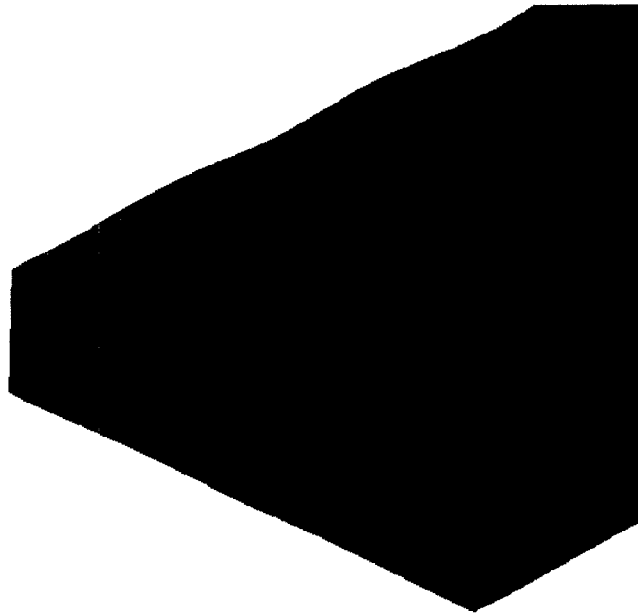


Figure 2.17 Déformation amplifiée de la plaque en Plexiglas[®] avec un cadre d'acier
 due à une pression de compaction de 8 bars sur la surface interne

Tableau 2.8 Caractéristiques du moule Polyflex

Dimensions des parois du moule :	450 x 200 x 38,1 mm
Pression maximale dans le moule :	6 bars
Déf. max de la cavité due à la pression :	0,21 mm
Déf. max au bord de la rainure intérieure :	0,03 mm
Facteur de sécurité (F.S.) :	6.95

2.7 Conclusion

Ce chapitre décrit les étapes du procédé Polyflex, et présente les études de la conception du moule qui permettra d'évaluer le procédé.

Deux types d'écoulement de la résine ont été identifiés dans le procédé Polyflex : l'écoulement du type RTM et l'écoulement du type VARI. Dans l'écoulement du type RTM, la résine s'écoule sur le plan renfort pendant la fabrication du composite. Ce type d'écoulement est obtenu lorsque l'épaisseur des fibres au début de la fabrication est égale à l'épaisseur de la cavité du moule ($h_0 = H$). L'écoulement de type VARI est obtenu lorsque l'épaisseur initiale des fibres est inférieure à l'épaisseur de la cavité ($h_0 < H$). Il se produit alors un écoulement de résine sur le plan, mais aussi sur l'épaisseur du renfort, ce qui permet à la résine de s'écouler facilement dans la cavité. Lorsque le fluide de compaction remplit la chambre de compaction, il se produit un effet de « vague » avec la résine, qui s'écoule encore plus rapidement sur le renfort.

Un moule a été mis en place pour réaliser des expériences dans lesquelles la résine est remplacée par un fluide non réactif, soit une huile de silicone. Ceci permet une manipulation plus facile qu'une résine polymère, tout en simulant la viscosité d'une résine injectée à une température donnée dans un moule isotherme. Le moule a des parois transparentes en PMMA. Ceci permet de visualiser l'écoulement des fluides dans la cavité. La charge de pression maximale permise dans le moule est de 8 bars. Cette charge limite la déformation de la cavité du moule à 0,32 mm et la déformation au droit de la rainure intérieure à 0,05 mm. Cependant, puisque l'étendue de mesure des capteurs est limitée entre -1 et 6 bars, la charge maximale possible pour évaluer le procédé Polyflex est donc de 6 bars. Le Tableau 2.9 résume les caractéristiques principales des composantes du moule, ainsi que les charges maximales à prendre en compte. Les dessins finaux de détail et d'assemblage du moule Polyflex sont inclus dans l'Annexe A.

Comme on peut le constater à l'Annexe A, le moule est muni de miroirs qui projettent dans une même direction la séquence de fabrication vue du haut et du bas du moule. Le montage sera décrit dans le chapitre sur la méthodologie expérimentale.

Tableau 2.9 Caractéristiques des composants du moule Polyflex

Moule	Pression <i>max</i> dans la cavité : 6 bars Déf. max dans la cavité : 0,21 mm Épaisseur <i>min</i> de la cavité : 3,175 mm (1/8 po)
Couche de séparation	Matériau : Film de nylon Épaisseur : 0,075 mm Modèle : Strechlon 700 (Airtech, USA)
Plaques inférieure et supérieure	Matériau : PMMA (Plexiglas [®]) Dimensions : 450 x 200 x 38,1 mm
Cadre	Épaisseurs : 3,175, 6,350, 7,938, 9,525 et 15,875 mm (1/8, 1/4, 5/16, 3/8 et 5/8 po) Largeur du cadre : 47 mm Largeur de palier (pour fixer le renfort) : 6 mm
Joints d'étanchéité	Matériau : Néoprène Diamètre de section : 1/8", diamètre réel : 0.139" (3.53mm) Longueur du joint extérieur : 1043 mm Longueur du joint intérieur : 1219 mm Largeur de rainure sur les plaques : 0.195±0.005" (4.953±0.127mm) Profondeur des rainures sur les plaques : 0.100 - 0.110" (2.540 – 2.794 mm)
Boulons	Filet : 3/8 – 16 UNC Longueur de tige : 4 ½" (114.3 mm) Grade SAE : 1 Nombre de boulons : 12
Capteurs de pression	Modèle : 82-100-A-C (Durham Instruments, Canada) Nombre de capteurs : 6 Modèle : 96-100-A-4-C (Durham Instruments, Canada) Nombre de capteurs : 2

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

3.1 Introduction

Afin de représenter le montage pour les manipulations en laboratoire, une description sera réalisée sur les matières premières et les outils utilisés pour l'évaluation du procédé Polyflex.

Les matières premières du procédé Polyflex sont :

- résine,
- fluide de compaction,
- renfort,
- film de séparation.

Les outils pour les manipulations en laboratoire sont :

- moule Polyflex muni des capteurs qui mesurent de la pression dans la cavité,
- réservoirs à pression,
- débitmètre pour la mesure du débit du fluide de compaction,
- caméra pour la mesure de la vitesse d'écoulement de la résine.

3.2 Matières premières

3.2.1 Résine

De l'huile de silicone est utilisée au lieu de la résine pour les expériences. Noter que le fabricant d'huile de silicone (Dow Corning, Midland, MI) dispose d'une gamme limitée de viscosités pour ce produit. L'huile de silicone 200® Fluid est disponible avec des viscosités de 0,05, 0,1, 0,2, 0,35, 0,5 et 1 Pa.s. Notre objectif est de réaliser

des expériences avec un fluide de compaction ayant une viscosité η_f plus grande, mais aussi plus faible que celle de la résine η_r . Compte tenu de la gamme de viscosités disponibles, une viscosité $\eta_r = 0.5 \text{ Pa.s}$ est choisie pour le fluide qui remplace la résine. Ce liquide transparent est teint en rouge afin de bien le distinguer du fluide de compaction dans les observations.

3.2.2 Fluide de compaction

Le fluide de compaction est un fluide non réactif et non miscible dont les fonctions principales sont :

- permettre une imprégnation rapide du renfort encore sec par la résine injectée et
- compacter la pièce pendant la fabrication.

Suivant le plan d'expériences effectué (factoriel à deux niveaux), la viscosité du fluide de compaction a deux valeurs. Étant donné une viscosité de la résine $\eta_r = 0,5 \text{ Pa.s}$, on utilisera pour les expériences de l'huile de silicone 200[®] Fluid de viscosités $\eta_f = 0,1 \text{ Pa.s}$ et $\eta_f = 1,0 \text{ Pa.s}$ afin de déterminer l'influence de la viscosité du fluide de compaction sur le temps de remplissage. Ce fluide est teint en bleu pour les expériences. Le Tableau 3.1 résume les caractéristiques des fluides utilisés pour observer le procédé Polyflex.

Tableau 3.1 Caractéristiques des fluides utilisés pour les expériences du procédé Polyflex

	Résine	Fluide de compaction
Colorant	Rouge	Bleu
Viscosité [Pa.s]	0,5	0,1 et 1,0
Masse volumique	969 kg/m ³	
Type de fluide	Huile de silicone	

3.2.3 Renfort

Le renfort fibreux qui a été utilisé pour les observations est le OCF8610 (Owens Corning, Toledo, OH), un mat à fibres continues et aléatoires, d'une masse surfacique de 0,45 kg/m². Ce renfort a été caractérisé en compaction [32] et en perméabilité [42]. Le renfort est considéré isotrope dans le plan, et le modèle de perméabilité est le suivant :

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

Un résumé des caractéristiques du renfort OCF-8610 est donné au

Tableau 3.2. La perméabilité K est fonction du taux des fibres V_f et le modèle de compaction donne le taux de fibres V_f en fonction d'une pression P [Pa] appliquée uniformément sur la surface du renfort sec. Les expériences ont été effectuées en fixant l'épaisseur de la cavité du à 3,175 mm. Le

Tableau 3.2 donne la fraction volumique de fibres initiale V_{f0} du renfort OCF-8610 par rapport au nombre de couches dans une cavité $H = 3.175 \text{ mm}$.

Tableau 3.2 Caractéristiques du renfort OCF-8610

Densité surfacique	[kg/m ²]	0,45
Masse volumique	[kg/m ³]	2540
Perméabilité	[m ²]	$K = \left[200 + 11 e^{16.8 (0.5 - V_f)} \right] 9.87 \times 10^{-13}$
Compaction		$V_f = 0,002 P^{0.4}$

Tableau 3.3 Fraction de fibres V_{f0} du OCF-8610 en fonction du nombre de couches

Épaisseur	Nombre de couches			
	1	2	3	4
3,175 mm	$V_{f0} = 5,60\%$	11,20%	16,70%	22,30%

3.2.4 Film de séparation

Un film de séparation est utilisé pour diviser la cavité du moule en deux chambres mobiles et étanches. Les chambres d'injection et de compaction servent respectivement à l'imprégnation du renfort et à la compaction du mélange renfort-résine pendant le remplissage de la pièce. Pour les expériences réalisées avec le moule Polyflex, on utilise de l'huile de silicone et le remplissage s'effectue à température ambiante. Un film transparent compatible avec l'huile de silicone semble être le choix adéquat pour les manipulations au laboratoire. Pour des applications industrielles, la couche de séparation doit être adaptée aux différents types de résines utilisées : polyester, vinylester, époxyde, etc. De plus, il est souhaitable que la couche de séparation soit formée par thermoformage en même temps que la préforme. La membrane de séparation doit résister à la température élevée du procédé de mise en

forme qui peut varier entre 180 et 250 °C, dépendamment des caractéristiques du renfort utilisé.

Afin de réaliser le meilleur choix du film de séparation pour une application industrielle, il faut que celui-ci :

- soit très élastique, de façon à épouser facilement la forme de la pièce;
- résiste au déchirement par la préforme lorsque le moule est fermé ;
- résiste à la température maximale de fabrication ;
- soit incompatible avec la résine utilisée pour éviter le collage.

Le Tableau 3.4 décrit les caractéristiques principales des différentes membranes élastiques commerciales utilisées dans les procédés d'infusion sous vide (« *vacuum bagging* ») pouvant être utiles dans le procédé Polyflex.

Tableau 3.4 Propriétés des différentes couches de séparation

	Wrightlon Econolon	Strechlon 700	IPPLON DP1000	Wrightlon 8400	PO150 RD	PA232	Membrane de Silicone
Fabricant / Distributeur	Airtech	Airtech	Airtech	Airtech	Diatex	Diatex	McMaster-Carr
Matériau	Nylon	N/D	Nylon	Nylon	Tri-couches	Nylon 66/6	Silicone
Résines à éviter	Phénoliques	BMI, Polyester, Phénoliques	Phénoliques	Phénoliques	Aucune	Phénoliques	N/D
Elongation [%]	350+	500+	450+	300+	550	400	250
Température max d'utilisation [°C]	149	195	204	232	125	232	215
Température de fusion [°C]	193	202	215	260	N/D	N/D	N/D
Résistance en tension [MPa]	48	35	48	62	N/D	N/D	5.5
Épaisseurs [mm]	0.035, 0.050, 0.075, 0.125	0.075	0.050, 0.075, 0.125	0.050, 0.075, 0.125	0.100	0.050, 0.075	0.50, 0.80, 1.60
Couleur	Transparent	Blanc	Orange	Bleu	Transparent	Transparent	Blanc
Prix [\$/m ²]	0.75 (0.035 mm)	5.90 (0.075 mm)	1.91 (0.050 mm)	2.04 (0.050 mm)	4.20 (0.100 mm)	1.96 (0.050 mm)	170 (0.500 mm)

a) Membrane de silicone

On peut constater dans le Tableau 3.4 que la *membrane de silicone* constitue un mauvais choix de couche de séparation pour le procédé Polyflex à cause de la faible résistance à la traction qui entraîne des risques de déchirure à faible épaisseur. De plus, les *membranes de silicone* commercialement disponibles sont relativement épaisses comparées aux films de nylon utilisés dans le procédé d'infusion sous vide. Ceci entraîne un coût élevé et des difficultés de fabrication dans le cas de pièces complexes avec tolérances dimensionnelles serrées.

b) Films de nylon

Le film le plus économique du Tableau 3.4, *Wrightlon Econolon*, semble être un choix adéquat pour les expériences en laboratoire, étant donné les bonnes propriétés physiques et mécaniques du film. De plus, il est transparent et compatible avec l'huile de silicone. Pour les applications industrielles où la préforme sera thermoformée avec la couche de séparation, le choix du film est fonction de la température de formage des fibres. Compte tenu de la température de préformage, les films de nylon combinent les meilleures propriétés mécaniques et physiques. Toutefois, il faut s'assurer de la compatibilité du film avec la résine utilisée. Afin de profiter d'une elongation élevée, il est conseillé d'utiliser le film *IPPLON DP1000* pour des températures de préformage inférieures à 204°C. Pour des températures d'utilisation supérieures à 204°C, le film *Whrightlon 8400* semble le meilleur choix. Étant donné que la compagnie *Diatex* est située en France, on déconseille l'utilisation de ces films car les prix sont plus élevés que ceux de la compagnie *Airtech*. Remarquer toutefois que tous les films de nylon sont plastiques et ne peuvent être utilisés qu'une seule fois.

c) Strechlon 700

Selon la littérature, il est déconseillé d'utiliser le film *Strechlon 700* avec les résines polyesters, BMI et phénoliques. Toutefois, compte tenu de sa compatibilité avec

l'huile de silicone et de sa disponibilité au laboratoire de l'École Polytechnique, le film *Strechlon 700* sera utilisé pour les manipulations en laboratoire. Même si ce film n'est pas transparent, sa translucidité permettra de visualiser le remplissage de la cavité à travers les parois transparentes du moule.

3.3 Outils utilisés dans les manipulations

3.3.1 Débitmètre pour la mesure du débit du fluide de compaction

Le débitmètre 83F15 (Endress & Hauser, Greenwood, IN), illustré à la Figure 3.1, a été utilisé pour mesurer le débit du fluide de compaction au port d'entrée. Il faut noter que ce débitmètre a une capacité limitée pour la mesure des faibles débits. Cependant, étant donné que le temps de remplissage de la chambre de compaction est inférieur à une minute, on a calculé à l'Annexe B que l'erreur globale du débitmètre, pour les conditions de fabrication utilisées en laboratoire, n'excède pas 10 %.

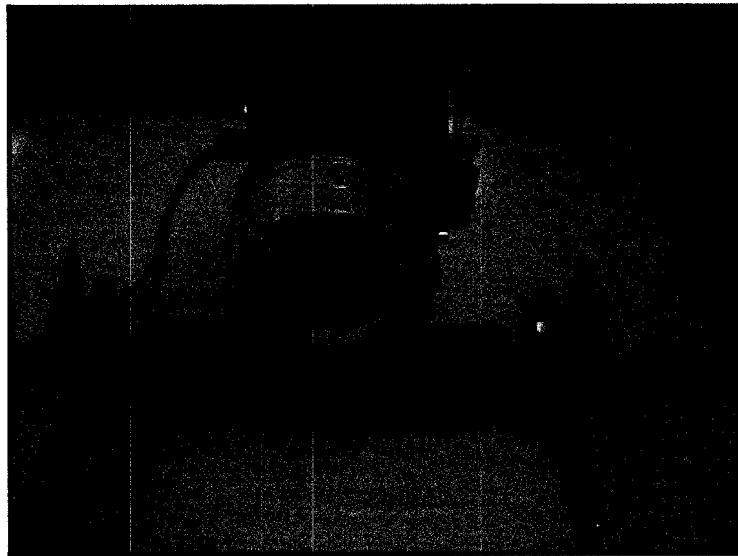


Figure 3.1 Débitmètre Endress & Hauser

3.3.2 Moule Polyflex muni de capteurs qui mesurent la pression dans la cavité

Le moule Polyflex, dont la conception est décrite précédemment, est muni de 8 capteurs de pression absolue (0 - 7 bars) de la compagnie Durham Instruments : six capteurs (82-100-A-C) sont placés au centre des plaques inférieure et supérieure (moule et contre moule), à $\frac{L}{4}$, $\frac{L}{2}$ et $\frac{3L}{4}$ de la longueur totale de la cavité (Voir Figure 3.2). Deux capteurs (96-100-A-4-C) se trouvent aux ports d'entrée des fluides d'injection et de compaction.

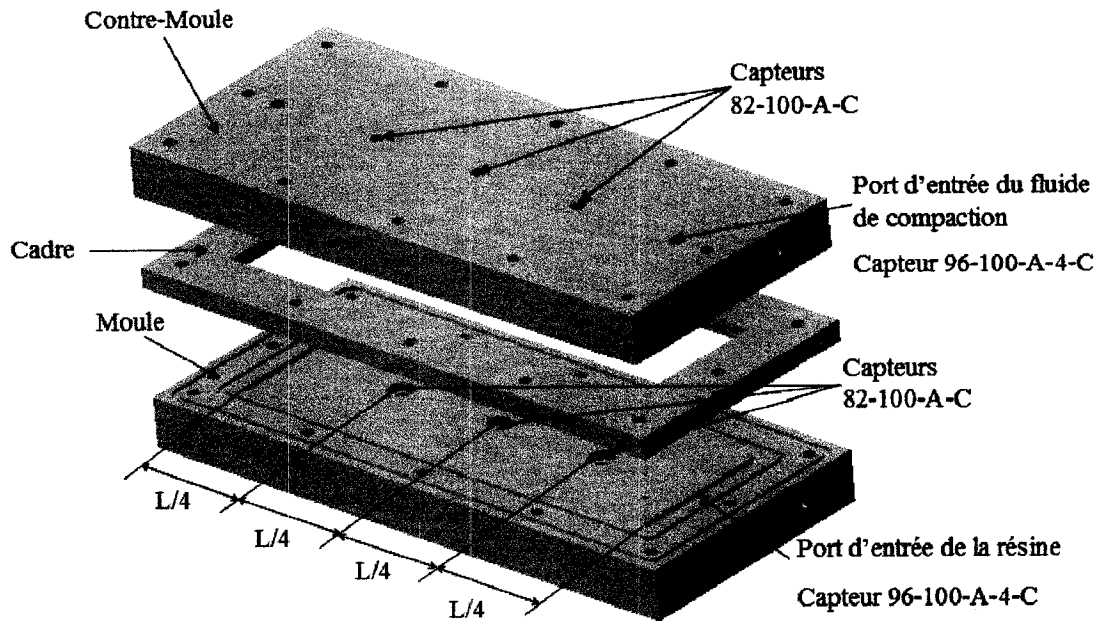


Figure 3.2 Disposition des capteurs de pression absolue du moule Polyflex

Les capteurs placés sur chacune des plaques mesurent la pression dans la chambre d'injection et dans la chambre de compaction, qui sont séparées par le film plastique *Strechlon 700*. Les capteurs situés dans la chambre d'injection doivent mesurer la pression des fibres P_c ainsi que la pression de la résine P_r . Les capteurs de la chambre de compaction mesurent seulement la pression du fluide de compaction P_f . Les capteurs placés aux ports d'entrée des deux fluides mesurent la pression d'injection de chacun des fluides.

3.3.3 Réservoirs sous pression

La résine, qui est remplacée ici par l'huile de silicone, est injectée à pression constante à l'aide du réservoir sous pression illustré à la Figure 3.3a. Un deuxième réservoir est requis pour introduire le fluide de compaction à pression constante. Le réservoir de vide montré à la Figure 3.3b est utilisé pour tirer de vide à pression constante. Les deux types de réservoirs se règlent à l'aide d'une valve et la pression indiquée est

comparée à celle mesurée par les capteurs de pression situés aux ports d'injection des fluides. Les valeurs des pressions d'injection et de vide utilisées sont indiquées au chapitre sur l'étude expérimentale.

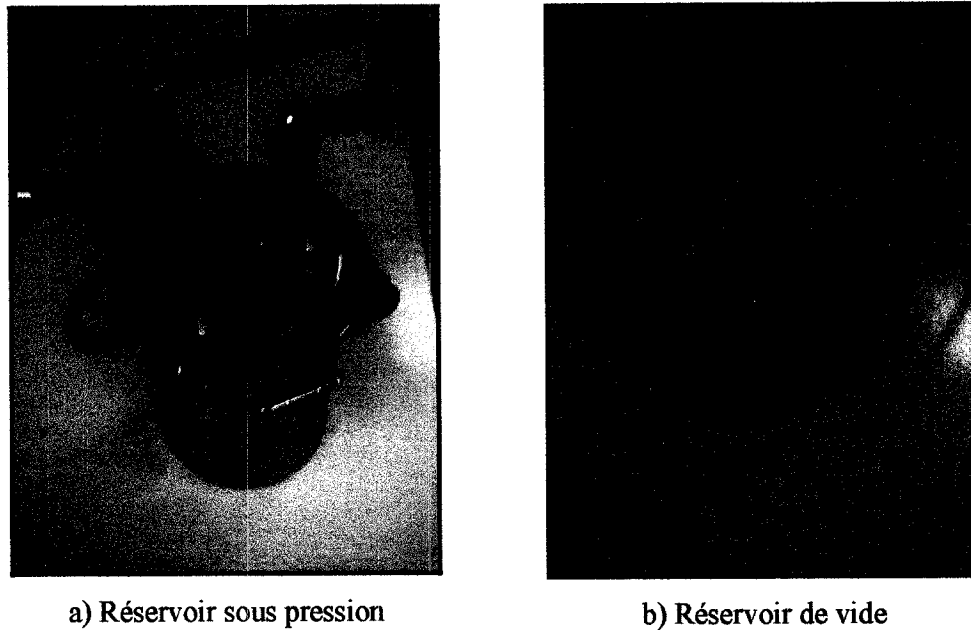


Figure 3.3 Réservoirs sous pression utilisés

3.3.4 Caméra pour la mesure de la vitesse d'écoulement de la résine

Finalement, une caméra numérique enregistre la séquence de fabrication projetée à l'aide des miroirs disposés sur le moule pour visualiser l'écoulement des fluides sur les deux faces de la cavité. La Figure 3.6 illustre la disposition des miroirs et de la caméra pour observer le remplissage de la cavité du moule. Les parois inférieure et supérieure de la cavité sont marquées par des lignes parallèles, perpendiculaires à la direction d'écoulement et séparées par des intervalles de longueur $\Delta L = 30 \text{ mm}$ (voir

Figure 3.4). Une vitesse moyenne pour chaque intervalle sera déterminée à l'aide de la caméra afin d'évaluer l'écoulement de la résine à l'intérieur du moule.

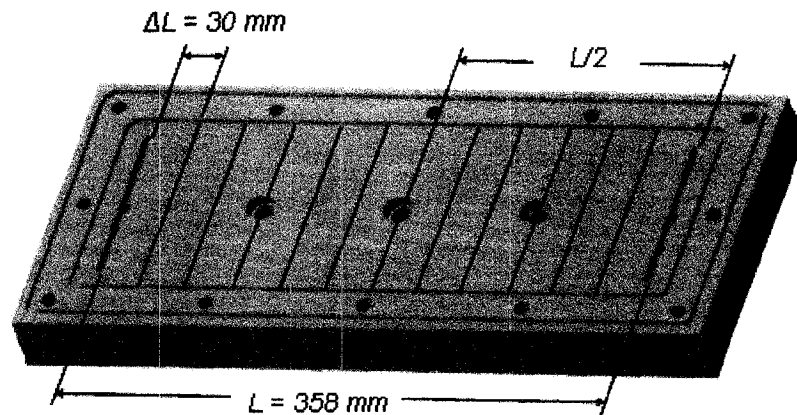


Figure 3.4 Lignes de référence marquées selon la longueur du moule et du contre-moule.

3.4 Montage

La fermeture du moule doit comprendre le film plastique qui sépare deux chambres étanches lors de la mise en œuvre du procédé. Après avoir essayé de plusieurs façons, on a trouvé que la disposition illustrée à la Figure 3.5 est celle qui assure un écoulement uniforme du fluide de compaction en évitant l'effet de bord sur le fluide. Cette approche consiste à placer un film entre le renfort et le cadre et un autre film de même grandeur entre le cadre et le contre-moule. Entre les deux films, sur deux bords de la cavité du moule, on a placé deux morceaux de joint torique de longueur égale à la longueur L de la cavité et de diamètre égale à l'épaisseur ($H = 3,175 \text{ mm}$) de la cavité. Étant donné que le film *Strechlon 700* se déforme facilement, il épousera la forme de la plaque compactée après l'écoulement du fluide de compaction.

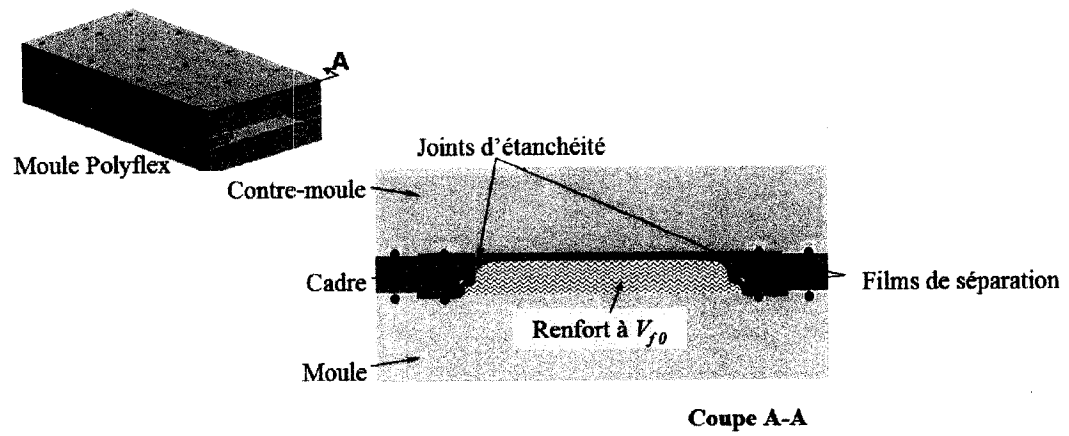


Figure 3.5 Disposition initiale des films qui divisent la cavité du moule

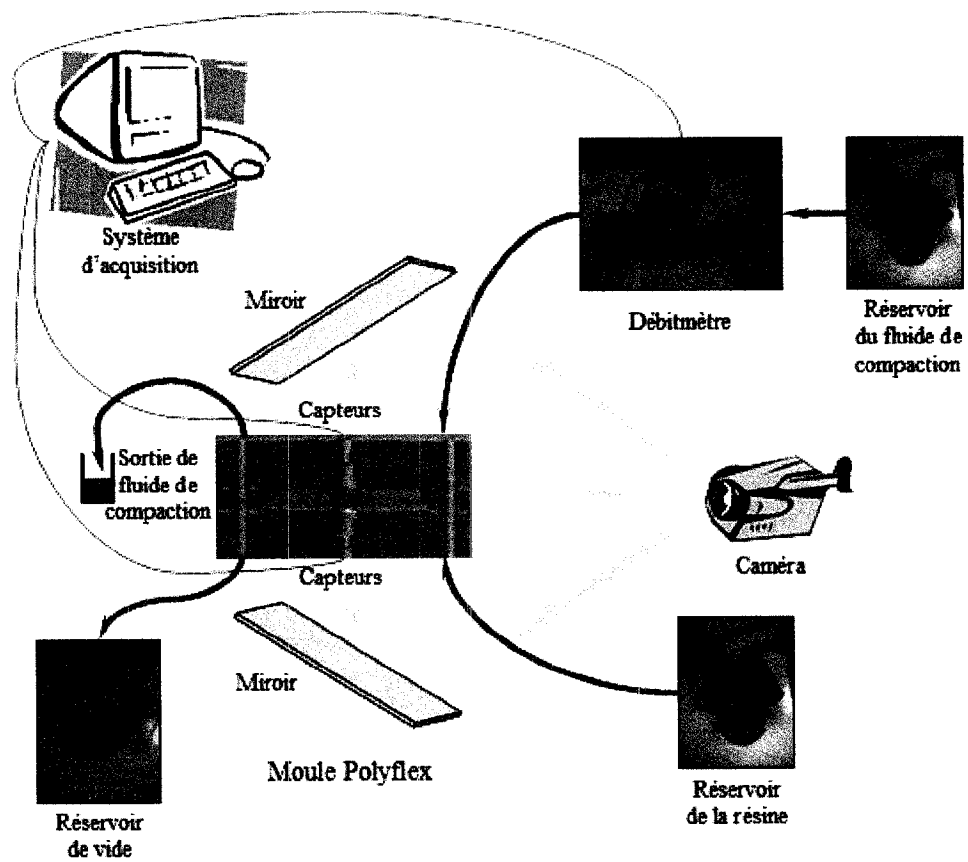


Figure 3.6 Montage des expériences pour l'évaluation du procédé Polyflex

Le montage complet utilisé dans les expériences est montré à la Figure 3.6. La résine contenue dans un réservoir est injectée à pression constante dans la chambre d'injection. La chambre d'injection se trouve dans la partie inférieure de la cavité du moule, séparée de la chambre de compaction par le film plastique. Le vide est tiré à partir de l'évent de résine pendant la fabrication jusqu'à l'imprégnation totale du renfort. Le fluide de compaction est contenu dans un deuxième réservoir. Ce fluide sous pression passe par le débitmètre avant d'entrer dans la chambre de compaction. À l'étape de compaction, le fluide remplit la chambre de compaction jusqu'à l'évent qui se ferme afin de transmettre la pression statique imposée à l'aide de la valve du réservoir. À la fin de l'expérience, le fluide de compaction est évacué par l'évent à l'aide d'air injecté sous pression au port d'entrée. Pendant l'expérience, le système d'acquisition relève à chaque milliseconde la pression des capteurs et le débit du fluide de compaction. L'enregistrement vidéo de chacune des expériences a été réalisé et conservé pour évaluer la vitesse d'écoulement de la résine.

3.5 Conclusion

L'injection de la résine et du fluide de compaction sera réalisée à pression constante, réglée par une valve reliée à chacun des réservoirs. Une caméra numérique enregistre chacune des expériences afin de mesurer la vitesse d'écoulement de la résine. La détermination des paramètres de fabrication, ainsi que les plans d'expériences réalisés seront présentés au chapitre suivant.

CHAPITRE 4 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

4.1 Introduction

Ce chapitre décrit la planification des expériences réalisées pour évaluer le procédé Polyflex et présente un compte-rendu détaillé des observations effectuées en laboratoire lors de l'injection d'échantillons plans dans le moule expérimental. La première partie de cette étude a pour objectif d'identifier les valeurs des paramètres de fabrication utilisés en laboratoire. Les variables du problème, c'est-à-dire les paramètres de fabrication employés et les résultats recherchés seront décrits avant d'aborder la planification des essais expérimentaux en laboratoire. La planification d'essais sera effectuée selon une analyse factorielle à deux niveaux, dans lequel deux valeurs extrêmes seront étudiées pour chaque paramètre de fabrication. Des expériences supplémentaires seront aussi réalisées avec des valeurs médianes afin de mieux analyser la variabilité des résultats. Les différentes mesures effectuées et les observations en laboratoire permettront de mieux comprendre les phénomènes en jeu lors de l'imprégnation d'un renfort fibreux par le procédé Polyflex.

Les paramètres de fabrication analysés sont les suivants :

- la pression constante d'injection de la résine P_r ,
- la pression constante d'injection du fluide de compaction P_f ,
- la viscosité du fluide de compaction η_f ,
- la position finale du front de la résine injectée L_r ,
- le taux volumique de fibres initial V_{f0} .

Les résultats à analyser sont :

- le temps total d'imprégnation du renfort t_p ,
- le rapport des vitesses de la résine à l'étape 2 de compaction $R_2 = \frac{v_{r\ max}}{v_{r0}}$.

Les mesures réalisées en laboratoire sont les suivantes :

- la pression sur les capteurs du moule,
- le débit du fluide de compaction,
- la vitesse d'écoulement de la résine.

4.2 Paramètres expérimentaux de fabrication

4.2.1 Taux volumique de fibres initial

La fraction volumique de fibres à utiliser dépend de l'épaisseur de la cavité ainsi que du nombre de couches du renfort. On a fixé précédemment l'épaisseur de cavité du moule transparent $H = 3,175$ mm. La fraction de fibres initiale V_{f0} a été donnée au Tableau 3.3 en fonction du nombre de couches du renfort OCF-8610 pour une cavité de 3,175 mm d'épaisseur. Un des avantages du procédé Polyflex est d'offrir la possibilité de contrôler le taux volumique de fibres. La compaction du mélange renfort-résine à l'étape 2 de compaction est fonction de la quantité de résine injectée et de la pression du fluide de compaction. On envisage l'imprégnation d'un renfort ayant une fraction de fibres initiale V_{f0} comprise dans l'intervalle $10 \% < V_{f0} < 20 \%$. Cet intervalle, qui implique l'utilisation de **2 et de 3 couches du renfort OCF-8610** dans la cavité du moule, permet d'injecter la résine facilement à travers un renfort ayant une faible fraction volumique de fibres. Le mélange renfort-résine sera donc compacté à l'étape 2 de compaction, de telle sorte que le taux volumique de fibres final augmentera. L'utilisation d'une seule couche du renfort donne une fraction de fibres initiale $V_{f0} = 5,6 \%$ dans la cavité. Ceci impliquerait une compaction qui n'est pas représentative de l'étape 2 de compaction. Remarquer que le taux volumique de mats en fibres de verre pour les composites couramment fabriqués dans l'industrie est d'environ 30 %. Le taux volumique de fibres final V_{fc} d'une plaque composite fabriquée par le procédé Polyflex est calculé à l'Annexe C.

4.2.2 Position finale du front L_r de la résine injectée

La fraction volumique de fibres finale V_{fc} d'un composite fabriqué par le procédé Polyflex est fonction de la quantité de résine introduite dans le moule à l'étape 1 d'injection. La fraction de fibres finale V_{fc} peut être évaluée à partir des hypothèses suivantes :

- La résine et le renfort sont considérés incompressibles.
- Les chambres d'injection et de compaction du moule Polyflex sont étanches.
- Aucune bulle d'air ou zone sèche n'est présente dans le renfort à la fin de la fabrication.
- La pression du fluide de compaction P_f est constante dans le temps sur la couche de séparation.

Le schéma de la Figure 4.1a montre la chambre d'injection à la fin de l'étape 1 d'injection, dont les dimensions sont L , H et w . À la fin de cette première étape, le front de résine se trouve à une distance L_r de la ligne d'injection. La Figure 4.1b illustre l'étape de consolidation du procédé Polyflex, qui est caractérisée par l'imprégnation et la compaction totale du composite. Le volume de résine final du composite est celui injecté à l'étape 1 d'injection.

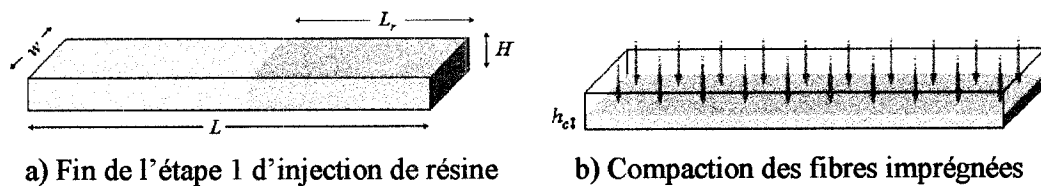


Figure 4.1 Compaction finale de la pièce fabriquée par le procédé Polyflex

On obtient à l'Annexe C la fraction de fibres V_{fc} en fonction de la quantité de résine injectée, de l'épaisseur H de la cavité et des caractéristiques d'un renfort quelconque.

La pression $P_{c\ max}$ nécessaire pour compacter les fibres jusqu'à une fraction volumique V_{fc} et l'épaisseur finale h_c du composite sont aussi calculées à l'Annexe C.

Pour la planification des essais, les valeurs extrêmes du paramètre L_r (position finale du front de la résine de l'étape d'injection) sont déterminées à $L_r = L/2$ et $L_r = 2/3 L$, où L est la longueur de la cavité du moule. Pour un taux volumique de fibres initial $V_{fo} = 11,2\%$ (2 couches du renfort OCF-8610 dans la cavité d'épaisseur $H = 3,175\text{ mm}$), une plus grande valeur de L_r entraînerait une compaction très faible. Par exemple, si $L_r = 3/4 L$, le taux de fibres maximal qu'on peut obtenir serait $V_{fc} = 13,4\%$. Pour une valeur $L_r < L/2$, la pression $P_{c\ max}$ requise dépasserait la limite permise de 6 bars dans le moule.

Le

Tableau 4.1 donne la fraction de fibres finale V_{fc} , la pression $P_{c\ max}$ nécessaire pour compacter les fibres jusqu'à V_{fc} et l'épaisseur finale h_c du composite pour les positions finales du front de résine à la fin de l'étape 1 d'injection ($L_r = L/2$ et $L_r = 2/3 L$). Ces résultats sont calculés en fonction des fractions de fibres initiales V_{f0} du renfort OCF-8610 déterminées précédemment. La dernière colonne du tableau précise le taux de compaction pour chacune des conditions de fabrication indiquées dans les deux premières colonnes du tableau.

Tableau 4.1 Résultats de compaction des plaques fabriquées par le procédé Polyflex pour les conditions de fabrication déterminées et pour une cavité du moule $H = 3,175$ mm

L_r	Vf_0 [%]	$P_{c\ max}$ [bar]	h_c [mm]	Vf_c [%]	Compaction [%]
L/2	11,2	1,01	1,76	20,1	44
L/2	16,7	2,46	1,85	28,7	42
2/3 L	11,2	0,49	2,35	15,1	26
2/3 L	16,7	1,20	2,47	21,5	22

4.2.3 Viscosité du fluide de compaction η_f

On analysera l'influence de la viscosité η_f du fluide de compaction sur le temps d'imprégnation t_p du renfort. On a déterminé précédemment que le fluide de compaction utilisé dans cette étude sera de l'huile de silicone, dont les valeurs extrêmes de viscosité sont comprises entre **0,1 Pa.s** et **1,0 Pa.s**.

4.2.4 Pression de la résine

Comme la résine est introduite dans un moule rectangulaire à partir d'une ligne d'injection placée à l'extrémité, le front de la résine à l'étape 1 d'injection est rectiligne. Si l'épaisseur du renfort est inférieure à celle de la cavité avant la fabrication ($h_0 < H$) une injection flexible de résine se produit là où l'épaisseur de la zone saturée augmente au fur et à mesure que la résine avance dans le moule. Afin de déterminer ici d'une manière simplifiée les plages de valeur des paramètres d'injection qui seront considérés dans notre étude, on ne considérera pas cette possibilité.

La vitesse v_r du front de la résine dans un moule rigide ($h_0 = H$) est calculée par la loi de Darcy pour un écoulement unidirectionnel de résine en milieu poreux à l'aide de l'équation (1.5) :

$$v_r = -\frac{K}{\phi \eta_r} \frac{dp}{dx} \Big|_{x=L_r} \quad (4.1)$$

On rappelle que la vitesse réelle de la résine v_r est proportionnelle à la perméabilité K du renfort et du gradient de pression dp/dx de la résine injectée. La vitesse v_r est inversement proportionnelle à la porosité ϕ du renfort et à la viscosité η_r de la résine. Il faut noter que les expériences en laboratoire ne représentent pas un écoulement tout à fait rectiligne mais il s'agit d'approximer la réalité à l'aide de la loi de Darcy.

En intégrant l'équation (4.2) (en supposant qu'à l'instant $t = 0$, le front de résine se trouve au port d'injection), on obtient le temps t_1 nécessaire pour que le front de résine atteigne une position finale L_r pendant l'étape 1 d'injection :

$$t_1 = \frac{\eta_r \phi}{K(-\Delta P)} \frac{L_r^2}{2} \quad (4.2)$$

où la différence de pression ΔP correspond à l'écart entre la pression au front de résine, (égale ici à la pression de vide) et la pression P_{r0} mesurée au port d'injection. Remarque que ΔP est toujours négative dans notre cas et que le signe « - » dans l'équation (4.2) s'annule. L'influence de la pression de vide P_v ne sera pas étudiée séparément dans ce travail. Toutefois, il se peut fort bien que la saturation du composite dépende en fait de la pression de vide imposée dans la cavité avant l'injection de la résine. Ces questions pourront faire l'objet d'études ultérieures. Pour tous les essais réalisés dans notre travail, la pression de vide est fixée à $P_v = -0,25$ bars. Dans le cas d'un écoulement rectiligne de résine en régime permanent, la différence ΔP est donc égale à la pression relative d'injection P_r imposée à la valve du réservoir de résine, soit :

$$\Delta P = P_v - P_{r0} = -P_r \quad (4.3)$$

La pression d'injection P_r de la résine sera déterminée en fonction du temps de remplissage t_l à l'étape 1 d'injection. Une pression P_r de résine trop forte à travers un renfort de faible fraction de fibres V_{f0} implique un temps de remplissage t_l trop court pour pouvoir évaluer correctement le comportement du procédé Polyflex. Le temps minimal de remplissage t_l sera donc fixé à 10 s. La valeur de la fraction de fibres initiale V_{f0} étant déterminée, il reste à déterminer les valeurs extrêmes de la pression P_r d'injection de résine pour une longueur remplissage de $L_r = 179$ mm ($L/2$) et pour que le temps t_l d'injection dépasse 10 s.

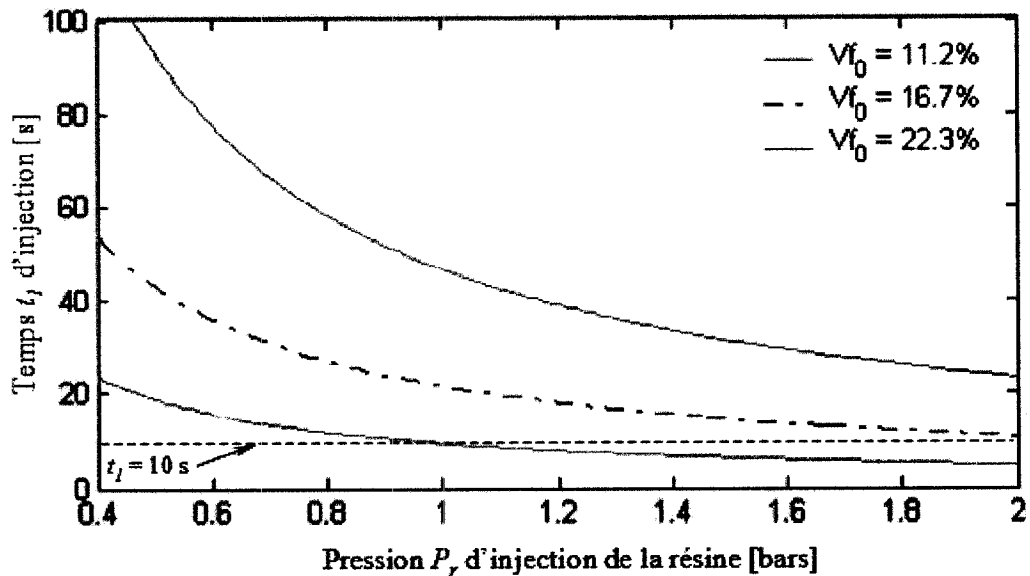


Figure 4.2 Temps nécessaire pour remplir la moitié du moule en fonction de la pression P_r d'injection imposée au réservoir de résine

À l'aide de l'équation (4.2), la Figure 4.2 donne le temps de remplissage t_l pour imprégner une longueur $L_r = 179$ mm du renfort OCF-8610 en fonction de la pression

d'injection P_r de la résine fixée sur le pot de pression. La viscosité η_r de la résine a été déterminée à $\eta_r = 0,5$ Pa.s et le modèle de perméabilité K du renfort OCF-8610 a été donné à l'équation (3.1) :

$$K = \left[200 + 11 e^{16.8 (0.5 - V_f)} \right] 9.87 \times 10^{-13} \quad (4.4)$$

On observe dans le graphique que pour une fraction de fibres initiale $V_{f0} = 11,2$ % (2 couches dans la cavité d'épaisseur $H = 3,175$ mm), la moitié du renfort (sur une distance $L_r = 179$ mm) se remplit en 10 s avec une pression de $P_r = 1,05$ bars. On impose une pression d'injection minimale de $P_r = 0,50$ bars pour les essais du procédé Polyflex en laboratoire.

4.2.5 Pression du fluide de compaction

L'espace de variation de la pression de compaction est défini par rapport aux valeurs de la pression $P_{c \max}$ nécessaire pour compacter le renfort jusqu'à une fraction de fibres V_{fc} donnée. On rappelle que la fraction de fibres V_{fc} a été calculée pour les valeurs spécifiées de la position finale L_r du front de résine à fin de l'étape d'injection. En s'assurant que la pression du fluide de compaction $P_f > P_{c \max}$, on est confiant que pour les manipulations en laboratoire la fraction de fibres finale V_{fc} correspond au résultat obtenu à l'Annexe C à partir d'hypothèses fondées sur la conservation des volumes de fluide. On impose une valeur de pression P_f du fluide de compaction comprise dans l'intervalle $1,5 P_{c \max} < P_f < 4 P_{c \max}$. Lors des manipulations préliminaires en laboratoire, on a observé qu'une pression P_f du fluide de compaction inférieure à $1,5 P_{c \max}$ entraîne un temps total t_p de remplissage trop élevé. Cependant, la pression P_f ne devra pas dépasser la limite permise de pression dans le moule (6 bars).

Ayant déjà défini le taux de fibres initial V_{f0} et la position finale L_r du front de résine à la fin de l'étape 1 d'injection, le Tableau 4.2 donne les valeurs extrêmes utilisées pour la pression P_f d'injection du fluide de compaction. Les quatre premières colonnes représentent les valeurs des paramètres de fabrication spécifiés, tandis que les trois

dernières

colonnes,

reprises

du

Tableau 4.1, donnent les résultats théoriques de compaction de la pièce composite analysée en laboratoire.

Tableau 4.2 Valeurs extrêmes de la pression P_f d'injection du fluide de compaction déterminées pour les manipulations en laboratoire

V_{f0} [%]	L_r	P_f [bars]		$P_{c\ max}$ [bars]	h_c [mm]	V_{fc} [%]
11,2	L/2	1,52	4,04	1,01	1,76	20,1
11,2	2/3 L	0,74	1,96	0,49	2,35	15,1
16,7	L/2	3,69	6,00	2,46	1,85	28,7
16,7	2/3 L	1,80	4,80	1,20	2,47	21,5

4.3 Résumé sur les paramètres de fabrication

Le Tableau 4.3 récapitule les valeurs extrêmes des paramètres de fabrication considérés pour la planification d'essais en laboratoire du procédé Polyflex. Les contraintes sur les paramètres de fabrication sont résumées ci-dessous :

- Épaisseur du moule fixe : $H = 3,175$ mm.
- Fraction de fibres initiale V_{f0} comprise dans l'intervalle : $10\% < V_{f0} < 20\%$.
- Pression maximale permise dans le moule : 6 bars.
- Intervalle des viscosités disponibles pour l'huile de silicone utilisée comme fluide de compaction : $0,05 < \eta_f < 1,0$ Pa.s.
- Temps minimal d'imprégnation du renfort à l'étape 1 d'injection : $t_I = 10$ s.
- Pression P_f du fluide de compaction comprise dans l'intervalle $1,5 P_{c\ max} < P_f < 4 P_{c\ max}$, où $P_{c\ max}$ est la pression nécessaire pour compacter le renfort jusqu'à la fraction de fibres V_{fc} correspondant à la quantité de résine injectée.

Tableau 4.3 Valeurs extrêmes des paramètres de fabrication utilisées dans la planification d'essais en laboratoire pour l'évaluation du procédé Polyflex

	Valeur	
	-	+
Taux volumique de fibres initial V_{f0} [%] :	11,2	16,7
Position finale L_r du front de résine à l'injection :	$L/2$	$2/3 L$ L étant la longueur de la cavité
Viscosité η_f du fluide de compaction [Pa.s] :	0,1	1,0
Pression P_r de la résine réglée dans le réservoir [bars] :	0,50	1,05
Pression P_f d'injection du fluide de compaction [bars] :	1,52	4,04 pour $V_{f0} = 11,2\%$; $L_r = L/2$
	0,74	1,96 pour $V_{f0} = 11,2\%$; $L_r = 2/3 L$
	3,69	6,00 pour $V_{f0} = 16,7\%$; $L_r = L/2$
	1,80	4,80 pour $V_{f0} = 16,7\%$; $L_r = 2/3 L$

4.4 Résultats à analyser

En rappelant que l'objectif principal du procédé Polyflex consiste à améliorer la productivité des composites fabriqués par injection sur renfort, les résultats à analyser dans notre planification d'expérience portent sur le temps de fabrication et la vitesse d'imprégnation du renfort, soit :

- le temps total d'imprégnation du renfort t_p ,
- le rapport des vitesses de la résine à l'étape 2 de compaction $R_2 = \frac{v_{r\max}}{v_{r0}}$.

Le rapport R_2 de la vitesse maximale $v_{r\max}$ du front de résine sur sa vitesse v_{r0} au début de l'étape 2 de compaction est un résultat qui sert à déterminer les paramètres de fabrication nécessaires pour que la vitesse d'écoulement de la résine augmente par rapport à la fin de l'injection. La nécessité d'analyser le rapport R_2 a été remarquée pendant les manipulations en laboratoire et sera expliquée à la fin du chapitre.

4.5 Planification d'expériences

La planification d'expériences comprend la définition du problème, l'identification des variables et la planification des essais expérimentaux. Le procédé Polyflex est étudié pour des pressions constantes d'injection et de compaction. L'objectif de cette analyse est de déterminer l'influence des variables contrôlables sur les variables de réponse. Le processus de planification des essais expérimentaux est illustré à la Figure 4.3.

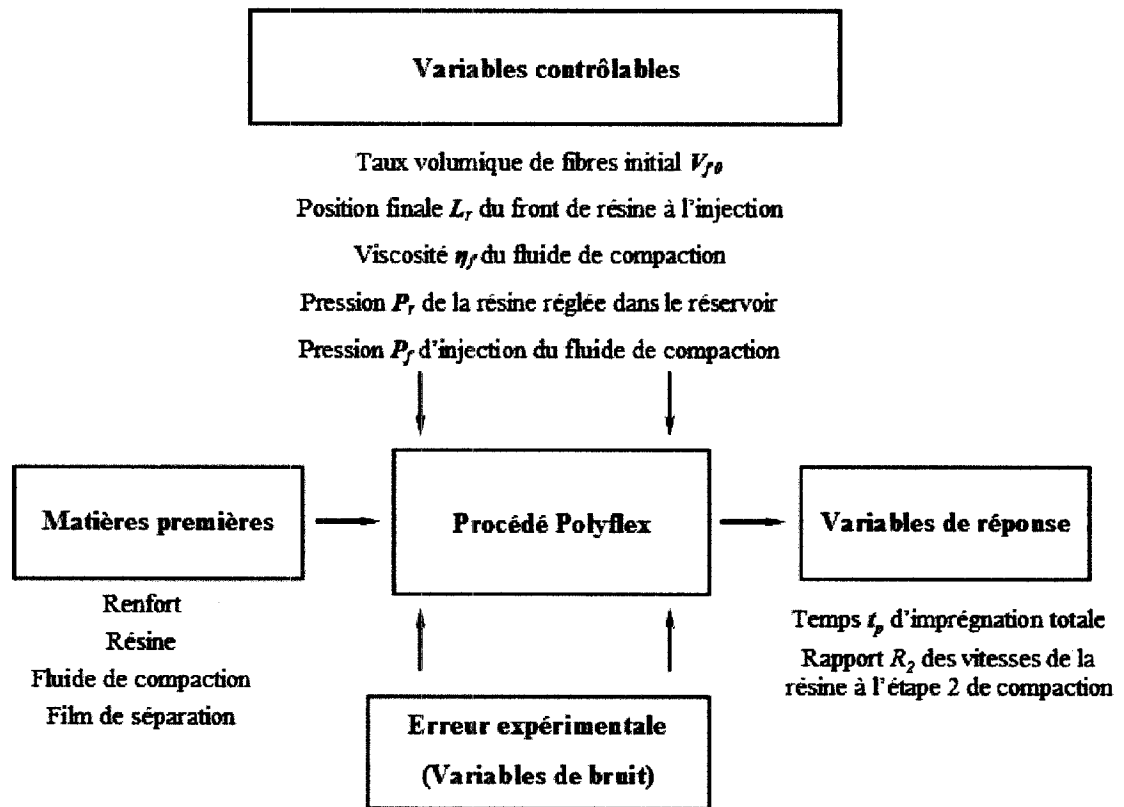


Figure 4.3 Processus de planification d'essais

Les caractéristiques des matières premières sont données par les fournisseurs et n'ont pas fait l'objet de vérifications particulières. Les variables de bruit qui constituent

l'erreur expérimentale n'ont pas été identifiées. On crée un plan d'expériences factoriel à deux niveaux, c'est-à-dire qu'on fait varier les paramètres de fabrication entre deux valeurs extrêmes (- et +). Des valeurs moyennes des paramètres ont aussi été étudiées afin de mieux analyser la variabilité des résultats. Puisque le paramètre P_f est différent pour les quatre combinaisons des paramètres V_{f0} et L_r , le plan d'essais comprend 4 séries d'expériences dans lesquelles 4 paramètres de fabrication sont variés. Les 4 séries d'expériences sont regroupées en deux tableaux, un pour chaque taux volumique de fibres initial V_{f0} . Le Tableau 4.4 donne le plan des expériences réalisées pour un taux de fibres initial $V_{f0} = 11,2 \%$, tandis que le Tableau 4.5 indique la planification des essais réalisés pour un taux de fibres initial $V_{f0} = 16,7 \%$.

Tableau 4.4 Plan d'expériences pour un taux de fibres initial $V_{f0} = 11,2 \%$

Essai	P_r bars	P_f bars	η_f Pa.s	L_r	
1	0,50	1,52	0,1	L/2	$V_{fc} = 20,1 \%$ $h_c = 1,76 \text{ mm}$
2	1,05	1,52	0,1	L/2	
3	0,50	4,04	0,1	L/2	
4	1,05	4,04	0,1	L/2	
5	0,50	1,52	1,0	L/2	
6	1,05	1,52	1,0	L/2	
7	0,50	4,04	1,0	L/2	
8	1,05	4,04	1,0	L/2	
9	0,78	2,78	0,1	L/2	
10	0,78	2,78	1,0	L/2	
11	0,50	0,74	0,1	2/3 L	$V_{fc} = 15,1 \%$ $h_c = 2,35 \text{ mm}$
12	1,05	0,74	0,1	2/3 L	
13	0,50	1,96	0,1	2/3 L	
14	1,05	1,96	0,1	2/3 L	
15	0,50	0,74	1,0	2/3 L	
16	1,05	0,74	1,0	2/3 L	
17	0,50	1,96	1,0	2/3 L	
18	1,05	1,96	1,0	2/3 L	
19	0,78	1,35	0,1	2/3 L	
20	0,78	1,35	1,0	2/3 L	

Tableau 4.5 Plan d'expériences pour un taux de fibres initial $V_{f0} = 16,7 \%$

Essai	P_r bars	P_f bars	η_f Pa.s	L_r	
21	0,50	3,69	0,1	L/2	$V_{fc} = 28,7 \%$ $h_c = 1,85 \text{ mm}$
22	1,05	3,69	0,1	L/2	
23	0,50	6,00	0,1	L/2	
24	1,05	6,00	0,1	L/2	
25	0,50	3,69	1,0	L/2	
26	1,05	3,69	1,0	L/2	
27	0,50	6,00	1,0	L/2	
28	1,05	6,00	1,0	L/2	
29	0,78	4,17	0,1	L/2	
30	0,78	4,17	1,0	L/2	
31	0,50	1,80	0,1	2/3 L	$V_{fc} = 21,5 \%$ $h_c = 2,47 \text{ mm}$
32	1,05	1,80	0,1	2/3 L	
33	0,50	4,80	0,1	2/3 L	
34	1,05	4,80	0,1	2/3 L	
35	0,50	1,80	1,0	2/3 L	
36	1,05	1,80	1,0	2/3 L	
37	0,50	4,80	1,0	2/3 L	
38	1,05	4,80	1,0	2/3 L	
39	0,78	3,30	0,1	2/3 L	
40	0,78	3,30	1,0	2/3 L	

4.6 Observations en laboratoire

Selon le plan d'expériences, 40 essais (plus 12 essais répétés) ont été réalisés en laboratoire de façon à tester l'efficacité du procédé Polyflex. Ce procédé est mis en oeuvre pour des pressions d'injection de résine et de fluide de compaction constantes. Afin de comprendre le phénomène de remplissage du procédé, chacune des expériences comporte trois types d'observations :

- la pression sur les capteurs du moule,
- le débit du fluide de compaction et
- la vitesse du front de résine.

Tel que schématisé précédemment, les appareils utilisés pour chacune des observations sont, respectivement : les capteurs branchés au système d'acquisition de données (DAQ), le débitmètre connecté aussi au DAQ et la caméra pour mesurer visuellement la vitesse des fluides. Les étapes de fabrication sont définies et schématisées dans cette section. Une description des observations effectuées sera donnée pour chacune des étapes du procédé. On traitera le problème de mesure des capteurs à tenir en compte pour la conception des moules dans l'avenir. Dernièrement, lors des observations de la vitesse du front de résine, le rapport de la vitesse maximale sur la vitesse initial à l'étape de compaction sera introduit afin de connaître les paramètres de fabrication nécessaires pour diminuer le temps de remplissage du procédé.

Les expériences effectuées comprennent les étapes suivantes du procédé Polyflex :

Étape 1 : Injection de la résine

Étape 2 : Compaction du composite

- a. Début de l'injection du fluide de compaction
- b. Fin de l'injection du fluide de compaction
- c. Fin de l'imprégnation du renfort

Étape 1 : Injection de la résine

Décrite à la Figure 4.4, cette étape commence par l'injection à pression constante de la résine et se termine lorsque la valve du pot d'injection se ferme. Le liquide atteint alors la position désirée (soit à $L/2$ ou $2/3 L$ de la cavité du moule dans les expériences).

Étape 2 : Compaction du composite

Le fluide de compaction est injecté à pression constante jusqu'à ce que la résine imprègne la totalité des fibres. Afin de bien comprendre l'imprégnation des fibres à l'étape 2 de compaction, celle-ci est séparée en trois sections :

Étape 2a : Début de l'injection du fluide de compaction

Cette partie, schématisée sur la Figure 4.5, commence au début de l'injection du fluide de compaction jusqu'au croisement des fluides dans la cavité du moule.

Étape 2b : Fin de l'injection du fluide de compaction

Cette étape est montrée à la Figure 4.6 et commence au croisement des fluides jusqu'à ce que le fluide de compaction atteigne l'évent, lequel est fermé à ce moment.

Étape 2c : Fin de l'imprégnation du renfort

Cette étape se poursuit jusqu'à la fin de l'imprégnation totale des fibres depuis la fermeture de l'évent du fluide de compaction, tel qu'illustré à la Figure 4.7.

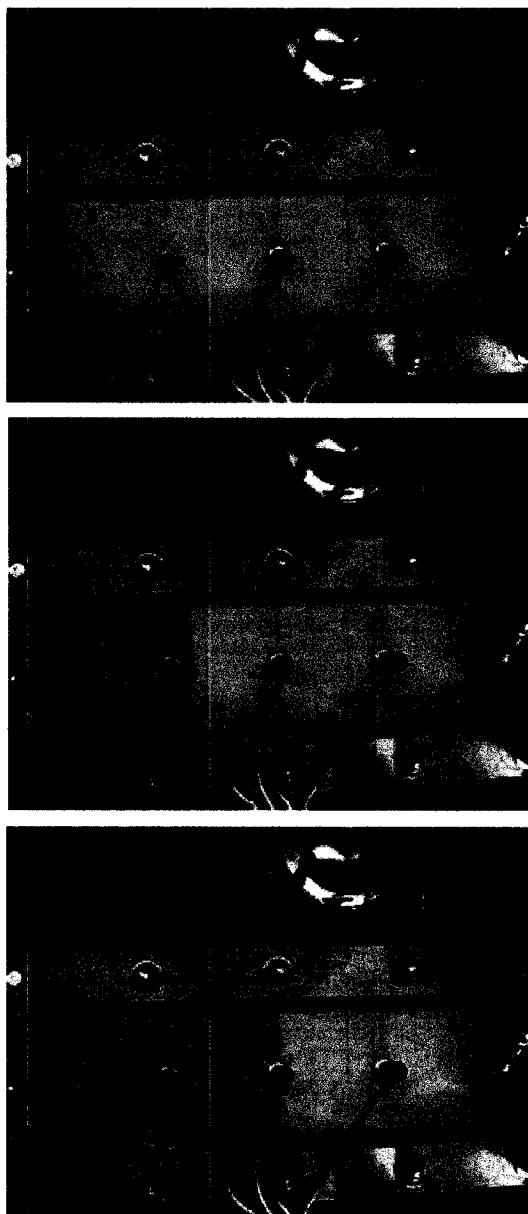


Figure 4.4 Étape 1 - Injection de la résine : le front de résine progresse dans la cavité

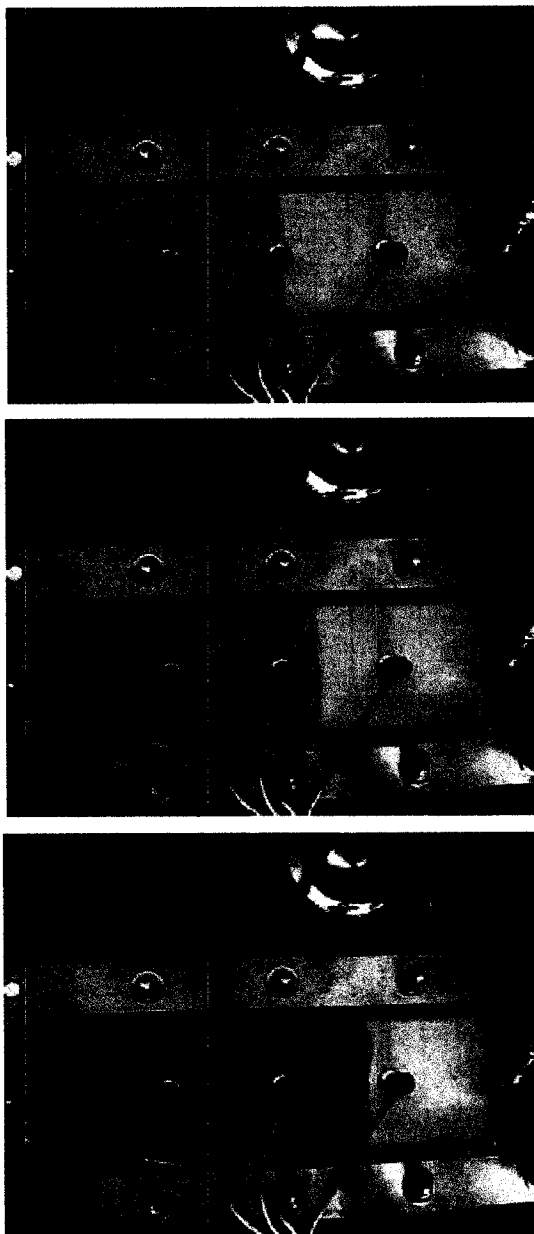


Figure 4.5 Étape 2a – Début de l'injection du fluide de compaction : le fluide de compaction pénètre dans la chambre de compaction jusqu'au niveau de la résine



Figure 4.6 Étape 2b - Fin de l'injection du fluide de compaction : après avoir dépassé la résine, le fluide de compaction finit de remplir la chambre de compaction



Figure 4.7 Étape 2c - Fin de l'impregnation du renfort : la résine finit d'impregner le renfort

4.6.1 Pression sur les capteurs

La Figure 4.8 montre les résultats de la mesure de la pression par les capteurs disposés sur les deux parois du moule lors de l'imprégnation des fibres. Afin de mieux comprendre la légende utilisée dans la figure, on rappelle la nomenclature de la valeur de la pression obtenue à l'aide des capteurs, où P_r est la pression de la résine et P_f est celle du fluide de compaction :

P_{r0} ou P_{f0} : pressions mesurées au port d'entrée des fluides injectés (résine, fluide de compaction),

$P_{rL/4}$ ou $P_{fL/4}$: pressions mesurées à $L/4$ de la longueur totale de la cavité,

$P_{rL/2}$ ou $P_{fL/2}$: pressions mesurées à $L/2$,

$P_{r3L/4}$ ou $P_{f3L/4}$: pressions mesurées à $3L/4$.

Le texte à droite de la figure précise les temps caractérisant l'imprégnation du renfort dans l'expérience. Il faut mentionner que la géométrie et la position des capteurs ne permettent pas de mesurer la pression de compaction P_c exercée sur les fibres. Le diagramme donne ainsi une idée du développement de la pression dans le moule, mais ne fournit pas de mesures exactes des pressions exercées sur le renfort. Cette question sera discutée plus loin dans ce chapitre.

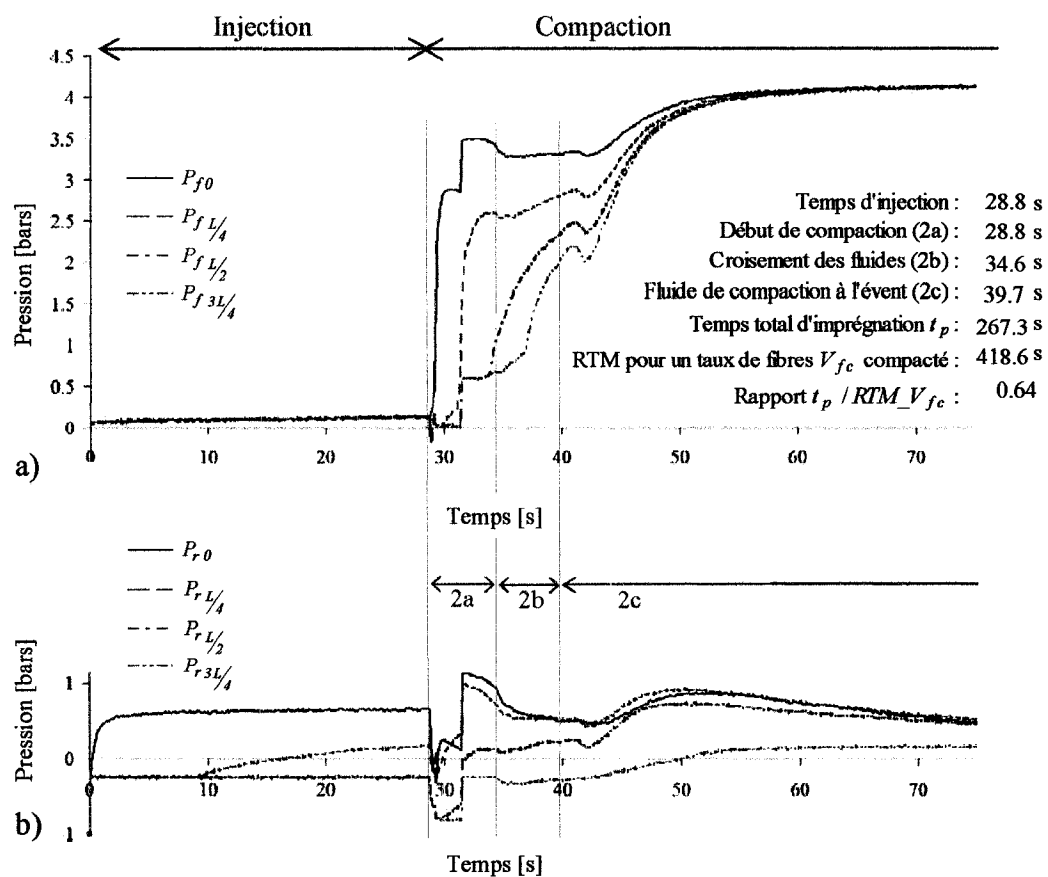


Figure 4.8 Distribution de pression dans les chambres de compaction (a) et d'injection

(b)

Étape 1 : Injection de la résine

Au temps 0, les capteurs de la chambre d'injection mesurent une pression de vide, ajustée à -0,25 bars, tandis que les capteurs de la chambre de compaction mesurent une pression légèrement supérieure à zéro. Un instant après, on constate une augmentation de pression au port d'injection de la résine (fluide rouge), qui devient constante à 0,5 bars. La pression mesurée au cadran du pot d'injection est donc de $0,5 - (-0,25) = 0,75$ bars. Après environ 10 secondes d'injection, le front du fluide rouge a rempli le quart de la cavité du moule et la pression au capteur $P_{rL/4}$ commence à s'élever. L'étape 1 d'injection se termine à 28,8 s, lorsque le fluide rouge a rempli la moitié de la cavité et que le port d'injection est fermé.

Étape 2a : Début de l'injection du fluide de compaction

Au moment où le port d'injection de la résine (fluide rouge) est fermé, le fluide de compaction (fluide bleu) pénètre dans le moule à pression constante et l'étape 2 de compaction commence. L'étape 2a débute avec une chute de pression pendant environ 3 secondes sur tous les capteurs (sauf pour P_{f0}). La chute de pression dans la chambre d'injection s'explique par deux facteurs :

- a) Une fois que le port d'injection est fermé, la pression dans la chambre d'injection devient nulle.
- b) Le début d'injection du fluide bleu est marqué par l'application d'une force de compression instantanée sur la chambre d'injection. Par conséquent, le compresseur, qui sert à la mise sous vide de la chambre d'injection, est moins chargé et tire plus de vide pendant un moment.

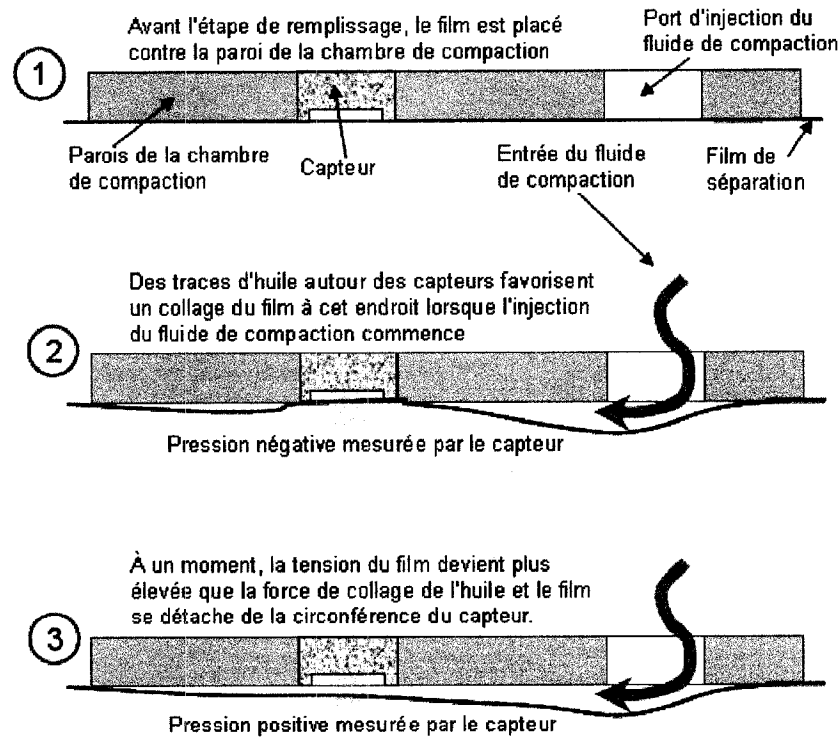


Figure 4.9 Chute de pression sur les capteurs de la chambre de compaction à l'étape 2a

Par contre, la chute de pression mesurée sur les capteurs de la chambre de compaction s'explique par un effet de succion temporaire du capteur (entouré de traces d'huile) par le film plastique. Ce phénomène est montré à la Figure 4.9. Puisque le capteur P_{f0} est placé dans le conduit d'injection du fluide bleu et non pas sur la paroi du moule, celui-ci ne mesure pas de chute de pression, mais plutôt une augmentation de pression à partir de son état initial.

À mi-parcours de l'étape 2a, on voit grâce à la pression ascendante mesurée par le capteur $P_{fL/4}$ que le fluide bleu a rempli le quart de la cavité. Pendant que la pression monte aux capteurs P_{f0} et $P_{fL/4}$, les capteurs $P_{fL/2}$ et $P_{f3L/4}$ mesurent une pression

de 0,5 bars pendant quelques secondes. Ce palier de pression s'explique par le fait que de l'air est emprisonné entre le front du fluide de compaction et la rainure d'échappement du fluide, le film étant collé à la rainure et empêchant l'air de sortir. La pression aux capteurs P_{r0} et $P_{rL/4}$ diminue légèrement après le début d'injection du fluide bleu. Cette diminution est due à la dispersion du fluide rouge dans la chambre d'injection. Après environ 33 s, le fluide bleu atteint le capteur $P_{rL/2}$ et la pression de celui-ci commence à monter. La pression au capteur $P_{r3L/4}$ reste stable et légèrement inférieure à la pression de vide imposée à l'état initial.

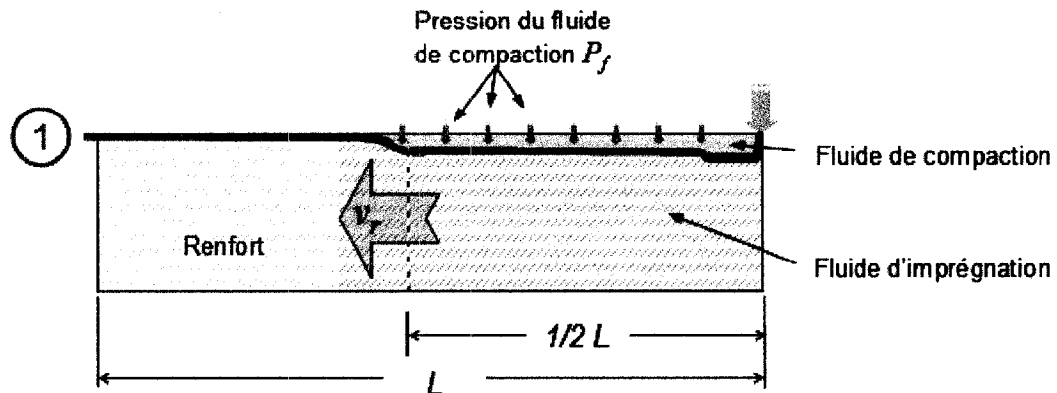
Le croisement des deux fluides s'observe à 34,6 s. À cet instant, on constate une diminution de la pression sur tous les capteurs. Ce phénomène passager s'explique par l'absence de résine en dessous du front du fluide bleu. Ce dernier s'écoule donc avec plus de facilité dans la chambre de compaction.

Étape 2b : Fin de l'injection du fluide de compaction

Après la légère baisse de la pression mesurée par les capteurs au croisement des fluides, la pression dynamique mesurée par le capteur P_{f0} devient stable. Les autres capteurs de la chambre de compaction mesurent toujours une pression ascendante en régime transitoire à l'étape 2b. La pression descend moins vite aux capteurs P_{r0} et $P_{rL/4}$ que pendant l'étape 2a pour les deux raisons suivantes :

- a) L'accumulation de résine se réduit à ces endroits.
- b) Tel qu'indiqué à la Figure 4.10, après le croisement des fluides, la vitesse d'écoulement de la résine v_r diminue à cause de la pression du fluide de compaction, qui fait augmenter le taux volumique de fibres non imprégnées et rend ainsi plus difficile l'avancement du front de résine.

La pression au capteur $P_{r, L/2}$ monte au fur et à mesure que la région au dessus de ce capteur se remplit. Pendant ce temps, le capteur $P_{r, 3L/4}$ mesure une pression stable, puisque le fluide rouge n'a pas encore complètement rempli la chambre d'injection.



La vitesse du front de la résine v_r diminue après le croisement des fluides puisque la fraction des fibres non imprégnées augmente, étant donné la diminution d'épaisseur causée par P_f

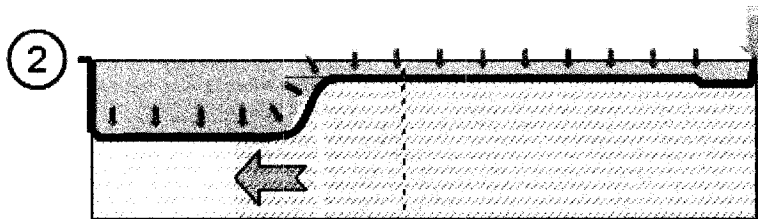


Figure 4.10 Diminution de la vitesse d'écoulement de la résine après le croisement des fluides

Étape 2c : Fin de l'imprégnation du renfort

Le début de cette phase est indiqué par la fermeture de l'évent du fluide de compaction. La Figure 4.11 montre les variations de pression dans tous les capteurs

pendant l'étape 2c avant et après l'imprégnation totale du renfort. On observe que la pression diminue sur tous les capteurs et ensuite augmente considérablement (à l'exception de celle lue par le capteur $P_{r\ 3L/4}$). La pression dynamique mesurée à l'étape 2b par le capteur P_{f0} devient rapidement égale à la pression statique imposée à la valve du pot de pression dans toute la chambre de compaction. Pendant que le front de la résine atteint le capteur $P_{r\ 3L/4}$ à environ 44 s, la pression mesurée sur le capteur est peu élevée au début de l'étape 2c, puisque c'est le renfort sec qui subit la part de la charge de compaction qui n'est pas transmise au capteur, étant donné le faible volume de fluide rouge près de l'évent (voir Figure 4.11). Contrairement au capteur $P_{r\ 3L/4}$, la pression plus élevée mesurée par les capteurs P_{r0} , $P_{r\ L/4}$ et $P_{r\ L/2}$ au début de cette phase s'explique parce que la même pression $P_f = 4,2$ bars exercée par le fluide de compaction est d'autant plus supportée par la résine près du port d'injection qu'en direction de l'évent. Cela implique qu'au début de l'étape 2c la pression de compaction exercée sur les fibres P_c est plus faible (ou bien que l'épaisseur du matériau est plus grande) au voisinage du port d'injection plutôt qu'en direction de l'évent.

La pression de la résine P_r commence à se stabiliser à environ 55 s. À partir de ce moment, les pressions P_r et P_c s'équilibrent afin de supporter une pression de compaction P_f constante. On aperçoit que la pression mesurée par le capteur P_{r0} descend graduellement sans atteindre l'équilibre avant la fermeture de l'évent à environ 270 s. Étant donné son emplacement dans le tuyau d'injection, ce capteur est le seul parmi ceux de la chambre d'injection à mesurer uniquement la pression du fluide rouge. Après l'étape 1 d'injection de la résine, étant donné que la cavité n'est pas remplie, la pression au port d'injection diminue jusqu'à ce que l'évent de la chambre d'injection soit fermé à environ 270 s. C'est à ce moment qu'on constate une

légère augmentation de la pression mesurée au capteur $P_{r\ 3L/4}$, après quoi les pressions se stabilisent dans les deux chambres.

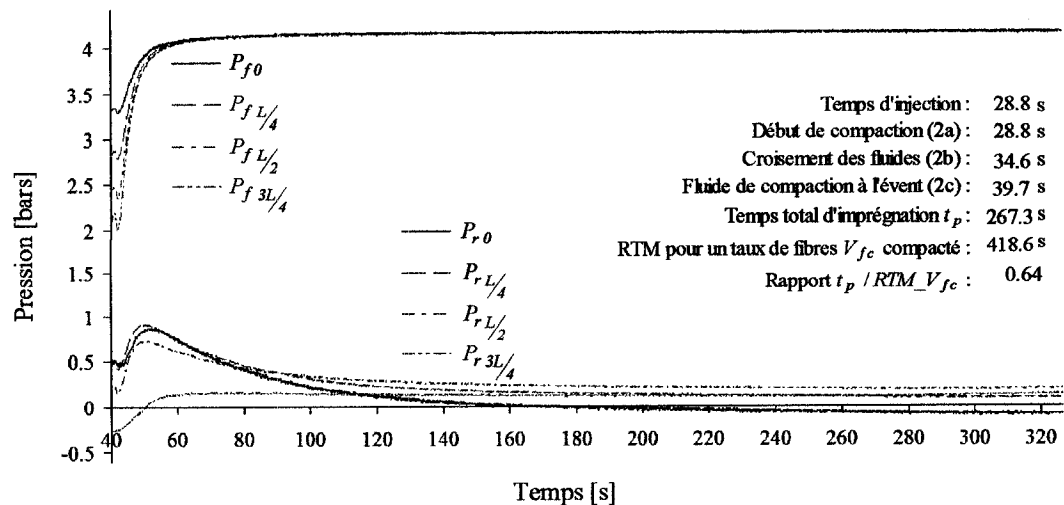


Figure 4.11 Distribution de pression dans le moule à l'étape 2c

Variabilité de la pression mesurée dans la chambre d'injection

Pourquoi la pression mesurée par les capteurs de la chambre d'injection n'est pas la même ? En principe, la pression finale dans la chambre d'injection doit être à l'équilibre et constante, puisque la pression P_f du fluide de compaction est constant et qu'en principe il n'y a pas de fuite de fluide dans le moule. Cette différence est due à deux facteurs principaux :

- Les capteurs ne transmettent pas correctement la pression P_c exercée sur les fibres. La Figure 4.12 montre que la valeur de la pression P_c mesurée par un capteur résulte de la **disposition de fibres s'appuyant sur le diaphragme** du capteur, ainsi que du **taux volumique de fibres V_f** placées sur le capteur. La surface de pression des fibres sur le diaphragme dépend de la façon dont les

fibres aléatoires fléchissent sur le capteur. En outre, à cause de la distribution aléatoire des fibres dans un renfort de type mat, le taux volumique de fibres peut varier d'un endroit à un autre.

- b) Les capteurs ne sont pas placés au même niveau sur la paroi du moule. Étant donné un perçage irrégulier des trous pour les capteurs, ainsi que des traces d'huile sur la paroi où les capteurs s'appuient, ceux-ci ne sont pas placés à la même hauteur par rapport à la paroi du moule. Si le taux de fibres varie selon l'épaisseur du renfort sur les capteurs, la pression sur les fibres P_c change en conséquence. Pour une pression du fluide de compaction P_f constante, la relation (2.1) indique qu'une augmentation de la pression P_c produit une diminution de la pression de la résine P_r afin d'atteindre l'équilibre :

$$P_f = P_r + P_c \quad (4.5)$$

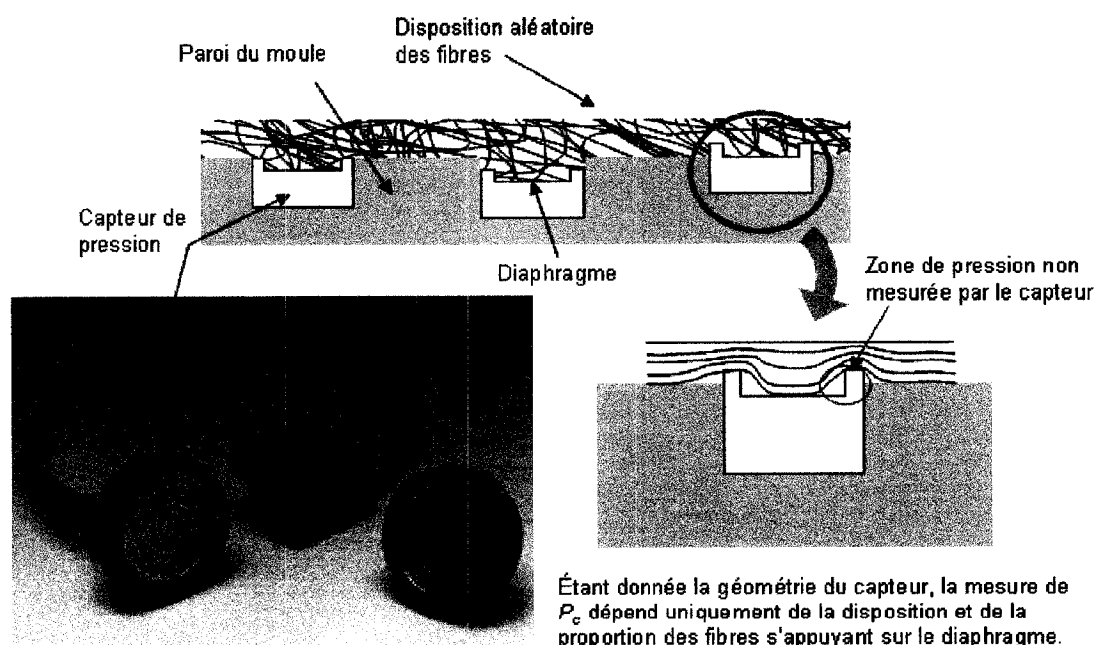


Figure 4.12 Transmission de la pression exercée sur les fibres P_c aux capteurs

Des essais de compaction du renfort OCF-8610 non imprégné à un taux volumique de fibres $V_f = 11,6\%$ ont été réalisées afin de trouver l'influence de la pression P_c mesurée par les capteurs en fonction de la pression du fluide de compaction P_f . Pour une pression P_f donnée, la valeur de P_c mesurée par les capteurs varie d'une expérience à l'autre. Cette variabilité résulte, tel que mentionné plus haut, de la disposition et de la proportion aléatoires des fibres s'appuyant sur le diaphragme des capteurs. Ceci prouve que la mesure de la pression obtenue par les capteurs se trouvant sur la paroi de la chambre d'injection, c'est-à-dire $P_{rL/4}$, $P_{rL/2}$ et $P_{r3L/4}$ donne une idée de la pression du fluide dans la chambre d'injection, mais n'indique pas une valeur exacte. À l'équilibre, lorsque l'évent d'imprégnation est fermé et que toutes les pressions mesurées se stabilisent, c'est le capteur P_{r0} qui mesure la pression réelle du fluide. À ce moment, la relation (4.5) indique que la pression exercée sur les fibres devient $P_c = P_f - (P_{r0} - P_v)$. Dans cette expérience, $P_c = 4,16 - (-0,09) = 4,25$ bars, la pression du vide de -0,25 bars étant incluse dans la pression de la résine P_r mesurée par les capteurs.

4.6.2 Débit du fluide de compaction D_f

La Figure 4.13 montre deux exemples du débit D_f du fluide de compaction. Les deux graphiques superposés mettent en évidence la variation du débit D_f selon les deux types de viscosité utilisés. Il faut noter que les deux expériences de la Figure 4.13 ont été réalisées en fixant les autres paramètres :

- pression du fluide de compaction $P_f = 3,30$ bars,
- pression de la résine $P_r = 0,80$ bars,
- pression de vide $P_v = -0,25$ bars,
- taux de fibres initial $V_{f0} = 16,7\%$,

- position finale du front de la résine injectée $L_r = 2/3 L$ et
- viscosité de la résine $\eta_r = 0,5 \text{ Pa.s}$.

L'injection du fluide de compaction (fluide bleu) commence juste après la fin d'injection de la résine (fluide rouge). Pour les deux exemples de la Figure 4.13, l'étape 2 de compaction commence 49 s après le début de la séquence de fabrication.

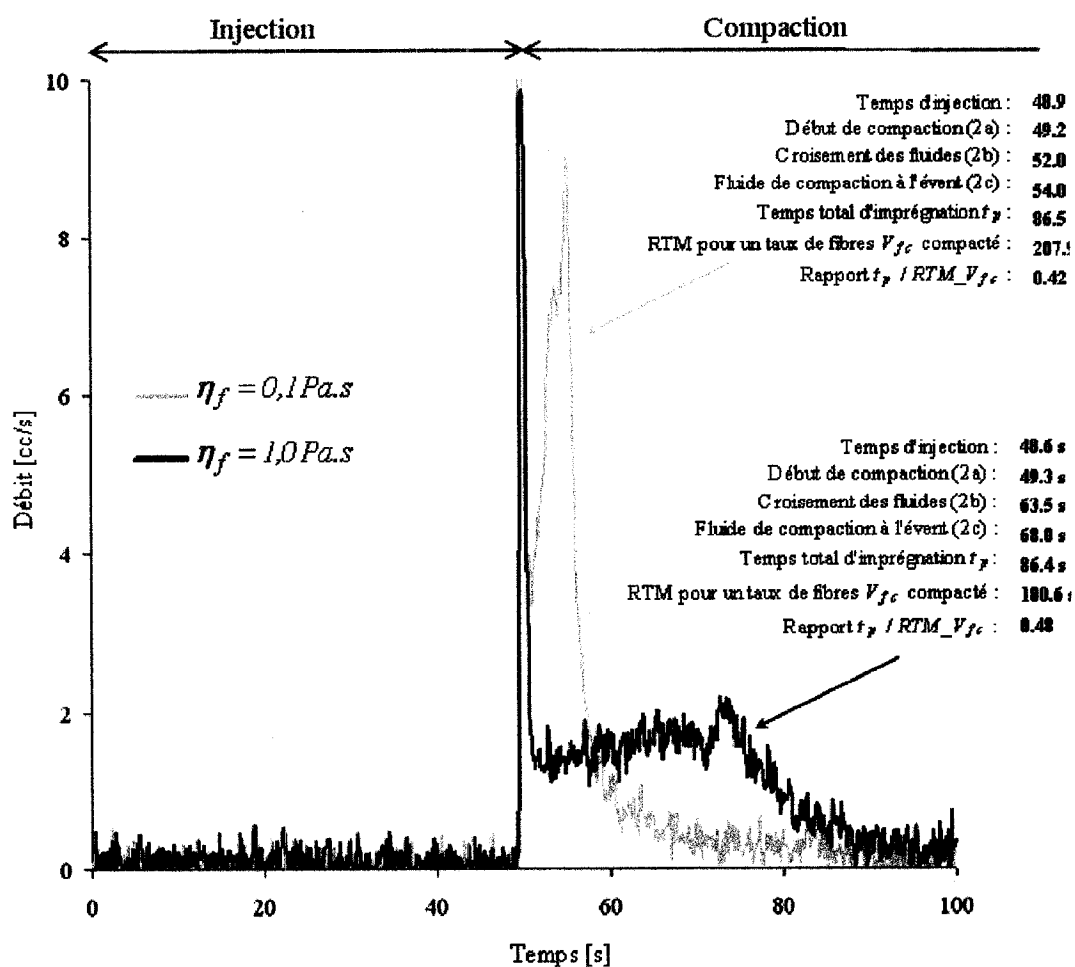


Figure 4.13 Débit du fluide de compaction selon sa viscosité

Le pic du débit mesuré au début de l'étape 2 de compaction est dû au remplissage du tuyau et de la rainure d'injection du fluide bleu. Pendant l'étape 2 de compaction, le comportement du débit du fluide de compaction D_f varie selon la viscosité du fluide de compaction. Le débit D_f d'un fluide de viscosité 1.0 Pa.s montre un comportement quasiment constant, tandis que l'évolution du débit D_f d'un fluide de viscosité 0.1 Pa.s est linéaire ascendante pendant l'étape 2 de compaction. Pendant le remplissage des chambres de compaction et d'injection, le croisement des fluides a lieu à 52 s pour l'expérience avec un fluide de compaction de viscosité $\eta_f = 0,1$ Pa.s et à 63 s pour celle avec le fluide de viscosité $\eta_f = 1,0$ Pa.s. On remarque ainsi que la dérivée du débit D_f ne subit pas de changement au croisement des fluides. Par ailleurs, tous les paramètres de fabrication étant fixés sauf la viscosité du fluide de compaction η_f , la chambre de compaction se remplit plus rapidement avec un fluide de compaction de viscosité faible qu'avec un fluide de viscosité élevé. Après la fermeture de l'évent de compaction, la pression du fluide augmente, ce qui fait entrer pendant quelques secondes encore, plus de fluide de compaction avant que son débit ne descende rapidement jusqu'au remplissage complet de la chambre de compaction.

Pour les deux expériences de la Figure 4.13, le temps de remplissage final t_p a été le même ($t_p = 86$ s). En général, le temps t_p n'est pas influencé par la viscosité η_f avec une pression P_f du fluide de compaction élevée. Cette constatation sera abordée dans l'analyse des résultats au chapitre suivant. Dans l'expérience où la viscosité du fluide de compaction est de $\eta_f = 0,1$ Pa.s, le débit D_f du fluide de compaction injecté à pression constante présente un comportement linéaire ascendant pendant l'étape 2 de compaction. Avec les mêmes paramètres de fabrication pour un fluide de compaction plus visqueux $\eta_f = 1,0$ Pa.s, le débit D_f reste quasiment constant.

4.6.3 Vitesse du front de résine

La Figure 4.14 illustre les comportements typiques de la vitesse du front de résine v_r , pour deux pressions P_f du fluide de compaction en gardant fixes les autres paramètres de fabrication. À titre de comparaison, la vitesse de remplissage prédite pour le procédé RTM est aussi incluse dans le cas d'une injection à pression constante dans un moule rigide. La vitesse de la résine v_r à l'étape 2 de compaction, et par conséquent le temps de remplissage total t_p , varient beaucoup. Plus la pression du fluide de compaction P_f est élevée, plus la vitesse v_r est grande et par conséquent, plus la résine imprégnera rapidement le renfort.

Au début de l'injection, on constate que la vitesse d'écoulement de la résine v_r diminue et se comporte de la même façon que dans le procédé RTM jusqu'à la fin d'injection. Puis, selon la pression imposée par le fluide de compaction, la vitesse v_r devient plus ou moins importante. Pendant l'étape 2 de compaction, pour une pression P_f élevée, la vitesse v_r augmente en deux temps, tout d'abord après le début de l'injection du fluide de compaction, puis au croisement des fluides. Après le croisement des fluides, la vitesse du front de résine diminue. Ceci s'explique facilement puisque le fluide de compaction vient comprimer le renfort encore sec et la résine a évidemment plus de difficulté à s'écouler à travers un renfort plus compacté. Par contre, tel qu'illustré à la Figure 4.14, une faible pression du fluide de compaction entraîne une vitesse décroissante de la résine dès le début de l'étape 2 de compaction. Ceci implique que le temps de remplissage, pour une pression P_f faible, sera beaucoup plus élevé qu'avec une pression P_f élevée. Dans les deux expériences de la Figure 4.14, le renfort prend 5017 s pour être complètement imprégné avec une pression de compaction $P_f = 2,5$ bars au lieu de 133 s avec $P_f = 5,9$ bars.

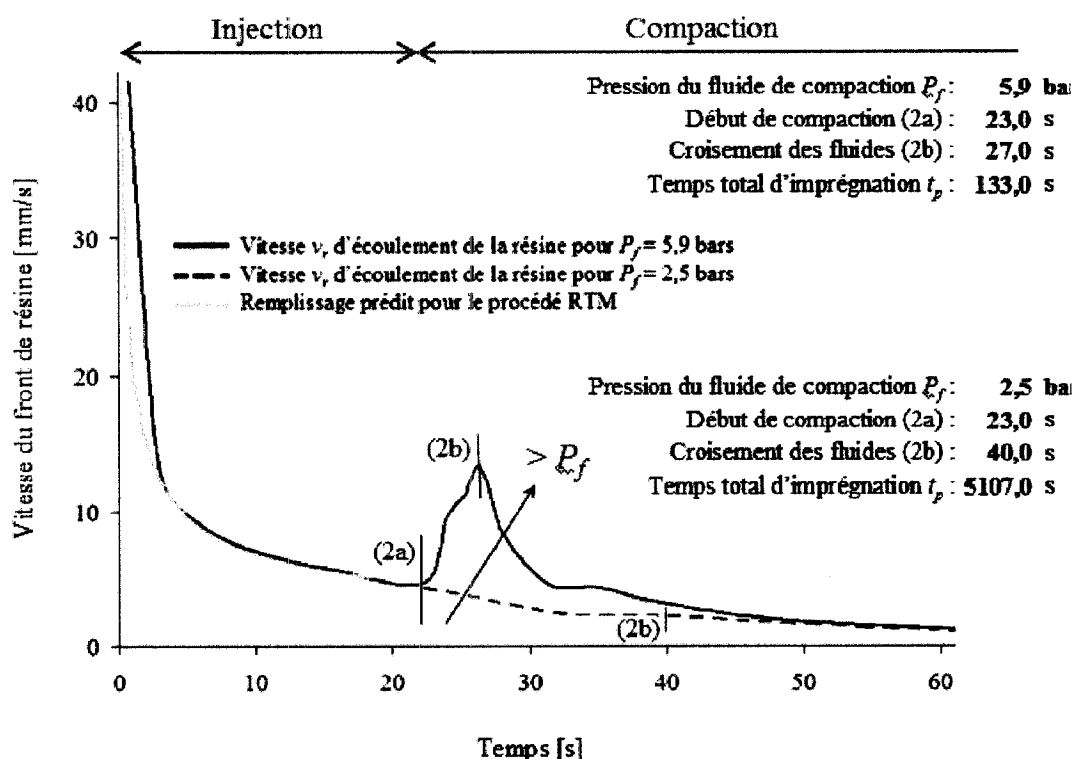


Figure 4.14 Vitesse du front de résine pour deux pressions du fluide de compaction P_f

Les observations sur la vitesse d'écoulement de la résine à l'étape 2 de compaction conduisent à introduire le rapport de la vitesse maximale $v_{r\max}$ du front de résine sur la vitesse v_{r0} au début de la compaction :

$$R_2 = \frac{v_{r\max}}{v_{r0}} \quad (4.6)$$

L'indice « 2 » indique ici qu'il s'agit de l'étape 2 de compaction. L'objectif est de trouver les paramètres de fabrication nécessaires pour que la vitesse du front de résine à l'étape 2 de compaction soit plus élevée qu'à la fin de l'injection afin de contribuer à réduire le temps de remplissage du renfort dans le procédé Polyflex.

4.7 Conclusion

Les variables utilisées pour la planification d'essais ainsi que l'observation en laboratoire des étapes d'injection et de compaction du procédé Polyflex ont été étudiées dans ce chapitre. La section 3.3 contient un résumé des contraintes considérées pour la détermination des paramètres de fabrication, ainsi que les valeurs extrêmes des paramètres, utilisées dans les essais en laboratoire. L'objectif de la planification d'expériences est d'étudier l'influence de 5 paramètres de fabrication sur deux variables de réponse. Étant donné que les valeurs extrêmes du paramètre P_f (pression du fluide de compaction) ont été calculées pour les quatre combinaisons des paramètres V_{f0} et L_r (taux volumique des fibres initial et position finale du front de résine à l'étape 1 d'injection, respectivement), le plan d'expériences comporte 4 séries d'essais pour 4 paramètres de fabrication par série.

La description du procédé Polyflex pour des pressions constantes d'injection de la résine et du fluide de compaction a été réalisée dans les observations en laboratoire. On a décrit les étapes d'injection et de compaction jusqu'à l'imprégnation totale du renfort. La distribution des pressions à l'intérieur du moule a été expliquée pendant chacune des étapes. Une chute de pression se produit au début de l'étape 2 de compaction suite à la fermeture du port d'injection de la résine en raison de l'augmentation de la pression de vide causée par le collage de la membrane sur les capteurs de la chambre de compaction. Puisque la pression du fluide de compaction est plus élevée que celle de la résine et comme la chambre de compaction ne contient pas de renfort, son remplissage s'effectue beaucoup plus rapidement que celui de la chambre d'injection. Après le croisement des fluides, la vitesse du front de résine décroît puisque le fluide de compaction s'appuie contre le renfort encore sec et entraîne un écoulement plus difficile de la résine.

Pour les procédés d'injection de résine sur renfort fibreux, une injection de résine à débit constant implique que, pour maintenir le débit constant pendant le remplissage, la pression dans le moule augmente dans le temps. Pour une injection à pression constante, le débit de résine diminue dans le temps. En fixant tous les paramètres de fabrication sauf la viscosité η_f du fluide de compaction, les observations du procédé Polyflex (pour une injection à pression constante du fluide de compaction) ont montré que, peu importe la viscosité η_f du fluide de compaction, le comportement du débit D_f du fluide de compaction ne décroît pas. Cette constatation est particulièrement intéressante dans la fabrication des pièces pour une injection à débit D_f constant et dans la conception des moules.

On peut établir que, pour une injection à débit D_f constant du fluide de compaction, la pression à l'intérieur du moule n'augmentera pas par rapport à l'état initial, contrairement aux autres procédés d'injection où la pression dans le moule augmente dans le temps pour une injection de résine à débit constant.

Ceci n'a pas été analysé dans cette étude, mais fait partie du travail à suivre.

On a observé que la géométrie et la disposition des capteurs placés dans la chambre d'injection empêchent de transmettre correctement la pression des fibres. Alors que la pression de la résine P_r est bien mesurée par ces capteurs, la pression exercée sur les fibres P_c ne l'est pas. Pour la conception des moules dans l'avenir, il n'est pas nécessaire de placer des capteurs sur la paroi du moule pour mesurer aussi la pression P_c de fermeture du moule sur le renfort, même si la surface de mesure est plus grande, puisque cette pression ne se transmet pas correctement. On sait qu'à l'équilibre la pression P_c est égale à la différence entre la pression du fluide de compaction P_f et la pression de la résine P_r . L'emplacement de capteurs de pression à l'intérieur du moule du côté de la cavité semble être un meilleur choix pour mesurer seulement la pression de la résine P_r et en déduire celle exercée sur les fibres par la suite.

En fixant tous les paramètres de fabrication sauf la pression du fluide de compaction P_f , on a observé qu'après l'étape 1 d'injection, la vitesse v_r du front de résine augmente avec une pression P_f élevée et diminue avec une pression P_f faible. Pour une pression de compaction P_f élevée, cette vitesse v_r augmente jusqu'au moment où le fluide de compaction dépasse le front de résine, puis la vitesse v_r décroît jusqu'au remplissage total du renfort. Si à l'étape 2 de compaction la vitesse de la résine augmente, le temps de remplissage final t_p diminue considérablement. Le rapport de la vitesse maximale $v_{r\ max}$ du front de résine sur la vitesse $v_{r\ 0}$ au début de l'étape 2 de compaction sera analysé afin d'identifier les paramètres de fabrication requis pour que la vitesse v_r de la résine reste toujours plus élevée pendant la compaction (l'étape 2).

CHAPITRE 5 : PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

5.1 Introduction

L'objectif fondamental du nouveau procédé Polyflex est d'augmenter la productivité des pièces composites fabriquées par RTM. Le but principal de ce travail est d'identifier l'influence des paramètres de fabrication dans le cas d'une fabrication à pression d'injection constante afin de réduire le temps total d'imprégnation du renfort t_p . Selon un plan d'expériences factoriel à deux niveaux, on a étudié l'influence de 5 paramètres de fabrication sur 2 variables de réponse. Les variables de l'analyse sont rappelées ci-dessous. Ce chapitre présente les résultats obtenus à partir du plan d'expériences, ainsi qu'une analyse détaillée de l'influence des paramètres de fabrication sur les deux résultats étudiés.

Les cinq paramètres de fabrication, définis au chapitre précédent, sont les suivants :

- la pression constante d'injection de la résine P_r ,
- la pression constante d'injection du fluide de compaction P_f ,
- la viscosité du fluide de compaction η_f ,
- la position finale du front de la résine injectée L_r et
- le taux volumique de fibres initial V_{fo} .

Les résultats à analyser sont :

- le temps total d'imprégnation du procédé Polyflex t_p et
- le rapport des vitesses de la résine à l'étape 2 de compaction $R_2 = \frac{v_{r\ max}}{v_{r0}}$

Un composite fabriqué par le procédé Polyflex a une épaisseur finale h_c qui dépend largement de la quantité de résine injectée (L_r). L'épaisseur h_c , calculée à l'Annexe C, n'a pas été mesurée puisque aucune pièce durcie n'a été fabriquée. Le temps total

d'imprégnation t_p correspond à la durée des étapes d'injection et de compaction du procédé Polyflex, dans lesquelles le renfort est imprégné complètement. Le rapport R_2 représente le taux de variation de la vitesse d'écoulement de la résine à l'étape 2 de compaction. Ce résultat est analysé de façon à déterminer les paramètres de fabrication nécessaires pour que la vitesse v_r de la résine augmente à l'étape 2 de compaction par rapport à la fin de l'injection.

5.2 Résultats du plan d'expériences

Les deux tableaux montrés ci-dessous donnent les valeurs des variables déterminées par le plan d'expériences : les paramètres de fabrication et les variables de réponse à analyser. Sur les tableaux, les cinq premières colonnes représentent les numéros d'essais et les paramètres de fabrication, tandis que la sixième et septième colonnes correspondent aux variables de réponse obtenues. La définition des notations des variables utilisées aux tableaux est donnée au début de ce chapitre. Dans la dernière colonne, une autre réponse est également calculée à titre indicatif : le rapport du temps t_p de remplissage final sur le temps t_r de remplissage théorique par le procédé RTM, évalué pour une fraction de fibres finale V_{fc} à l'aide de l'équation (4.2) :

$$t_r = \frac{\eta_r (1 - V_{fc}) L^2}{K (-\Delta P) 2} \quad (5.1)$$

La longueur du moule est $L = 358$ mm, tandis que la viscosité de la résine est $\eta_r = 0,5$ Pa.s. Les notations ΔP , V_{fc} et K sont respectivement les mêmes variables de gradient de pression de résine, de fraction de fibres final et de perméabilité du renfort que celles déterminées dans les expériences. Cependant, ce rapport de temps n'a pas été analysé puisque les étapes du procédé Polyflex diffèrent considérablement du procédé RTM classique.

Le Tableau 5.21 décrit les résultats des expériences pour deux couches du renfort OCF-8610, où l'épaisseur initiale h_0 du renfort est inférieure à l'épaisseur de la cavité H . Le Tableau 5.2 présente les résultats pour trois couches de renfort, où $h_0 = H$.

Le taux volumique de fibres initial pour les expériences du Tableau 5.1 est $V_{f0} = 11,2$ % et l'épaisseur initial du renfort après la mise sous vide est $h_0 = 3,08$ mm. Le calcul du taux volumique de fibres final V_{fc} et l'épaisseur finale h_c dépend de la quantité de résine injectée :

- Pour une position finale L_r du front de résine à l'étape 1 d'injection $L_r = L/2$ (où $L = 358$ mm est la longueur de la cavité du moule), $V_{fc} = 20,1$ % et $h_c = 1,76$ mm.
- Pour $L_r = 2/3 L$, $V_{fc} = 15,1$ % et $h_c = 2,35$ mm.

Pour le Tableau 5.2, le taux volumique de fibres initial V_{f0} et l'épaisseur h_0 initiale du renfort sont respectivement $V_{f0} = 16,7$ % et $h_0 = 3,175$ mm. Le taux de fibres final V_{fc} et l'épaisseur h_c finale du renfort sont les suivants :

- Pour $L_r = L/2$, $V_{fc} = 28,7$ % et $h_c = 1,85$ mm.
- Pour $L_r = 2/3 L$, $V_{fc} = 21,5$ % et $h_c = 2,47$ mm.

Tableau 5.1 Résultats du plan d'expériences pour un taux de fibres initial $V_{f0} = 11,2\%$
(2 couches du renfort OCF-8610)

Essai	P_r bars	P_f bars	η_f Pa.s	L_r	t_p [s]	R_2	$\frac{t_p}{t_r}$
1	0,50	1,52	0,1	L/2	129,16	3,36	0,59
2	0,50	4,04	0,1	L/2	54,39	9,65	0,24
3	0,50	1,52	1,0	L/2	666,11	1,44	2,99
4	0,50	4,04	1,0	L/2	44,78	3,88	0,21
5	1,05	1,52	0,1	L/2	97,73	1,53	0,73
6	1,05	4,04	0,1	L/2	39,24	4,65	0,27
7	1,05	1,52	1,0	L/2	294,63	1,00	2,65
8	1,05	4,04	1,0	L/2	44,03	2,58	0,28
9	0,78	2,78	0,1	L/2	65,12	3,95	0,36
10	0,78	2,78	1,0	L/2	50,41	1,54	0,42
11	0,50	0,74	0,1	2/3 L	75,15	1,47	0,72
12	0,50	1,96	0,1	2/3 L	62,05	4,44	0,49
13	0,50	0,74	1,0	2/3 L	177,66	1,00	1,33
14	0,50	1,96	1,0	2/3 L	67,65	2,11	0,48
15	1,05	0,74	0,1	2/3 L	84,42	1,00	1,30
16	1,05	1,96	0,1	2/3 L	31,99	2,45	0,52
17	1,05	0,74	1,0	2/3 L	101,29	1,00	1,52
18	1,05	1,96	1,0	2/3 L	41,78	1,03	0,67
19	0,78	1,35	0,1	2/3 L	44,98	2,24	0,46
20	0,78	1,35	1,0	2/3 L	54,57	1,00	0,82

$V_{fc} = 20,1\%$
 $h_c = 1,76\text{ mm}$

$V_{fc} = 15,1\%$
 $h_c = 2,35\text{ mm}$

Tableau 5.2 Résultats du plan d'expériences pour un taux de fibres initial $V_{f0} = 16,7\%$
(3 couches du renfort OCF-8610)

Essai	P_r bars	P_f bars	η_f Pa.s	L_r	t_p [s]	R_2	$\frac{t_p}{t_r}$
21	0,50	3,69	0,1	L/2	509,06	6,16	0,76
22	0,50	6,00	0,1	L/2	222,37	10,03	0,38
23	0,50	3,69	1,0	L/2	210,00	2,30	0,53
24	0,50	6,00	1,0	L/2	239,04	5,68	0,35
25	1,05	3,69	0,1	L/2	516,85	3,01	1,43
26	1,05	6,00	0,1	L/2	88,90	7,43	0,26
27	1,05	3,69	1,0	L/2	173,14	1,77	0,56
28	1,05	6,00	1,0	L/2	139,70	3,10	0,39
29	0,78	4,17	1,0	L/2	209,22	3,65	0,51
30	0,78	4,17	0,1	L/2	192,59	6,69	0,49
31	0,50	1,80	0,1	2/3 L	280,19	1,78	1,07
32	0,50	4,80	0,1	2/3 L	89,05	10,96	0,37
33	0,50	1,80	1,0	2/3 L	530,31	1,00	1,96
34	0,50	4,80	1,0	2/3 L	89,82	4,86	0,33
35	1,05	1,80	0,1	2/3 L	120,83	1,00	0,93
36	1,05	4,80	0,1	2/3 L	56,94	5,36	0,42
37	1,05	1,80	1,0	2/3 L	268,48	1,00	1,89
38	1,05	4,80	1,0	2/3 L	65,49	2,90	0,42
39	0,78	3,30	0,1	2/3 L	86,54	3,79	0,42
40	0,78	3,30	1,0	2/3 L	86,38	1,88	0,49

$V_{f_c} = 28,7\%$
 $h_c = 1,85 \text{ mm}$

$V_{f'_c} = 21,5\%$
 $h_c = 2,47 \text{ mm}$

Tel que mentionné précédemment, on a divisé les expériences en quatre groupes, chacun ayant deux paramètres fixes (le taux de fibres initial V_{f0} et la position finale du front de la résine injectée L_r) où l'intervalle de pressions P_f varie d'un groupe d'expériences à l'autre. L'analyse de ces quatre groupes d'expériences, avec des intervalles différents de pression P_f de compaction, a empêché l'étude de l'interaction entre plusieurs facteurs en même temps. Étant donné la plage très grande de résultats (par exemple, $t_{p \max} = 666$ s et $t_{p \min} = 32$ s), ceux-ci ont été normalisés. On a choisi d'utiliser une normalisation de type inverse de racine (par exemple, $t_p^* = 1 / \text{racine}(t_p)$) afin de rapprocher l'écart des résultats.

5.3 Analyse du temps de remplissage

La Figure 5.1 décrit graphiquement l'influence des paramètres sur le temps d'imprégnation total t_p . Les axes X et Y représentent respectivement la pression d'injection de la résine P_r et la viscosité du fluide de compaction η_f , tandis que l'axe Z est représenté par l'inverse de la racine du temps t_p . On met en évidence l'influence de la pression du fluide de compaction P_f sur le temps t_p en traçant deux surfaces sur chaque graphique, une pour chaque pression P_f différente. Chacune des surfaces a été obtenue par la méthode du krigeage (avec dérive constante et covariance linéaire) en reliant linéairement les quatre coordonnées correspondant à X, Y et Z obtenues par les expériences pour une pression de compaction P_f donnée.

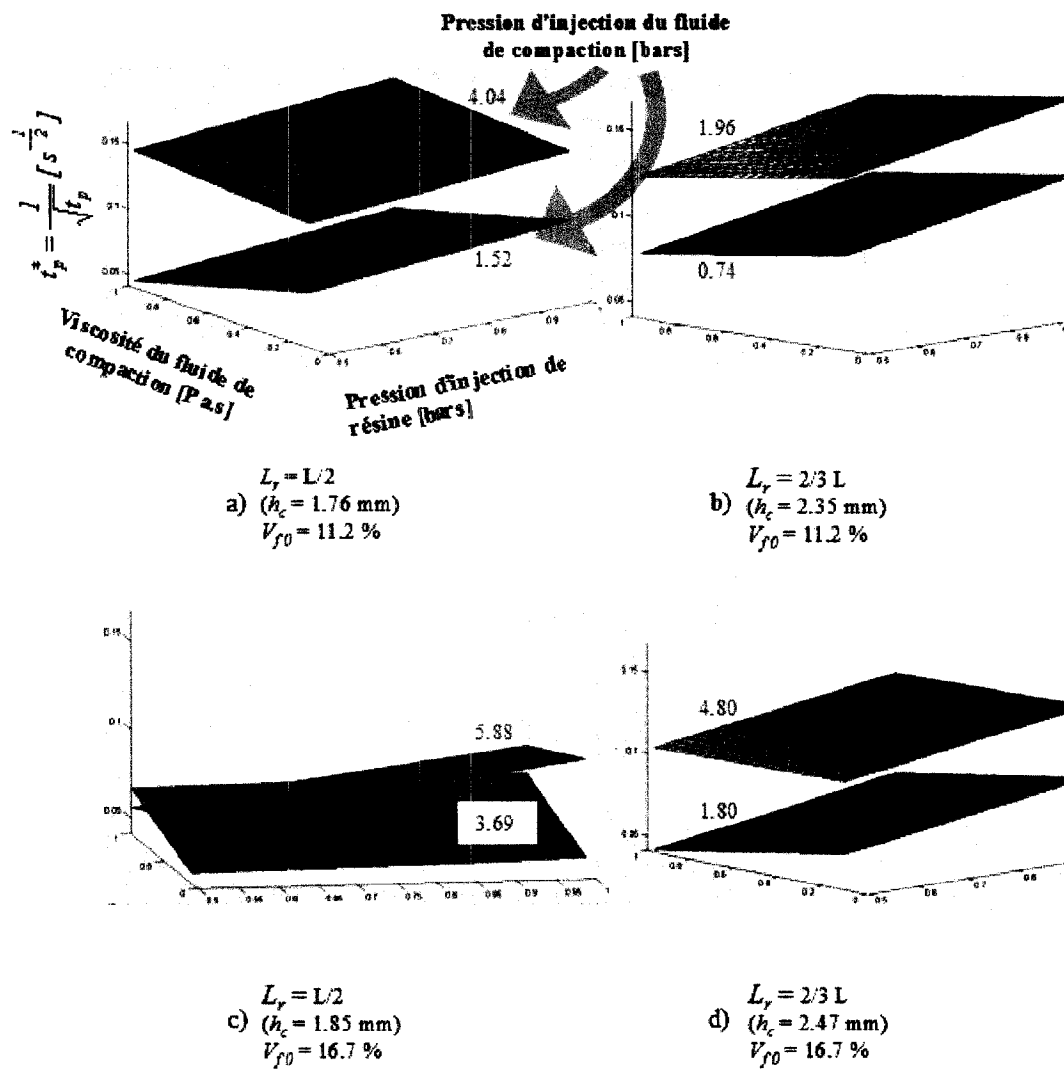


Figure 5.1 Influence des paramètres sur le temps total d'imprégnation t_p

Les quatre graphiques de la Figure 5.1 ont une échelle de réponse fixe dans l'intervalle $0,04 < t_p^* < 0,17 \text{ s}^{-1/2}$ où $t_p^* = 1 / \text{racine}(t_p)$. On s'aperçoit que plus la pression P_f est élevée, moins il faut de temps pour imprégner toutes les fibres (plus élevé sera l'inverse de la racine du temps t_p). On peut aussi observer une faible diminution du temps de remplissage pour une pression d'injection de résine P_r plus élevée, cette diminution restant constante quelle que soit la pression de compaction P_f imposée. En outre, l'influence de la viscosité du fluide de compaction η_f est incertaine, mais on constate que pour des pressions P_f élevées, la viscosité η_f n'a pas autant d'influence sur le temps t_p que pour les pressions faibles pressions. On constate aussi que le temps t_p est plus court (le terme t_p^* est plus élevé) pour les expériences ayant un taux volumique de fibres initial $V_{f0} = 11,2\%$ (cas a et b) que pour celles dont le taux volumique est $V_{f0} = 16,7\%$ (cas c et d). La Figure 5.1 ne permet pas de conclure sur les effets de la position finale L_r du front de résine à la fin de l'étape 1 d'injection.

5.3.1 Influence de la pression de compaction P_f sur le temps de remplissage t_p

Afin de comparer toutes les expériences et de mettre en évidence l'influence de P_f , on utilise le rapport de la pression P_f imposée sur la pression $P_{c \text{ max}}$. Tel qu'indiqué précédemment, $P_{c \text{ max}}$ est la pression nécessaire pour compacter le renfort sec à la fraction de fibres V_{fc} déterminée à l'Annexe C par le modèle de compaction de la relation (C.6) :

$$P_{c \text{ max}} = \left[\frac{V_{fc}}{A} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (5.2)$$

où les coefficients $A = 0,002 \text{ Pa}^{-1}$ et $B = 0,4$ ont été obtenus pour le renfort OCF-8610 [32].

Dans le cas du procédé Polyflex, l'épaisseur finale du composite h_c dépend non seulement du volume des fibres, mais aussi de la quantité de résine injectée. On

constate dans la Figure 5.2 que le temps de remplissage t_p diminue pour un rapport $P_f / P_{c \max}$ élevé. On remarque à la Figure que la variabilité de réponse est moins importante pour une pression $P_f > 3 P_{c \max}$. Plus le rapport $P_f / P_{c \max}$ est important, plus le temps de remplissage du procédé Polyflex diminue.

Étant donné les plages de paramètres de ces expériences, il est conseillé d'utiliser le plus grand rapport $P_f / P_{c \max}$ possible, supérieur à 2,5, afin de réduire le temps de remplissage du procédé Polyflex. Pour la conception de moules, le taux volumique de fibres final maximal V_{fc} de la pièce à fabriquer déterminera la pression du fluide de compaction P_f à utiliser. Tel qu'expliqué précédemment, cette pression P_f dépendra de la pression exercée sur les fibres $P_{c \max}$ calculée en fonction de V_{fc} (relation (5.2)). Plus le rapport $P_f / P_{c \max}$ est grand, plus faible sera le temps de remplissage t_p , mais aussi plus le moule devra être rigide (coûteux) afin de supporter la pression de compaction transmise dans toute la cavité du moule. À titre d'exemple, pour fabriquer une pièce ayant 30% de son volume en renfort OCF-8610, une pression de fluide de compaction $P_f = 4 P_{c \max}$ entraînerait une réduction considérable du temps de remplissage total t_p , mais le moule devrait supporter une pression de 11 bars. Le graphique de la Figure 5.3 indique les différentes valeurs de pression P_f du fluide de compaction pour atteindre le taux de fibres V_{fc} déterminé par le calcul de pression $P_{c \max}$ de compaction du renfort OCF-8610 par le modèle de [32]. On constate dans cette figure que le procédé Polyflex est encore plus avantageux pour la fabrication des pièces à plus faible taux volumique de fibres, puisque la pression P_f de fluide de compaction nécessaire pour assister à l'imprégnation et compacter le renfort sera beaucoup plus faible.

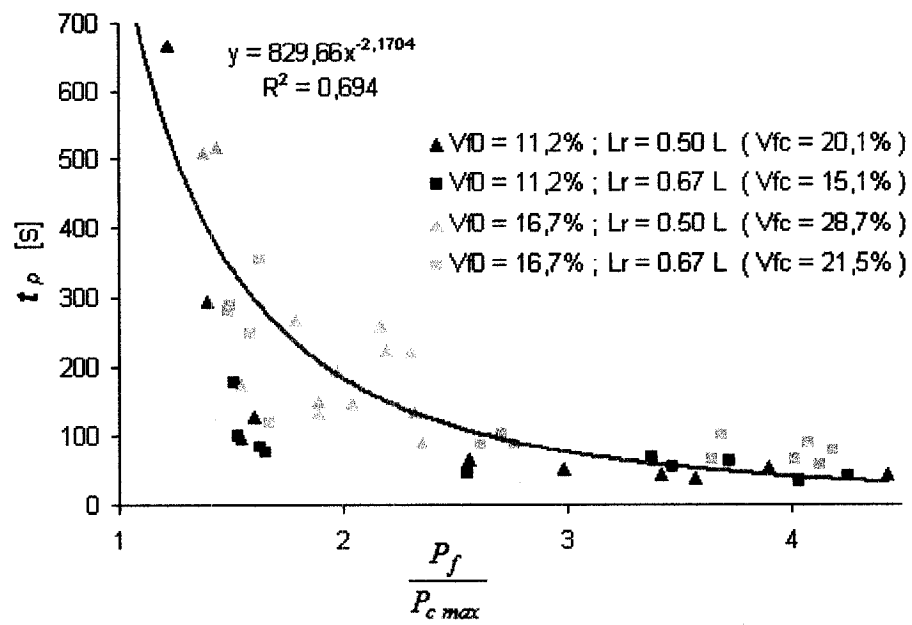


Figure 5.2 Temps de remplissage final en fonction du rapport des pressions de compaction

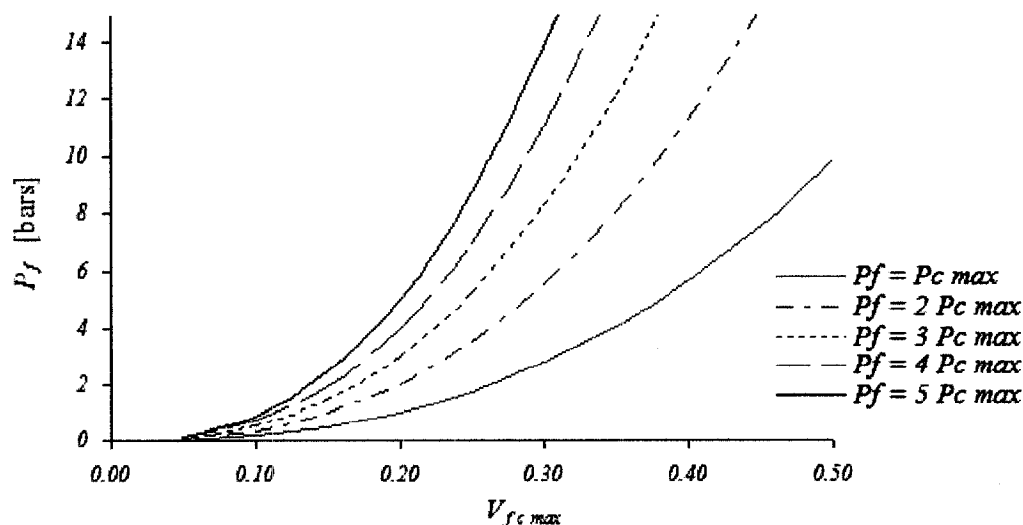


Figure 5.3 Pression du fluide de compaction nécessaire pour compacter le renfort OCF-8610 selon le modèle de compaction de [32]

5.3.2 Influence du taux de fibres initial V_{f0} sur le temps de remplissage t_p

La Figure 5.4 a été tirée du graphique de la Figure 5.2 afin de mettre en évidence l'influence de la fraction de fibres initiale V_{f0} sur le temps de remplissage t_p . On remarque à la Figure 5.4 que le temps de remplissage est plus court pour un taux volumique de fibres initial V_{f0} plus faible, étant donné l'épaisseur de cavité de 3,125 mm et le rapport de pressions de compaction $P_f / P_{c \max}$. Cette constatation est évidente, puisque la résine a tendance à s'écouler plus vite lorsque la perméabilité du renfort est plus faible (V_{f0} faible). De plus, pour une épaisseur de cavité de 3.125 mm, le temps t_p est réduit davantage avec un taux volumique de fibres $V_{f0} = 11,2\%$ puisqu'au départ le renfort n'occupe pas toute la cavité du moule et une partie de la résine s'écoule par conséquent par-dessus le renfort lors de l'injection. Quelle serait donc l'influence de V_{f0} sur V_{fc} ? Dans la Figure 5.4, pour un même taux de fibres final V_{fc} ($\blacktriangle$ et $\boxtimes$), on constate que le temps t_p est plus faible pour imprégner et compacter deux couches de renfort OCF-8610 que pour trois couches, quelque soit la viscosité du

fluide de compaction η_f ou la pression d'injection de résine P_r utilisées. Cette observation, expliqué par l'écoulement de résine de type VARI qui a lieu, est encore plus claire pour une pression $P_f > 2,5 P_{c\max}$.

On a constaté une diminution du temps de remplissage t_p pour un taux de fibres V_{f0} plus faible, quelque soit la viscosité η_f ou la pression d'injection de résine P_r utilisée. L'écoulement de résine de type VARI qui s'effectue au dessus du renfort facilite aussi la diminution du temps de remplissage. Pour un taux de fibres final V_{fc} donné, un taux de fibres initial V_{f0} plus faible aide à diminuer le temps de remplissage total. En revanche, il est conseillé de choisir un taux de fibres initial suffisant pour éviter le lavage des fibres et la formation de vides microscopiques dus à une pression d'injection P_r trop élevée ne permettant pas d'assurer un remplissage adéquat à l'intérieur du moule.

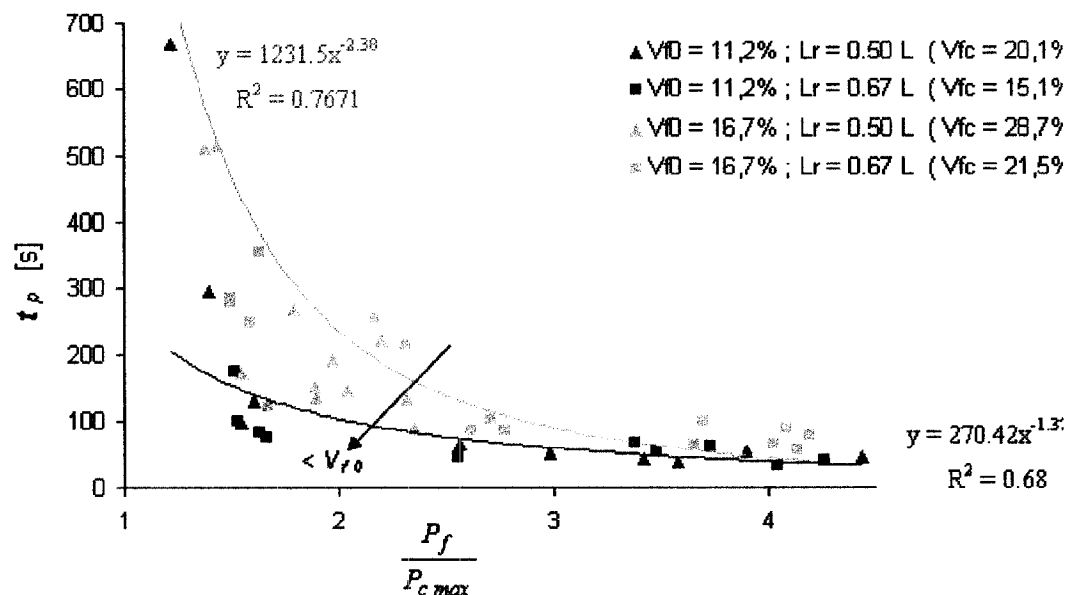


Figure 5.4 Influence du taux de fibres initial V_{f0} sur le temps de remplissage t_p

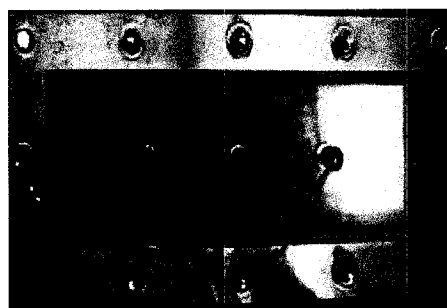
5.3.3 Influence de la position finale du front de la résine injectée L_r sur le temps

$$t_p$$

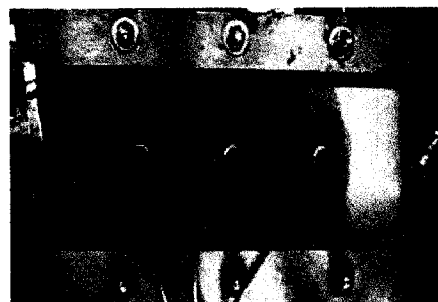
Compte tenu du graphique de la Figure 5.2, on ne peut pas conclure si la position finale du front L_r de la résine injectée a un effet sur le temps de remplissage pour un rapport donné des pressions de compaction $P_f / P_{c \max}$. En fixant tous les paramètres (avec $P_f / P_{c \max}$) sauf la position L_r , l'écart du temps de remplissage t_p n'est pas significatif d'un essai à l'autre. On établit donc que le temps de remplissage t_p n'est pas influencé de façon explicite par la position finale du front L_r de la résine à l'étape 1 d'injection. Le taux volumique de fibres final V_{fc} est déterminé par la position L_r . On peut donc conclure que c'est le rapport des pressions de compaction $P_f / P_{c \max}$ et le taux de fibres initial V_{fo} qui influencent le temps t_p de remplissage Polyflex sans égard à la position finale L_r du front de la résine à l'étape 1 d'injection.

5.3.4 Influence de la viscosité du fluide de compaction η_f sur le temps t_p

La Figure 5.1 décrit, pour chaque groupe d'expériences et pour une pression P_f donnée, l'influence de la viscosité η_f du fluide de compaction et de la pression d'injection P_r de résine sur le temps de remplissage t_p . On constate que pour de faibles pressions P_f , le temps t_p en fonction de la viscosité η_f varie d'une série d'expériences à l'autre. Pour les surfaces supérieures de chacun des graphiques, c'est-à-dire pour les pressions de compaction P_f élevées, le temps t_p d'imprégnation total est court et il ne semble pas être influencé par la viscosité η_f du fluide de compaction.

a) Viscosité $\eta_f = 0,1 \text{ Pa.s}$

Position de croisement à 0.74 L

b) Viscosité $\eta_f = 1,0 \text{ Pa.s}$

Position de croisement à 0.83 L

Figure 5.5 Position de croisement de la résine et du fluide de compaction pour les essais 39 et 40 où tous les paramètres de fabrication sont fixes sauf la viscosité η_f du fluide de compaction. La pression du fluide de compaction est $P_f = 2,75 P_{c \max} = 3,3$ bars.

La Figure 5.5 illustre la position de croisement des fluides pour un fluide de compaction de faible viscosité η_f (Figure 5.5a) et pour un fluide de compaction de viscosité η_f élevée (Figure 5.5b). Les deux expériences de la figure ont donné un temps de remplissage $t_p = 86 \text{ s}$ pour une pression de compaction élevée $P_f = 2,75 P_{c \max}$ et pour les autres paramètres fixes. Bien que la chambre de compaction se remplisse plus rapidement avec un fluide de faible viscosité η_f (en 54 s dans la Figure 5.5a), la vitesse d'écoulement de la résine décroît après le croisement des fluides et le temps pour imprégner le renfort encore sec est long. Si le temps de remplissage total t_p est environ le même quelque soit la viscosité η_f du fluide de compaction avec les autres paramètres fixes, la chambre de compaction se remplit plus lentement avec un fluide de viscosité η_f élevée (en 68 s dans la Figure 5.5b). Dans ces conditions, la vitesse d'écoulement v_r de la résine décroît après un croisement de fluides à une position plus éloignée dans le moule mais le temps pour imprégner le renfort encore sec est plus court qu'avec un fluide de compaction de faible viscosité η_f .

Les expériences mentionnées ci-haut ont été effectuées avec le renfort OCF-8610 dont l'épaisseur initiale h_0 est égale à l'épaisseur de la cavité $H = 3,175$ mm. Pour les expériences où l'épaisseur initiale h_0 du renfort est inférieure à celle de la cavité, le même type de comportement est observé. Dans ce cas, l'épaisseur du renfort varie pendant l'imprégnation de résine. On établit donc que si on utilise une préforme dont l'épaisseur (qui ne varie pas lorsqu'elle est imprégnée) est inférieure à celle de la cavité ($h_0 < H$), la résine s'écoulera beaucoup plus facilement par-dessus cette préforme.

On prétend que l'utilisation d'un fluide de compaction plus visqueux poussera la résine sur la préforme plus rapidement avec ces conditions et que le remplissage de résine après le croisement des fluides se réalisera plus rapidement qu'en utilisant un fluide de compaction moins visqueux.

Une étude du procédé Polyflex avec une préforme d'épaisseur h_0 inférieure à l'épaisseur H de la cavité est nécessaire afin de quantifier l'influence de la viscosité η_f de fluide de compaction sur le temps de remplissage t_p pour des pressions de compaction P_f élevées.

5.3.5 Influence de la pression d'injection de la résine P_r sur le temps t_p

La Figure 5.1 montre que, pour une pression d'injection de résine P_r plus élevée, le temps de remplissage t_p diminue faiblement sans égard à la pression de compaction P_f imposée. Cette diminution du temps t_p s'explique si tous les paramètres du procédé sont fixés sauf la pression P_r d'injection de la résine. Le temps de remplissage pour un écoulement de résine de type RTM a été donné à l'équation (4.2) :

$$t_r = \frac{\eta_r \phi}{K(-\Delta P)} \frac{L_r^2}{2} \quad (5.3)$$

On voit dans la relation (5.3) que le temps de remplissage t_r diminue proportionnellement avec l'augmentation du gradient de pression ΔP . Ceci implique que, étant donné une position finale L_r du front de résine, plus le gradient de pression ΔP est élevé, plus rapidement s'imprégnera le renfort. Cependant, ce gain de temps à l'injection est perdu dans la plupart des expériences quand l'étape 2 de compaction prend beaucoup plus de temps que l'étape 1 d'injection. Pour cette raison, l'influence de la pression d'injection sur le temps de remplissage total t_p est faible.

On a montré que le temps de remplissage t_p est réduit pour une pression du fluide de compaction P_f donnée. Cependant, l'influence de la pression P_r sur le temps t_p de l'ensemble des expériences ne semble pas être importante d'après la Figure 5.2. Afin de réduire ce temps pour une pression P_f donnée, il est suggéré d'injecter la résine à la pression la plus élevée possible, tout en évitant cependant le déplacement des fibres et la formation de micro-vides résultant d'une vitesse de remplissage trop rapide de la cavité.

5.4 Analyse du rapport R_2

On a observé au chapitre précédent que la vitesse d'écoulement de la résine v_r décroît après l'étape 1 d'injection pour une pression du fluide de compaction P_f faible. Au contraire, pour une pression P_f élevée, cette vitesse v_r augmente après l'injection et diminue lentement après le croisement des fluides, ce qui peut réduire d'une manière significative le temps de remplissage t_p . On a déterminé à la relation (4.6) le rapport R_2 de la vitesse maximale du front de résine $v_{r\max}$ sur la vitesse v_{r0} au début de l'étape 2 de compaction :

$$R_2 = \frac{v_{r\max}}{v_{r0}} \quad (5.4)$$

Un rapport $R_2 = 1$ signifie que la vitesse v_r diminue tout de suite après l'étape d'injection, tandis qu'un rapport $R_2 > 1$ signifie que la vitesse maximale de la résine à l'étape 2 de compaction est « R_2 » fois supérieure à la vitesse de la résine à la fin d'injection. Le but de cette analyse est d'identifier l'influence des paramètres de fabrication sur la vitesse de la résine à l'étape 2 de compaction.

La Figure 5.6 décrit graphiquement l'influence des paramètres de fabrication sur le rapport R_2 . Comme dans les graphiques de la Figure 5.1, les axes X et Y représentent la pression P_r d'injection de la résine et la viscosité η_f du fluide de compaction respectivement, tandis que l'axe Z est représenté par R_2 . On met aussi en évidence l'influence de la pression du fluide de compaction P_f sur le rapport R_2 en traçant deux surfaces sur chaque graphique, une pour chaque pression P_f différente. Chacune des surfaces a été créée par la méthode du krigeage (avec dérive constante et covariance linéaire). On a choisi de normaliser les résultats selon une fonction de type inverse de racine ($R_2^* = 1 / \text{racine}(R_2)$) afin de rapprocher leur écart.

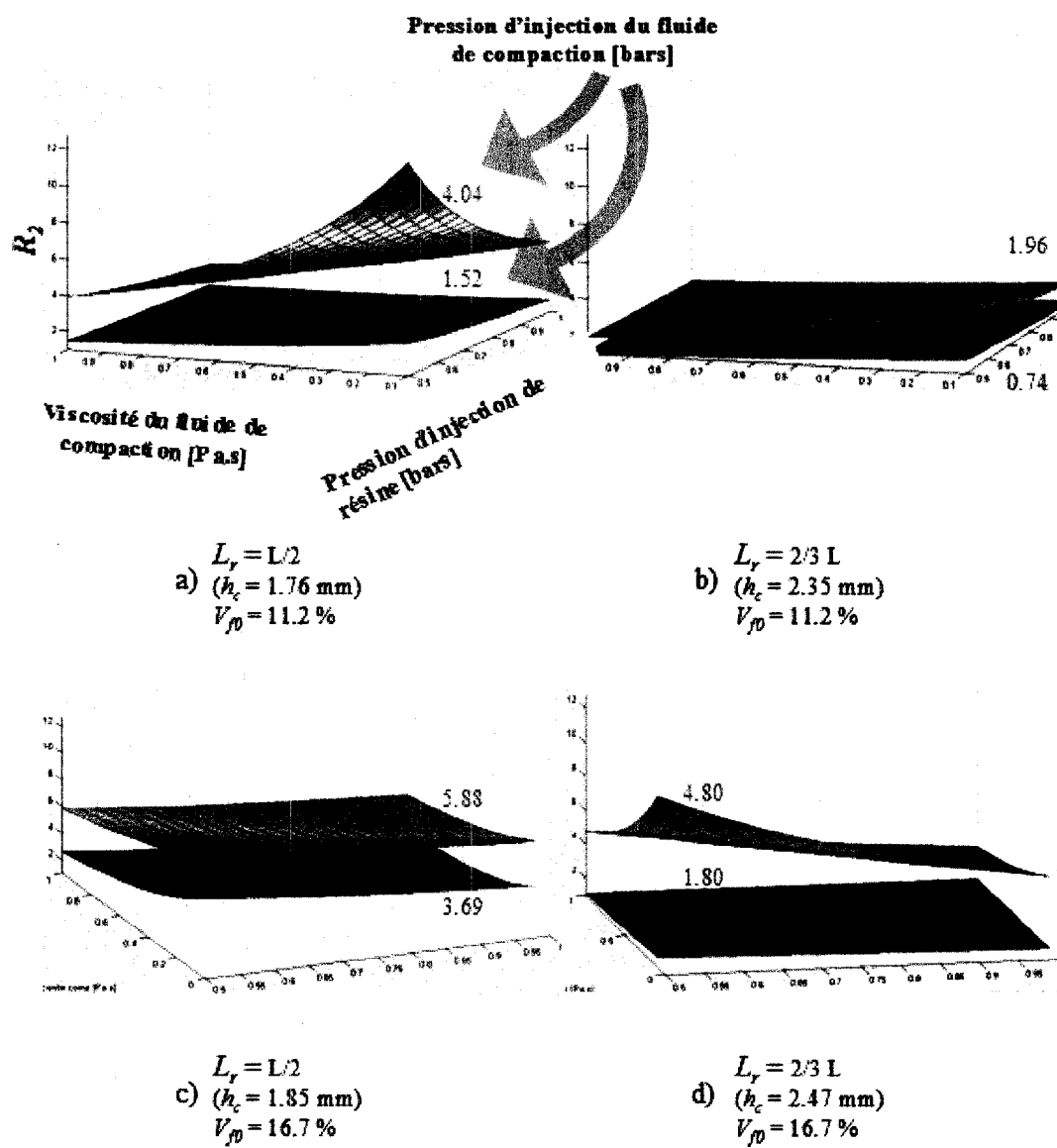


Figure 5.6 Influence des paramètres sur la vitesse de la résine après l'injection

On observe dans les quatre graphiques une forte influence de la pression du fluide de compaction P_f sur le rapport R_2 . Ceci signifie que, plus la pression P_f est élevée, plus vite circulera la résine après l'injection. De plus, on observe sur tous les graphiques que pour une viscosité η_f plus faible du fluide de compaction le rapport R_2 est plus élevé. On en déduit aussi que plus la pression P_r d'injection de résine est faible, plus rapide sera la vitesse v_r pendant l'étape 2 de compaction par rapport à la vitesse v_r à la fin de l'injection. La Figure 5.6 ne semble mettre en évidence aucune relation entre le taux volumique de fibres initial V_{f0} et le rapport R_2 . Cette constatation est aussi vraie pour la position finale L_r du front de la résine injectée. On conclut donc que ces deux paramètres n'ont pas d'influence sur le rapport R_2 .

5.4.1 Influence de la pression du fluide de compaction P_f sur le rapport R_2

On a constaté que la pression P_f du fluide de compaction est le paramètre qui influence le plus la vitesse d'écoulement de la résine v_r à l'étape 2 de compaction. Par contre, lors de l'analyse des résultats, on n'a trouvé aucune indication qui prouve que le rapport de pressions de compaction $P_f / P_{c \max}$ soit le facteur d'influence sur le rapport R_2 . C'est plutôt la pression P_f qui gouverne ce rapport de vitesses d'écoulement de la résine à l'étape de compaction. On remarque sur la Figure 5.7 que pour une pression $P_f > 3$ bars, le rapport $R_2 > 1$, ce qui signifie que la vitesse v_r de la résine devient plus élevée pendant l'étape 2 de compaction qu'à la fin d'injection, quelque soient les paramètres de fabrication.

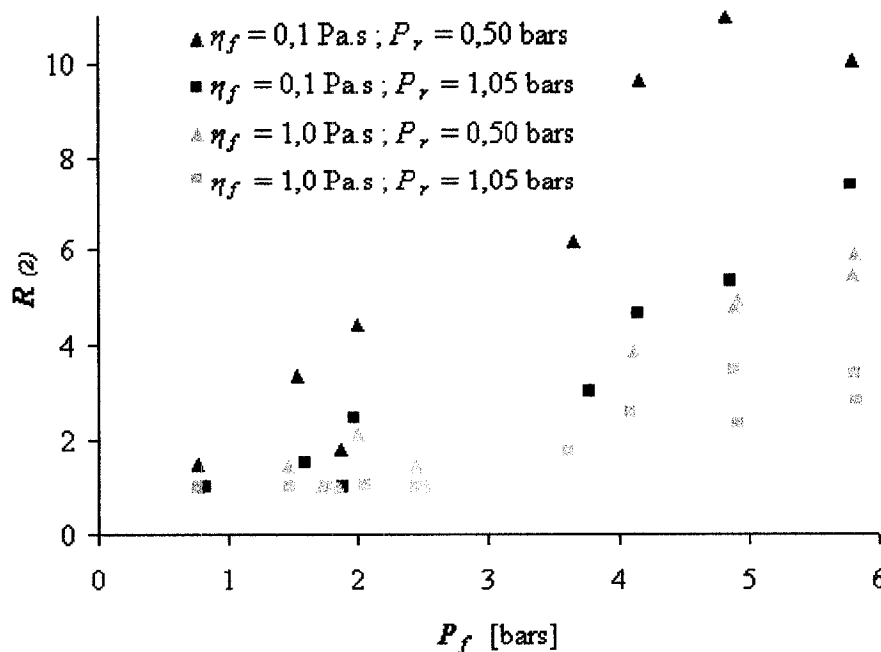


Figure 5.7 Rapport R_2 en fonction de la pression P_f du fluide de compaction, pour les différentes combinaisons des paramètres viscosité η_f du fluide de compaction et pression P_r d'injection de la résine

Pour un rapport $R_2 > 2$, c'est-à-dire, pour que la vitesse maximale de la résine à l'étape 2 de compaction soit supérieur à deux fois la vitesse de la résine à la fin d'injection, il faut une pression $P_f > 2$ bars avec une faible viscosité ($\eta_f = 0,1$ Pa.s) du fluide de compaction ou bien $P_f > 4$ pour une viscosité élevée ($\eta_f = 1,0$ Pa.s).

5.4.2 Influence de la viscosité du fluide de compaction η_f sur le rapport R_2

Pour une pression P_f donnée, on observe dans le graphique de la Figure 5.7 que plus la viscosité du fluide de compaction η_f est faible, plus élevé sera la vitesse v_r de la résine à l'étape 2 de compaction par rapport à la vitesse v_r à la fin d'injection. On a aussi observé précédemment que la vitesse de la résine à l'étape 2 de compaction augmente

jusqu'au croisement des fluides. Étant donné une pression P_f constante, on a montré qu'un fluide de basse viscosité remplit la chambre de compaction plus rapidement qu'un fluide plus visqueux. Une vitesse v_f élevée du fluide de compaction entraînera un flux de résine v_r rapide avant le croisement des fluides. Pour cette raison, la viscosité η_f du fluide de compaction a une grande influence sur la vitesse d'écoulement de la résine au début de l'étape 2 de compaction, avant le croisement des fluides.

Étant donné la faible résistance à l'écoulement, un fluide moins visqueux sera injecté (à une même pression) plus rapidement qu'un fluide plus visqueux. L'utilisation d'un fluide de compaction de faible viscosité est conseillée pour les conditions de fabrication étudiées en laboratoire, de même qu'il faut assurer une pression de compaction élevée ($P_f > 3$ bars). On pourrait penser qu'un gaz, qui est un fluide de faible viscosité, pourrait faciliter l'écoulement de la résine. Même si cela semble être le cas, il est déconseillé d'utiliser des fluides compressibles comme l'air, puisque l'épaisseur finale de la pièce en fonction de la pression de compaction ne pourrait plus se prédire puisque l'hypothèse de conservation du volume dans la cavité du moule ne serait plus valable.

5.4.3 Influence de la pression d'injection de la résine P_r sur le rapport R_2

En fixant les paramètres de pression P_f du fluide de compaction et de sa viscosité η_f , on remarque dans les Figure 5.6 et Figure 5.7 que plus faible est la pression d'injection de résine P_r , plus grande sera la vitesse de la résine à l'étape 2 de compaction par rapport à la fin d'injection. Pour un écoulement de type RTM dans le cas unidirectionnel, la vitesse v_r de la résine a été donnée à la relation (1.5) :

$$v_r = -\frac{K}{\phi \eta_r} \frac{dp}{dx} \quad (5.5)$$

Si on fixe tous les paramètres sauf le gradient de pression dp/dx , la vitesse v_r de la résine croît proportionnellement avec l'augmentation du gradient dp/dx . Ceci implique que, pour un même volume à injecter, plus la pression P_r est élevée, plus la vitesse v_r sera élevée à la fin d'injection.

En effet, pour une pression de compaction élevée (par exemple $P_f > 3$ bars), on a observé à l'étape de compaction qu'une pression P_r élevée entraîne une vitesse maximale $v_{r\ max}$ de résine plus élevée que pour une faible pression P_r d'injection de résine. On conclut que rapport R_2 n'est pas représentatif de la vitesse maximale $v_{r\ max}$ de la résine. Pour une pression de compaction élevée, une pression P_r d'injection faible, qui produit un rapport R_2 important, entraîne une vitesse maximale $v_{r\ max}$ de résine plus faible qu'avec une pression P_r élevée.

5.5 Conclusion

L'analyse des résultats des expériences a permis de justifier l'utilisation du procédé Polyflex dans le but d'augmenter la productivité des pièces composites fabriquées par RTM. Le temps de remplissage t_p ainsi que le rapport R_2 de la vitesse du front de la résine à l'étape 2 de compaction ont été étudiés afin proposer un ordre de grandeur des paramètres de fabrication les plus performants. On a trouvé que le facteur le plus important qui gouverne la diminution du temps de remplissage t_p et l'augmentation de la vitesse v_r du front de résine après l'étape d'injection est la pression P_f de compaction dans le moule. Étant donné un taux volumique de fibres final V_{fc} et un même rapport $P_f / P_{c\ max}$ (rapport de la pression P_f du fluide de compaction sur la pression $P_{c\ max}$ de compaction requise pour obtenir un taux de fibres V_{fc}), le temps de remplissage de la cavité est autant diminuée en utilisant un faible taux de fibres initial V_{f0} que pour un taux de fibres V_{f0} élevé. Le procédé Polyflex est particulièrement plus

intéressant pour la fabrication de composites à faible taux de fibres ($V_{fc} < 30\%$) en raison du niveau de production qu'il assure, comparé au procédé RTM.

Le Tableau 5.3 résume les points importants à retenir après l'analyse des résultats. Les deux premières colonnes présentent les paramètres utilisés, classés par ordre d'importance. Dans la troisième colonne, on examine l'influence des paramètres sur les deux réponses, tandis que la quatrième colonne indique les tendances recommandées des paramètres de fabrication. Bien qu'il ait été impossible de quantifier le poids de ces paramètres, le tableau les classe par ordre d'importance afin d'assurer une injection plus rapide dans laquelle la vitesse d'écoulement de la résine à l'étape 2 de compaction sera plus élevée qu'à la fin de l'injection. Cet objectif permet d'assurer que le temps de remplissage t_p sera donc plus favorable que pour procédé RTM pour un même taux de fibres final.

Les paramètres de fabrication recommandés sont propres à la géométrie de la cavité du moule et aux caractéristiques du renfort et de la résine étudiés. On prétend que l'utilisation d'une préforme d'épaisseur h_0 plus faible que celle de la cavité du moule assurera un temps de remplissage t_p encore plus faible qu'avec un renfort dont l'épaisseur augmente pendant le remplissage. Dans ces conditions, la résine s'écoulera plus facilement par dessus la préforme que par dessous un renfort. Un fluide de compaction visqueux dans ces conditions pousserait la résine plus rapidement. L'étude du procédé Polyflex avec une préforme constitue une des recommandations de travail à suivre dans l'avenir.

Tableau 5.3 Ordre d'influence des paramètres de fabrication

	<i>Paramètres contrôlés</i>	<i>Description du poids des paramètres sur les réponses analysées</i>	<i>Valeur visée</i>
1	Pression du fluide d'injection P_f	Influence considérablement la vitesse d'écoulement de la résine à l'étape de compaction ainsi que le temps de remplissage t_p avec le rapport $P_f / P_{c\ max}$.	$P_f > 2 P_{c\ max}$ $P_f > 3$ bars
2	Taux volumique des fibres initial V_{f0}	Facteur très important pour diminuer le temps t_p . Aucune influence de ce paramètre a été trouvée afin d'augmenter le rapport R_2 .	V_{f0} faible
3	Viscosité du fluide de compaction η_f	Paramètre à réduire pour augmenter la vitesse d'écoulement de la résine avant le croisement des fluides. Il est déconseillé d'utiliser des fluides compressibles. Pas d'influence de cette viscosité sur le temps t_p pour $P_f / P_{c\ max}$ élevé.	η_f faible
4	Pression d'injection de résine P_r	Pour un rapport $P_f / P_{c\ max}$ donné, une pression P_r élevée fait réduire le temps t_p , mais pas significativement. Pour $P_f > 3$ bars et P_r élevée, la vitesse de la résine à l'étape de compaction est supérieur à celle pour une faible pression P_r . Le rapport R_2 n'est pas représentatif pour le choix de la pression P_r .	P_r élevé
5	Longueur du volume de résine injectée L_r	Aucune influence a été mis en évidence pour ce paramètre sur le temps t_p ni sur le rapport R_2 . On a montré que L_r n'influence pas le temps t_p pour un taux de fibres V_{fc} fixe (avec un taux de fibres V_{f0} différent)	Peu importe

CONCLUSION

Ce mémoire a présenté les travaux de développement d'un nouveau procédé d'injection d'une résine polymère à travers un renfort fibreux, appelé Polyflex. Ce procédé consiste à injecter une quantité donnée de résine dans la cavité du moule ou chambre d'imprégnation. À l'aide d'un fluide non miscible injecté sous pression dans une deuxième chambre, miroir de la première et séparée du renfort par un film plastique imperméable, la résine est forcée de finir d'imprégner la pièce pendant que le renfort fibreux se compacte. Une particularité du procédé Polyflex réside dans la capacité de contrôler l'épaisseur h_c et le taux de fibres V_{fc} final de la pièce en fonction de la quantité de résine injectée. Les deux principaux volets de ce travail comprennent la conception d'un moule d'injection simple et l'analyse expérimentale du procédé.

Un moule transparent a été conçu pour visualiser l'imprégnation pendant la fabrication. Le choix des matériaux et la détermination des limites d'utilisation du moule ont été étudiés avant sa fabrication. Les parois transparentes du moule Polyflex ont été fabriquées en PMMA (Polyméthylméthacrylate ou Plexiglas®). Une pression uniforme de 8 bars est permise dans le moule afin de limiter sa déformation maximale à 0,32 mm. Cependant, la charge maximale possible dans le moule a été de 6 bars (déflexion maximale de 0,21 mm) en raison de la capacité des capteurs de pression installés, dont la plage de mesure va de -1 à 6 bars.

Une analyse expérimentale a été réalisée dans le but de déterminer l'influence des paramètres de fabrication du procédé Polyflex sur le temps de remplissage et sur le rapport entre la vitesse maximale d'écoulement de la résine et sa vitesse initial à l'étape de compaction. Un plan d'expériences détaillé a été réalisé à cette fin. Cette analyse a été effectuée pour une séquence de fabrication isotherme et pour des

pressions d'injection constantes des fluides. Les phénomènes physiques sur lesquels repose le procédé Polyflex ont été observés et analysés à l'aide des mesures effectuées pendant chacune des séquences de fabrication. Les mesures réalisées ont porté sur la pression avec 8 capteurs installés dans la cavité du moule, le débit du fluide de compaction avec un débitmètre et la vitesse du front de résine par observation visuelle de la progression du front de résine avec une caméra numérique.

Les paramètres de fabrication étudiés ont été la pression d'injection P_r de la résine, la pression d'injection P_f du fluide de compaction, la viscosité η_f du fluide de compaction, la fraction volumique de fibres initiale V_{f0} et la position finale L_r du front de résine à l'étape 1 d'injection. La résine a été remplacée par une huile de silicone qui permet des manipulations plus faciles et reproduit les conditions réelles puisque la viscosité calibrée de l'huile de silicone est similaire à celle d'une résine thermodurcissable. Le fluide de compaction utilisé a été aussi une huile de silicone de deux viscosités différentes. Le renfort fibreux choisi pour cette étude est un mat de fibres de verre continues habituellement utilisé dans l'industrie des composites.

Deux types possibles d'écoulement de la résine ont été identifiés dans le procédé Polyflex :

1. Un écoulement de Darcy, écoulement typique du procédé RTM, est caractérisé par l'imprégnation du renfort dans le plan de la pièce. Ce type d'écoulement a lieu lorsque l'épaisseur du renfort, au début de la fabrication, est égale à l'épaisseur de la cavité du moule ($h_0 = H$).
2. Un écoulement de type VARI se distingue par la relaxation du renfort pendant l'imprégnation de la résine, qui se distribue selon un écoulement dans le plan mais aussi à travers l'épaisseur de la pièce. Cet écoulement a lieu lorsque l'épaisseur initiale du renfort est inférieure à l'épaisseur de la cavité ($h_0 < H$).
Un effet de « vague » peut aussi se produire sur le renfort lorsque le fluide de

compaction remplit la chambre de compaction. Le résultat de cet effet est une diminution appréciable de la durée de remplissage de la chambre d'injection.

La pression P_f du fluide de compaction est le paramètre de fabrication le plus important qui gouverne la réduction du temps t_p de remplissage total et l'augmentation du rapport R_2 , qui caractérise la variation de la vitesse du front de résine à l'étape 2 de compaction. Au début de cette étape (fin de l'injection de résine), la vitesse v_r du front de résine augmente pour une pression P_f de compaction élevée et décroît pour une pression P_f faible. Pour une pression P_f élevée, la vitesse v_r de la résine augmente jusqu'au moment où le fluide de compaction dépasse le front de résine, puis elle décroît jusqu'au remplissage total du renfort. Après le croisement des fluides, la vitesse v_r décroît puisque le fluide de compaction exerce une pression sur le renfort encore sec et entraîne ainsi un écoulement plus difficile de la résine par la suite. Pour les conditions de fabrication étudiées, une pression du fluide de compaction $P_f > 3$ bars assure une augmentation de la vitesse v_r du front de résine à l'étape de compaction, quelles que soient les valeurs des autres paramètres de fabrication.

La pression de compaction maximale $P_{c\ max}$ nécessaire pour obtenir le taux de fibres V_f final désiré dépend du comportement du renfort en compaction, tel que caractérisé en laboratoire. Le temps de remplissage total est réduit en fonction du rapport $P_f / P_{c\ max}$, quelles que soient les valeurs des autres paramètres de fabrication. Un rapport $P_f / P_{c\ max} > 2$ assure un remplissage plus rapide du renfort que pour le procédé RTM pour les mêmes conditions d'injection et la même fraction de fibres finale. La détermination d'un modèle de compaction pour un renfort est très importante puisque c'est à partir des caractéristiques du renfort qu'on peut définir l'ordre de grandeur de la pression P_f du fluide de compaction à appliquer.

Étant données les caractéristiques du renfort utilisé, le procédé Polyflex est particulièrement efficace pour la fabrication de composites à faible taux de fibres final

($V_{fc} < 30 \%$). Ceci permettrait d'appliquer une pression de compaction modérée ($P_f < 12$ bars avec un rapport $P_f / P_{c\ mac} < 4$) pour produire des pièces composites beaucoup plus rapidement qu'avec le procédé RTM standard.

Le débit D_f du fluide de compaction, de viscosité $\eta_f = 0,1$ Pa.s, augmente pendant le remplissage de la chambre de compaction. Le débit D_f reste constant pour une viscosité du fluide plus visqueuse $\eta_f = 1,0$ Pa.s. En fixant les autres paramètres de fabrication, une faible viscosité η_f implique que la chambre de compaction se remplit plus rapidement et entraîne une imprégnation plus rapide du renfort. Pour le mat continu utilisé dans ce travail, l'épaisseur du renfort augmente au passage de la résine jusqu'à l'épaisseur totale H de la cavité du moule. Quand on utilise une préforme dont l'épaisseur h_0 (qui ne varie pas pendant la fabrication) est plus faible que l'épaisseur H , un fluide de compaction plus visqueux va produire un effet de vague plus marqué sur la résine, qui imprégnera ainsi le renfort davantage à travers son épaisseur que dans le plan. Ceci permettrait de réduire encore le temps de fabrication et devrait être envisagé dans une analyse future du procédé.

Le temps de remplissage t_p diminue pour un faible taux de fibres initial V_{f0} . Pour un taux de fibres final $V_{fc} \sim 20 \%$, les expériences avec un taux de fibres initial plus faible ont été effectuées en moins de temps. Ceci confirme le fait que le temps de remplissage est plus court pour un écoulement de type VARI que pour un écoulement de type RTM.

La pression P_r d'injection de la résine n'influence guère le temps de remplissage final t_p . Cependant, le temps t_p devient plus court pour une pression P_r plus élevée. Cependant on doit tenir compte d'un lavage des fibres pour les pressions d'injection élevées. Le taux de fibres final V_{fc} est déterminé par la quantité de résine injectée, déterminée dans le cas de l'injection unidirectionnelle étudié ici par la position finale L_r du front de résine à l'étape d'injection. Par ailleurs, on a constaté

expérimentalement qu'il n'existait pas d'influence du paramètre L_r sur le temps t_p de remplissage ou sur la vitesse v_r d'écoulement de la résine.

Finalement, il faut mentionner que les paramètres de fabrication recommandés au Tableau 5.3 sont spécifiques à la géométrie de la pièce et aux caractéristiques de la résine et du renfort utilisés. Un modèle mathématique du procédé Polyflex est en développement afin de généraliser cette technique pour différentes conditions de fabrication. En ayant démontré que le temps de fabrication du procédé Polyflex peut être largement réduit par rapport au procédé RTM, on confirme le grand potentiel de cette nouvelle technologie pour la fabrication à haut volume de pièces composites pour l'industrie automobile.

RECOMMANDATIONS ET TRAVAUX FUTURS

Les recommandations pour la conception de moules Polyflex dans l'avenir sont les suivantes :

- L'injection d'un fluide de compaction à pression constante, le débit D_f du fluide de compaction ne conduit pas à une décroissance. Par analogie, si on veut imposer un débit constant au fluide de compaction, la pression ne devrait pas augmenter.
- Les capteurs de pression sur la paroi du moule n'ont pas transmis correctement la pression P_c exercée par les fibres. La mise en place des capteurs à l'intérieur du moule est conseillée afin de mesurer uniquement la pression du fluide. On pourrait calculer par la suite la pression P_c , qui est la différence entre la pression P_f du fluide de compaction avec la pression de la résine.

Les recommandations pour le travail expérimental à suivre sont les suivantes :

- Caractérisation en compaction et en perméabilité des renforts utilisés dans le procédé Polyflex.
- Étude de l'écoulement de la résine pour une préforme dont l'épaisseur ne varie pas pendant la fabrication ($h_0 = h_c < H$).
- Utilisation d'une résine de viscosité plus faible (par exemple $\eta_r = 0,1 \text{ Pa.s}$) et d'un fluide de compaction plus visqueux ($\eta_f \gg 1,0 \text{ Pa.s}$).
- Analyse du procédé Polyflex en employant des renforts tissés (pour obtenir un taux de fibres élevé) afin d'étudier la performance du procédé Polyflex pour d'autres types de renforts, c'est-à-dire, déterminer les taux de fibres V_{fc} finaux obtenus avec des pressions modérées.
- Évaluation du temps de remplissage t_p pour différentes épaisseurs de la cavité du moule, mais pour le même taux de fibres initial et final.
- Détermination de l'influence d'une injection des fluides d'imprégnation et de compaction à débit constant sur le temps de remplissage total.
- Analyse du procédé quand le fluide de compaction est soumis à des pulsations de fréquences différentes. Étant donné que la vitesse de la résine augmente par suite du coup de poing donné par le fluide de compaction au début de l'étape de compaction, des fréquences de vibration en pression du fluide de compaction vont certainement faciliter l'imprégnation du renfort, surtout dans le cas des renforts tissés qui possèdent deux échelles de porosité. Le temps de remplissage pourrait même diminuer encore plus.
- Fabrication réelle des plaques par le procédé Polyflex, c'est-à-dire, en utilisant une matrice polymère qui durcit après la fabrication. Ceci permettra d'évaluer les variations de l'épaisseur finale h_c ainsi que le taux de fibres V_{fc} du composite.

- Étude de l'influence de la pression du vide appliquée à l'évent de la chambre d'injection sur la saturation du composite.
- Analyse de la géométrie de la section d'un dispositif qui empêche l'effet de bord du fluide de compaction. On a vu à la section 3.4 que l'emplacement de joints d'étanchéité sur les bords était nécessaire pour assurer un écoulement uniforme du fluide.
- Étude du procédé Polyflex pour une géométrie complexe, pour une pièce composite sandwich et pour une injection périphérique.

RÉFÉRENCES

- [1] ACHESON, J. A., SIMACEK, P., et ADVANI, S. G. (2004). The implications of fiber compaction and saturation on fully coupled VARTM simulation Composites Part A. Applied Science and Manufacturing, Vol. 35, No. 2, p. 159-169. 1359-835X. 126 Spencer Laboratory, Center for Composite Materials, University of Delaware, Newark, DE 19716-3144, United States.
- [2] APPLE Rubber Products. Seal Design Catalog. 95. (GENERIC)
- [3] BERGSTROM, L. et ALWART, S. (1990). Advantages of mass cast methacrylate tooling for RTM Process. Tooling for Composites, Vol. 3., p.123-125.
- [4] BROOKHOUSE, P. (1998). New Design RTM Machine for Ford Transit Van Precision Toolmaker, Vol. 16, No. 1, p. 10. 0264-4703.
- [5] BUDINSKI, K. G. et BUDINSKI, M. K. (2005). Engineering materials : properties and selection, Pearson, Upper Saddle River, N.J.
- [6] CARREGA, M. et AGASSANT, J.-F. (2000). Matériaux industriels, Dunod, Paris, France.
- [7] CAUCHOIS, J. J.-P. (1997). RTM Process, JP Cauchois, Editions Syntech.
- [8] CHEN, B. et CHOU, T.-W., (1999). Compaction of woven-fabric preforms in liquid composite molding processes : single-layer deformation. Composites Science and Technology, Vol. 59, No. 10, p. 1519-1526. 0266-3538. Univ of Delaware, Newark, DE, USA.
- [9] CRAY, M., (1980). Development of a polyimide resin injection process for advanced composite structures Process. Symposium: Fabrication Techniques Advanced Reinforced Plastics. Vol., p. 35-44.
- [10] CRIPPS, David (2003). Guide to Composites: Resine Transfer Molding (RTM).

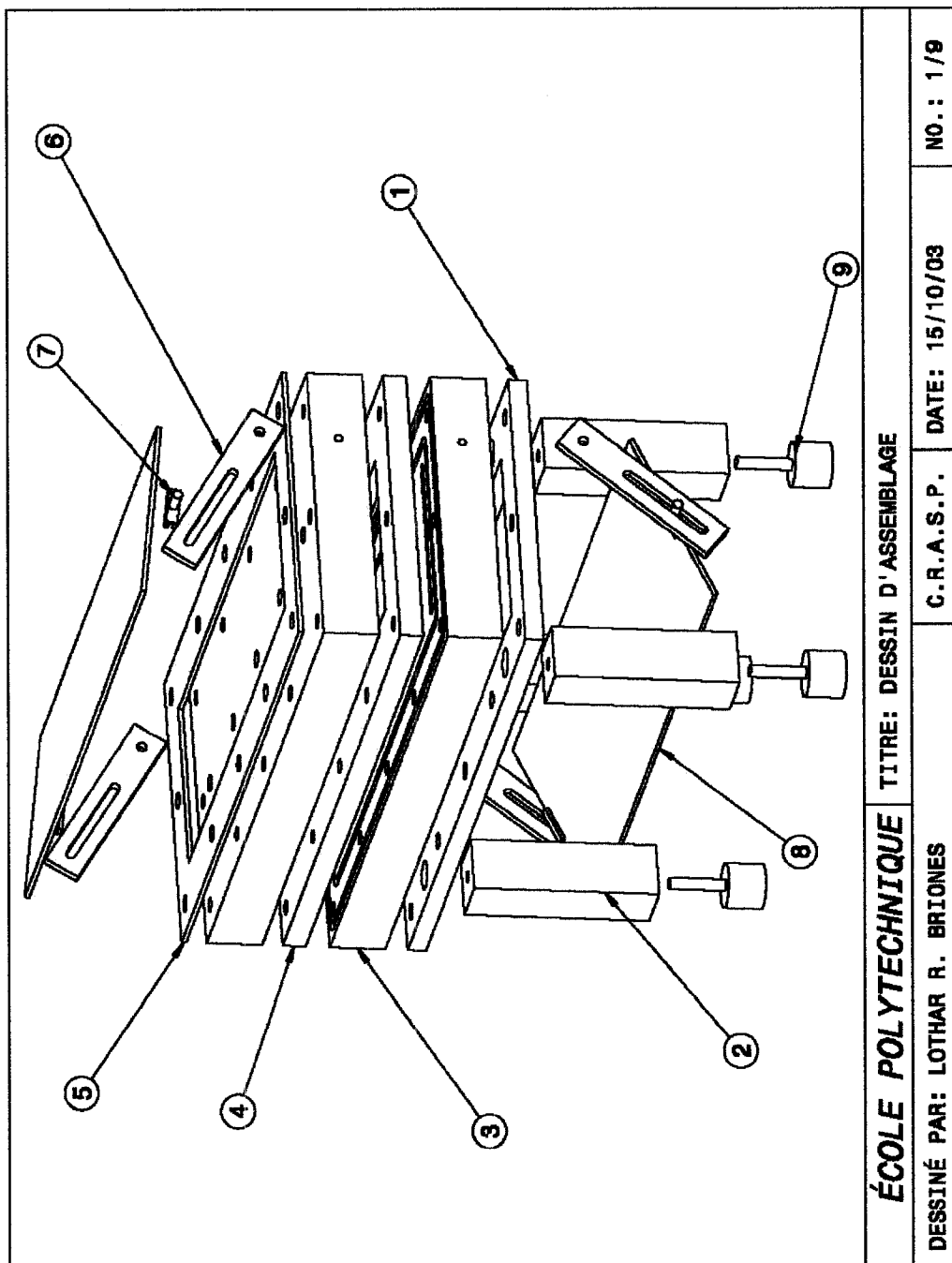
- [11] DARCY, H. (1856). Les Fontaines Publiques de Dijon Anonymous. Dalmont.
- [12] DAVENPORT, D. (2001). Modular tooling for affordable RTM. 46th International SAMPE Symposium and Exhibition 2001 a Materials and Processes Odyssey, May 6-10 2001, p. 326-334.
- [13] FERLAND, P., GUITTARD, D. et TROCHU, F. (1996). Concurrent Methods for permeability measurements in Resin Transfer Moulding Polymer Composites, Vol. 17, No. 1, p. 149-158.
- [14] GARDEN, G. K. (2005). CBD-60-F. Caractéristiques du verre, p. 67.
- [15] GAUVIN, R., TROCHU, F., LEMENN, Y. et DIALLO, L. (1996). Permeability measurements and flow simulation through fiber reinforcements. Polymer Composites, Vol. 17, No. 1, p. 34-42.
- [16] GAY, D., HOA, S. V. et TSAI, S. W. (2003). Composite materials : design and applications, CRC Press, Boca Raton, FL.
- [17] GREEN, P. (1959). Inventor. UK. No. 944955.
- [18] GUTOWSKI, T., CAI, Z., KINGERY, J. et WINEMAN, S. J. (1986). Resin Flow/Fiber Deformation Experiments. SAMPE Quarterly, Vol. 17, p. 54-58.
- [19] KLEINEBERG, M., HERBECK, L. et SCHOPPINGER, C. (2004). Advanced Liquid Resin Infusion - A New Perspective for Space Structures. DLR-Mitteilung, Vol., No. 1, p. 173-180. 1434-8462. DLR, German Aerospace Center, 38108 Braunschweig, Germany.
- [20] KOSCHMIEDER, M., TOPKER, J. et WASSENBERG, T. (2000). Innovations in the production of continuous fiber reinforced plastic parts. Macromolecular Materials and Engineering, Vol. 28, No. 4, p. 52-63.
- [21] LARSEN, E., CAIMS, D., MANDELL, J. et SAMBOWSKY, D. (2002). Investigations of a two-stage injection process to reduce the effects of in-plane resin flow. AIAA, Vol. 26, p. 1-7.
- [22] LEWITT, S. (2001). Alternative Approaches to Closed Molding Infusion Part

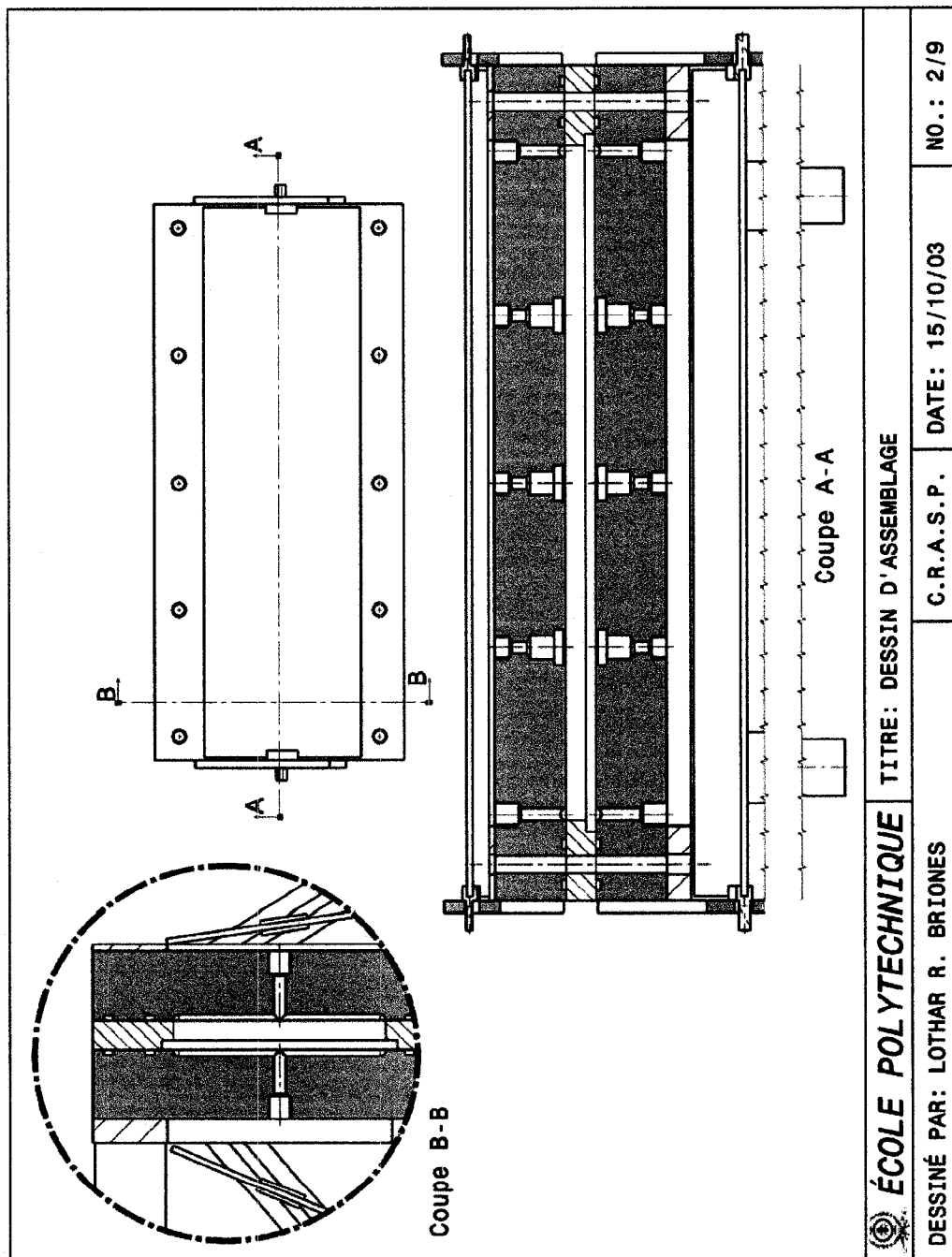
- One - History and Patents Composites Fabrication, Vol. p. 56-83, Sep.
- [23] LUBIN, G. et PETERS, S. T. (1998). Handbook of composites, Chapman & Hall London, New York.
 - [24] MALLICK, P. K. (1993). Fiber-reinforced composites : materials, manufacturing, and design, Marcel Dekker, New York.
 - [25] MALLICK, P. K. et NEWMAN, S. (1990). Composite materials technology : processes and properties, Hanser Publishers, Munich.
 - [26] MARCO CHEMICAL COMPANY, inventor. (1950). Marco Method. US. No. 2495640.
 - [27] MATWEB. (2003). Overview - Acrylic, General Purpose, Molded.
 - [28] MCCARTHY, R., HAINES, G. et NEWLEY, R., (1994). Polymer composite applications to aerospace equipment. Composites Manufacturing, Vol. 5 , No. 2, p. 83-93.
 - [29] MOURGUE, R. (1979). Conception des pièces en matières plastiques moulées à haute pression (compression, transfert, injection). R. Mourgue, Oyonnax.
 - [30] POTTER, K. (1997). Resin transfer moulding, Chapman & Hall, London, New York.
 - [31] RIGAS, E. J., WALSH, S. M. et SPURGEON, W. A. (2001). Development of a novel processing technique for Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM), 46th International SAMPE Symposium and Exhibition 2001 a Materials and Processes Odyssey, May 6-10 2001, p. 1086-1094.
 - [32] ROBITAILLE, F. et GAUVIN, R. (1998). Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. I: Review of experimental results Polymer Composites, Vol. 19, No. 2, p. 198-216. 0272-8397. Ecole Polytechnique de Montreal, Canada.
 - [33] ROSATO, D. V. et PLASTICS INSTITUTE OF AMERICA. (2001). Plastics engineering, manufacturing & data handbook, Kluwer Academic Publishers, Boston.

- [34] RUDD, C. D. (1997). Liquid moulding technologies resin transfer moulding, structural reaction injection moulding, and related processing techniques, Woodhead Publitions, Cambridge.
- [35] SCHEIDEGGER, A. E. (1974). The physics of flow through porous media, University of Toronto Press, Toronto, Buffalo, New York.
- [36] SEEMAN, W. H., inventor. (1991). Vacuum-forming method and apparatus for vacuum forming fiber reinforced composites. Europe. No. EP 0525263A1.
- [37] SMITH, G., inventor. (1959). US. No. 2913036, 1959.
- [38] ST. GOBAIN VETROTEX. (2005). Unifilo continuous filament mat. 99.
- [39] STICKLEN, J. (2005). TRP - Liquid Molding - Cure - Crosslinking of Unsaturated Polyester Resins. 99.
- [40] THAGARD, J. R., OKOLI, O. I. et LIANG, Z. (2003). Resin infusion between double flexible tooling: Evaluation of process parameters, Advancing Materials in the Global Economy - Applications, Emerging Markets and Evolving Technologies, May 11-15 2003, p. 634-645.
- [41] THAGARD, J. R., OKOLI, O. I., LIANG, Z., WANG, H.-P. et ZHANG, C. (2003). Resin infusion between double flexible tooling: Prototype development. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 34, No. 9, p. 803-811. 1359-835X. Department of Industrial Engineering, Florida A and M University, Florida State University, Tallahassee, FL 32310-6046, United States.
- [42] TROCHU, F., RUIZ, E. et DEMARÌA, C., (2000). Montréal (Québec), Canada, Dec.
- [43] WILLIAMS, C. D., GROVE, S. M. et SUMMERSCALES, J. (1998). Compression response of fiber-reinforced plastic plates during manufacture by the resin infusion under flexible tooling method. Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 29, No. 1-2, p. 111-114.
- [44] WILLAMS, C., SUMMERSCALES, J. et GROVE, S. (1996). Resin

- Infusion under Flexible Tooling (RIFT): A review. Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 27, No. 7, p. 517-524.
- [45] YANG, H. et LEE, J. (2001). Comparison of unsaturated polyester and vinylester resins in low temperature polymerization. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 79, No. 7, p. 1230-1242.
- [46] ZHU, Y. D., WANG, J. H., TAN, H. et TIAN, Z. G. (2003). Development of a Novel Low-cost Processing Technique for Vacuum Assisted Resin Transfer Molding, Composite Materials III: Proceedings of the 3rd China Cross-Strait Conference on Composite Materials, May 7-12 2003, p. 359-362.
- [47] ACHIM, V. (2004). Simulation numérique du procédé VARI et ses dérivés, Mémoire de maîtrise es sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Canada.

**Annexe A : Dessins techniques du moule Polyflex fabriqué pour les expériences
réalisées en laboratoire**





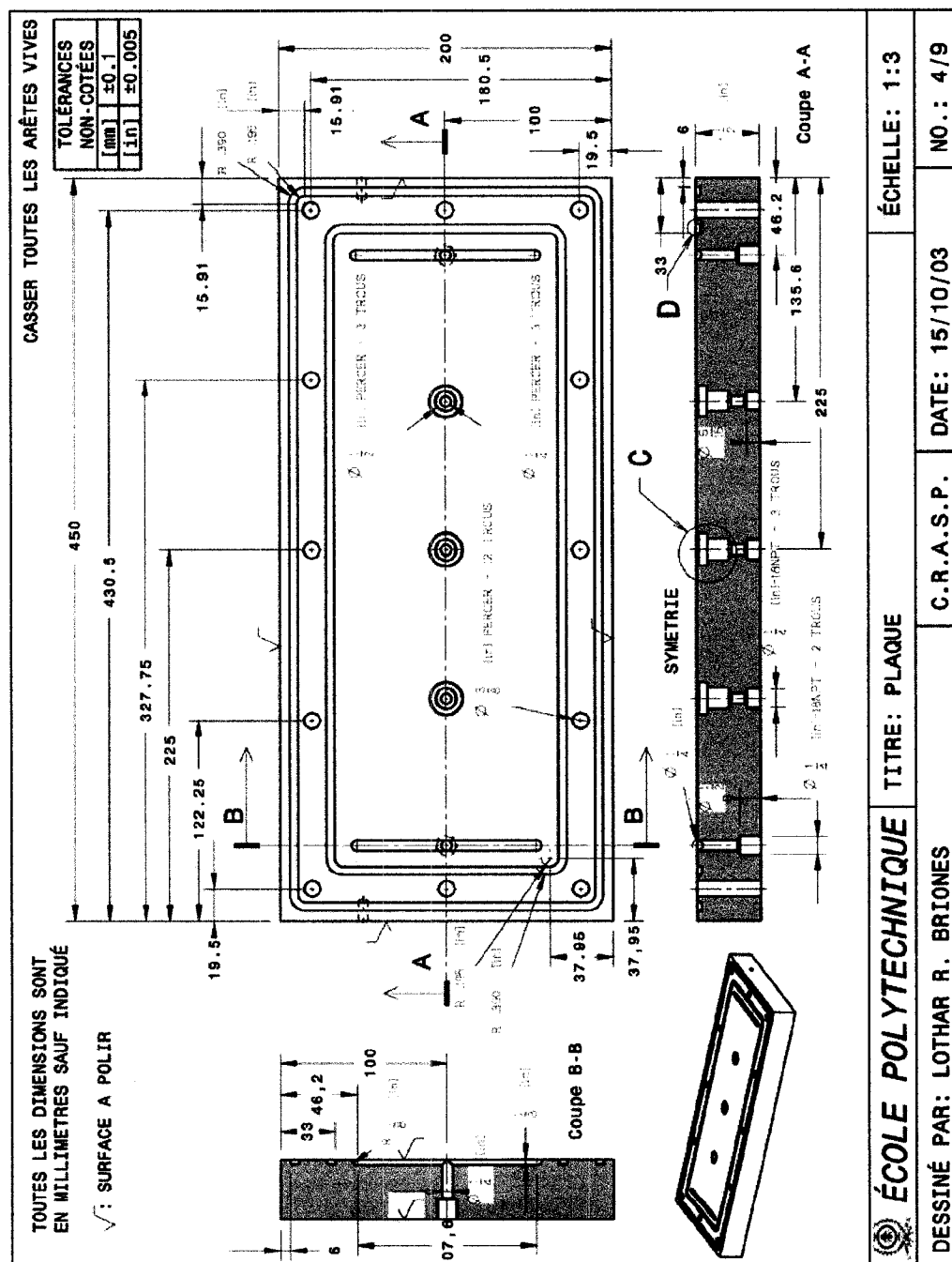
Nomenclature de Montage			
Numéro	Référence	Quantité	Matériau
1	Montage plateforme	1	Acier
2	Montage pate	4	PMMA

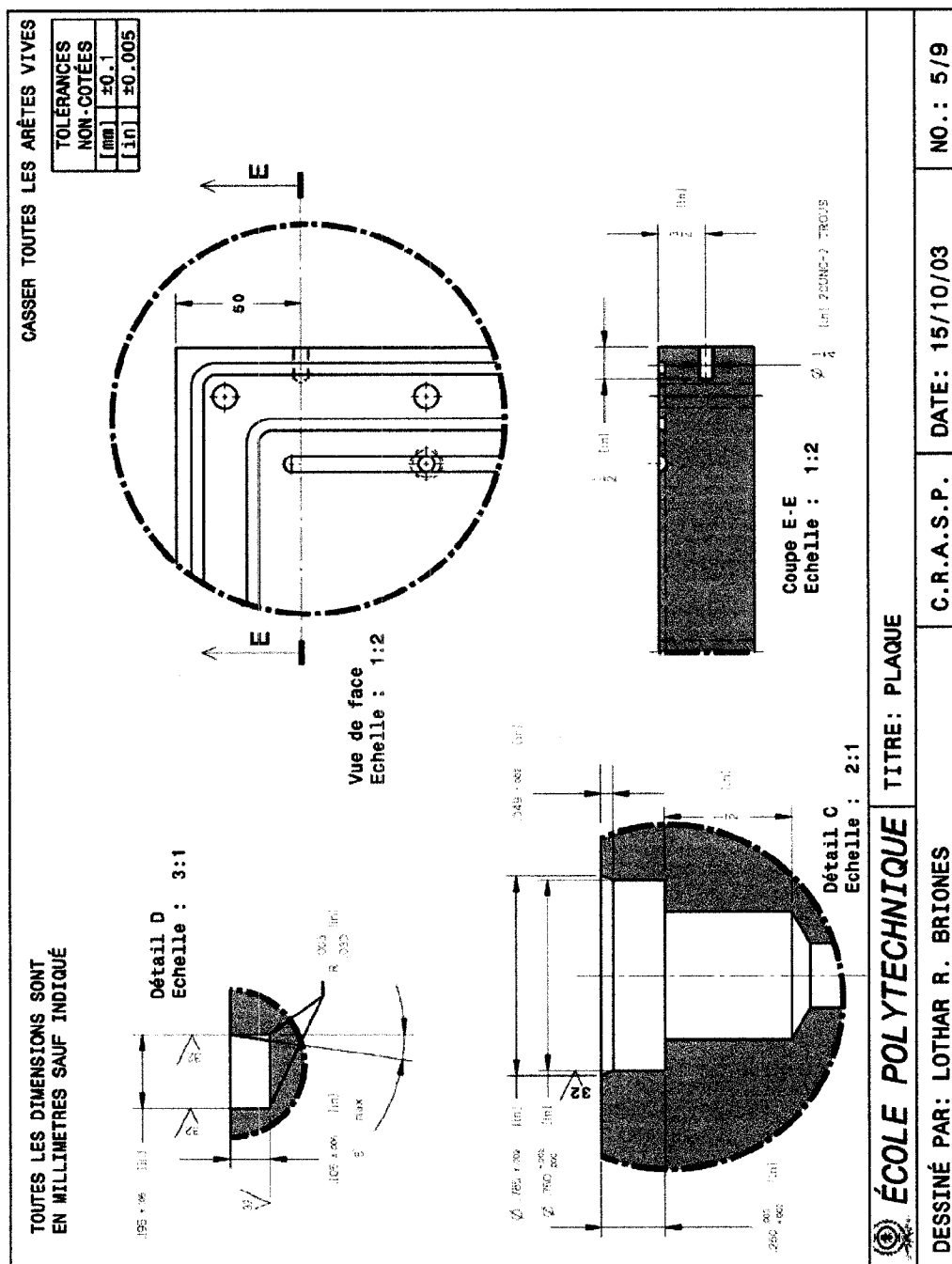
Nomenclature du Moule POLYFLEX			
Numéro	Référence	Quantité	Matériau
3	Plaque	2	PMMA
4	Cadre	5	PMMA
5	Feuille	1	Acier
	Montage	1	
6	Bras	4	PMMA
7	Tiroir	4	Laiton
8	Miroir	2	Verre
9	Niveleur	4	Acier

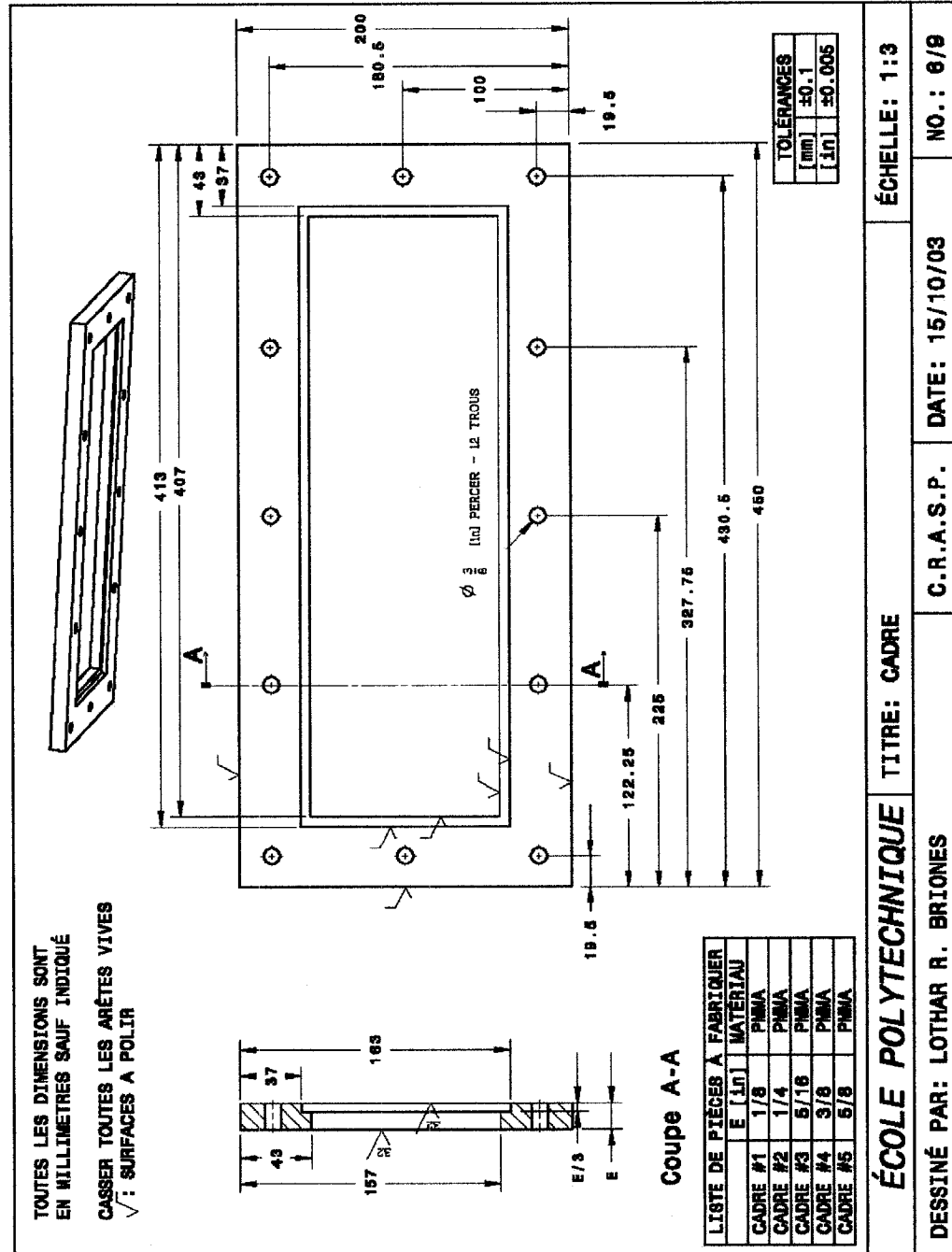
Récapitulatif sur le Moule POLYFLEX			
Page	Référence		
4	Plaque		
6	Cadre		
7	Feuille		
8	Montage plateforme		
8	Montage pate		
9	Bras		
9	Tiroir		
9	Miroir		

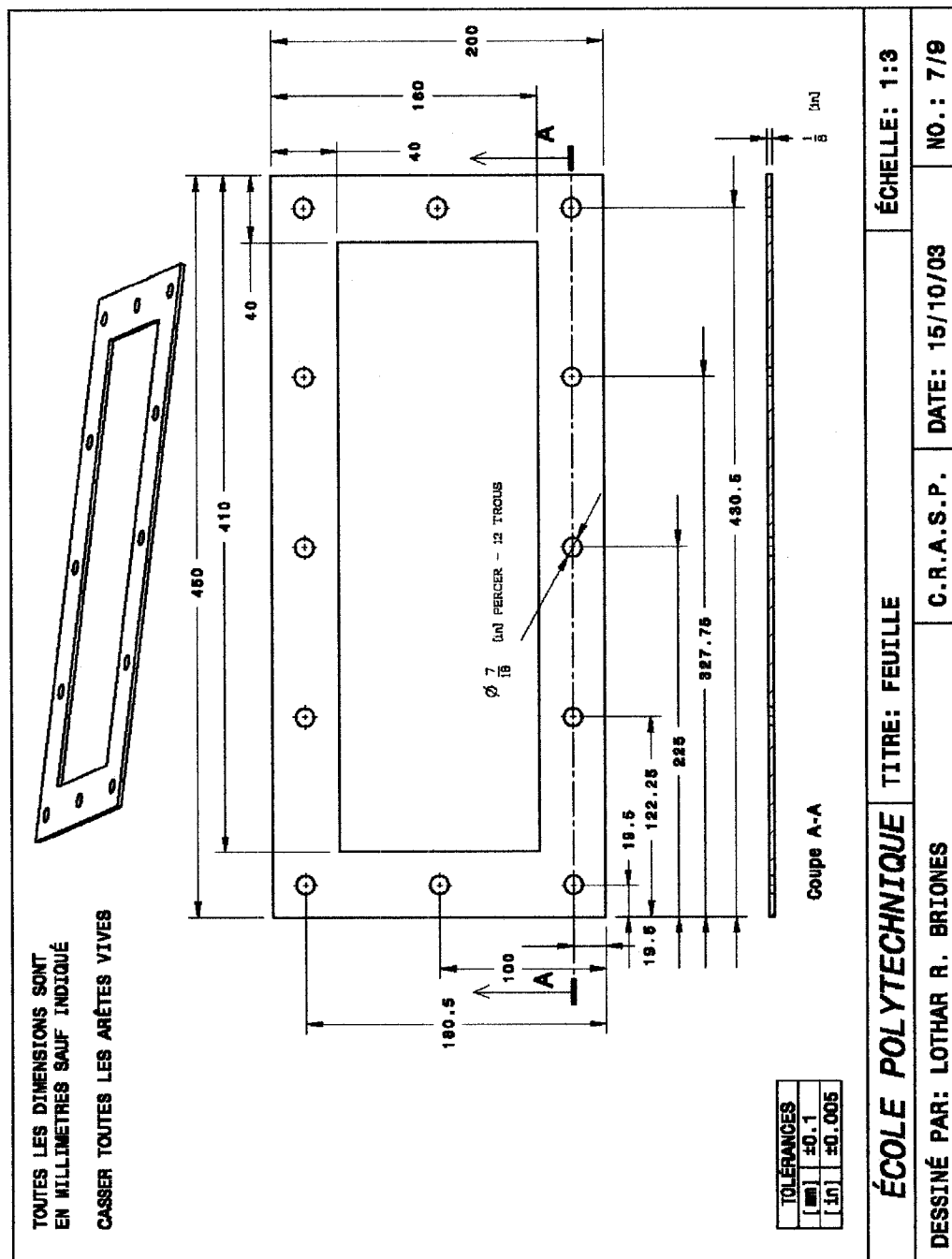
Pièces standard		
Quantité	Description	Commentaires
4	Niveleur 1 1/2 x 5/16-18UNC-2A	McMaster-Carr p.1204
4	Boulon 5/8 x 1/4-20UNC-2A	Pour fixer les bras
4	Ecrou 1/4-20UNC-2B	Pour serrer les tiroirs
4	Vis à tête fraisée 1 1/2 x 3/8-16UNC-2A	Pour fixer les pates au montage
6	Raccordement pour câble 1/4 NPT	Pour les capteurs

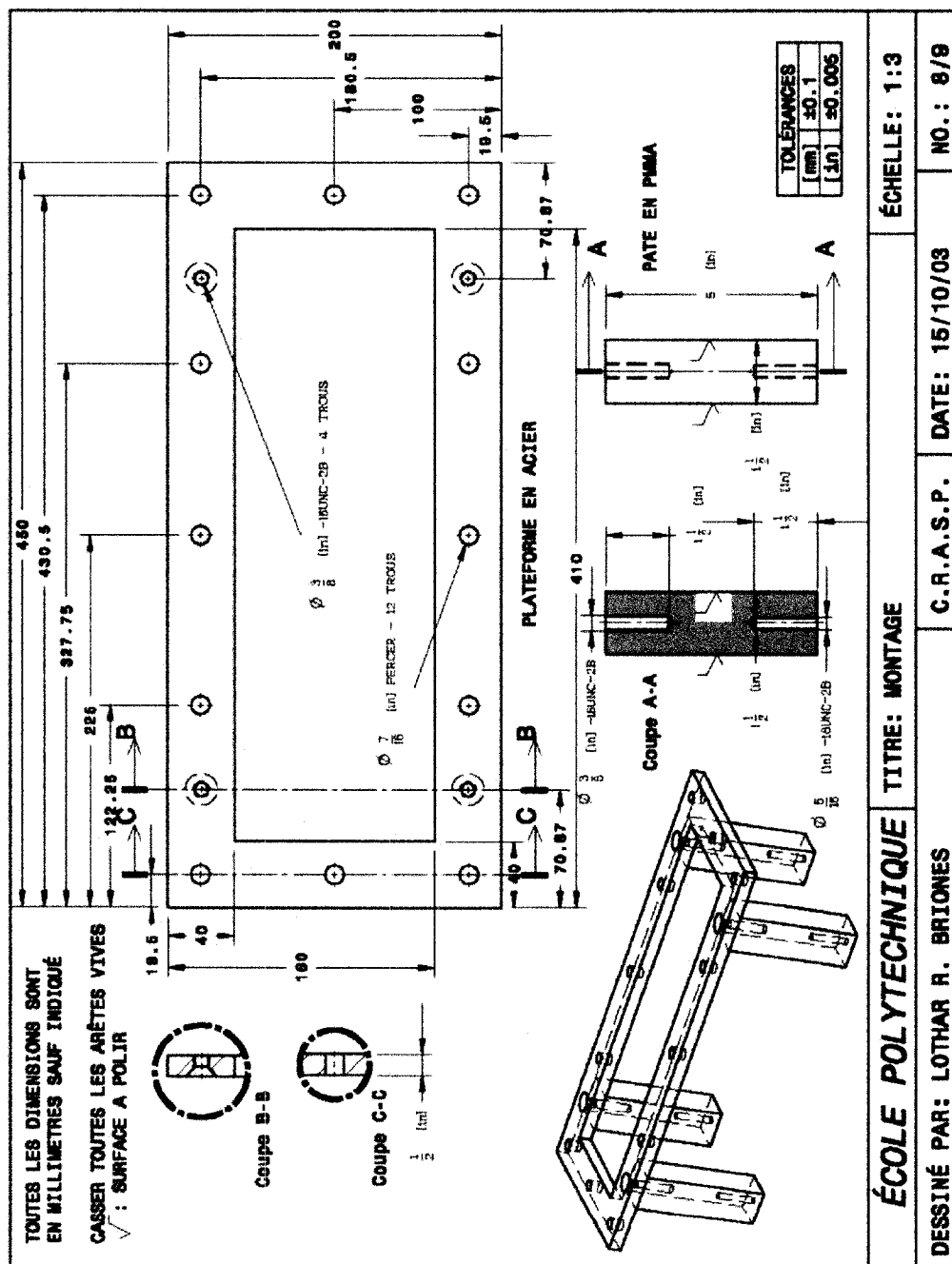
 ÉCOLE POLYTECHNIQUE		TITRE: DESSIN D'ASSEMBLAGE	
DESSINÉ PAR: LOTHAR R. BRIONES		C.R.A.S.P.	DATE: 15/10/03
			NO.: 3/9











Annexe B : Calcul de l'erreur de mesure du débitmètre Endress & Hauser

Calcul du volume total de fluide dans la chambre de compaction

Le volume total de fluide V_{cc} dans la chambre de compaction est le volume occupé par le fluide de compaction à la fin de la fabrication. Il est calculé par la relation suivante :

$$V_{cc} = L \cdot w \cdot (H - h_c) \quad (B.1)$$

Les dimensions de la cavité sont connues ($L = 358$ mm, $w = 114$ mm et $H = 3,175$ mm). Il reste donc à trouver l'épaisseur du renfort compacté h_c , qui est fonction du taux volumique de fibres final désiré V_{fc} .

L'équation (C.4) détermine la fraction de fibres finale V_{fc} du renfort par le principe du conservation de volume de fluide, pour un remplissage initial d'une moitié de la cavité du moule :

$$V_{fc} = 2 \cdot \frac{\rho_s n}{\rho_v H + \rho_s n} \quad (B.2)$$

À l'aide de l'équation (1.8), on calcule l'épaisseur uniforme du renfort compacté h_c à la fin de la fabrication :

$$h_c = \frac{\rho_s n}{\rho_v V_{fc}} \quad (B.3)$$

Selon le nombre de couches n du renfort OCF-8610, la fraction volumique de fibres finale V_{fc} , l'épaisseur finale du renfort h_c et le volume total dans la chambre de

compaction V_{cc} sont donnés au Tableau B.1 pour une masse surfacique du renfort de $\rho_s = 0,45 \text{ kg/m}^2$ et une masse volumique du verre de $\rho_v = 2540 \text{ kg/m}^3$.

Tableau B.1 Taux de fibres final V_{fc} , épaisseur finale h_c du renfort OCF-8610 et volume final V_{cc} dans la chambre de compaction selon le nombre de couches n pour une cavité de moule d'épaisseur $h_0 = 3,175 \text{ mm}$ et un remplissage initial de la moitié de la cavité

n	V_{fc}	h_c	V_{cc}
1	10,6%	1,68 mm	0,000061 m ³
2	20,1%	1,76 mm	0,000058 m ³
3	28,7%	1,85 mm	0,000054 m ³
4	36,5%	1,94 mm	0,000050 m ³

Calcul de l'erreur du débitmètre

Selon le fabricant Endress & Hauser, l'erreur de mesure pour le débitmètre 83F15 est fonction du débit massique au point zéro de stabilité (« *zero point stability* »), qui est donné par le fabricant ($D_z = 0,325 \text{ kg/h}$), et du débit massique du fluide D_m . L'erreur relative de mesure du débitmètre en pourcentage est calculée par l'équation suivante :

$$e = 0,1 + \frac{D_z}{D_m} \cdot 100 \quad (\text{B.4})$$

Dans le calcul de l'erreur on suppose que la chambre de compaction se remplit à débit constant. Le débit massique du fluide est donc obtenu par la relation suivante pour un temps de remplissage t de la chambre de compaction :

$$D_m = D_v \cdot \rho_f = \frac{V_{cc}}{t} \cdot \rho_f \quad (\text{B.5})$$

À débit constant, le débit volumique D_v est le rapport du volume total du fluide dans la chambre de compaction V_{cc} sur le temps de remplissage t de ce fluide à l'étape de compaction. Selon le fabricant de l'huile de silicone (Dow Corning, MI), la densité du fluide de compaction est $\rho_f = 969 \text{ kg/m}^3$. Pour un remplissage de résine pendant l'étape d'injection de la moitié de la cavité et en supposant un débit constant du fluide de compaction, la Figure B.1 illustre l'erreur de mesure du débitmètre 83F15 par rapport au temps de remplissage du fluide de compaction.

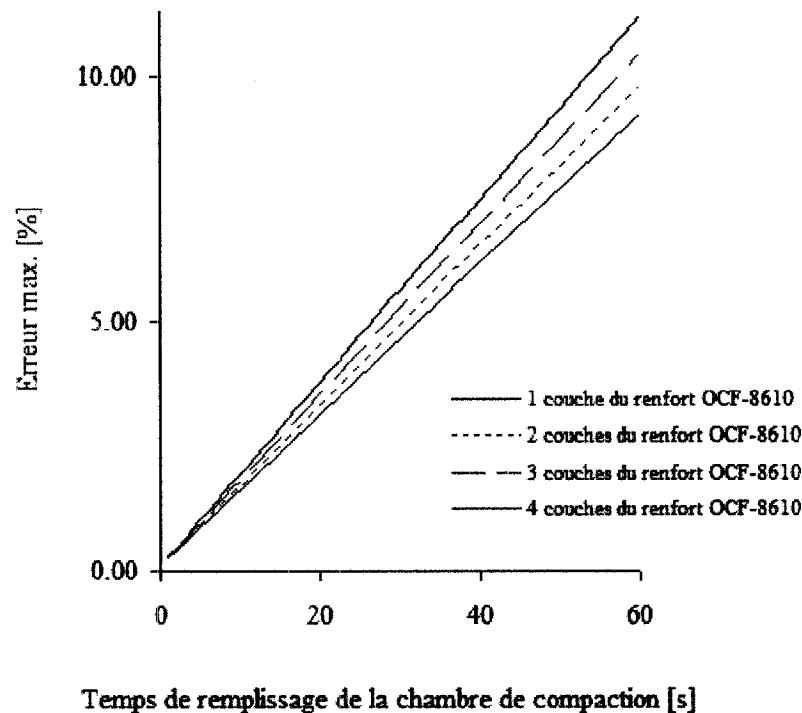


Figure B.1 Erreur de mesure du débitmètre par rapport au temps de remplissage de la chambre de compaction après l'injection de résine jusqu'à la moitié de la cavité

On a remarqué dans les expériences que le temps de remplissage de la chambre de compaction ne dépasse pas 60 s, ce qui résulte en une erreur maximale du débitmètre d'environ 10 %.

Annexe C : Calcul de la compaction d'une plaque composite fabriqué par le procédé Polyflex

À l'étape 1 d'injection, le volume nécessaire de résine V_{r1} est injecté dans le moule. En supposant que la moitié de la cavité du moule est remplie, V_{r1} s'obtient par la relation suivante :

$$V_{r1} = \frac{1}{2} L \cdot w \cdot H (1 - Vf_0) \quad (C.1)$$

où L , w et H correspondent à la longueur, la largeur et l'épaisseur de la cavité du moule et Vf_0 représente la fraction de fibres initiale du renfort. Tout de suite après la fermeture du port d'injection, l'étape 2 de compaction commence et le fluide de compaction est injecté sous pression dans la chambre de compaction, sur le film de séparation. En considérant que la pression du fluide de compaction P_f est constante au moment où la résine finit d'imprégner le renfort, le volume de résine V_{r2} final devient :

$$V_{r2} = L \cdot w \cdot h_c (1 - Vf_c) \quad (C.2)$$

où h_c correspond à l'épaisseur du composite compacté et Vf_c est la fraction volumique de fibres finale. Par conservation de volume, on peut déduire que $V_{r1} = V_{r2}$. La fraction de fibres Vf_c peut être déterminée par l'équation (1.8) :

$$Vf_c = \frac{\rho_s}{\rho_v} \frac{n}{h_c} \quad (C.3)$$

La masse surfacique ρ_s du renfort OCF-8610 est $\rho_s = 0,45$ [kg/m²] tandis que la masse volumique ρ_v du verre est $\rho_v = 2540$ [kg/m³]. La lettre n correspond au nombre de couches du renfort. À l'aide des relations (C.1), (C.2) et (C.3) on obtient la fraction de fibres Vf_c maximale en fonction de l'épaisseur H et des caractéristiques du renfort :

$$Vf_c = 2 \cdot \frac{\rho_s n}{\rho_v H + \rho_s n} \quad (C.4)$$

La valeur de Vf_c obtenue par l'équation (C.4) correspond à la fraction de fibres maximale obtenue par le procédé Polyflex pour un remplissage de résine jusqu'à la

moitié de la cavité du moule. On peut généraliser l'équation (C.4) pour obtenir la fraction de fibres V_{fc} finale pour un remplissage quelconque :

$$V_{fc} = \frac{l}{L_r / L} \cdot \frac{\rho_s n}{\rho_v H + \rho_s n} \quad (\text{C.5})$$

où L_r correspond à la position finale du front de résine injectée à partir du port d'entrée et L représente la longueur de la cavité du moule. À titre d'exemple, $L_r / L = 0,5$ signifie que la résine est injectée sur la moitié de la longueur du moule.

À l'aide du modèle de compaction d'un renfort de l'équation (1.6), on obtient la pression $P_{c \max}$ nécessaire pour que le fluide de compaction compacte le renfort jusqu'à la fraction de fibres V_{fc} :

$$P_{c \max} = \left[\frac{V_{fc}}{A} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (\text{C.6})$$

Les coefficients $A = 0,002 \text{ Pa}^{-1}$ et $B = 0,4$ du modèle de compaction ont été obtenus au laboratoire de l'École Polytechnique [32].

L'épaisseur finale h_c du composite est facilement obtenue à l'aide de la relation (C.3) :

$$h_c = \frac{\rho_s n}{\rho_v V_{fc}} \quad (\text{C.7})$$

Annexe D : Calcul du couple de serrage des boulons

Préchargement

Le préchargement se réalise de façon à joindre les membrures afin de partager avec les boulons la charge due à la pression du moule. Un préserrage adéquat diminue la charge en fatigue, empêche le boulon de se desserrer et évite que les membrures se séparent. Dans la pratique, la précharge F_i minimale devrait être égale à 85 % de la charge éprouvée $S_p A_t$ où S_p est la limite d'élasticité et A_t la surface de traction du boulon. Dans ce cas, la contrainte de torsion devient nulle après le serrage.

Couple de serrage

Le couple de serrage appliqué au boulon sert à vaincre le frottement – entre la tête du boulon et la membrure, et entre les filets et l'écrou – en induisant une force de traction. L'expression simplifiée du couple de serrage, proportionnel à la force initiale F_i dans le boulon et au diamètre nominal du boulon d_b , peut s'écrire comme suit :

$$T = 0.20 F_i d_b \quad (\text{D.1})$$

Joints avec une garniture

D'après le code ASME, l'étanchéité est assurée en suivant deux conditions :

- 1) La force de serrage doit suffire pour induire une compression y sur la surface d'écrasement effective de la garniture A_e ; y étant la pression minimale pour obtenir un fluage sur la garniture qui permettra de la joindre aux membrures.
- 2) La pression P_g appliquée sur la surface de contact, de largeur $2b$, doit être m fois la pression interne P_a : $P_g = m P_a$.

Selon le code ASME, une garniture en caoutchouc de dureté Shore A < 75, comme c'est le cas du joint d'étanchéité de néoprène choisi, possède les valeurs de m et y de 0.5 et 0 Mpa respectivement. La surface d'écrasement effective de la garniture A_e est donc définie par la longueur du joint d'étanchéité intérieur (1043 mm) et la largeur d'écrasement effectif b (estimée à 0,7 mm) :

$$\begin{aligned} A_e &= 1043 \text{ mm} \cdot 0,7 \text{ mm} \\ A_e &= 730 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (\text{D.2})$$

La surface effective de la garniture A_g est donnée par

$$\begin{aligned} A_g &= \text{Longueur du joint} \cdot 2b \\ A_g &= 1460 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (\text{D.3})$$

La surface réelle de réactions sur le joint intérieur du moule A_r est obtenue par la surface sur laquelle la pression interne est appliquée, soit la surface de la plaque du moule qui comprend le joint d'étanchéité intérieur :

$$A_r = 389 \cdot 139 = 54071 \text{ mm}^2 \quad (\text{D.4})$$

La force initiale de serrage F_i doit satisfaire les deux conditions d'étanchéité décrites ci-haut. F_i est donc déterminé par la valeur la plus grande des expressions (D.5) et (D.6) développées ci-dessous qui représentent ces conditions :

$$n_b = \text{nombre de boulons} \quad F_i' = A_e \cdot y \quad (D.5)$$

$$k_b = \text{rigidité des boulons} \quad P_g = m P_a = \frac{F_{g2}}{A_g} \text{ et } F_{g2} = F_i - \frac{k_g}{k_g + n_b k_b} F_a$$

$$k_g = \text{rigidité de la garniture} \quad m A_g P_a = F_i - (1 - C) P_a A_r$$

A_b = surface de la section des boulons

$$L_b = \text{épaisseur totale des membrures} \quad F_i'' = P_a [A_g m + A_r (1 - C)] \quad (D.6)$$

où

$$E_b = \text{module d'Young des boulons} \quad C = \frac{n_b k_b}{k_g + n_b k_b} \text{ et } k_b = \frac{A_b E_b}{L_b} ; k_g = \frac{A_g E_g}{t} \quad (D.7)$$

E_g = module d'Young de la garniture

Il est à noter que, d'après le code ASME, la valeur du coefficient de rigidité C est nulle pour le calcul de la force initiale F_i'' selon la deuxième condition d'étanchéité, soit l'expression (D.6). Cette approximation rend la force initiale de serrage plus élevée. Cependant, ce coefficient doit être connu afin de vérifier la force maximale dans chaque boulon étant donnée une pression P_a interne. La force résultante du boulon F_{b2} est fonction de la charge initiale F_i , de la force axiale F_a induite par pression interne et du coefficient de rigidité C :

$$F_{b2} = F_i + C \cdot F_a \quad (D.8)$$

Données des boulons

Une analyse est réalisée avec 12 boulons bas de gamme à filet 3/8-16 UNC Grade 1 dont les caractéristiques sont montrées au Tableau D.1.

Tableau D.1 Caractéristiques des boulons 3/8-16 UNC Grade 1

d_b : Diamètre nominal	9,525 mm
A_t : Surface de tension	50 mm ²
E_b : Module d'élasticité	207 GPa
A_b : Surface de la section du boulon	71,26 mm ²
L_b : Longueur de vis en tension	79,4 mm
S_p : Limite d'élasticité (proof strength)	248,2 MPa
S_u : Résistance ultime en traction	413,7 MPa
n_b : nombre de boulons	12

Analyse des forces

1) Force axiale induite par la pression interne

$$F_a = A_r \cdot P_a = 54071 \text{ mm}^2 \cdot 6 \text{ bars}$$

$$F_a = 32,4 \text{ KN}$$

2) Coefficient de rigidité du joint C

En substituant les valeurs de l'équation (D.7), et en posant une épaisseur de joint d'étanchéité égal à $2t$ car il y a deux joints d'étanchéité intérieurs à travers le moule, on obtient :

$$k_b = \frac{0.1104 \text{ po}^2 \cdot 30E6 \text{ lb / po}^2}{3.758 \text{ po}}$$

$$k_b = 878 \text{ 049 lb / po}$$

$$k_g = \frac{A_g E_g}{2t}$$

$$k_g = \frac{2.31 \text{ po}^2 \cdot 10E3 \text{ lb / po}^2}{2 \cdot 0.104 \text{ po}}$$

$$k_g = 111 \text{ 021 lb / po}$$

$$C = \frac{12 \cdot 878 \text{ 049}}{111 \text{ 021} + 12 \cdot 878 \text{ 049}} = 0.99$$

3) Force initiale résultante pour obtenir l'étanchéité

$$\begin{aligned}
 F_i' &= A_e \cdot y & F_i'' &= P_a [A_g \cdot m + A_r (1 - C)] ; \text{ posons } C = 0 \\
 F_i' &= 730 \text{ mm}^2 \cdot 0 & F_i'' &= 0,6 \text{ MPa} [1460 \text{ mm}^2 \cdot 0,5 + 54071 \text{ mm}^2] \\
 F_i' &= 0 & F_i'' &= 32,9 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

Le choix évident pour la charge initiale de serrage est $F_i = 32,9 \text{ KN}$.

4) Force initiale dans chaque boulon et couple de serrage

$$\begin{aligned}
 (F_i)_{\text{boulon}} &= \frac{32,9 \text{ KN}}{12} = 2,7 \text{ KN} \\
 T &= 0,20 \cdot (F_i)_{\text{boulon}} \cdot d_b \\
 T &= 0,20 \cdot 2,7 \text{ KN} \cdot 9,525 \text{ mm} = 5 \text{ N m}
 \end{aligned}$$

5) Force résultante dans chaque boulon à la pression interne

$$\begin{aligned}
 F_{b2} &= F_i + C \cdot F_a \\
 F_{b2} &= 32,9 + 0,99 \cdot 32,4 = 65 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

La force maximale dans chaque boulon étant de $\frac{65 \text{ KN}}{12} = 5,4 \text{ KN}$.

6) Vérification

Les forces correspondant à la limite d'élasticité et à la résistance ultime en traction du boulon sont $Sp_{At} = 12,4 \text{ KN}$ et $Su_{At} = 20,7 \text{ KN}$ respectivement. Ainsi, au moment du serrage initial, chaque boulon serait chargé à $2,7 / 12,4 = 21 \%$ de sa limite élastique. Lors de l'application de la pression interne $P_a = 6 \text{ bars}$, chaque boulon serait chargé à $5,4 / 20,7 = 26 \%$ de sa résistance ultime en traction, c'est-à-dire, 12 boulons supportent largement la pression interne du moule.

7) Conclusion

Douze (12) boulons à filet 3/8-16 UNC Grade 1 supportent amplement la pression interne de 6 bars dans le moule. Pour que chaque boulon puisse supporter au moins 85% de la charge $Sp\ At$, soit $(F_i)_{\text{boulon}} > 12,4 \times 0,85 = 10,54 \text{ KN}$, pour le preserrage, le couple de torsion doit augmenter si on décide d'utiliser 12 boulons. Pour une charge initial sur chaque boulon $(F_i)_{\text{boulon}} = 10,54 \text{ KN}$, le couple de serrage doit donc être le suivant :

$$T = 0,20 \cdot (F_i)_{\text{boulon}} \cdot d_b \quad (\text{D.9})$$

$$T = 0,20 \cdot 10,54 \text{ KN} \cdot 9,525 \text{ mm} = 20 \text{ N m}$$

Ceci se traduit par une charge de 63% sur la limite d'élasticité de chaque boulon ($Su\ At = 20,7 \text{ KN}$) pour une pression interne de 6 bars.