

Titre: Caractérisation combinée de la perméabilité et de la compaction des renforts fibreux dans les procédés de fabrication des composites par infusion
Title:

Auteur: Bruno Croteau-Labouly
Author:

Date: 2007

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Croteau-Labouly, B. (2007). Caractérisation combinée de la perméabilité et de la compaction des renforts fibreux dans les procédés de fabrication des composites par infusion [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8075/>
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8075/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: François Trochu
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CARACTÉRISATION COMBINÉE
DE LA PERMÉABILITÉ ET DE LA COMPACTION
DES RENFORTS FIBREUX DANS LES PROCÉDÉS
DE FABRICATION DES COMPOSITES PAR INFUSION

BRUNO CROTEAU-LABOULY
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

ISBN: 978-0-494-36905-0

Our file *Notre référence*

ISBN: 978-0-494-36905-0

NOTICE:

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

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

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

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

AVIS:

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

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

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

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

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

CARACTÉRISATION COMBINÉE
DE LA PERMÉABILITÉ ET DE LA COMPACTION
DES RENFORTS FIBREUX DANS LES PROCÉDÉS
DE FABRICATION DES COMPOSITES PAR INFUSION

présenté par: CROTEAU-LABOULY Bruno

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

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

M. RUIZ Eduardo Antonio Julian, Ph.D., président

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

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., membre

DÉDICACE

à mes parents et amis, Fabienne et Alexandre...

REMERCIEMENTS

Cette étude a été effectuée au sein de la Chaire de Recherche sur les Composites à Haute Performance de l'École Polytechnique de Montréal. L'auteur tient à remercier tous les membres qui ont collaboré à la réalisation de ce travail.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma reconnaissance à François Trochu pour m'avoir donné l'opportunité d'évoluer dans un laboratoire de recherche avancée en matériaux composites. Je tiens aussi à le remercier pour sa patience et sa confiance qui m'ont grandement aidé à terminer cet ouvrage.

Je tiens également à remercier mes nombreux collègues de la chaire de recherche pour leur appui et leurs judicieux conseils. Plus particulièrement, je voudrais remercier Vincent Achim qui fut d'une aide cruciale d'un bout à l'autre du projet et surtout dans le volet final de simulation numérique. Je remercie aussi Jean-François Désilets pour la mise en œuvre des plans d'expérience, Philippe Causse et Sofiane Soukane pour leur soutien scientifique constructif, sans oublier Fanny, Isabelle, François, JS, Monpita et Marc-André pour leur support.

Mes remerciements vont également au Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada et au Fonds Québécois de Recherche sur la Nature et les Technologies pour leur appui financier.

Enfin, mes remerciements vont aussi à l'endroit de M. Eduardo Ruiz et M. Marek Balazinski pour avoir accepté d'être membres de mon jury.

RÉSUMÉ

La fabrication de composites par infusion consiste à faire le vide dans la cavité d'un moule composé d'une paroi rigide recouverte par un film plastique étanche. Une résine polymère liquide est infusée par gravité à travers le renfort fibreux sous l'effet du vide appliqué. Ce procédé connaît actuellement un essor grandissant dans l'industrie des composites, puisqu'il permet la fabrication de pièces de grande taille à faible coût. La simulation numérique du procédé offre la possibilité de réduire le temps de développement des pièces. Les paramètres matériau utilisés dans les logiciels de simulation doivent être évalués expérimentalement. Lors d'une infusion, la flexibilité de la membrane permet une expansion du renfort fibreux, ce qui augmente son épaisseur. La perméabilité dépend du taux volumique de fibres et n'est pas un paramètre constant dans le temps dans les procédés d'infusion. La méthodologie actuelle de caractérisation de la perméabilité et de la compaction des renforts en moule rigide requiert de nombreuses expériences différentes et n'est pas adaptée puisque les conditions expérimentales ne sont pas identiques à celles du procédé d'infusion. Dans ce mémoire, une nouvelle méthodologie est proposée pour obtenir en un seul essai les courbes d'expansion et de perméabilité d'un renfort pour différents taux volumiques de fibres. Un nouveau banc d'essai expérimental de caractérisation a été développé qui permet une caractérisation couplée de la perméabilité et de l'expansion du renfort. Ces paramètres sont ensuite utilisés dans le module d'infusion du logiciel PAM-RTM. En application, une étude numérique a été menée sur le carénage de la voiture solaire de l'École Polytechnique de Montréal, qui a permis d'établir une stratégie d'infusion efficace. Les résultats numériques de l'infusion de cette pièce complexe sont étudiés et comparés avec l'infusion réelle de la pièce afin de compléter la validation du logiciel.

ABSTRACT

The manufacturing of composite parts by resin infusion consists of applying vacuum inside the cavity of a mold composed of a rigid plate sealed with a flexible membrane. A liquid polymer is infused by gravity through a fibrous reinforcement as a result of the applied vacuum. The use of this process has greatly increased since it enables the manufacturing of large parts at relatively low cost. The numerical simulation of the process reduces the conceptual time required to set-up the fabrication process. The physical parameters of the materials used in the simulation software must be evaluated experimentally. During an infusion, the flexibility of the membrane enables an expansion of the fibrous reinforcement, thus a gain in thickness. The permeability depends on the fiber volume fraction and is not a constant parameter in time for the infusion processes. The actual methodology for the characterisation of permeability and compaction of fibrous reinforcements in rigid molds requires many different experiments. Moreover, this methodology is not adapted to the true operating conditions of resin infusion. In this work, a new methodology is proposed in order to obtain during a single experiment the expansion and permeability of a fibrous reinforcement for different fiber volume fractions. A new experimental test bench has been developed that enables a combined characterisation of permeability and expansion of the fibrous reinforcement. These parameters are then used in the infusion module of PAM-RTM to validate resin infusion in a part of variable thickness. Finally, a study was conducted on the fairings of the solar car of École Polytechnique de Montréal, in which it was shown that a numerical simulation can help to determine an effective infusion strategy. The numerical results of the infusion of this complex part are then studied and compared with a real infusion to complete the validation of the numerical software.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	IV
REMERCIEMENTS.....	V
RÉSUMÉ	VI
ABSTRACT.....	VII
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES ANNEXES	XIX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Matrices.....	1
1.1.1 Thermoplastiques	2
1.1.2 ThermoDurcissables	3
1.2 Renforts.....	3
1.3 Procédés de fabrication	4
1.3.1 Moulage par transfert de résine.....	5
1.3.2 Moulage par infusion de résine.....	6
1.4 Motivations, problématique et objectifs	12
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	16
2.1 Compaction	16
2.1.1 L'approche de la théorie des poutres	17
2.1.2 L'approche viscoélastique	20
2.1.3 L'approche mécanique des sols	22

2.2	Loi de Darcy	23
2.3	Perméabilité	26
2.4	Modélisation de l'infusion	28
2.4.1	Perméabilité en infusion	30
CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT D'UN BANC D'ESSAI EXPÉRIMENTAL.....		33
3.1	Présentation du banc d'essai expérimental	33
3.2	Sélection d'un moule	35
3.3	Sélection d'un renfort	36
3.3.1	Mesure de perméabilité.....	37
3.3.2	Évaluation de la densité du renfort d'acrylique	39
3.4	Sélection d'un fluide	40
3.4.1	Évaluation de la viscosité du fluide	41
3.4.2	Influence de la pigmentation.....	43
3.4.3	Considérations pratiques.....	44
3.5	Système d'acquisition de données	46
3.5.1	Mesures d'épaisseur.....	46
3.5.2	Mesures de pression.....	50
3.5.3	Mesures de la masse.....	53
3.5.4	Bouton pressoir	54
3.6	Méthode d'évaluation de la compaction et de la perméabilité d'un milieu poreux compressible lors d'une infusion	55
3.6.1	Cycles de compression à sec.....	56
3.6.2	Infusion de l'échantillon	57
3.6.3	Perméabilité en régime permanent.....	58

CHAPITRE 4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA COMPACTION CYCLIQUE DES RENFORTS FIBREUX	59
4.1 Cycles de compaction des renforts fibreux.....	61
4.1.1 Expansion d'un renfort mouillé	64
4.2 Plan d'expériences	66
4.3 Résultats.....	67
4.4 Expansion d'un milieu poreux sous membrane flexible.....	72
4.4.1 Vérification de l'expansion en régime permanent	77
4.5 Comparaison des modèles d'expansion.....	80
4.6 Conclusion	81
CHAPITRE 5 IDENTIFICATION EXPÉRIMENTALE DE LA PERMÉABILITÉ DANS LE PROCÉDÉ D'INFUSION SOUS MEMBRANE FLEXIBLE	83
5.1 Évaluation de la vitesse du fluide	85
5.2 Distribution de la pression de vide à l'intérieur d'un moule à paroi flexible unidirectionnel	86
5.3 Évaluation de la perméabilité lors d'une infusion	89
5.4 Plan d'expériences	91
5.5 Résultats.....	91
5.6 Analyse	92
5.6.1 Perméabilité à différentes pressions d'infusion	95
5.7 Conclusion	102

CHAPITRE 6 SIMULATION D'INFUSION ET APPLICATION RÉELLE	103
6.1 Logiciel de simulation.....	103
6.2 Infusion unidirectionnelle d'un échantillon rectangulaire	104
6.2.1 Implémentation des paramètres expérimentaux.....	105
6.2.2 Résultats.....	106
6.3 Infusion unidirectionnelle d'un échantillon comportant deux zones d'épaisseurs différentes	110
6.3.1 Résultats.....	112
6.4 Infusion d'une pièce à géométrie complexe	115
6.4.1 Implémentation des paramètres expérimentaux pour la simulation de l'infusion	116
6.4.2 Étude des stratégies d'infusion	117
6.4.3 Infusion du carénage	121
6.5 Conclusion	125
CONCLUSION.....	126
RÉFÉRENCES	129
ANNEXES.....	135

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des thermoplastiques.....	2
Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des thermodurcissables	3
Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients des principaux renforts.....	4
Tableau 1.4 : Liste du matériel d'infusion	11
Tableau 3.1 : Perméabilité du mat d'acrylique mesurée en moule unidirectionnel rigide	38
Tableau 3.2 : Masses volumiques moyennes d'échantillons d'acrylique	40
Tableau 3.3 : Paramètres mesurés par le système d'acquisition de données	46
Tableau 3.4 : Paramètres des capteurs LVDT	47
Tableau 3.5 : Coefficients de calibration des capteurs LVDT	49
Tableau 4.1 : Paramètres expérimentaux de la compaction sous parois rigides	67
Tableau 4.2 : Taux volumique de fibres maximal atteint à -70KPa pour 18 échantillons	71
Tableau 5.1 : Perméabilités calculées à différents taux de fibres	90
Tableau 5.2 : Paramètres du plan d'expériences en infusion.....	91
Tableau 5.3 : Résultats d'infusions d'acrylique à pression variable.....	91
Tableau 5.4 : Calcul de la perméabilité en infusion en régime permanent à 70 kPa.....	93
Tableau 5.5 : Calcul de la perméabilité en infusion en régime permanent à 50 kPa.....	93
Tableau 5.6 : Calcul de la perméabilité en infusion en régime permanent à 30 kPa.....	93
Tableau 5.7 : Perméabilités de l'acrylique calculées à $V_f = 13\%$	99
Tableau 6.1 : Paramètres du module VARI du logiciel PAM-RTM	104
Tableau 6.2 : Paramètres de la simulation numérique de l'infusion de l'échantillon 70h d'acrylique 100 x 440 mm	106
Tableau 6.3 : Paramètres de la simulation numérique d'infusion à deux zones d'épaisseurs différentes.....	111
Tableau 6.4 : Paramètres de la simulation numérique d'infusion dans le banc d'essai expérimental.....	117
Tableau 6.5 : Temps de passage du front d'imprégnation.....	124

Tableau A.1 : Hauteurs de cavité disponibles.....	143
Tableau A.2 : Exemples de valeurs de perméabilité.....	146
Tableau A.3 : Résultats d'une mesure de perméabilité pour le renfort d'acrylique	150
Tableau B.1 : Exemple de données recueillies lors d'un essai	165

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Étapes du moulage par transfert de résine.....	6
Figure 1.2 : Représentation schématique de l'infusion.....	7
Figure 1.3 : Étapes de l'infusion de résine.....	7
Figure 2.1 : Régimes de déformation sous pression des renforts tissés.....	19
Figure 2.2 : Évolution de la force de fermeture du moule dans les procédés RTM [14]..	21
Figure 2.3 : Gradient de pression pour une injection unidirectionnelle.....	25
Figure 2.4 : Déformation du renfort lors d'une infusion.	28
Figure 2.5 : Représentation du volume de contrôle pour l'infusion.	29
Figure 3.1 : Banc d'essai expérimental pour la caractérisation de l'infusion.....	33
Figure 3.2 : Diagramme schématique du banc d'essai expérimental d'infusion.....	34
Figure 3.3 : Photo du banc d'essai expérimental d'infusion.....	35
Figure 3.4 : Position des capteurs de pression et des lignes d'alimentation du moule de caractérisation de l'infusion.....	36
Figure 3.5 : Mesure de la masse d'échantillons dans l'air et dans l'eau distillée.	39
Figure 3.6 : Mesure de la viscosité dans un rhéomètre.....	41
Figure 3.7 : Chute de la viscosité de l'huile de silicone 0.1 Pa·s.	42
Figure 3.8 : Calculs de viscosité pour différents taux de cisaillement.....	43
Figure 3.9 : Viscosité de différents lots d'huile de silicone : (A) avec pigmentation; (B) sans pigmentation.....	44
Figure 3.10 : Tests de viscosité de l'huile silicone du lot AA116720.....	45
Figure 3.11 : Coupe longitudinale d'un capteur LVDT.	47
Figure 3.12 : Correction de l'imprécision des capteurs LVDT.	48
Figure 3.13 : Précision des capteurs LVDT lors de mesures d'épaisseurs de cales calibrées de 3, 5 et 8 mm.	50
Figure 3.14 : Représentation de l'acquisition de pression.	51
Figure 3.15 : Avancement du front d'imprégnation lors d'une infusion.	57

Figure 4.1 : Compaction d'un renfort exprimée en termes de taux volumique de fibres et d'épaisseur.	59
Figure 4.2 : Banc d'essai de compaction sous parois rigides.	60
Figure 4.3 : Cycles de compaction à 30 kPa d'un renfort fibreux.	62
Figure 4.4 : Cycle de compaction et expansion de l'acrylique à différentes pressions.	63
Figure 4.5 : Compaction d'un renfort d'acrylique mouillé.	65
Figure 4.6 : Courbe moyenne des neuf essais effectués pour un cycle de compaction à 70 kPa de pression de vide maximale.	65
Figure 4.7 : Expansion de 9 échantillons d'acrylique secs à partir de 30 kPa.	68
Figure 4.8 : Expansion de 9 échantillons d'acrylique mouillés à partir de 30 kPa.	68
Figure 4.9 : Expansion de 9 échantillons d'acrylique secs à partir de 50 kPa.	69
Figure 4.10 : Expansion de 9 échantillons d'acrylique mouillés à partir de 50 kPa.	69
Figure 4.11 : Expansion de 9 échantillons d'acrylique secs à partir de 70 kPa.	70
Figure 4.12 : Expansion de 9 échantillons d'acrylique mouillés à partir de 70 kPa.	70
Figure 4.13 : Comparaison du cycle de compaction du renfort d'acrylique sec et mouillé.	72
Figure 4.14 : Évolution du champ de pression lors d'une infusion unidirectionnelle.	73
Figure 4.15 : Comportement en expansion initial de l'acrylique.	74
Figure 4.16 : Mesures de la variation d'épaisseur pour 3 capteurs LVDT.	76
Figure 4.17 : Effet de correction de l'épaisseur initiale de l'acrylique sur le comportement en expansion.	77
Figure 4.18 : Comparaison de l'expansion de l'acrylique en régime permanent et du modèle corrigé obtenu en régime transitoire.	78
Figure 4.19 : Modèle d'expansion du renfort d'acrylique lors d'une infusion.	79
Figure 4.20 : Comparaison du cycle de compaction du renfort d'acrylique mouillé dans deux bancs d'essais : plaques rigides et infusion.	80
Figure 5.1 : Vérification du système permanent et obtention du débit.	85
Figure 5.2 : Distribution de pression de vide à l'intérieur d'un moule à paroi déformable en régime permanent.	87

Figure 5.3 : Répartition de la pression et de l'épaisseur du renfort d'acrylique en régime permanent à 70 kPa de pression de vide.....	88
Figure 5.4 : Perméabilité de l'acrylique en régime permanent pour une infusion réalisée avec une pression de vide de -70 KPa.....	90
Figure 5.5 : Perméabilités de l'échantillon d'acrylique AK70h à 30, 50 et 70 kPa de pression de vide en régime permanent.....	94
Figure 5.6 : Perméabilité de l'acrylique mesurée en régime permanent pour une infusion à 30 kPa.....	95
Figure 5.7 : Perméabilité de l'acrylique mesurée en régime permanent pour une infusion à 50 kPa.....	96
Figure 5.8 : Perméabilité de l'acrylique mesurée en régime permanent pour une infusion à 70 kPa.....	96
Figure 5.9 : Perméabilité de l'acrylique à différentes pressions d'infusion.....	97
Figures 5.10 : Perméabilité calculée en régime permanent pour le renfort d'acrylique pour des infusions à 70 kPa de vide.....	98
Figure 5.11 : Perméabilité moyenne de l'acrylique en infusion.....	99
Figure 5.12 : Comparaison des perméabilités de l'acrylique obtenues en infusion et en moule rigide.....	100
Figure 6.1 : Maillage de l'échantillon du banc d'essai d'infusion.....	105
Figure 6.2 : Comparaison des chutes de pression dans le modèle numérique et expérimental.....	107
Figure 6.3 : Comparaison de l'expansion du renfort avec les 3 capteurs LVDT.....	108
Figure 6.4 : Temps de remplissage de l'échantillon numérique d'acrylique.....	109
Figure 6.5 : Comparaison de l'évolution du front d'imprégnation expérimental et numérique.....	110
Figure 6.6 : Maillage de l'échantillon à deux épaisseurs.....	111
Figure 6.7 : Comparaison de l'évolution des fronts d'imprégnation expérimentaux et numériques d'un échantillon à deux épaisseurs.....	112

Figure 6.8 : Comparaison des chutes de pression numériques et expérimentales pour l'échantillon à deux sections.....	113
Figure 6.9 : Comparaison de l'expansion du renfort à deux sections.....	114
Figure 6.10 : Esteban IV, voiture solaire de l'École Polytechnique de Montréal.	115
Figure 6.11 : Maillage du carénage.....	116
Figure 6.12 : Simulation de l'infusion du carénage par point d'injection central.	118
Figure 6.13 : Simulation de l'infusion du carénage par ligne d'injection centrale.....	119
Figure 6.14 : Mauvais emplacement de l'évent qui cause une zone sèche.....	120
Figure 6.15 : Déplacement de l'évent au milieu de la zone sèche.....	121
Figure 6.16 : Simulation de l'infusion périphérique du carénage.....	121
Figure 6.17 Comparaison de l'infusion et de la simulation du carénage.....	123
Figure 6.18 : Comparaison des temps d'imprégnation lors de l'infusion expérimentale et numérique du carénage.	124
Figure A.1 : Représentation du moule de perméabilité 1D.	135
Figure A.2 : Banc d'essai de perméabilité 1D.	136
Figure A.3 : Observation du front d'imprégnation.	137
Figure A.4 : Pot à pression.....	138
Figure A.5 : Découpe des fibres.	139
Figure A.6 : Manipulation de la plaque de verre.	140
Figure A.7 : Application d'un joint de mastic.	140
Figure A.8 : Bloc de serrage.	141
Figure A.9 : Épaisseur des différentes cales métalliques.....	144
Figure A.10 : Pression d'injection de l'huile de silicone.....	151
Figure A.11 : Progression du front d'imprégnation.	151
Figure A.12 : Vitesse du front d'imprégnation.....	152
Figure A.13 : Perméabilité du renfort fibreux à $V_f = 22\%$	152
Figure B.1 : Banc d'essai pour caractériser la perméabilité en infusion.	153
Figure B.2 : Moule de mesure de la perméabilité en infusion.	154
Figure B.3: Pot de vide.	155

Figure B.4: Valve de vide et capteur de pression.	155
Figure B.5: Interface du logiciel d'acquisition.	156
Figure B.6: Chevauchement des joints d'étanchéité.	158
Figure B.7: Méthode des deux angles de 45 degrés.....	158
Figure B.8: Exemple de front d'écoulement inadéquat pour les mesures.....	159
Figure B.9: Écoulement préférentiel sur les bords de la fibre.	160
Figure B.10: Application de la membrane sur les fibres et le joint d'étanchéité.	161
Figure B.11: Technique utilisée pour effectuer un pli dans la membrane.	161

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Procédure d'utilisation du moule de perméabilité 1D	135
Annexe B : Méthode expérimentale de caractérisation du procédé d'infusion de résine	153

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Les matériaux composites connaissent une utilisation grandissante dans les industries aéronautique, automobile, navale et sportive. Ils permettent une réduction de poids considérable par rapport aux autres matériaux, une bonne résistance à la corrosion et des coûts de fabrication moins élevés. Un composite se définit comme l'association d'au moins deux matériaux non miscibles, dont les qualités se combinent avec synergie. Dans le domaine des composites, ces deux matériaux sont un renfort fibreux et une matrice. Le renfort permet de supporter les charges mécaniques, tandis que la matrice distribue les charges et assure la cohésion et la protection du renfort.

Ce mémoire porte sur la caractérisation simultanée de la compaction et de la perméabilité des renforts fibreux utilisés pour fabriquer des composites par infusion de résine. Avant de décrire le problème à résoudre, on commencera par présenter des informations de base sur les composites en introduisant d'abord les matrices polymères et renforts utilisés, puis en faisant le point sur les principaux procédés de fabrication des composites.

1.1 Matrices

La matrice est le constituant principal d'un matériau composite. C'est grâce à elle que la pièce prend forme. Une pièce peut être uniquement constituée de la matrice, mais il ne s'agit plus d'un matériau composite. Les propriétés mécaniques des matrices sont trop faibles et celles-ci doivent être renforcées. La fonction de la matrice est non seulement de donner une forme à la pièce, mais aussi de transférer les contraintes mécaniques au renfort, fournir une protection contre l'environnement extérieur et protéger le renfort.

contre l'abrasion. Les matrices peuvent se présenter sous différentes formes dans un composite : polymère, métallique et céramique. La majeure partie des composites est fabriquée avec des matrices polymères : leur faible température de mise en œuvre permet l'utilisation d'équipements simples et leur faible tension de surface assure une meilleure adhérence sur les fibres et entraîne une meilleure répartition des charges mécaniques. Les matrices polymère sont divisées en deux familles : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

1.1.1 Thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des polymères caractérisés par de longues chaînes moléculaires. Leur cohésion est assurée par de faibles liaisons (Van der Waals), qui leur permettent, lorsque la température de fusion est atteinte, de se liquéfier et de prendre ainsi une autre forme. Ceci constitue le principal attrait de ce type de matrice : ils sont stockés sous forme de billes et peuvent être simplement fondus et mis en forme. Les thermoplastiques les plus courants sont le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le sulfure de polyphénylène (PPS), le polyéther-éther-ketone (PEEK) et les polyamides (PA).

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des thermoplastiques

Avantages	Inconvénients
Mise en forme propre	Viscosité élevée (imprégnation difficile du renfort)
Entreposage simple à température ambiante	
Temps de fabrication rapide	
Réparation des défauts	
Recyclable	Déformable à faible température

1.1.2 Thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des polymères qui, lors de la polymérisation, subissent une réticulation de leurs chaînes moléculaires et forment un réseau tridimensionnel indissociable. De ce fait, après polymérisation, leur forme est figée et ils ne peuvent être fondu. Les thermodurcissables les plus courants sont : le polyester, le vinyl ester, l'époxy, le polyuréthane, le phénolique et les polyimides.

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des thermodurcissables

Avantages	Inconvénients
Faible viscosité	Manipulation de constituants dangereux
Liquide à température ambiante	Entreposage limité et risqué
Polymérisation contrôlée	Non directement recyclable

1.2 Renforts

Les renforts permettent de créer des matériaux composites à haute performance dont la structure est solide et résistante. Ils supportent les charges appliquées sur les pièces. Ceci réduit les contraintes appliquées sur la matrice et améliore les propriétés mécaniques du composite. Les renforts fibreux sont généralement constitués de verre, d'aramide ou de carbone. Ils se présentent sous forme de fibres courtes, aléatoires (mats), unidirectionnelles ou tissées. Les fibres orientées confèrent des propriétés mécaniques anisotropes aux composites.

Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients des principaux renforts

	Avantages	Inconvénients
Verre	Faible coût Haute résistance chimique Excellentes propriétés isolantes Bonne adhérence fibre/résine	Faible résistance en tension Haute densité
Kevlar	Faible densité Haute résistance en tension Haute résistance aux impacts Faible conductivité thermique Faible expansion thermique Amortissement des vibrations	Coût élevé Faible résistance en compression Découpe difficile Sensible aux rayons ultra-violets Faible adhérence fibre/matrice
Carbone	Excellent module en tension Excellent résistance en tension Très faible expansion thermique Haute résistance en fatigue	Coût élevé Faible résistance aux impacts Allongement à la rupture faible Haute conductivité électrique

1.3 Procédés de fabrication

De nombreux procédés de fabrication ont été développés afin de répondre aux exigences des divers types de pièces à concevoir. Le coût unitaire, le volume de production, la taille des pièces et la complexité de la forme sont des facteurs qui permettent de sélectionner le plus adéquat parmi la multitude de procédés répertoriés par Gutowski [1]. Les différents procédés de fabrication des matériaux composites peuvent être classés en deux familles : les procédés à moule ouvert et à moule fermé.

Les méthodes de fabrication à moule ouvert permettent la fabrication de plusieurs types de pièces. Le laminage manuel («*hand lay up*»), procédé le plus commun, consiste en

l'application à la main de plis successifs imprégnés de résine sur la surface d'un moule. Le procédé se distingue par sa simplicité, mais comporte plusieurs inconvénients. Il n'est pas adapté à la production de pièces de grande série, puisque le temps de fabrication est assez long. Le faible taux de fibres et la présence de nombreuses inclusions d'air réduisent considérablement la qualité des pièces. De plus, l'exposition des ouvriers aux émanations organiques («*Volatile Organic Compound*») libérées lors de la polymérisation est nocive pour leur santé. En effet, des études ont démontré les effets néfastes du styrène [2], solvant et agent réticulateur des polyesters insaturés.

Face à ces enjeux, des méthodes de fabrication à moule fermé ont été développées. Une nouvelle problématique s'impose alors : une résine liquide doit pénétrer à l'intérieur du moule et imbiber les fibres. Ce type de mise en œuvre de matériaux composites est classé sous l'acronyme LCM («*Liquid Composite Molding*»).

1.3.1 Moulage par transfert de résine

Le procédé de moulage par transfert de résine (RTM) consiste en une injection d'une matrice polymère à travers un renfort sec placé à l'intérieur d'un moule fermé rigide. L'utilisation du procédé pour fabriquer des composites à matrice thermodurcissable est relativement récente (depuis 3 décennies), mais connaît une forte expansion. Grâce à la rapidité du procédé et à la quantité réduite de consommables, le RTM est bien adapté aux productions en faible série, soit quelques milliers de pièces par an. Ce type de procédé attire particulièrement l'industrie automobile grâce à ses basses exigences énergétiques et faibles forces de serrage [1].

Tel qu'illustré à la Figure 1.1, le procédé RTM comprend les étapes suivantes :

- a) Une préforme est découpée aux dimensions finales de la pièce, puis déposée dans la partie femelle du moule.

- b) Le moule est fermé en s'assurant de son étanchéité afin de prévenir les fuites de résine. Une résine liquide catalysée est ensuite injectée sous pression et s'écoule à travers le renfort fibreux.
- c) La résine polymérise.
- d) Le moule est ouvert et la pièce est démoulée.

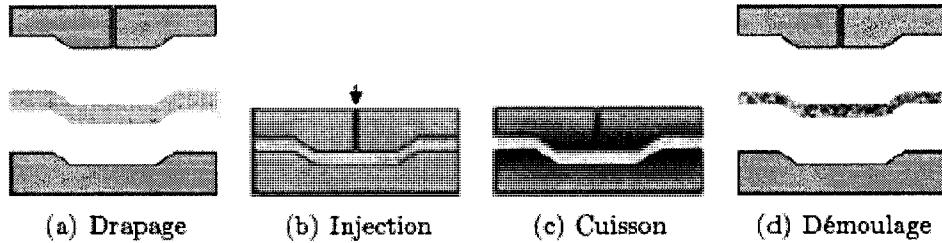


Figure 1.1 : Étapes du moulage par transfert de résine.

1.3.2 Moulage par infusion de résine

Tel qu'illustré à la Figure 1.2, les différents procédés de fabrication par infusion consistent à faire le vide dans la cavité d'un moule composé d'une paroi rigide recouverte par un film plastique étanche. Une résine polymère est infusée par gravité à travers le renfort fibreux sous l'effet du vide appliqué [3]. Les différents procédés d'infusion, aussi référencés sous les acronymes VARI (« *Vacuum Assisted Resin Infusion* »), VARTM (« *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* ») et RIFT (« *Resin Infusion under Flexible Tooling* »), ont fait l'objet d'une revue de la littérature par Williams [4].

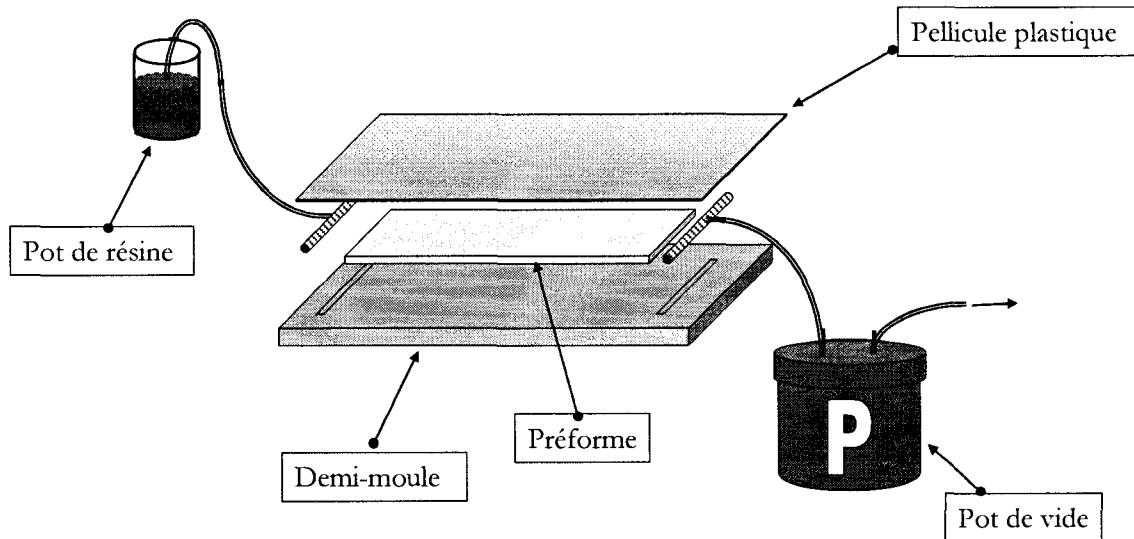


Figure 1.2 : Représentation schématique de l'infusion.

Tel qu'illustré à la Figure 1.3, le procédé d'infusion comprend les étapes suivantes :

- Une préforme est découpée aux dimensions finales de la pièce et est ensuite déposée sur le moule. Une membrane flexible, agissant comme contre moule, est déposée et scellée par-dessus.
- Le moule est fermé en actionnant une pompe à vide, ce qui retire l'air de la cavité. Une résine liquide catalysée est alors infusée à travers le renfort fibreux grâce à la différence de pression.
- La résine polymérisée.
- La membrane est retirée et la pièce est démoulée.

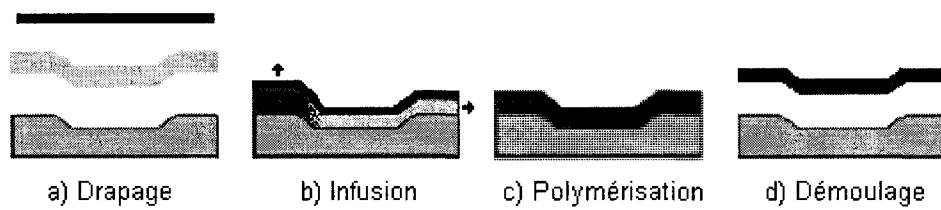


Figure 1.3 : Étapes de l'infusion de résine.

Un des premiers exemples de l'utilisation de l'infusion fut pour la construction de bateaux, procédé breveté en 1950 par Marco Chemicals Inc. [5]. En 1978 apparaît l'utilisation d'une membrane déformable par Gotch [6], qui propose aussi de faire pénétrer la résine liquide à l'intérieur du moule après sa fermeture grâce à la différence de pression. Ceci inspire Leconte [7] qui dépose un brevet sur la fabrication de coques de faible épaisseur en composites par infusion. Il permet l'intégration à même la coque d'une âme et de raidisseurs. En 1991, Seeman brevète le procédé SCRIMP («*Seemann Composites Resin Infusion Moulding Process*») [8] qui utilise un milieu de dispersion au-dessus du renfort qui permet une imprégnation plus rapide. Par la suite, d'autres techniques qui facilitent l'imprégnation du réseau fibreux en s'inspirant du SCRIMP ont été développées telles le LRI («*Liquid Resin Infusion*») et le FASTRAC («*Fast Remotely Accurate Channeling*»).

Avantages des procédés d'infusion

- L'exposition des opérateurs à des risques industriels est réduite : le contact avec des produits nocifs et l'émanation de vapeurs de styrène, inhérents aux procédés à moules ouverts, sont considérablement diminués.
- Différentes géométries peuvent être infusées. Les pièces ne sont limitées ni en taille, ni en forme.
- Lorsque l'intérieur du moule est mis sous vide, la membrane flexible est comprimée sous la pression atmosphérique. Cette pression qui ne dépend pas de la technique de serrage, est appliquée uniformément sur la pièce.
- L'application du vide partiel à l'intérieur du moule permet de retirer une partie de l'air, des composants volatiles et de l'excès de résine.

- L'équipement requis est rudimentaire : un pompe, un réservoir de vide et des lignes d'alimentation peuvent être achetés à faible coût et sont peu volumineux.
- La fabrication des pièces est effectuée dans un local à température et à pression ambiantes.

Inconvénients des procédés d'infusion

- Les cycles de fabrication sont longs, non seulement la phase d'imprégnation, mais aussi la préparation du moule.
- L'automatisation est difficile.
- Beaucoup de consommables ne sont pas réutilisables.
- La surface finale du côté membrane n'est pas de bonne qualité (souvent rugueuse).

1.3.2.1 Considérations pratiques pour la mise en œuvre de l'infusion

L'infusion est un procédé qui met en pratique beaucoup de savoir-faire (« *know-how* »). Différents stratagèmes et techniques doivent être assimilés afin de réaliser des pièces de qualité :

1. Le moule doit être parfaitement étanche et doit être vérifié avant toute production de pièces, car toute fuite est impardonnable et difficile à détecter par la suite.
2. Un emplacement adéquat des lignes d'alimentation de résine permet d'éviter les emprisonnements d'air. Il est possible d'établir des stratégies d'infusion avec plusieurs points d'entrée de la résine et de tirage du vide (évents) en les fermant indépendamment

à l'aide de pinces au moment approprié. La simulation numérique permet minimiser les essais de mise au point.

3. La quantité de résine nécessaire à l'infusion peut être déterminée en fonction du poids des fibres mesuré avant l'infusion et du taux de fibres désiré. Une bonne évaluation permet d'éviter les pertes de résine ou d'avoir à mettre au point une seconde formulation de résine. Les lignes d'alimentation et la résine évacuée doivent être considérées comme des pertes.
4. La viscosité de la résine détermine la difficulté de l'imprégnation du renfort. Une résine trop visqueuse peut être diluée dans un solvant (styrène) afin de faciliter l'écoulement.
5. La perméabilité du renfort fibreux influence directement le temps de remplissage du moule. Un milieu de dispersion peut être utilisé pour faciliter l'imprégnation.
6. La formulation d'une résine thermodurcissable peut être ajustée aux exigences de remplissage du moule (« *pot life* »). Les rapports d'accélérateurs et de catalyseurs sont adaptés à la taille des pièces : la polymérisation est suffisamment lente pour laisser la résine imprégner totalement la pièce avant le gel et suffisamment rapide pour assurer une cadence de fabrication optimale.

Tableau 1.4 : Liste du matériel d'infusion

Élément	Caractéristiques
Membrane flexible	Solide, flexible, chimiquement inerte et étanche. Lorsque la membrane est scellée contre le moule, elle permet l'application du vide à l'intérieur de la cavité et la compression du renfort.
Gomme scellante	Étanche sous vide, facile à appliquer et retirer, malléable.
Milieu de dispersion	Grillage plastique de haute perméabilité, qui facilite l'imprégnation de la résine à l'intérieur du moule.
Tissu d'arrachage « <i>peel ply</i> »	Tissu permettant la séparation du milieu de dispersion et de la pièce. Il laisse une surface texturée (après son retrait) sur la pièce, qui facilite l'application de peinture ou le collage.
Tubes d'apport	Tubes de plastique acheminant la résine vers le moule. Ils sont comprimés lorsque la quantité souhaitée de résine est infusée.
Torsade	Lanière de plastique enroulée sous forme de tube, qui permet la distribution de la résine à l'intérieur du moule.

Risques et problèmes de l'infusion

Différents problèmes peuvent subvenir lors d'une infusion, qui créeront des défauts dans les pièces. Ces défauts se présentent sous formes de bulles d'air, de compaction déficiente ou d'absence d'imprégnation et les pièces seront rebutées puisque difficilement réparables.

Les pertes de pression sont occasionnées par un moule non étanche, une membrane percée, un système de pompe à vide inefficace ou pas assez puissant, ou encore des

fuites dans les canaux de distribution. Ces pertes sont créées par une ouverture par laquelle pénètre l'air ambiant.

L'imprégnation partielle des pièces est aussi un facteur de rebut et peut être due à une incompatibilité de la fibre et la résine, un temps de gel trop rapide, une position inadéquate des ports d'entrée et des événements, ou une utilisation incorrecte du milieu de dispersion.

1.4 Motivations, problématique et objectifs

La simulation numérique est essentielle lors de l'élaboration de pièces en composite. Avant la création d'un moule, il importe de définir les stratégies de fabrication et l'emplacement des ports d'entrée de la résine et des événements. Grâce aux logiciels de modélisation, il est possible de simuler le remplissage de pièces virtuelles et d'optimiser les paramètres de fabrication. Pour modéliser les écoulements de résine à travers un renfort fibreux, il faut établir les lois qui gouvernent les mécanismes d'imprégnation et déterminer ensuite les paramètres empiriques qui caractérisent les matériaux utilisés. Des bancs d'essais expérimentaux doivent être élaborés afin d'obtenir ces données expérimentales. Un des objectifs de l'étude des procédés LCM est l'élaboration et le perfectionnement de nouveaux procédés, qui réduisent le temps de mise en œuvre et les coûts de fabrication de pièces en composite. La création d'outils de simulation fiables est essentielle pour l'optimisation et l'évolution des procédés de fabrication.

La perméabilité représente la capacité d'un milieu poreux à se laisser imprégner par un fluide. Il s'agit d'un paramètre crucial pour évaluer le temps de remplissage des pièces par les procédés LCM. Elle permet l'optimisation de l'imprégnation ainsi qu'une amélioration de la fiabilité du procédé de fabrication. Les moules RTM, composés de parois rigides, assurent une épaisseur constante à la cavité dans laquelle est placé le

renfort fibreux comprimé. Le renfort est immobile et son épaisseur est fixe, sa porosité est donc constante. De plus, la distribution de pression lors de l'imprégnation unidirectionnelle d'un moule rectangulaire varie linéairement entre le point d'injection et le front d'avancement de la résine. L'équation de Darcy permet alors d'évaluer empiriquement la perméabilité en suivant l'évolution du front.

Les procédés d'infusion ne peuvent cependant pas bénéficier de cette méthode d'évaluation de la perméabilité. La paroi flexible autorise une expansion du renfort fibreux lors du passage du front d'imprégnation. La variation de pression dans la matrice change la porosité du renfort. Comme la perméabilité du renfort dépend de la porosité, la perméabilité n'est donc pas constante au cours de l'infusion. Ainsi la perméabilité évaluée dans un moule rigide, valable pour la modélisation du procédé RTM, ne peut être utilisée pour prédire l'évolution du front d'imprégnation lors de l'infusion de renforts fibreux compressibles.

L'objectif central de ce mémoire est de développer une démarche expérimentale de caractérisation couplée de la compaction, de l'expansion et de la perméabilité des renforts fibreux pour utilisation dans un logiciel de prédiction de l'infusion.

Plus précisément, les travaux ont été orientés dans les directions suivantes :

1. Le chapitre 2 présente une revue de la littérature qui traite de la caractérisation des procédés d'infusion.
2. Le chapitre 3 décrit le développement d'un nouveau banc d'essai expérimental et de la méthode qui permet de déterminer en un seul essai la perméabilité en infusion pour une large gamme de porosités.

3. Le chapitre 4 propose une étude de la compaction et de l'expansion des renforts fibreux compressibles dans le contexte du procédé d'infusion. Un renfort de type mat d'acrylique dont l'expansion est importante a été choisi pour fins de validation.
4. Le chapitre 5 expose une méthode pour déterminer la perméabilité des renforts fibreux en considérant le comportement en expansion lors d'une infusion sous membrane flexible.
5. Le chapitre 6 présente la validation d'un outil de simulation numérique de l'infusion grâce à cette nouvelle démarche expérimentale. Il expose aussi une étude qui permet de prévoir les paramètres d'infusion d'une pièce réelle grâce à la simulation numérique du procédé et d'observer les corrélations entre les modèles virtuel et réel.

En résumé, les principaux points nouveaux dans ce mémoire sont les suivants :

- a) La caractérisation couplée de la compaction et de la perméabilité d'un renfort fibreux en fonction du taux de fibres est une démarche nouvelle. En effet, en général, la caractérisation de ces deux paramètres n'est pas faite de manière simultanée, ni en une seule expérience. Il faut réaliser un nouvel essai afin de déterminer la perméabilité pour chaque valeur du taux volumique de fibres. Il faut enfin faire un essai de compaction et d'expansion du renfort en fonction du taux de fibres.
- b) L'application dans le chapitre 6 de cette nouvelle approche de caractérisation du procédé d'infusion constitue également un des points innovateurs de ce travail. Tout d'abord, il n'existe pas, à notre connaissance, de modèle de simulation de l'infusion qui tienne compte des variations d'épaisseur du renfort pendant l'imprégnation. Or c'est justement ce que la nouvelle approche de caractérisation proposée dans ce mémoire permet de faire : en notant les variations d'épaisseur du renfort à plusieurs positions d'un banc d'essai unidirectionnel, il est possible de caractériser le comportement en

expansion du renfort saturé pendant le remplissage de la cavité, une information utilisée ensuite dans le logiciel de prédiction de l'infusion.

- c) La réalisation d'un montage original, décrit au chapitre 3, pour caractériser simultanément la compaction et l'expansion de renforts pendant une infusion unidirectionnelle, puis la déduction lors d'une seule expérience de la perméabilité du renfort infusé en fonction du taux volumique de fibres, constitue également une nouvelle contribution.
- d) La consistance de la nouvelle approche de caractérisation avec le module VARI du logiciel PAM-RTM a été établie au chapitre 6. La simulation du procédé effectuée avec des données extraites de l'expérience de caractérisation de l'infusion est en accord avec les observations expérimentales. Cette contribution ouvre la voie à un nouveau logiciel de caractérisation rapide de l'infusion, qui peut se révéler très utile à terme pour la fabrication par infusion de pièces complexes de grande taille.
- e) Enfin, des résultats de validation du logiciel sont présentés d'abord pour l'infusion d'un échantillon rectangulaire contenant deux zones d'épaisseurs différentes, puis dans le cas d'une pièce réelle fabriquée par infusion pour un véhicule.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La réduction du coût de développement des pièces en composite est cruciale pour assurer la rentabilité de la production. Il est essentiel de procéder à la simulation numérique afin de réduire le temps de développement et le coût des projets. L'utilisation d'outils de simulation tels que PAM-RTM[©] ou RTM-Worx[©] permet de prévoir le comportement du fluide s'écoulant à travers le renfort fibreux considéré comme un milieu poreux. Ceci aide à élaborer des stratégies d'injection et à optimiser les procédés de fabrication. Procéder par essais et erreurs pour développer un moule de série résulte en un coût de développement trop élevé. Pour tirer profit de la simulation numérique, il est crucial de bien comprendre les mécanismes d'imprégnation. Les algorithmes de simulation de remplissage des moules d'injection sont fondés sur les lois qui gouvernent l'écoulement de fluides en milieux poreux. Le chapitre actuel présente une revue de la littérature issue de l'étude des milieux poreux et de leur imprégnation en vue de fabriquer des pièces composites par infusion.

2.1 Compaction

Les milieux poreux fibreux sont composés d'un squelette solide et de vides interstitiels interconnectés permettant l'imprégnation d'un fluide. Le renfort fibreux constitue le squelette solide au travers lequel s'écoule une résine liquide qui imprégnera les pores interstitiels. Le rapport du volume occupé par le renfort sur le volume total du milieu poreux donne le taux volumique de fibres V_f . L'espace occupé par la résine est la porosité ϕ du matériau :

$$\phi = 1 - V_f \quad (2.1)$$

Le taux volumique de fibres est lié à l'épaisseur du renfort par la loi suivante :

$$V_f = \frac{\rho_s n}{\rho_v h} \quad (2.2)$$

où ρ_v et ρ_s sont la densité volumique et surfacique du renfort, n est le nombre de couches identiques et h est l'épaisseur.

L'un des principaux avantages des matériaux composites est leur faible rapport densité/propriétés mécaniques. Dans le cas des pièces aéronautiques, cet aspect est crucial puisque les coûts d'opération d'aéronefs se voient considérablement réduits par une diminution du poids total. Lors de l'imprégnation d'un renfort, tout l'espace libre du milieu poreux sera occupé par de la résine. Il importe donc de comprimer le renfort fibreux : la pièce résultante sera moins épaisse et le taux volumique de fibres sera plus élevé, ce qui confère de meilleures propriétés mécaniques au composite. Lors de la compaction du réseau fibreux, la porosité diminue à mesure que les fibres se rapprochent et que le renfort devient plus compact. L'épaisseur du renfort diminue. L'augmentation du taux volumique de fibres dans un volume de contrôle donné permet de diminuer les charges appliquées sur la matrice en les redistribuant sur les fibres.

Le comportement d'un renfort fibreux soumis à une contrainte de compaction à travers son épaisseur transversale n'obéit pas à une loi générale. La réorganisation du réseau fibreux est un phénomène complexe, non linéaire, qui peut être représenté par différents modèles empiriques.

2.1.1 L'approche de la théorie des poutres

L'un des premiers modèles de compaction basé sur la théorie des poutres fut élaboré pour l'industrie textile en 1946. Les fibres sont considérées comme des poutres

soumises à des sollicitations de compression. Van Wyk [9] exprimait alors la pression P résultant de la compaction d'un tissu de laine à un volume V donné:

$$P = kE \frac{m^3}{\rho_v^3} \left[\frac{1}{V^3} - \frac{1}{V_0^3} \right] \quad (2.3)$$

où m est la masse totale de fibres de densité ρ_v , V_0 est le volume occupé par les fibres lorsqu'aucune contrainte est appliquée, E est le module d'élasticité des fibres et k est une constante déterminée empiriquement.

Par la suite, de nombreux auteurs ont repris les travaux de Van Wyk en adaptant les modèles de compaction aux renforts fibreux utilisés dans l'industrie des composites. Gutowski et al. [1] proposèrent un modèle mathématique qui considère une ondulation régulière des fibres. Elles peuvent être représentées par des poutres à contacts multiples en flexion :

$$P = \frac{3\pi E}{\beta^4} \frac{\left(\sqrt{\frac{V_f}{V_{f0}}} - 1 \right)}{\left(\sqrt{\frac{V_{fm}}{V_f}} - 1 \right)^4} \quad (2.4)$$

où V_{fm} , V_{f0} et V_f représentent respectivement le taux volumique de fibres maximal, initial et lors de la compression, E est le module d'élasticité des fibres et β est une constante décrivant la forme des fibres. L'utilisation d'un taux volumique de fibres maximal pose cependant une limite à l'utilisation de ce modèle [10]. De plus, le modèle n'est valide que pour la gamme de renforts étudiés par l'auteur.

Chen et al. [11] ont proposé de diviser la compaction en trois modèles distincts, les régimes 1, 2 et 3, présentés à la Figure 2.1, afin de mieux représenter les relations constitutives de la compaction.

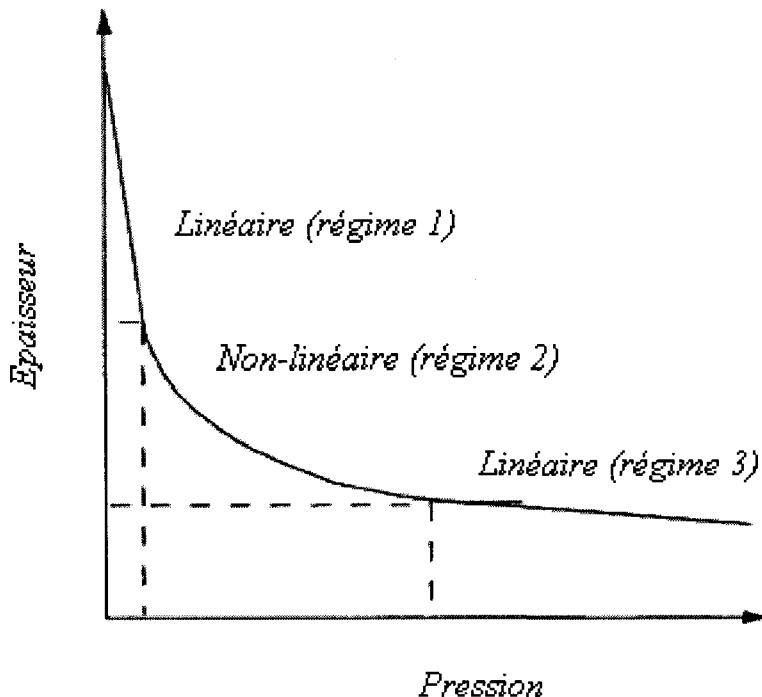


Figure 2.1 : Régimes de déformation sous pression des renforts tissés.

Le régime 1 débute lorsque les fibres tissées sont légèrement comprimées à faible pression. La résistance de contact entre les points de friction empêche le glissement relatif des couches de fibres. La déformation linéaire de la préforme est due à la compression des espaces interstitiels entre les différentes couches de renfort et non des fibres d'un même pli.

Le régime 2 est caractérisé par une compression des espaces interstitiels subsistant combinée à la déformation solide des fibres des différentes couches de renfort. Cette étape est non-linéaire telle que le démontrent les courbes expérimentales.

Le régime 3 se déroule alors qu'une forte pression est exercée. À ce moment, seules les fibres sont comprimées et réarrangées. On suppose que la porosité s'approche d'une constante et que la déformation est linéaire.

En se fondant sur ces hypothèses et sur les résultats d'une étude expérimentale, Chen et al. [12] élaborent un modèle semi-empirique avec un coefficient de compressibilité C_b , qui dépend d'une valeur initiale C_{b0} , d'un coefficient C_s de compressibilité du matériau à l'état solide et d'un facteur d'ajustement k propre aux résultats expérimentaux :

$$P = \frac{1}{C_b} \left(1 - \frac{V_{f0}}{V_f} \right) \quad (2.5)$$

$$C_b = \frac{(1 - V_f)(V_{fm} - V_f)^k}{(1 - V_{f0})(V_{fm} - V_{f0})^k} C_{b0} + \left[2 - V_f - \frac{(1 - V_f)(V_{fm} - V_f)^k}{(V_{fm} - V_{f0})^k} \right] C_s \quad (2.6)$$

où V_{f0} est le taux volumique initial de fibres et V_{fm} est le taux volumique maximal pouvant être atteint. Cette approche est intéressante et plus représentative du comportement réel du matériau, mais elle requiert une caractérisation complexe et reste difficile à implémenter dans un logiciel de simulation.

2.1.2 L'approche viscoélastique

Les modèles de compaction de renforts fibreux précédemment cités supposent une réponse instantanée du système : lorsqu'une contrainte est appliquée, une déformation immédiate en résulte. Cette approche néglige un paramètre important qui intervient au niveau de la compaction d'un renfort fibreux : le temps. Les phénomènes de friction entre les fibres sont à l'origine d'un retard entre la contrainte appliquée et la stabilisation du système. Pearce et al. [13] ont en effet observé qu'il existe un phénomène de relaxation du renfort fibreux lors de la fermeture d'un moule. Cette relaxation peut se dérouler pendant un temps équivalent au temps du cycle de fabrication de la pièce et doit être considérée [14].

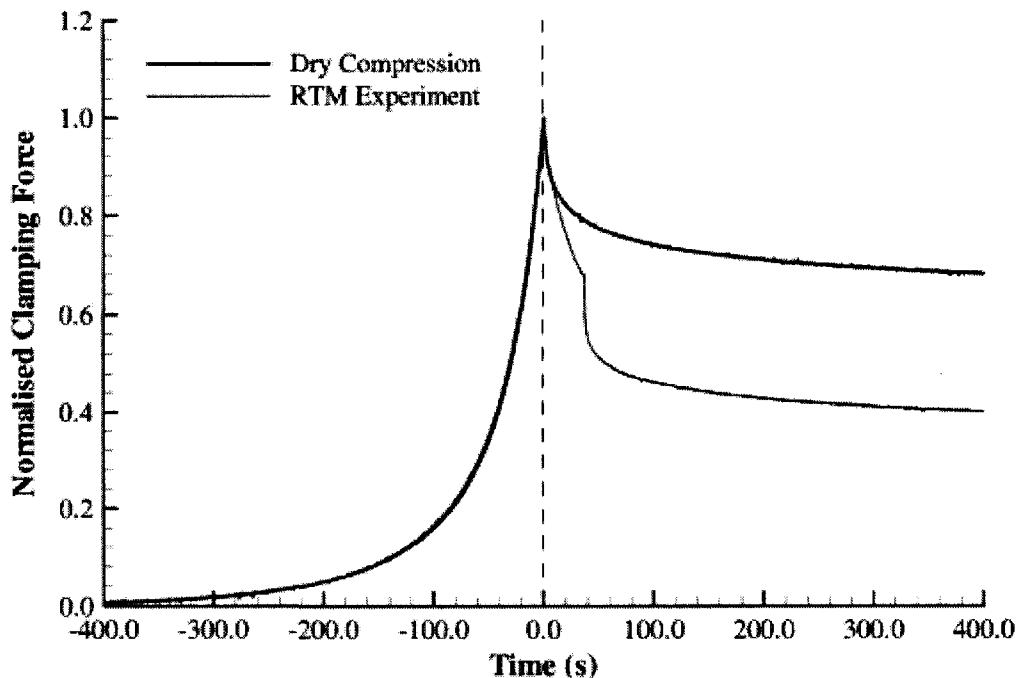


Figure 2.2 : Évolution de la force de fermeture du moule dans les procédés RTM [14].

La Figure 2.2 illustre le phénomène de relaxation. La fermeture du moule s'effectue pendant 400 secondes, lors desquelles le renfort subit une compaction puisque l'épaisseur de la cavité décroît. La force de serrage nécessaire à la fermeture du moule est enregistrée et augmente jusqu'à ce que le moule soit fermé à 0 secondes. L'épaisseur de la cavité du moule est ensuite maintenue constante. À ce moment, la force de serrage du moule diminue, ce qui indique que la contrainte supportée par les fibres diminue avec le temps. Une réorganisation du réseau fibreux est à l'origine de ce phénomène : un glissement survient aux points de contact entre les fibres du renfort qui recherche toujours à retourner dans un état de contraintes minimales.

Les modèles viscoélastiques ont été développés pour mieux comprendre les phénomènes qui se produisent dans la cavité d'un moule après fermeture du moule [14-16]. La réorganisation du réseau fibreux a un impact sur les vides interstitiels interconnectés et donc sur la perméabilité. Cependant, le phénomène peut toutefois être considéré

négligeable lors d'une infusion, puisque la déformation de la paroi du moule a une influence beaucoup plus grande sur la perméabilité.

2.1.3 L'approche mécanique des sols

La compressibilité des milieux poreux a fait l'objet de nombreuses études en mécanique des sols. Terzaghi [17] proposa de décomposer la réponse résultant de la contrainte appliquée sur un milieux poreux saturé de la manière suivante : une partie de la contrainte totale est supportée par le squelette du renfort fibreux, en complément de la pression hydrostatique du fluide. Ce principe se traduit par la relation suivante. :

$$\sigma_{tot} = \sigma_f + P_i \quad (2.7)$$

où σ_{tot} est la contrainte totale externe appliquée sur le milieu poreux saturé, σ_f représente la contrainte de réaction du squelette du renfort fibreux et P_i est la pression interstitielle. Cette relation d'équilibre est importante pour la modélisation des procédés d'infusion : la pression de vide imposée à la résine force l'écrasement de la membrane sur les fibres. L'écrasement de la membrane est supporté par le squelette du renfort fibreux. Ainsi, le renfort supporte la pression de vide appliquée sur la résine.

En 1956, Biot [18] établissait les lois de la consolidation d'un milieu poreux. Lorsqu'on applique une pression à la surface d'un sol poreux imprégné d'un liquide, celui-ci se comprimera plus lentement qu'un renfort sec. En effet, le fluide qui est logé dans les pores est incompressible et doit être expulsé du milieu poreux. La déformation résultant de la charge appliquée est retardée par le temps nécessaire pour expulser le fluide interstitiel.

L'étude expérimentale de la compression de renforts secs a permis de mieux comprendre les phénomènes de compaction, mais au prix d'une simplification du comportement réel du matériau. La matrice qui imprègne le renfort agit aussi comme un

lubrifiant et altère la résistance due à la friction entre les fibres. Gauvin et Robitaille [19, 20] ont comparé les comportements en compression de renforts secs et saturés. Ils ont montré l'effet notable de la lubrification du renfort saturé sur les courbes de compaction. La compaction d'un renfort saturé peut aussi être représentée par une loi de puissance, qui relie le taux volumique de fibres et la pression :

$$V_f = V_{f_0} P_{comp}^B \quad (2.8)$$

où P_{comp} est la pression de compaction appliquée sur les fibres, V_{f_0} le taux de fibres initial (sans compression) et B un paramètre empirique. En raison de la simplicité et du petit nombre de paramètres à identifier, le modèle exponentiel (éq. 2.8) est le plus répandu pour représenter le comportement en compaction des renforts fibreux.

De récentes publications permettent d'établir une compréhension plus complète du comportement des renforts fibreux soumis à une contrainte. Williams et al. [21] ont noté qu'un taux volumique de fibres plus élevé était atteint en appliquant plusieurs cycles de compaction. Carnaby et al. [22] ont observé l'hystéresis des renforts fibreux lorsque la contrainte est relâchée. En effet, l'expansion du matériau suite à une compaction ne peut être représentée par le même modèle. Cette expansion, mentionnée aussi par Correia et al. [23], a des implications importantes pour la modélisation de l'infusion. Le renfort est d'abord comprimé à sec, puis il subit une expansion pendant l'infusion de résine. Un modèle de compaction applicable pour l'infusion doit donc considérer l'expansion du renfort saturée par la résine.

2.2 Loi de Darcy

Les phénomènes d'écoulements en milieux poreux ont fait l'objet de nombreuses études en mécanique des sols. Darcy s'est intéressé à l'écoulement de l'eau au travers des lits de sable [24] en introduisant la notion de vitesse de Darcy u_d comme suit :

$$u_d = -\frac{K}{\mu} \nabla p \quad (2.9)$$

où K est la perméabilité, μ est la viscosité du fluide et ∇p est le gradient de pression.

Puisque la vitesse lors d'une injection de résine est relativement faible, en considérant le renfort comme un milieu poreux, on peut utiliser la loi de Darcy pour évaluer la progression du front d'imprégnation [25, 26]. Bien qu'elle ait la dimension d'une vitesse, la vitesse dite de Darcy ne correspond pas exactement à la vitesse du fluide filtrant, puisqu'elle ne tient pas compte de l'espace occupé par le squelette du renfort fibreux. En effet, la porosité ϕ étant la fraction du volume de contrôle que devra remplir le fluide, il s'ensuit que la vitesse du front de résine u_F dans un écoulement unidirectionnel en milieu poreux est reliée à la vitesse de Darcy u_d par la relation suivante :

$$u_F = \frac{u_d}{\phi} \quad (2.10)$$

La vitesse moyenne u_F des particules de résine à travers un renfort fibreux lors d'une injection est donc définie comme suit :

$$u_F = -\frac{K}{\mu\phi} \nabla p \quad (2.11)$$

La validité de la loi de Darcy pour modéliser l'écoulement d'un fluide au travers d'un milieu poreux dépend des hypothèses suivantes :

- La vitesse de l'écoulement est faible et correspond à un faible nombre de Reynolds, caractéristique des écoulements laminaires.
- Le fluide est newtonien et incompressible, c'est-à-dire que la viscosité ne varie pas avec le taux de cisaillement et que le volume occupé par le fluide ne change pas avec la pression appliquée.
- La tension de surface et les effets capillaires sont négligés.

Dans un moule rectangulaire de section constante, la loi de conservation de la masse implique que le volume de fluide qui entre dans un volume de contrôle est égal au volume de fluide sortant (dans le cas d'un fluide incompressible). De plus, la vitesse interne reste constante si les pressions d'entrée P_0 et de sortie ($P_{ambiance} = 0$) sont maintenues. Le gradient de pression peut être évalué comme suit entre l'entrée et la position du front d'imprégnation x_f à un instant donné :

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{P_0}{x_f} \quad (2.12)$$

La solution du problème de Darcy pour une injection unidirectionnelle donne un champ de pression qui décroît linéairement du port d'entrée de la résine jusqu'à la position du front, tel qu'illustre à la Figure 2.3.

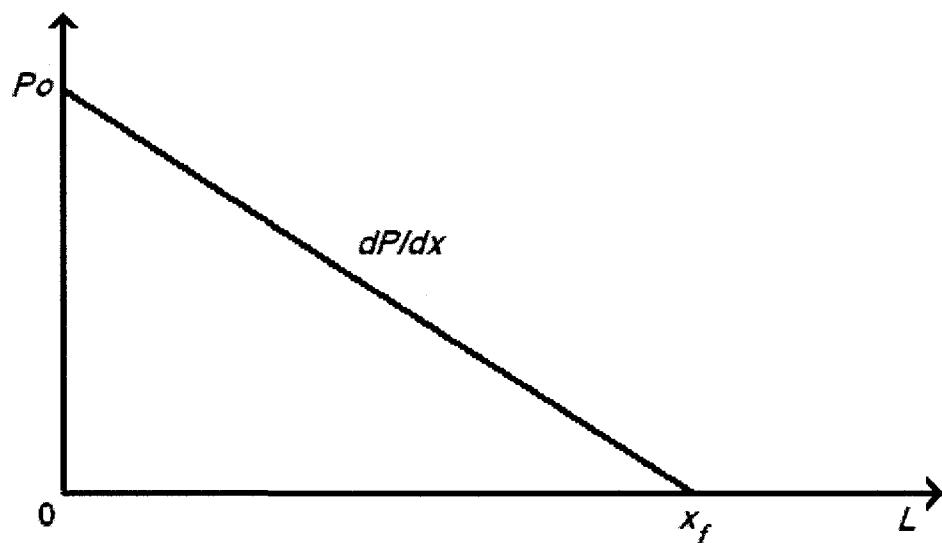


Figure 2.3 : Gradient de pression pour une injection unidirectionnelle.

Il est possible d'obtenir le temps d'injection t_{fill} nécessaire pour saturer complètement de résine un moule rectangulaire de longueur L à pression d'entrée P_0 grâce à la forme intégrée de l'équation de Darcy :

$$t_{fill} = \frac{\phi \mu L^2}{2 K P_0} \quad (2.13)$$

2.3 Perméabilité

La perméabilité est une propriété des milieux poreux qui représente l'aptitude à se laisser imprégner d'un fluide. L'unité de perméabilité est le m^2 ou le Darcy.

$$1 \text{ darcy} = \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{\text{m}^2} \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{atm}/\text{m}} = 0.987 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \quad (2.14)$$

La perméabilité d'un renfort est anisotrope et représentée par un tenseur symétrique.

Lors d'une injection par transfert de résine (RTM), les parois du moule sont considérées comme assez rigides pour soutenir la pression interne d'injection sans déformation. Les déformations de la préforme située à l'intérieur du moule sont donc négligeables et la fraction volumique de fibres reste constante. La perméabilité d'un milieu poreux dépend du taux volumique de fibres du matériau. En comprimant le matériau, on réduit la porosité; il devient donc plus difficile pour le fluide d'imprégner le milieu poreux.

Différents modèles analytiques [27] et expérimentaux ont été proposés afin de déterminer la perméabilité. Le modèle analytique de Kozeny-Carman permet d'obtenir la perméabilité à partir du diamètre d des fibres constituant le renfort et d'une constante k caractéristique de la structure du renfort:

$$K = k \frac{d^2 \phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (2.15)$$

Ce modèle permet une approximation rapide de la perméabilité pour une évaluation simple. Cependant, il est limité à une faible gamme de porosité.

Deux principales approches ont été utilisées pour mesurer la perméabilité de façon expérimentale. La première, développée par Ferland et al [25], consiste à évaluer la perméabilité grâce à la mesure du front d'avancement unidirectionnel du fluide à l'intérieur d'une cavité d'épaisseur constante. La seconde approche [28, 29] consiste à observer l'évolution radiale d'un front d'écoulement à partir d'un point d'injection central.

Une étude comparative des deux méthodes a été effectuée sur un renfort de basalte et montre que les perméabilités obtenues sont semblables [30]. La première méthode est plus accessible que la seconde en raison de la simplicité et du coût du montage expérimental. Une méthode détaillée pour obtenir la perméabilité unidirectionnelle insaturée en moule rigide est présentée à l'Annexe A. La mesure de la perméabilité transverse [31, 32] permet de compléter le tenseur de perméabilité pour un matériau donné.

En évaluant la perméabilité pour différentes gammes de porosités, il est ensuite possible d'établir un modèle empirique exponentiel de la perméabilité [26]:

$$K = A \cdot V_f^B \quad (2.16)$$

où V_f est le taux de fibres, A et B sont des paramètres empiriques.

Le problème des renforts multicouches ont été traités par Diallo et al. [33]. Lorsque le renfort est composé de couches de différentes perméabilités, la perméabilité équivalente du renfort K_{tot} peut être exprimée par la moyenne des perméabilités K_i pondérées par l'épaisseur h de chacune des couches selon la formule :

$$K_{tot} = \frac{K_1 h_1 + \dots + K_n h_n}{h_{tot}} \quad (2.17)$$

2.4 Modélisation de l'infusion

La modélisation de l'imprégnation d'un renfort fibreux lors d'une infusion constitue un défi supplémentaire par rapport aux simulations RTM. En effet, la présence d'une membrane déformable permet l'expansion du renfort fibreux au passage du front d'imprégnation tel que montré à la Figure 2.4. Ceci a pour effet de modifier la porosité et la perméabilité du matériau et donc le gradient de pression à l'intérieur de la cavité.



Figure 2.4 : Déformation du renfort lors d'une infusion.

La distribution de la pression à l'intérieur d'un moule à paroi flexible est aussi différente de celle d'un moule à paroi rigide. Le gradient de pression entre le port d'entrée et l'évent dans un moule d'infusion n'est pas linéaire[23, 34], puisque la membrane flexible permet une modification de la cavité du moule. Il est donc difficile de prévoir analytiquement l'épaisseur de la préforme pendant l'imprégnation puisqu'elle dépend de la pression appliquée.

Le fluide imprégnant le volume de contrôle obéit à la loi de conservation de la masse, dont découlent les équations de continuité appliquées à la matrice et au renfort [35]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho, \phi) + \operatorname{div}(\phi \rho, u_r) = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\phi)\rho_s] + \operatorname{div}[(1-\phi)\rho_s u_s] = 0 \quad (2.19)$$

où les indices r et s représentent respectivement la résine et le renfort solide.

Hammami et al. [36] ont proposé d'étudier un écoulement unidimensionnel pour modéliser le procédé d'infusion. Le volume de contrôle défini à la Figure 2.5 est un

élément de longueur dx et d'épaisseur variant entre $h(x)$ et $h(x+dx)$ qui augmente dans un instant dt .

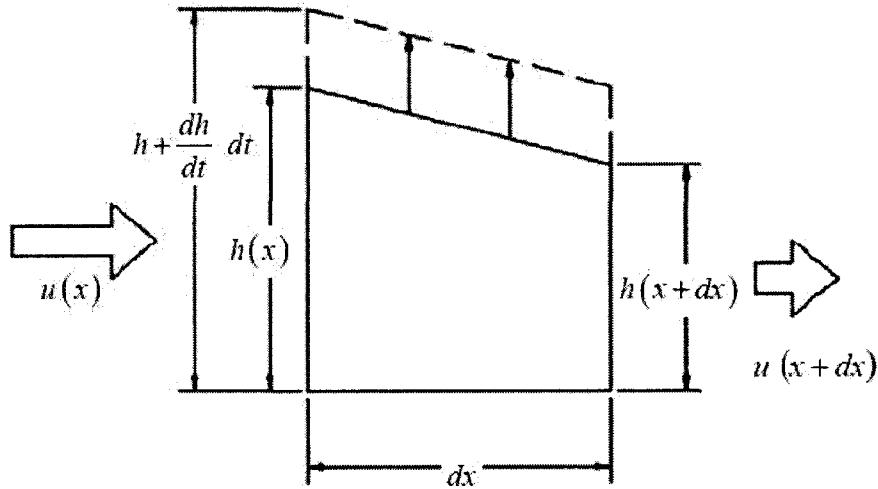


Figure 2.5 : Représentation du volume de contrôle pour l'infusion.

La quantité de matière qui entre dans le volume de contrôle doit être égale à la quantité qui en sort. Comme le volume de contrôle subit une dilatation, l'épaisseur en entrée est différente de l'épaisseur en sortie, car l'épaisseur du renfort varie lors de l'infusion. Cet aspect doit être considéré dans l'équation de continuité appliquée à l'infusion [36, 37]. La Figure 2.5 est représentée sous forme d'équation :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot \phi \cdot dV + \rho(u_0 \cdot h_0 - u_i \cdot h_i) = 0 \quad (2.20)$$

où V est le volume de contrôle, ρ est la densité du fluide, u est la vitesse du fluide et h l'épaisseur. Considérant que le fluide est incompressible, la densité du fluide est alors constante. Après intégration l'équation se réécrit sous forme différentielle :

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi \cdot h \cdot \partial x] + \partial(u \cdot h) = 0 \quad (2.21)$$

En convertissant la porosité en taux volumique de fibres V_f , on obtient :

$$\partial_x \frac{\partial}{\partial t} [(1 - V_f) \cdot h] = -\partial(u \cdot h) \quad (2.22)$$

Enfin, en notant que $V_f \cdot h$ est constant dans le temps, alors on obtient l'équation de conservation de la quantité de résine dans le temps dans un milieu poreux déformable unidirectionnel :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial(u \cdot h)}{\partial x} \quad (2.23)$$

En combinant cette équation de continuité et l'équation de Darcy et en considérant que l'épaisseur du renfort dépend de la pression appliquée, on obtient [36, 38]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{hK}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = -\frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.24)$$

Les changements de porosité lors de l'infusion modifient aussi la perméabilité qui affecte le gradient de pression dans l'équation 2.24. Une loi de comportement de la perméabilité en infusion est nécessaire ici pour résoudre l'équation 2.24 qui comporte deux inconnues, l'épaisseur h et la pression P .

2.4.1 Perméabilité en infusion

La perméabilité du renfort fibreux est un paramètre qui n'est pas constant lors d'une infusion, puisque la porosité change dynamiquement. Joubaud et al. [3] ont proposé un modèle d'évaluation de la perméabilité qui intègre les modèles de compaction et de perméabilité exponentiels. En combinant les équations 2.8 et 2.16, on obtient un modèle de perméabilité dite flexible :

$$K_{eff} = A(C \cdot P^D)^B \quad (2.25)$$

Ce modèle nécessite cependant une étude exhaustive du matériau en termes de perméabilité et de compaction dans les bancs d'essai prévus pour la caractérisation en

moule rigide. De plus, les paramètres sont découplés, puisqu'ils proviennent d'expériences indépendantes.

Walsh [39] a proposé un modèle empirique d'évolution de la perméabilité lors d'une infusion de résine qui tient compte du changement d'épaisseur et du mouillage du renfort :

$$K = K_0 n_K^{-(x-x_f)/R} \quad (2.26)$$

où K est la perméabilité, x_f la position du front, R un coefficient de mouillage qui permet de simuler l'amortissement du système et n le rapport des valeurs extrêmes.

En combinant les équations 2.13 et 2.26 et les conditions particulières d'infusion dans un moule rectangulaire à largeur constante, il est alors possible d'évaluer le temps d'infusion grâce à la forme intégrée de l'équation de Darcy modifiée :

$$t_{fill} = \frac{\phi_0 \mu L^2}{K_0 P_0 n \ln(n)} \frac{(n-1)}{2} \quad (2.27)$$

où n est une constante de remplissage liée au mouillage. La comparaison des solutions analytiques et numériques proposées par Walsh [39] montre de bonnes corrélations, mais cette technique n'est pas encore validée puisqu'elle doit être couplée à une analyse expérimentale.

L'évaluation du temps d'infusion d'un moule rectangulaire a aussi fait l'objet d'études analytiques par Correia et al. [40], qui affirment que les temps de remplissage en RTM et en VARI sont directement proportionnels et reliés par une constante $C\alpha$ (où $\alpha=x/L$, la position adimensionnelle du front d'imprégnation) définie comme suit :

$$C_\alpha = \frac{\left[\frac{\partial P}{\partial \alpha} \right]_{\alpha=1}}{\Delta P} = \frac{t_{inf}}{t_{RTM}} \quad (2.28)$$

Le temps de remplissage d'une infusion peut alors être déterminé comme suit :

$$t_{\text{inf}} = \frac{L^2 \cdot \mu}{2 \cdot \Delta P} \cdot \frac{1}{C_\alpha \cdot [K]_{\alpha=1}} \quad (2.29)$$

où K est la perméabilité au front d'imprégnation. Cette méthode analytique constitue une approche intéressante pour une évaluation rapide. Cependant, ce modèle ne que considère la perméabilité au front d'imprégnation qui est considérée comme constante pendant toute l'infusion.

Différents bancs d'essais expérimentaux ont été développés pour déterminer indépendamment le temps d'imprégnation, la compaction et la perméabilité de renforts fibreux [3, 21, 35, 36, 40]. Hammami décrit les éléments qui affectent la perméabilité lors d'une infusion [41]. Tackitt et al. [42] ont récemment étudié expérimentalement l'évolution de l'épaisseur dans l'infusion grâce à des capteurs LVDT pour suivre l'évolution des épaisseurs du renfort. Ils ont ainsi pu observer la distribution du gradient d'épaisseur du renfort. Williams et al. [21] ont développé un montage expérimental d'infusion où l'épaisseur du renfort mesurée par un LVDT est corrélée avec un capteur de pression. Leur étude se limite aux variations d'épaisseurs lors de l'infusion sans tenir compte du gradient de pression. Il n'existe pas actuellement de banc d'essai expérimental permettant d'obtenir simultanément la distribution de la pression, de l'épaisseur et de la perméabilité dans le procédé d'infusion.

CHAPITRE 3

DÉVELOPPEMENT D'UN BANC D'ESSAI EXPÉRIMENTAL

Ce chapitre présente l'élaboration d'un banc d'essai expérimental pour le procédé d'infusion de résine. Une nouvelle approche expérimentale a été développée afin d'obtenir l'épaisseur et la pression appliquées sur le renfort lors de l'imprégnation. L'évolution du front d'imprégnation et le débit de fluide sont aussi mesurés lors de l'infusion. Les différents éléments du banc d'essai expérimental ont fait l'objet d'une étude afin d'assurer des essais répétitifs. Ainsi un mat d'acrylique et une huile de silicone ont été sélectionnés pour effectuer les essais. Grâce à la nouvelle démarche développée dans ce chapitre, il est possible d'obtenir en un seul essai expérimental le modèle de compaction et la perméabilité d'un renfort fibreux.

3.1 Présentation du banc d'essai expérimental

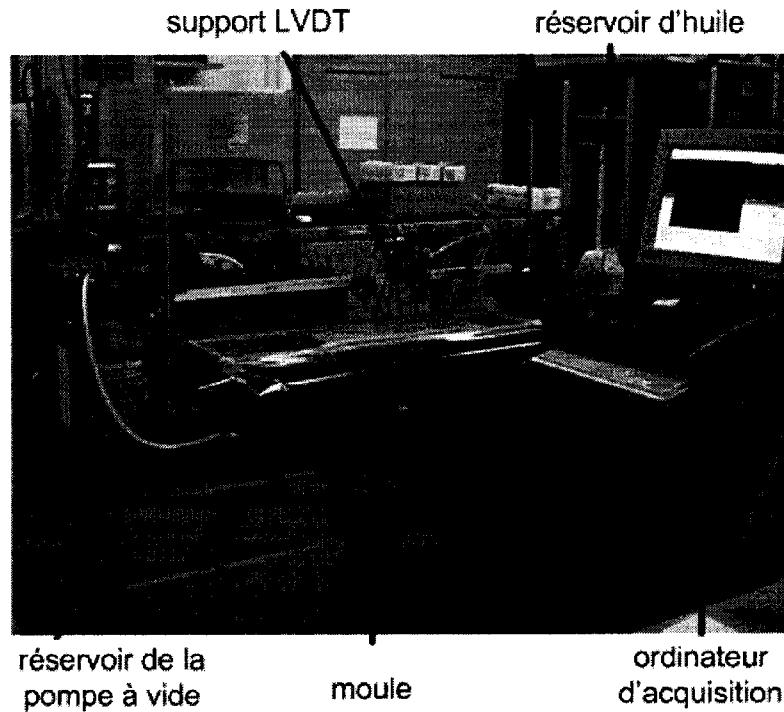


Figure 3.1 : Banc d'essai expérimental pour la caractérisation de l'infusion.

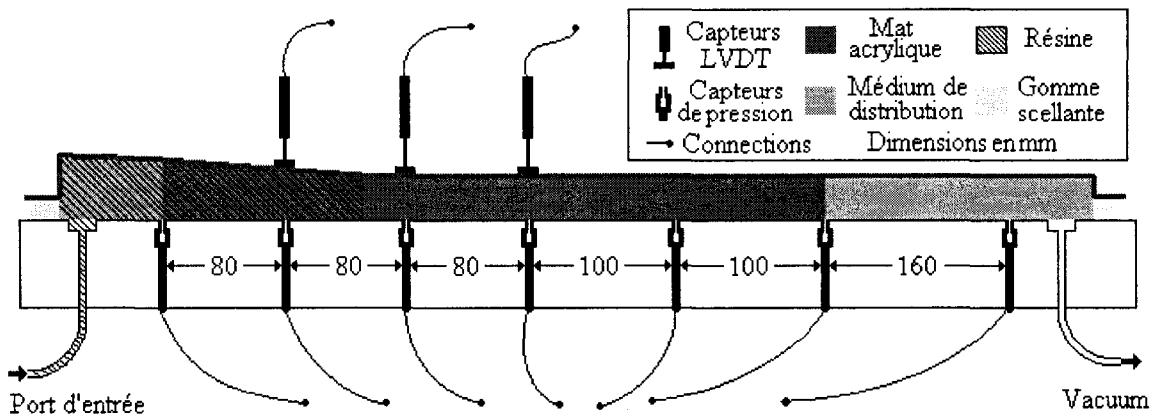


Figure3.2 : Diagramme schématique du banc d'essai expérimental d'infusion.

Le banc d'essai expérimental utilisé pour déterminer la compaction et la perméabilité d'un milieu poreux compressible pour l'infusion de résine est montré aux Figures 3.1 à 3.3. Le moule est constitué d'une plaque de plastique rigide transparente, sur laquelle sont inscrites des lignes équidistantes de 20 mm. Le port d'entrée est relié à un bidon contenant le fluide ou le liquide filtrant (huile de silicone) et l'évent est relié au réservoir de la pompe à vide. Un milieu de dispersion au port d'entrée permet d'assurer un front d'écoulement linéaire à l'entrée du renfort à partir du point de référence 0. C'est à partir de ce point de référence que débute l'acquisition de données. Sept capteurs de pression sont insérés le long de l'axe longitudinal du moule aux positions 0, 80, 160, 240, 340, 440 et 600 mm. Un renfort de 440 x 100 mm est placé sur le moule et recouvert d'une membrane polymère Wrightlon 7400 collée au moule sur toutes ses extrémités. Trois capteurs de déplacement (LVDT) sont placés sur la membrane aux positions 80, 160 et 240 mm pour mesurer l'épaisseur de l'échantillon en fonction de la pression locale appliquée. Un milieu de distribution est placé aux deux extrémités longitudinales de l'échantillon et le reliant au port d'entrée et à l'évent. Le bidon d'huile est placé sur une balance qui est reliée, tout comme les capteurs de pression et de déplacement, à un ordinateur.

Les données sont acquises grâce au logiciel LabView[©] et sont transférées dans un classeur Excel[©]. Avant le déroulement d'un essai, une pompe est branchée au pot de vide. L'air est retiré de la cavité où se trouve le renfort, qui est comprimé par la membrane. La valve d'entrée est ensuite ouverte, ce qui permet à l'huile d'imprégnier le renfort. Une description plus détaillée du montage expérimental est disponible à l'Annexe B.

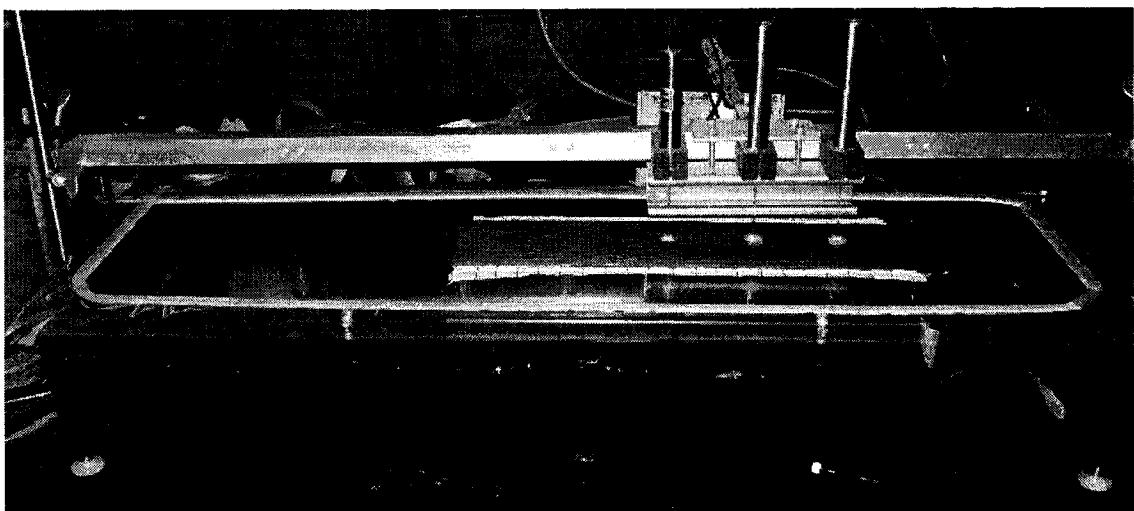


Figure 3.3 : Photo du banc d'essai expérimental d'infusion.

3.2 Sélection d'un moule

L'évaluation de la perméabilité en moule rigide repose sur la mesure de l'avancement d'un front d'imprégnation unidirectionnel. Cette méthode développée à Polytechnique [25] est directement applicable à l'évaluation de la perméabilité en infusion et sera retenue en raison de sa simplicité, sa fiabilité en termes de répétitivité des résultats et son coût abordable. Le moule requis ici est une simple plaque rectangulaire, sur laquelle est déposée une membrane flexible. Le montage doit répondre aux exigences suivantes :

1. Le moule doit être transparent afin de pouvoir observer le front d'imprégnation.
2. La base du moule doit être assez rigide pour soutenir la pression de vide sans déformations.
3. La base du moule doit être percée pour les capteurs de pression, le port d'entrée et l'évent.

La solution retenue est une plaque de plexiglas fixée sur un support en métal. La face supérieure de la plaque comprend deux rainures qui servent de port d'injection et d'évent. La face inférieure comprend quinze trous filetés permettant d'y fixer les capteurs de pression. La position de ces éléments est montrée sur la Figure 3.4.

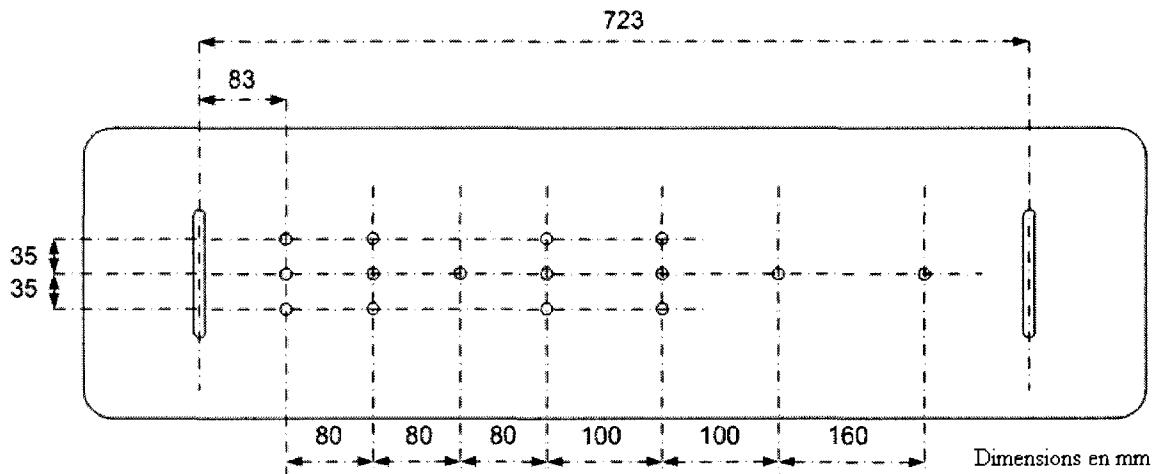


Figure 3.4 : Position des capteurs de pression et des lignes d'alimentation du moule de caractérisation de l'infusion.

3.3 Sélection d'un renfort

La performance d'un banc d'essai expérimental est tributaire de la précision de chacun de ces paramètres : la température, la pression, la viscosité, la densité, etc. Ces paramètres peuvent être contrôlés et varieront peu d'une expérience à l'autre. Lors de la mesure de perméabilité, le matériau est facteur qui introduit le plus de variabilité, car la

densité surfacique du renfort est reliée à son architecture et sa méthode de fabrication. Le comportement en compaction dépend beaucoup de la densité de surface du renfort, un paramètre en général assez variable. Afin de valider la nouvelle méthode de caractérisation qui fait l'objet de cette étude, il importe donc de sélectionner un renfort présentant de faibles variations de densité surfacique pour obtenir des résultats cohérents. La sélection d'un renfort propice à l'élaboration d'un plan d'expériences pour la caractérisation de la compaction et la mesure de la perméabilité en infusion doit considérer les points suivants :

- disposition aléatoire des fibres (un mat),
- forte compressibilité pour bien mettre en évidence les phénomènes étudiés,
- densité surfacique la plus constante possible,
- peu onéreux.

Différents renforts ont été testés afin de déterminer le plus adéquat : un mat de fibres de verre OCF 8610, une mousse de polyester et un mat d'acrylique de l'industrie textile (Rainbow felt de Fabricville). Le mat de fibres de verre a été écarté puisqu'il présente une perméabilité variable de plus de 15% et que sa manipulation entraîne des variations de densité surfacique (les fibres se déplacent). La mousse de polyester était trop compressible et ne pouvait être imprégnée à fortes pressions de vide. Le mat d'acrylique peut être comprimé à la moitié de son épaisseur sous une pression de 70 kPa, possède une densité constante et n'est pas affecté par les manipulations (les fibres conservent leur disposition). Le mat d'acrylique répond à toutes les exigences et a donc été retenu.

3.3.1 Mesure de perméabilité

Une méthodologie d'évaluation de la perméabilité a été développée à Polytechnique [25]. Une procédure décrivant les différentes étapes expérimentales est présentée à l'Annexe A. Avant de mener un plan d'expériences en infusion avec un renfort, il

importe de s'assurer que la variabilité de la perméabilité est faible. Les essais de perméabilité effectués sur la fibre d'acrylique sont décrits à l'Annexe A. Les résultats sont résumés dans le Tableau 3.1 :

Tableau 3.1 : Perméabilité du mat d'acrylique mesurée en moule unidirectionnel rigide

Échantillon	Taux volumique de fibres (%)	Perméabilité (m ²)
A-1	22.37	1.06E-10
A-2	22.31	9.67E-11
A-3	22.55	9.86E-11
A-4	21.6	7.45E-11
A-5	10.75	4.06E-10
A-6	11.08	3.64E-10
A-7	9.69	4.02E-10
A-8	9.63	3.63E-10
A-9	13.54	1.70E-10
A-10	13.59	1.36E-10
A-11	13.46	1.66E-10
A-12	13.76	1.54E-10

Le Tableau 3.1 montre que la perméabilité est semblable à un taux de fibres donné. Pour quatre essais autour de 22% en taux volumique de fibres, la perméabilité est de $9*10E-11$ m² alors qu'elle est respectivement de $1.61*10E-10$ m² et $4.6*10E-10$ m² pour un taux de fibres proche de 13.5% et 10%. Le renfort montre une faible variabilité de perméabilité et peut être utilisé pour des fins de caractérisation.

3.3.2 Évaluation de la densité du renfort d'acrylique

La densité volumique de l'acrylique a été déterminée en pesant des échantillons dans l'air et ensuite dans l'eau distillée tel que détaillé dans la norme ASME [43] et tel qu'illustré à la Figure 3.5.



Figure 3.5 : Mesure de la masse d'échantillons dans l'air et dans l'eau distillée.

Il est possible d'obtenir la densité du matériau grâce à la masse volumique de l'eau distillée qui vaut 0.99707 g/cm^3 à 23°C , température du laboratoire.

$$\rho_{mat} = \frac{m_{air} * \rho_{eau}}{m_{air} - m_{eau}} \quad (3.1)$$

où m est la masse et ρ est la masse volumique.

Six échantillons ont été testés et sont présentés au Tableau 3.2. La moyenne de la dernière colonne donne une masse volumique moyenne de l'acrylique équivalant à 1.41 g/cm³.

Tableau 3.2 : Masses volumiques moyennes d'échantillons d'acrylique

Échantillon	Masse dans l'air (g)	Masse dans l'eau (g)	Masse volumique (g/cm ³)
A	0.18405	0.05218	1.391
B	0.13846	0.04276	1.42
C	0.18787	0.05432	1.402
D	0.27225	0.0785	1.401
E	0.22026	0.0673	1.43
F	0.24113	0.07035	1.417
Moyenne			1.41

3.4 Sélection d'un fluide

La détermination de la perméabilité est fondée sur l'évaluation de paramètres interdépendants et variables. Il importe de limiter le nombre de ces paramètres afin de simplifier l'étude expérimentale. L'huile de silicone a été choisie au lieu de l'eau, de l'huile végétale ou de l'huile de maïs, puisqu'elle peut être utilisée sans affecter le montage expérimental et qu'il s'agit d'un fluide newtonien. La viscosité de l'huile de silicone est un paramètre à contrôler qui doit rester constant. Selon le fabricant Dow Corning, la viscosité de l'huile de silicone utilisée est constante et égale à 0.1 Pa·s, mais ceci doit être vérifié.

3.4.1 Évaluation de la viscosité du fluide

La viscosité μ désigne la capacité d'un fluide à s'écouler. Elle est exprimée en Pascal*secondes. La viscosité de l'huile de silicone a été mesurée à l'aide du rhéomètre MCR 501 d'Anton-Paar (Figure 3.6). Elle est obtenue en imposant une vitesse de rotation à un cylindre submergé dans le fluide. La contrainte mesurée permet de déduire la viscosité par la formule :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.2)$$

où τ est la contrainte de cisaillement et $\dot{\gamma}$ est le taux de déformation.

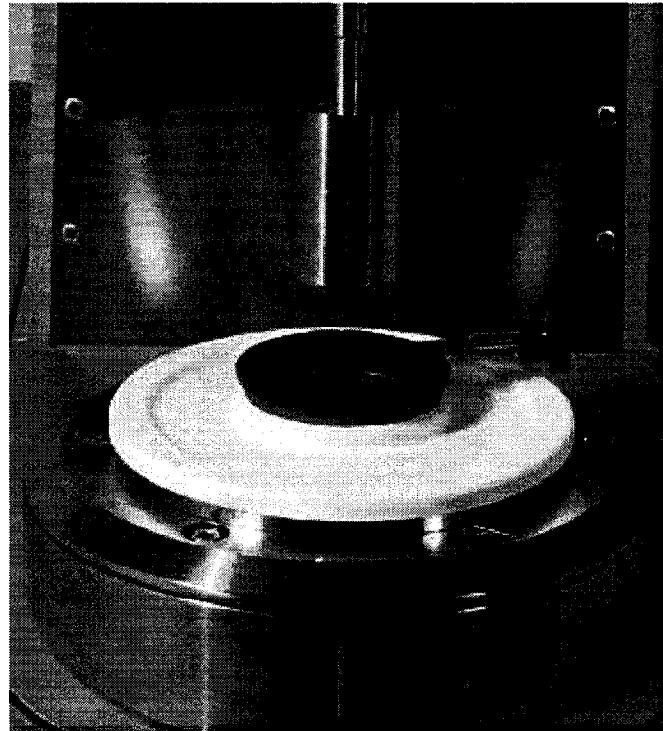


Figure 3.6 : Mesure de la viscosité dans un rhéomètre.

La viscosité de l'huile de silicone a été évaluée à différentes températures avec une rampe de chauffage de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ et un taux de cisaillement 10 s^{-1} . La Figure 3.7 montre

l'importance de la température lors de l'évaluation de la viscosité. Il existe une forte dépendance entre ces deux paramètres qui invalide l'hypothèse de constance de l'huile de silicone à $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. De ce fait, des infusions effectuées à différents moments, par exemple à 20°C un jour et à 25°C un autre jour, pourraient diverger, puisque la viscosité varie de $0.113 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ à $0.102 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (10% de variation). Il est donc primordial de contrôler la température du laboratoire de recherche afin d'assurer la validité des résultats ou de noter la température de chaque essai afin de faire une correction appropriée. Enfin, on note sur la Figure 3.7 que la viscosité de deux échantillons pris dans un même lot ne change pas.

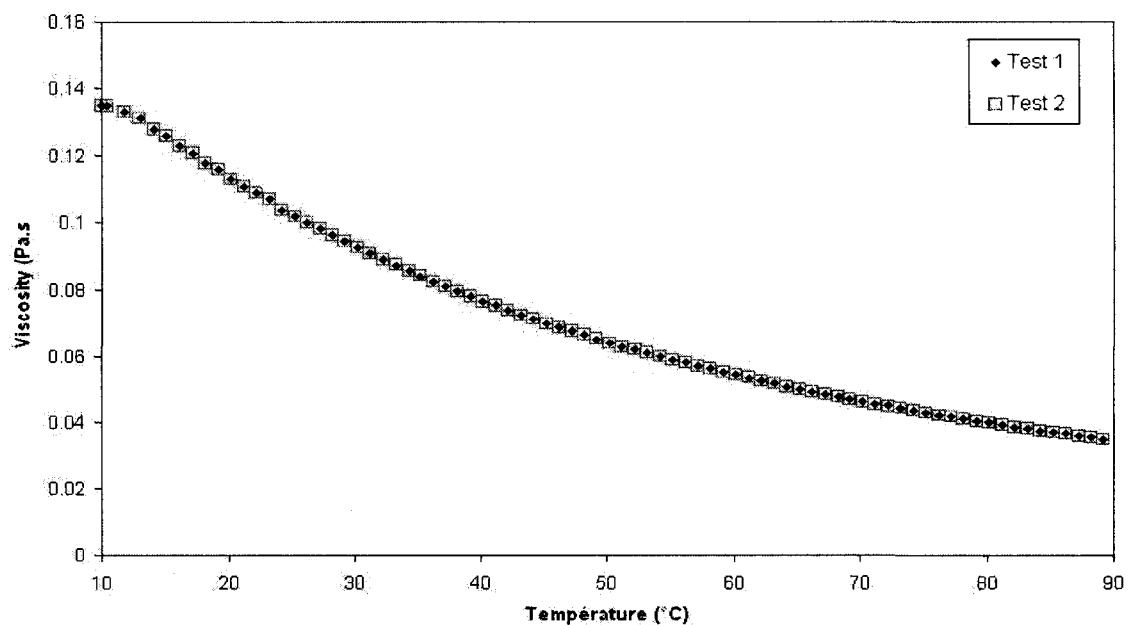


Figure 3.7 : Chute de la viscosité de l'huile de silicone $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Le taux de cisaillement de l'huile de silicone dépend de la vitesse du fluide, qui varie tout au long d'une infusion. Il est donc important de vérifier que ceci n'affectera pas la viscosité de l'huile de silicone.

Tel qu'observé sur la Figure 3.8, l'huile de silicone est un fluide newtonien : la viscosité ne varie pas en fonction du taux de cisaillement. La vitesse du front d'imprégnation n'a donc pas d'influence sur la viscosité, qui reste constante pendant l'infusion à température constante.

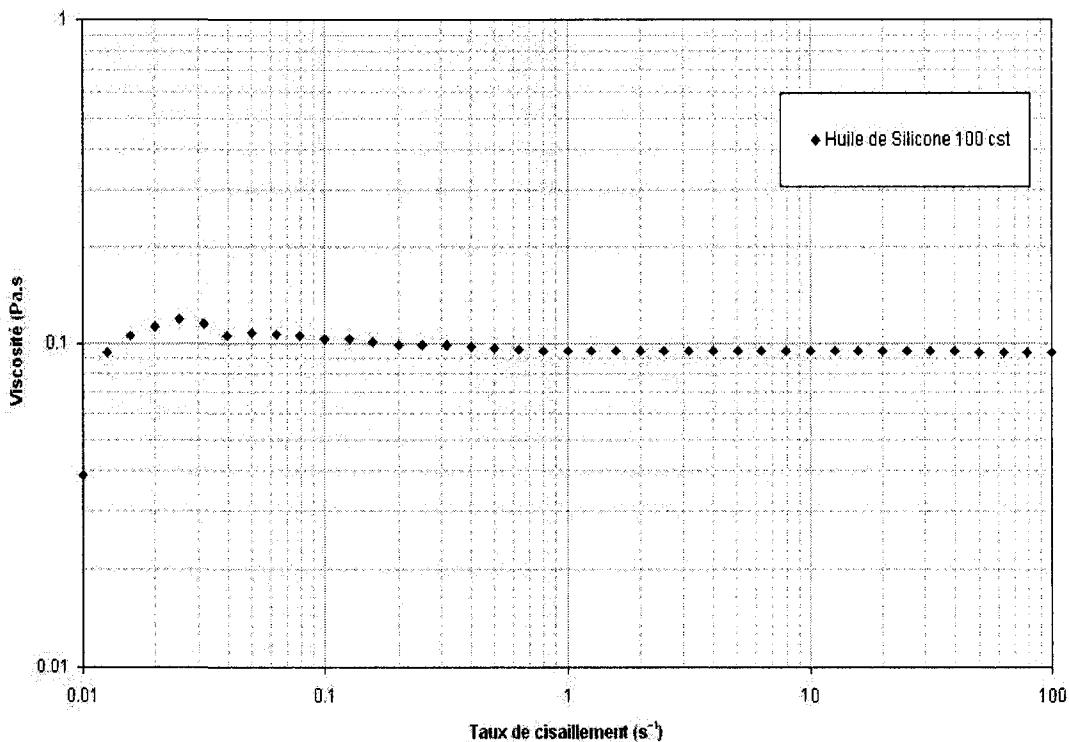


Figure 3.8 : Calculs de viscosité pour différents taux de cisaillement.

3.4.2 Influence de la pigmentation

L'huile de silicone fournie par le manufacturier est transparente. Il serait difficile d'observer l'évolution du front d'imprégnation lors d'une infusion si l'huile n'était pas colorée. Ainsi, quelques gouttes de colorant par litre d'huile y ont été ajoutées. Il y a lieu de vérifier l'effet de cet additif sur la viscosité.

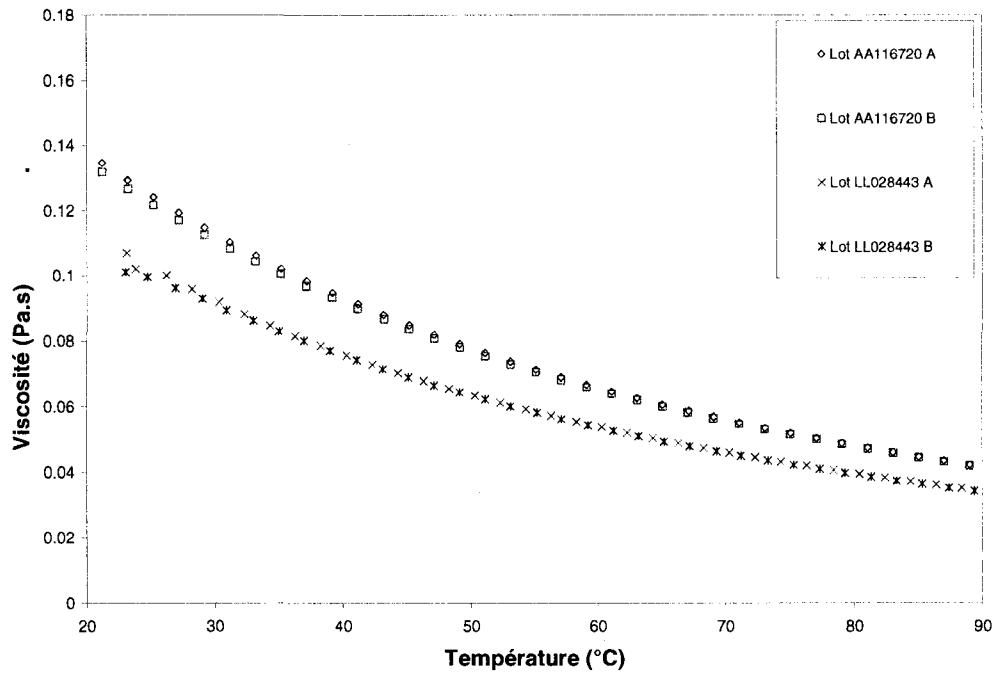


Figure 3.9 : Viscosité de différents lots d'huile de silicone : (A) avec pigmentation; (B) sans pigmentation.

La Figure 3.9 montre la viscosité de l'huile de silicone de deux lots différents. On peut observer tout d'abord que pour chaque lot, la pigmentation n'affecte pas la viscosité. Cependant, on observe un fait imprévu : la viscosité varie grandement de lots en lots. En effet, on peut observer que la viscosité varie entre 0.1 et 0.13 Pa·s entre les lots LL028443 et AA116720. Il est donc évident que l'huile de silicone sélectionnée pour le plan d'expériences devra provenir d'un seul et même lot.

3.4.3 Considérations pratiques

Il est important de considérer les ressources matérielles lors de l'élaboration d'un plan d'expériences. Il faut s'assurer que l'huile proviendra d'un seul et unique lot pour éviter des variations dans ses propriétés. La quantité d'huile utilisée pour le plan d'expériences ne devra pas excéder la quantité disponible dans ce lot.

La masse d'huile infusée lors d'une expérience est calculée en mesurant la différence de masse du bidon d'huile de silicium avant et après l'infusion : $156.21 \text{ g} - 13.4 \text{ g} = 142.81 \text{ g}$. La valeur initiale de 13.4 g correspond à l'huile circulant dans la conduite qui achemine l'huile au moule au début de l'infusion.

L'évaluation de la quantité nécessaire pour le plan d'expériences doit aussi tenir compte de la masse infusée pour atteindre le régime permanent, qui correspond environ à 150g. Ainsi la différence totale de masse après un essai complet est de 290g. En considérant un plan d'expériences de 9 essais, la masse d'huile minimale nécessaire est de $9 * 300\text{g} = 2.7 \text{ Kg}$. Un bidon d'huile calibrée de 18.1 kg a donc été réservé uniquement pour le plan d'expérience VARI afin d'éviter les erreurs liées aux changements de lots. La Figure 3.10 indique la viscosité du lot sélectionné, soit 0.127 Pa·s à 23 °C, à température ambiante contrôlée.

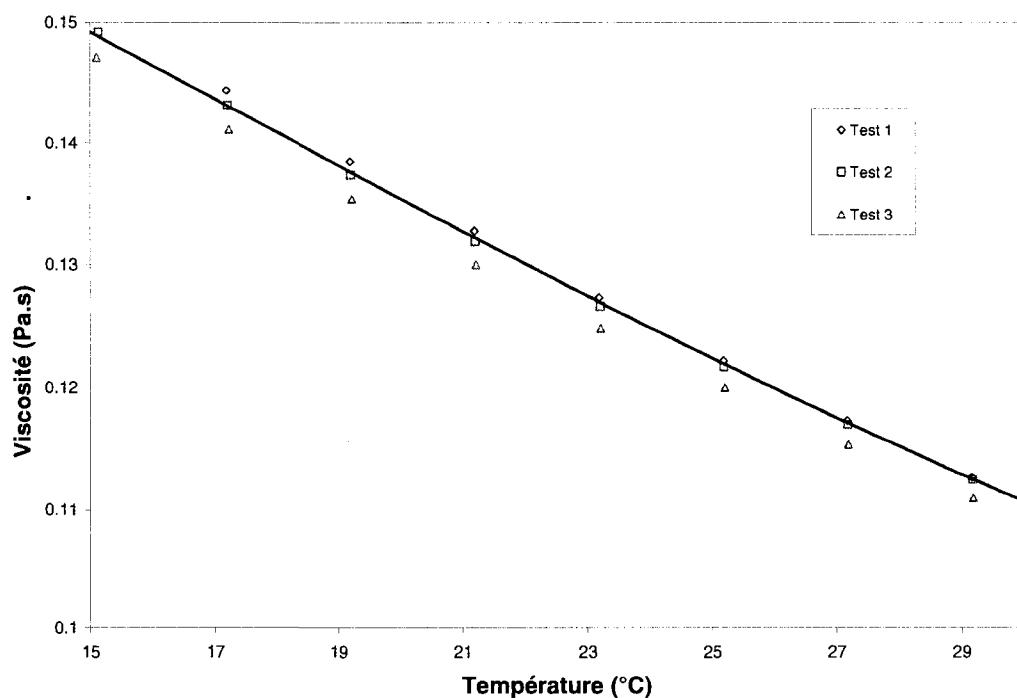


Figure 3.10 : Tests de viscosité de l'huile silicium du lot AA116720.

3.5 Système d'acquisition de données

La détermination de la perméabilité en VARI nécessite l'acquisition de données couplées. La corrélation de ces données permet de caractériser les renforts testés. Ces données sont acquises dans une application nommée VARI avec le logiciel d'acquisition Labview© et sont ensuite compilées dans un tableur au format Excel. Les différents éléments du montage et les paramètres mesurés sont les suivants :

Tableau 3.3 : Paramètres mesurés par le système d'acquisition de données

Capteur	Mesure
Pression	Contrainte verticale
LVDT	Épaisseurs des échantillons
Balance	Masse d'huile infusée
Bouton pressoir	Progression du front d'imprégnation

3.5.1 Mesures d'épaisseur

Le capteur LVDT («*Linear Variable Differential Transducer*») est un type de transformateur électrique utilisé pour mesurer un déplacement unidirectionnel (Figure 3.11). Il est constitué de 3 solénoïdes disposés autour d'un tube. La bobine centrale est dite primaire, alors que les bobines extérieures sont dites secondaires. Le noyau ferromagnétique coulisse dans l'axe du cylindre. Une tension est appliquée sur le circuit primaire et la tension résultante est mesurée sur les circuits secondaires. Le signal de sortie (en volts) correspond à la différence de tension entre les deux bobines secondaires et il est proportionnel au déplacement du noyau.

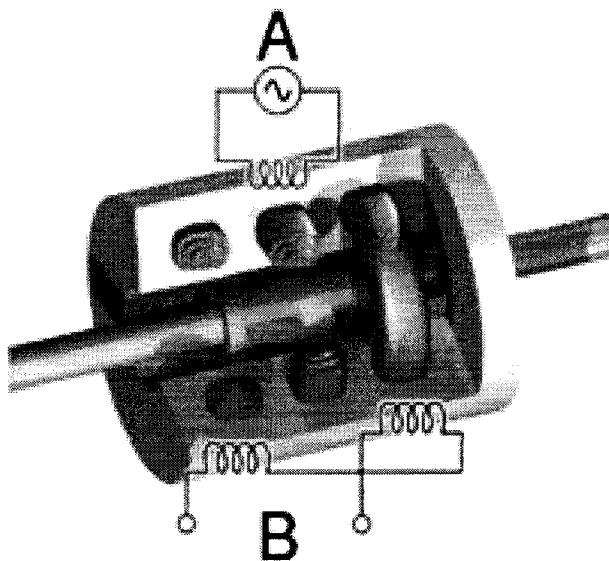


Figure 3.11 : Coupe longitudinale d'un capteur LVDT.

Les capteurs LVDT du montage expérimental sont décrits dans le Tableau 3.4 avec leurs coefficients de conversion respectifs et leur course totale. Un des capteurs est d'un modèle différent.

Tableau 3.4 : Paramètres des capteurs LVDT

Capteur	Type	Course totale (mm)
LVDT 1	DC-EC-500 Schaevitz Sensors	25.4
LVDT 2	DC-EC-500 Schaevitz Sensors	25.4
LVDT 3	DC 750 de MacroSensors	12.7

Les deux premiers LVDT ont une plage d'acquisition de 25.4 mm. Ces données sont enregistrées sous 16 bits, ce qui permet l'acquisition de 65536 données. La précision du capteur est donc $25.4\text{mm} / 65536 = 0.00039\text{ mm/donnée}$, ce qui est largement suffisant pour notre application.

Calibration des capteurs LVDT

Avant toute calibration, il est important de bien comprendre le fonctionnement d'un LVDT et son utilisation. La mise à zéro des LVDT posait à l'origine un grave problème. Le capteur était initialement installé sur une surface plane qui correspondait à la valeur de référence, le zéro. Suite à une mesure, le capteur revenait à la surface plane de référence, mais la valeur de référence qui devait indiquer zéro pourrait varier de $\pm 0,2$ mm. Cette incertitude d'environ 5% est reliée à l'angle θ de la tige par rapport à l'axe du capteur (Figure 3.12). En raison des faibles variations d'épaisseur devant être mesurées pendant l'infusion, il est nécessaire d'étudier et de corriger cette erreur si possible.

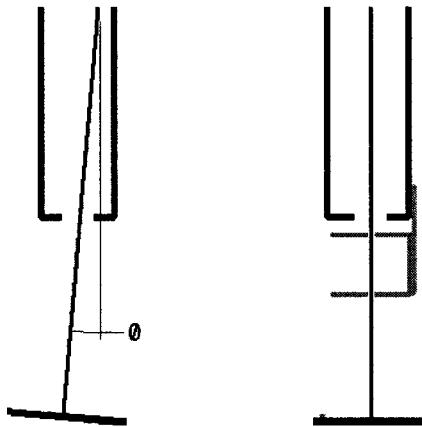


Figure 3.12 : Correction de l'imprécision des capteurs LVDT.

L'alignement des tiges à l'intérieur du capteur LVDT pose un problème, puisque plusieurs degrés de liberté sont en jeu. Le déplacement selon l'axe longitudinal doit être mesuré par le LVDT à condition que les autres degrés de liberté soient fixés. La tige peut en effet bouger librement autour de cet axe, ce qui cause l'incertitude mentionnée. Afin de remédier à ce problème, un guide a été installé sous les capteurs. Deux trous précis ont été percés dans le guide ce qui limitait les déplacements de la tige à un degré de liberté. La rotation de la tige autour de son axe pouvait aussi faire varier sensiblement

les résultats. Cette incertitude a été éliminée en ajoutant une référence visuelle sur le pied de la tige. Il ne reste ainsi qu'un seul degré de liberté aux capteurs LVDT.

Par la suite, la calibration des LVDT a été effectuée. Les coefficients de transformation mm/V ont été ajustés dans le programme LabView© afin de corrélérer le voltage enregistré par le capteur avec le déplacement correspondant.

Tableau 3.5 : Coefficients de calibration des capteurs LVDT

Capteur	Coefficient (mm/V)
LVDT 1	1.2600
LVDT 2	1.2600
LVDT 3	0.5960

Par la suite, la fiabilité du système d'acquisition des déplacements a été évaluée grâce à des cales d'épaisseurs calibrées de 3, 5 et 8 mm. La Figure 3.13 illustre les données recueillies pour 8 mesures indépendantes dans chaque cas. Pour chacune des cales mesurées, 50% des résultats sont inclus dans un rectangle, tandis que les résultats plus éloignés sont situés dans les lignes de part et d'autre du rectangle.

On constate que l'écart maximal est d'environ 0,06 mm, pour le calibre de 3 mm, soit 2%. L'erreur moyenne se situe autour de 0,02 mm ce qui peut être considéré comme négligeable pour notre application. Le LVDT 3 étant un modèle différent des deux autres, le coefficient de corrélation du Tableau 3.5 est différent.

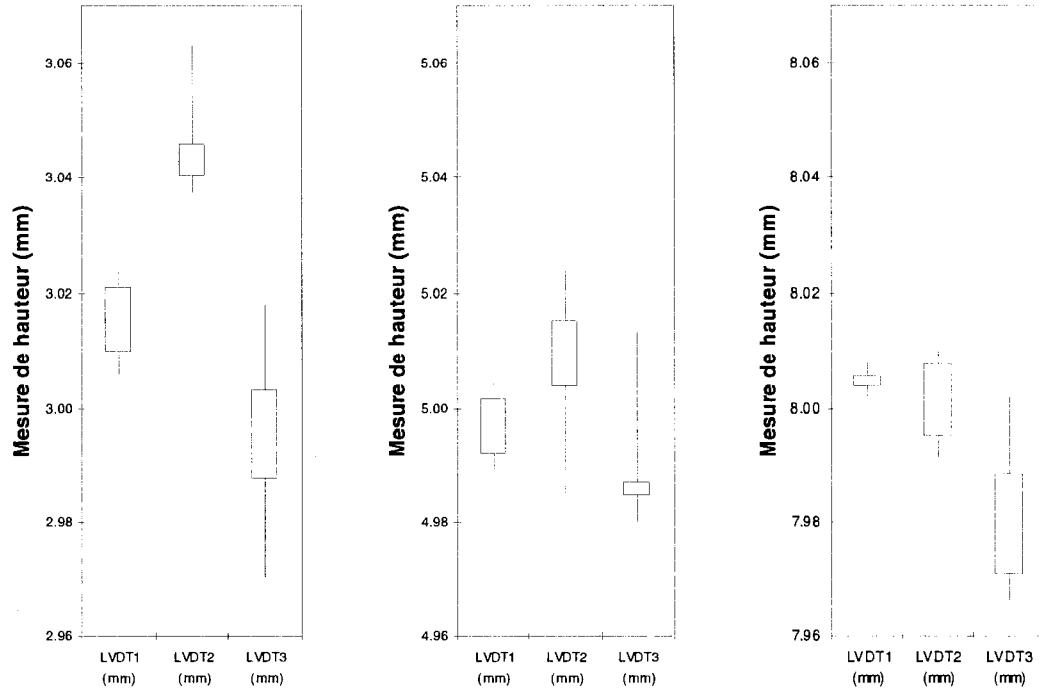


Figure 3.13 : Précision des capteurs LVDT lors de mesures d'épaisseurs de cales calibrées de 3, 5 et 8 mm.

3.5.2 Mesures de pression

Le moule de caractérisation est constitué d'une paroi rigide sur laquelle on pose un ruban adhésif (« *dum dum* ») et d'une membrane flexible. Différents capteurs (7 dans le plan d'expériences actuel) sont positionnés linéairement sur l'axe de symétrie longitudinale. Plusieurs trous filetés ont été percés dans la base rigide du moule, dans lesquels sont insérés les capteurs de pression. Les trous inutilisés ont été bouchés à l'aide d'argile afin d'assurer l'étanchéité du moule.

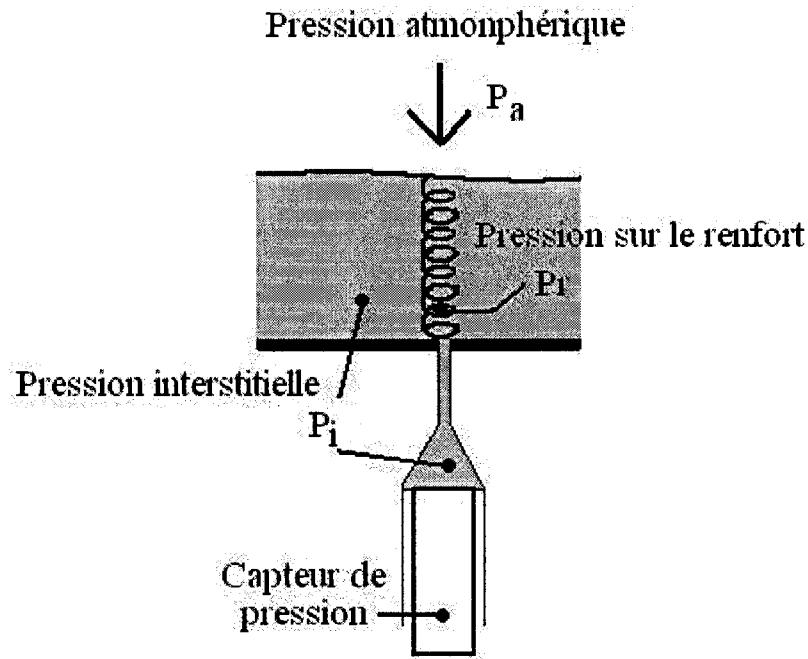


Figure 3.14 : Représentation de l'acquisition de pression.

La pression est enregistrée grâce à un capteur placé dans un trou percé dans le moule. Il s'agit de la pression statique interstitielle P_i à l'intérieur des pores du milieu poreux. Cependant, cette pression n'est pas celle qui est appliquée sur le renfort. En effet, cette pression doit être évaluée à partir de l'équation de Terzaghi [17] :

$$P_a = P_i + P_r \quad (3.4)$$

Tel qu'illustré à la Figure 3.14, le réseau fibreux agit comme un ressort et développe une force de réaction égale et opposée. Lorsqu'une pression de vide de -70 kPa est appliquée sur le fluide, alors la pression atmosphérique comprime la membrane, ce qui comprime le renfort afin de rétablir l'équilibre. En réaction, le renfort exerce une pression équivalente et opposée de 70 kPa tel que montré au Tableau 3.6. Cet équilibre peut être exprimé en pressions relatives ou absolues. Dans les deux cas, la pression appliquée sur le renfort est identique.

Tableau 3.6 : Pressions appliquées sur un renfort en systèmes relatif et absolu

	Pression atmosphérique (P_a)	Pression interstitielle (P_i)	Pression sur le renfort (P_r)
Pression relative	0 kPa	-70 kPa	70 kPa
Pression réelle	101.3 kPa	31.3 kPa	70 kPa

Il est possible de mesurer la pression appliquée sur le renfort en mesurant la pression interstitielle dans le fluide.

3.5.2.1 Calibration des capteurs de pression

Les capteurs ont tout d'abord été calibrés indépendamment et ensuite comparés avec un capteur témoin. Afin de vérifier la variabilité du système d'acquisition de pression, un essai à différentes pressions a été réalisé. À cette fin, il était impératif de soumettre chacun des capteurs de pression aux mêmes conditions expérimentales. Ainsi la pression de vide devait être identique partout. Une plaque métallique, soutenue par des cylindres de bois et entourée de gomme scellante déposée sur le moule a permis d'obtenir une cavité étanche en offrant une configuration de moule rigide. La pression de vide étant identique en tous points de la cavité, il était maintenant possible de vérifier la calibration des capteurs de pression.

Tableau 3.7 : Variabilité des pressions enregistrées en configuration moule rigide

Essai	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	PMAX	PMIN	Delta
1	-82.038	-82.058	-82.228	-82.039	-82.071	-82.047	-81.957	-81.957	-82.228	0.271
2	-74.942	-74.968	-75.112	-74.856	-74.987	-75.002	-74.896	-74.856	-75.112	0.256
3	-64.99	-64.965	-65.137	-64.895	-65.031	-64.977	-64.92	-64.895	-65.137	0.242
4	-55.396	-55.415	-55.513	-55.346	-55.39	-55.372	-55.311	-55.311	-55.513	0.202
5	-44.61	-44.737	-44.821	-44.692	-44.809	-44.693	-44.708	-44.61	-44.821	0.211
6	-40.16	-40.165	-40.284	-40.25	-40.213	-40.172	-40.178	-40.16	-40.284	0.124
7	-30.046	-30.149	-30.209	-30.16	-30.189	-30.095	-30.127	-30.046	-30.209	0.163
8	-25	-25.062	-25.082	-25.005	-25.083	-25.079	-25.023	-25	-25.083	0.083
9	-20.107	-20.212	-20.213	-20.261	-20.175	-20.126	-20.205	-20.107	-20.261	0.154
10	-15.217	-15.209	-15.265	-15.281	-15.275	-15.235	-15.276	-15.209	-15.281	0.072
11	-10.269	-10.249	-10.31	-10.321	-10.291	-10.228	-10.28	-10.228	-10.321	0.093
12	-4.941	-4.934	-4.933	-5.029	-4.993	-4.962	-4.989	-4.933	-5.029	0.096
13	-2.321	-2.404	-2.333	-2.44	-2.404	-2.39	-2.362	-2.321	-2.44	0.119
14	-0.11	-0.122	-0.114	-0.157	-0.169	-0.122	-0.102	-0.102	-0.169	0.067
15	-0.049	0.046	0.028	-0.036	0.003	0	0.018	0.046	-0.049	0.095

DeltaMAX	0.271
DeltaMoyen	0.150

On peut observer dans le Tableau 3.7 que 15 essais à différentes pressions de vide ont été effectués. Pour chacun de ces essais, les 7 capteurs de pression étaient branchés. Les valeurs maximale et minimale ont ensuite été calculées pour les sept capteurs de pression. La dernière rangée (essai 15) correspond à la pression ambiante suite à l'essai qui est bien revenue à 0 kPa. La valeur la plus élevée DeltaMAX, la différence entre P_MAX et P_MIN, enregistrée lors de tout l'essai est de 0.271 kPa. L'incertitude maximale enregistrée sur les capteurs de pression est donc de ± 0.135 kPa. Il est de plus intéressant de noter que les P_MAX et P_MIN ne se retrouvent pas toujours sur les mêmes capteurs de pression. Les différences ne sont donc pas dues à la calibration des capteurs.

3.5.3 Mesures de la masse

Une balance électronique est branchée directement sur le programme d'acquisition et permet d'obtenir sans délai la masse d'huile de silicium contenue dans un bidon. La

différence de masse entre le début de l'essai et un instant donné donne la masse totale infusée dans l'échantillon. Lorsque le régime permanent est atteint, le débit d'huile de silicone devient constant. Pour vérifier ce fait, il suffit de s'assurer que la dérivée de la perte de masse est constante : si, pendant un temps donné, la différence de masse enregistrée reste constante, alors le régime permanent est atteint. La balance de marque Setra possède une précision au centième de gramme.

3.5.4 Bouton pressoir

Les données fournies par les différents capteurs sont acquises à toutes les 0.1 secondes et sont enregistrées dans un classeur Excel. Cette capacité d'acquisition permet un enregistrement détaillé des données. Cependant, il serait long et fastidieux de sélectionner les quelques données importantes lors d'une expérience. Le montage expérimental a donc été muni d'un bouton pressoir qui permet à chaque impulsion d'enregistrer une série de données. L'utilisateur peut alors sélectionner les moments précis où il désire obtenir les données relatives à ses observations. Mesurer l'évolution du front d'imprégnation est la fonction principale du bouton pressoir, mais il peut aussi être utilisé pour établir les modèles de compaction. Les données sont donc acquises dans deux classeurs Excel ; le premier constitue toutes les données brutes à 0.1 secondes d'intervalle et est enregistré sous le format suivant : *nom-de-fichier.a* ; le second ne compile que les données enregistrées à chacune des impulsions dans le fichier suivant : *nom-de-fichier.b*.

Note : Lors de l'enregistrement des temps de passage d'une infusion, il est possible que deux enregistrements aient été effectués pour une même observation. L'intervalle entre ces deux impulsions étant très faible et facilement identifiable, il suffit alors de supprimer une des lignes du *fichier.b*.

3.6 Méthode d'évaluation de la compaction et de la perméabilité d'un milieu poreux compressible lors d'une infusion

Une méthode pour caractériser la compaction et la perméabilité pendant une infusion est présentée à l'Annexe B. On y décrit les éléments du montage, les principales données affichées par l'interface graphique du logiciel et les manipulations à effectuer pour obtenir la perméabilité d'un milieu poreux compressible. Le problème de la variabilité de la porosité, de la perméabilité et du gradient de pression lors d'une infusion peut être simplifié par l'acquisition de données couplées en régime permanent. En effet, l'infusion s'effectue généralement à pression constante. Or, il est possible d'obtenir un débit constant de fluide en poursuivant l'expérience jusqu'à ce que l'écoulement soit stabilisé. Ainsi, le gradient de pression, l'épaisseur du renfort, la porosité, la perméabilité et le débit deviennent constants dans le temps, même s'ils varient dans le sens de l'écoulement.

On verra qu'il est possible de coupler la distribution de la pression avec le modèle d'expansion du renfort fibreux. Puisque la pression varie tout au long du moule, alors l'épaisseur du renfort varie également. Il est possible de résoudre l'équation de Darcy pour chacune des épaisseurs enregistrées et obtenir ainsi la perméabilité en fonction de différents taux de fibres. Avec la nouvelle procédure proposée, un seul essai permet donc d'obtenir la perméabilité pour une large gamme de porosités.

Un essai est divisé en trois étapes successives :

1. Cycles de compaction à sec
2. Infusion de l'échantillon
3. Perméabilité en régime permanent

3.6.1 Cycles de compression à sec

Avant toute imprégnation, il importe d'effectuer des cycles de compaction afin d'assurer un taux de fibres plus élevé et surtout, de stabiliser l'état du renfort. De plus, en enregistrant les données de compaction et de relaxation, il en résulte une caractérisation plus complète du renfort fibreux. On obtiendra alors l'équation de compaction à sec, qui permet d'évaluer l'épaisseur initiale du matériau en fonction de la pression appliquée. Cette information est utile pour la mise au point d'un procédé d'infusion.

La caractérisation des cycles de compaction à sec consiste à effectuer 10 mesures à intervalles réguliers lors de la montée en pression et 10 mesures lors du relâchement de la pression. À cette fin, il suffit de brancher et débrancher le tuyau reliant la pompe au pot de vide en dévissant légèrement la vis de contrôle pour laisser l'air s'échapper. L'entrée d'huile reste fermée en tout temps. Il importe de bien faire attention, dans le cas de l'expansion du renfort, de ne pas comprimer l'échantillon entre deux mesures, ce qui aurait pour effet de changer l'état de la courbe puisque l'expansion dépend de la pression initiale appliquée.

Cet essai permet également de vérifier l'étanchéité du système. En effet, un système qui comporte une fuite subit des changements de pression interne. Pour remédier à ce problème, il suffit d'atteindre la pression de vide désirée, puis d'isoler le système complètement en fermant les valves d'entrée et observer si la pression de vide reste constante. Un système fermé, qui ne subit pas de pertes de pression, peut être considéré comme étanche.

3.6.2 Infusion de l'échantillon

L'infusion de l'échantillon correspond à l'étape d'imprégnation du renfort par l'huile de silicone (Figure 3.15). Elle débute lorsque la valve d'entrée est ouverte et se termine lorsque l'échantillon est imprégné. L'huile de silicone pénètre d'abord dans le milieu de dispersion, ce qui a pour résultat d'aligner le front linéairement. Par la suite, les données sont acquises dès que le front croise chacune des lignes parallèles espacées de 20 mm. Les valeurs de pression et d'épaisseur, ainsi que le temps requis pour l'imprégnation et la masse d'huile infusée sont enregistrés pour chaque distance parcourue.



Figure 3.15 : Avancement du front d'imprégnation lors d'une infusion.

Lors de cet essai, à mesure que le front d'imprégnation s'approche de la fin de l'échantillon, la pression interne diminue, ce qui force une expansion du matériau. Cette expansion du renfort est enregistrée et utilisée pour établir le modèle d'expansion du renfort fibreux. Les temps de passage du front d'imprégnation sont aussi enregistrés pour évaluer la vitesse d'avancée du front et en déduire la perméabilité, puis pour fins de comparaison avec la simulation numérique.

3.6.3 Perméabilité en régime permanent

L'essai en régime permanent est effectué après l'étape d'infusion. La pression interne est ajustée afin d'obtenir la pression désirée au dernier capteur de pression, celui situé à l'extrémité de l'échantillon. L'infusion est ensuite poursuivie jusqu'à l'atteinte d'un régime permanent. À ce moment, les variables du système deviennent constantes dans le temps : les pressions, épaisseurs et débit ne varient plus. L'utilisateur enregistre alors une série de dix mesures à intervalles réguliers de dix secondes. Les données sont ensuite analysées pour obtenir la perméabilité en fonction de la porosité.

CHAPITRE 4

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA COMPACTION CYCLIQUE DES RENFORTS FIBREUX

Pour mieux comprendre le déroulement de l'infusion sous membrane flexible, il est impératif de bien étudier et caractériser le comportement du renfort lors d'une compression et d'une expansion. En premier lieu, le renfort d'acrylique a été testé avec une machine de traction pour étudier la compaction des renforts fibreux. Ensuite, le phénomène d'expansion a été étudié. Enfin, l'étude a été poursuivie avec le banc d'essai expérimental, qui représente une infusion réelle.

Lorsqu'on applique une pression sur un renfort fibreux, celui-ci se comprime, ce qui réduit son épaisseur. Ce phénomène est présenté à la Figure 4.1. L'état du renfort peut aussi être représenté par le taux volumique de fibres qui est lié à l'épaisseur par l'équation 2.2. La représentation de la compaction par taux volumique de fibres permet de comparer des échantillons puisqu'elle considère la densité surfacique qui varie légèrement.

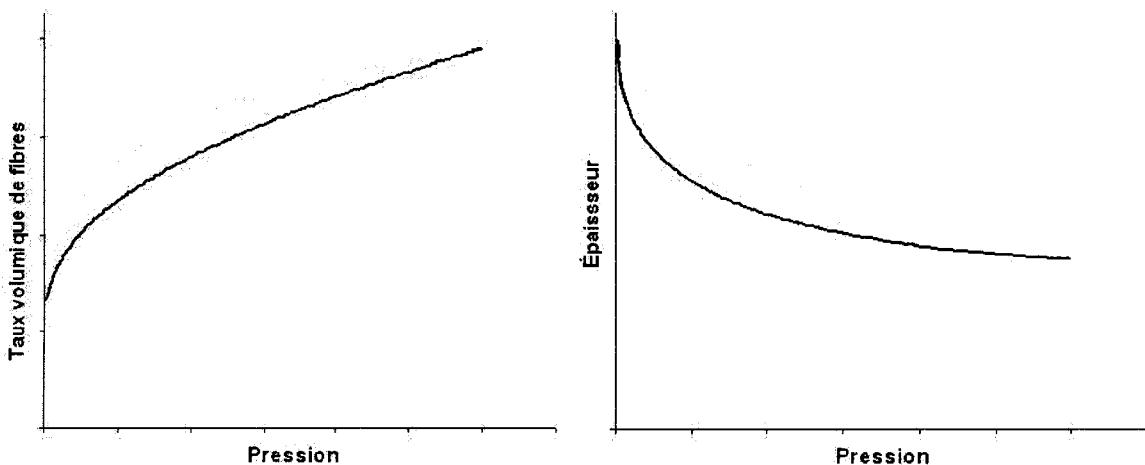


Figure 4.1 : Compaction d'un renfort exprimée en termes de taux volumique de fibres et d'épaisseur.

Le *Materials Test System*, ou MTS (Figure 4.2), est une machine hydraulique, qui permet d'appliquer une force sur un matériau et de mesurer le déplacement qui en résulte. Grâce au logiciel TestLoop[©], il est possible de contrôler la vitesse de déplacement du piston inférieur et d'appliquer des cycles de montée et descente. Ceci permet d'appliquer une compression au renfort, suivi d'une expansion. Une cellule de charge de 1 kN a été installée afin de mesurer la force résultant de la compaction. Cette force est la réaction du renfort qui, tel un ressort, tend à revenir à son état libre.

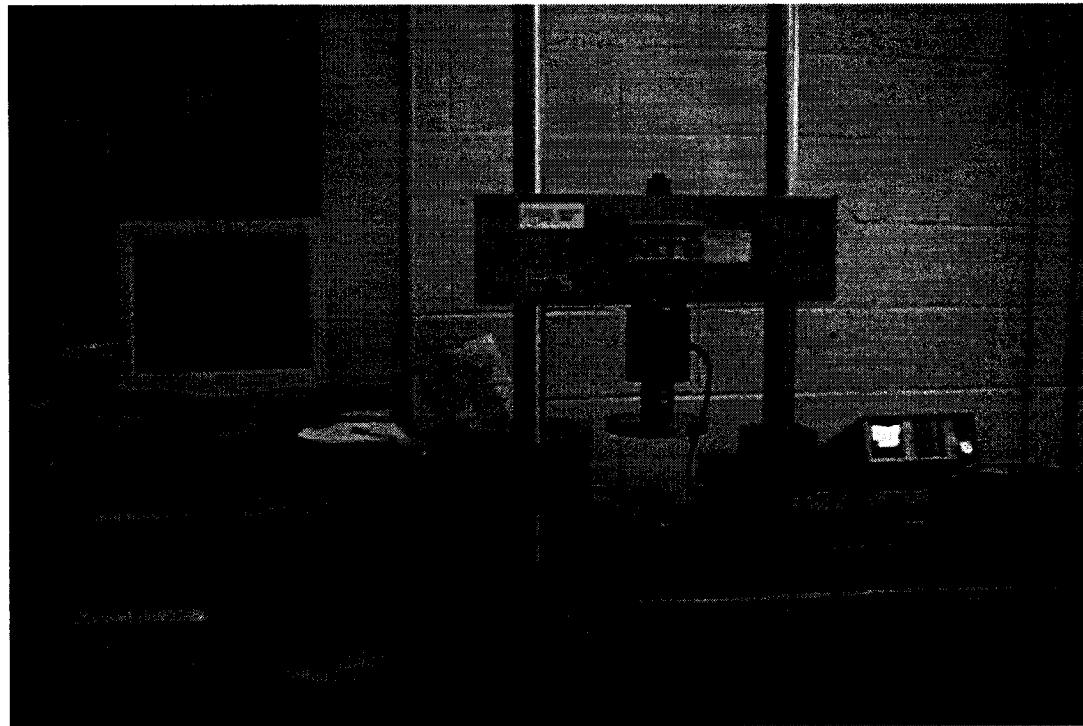


Figure 4.2 : Banc d'essai de compaction sous parois rigides.

Le système a été muni de deux plaques parallèles au milieu desquelles est placé un échantillon carré de 100 mm de côté. Le déplacement des plaques est contrôlé et la force F résultante est mesurée. La contrainte appliquée sur l'échantillon de largeur L est déduite grâce à l'équation 4.1 :

$$\sigma = \frac{F}{L^2} \quad (4.1)$$

4.1 Cycles de compaction des renforts fibreux

Une étude préliminaire permet d'analyser les phénomènes qui se produisent lors de la déformation des renforts fibreux et d'en observer les effets dans la modélisation du procédé d'infusion. L'étude est divisée en trois parties : la compaction, l'expansion et le cyclage.

a) Compaction

Un essai de compaction débute alors qu'un échantillon est libre entre deux plaques rigides. À mesure que les deux plaques se rapprochent à vitesse constante, l'échantillon est écrasé et son épaisseur diminue. La quantité de fibres restant identique dans l'espace disponible, le taux de fibres augmente. La force qu'exerce le renfort sur la paroi est enregistrée. Elle correspond à la pression de compaction. La compaction d'un renfort fibreux peut être observée à la Figure 4.3. La courbe de compaction des fibres peut être représentée par une loi de puissance du type [9] :

$$V_f = A \cdot P^B \quad (4.2)$$

où A représente le taux de fibres initial décompacté et B est un indice de raideur.

b) Expansion

Lorsque la pression prévue pour l'essai est atteinte, la seconde partie du cycle débute et les deux plaques s'éloignent à vitesse constante jusqu'à revenir à l'épaisseur initiale. La courbe d'expansion n'est pas identique à la courbe de compaction, puisque survient un phénomène d'hystéresis [22]. La courbe d'expansion peut aussi être représentée par une loi de puissance (éq. 4.2) et peut être observée à la Figure 4.3.

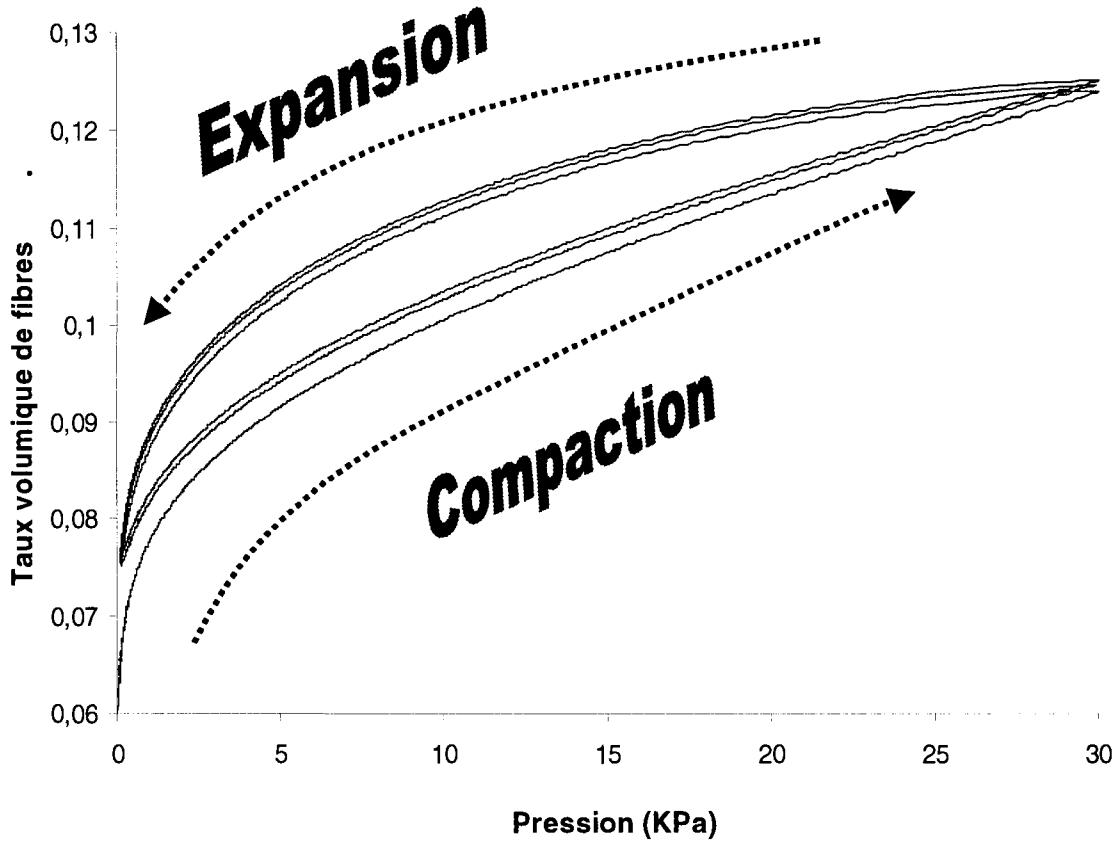


Figure 4.3 : Cycles de compaction à 30 kPa d'un renfort fibreux.

Cet aspect du cycle, durant lequel le renfort subit une expansion, est très important pour la modélisation de l'infusion. En général, les modèles empiriques usuels ne considèrent qu'une seule courbe pour modéliser le comportement en compaction des renforts fibreux. La compaction d'un matériau est ainsi utilisée lorsqu'un matériau est comprimé et lorsqu'il est en expansion. Jusqu'alors, l'expansion n'était pas considérée, puisqu'elle n'était pas systématiquement modélisée. Cependant, elle est importante en infusion : lorsque la résine imprègne le renfort, celui-ci subit une expansion liée aux changements internes de pression. Ceci a pour effet d'augmenter la perméabilité du milieu poreux et facilite l'imprégnation. Une modélisation adéquate de l'infusion doit donc considérer cette expansion lors de l'imprégnation.

c) Cyclage

Il est possible d'observer sur la Figure 4.3 un autre phénomène propre aux renforts fibreux lors d'un cycle de compaction. Suite à la complétiion d'un cycle de compaction-expansion, les fibres ont subi une réorganisation. Elles peuvent être comprimées davantage lors de la seconde compression et ne suivent plus la même courbe de compaction. Dans le cas du renfort d'acrylique, ce phénomène se stabilise dès le troisième cycle : la compression et l'expansion sont identiques pour les cycles subséquents. Il est donc approprié de comprimer à plusieurs reprises le matériau avant de l'impréigner : le taux de fibres final sera plus élevé et la variabilité du comportement des échantillons sera réduite. Cette observation s'applique aussi aux fibres tissées [13, 38].

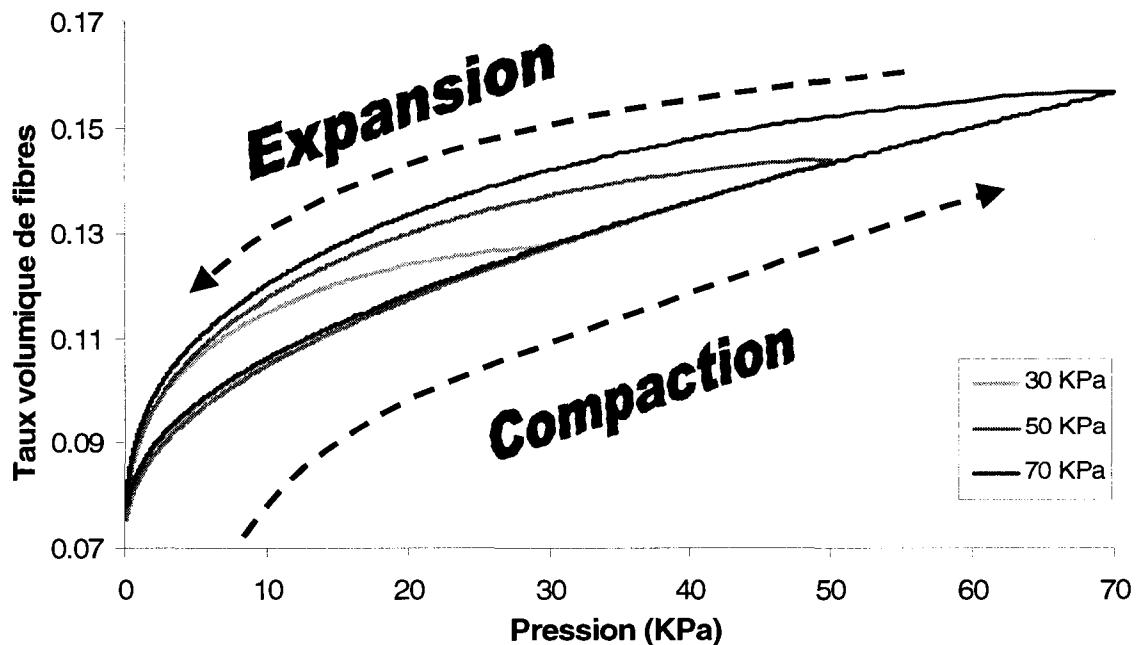


Figure 4.4 : Cycle de compaction et expansion de l'acrylique à différentes pressions.

La Figure 4.4 représente le troisième cycle de compaction-expansion d'un matériau à trois pressions maximales différentes : 30, 50 et 70 kPa. Dans les trois cas, la compression s'effectue en empruntant la même courbe de compaction, mais l'expansion

du matériau suit trois courbes distinctes qui ne sont pas identiques à la courbe de compression. Contrairement à la compaction, il n'existe pas seulement une courbe d'expansion pour caractériser le matériau. L'expansion d'un matériau est tributaire de la pression maximale appliquée.

La modélisation numérique de l'expansion d'un milieu poreux ne peut pas reposer sur une multitude de courbes afin de représenter le phénomène d'expansion. En effet, une caractérisation de l'expansion d'un renfort en fonction de la pression serait longue et inutile. Une méthode simple pour contourner ce problème consiste à appliquer la pression de vide maximale sur le renfort avant l'infusion et ensuite baisser la pression jusqu'à la pression désirée. De ce fait, la modélisation n'impliquera donc qu'une seule courbe d'expansion qui correspond à l'expansion maximale possible du renfort à partir de la pression de compaction maximale.

4.1.1 Expansion d'un renfort mouillé

Le cycle de compression étudié précédemment n'est pas le reflet exact du comportement du renfort lors d'une infusion. Un renfort mouillé n'est pas soumis aux mêmes conditions expérimentales qu'un renfort sec puisque le contact entre les fibres se trouve lubrifié et que celles-ci se réarrangent ainsi plus aisément, ce qui résulte en un taux de fibres plus élevé [44]. Un renfort mouillé est beaucoup plus proche des réelles conditions d'infusion où le renfort est complètement saturé de fluide.

Un montage supplémentaire présenté à la Figure 4.5 était nécessaire afin de réaliser des tests avec des échantillons mouillés. Une plaque de plexiglas incompressible aux pressions appliquées entourée d'un joint de mastic et remplie d'huile de silicone a été ajoutée entre les plaques de compression. Ceci permet de garder l'échantillon mouillé et de mieux représenter le phénomène d'expansion lors de l'infusion.

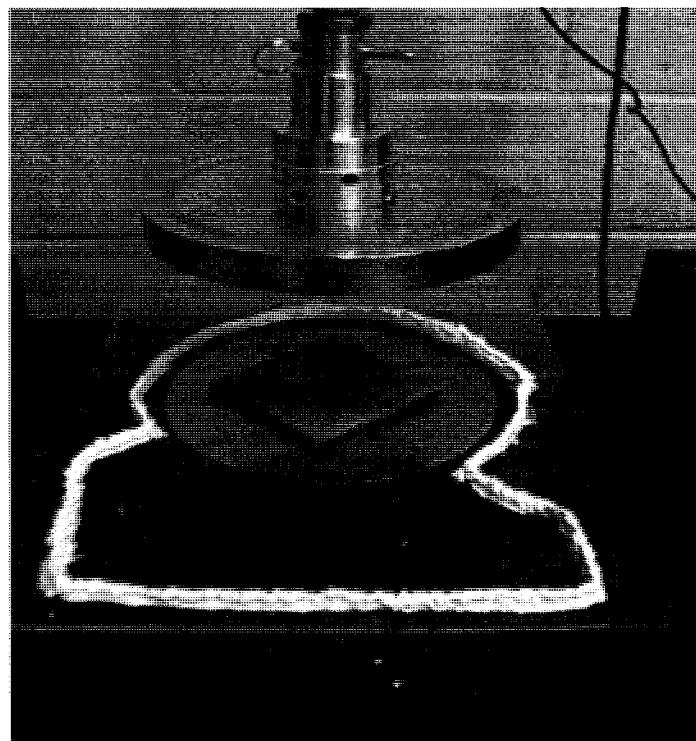


Figure 4.5 : Compaction d'un renfort d'acrylique mouillé.

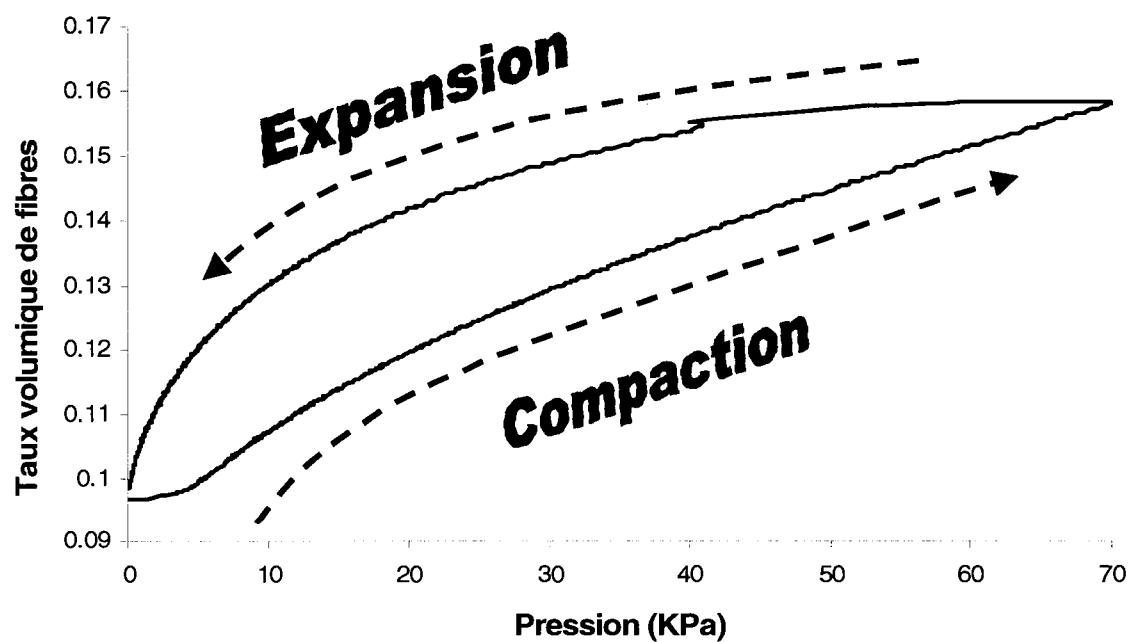


Figure 4.6 : Courbe moyenne des neuf essais effectués pour un cycle de compaction à 70 kPa de pression de vide maximale.

En observant la Figure 4.6, on peut remarquer que celle-ci est semblable à la courbe de la Figure 4.4. Par contre, un point d'infexion survient lors de l'expansion vers 40 kPa. De plus, le début de la compaction semble aussi altéré. Ce phénomène est créé par la présence d'huile de silicone, qui altère la courbe d'expansion. Il est présent sur tous les essais sur renfort mouillé, à différentes pressions. Dans le cas d'une compression, la consolidation du milieu poreux force le fluide hors du renfort [18]. Dans le cas d'une expansion, le liquide doit pénétrer à l'intérieur du milieu poreux. Lors d'une infusion, un gradient de pression permet une bonne imprégnation, mais ce banc d'essai est à pression ambiante. Alors, une partie de l'huile de silicone ne peut pénétrer à l'intérieur de l'échantillon et l'huile est remplacée par de l'air. La loi de Terzaghi (éq. 2.6) stipule qu'une partie de la contrainte est supportée par le squelette du renfort fibreux, en complément de la pression hydrostatique du fluide. Lorsque l'air remplace l'huile, alors la contrainte n'est supportée que par le renfort. Cet effet peut être la cause du point d'infexion dans la courbe.

4.2 Plan d'expériences

Pour chaque pression de compaction, 9 échantillons ont été testés. Les expériences ont été effectuées avec des échantillons secs et des échantillons mouillés avec de l'huile de silicone. Le nombre d'essais est donc de 54 pour ce plan d'expériences. Chacun des échantillons est pesé avant l'expérience. La densité surfacique ρ_s du renfort est calculée pour chaque essai en divisant le poids de l'échantillon par sa longueur et sa largeur. Le taux volumique de fibres est déterminé en fonction de l'épaisseur du renfort par l'équation 2.2 qui tient compte de la densité surfacique et permet la comparaison entre des échantillons de masse différente. Les paramètres du plan d'expériences sont présentés au tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Paramètres expérimentaux de la compaction sous parois rigides

Paramètre	Valeur
Échantillon	Mat d'acrylique
Nombre de couches	4 couches
Dimensions des échantillons	100 mm x 100 mm
Densité volumique	1.41 g/cm ³
Densité surfacique	0.0165 g/cm ²
Vitesse de compression	2 mm/min
Vitesse d'expansion	2 mm/min
Nombre de cycles	3
Pression de compaction	30, 50 et 70 kPa

4.3 Résultats

Les résultats sont présentés sous forme de graphique, dans les Figures 4.7 à 4.12, qui donnent le taux volumique de fibres d'acrylique en fonction de la pression de compaction. On peut y observer l'expansion d'échantillons d'acrylique secs et mouillés à partir de l'épaisseur minimale obtenue pour des pressions de compaction de 30, 50 et 70 kPa.

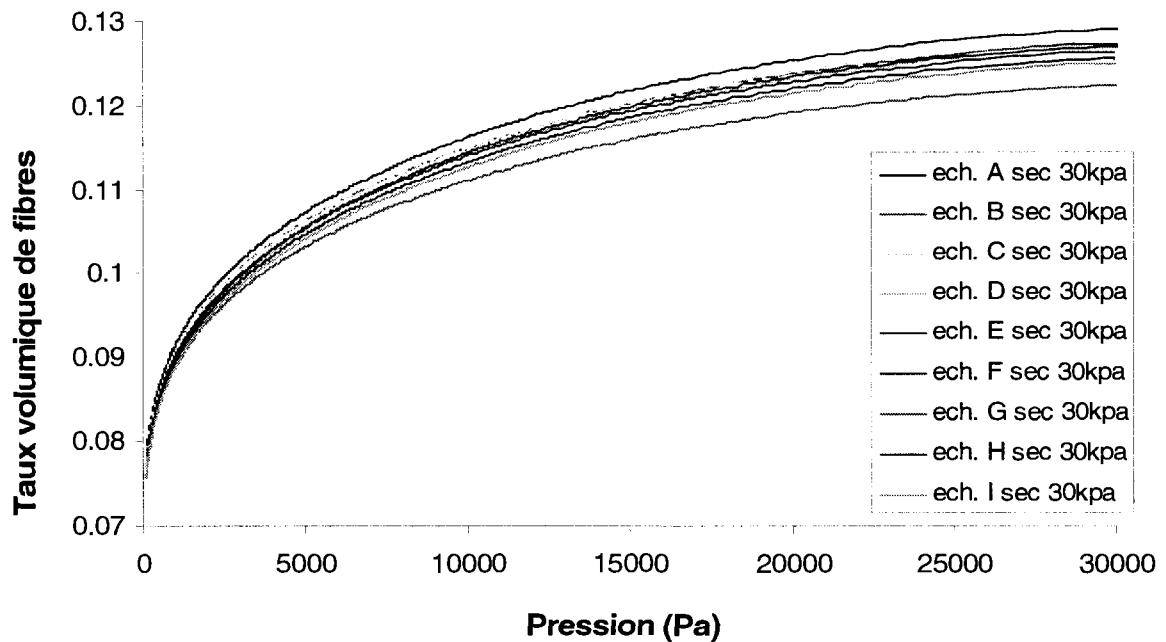


Figure 4.7 : Expansion de 9 échantillons d'acrylique secs à partir de 30 kPa.

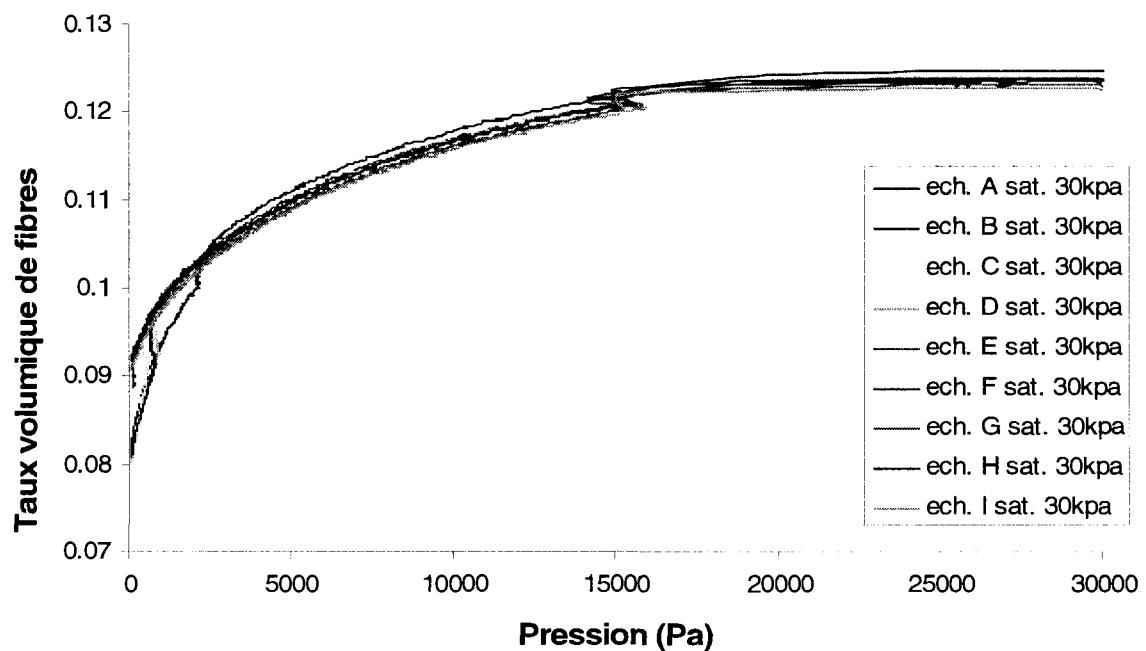


Figure 4.8 : Expansion de 9 échantillons d'acrylique mouillés à partir de 30 kPa.

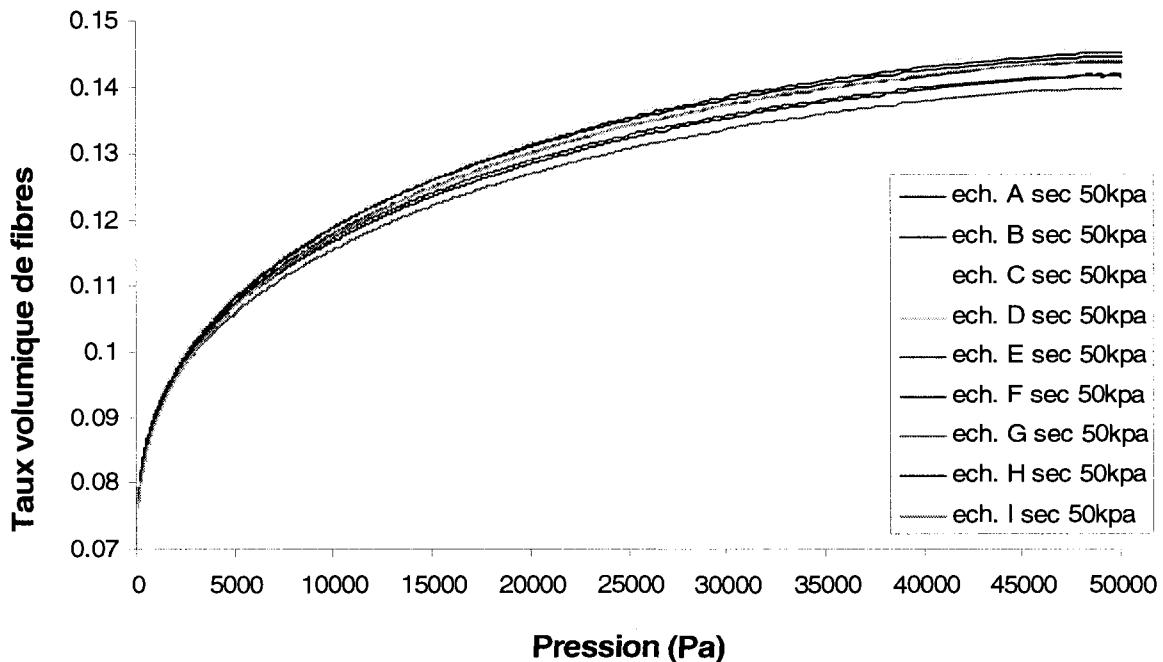


Figure 4.9 : Expansion de 9 échantillons d'acrylique secs à partir de 50 kPa.

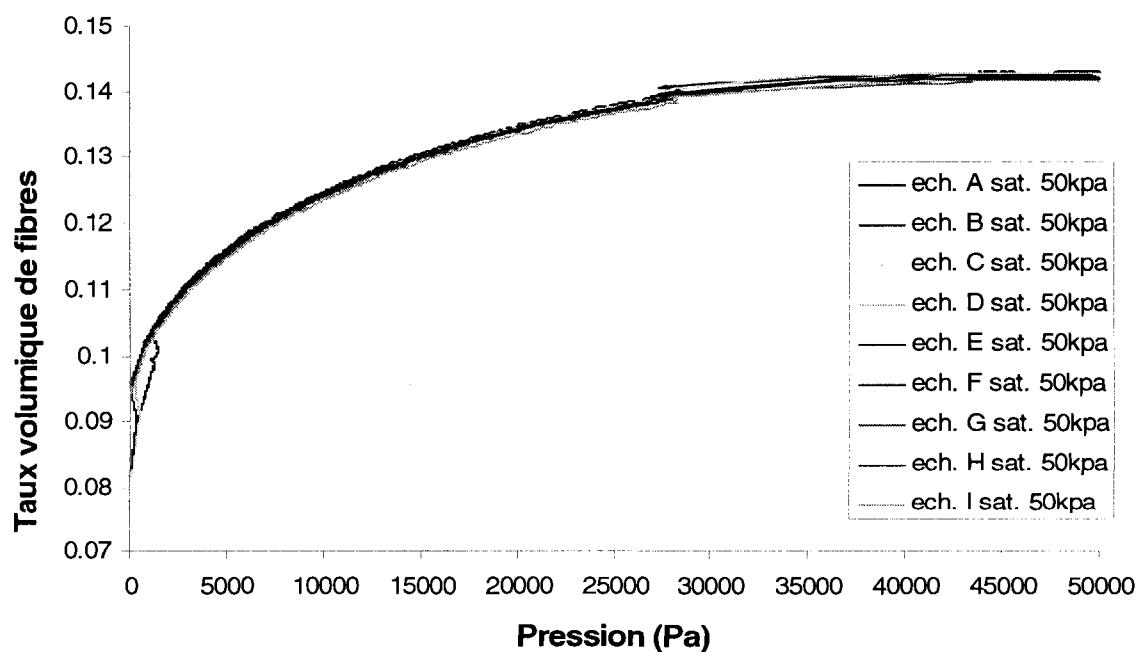


Figure 4.10 : Expansion de 9 échantillons d'acrylique mouillés à partir de 50 kPa.

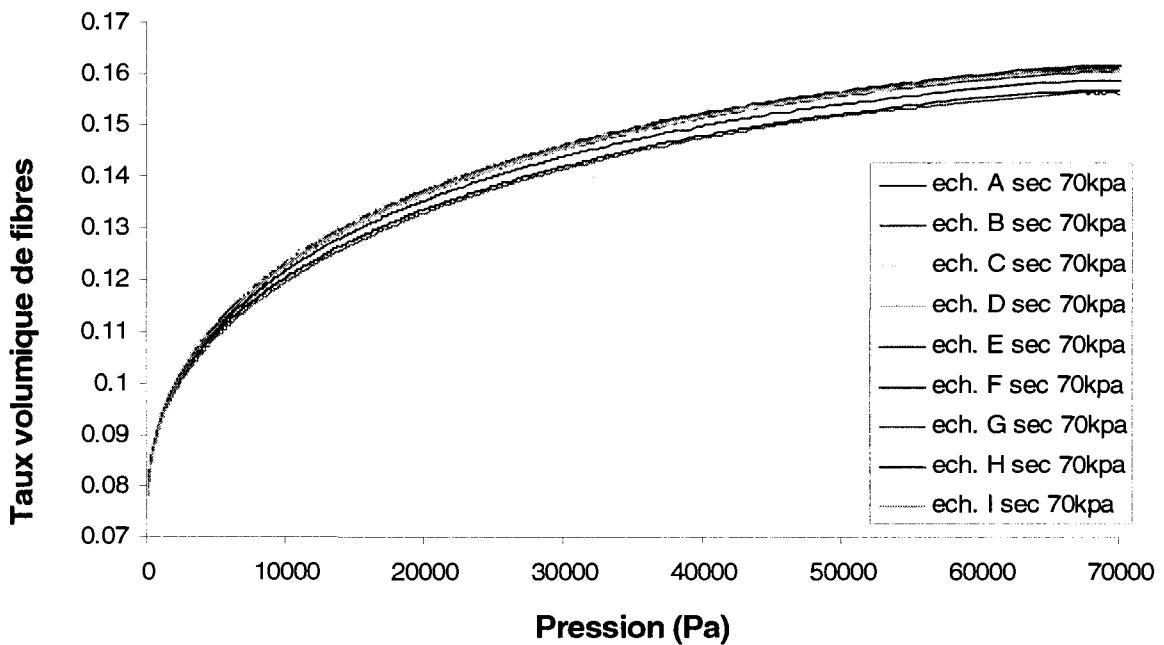


Figure 4.11 : Expansion de 9 échantillons d'acrylique secs à partir de 70 kPa.

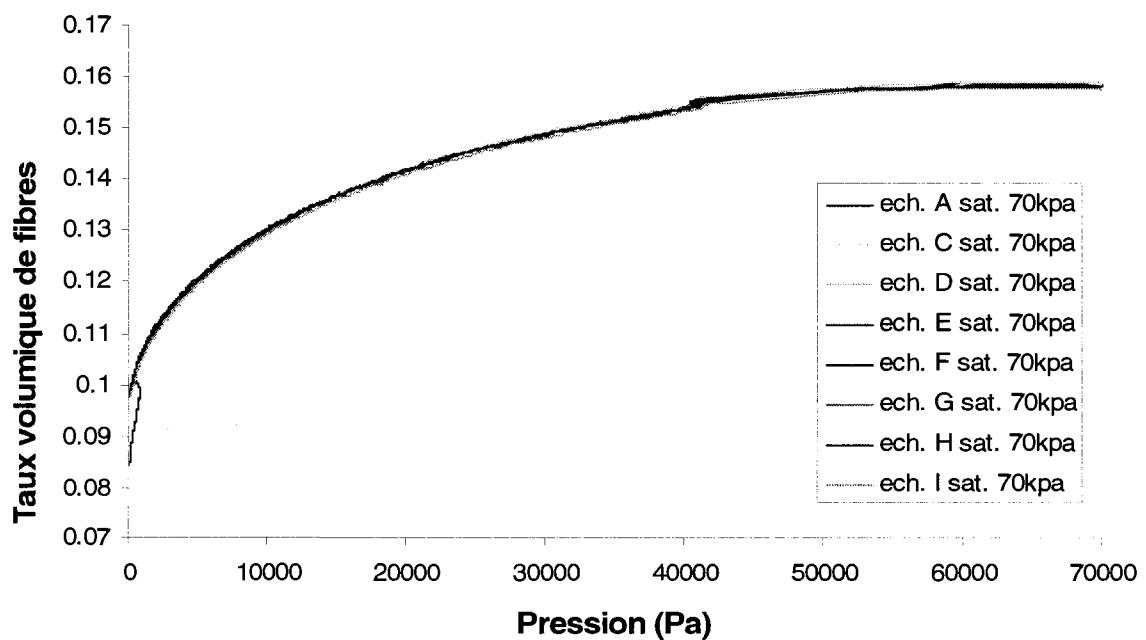


Figure 4.12 : Expansion de 9 échantillons d'acrylique mouillés à partir de 70 kPa.

Plusieurs constatations peuvent être tirées de l'analyse de ces courbes :

- a) L'épaisseur du renfort comprimé est d'autant plus faible que la pression de compaction est forte.
- b) Les renforts comprimés ne reviennent jamais à leur épaisseur initiale à la fin de l'expansion, et l'épaisseur décompactée reste toujours plus faible pour le renfort mouillé.
- c) La dispersion du comportement est plus faible pour les renforts mouillés et diminue quand la pression de compaction augmente.
- d) Une certaine instabilité se manifeste à la fin de l'expansion de renforts mouillés.
- e) Le début de l'expansion des renforts imbibés est plus lent que pour les renforts secs. Cette différence est liée à un point d'infexion qui peut être le résultat de la déconsolidation du milieu poreux. De ce fait l'expansion d'un renfort imbibé est différente de l'expansion d'un renfort sec.

En comparant les taux volumique maximaux atteints pour les 18 échantillons secs et saturés (Tableau 4.2), on peut voir que la moyenne est sensiblement identique.

Tableau 4.2 : Taux volumique de fibres maximal atteint à -70KPa pour 18 échantillons

Échantillon	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Moy.
Sec (%V _f)	16.12	16.03	16.19	15.66	16.10	15.61	15.62	15.85	16.09	15.91
Mouillé (%V _f)	15.85	15.82	15.86	15.90	15.65	15.81	15.84	15.81	15.76	15.81

Tel que mentionné par Robitaille et al.[44], la lubrification du renfort fibreux permet d'obtenir un taux de fibres plus élevé. Une expérience comparative effectuée sur 18 échantillons permet de constater que le renfort d'acrylique ne présente pas cette particularité. En effet, la moyenne des pressions obtenues sur les neuf échantillons mouillés est légèrement plus basse que celle des renforts secs. Cette différence de 0,1% est faible, alors les moyennes sont considérées semblables. Cependant, la dispersion des

résultats observée au Tableau 4.2 est beaucoup plus grande pour les renforts secs que pour les renforts mouillés dont le contact entre les fibres est lubrifié.

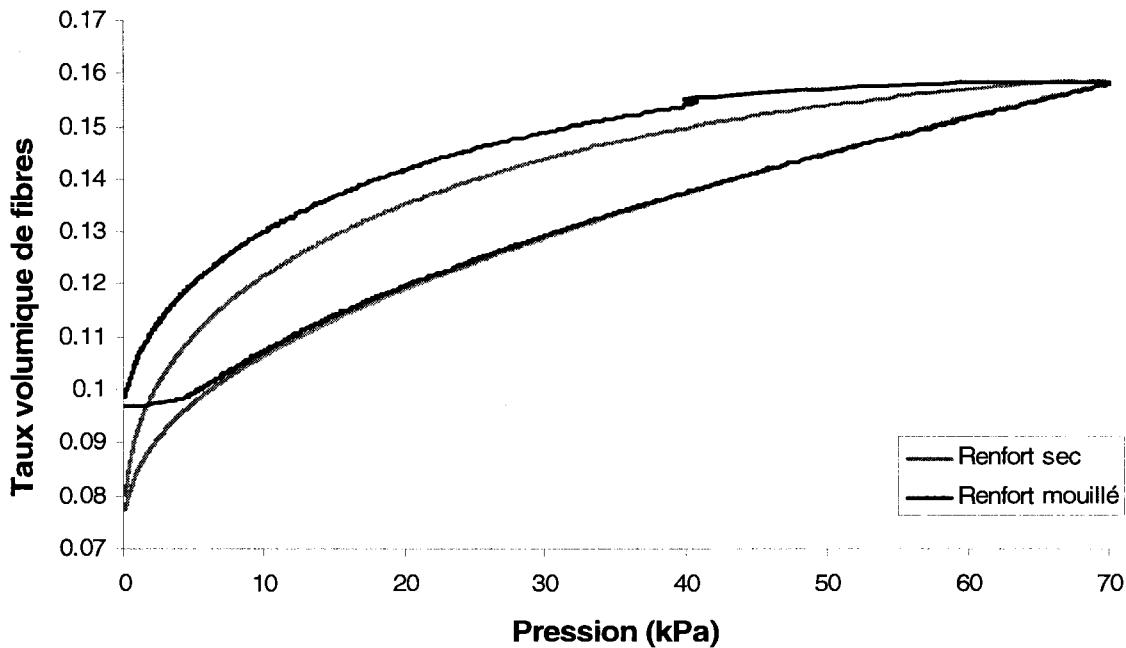


Figure 4.13 : Comparaison du cycle de compaction du renfort d'acrylique sec et mouillé.

La comparaison des cycles secs et mouillés (Figure 4.13) permet de visualiser l'effet de la lubrification sur le comportement du renfort en infusion. En effet, la courbe de compaction semble identique dans les deux cas, mais l'expansion est différente entre le renfort sec et mouillé. Cette différence peut être occasionnée par l'aspiration d'huile causant un point d'inflexion qui altère la courbe d'expansion du renfort mouillé.

4.4 Expansion d'un milieu poreux sous membrane flexible

Lors d'une infusion, le renfort est soumis à des pressions de compaction qui évoluent et modifient dynamiquement l'épaisseur. Le taux de fibres varie à mesure que le fluide se propage à l'intérieur du renfort. À l'intérieur du moule d'infusion, la pression est enregistrée en différents points où se situent les sept capteurs de pression, soit à 0, 80,

160, 240, 340, 440 et 600 mm. Au dessus de trois de ces points, (80, 160 et 240 mm) sont placés les capteurs LVDT pour mesurer l'épaisseur de l'échantillon qui varie en fonction de la pression appliquée. Il est possible d'observer sur la Figure 4.14 la variation de pression occasionnée par le passage du front d'imprégnation. Les capteurs sont tous initialement à la même pression de vide et un changement de cette valeur témoigne de l'avancement du front.

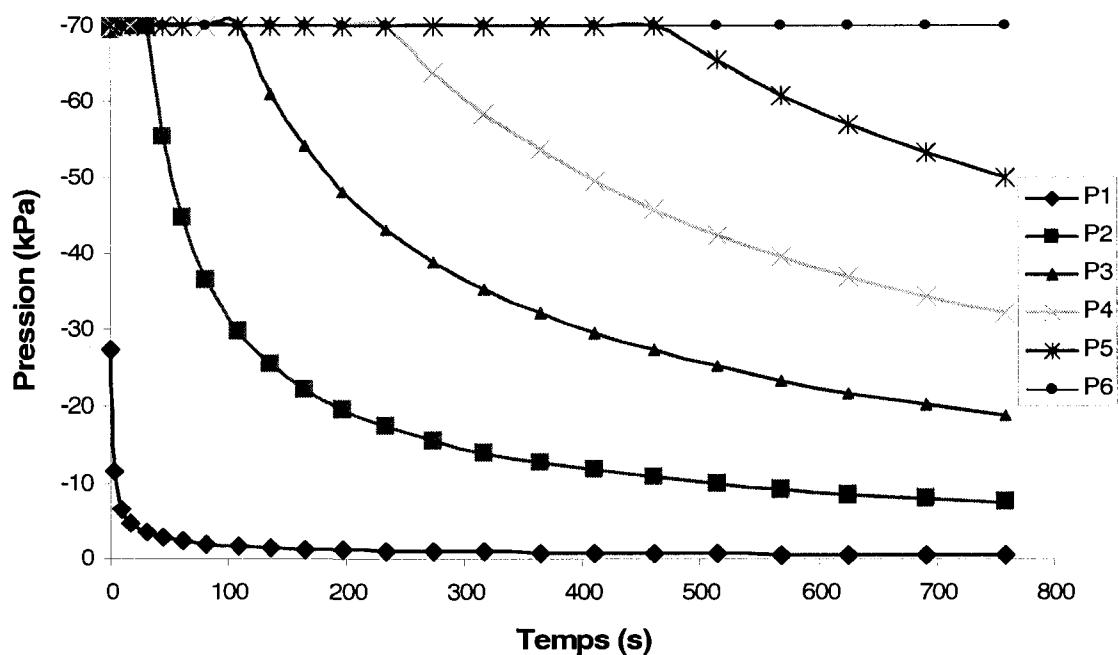


Figure 4.14 : Évolution du champ de pression lors d'une infusion unidirectionnelle.

À titre d'exemple, après 400 secondes, les 4 premiers capteurs ont enregistré une différence de pression. Le front d'imprégnation se situe à cet instant entre les capteurs P4 et P5, c'est-à-dire entre 240 et 340 mm du début de l'échantillon. Les valeurs de pression des capteurs sont les suivantes : -0.8, -12.8, -32.25, -53.58 et -70.1 kPa. Ainsi, la pression appliquée sur le renfort diffère sur son axe longitudinal et l'épaisseur du renfort est différente pour chacun de ces points.

Le premier capteur de pression placé au niveau du port d'injection du fluide varie d'une façon tellement radicale qu'il serait difficile d'obtenir un modèle d'expansion cohérent à partir de ses mesures. Les LVDT ont donc été positionnés au dessus des capteurs 2, 3 et 4. De cette façon, à tout moment et de manière représentative, on peut obtenir l'épaisseur du renfort reliée à la pression de compaction appliquée. À partir de ces mesures, on peut établir, pour chacun des essais, le modèle d'expansion du renfort fibreux tracé à la Figure 4.15. L'épaisseur (et non le taux volumique de fibres) sera utilisée ici pour une meilleure visualisation et compréhension de la démarche.

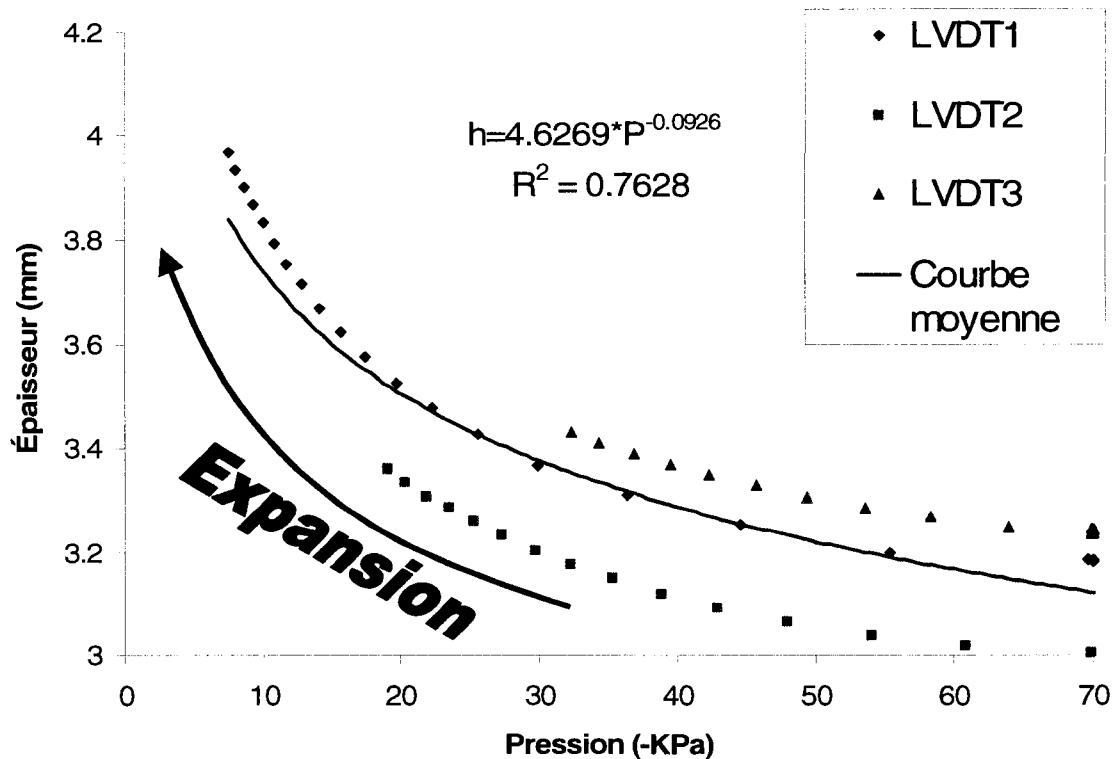


Figure 4.15 : Comportement en expansion initial de l'acrylique.

On peut d'abord remarquer que l'épaisseur de l'échantillon dépend de la pression à laquelle il est soumis et semble obéir à une loi de puissance [9]. Les différentes courbes des LVDT ne se superposent pas, mais semblent néanmoins obéir à un comportement d'expansion similaire. Cette variabilité provient de l'épaisseur initiale comprimée de

l'échantillon qui est différente pour chaque capteur LVDT. Cette variabilité est relativement élevée soit $(3.246\text{mm} - 3.003\text{mm}) / 3.003\text{mm} * 100 = 8.1\%$, et sera corrigée pour mieux représenter les résultats ultérieurs. Ces observations montrent bien que la densité de surface du matériau n'est pas uniforme, sinon, toutes les lectures initiales des trois capteurs seraient identiques. Donc, les épaisseurs à 70 kPa sur la Figure 4.15 seraient identiques, ce qui n'est pas le cas.

Le capteur LVDT 1 est le capteur dont l'épaisseur évolue le plus. Avant l'imprégnation, la pression initiale est identique tout au long de l'échantillon et l'épaisseur aussi. Par contre, à la fin de l'infusion, la pression au LVDT 1 est de -7.5 kPa, alors que les pressions aux capteurs 2 et 3 sont de -18 et -32.2 kPa. Il est donc normal que le LVDT 1 indique une expansion plus élevée.

Lors de l'infusion, la lecture des capteurs reste constante jusqu'au passage du front d'imprégnation. Les données constantes peuvent être supprimées dans un premier temps pour limiter la quantité de données inutiles. Dans le cas du LVDT 3, le front d'imprégnation traverse la référence de 240 mm après 239 secondes. Les douze valeurs de pression et d'épaisseur enregistrées jusqu'à ce point sont identiques et une seule information suffit.

Le comportement en expansion du matériau dépend de sa densité surfacique, qui peut varier légèrement puisque des échantillons de dimensions identiques n'ont pas le même poids. L'échantillon est pesé avant chaque expérience et on émet l'hypothèse que la densité surfacique de l'échantillon est constante. En négligeant les variations locales de densité dans l'échantillon, on peut affirmer que le comportement en expansion devrait être identique aux trois points de mesure si l'expansion débute à la même épaisseur initiale. Comme nous cherchons ici à caractériser le comportement moyen du matériau à partir du résultat des mesures effectuées à trois positions différentes (les positions des trois capteurs LVDT), il semble donc naturel de considérer comme épaisseur initiale de

l'expansion du renfort la moyenne des trois lectures des LVDT à la pression de compaction maximale de l'expérience soit ici à 70 kPa.

En résumé, cette hypothèse revient à prendre la valeur moyenne du signal des LVDT comme épaisseur initiale comprimée. La valeur initiale enregistrée par les LVDT est alors modifiée : les capteurs LVDT enregistrent alors une variation d'épaisseur qui est ajoutée à l'épaisseur moyenne initiale. Cette différence de l'épaisseur par rapport à l'épaisseur initiale, qui est dans ce cas de 3.14 mm, est illustrée à la Figure 4.16.

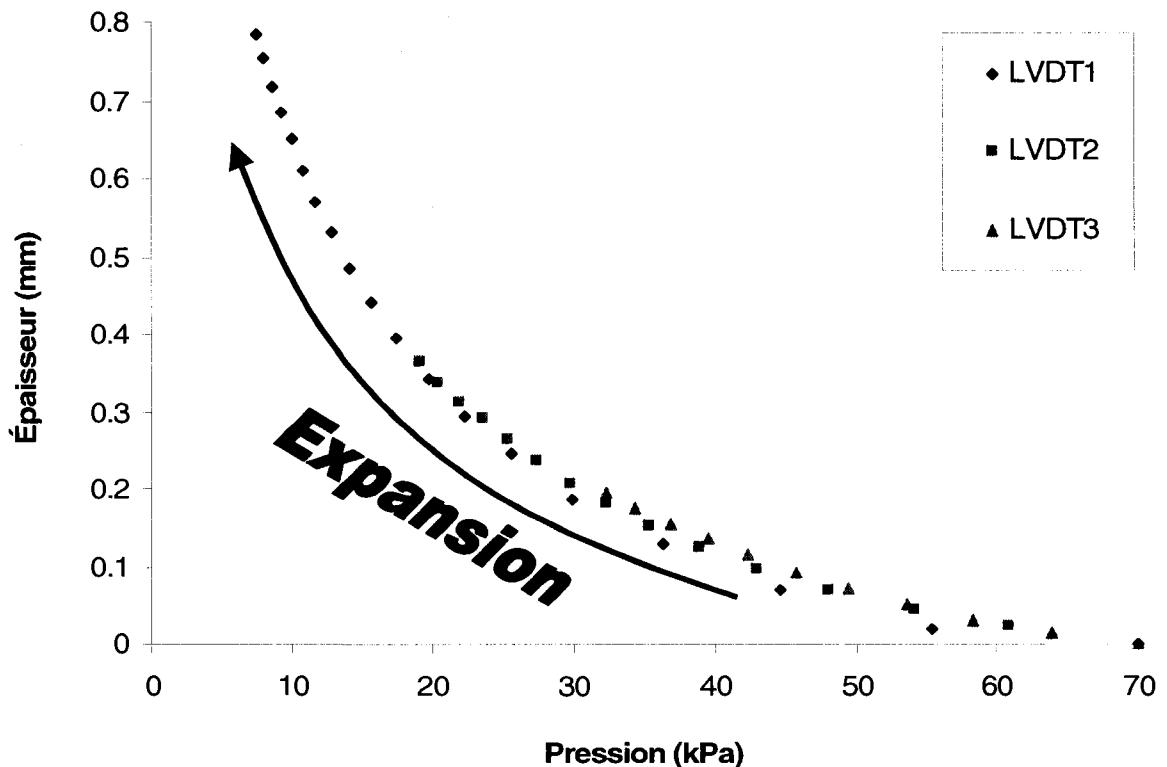


Figure 4.16 : Mesures de la variation d'épaisseur pour 3 capteurs LVDT.

La Figure 4.16 montre que l'expansion mesurée par les LVDT en fonction de la différence de pression appliquée est semblable pour chacun des LVDT si une épaisseur initiale moyenne est considérée. Alors, une courbe corrigée de l'expansion est introduite

et correspond à l'expansion mesurée à la Figure 4.16 additionnée de l'épaisseur initiale moyenne. Elle est montrée à la Figure 4.17 et peut être représentée par une forme exponentielle. Cette approximation au sens des moindres carrés donne une forte corrélation ($R^2 = 0.9858$). La Figure 4.17 montre que les courbes d'expansion des trois capteurs LVDT se superposent, ce qui permet de justifier l'hypothèse posée consistant à mesurer l'expansion à partir d'une épaisseur moyenne.

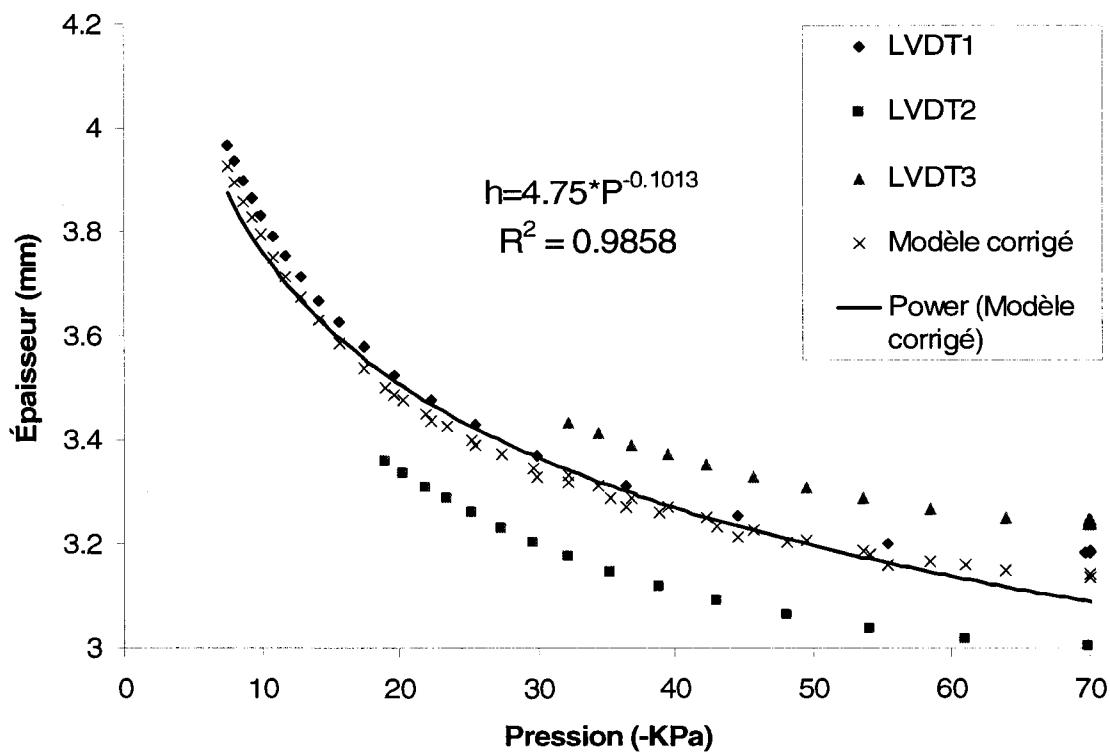


Figure 4.17 : Effet de correction de l'épaisseur initiale de l'acrylique sur le comportement en expansion.

4.4.1 Vérification de l'expansion en régime permanent

Dans une expérience de caractérisation, lorsque l'échantillon a été complètement infusé par de l'huile de silicone, un essai à débit permanent a lieu. La pression au capteur 6, qui

est situé au bout de l'échantillon, est fixée à -70 kPa, et ensuite s'établit le régime permanent. La hauteur et la pression à l'intérieur de l'échantillon sont variables sur la longueur, mais restent fixes localement. Plusieurs points reliant la pression et l'épaisseur sont alors obtenus et sont comparés au modèle d'expansion.

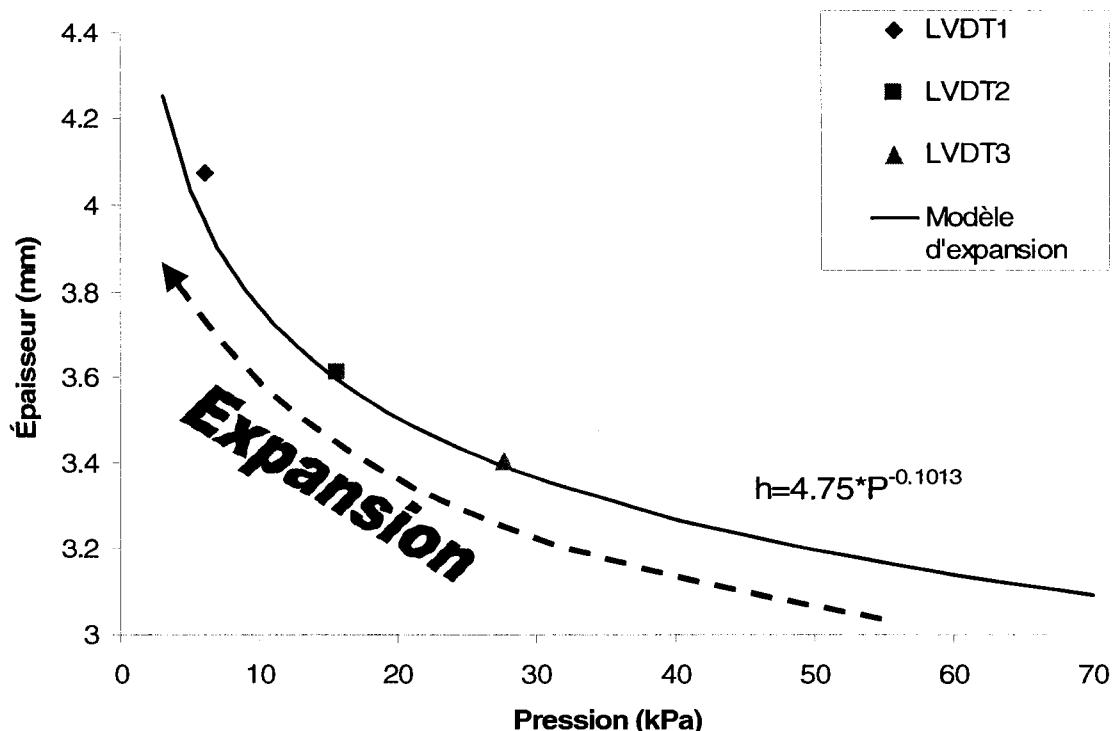


Figure 4.18 : Comparaison de l'expansion de l'acrylique en régime permanent et du modèle corrigé obtenu en régime transitoire.

La Figure 4.18 montre qu'il existe une corrélation entre les différents points provenant d'expériences en régime permanent et le modèle obtenu lors de l'infusion (régime transitoire). Les épaisseurs des trois capteurs LVDT se trouvent superposées à la courbe d'expansion. Ainsi, en régime permanent, l'épaisseur est aussi liée à la pression et peut être représentée par la même loi de puissance identifiée précédemment à partir des résultats obtenus en régime transitoire.

Les capteurs LVDT 2 et 3 indiquent des épaisseurs qui semblent coller au modèle. Aux pressions de -15.6 et -27.7 kPa, le modèle d'expansion transitoire prévoit 3.59 et 3.39 mm, alors que les valeurs des épaisseurs mesurées par les LVDT 2 et 3 en régime permanent sont 3.61 et 3.4 mm respectivement. L'erreur maximale est ici de 0.5% et peut être négligée. L'épaisseur mesurée par le LVDT1 est située à l'extérieur des mesures effectuées lors de l'infusion. La distribution de la pression en régime permanent varie et la pression mesurée à ce capteur est légèrement plus basse, soit -6.1 kPa. À cette pression, le modèle d'expansion prévoit une épaisseur de 3.95 mm alors que la valeur mesurée est de 4.07 mm. Cette différence de 2.9% est néanmoins considérée comme faible.

Il est maintenant possible d'établir et de tracer dans la Figure 4.19 la courbe du modèle d'expansion du renfort fibreux qui relie le taux volumique de fibres à la pression appliquée.

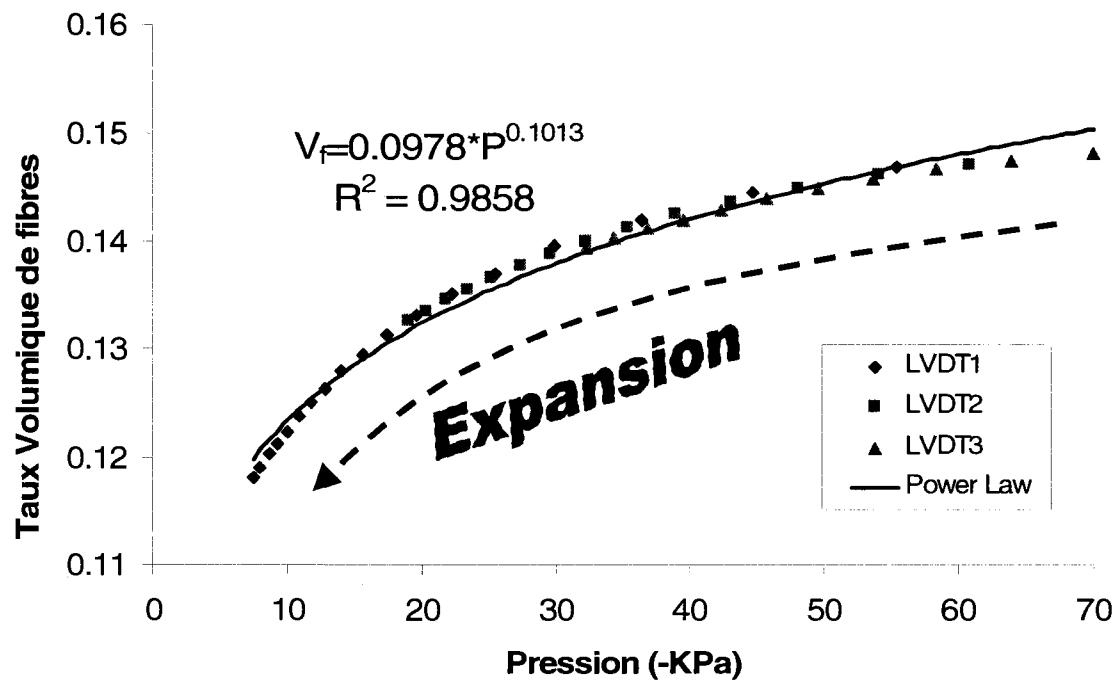


Figure 4.19 : Modèle d'expansion du renfort d'acrylique lors d'une infusion.

Afin de pouvoir utiliser ce modèle pour la simulation numérique, il faudra associer à chaque étape de calcul une perméabilité au taux de fibres prédit par le calcul du champ de pression. Une caractérisation expérimentale de la perméabilité est donc nécessaire en fonction du taux de fibres.

4.5 Comparaison des modèles d'expansion

Une étude exhaustive de l'expansion des renforts fibreux a été exécutée dans deux bancs d'essais différents. Dans les deux cas, un modèle de compaction et d'expansion du renfort fibreux d'acrylique soumis à une contrainte a été obtenu. La Figure 4.20 montre une comparaison des courbes moyennes d'expansion pour les deux bancs d'essai : la caractérisation sous plaque rigide et la caractérisation sous infusion.

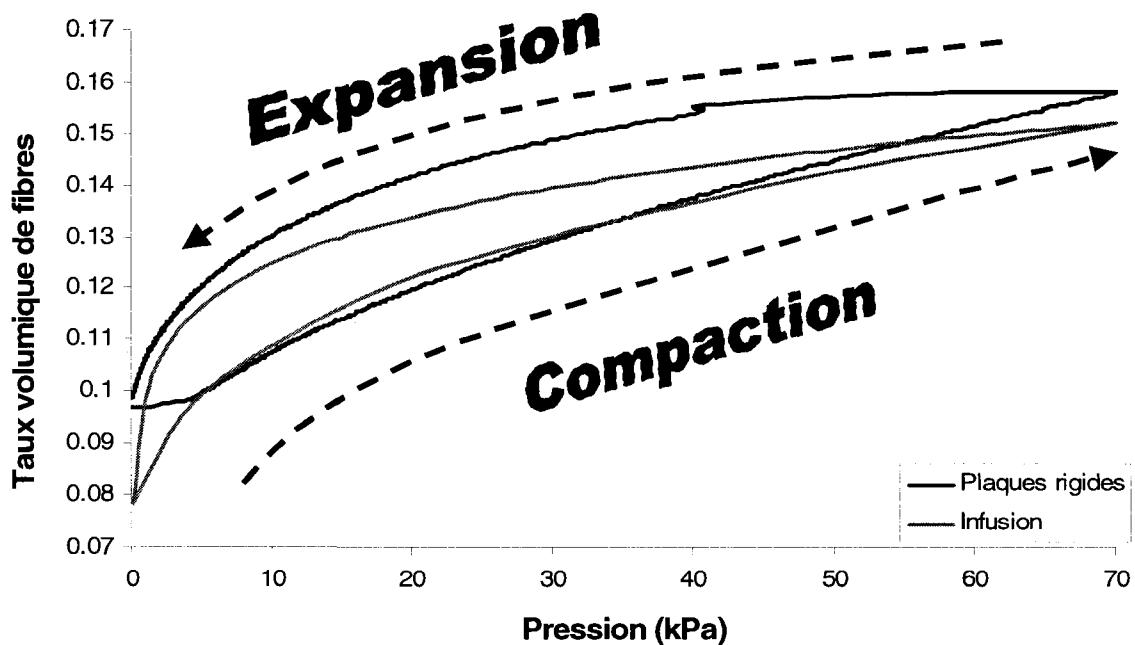


Figure 4.20 : Comparaison du cycle de compaction du renfort d'acrylique mouillé dans deux bancs d'essais : plaques rigides et infusion.

On peut observer sur la Figure 4.20 qu'il existe une différence entre les cycles de compaction obtenus dans les deux bancs d'essais. Cette différence semble essentiellement due à l'épaisseur mesurée à pression maximale. En effet, puisque l'expansion dépend de l'épaisseur à pression maximale à partir de laquelle elle est observée et que ces deux épaisseurs sont différentes à la même pression de compaction, les deux modèles sont distincts. Les conditions d'opérations sont différentes puisque dans l'un, l'expansion est effectuée entre plateaux rigides à pression ambiante et vitesse de compression-expansion constante et dans l'autre, l'une des parois est flexible, la vitesse de déformation est lente et variable et le renfort est soumis à une pression de vide. La flexibilité de la paroi et la succion due à la pression de vide changent les conditions de contact avec le renfort fibreux par rapport au contact avec une paroi rigide. Le taux de fibres obtenu par compaction rigide est légèrement supérieur (moins de 1%) à celui obtenu par aspiration sous membrane flexible.

Le modèle d'expansion d'un renfort fibreux lors d'une infusion doit être obtenu à l'aide d'un montage qui est semblable aux conditions réelles pour obtenir des résultats plus adéquats et représentatifs, ce que permet justement de faire le banc d'essai pour l'infusion développé dans ce mémoire.

4.6 Conclusion

Le plan d'expériences concernait l'étude des cycles de compaction en infusion. Il était important au départ de mener des expériences avec une machine de traction, méthode éprouvée et robuste, qui est couramment utilisée pour caractériser les renforts fibreux. Ceci a permis de mieux comprendre le cycle de compression-expansion propre à l'infusion. Par la suite, le comportement en compaction a été observé dans un banc d'essai expérimental muni d'une membrane flexible mieux adapté aux conditions réelles

de l'infusion. L'étude approfondie du cycle de compaction-expansion des renforts fibreux a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La déformation du renfort fibreux se fait de manière cyclique, dans laquelle on distingue une phase de compression et une phase d'expansion.
- La compression et l'expansion peuvent être représentées par une loi de puissance, mais qui ne sont pas identiques.
- Lors d'une infusion, le renfort est initialement comprimé. À mesure que la résine se propage, le renfort subit une expansion liée aux changements de pression internes.
- La compaction permet une réorganisation du réseau fibreux qui augmente le taux de fibres.
- Le comportement du renfort d'acrylique tend à se stabiliser après trois cycles de compaction.
- L'expansion d'un renfort fibreux dépend de l'historique de compaction, c'est-à-dire de la pression maximale à laquelle il a été soumis.
- Les renforts mouillés se compriment plus facilement que les renforts secs et montrent un comportement plus répétitif.
- La caractérisation de la compression-expansion est légèrement différente entre plaques rigide et en infusion. Le banc d'essai d'infusion permet d'obtenir un modèle adapté au phénomène réel et est plus adéquat.

CHAPITRE 5

IDENTIFICATION EXPÉRIMENTALE DE LA PERMÉABILITÉ DANS LE PROCÉDÉ D'INFUSION SOUS MEMBRANE FLEXIBLE

La perméabilité représente l'aptitude d'un milieu poreux à se laisser imprégner par un fluide. Cette propriété dépend du renfort utilisé, du type de tissage et de la porosité. La perméabilité peut être déterminée empiriquement à l'aide de bancs d'essais expérimentaux.

Diverses méthodes reposant sur des injections unidirectionnelles ou radiales sont utilisées pour déterminer la perméabilité dans les procédés RTM [25, 28-30, 32]. La perméabilité est évaluée d'habitude à partir de l'avancée du front d'imprégnation dans un moule rigide donc de porosité constante. Ces méthodes demandent de nombreuses expériences pour établir une loi reliant la perméabilité à la porosité. Lors d'une infusion, la porosité change dynamiquement après le passage du front d'imprégnation, ce qui modifie la perméabilité. Or, la perméabilité de renforts fibreux est un des paramètres critiques avec la viscosité de la résine qui gouvernent à travers la loi de Darcy l'imprégnation d'un milieu poreux. Pour modéliser le procédé d'infusion, il faut connaître la perméabilité en fonction de la porosité. Un des objectifs de ce mémoire est justement de proposer une nouvelle méthode pour identifier directement à partir d'une seule expérience d'infusion unidirectionnelle, la perméabilité en fonction de la porosité. Comme on le verra dans ce chapitre, cette approche conduit naturellement à introduire une nouvelle notion de perméabilité, la perméabilité en infusion, adaptée à l'infusion de résine et caractéristique du mode d'imprégnation particulier de ce procédé, dans lequel le renfort fibreux est considéré comme un milieu poreux déformable.

L'infusion est caractérisée par une paroi déformable qui permet une expansion du renfort fibreux. Dans ce cas, les méthodes d'évaluation de la perméabilité développées

pour les moules rigides ne sont pas bien appropriées. La variation de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps modifie la porosité de manière continue et en tout point du milieu poreux, le gradient de pression et donc la perméabilité du renfort. L'équation 5.1 gouverne le champ de pression et l'épaisseur locale h du renfort à tout instant et en toute position de la cavité. Cette équation contient deux fonctions inconnues, h et P . De plus, la perméabilité K est une fonction de l'épaisseur locale h du renfort.

$$\nabla \left(\frac{hK}{\mu} \nabla P \right) = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.1)$$

Pour résoudre cette équation, il faut connaître la fonction $K(h)$ en plus d'une relation constitutive reliant P et h (déterminée au chapitre précédent). L'objectif de ce chapitre est d'identifier la fonction $K(h)$ à partir des mesures réalisées sur le banc d'essai expérimental.

La variation dynamique de l'épaisseur du renfort constitue un obstacle complexe pour l'évaluation de la perméabilité en infusion, mais cette difficulté peut être contournée en intégrant certains paramètres de l'expérience de Darcy [24]. En procédant en régime permanent, par exemple, il est possible de fixer le débit du fluide. Il suffit d'infuser d'abord un échantillon, puis de laisser l'infusion se poursuivre après l'imprégnation totale jusqu'à ce que la hauteur de l'échantillon cesse de varier et que le débit du fluide devienne constant. La vitesse du fluide dépend alors uniquement de la section d'écoulement. Comme la longueur de l'échantillon est constante, il suffit de connaître l'épaisseur du renfort pour déduire la vitesse. Or, l'épaisseur du renfort dépend de la pression appliquée, qui peut être évaluée grâce à un modèle de distribution de la pression à l'intérieur du moule. L'épaisseur peut donc être obtenue en tout point de l'axe longitudinal du moule. Il est possible d'obtenir la perméabilité en fonction de la porosité à partir du débit du fluide, du modèle d'expansion du renfort et du champ de pression.

5.1 Évaluation de la vitesse du fluide

Lorsque le régime permanent est atteint, la hauteur et la pression en tout point de l'échantillon demeurent constantes. La stabilité du régime permanent peut être vérifiée en observant la courbe de perte de masse du bidon d'huile de silicone. Toute la masse de fluide issue du bidon pénètre dans le moule, traverse l'échantillon et est récupérée dans le pot de vide. En régime permanent, la perte de masse est représentée sous la forme d'une droite tel qu'illustré à la Figure 5.1, dont la pente est égale au débit.

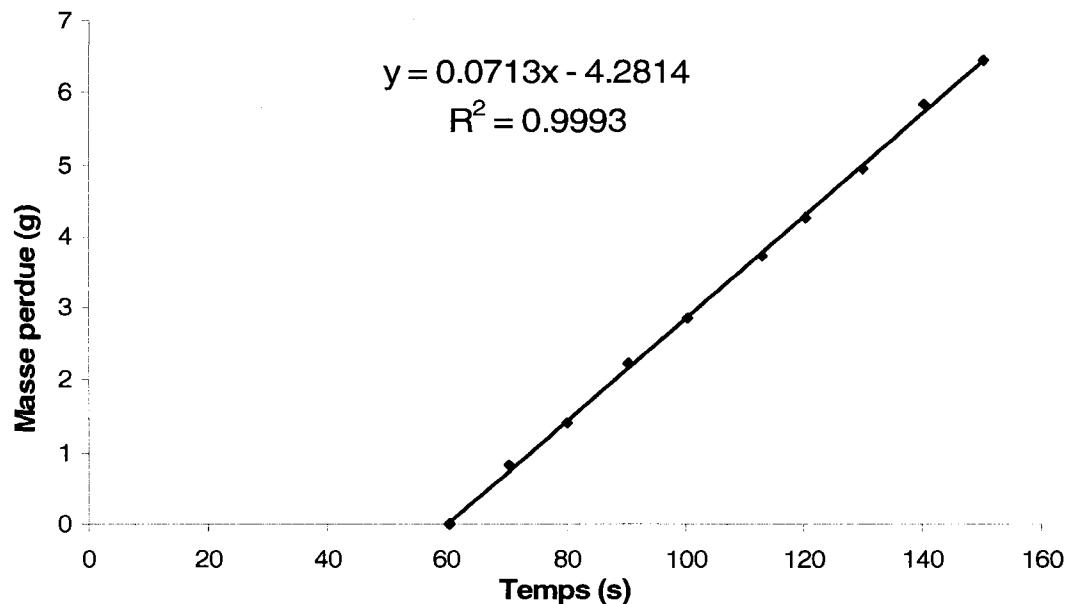


Figure 5.1 : Vérification du système permanent et obtention du débit.

En mesurant les différences de masse de fluide entre deux observations on obtient le débit (mm^3/sec) à partir de la moyenne des dix mesures :

$$Q = \frac{1}{10} \sum_1^{10} \frac{m_i - m_{i-1}}{\Delta t \cdot \rho_h} \quad (5.2)$$

où m_i est la masse à l'instant t_i et ρ_h est la densité de l'huile de silicone.

La vitesse du fluide est ensuite déduite simplement à partir de l'aire d'une section verticale de l'échantillon :

$$u_x = \frac{Q}{l \cdot h(x)} \quad (5.3)$$

où l est la largeur de l'échantillon et $h(x)$ est l'épaisseur du renfort, qui dépend ici en régime permanent seulement, de la position et non du temps.

5.2 Distribution de la pression de vide à l'intérieur d'un moule à paroi flexible unidirectionnel

L'étude des variations internes de pression lors d'une infusion permet de bien comprendre le comportement du renfort fibreux et les forces régissant l'écoulement du fluide. Il importe donc d'étudier la distribution de la pression. La connaissance du champ de pression rend possible, avec le modèle d'expansion du renfort, d'évaluer la distribution de l'épaisseur de l'échantillon, qui donnera finalement la perméabilité en fonction de la porosité.

Le champ de pression à l'intérieur d'un moule rectangulaire à paroi rigide dans un écoulement unidirectionnel est linéaire entre le port d'entrée et l'évent [25]. Le gradient de pression dans la cavité peut donc être évalué comme suit :

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{P_0(t)}{x_f(t)} \quad (5.4)$$

où $P_0(t)$ est la pression d'injection et $x_f(t)$ représente la position du front à l'instant t .

La membrane déformable permet une expansion du renfort fibreux qui influence la distribution interne de pression. L'équation 5.4 n'est donc plus valable pour l'infusion. À partir des mesures de pression réalisées le long de l'axe longitudinal du moule en régime permanent, il est possible de tracer le champ de pression dans la cavité.

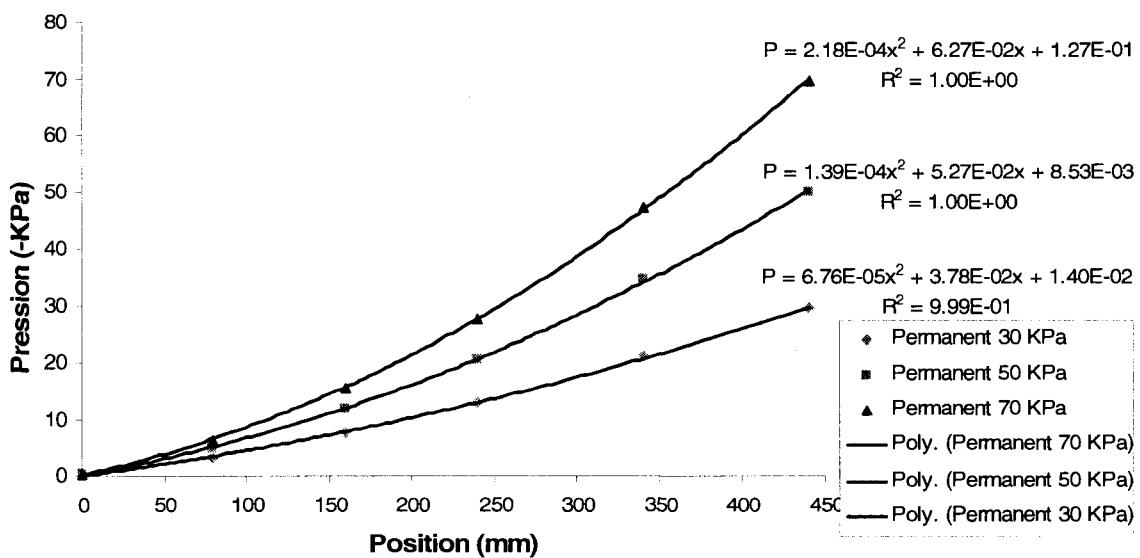


Figure 5.2 : Distribution de pression de vide à l'intérieur d'un moule à paroi déformable en régime permanent.

Trois courbes de pression sont tracées à la Figure 5.2, pour trois pressions de vide différentes. En régime permanent, la pression possède une distribution quadratique. Les six capteurs de pression situés le long de l'axe longitudinal permettent d'observer le champ de pression en fonction de la position des capteurs.

On constate aussi la présence d'un terme constant dans les équations de la pression. Ce terme correspond aux pertes de charge du montage expérimental reliées à l'acheminement de l'huile de silicium jusqu'au moule. Ainsi, pour les pressions de vide de 30, 50 et 70 kPa, le premier capteur enregistre des pressions initiales de 0.23, 0.31 et 0.42 kPa respectivement, ce qui ajoute des pressions initiales de 0.01, 0.01 et 0.13 kPa dans les équations de distribution de la pression de vide, tel que vu à la Figure 5.2.

Grâce au modèle de distribution de la pression à l'intérieur d'un moule à paroi flexible, il est maintenant possible de dresser une vue en coupe de l'épaisseur de l'échantillon. Il suffit de relier les épaisseurs calculées en fonction de la pression le modèle d'expansion pour obtenir les courbes de la Figure 5.3, qui montrent comment l'épaisseur diminue et la pression de vide augmente selon l'axe longitudinal du moule avec la distance au point d'entrée du fluide. Le gradient de pression est obtenu facilement en dérivant l'équation quadratique du champ de pression.

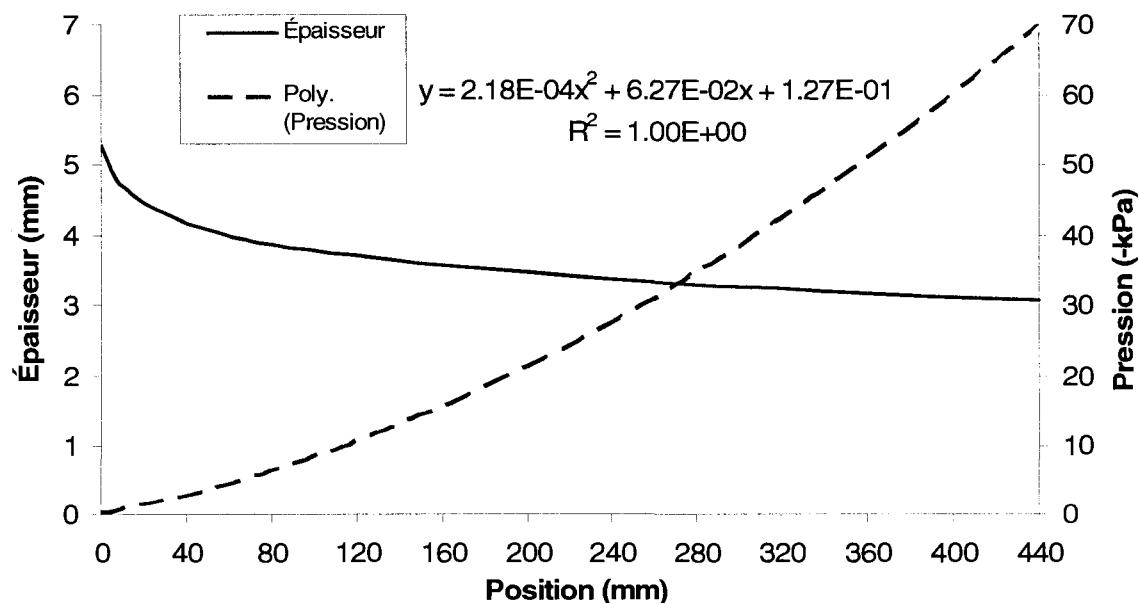


Figure 5.3 : Répartition de la pression et de l'épaisseur du renfort d'acrylique en régime permanent à 70 kPa de pression de vide.

5.3 Évaluation de la perméabilité lors d'une infusion

L'atteinte du régime permanent lors de l'infusion permet d'émettre l'hypothèse que la paroi n'est plus flexible puisque la hauteur ne varie plus. Pour chaque point de l'axe longitudinal, il est alors possible de résoudre l'équation de Darcy, puisque le gradient de pression, la vitesse du fluide, la porosité et la viscosité sont fixés. On obtient l'expression suivante pour la perméabilité $K(x)$ en fonction de la position x sur l'axe longitudinal du moule :

$$K_x = -\frac{\mu \cdot \phi \cdot u_x}{dp/dx} \quad (5.5)$$

où ϕ est la porosité, μ la viscosité, u_x la vitesse du fluide et P la pression.

À chaque position sur l'axe longitudinal du moule, le calcul de la perméabilité s'effectue dans l'ordre présenté au Tableau 5.1. La pression locale est calculée ainsi que le gradient de pression. Le modèle d'expansion donne une épaisseur et un taux volumique de fibres pour chaque pression. La vitesse est ensuite déterminée à partir du débit et de l'aire du renfort traversée. Enfin, la perméabilité est calculée avec l'équation 5.5. Les points situés avant 80 mm ne sont pas considérés dans le calcul, puisque le modèle d'expansion exponentiel a été construit à partir des acquisitions simultanées de l'épaisseur et de la pression, soit à 80 mm du port d'entrée là où se situe le premier capteur LVDT.

Tableau 5.1 : Perméabilités calculées à différents taux de fibres

Position (mm)	80	160	240	340	440
Pression (Kpa)	6.534	15.732	27.720	46.629	69.898
dP/dx (Kpa/mm)	0.098	0.132	0.167	0.211	0.254
Epaisseur (mm)	3.903	3.585	3.394	3.228	3.104
V_f	0.119	0.130	0.137	0.144	0.150
Porosité	0.881	0.870	0.863	0.856	0.850
Vitesse (mm/s)	0.198	0.216	0.228	0.240	0.249
Perméabilité (m^2)	2.275E-10	1.802E-10	1.494E-10	1.236E-10	1.058E-10

Pour la gamme de taux de fibres observée, il est ensuite possible d'établir la courbe de la perméabilité de l'acrylique en fonction du taux de fibres de la Figure 5.4. Celle-ci est bien représentée par une loi de puissance.

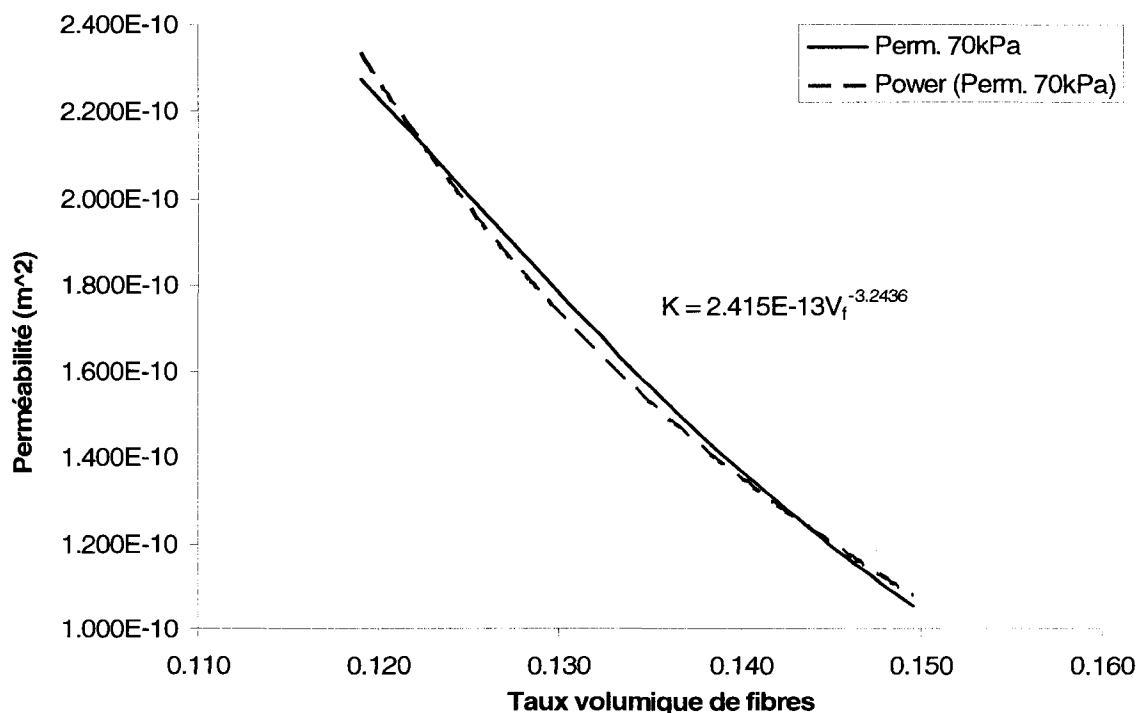


Figure 5.4 : Perméabilité de l'acrylique en régime permanent pour une infusion réalisée avec une pression de vide de -70 KPa.

5.4 Plan d'expériences

Afin de compléter cette évaluation de la perméabilité du mat d'acrylique et de vérifier la répétitivité des résultats, un plan d'expériences a été élaboré, dont les paramètres sont présentés au Tableau 5.2. Il a pour objectif de valider la démarche expérimentale menant à l'évaluation de la perméabilité, mais il a aussi permis de comparer les résultats obtenus à différentes pressions de vide.

Tableau 5.2 : Paramètres du plan d'expériences en infusion

Paramètres	Valeurs
Nombre d'expériences	9 infusions
Pressions d'infusion	-30, -50 et -70 kPa
Renfort	mat d'acrylique
Taille des échantillons	100 mm x 440 mm
Nombre de plis	4 plis
Fluide	huile de silicone 0.127 Pa*s à 23°C

5.5 Résultats

Lors d'une infusion, de nombreux paramètres entrent en jeu et peuvent être analysés. Une première série de données comparables est présentée dans le tableau 5.3. Les données plus complexes sont analysées dans la section suivante.

Tableau 5.3 : Résultats d'infusions d'acrylique à pression variable

Echantillon	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Pression de vide (-kPa)	30	30	30	50	50	50	70	70	70
Masses de l'échantillon (g)	30.07	29.1	29.57	29.1	28.91	27.88	29.44	28.81	29.68
Temps d'infusion (s)	1389	1495	1424	972	937	958	819	758	748
Temps d'infusion moyen (s)					956			775	
Ecart de temps (%)	3.3	4.1	0.8	1.7	2.0	0.2	5.7	2.2	3.5

Les échantillons d'acrylique découpés pour le plan d'expériences ont une faible variabilité de densité surfacique. Pour les neuf échantillons du Tableau 5.3, la moyenne de masse est de 29.2 g. La différence maximale est de 1.3 g soit 4.4%, qui peut être expliquée par la variabilité de la densité du renfort ou la précision de la découpe. Noter que la masse de l'échantillon est considérée dans le calcul du taux de fibres.

Les temps d'infusion du Tableau 5.3 sont directement reliés à la pression de vide appliquée : plus la pression est faible, plus lente sera l'infusion. À 30 kPa, la moyenne du temps requis pour atteindre 440 mm est de 1436 s, alors qu'à 50 kPa et 70 kPa, elle est de 956 s et 775 s respectivement. À 30, 50 et 70 kPa de pression de vide, la variabilité sur 3 échantillons par rapport à leur moyenne est respectivement de 4.1%, 2% et 5.7%. Ainsi, à pression de vide donnée, les temps nécessaires pour l'infusion d'un échantillon d'acrylique sont répétables.

5.6 Analyse

Lors d'une même expérience, l'infusion se déroule à pression constante, puis trois régimes permanents sont établis pour déterminer la perméabilité. À 30, 50 et 70 kPa de pression de vide, plusieurs paramètres de l'expérience varient : la pression interne, l'épaisseur et le débit sont différents pour chacun des régimes permanents. Pour une infusion dont l'imprégnation est effectuée à 70 kPa, les données pertinentes à l'élaboration de la Figure 5.5 sont compilées dans les tableaux 5.4, 5.5 et 5.6.

Tableau 5.4 : Calcul de la perméabilité en infusion en régime permanent à 70 kPa

Position (mm)	80	120	160	200	240	280	320	360	400	440
Pression (Kpa)	6.534	10.784	15.732	21.377	27.720	34.760	42.498	50.934	60.067	69.898
dP/dx (Kpa/mm)	0.098	0.115	0.132	0.150	0.167	0.185	0.202	0.220	0.237	0.254
Épaisseur (mm)	3.903	3.718	3.585	3.481	3.394	3.321	3.257	3.201	3.150	3.104
V_f	0.119	0.125	0.130	0.133	0.137	0.140	0.143	0.145	0.147	0.150
Porosité	0.881	0.875	0.870	0.867	0.863	0.860	0.857	0.855	0.853	0.850
Vitesse (mm/s)	0.198	0.208	0.216	0.222	0.228	0.233	0.238	0.242	0.246	0.249
Permeabilité (m^2)	2.275E-10	2.012E-10	1.802E-10	1.633E-10	1.494E-10	1.378E-10	1.280E-10	1.196E-10	1.122E-10	1.058E-10

Tableau 5.5 : Calcul de la perméabilité en infusion en régime permanent à 50 kPa

Position (mm)	80	120	160	200	240	280	320	360	400	440
Pression (Kpa)	5.099	8.320	11.985	16.096	20.651	25.651	31.096	36.986	43.320	50.100
dP/dx (Kpa/mm)	0.075	0.086	0.097	0.108	0.119	0.131	0.142	0.153	0.164	0.175
Épaisseur (mm)	3.997	3.813	3.681	3.577	3.492	3.420	3.357	3.301	3.251	3.206
V_f	0.116	0.122	0.126	0.130	0.133	0.136	0.138	0.141	0.143	0.145
Porosité	0.884	0.878	0.874	0.870	0.867	0.864	0.862	0.859	0.857	0.855
Vitesse (mm/s)	0.154	0.161	0.167	0.172	0.176	0.180	0.183	0.186	0.189	0.192
Permeabilité (m^2)	2.303E-10	2.089E-10	1.907E-10	1.753E-10	1.623E-10	1.511E-10	1.415E-10	1.330E-10	1.256E-10	1.190E-10

Tableau 5.6 : Calcul de la perméabilité en infusion en régime permanent à 30 kPa

Position (mm)	80	120	160	200	240	280	320	360	400	440
Pression (Kpa)	3.446	5.502	7.776	10.268	12.977	15.903	19.048	22.410	25.989	29.786
dP/dx (Kpa/mm)	0.049	0.054	0.060	0.065	0.070	0.076	0.081	0.087	0.092	0.098
Épaisseur (mm)	4.152	3.968	3.838	3.736	3.653	3.581	3.520	3.465	3.416	3.371
V_f	0.112	0.117	0.121	0.124	0.127	0.130	0.132	0.134	0.136	0.138
Porosité	0.888	0.883	0.879	0.876	0.873	0.870	0.868	0.866	0.864	0.862
Vitesse (mm/s)	0.108	0.113	0.117	0.120	0.122	0.125	0.127	0.129	0.131	0.133
Permeabilité (m^2)	2.496E-10	2.335E-10	2.184E-10	2.048E-10	1.927E-10	1.819E-10	1.723E-10	1.636E-10	1.559E-10	1.488E-10

On peut observer que la distribution de la pression dans l'échantillon dépend évidemment de la pression de vide appliquée. De ce fait, le gradient de pression est aussi différent pour chaque essai. Alors la hauteur, la porosité et la vitesse du fluide, qui dépendent de la pression locale, sont aussi variables. Ces trois essais constituent donc des essais distincts.

Le calcul de la perméabilité débute à 80 mm de l'entrée, puisque l'expansion du renfort est mesurée en ce point. Les mesures effectuées à des pressions de vide plus faibles donnant des épaisseurs d'expansion plus élevées sont à l'extérieur du domaine de validité du modèle d'expansion.

Pour un seul essai, tel que montré à la Figure 5.5, les trois modèles de perméabilités, calculés à l'aide de paramètres différents provenant de pressions différentes en régime permanent, convergent et sont superposés. À titre d'exemple, pour un taux volumique de fibres de 13%, les perméabilités en régime permanent à 30, 50 et 70 kPa de pression de vide sont respectivement de $1.819 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, $1.753 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ et $1.802 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. La proximité de ces résultats (l'écart maximal est de 3.8%) démontre que les perméabilités calculées en régime permanent à différentes pressions de vide sont identiques.

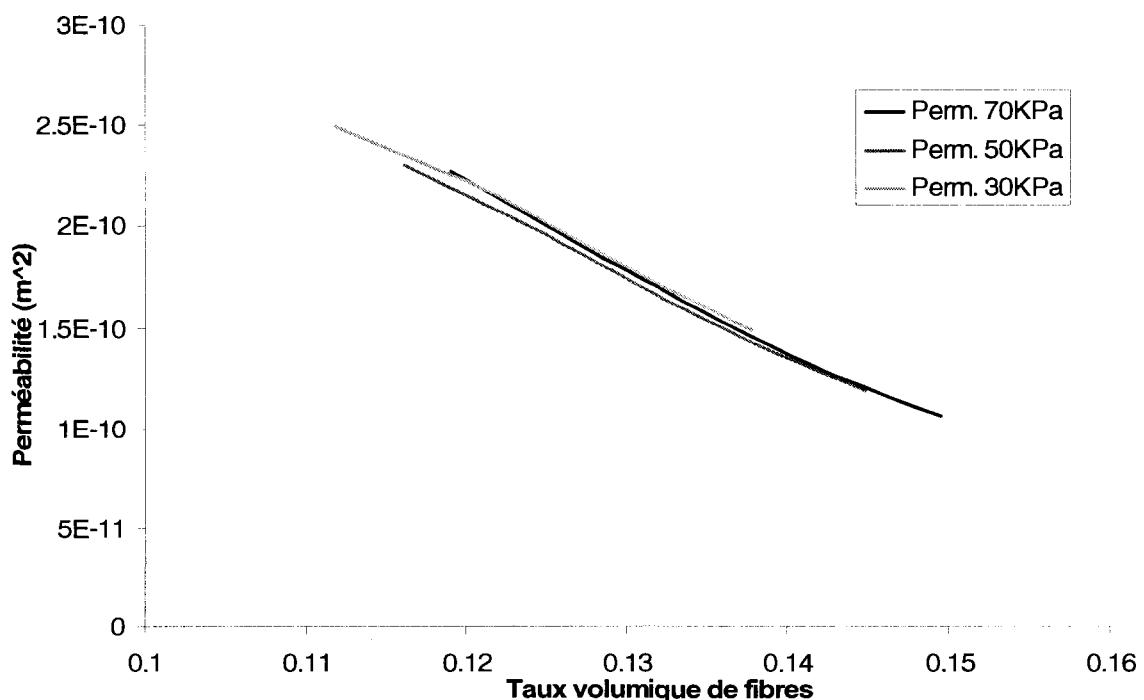


Figure 5.5 : Perméabilités de l'échantillon d'acrylique AK70h à 30, 50 et 70 kPa de pression de vide en régime permanent.

Il est peu recommandé, lors de la caractérisation de milieux poreux, d'effectuer des mesures pour différents régimes permanents. En effet, une mesure à la pression la plus élevée permet une évaluation de la perméabilité pour une gamme plus étendue de porosités. Néanmoins, cette étude effectuée à trois reprises sur un même échantillon à des pressions différentes démontre la robustesse du système de mesure.

5.6.1 Perméabilité à différentes pressions d'infusion

Les neuf infusions du plan d'expérience ont été effectuées à des pressions de vide de 30, 50 et 70 kPa. L'épaisseur initiale du renfort dépend de la pression de vide appliquée. Alors, les modèles d'expansion sont différents pour les trois pressions d'infusion. Trois études comparatives sont effectuées sur des infusions à pressions initiales identiques afin de comparer les perméabilités obtenues. Elles sont obtenues en régime permanent dont les pressions correspondent aux pressions d'infusion. Elles sont présentées aux Figures 5.6, 5.7 et 5.8.

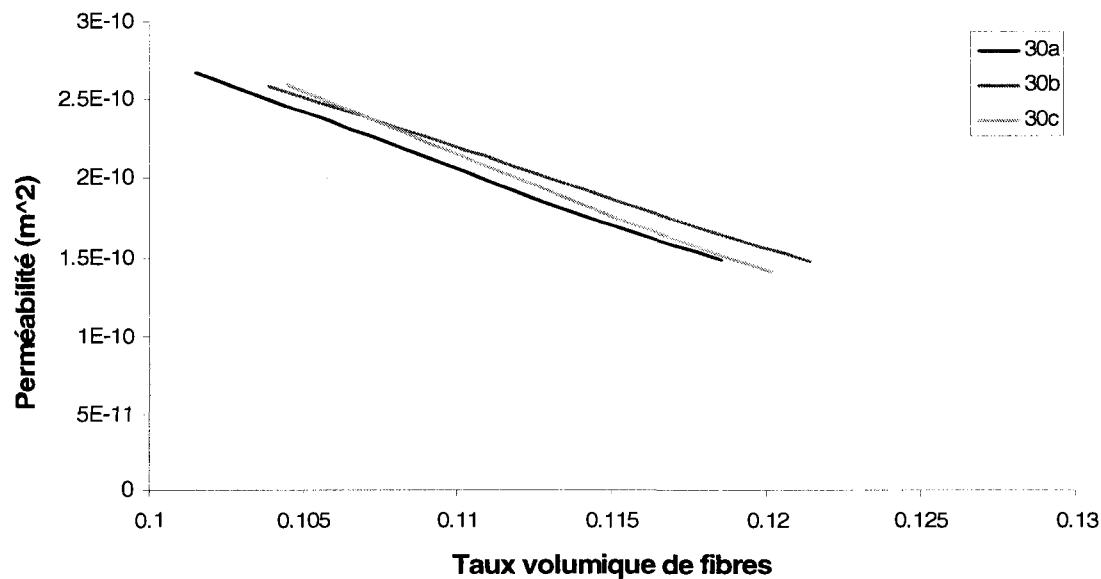


Figure 5.6 : Perméabilité de l'acrylique mesurée en régime permanent pour une infusion à 30 kPa.

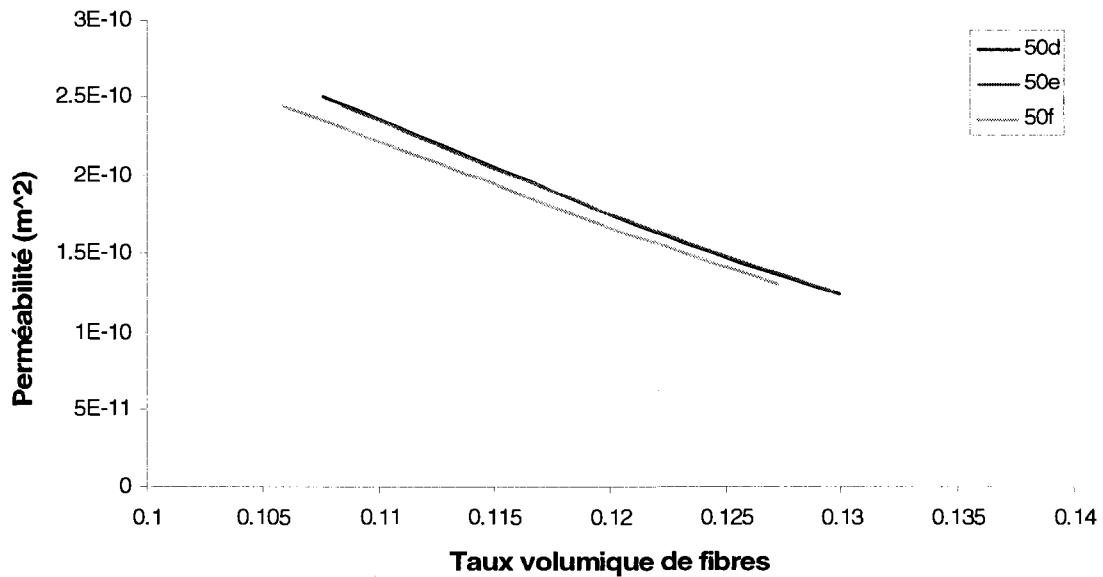


Figure 5.7 : Perméabilité de l'acrylique mesurée en régime permanent pour une infusion à 50 kPa.

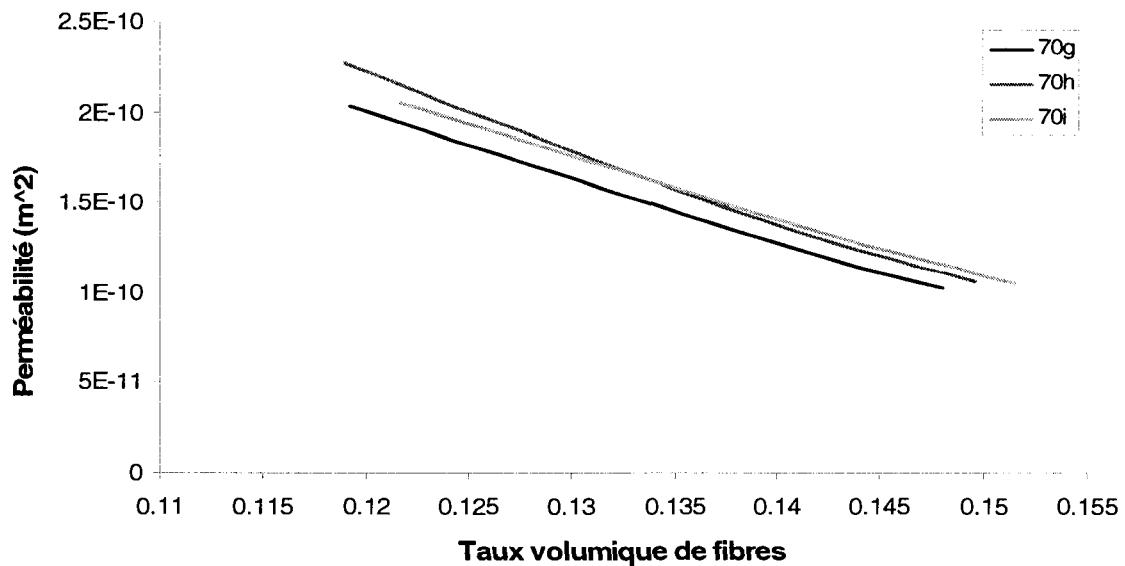


Figure 5.8 : Perméabilité de l'acrylique mesurée en régime permanent pour une infusion à 70 kPa.

L'étude comparative permet de montrer que pour chacune des pressions d'infusion considérées, les perméabilités sont très voisines pour les trois échantillons. Il est alors

possible de compiler les résultats obtenus afin d'observer la répartition de la perméabilité en fonction du taux de fibres.

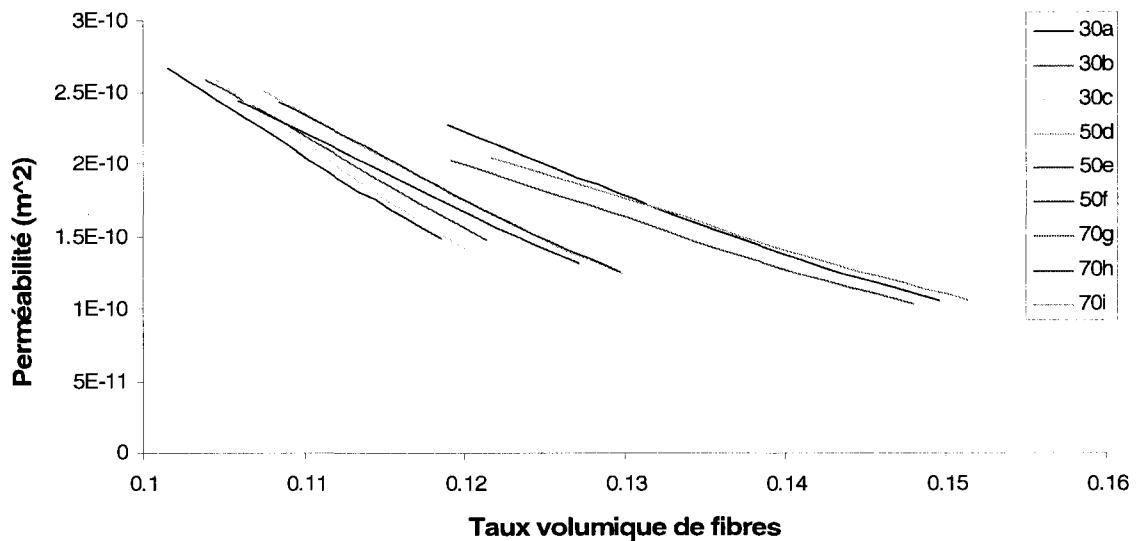


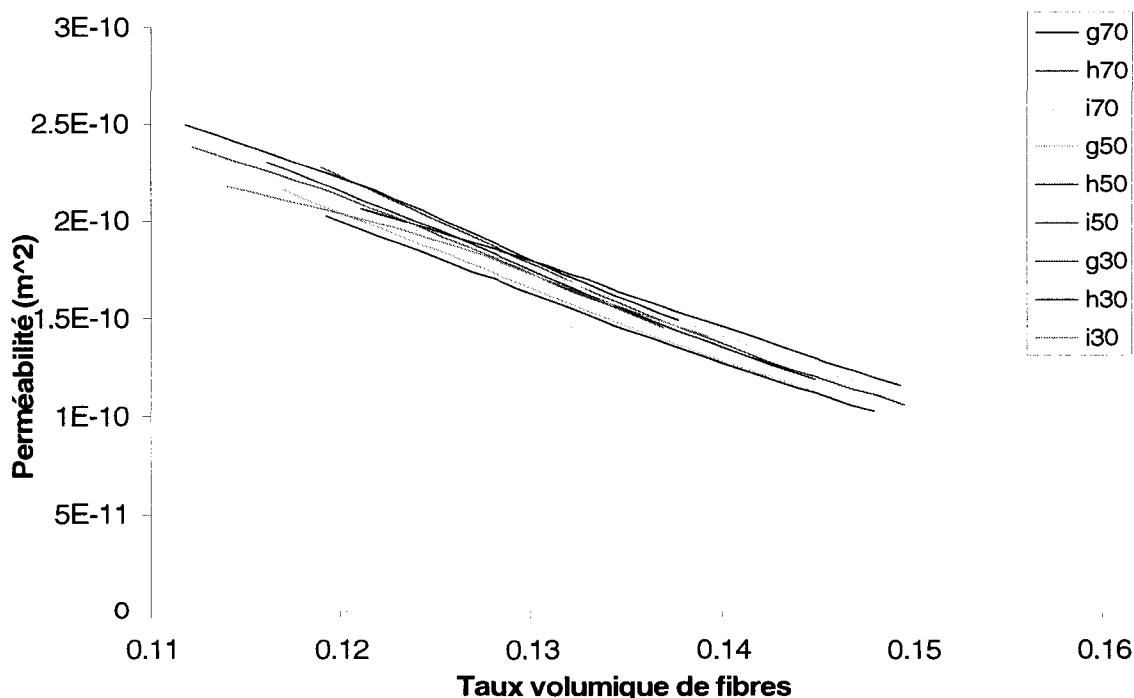
Figure 5.9 : Perméabilité de l'acrylique à différentes pressions d'infusion.

La Figure 5.9 montre que les perméabilités obtenues pour des pressions d'infusion différentes ne sont pas uniformément réparties. Elles ne sont pas distribuées autour d'une courbe commune, alors une loi de comportement ne peut leur être attribuée. Le modèle d'expansion dépend de la pression d'infusion lors de l'imprégnation. Puisque cette pression est différente, alors l'épaisseur du renfort mesurée dont dépend le calcul de la perméabilité est aussi différente. La Figure 5.9 montre qu'il faut un modèle d'expansion commun pour obtenir des perméabilités comparables. Des modèles d'expansion différents donnent des résultats différents. De ce fait, il est recommandé pour chaque mesure de comprimer le matériau à la pression de compaction maximale, afin de permettre une évaluation de la perméabilité avec un modèle d'expansion semblable.

La perméabilité doit ainsi être évaluée à des pressions d'infusion identiques. Alors, les modèles d'expansion acquis lors de l'infusion sont semblables. Les régimes permanents peuvent ensuite être ajustés à des pressions de vide différentes, tout en conservant le

même modèle d'expansion. Il suffit d'appliquer d'abord la pression maximale, puis de réduire ensuite la pression jusqu'au niveau désiré. En effectuant une infusion à 70KPa de pression de vide et en ajustant les pressions de vide pour obtenir des régimes permanents distincts à 70, 50 et 30 kPa, on obtient la Figure 5.10.

Les perméabilités enregistrées lors des neuf essais présentées à la Figure 5.10 montrent une répartition groupée. Par exemple, pour un taux de fibres de 13%, l'échantillon g70 donne la perméabilité la plus faible à 1.63×10^{-10} , alors que l'échantillon h30 donne la perméabilité la plus élevée à 1.82×10^{-10} . L'écart maximal entre les neuf échantillons est de 11%. Cet écart est tout à fait acceptable pour la perméabilité en infusion quand on pense qu'il dépasse souvent 15% pour la perméabilité rigide. Une comparaison des perméabilités au taux volumique de 13% est présentée dans le Tableau 5.7.



Figures 5.10 : Perméabilité calculée en régime permanent pour le renfort d'acrylique pour des infusions à 70 kPa de vide.

Tableau 5.7 : Perméabilités de l'acrylique calculées à $V_f = 13\%$

Échantillon	h70	i70	g50	h50	i50	g30	h30	i30
Perméabilité (m^2)	1.80E-10	1.77E-10	1.66E-10	1.75E-10	1.79E-10	1.72E-10	1.82E-10	1.72E-10

La perméabilité moyenne enregistrée est de 1.74×10^{-10} pour un taux de fibres de 13%. L'écart maximal par rapport à cette moyenne est de 6.3%. La perméabilité peut ainsi être prédite de façon précise pour un taux de fibres donné avec une faible variabilité, qui dépend des variations du taux de fibres d'un échantillon à l'autre.

Le modèle de perméabilité en fonction du taux de fibres de l'acrylique est obtenu à partir de la moyenne des perméabilités à trois pressions de vide différentes. Ce modèle est bien représenté par la loi de puissance : $K = 2.011E-13 \cdot V_f^{-3.3021}$. Il est présenté à la Figure 5.11. Dans la plage d'observations, à un taux volumique de 13%, l'écart maximal observé entre la courbe moyenne et l'essai h30 est de $1.09E-11 m^2$, soit 6.4%, ce qui est faible. Le modèle est contenu à l'intérieur de la plage de perméabilités observées.

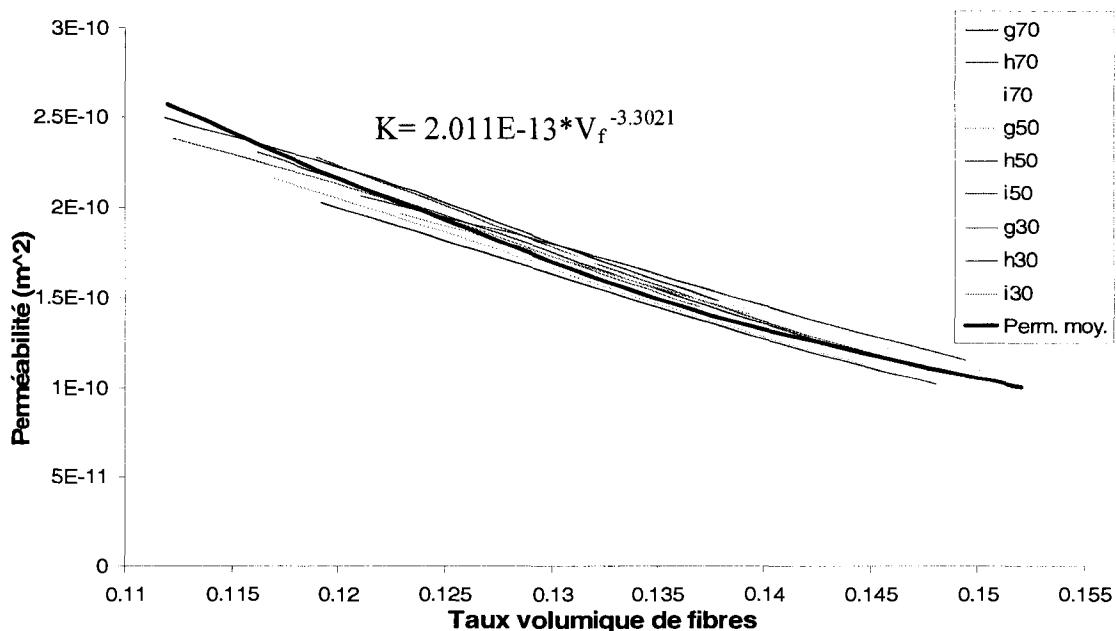


Figure 5.11 : Perméabilité moyenne de l'acrylique en infusion.

Le modèle exponentiel de perméabilité en infusion est comparé aux résultats expérimentaux obtenus en moule rigide. Les résultats de la Figure 5.12 montrent que les perméabilités sont semblables pour la gamme de taux de fibres observée. À faible taux de fibres, la variabilité obtenue en moule rigide est semble élevée puisque le renfort est peu comprimé. Par contre, pour un taux de fibres de 13.5%, l'écart maximal de perméabilité de 12% est considéré comme faible. Le modèle en infusion prévoit $1.5E-11 m^2$ alors que l'essai en moule rigide A-9 prévoit $1.7 E-11 m^2$. Le modèle de perméabilité en infusion est situé à l'intérieur des résultats de perméabilité obtenus en moule rigide.

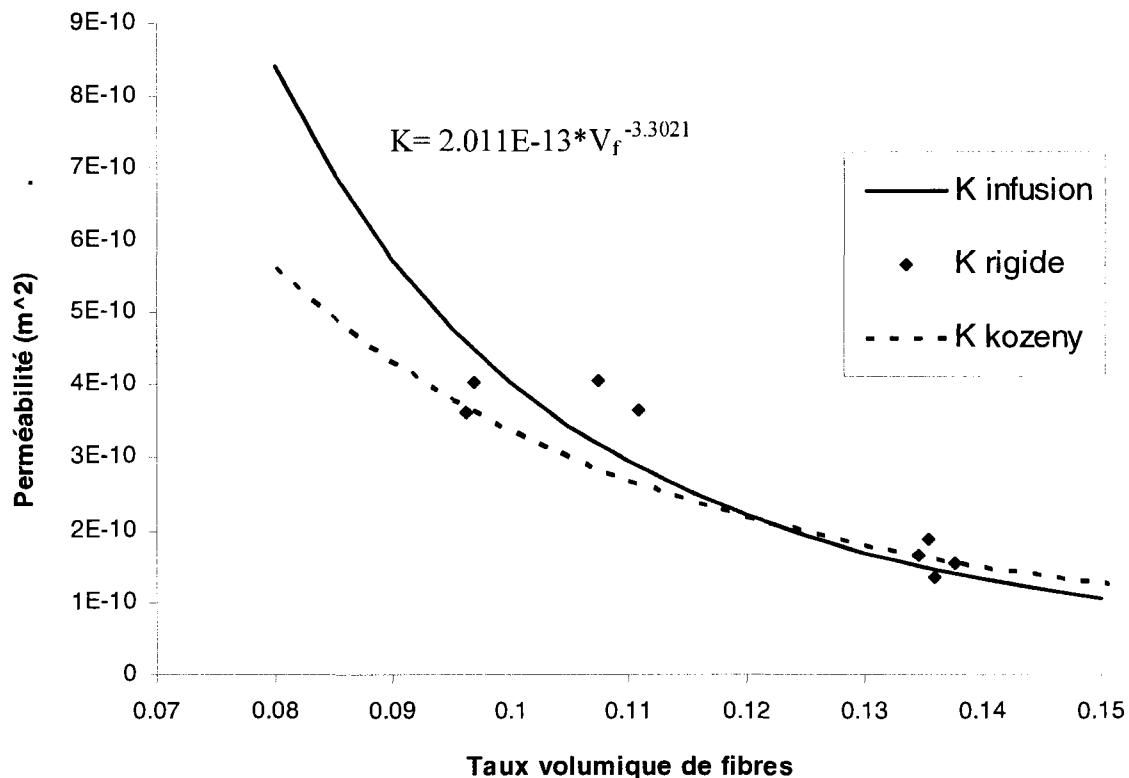


Figure 5.12 : Comparaison des perméabilités de l'acrylique obtenues en infusion et en moule rigide.

La Figure 5.12 montre aussi la courbe de perméabilité qui provient de l'équation de Kozeny-Carman (2.15). Celle-ci est obtenue en utilisant le point moyen de la perméabilité en moule rigide ($V_f=13,59\%$ et $K=1.61E-10\ m^2$). À un taux de fibres de 11%, le modèle de perméabilité en infusion prévoit une perméabilité de $2.94E-10\ m^2$ tandis que celui de Kozeny-Carman prévoit $2.69E-10\ m^2$. L'écart est de 9% et est considéré acceptable puisqu'il correspond à la valeur de taux de fibres la plus faible du domaine d'observation.

5.7 Conclusion

Le plan d'expériences en infusion concernait l'identification expérimentale de la perméabilité lors d'une infusion. Le modèle d'expansion du renfort fibreux est tout d'abord acquis pendant la phase d'imprégnation d'une infusion. Il permet d'associer l'épaisseur et le taux de fibres du renfort à la pression de vide appliquée. Ensuite, lorsque la pièce est totalement infusée, l'atteinte d'un régime permanent permet de fixer certains paramètres afin de simplifier l'étude. Le régime permanent est caractérisé par un débit de fluide constant. En divisant le débit par l'aire du renfort traversée, on obtient la vitesse du fluide. La distribution de la pression est mesurée entre le début et la fin de l'échantillon. En régime permanent, cette distribution est répartie de façon quadratique. La dérivée de cette équation donne le gradient de pression. La porosité est liée à l'épaisseur du renfort mesurée. Le champ de pression du matériau peut être converti en distribution de la porosité grâce au modèle d'expansion. Enfin, la viscosité de l'huile de silicium est constante lors d'une infusion, puisque le fluide est newtonien et que la température de la pièce est constante. Les paramètres de l'équation de Darcy étant ainsi fixés, la perméabilité en infusion peut être évaluée en fonction de la porosité et est bien représentée par une loi exponentielle.

Les perméabilités sont obtenues pour une gamme de porosités en un seul essai. La paroi flexible permet une expansion du renfort fibreux qui dépend de la pression appliquée sur le renfort. Cette pression évolue entre le port d'entrée et l'évent. Pour cette raison, l'épaisseur de l'échantillon n'est pas constante. La perméabilité est évaluée pour différentes épaisseurs du renfort lors d'un seul essai.

CHAPITRE 6

SIMULATION D'INFUSION ET APPLICATION RÉELLE

Le développement d'un banc d'essai expérimental d'infusion a permis d'élaborer une nouvelle méthode de caractérisation des renforts fibreux compressibles. Grâce à cette nouvelle approche, le modèle d'expansion et la perméabilité d'un mat d'acrylique ont été obtenus. Ces paramètres expérimentaux sont ensuite intégrés au module d'infusion de PAM-RTM, un logiciel de simulation numérique des procédés LCM. Un maillage par élément finis de l'échantillon testé dans le banc d'essai expérimental est utilisé pour simuler l'infusion. La gamme de pression, les épaisseurs et les temps de passage du front d'imprégnation ont été comparés au modèle expérimental afin d'assurer la validité du logiciel. Ensuite, une étude a été effectuée sur une pièce de grande taille. D'abord, l'infusion de la pièce a été simulée numériquement. Ceci a permis de déterminer les stratégies et de préciser les paramètres d'infusion. Par la suite, une infusion expérimentale a été comparée à la simulation numérique afin de compléter la validation du logiciel d'infusion.

6.1 Logiciel de simulation

Les simulations de l'infusion sont effectuées dans l'interface VARI du logiciel PAM-RTM version 2004.1 par ESI Group. Elles sont réalisées sur des maillages par éléments finis développés dans CATIA V5R15. Dans la simulation de l'infusion, des conditions aux frontières sont imposées au port d'injection et à l'évent. Les résultats du calcul permettent d'observer l'écoulement de résine à travers le renfort fibreux et de déterminer les variations de l'épaisseur du renfort pendant le remplissage du moule.

Les paramètres physiques qui peuvent être pris en compte dans le logiciel PAM-RTM sont présentés dans le Tableau 6.1 :

Tableau 6.1 : Paramètres du module VARI du logiciel PAM-RTM

Élément	Paramètres
Résine	densité viscosité conductivité thermique chaleur spécifique cinétique de polymérisation
Renfort	perméabilité modèle d'expansion densité volumique densité surfacique épaisseur naturelle conductivité thermique chaleur spécifique
Conditions frontières	point d'injection évent « <i>runner</i> » température
Autres	capteurs pression externe

6.2 Infusion unidirectionnelle d'un échantillon rectangulaire

La simulation de l'infusion d'un échantillon identique au modèle expérimental a été effectuée en implémentant des modèles de perméabilité et compaction identiques aux

modèles expérimentaux. Ceci permet de vérifier la consistance du modèle numérique avec les résultats expérimentaux.

6.2.1 Implémentation des paramètres expérimentaux

L'échantillon caractérisé dans le banc d'essai d'infusion est une plaque rectangulaire de 100 mm x 440 mm, dont le maillage à la Figure 6.1 est constitué de 476 nœuds et 846 éléments triangulaires.

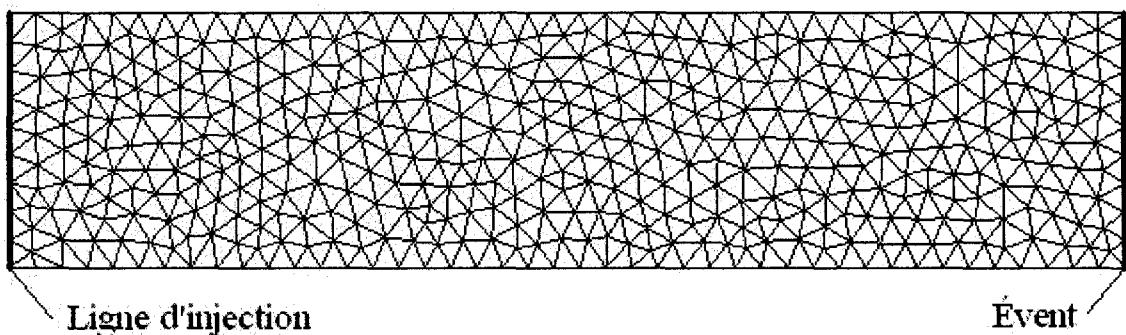


Figure 6.1 : Maillage de l'échantillon du banc d'essai d'infusion.

Aux deux extrémités de l'échantillon sont situés les ports d'entrée et de sortie de la résine. À gauche se situe une ligne d'injection, et à droite la ligne d'évent. Ainsi le front d'imprégnation est linéaire et parcourt l'échantillon du point d'injection jusqu'à l'évent, de gauche à droite. Des capteurs virtuels ont été placés aux points 0, 80, 160, 240, 340 et 440 mm à partir du point d'injection, à 50 mm de chacun des côtés au milieu de l'échantillon. L'emplacement des capteurs est donc le même que sur le banc d'essai expérimental. Ces capteurs permettent d'obtenir la pression, l'épaisseur et les temps de passage du front d'imprégnation.

Tableau 6.2 : Paramètres de la simulation numérique de l'infusion de l'échantillon 70h d'acrylique 100 x 440 mm

Paramètre	Valeur
Modèle d'expansion	$V_f = 0.09878 * P^{0.1013}$
Perméabilité	$K = 2.415E^{-13} * V_f^{-3.2436}$
Densité de l'huile de silicone	0.960 g/cm ³
Viscosité de l'huile de silicone	0.127 Pa*s
Densité volumique de l'acrylique	1.41 g/cm ³
Densité surfacique de l'acrylique	0.06548 g/cm ²
Pression atmosphérique	101300 Pa
Pression au point d'injection	100816 Pa
Pression à l'évent	31232 Pa
Position des capteurs	0, 80, 160, 240, 340 et 440 mm

Les paramètres du Tableau 6.2 sont les mêmes que ceux provenant de l'infusion de l'échantillon d'acrylique 70h du plan d'expérience présenté au chapitre 5. La variabilité de la densité surfacique du matériau, du modèle d'expansion et de la perméabilité est prise en compte par la méthode de caractérisation développée dans ce mémoire. Les pressions sont celles imposées dans l'essai expérimental 70h. De ce fait, la pression au port d'injection est fixée à 0.484 kPa sous la pression atmosphérique, puisqu'une perte de charge survient entre le bidon d'huile de silicone et le port d'injection.

6.2.2 Résultats

Les capteurs virtuels placés dans le moule permettent de comparer les valeurs numériques et expérimentales. Le passage du front d'imprégnation diminue la pression de vide. Les résultats de la simulation numérique sont comparés à ceux obtenus avec le banc d'essai expérimental de la Figure 6.2.

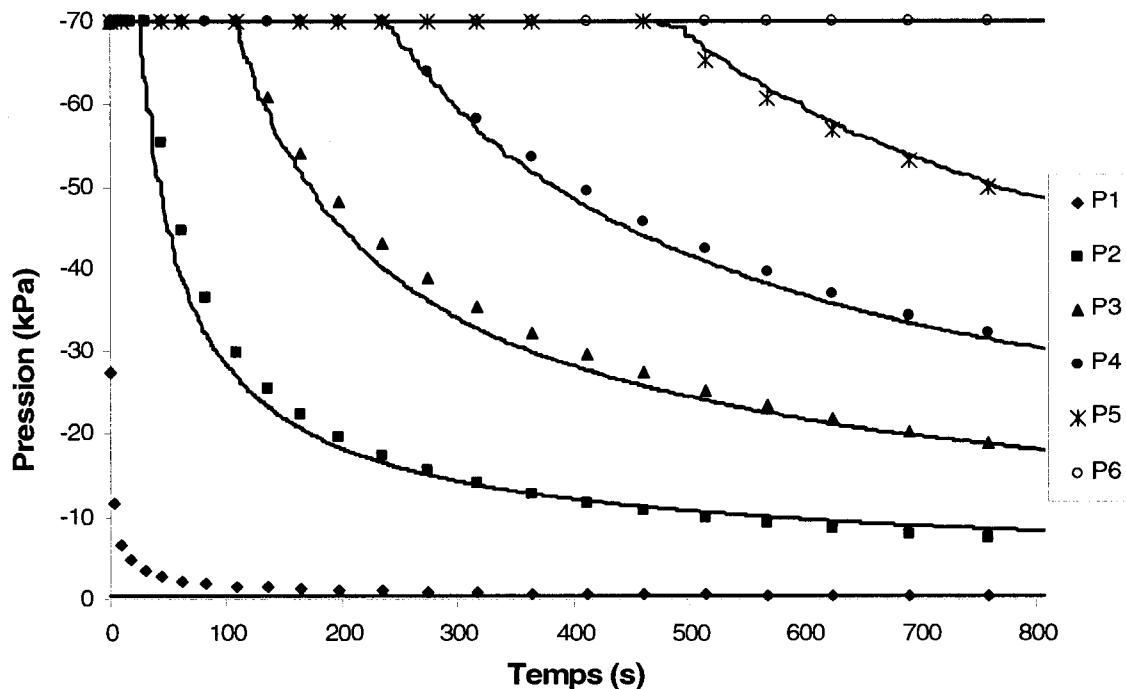


Figure 6.2 : Comparaison des chutes de pression dans le modèle numérique et expérimental.

La pression initiale pour chaque capteur est de -70 kPa et chute dès le passage du front d'imprégnation. La pression au port d'injection est fixée à -0,484 kPa (pression finale expérimentale enregistrée au premier capteur) et reste constante tout au long de l'infusion. Par contre, le premier capteur expérimental est soumis à une chute de pression qui n'est pas instantanée. Le milieu de dispersion et le tube d'alimentation occasionnent des pertes de charge qui influencent le gradient de pression au début de l'infusion, mais deviennent rapidement négligeables. Une simulation numérique plus proche du phénomène réel pourrait tenir compte d'une pression d'entrée variable, tel que le montre le modèle expérimental, mais ceci reste négligeable. On pose ici l'hypothèse que les pressions au port d'injection et à l'évent sont constantes tout au long de l'expérience.

Dès le passage du front d'imprégnation, les capteurs enregistrent une chute de la pression de vide tel que montré à la Figure 6.2. La pression augmente entre le port d'injection et le front d'imprégnation. Les valeurs numériques et expérimentales de pression montrées à la Figure 6.3 sont très semblables. La différence de pression la plus élevée est de 4.25 kPa et survient à 82 secondes.

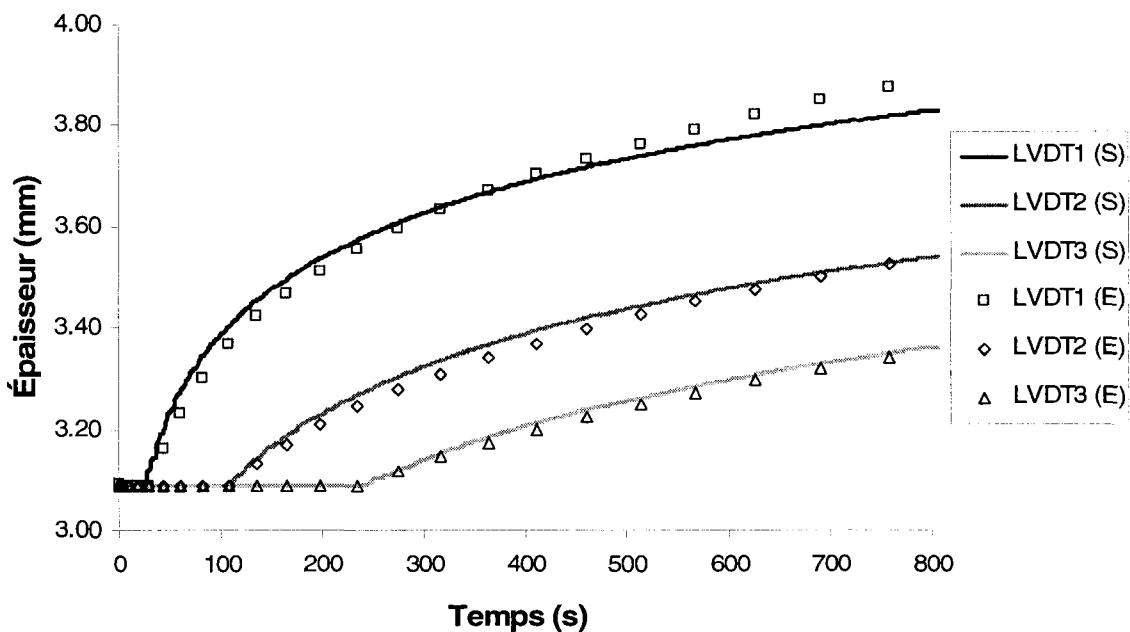


Figure 6.3 : Comparaison de l'expansion du renfort avec les 3 capteurs LVDT.

La variation d'épaisseur occasionnée par la chute de pression est montrée à la Figure 6.3. Tous les capteurs enregistrent initialement la même valeur, soit 3.18 mm. Le renfort est soumis à une pression de compaction identique en tous points. Dès le passage du front d'imprégnation, l'épaisseur du renfort augmente. Celle-ci dépend de la pression de vide locale. Les variations d'épaisseur enregistrées dans la simulation et l'expérience sont semblables. Une différence maximale de 0.05 mm est enregistrée au premier capteur à la fin de l'imprégnation. Une faible différence en pression de 1.015 kPa entraîne une large différence d'épaisseur en raison du modèle exponentiel qui la relie à la pression.

L'évolution du front d'imprégnation est présentée à la Figure 6.4. Le temps requis pour atteindre l'évent est de 808 secondes, ce qui est proche du modèle expérimental, dont le temps de remplissage est de 758 secondes. Une différence ici de 50 secondes correspond à une erreur relative de 6.25% et peut être considérée comme faible. Cette différence peut être due soit à l'utilisateur qui évalue visuellement la position du front d'imprégnation à la fin de l'expérience, soit à la variabilité des caractéristiques du matériau (densité de surface, taux de fibres, défauts, etc.).

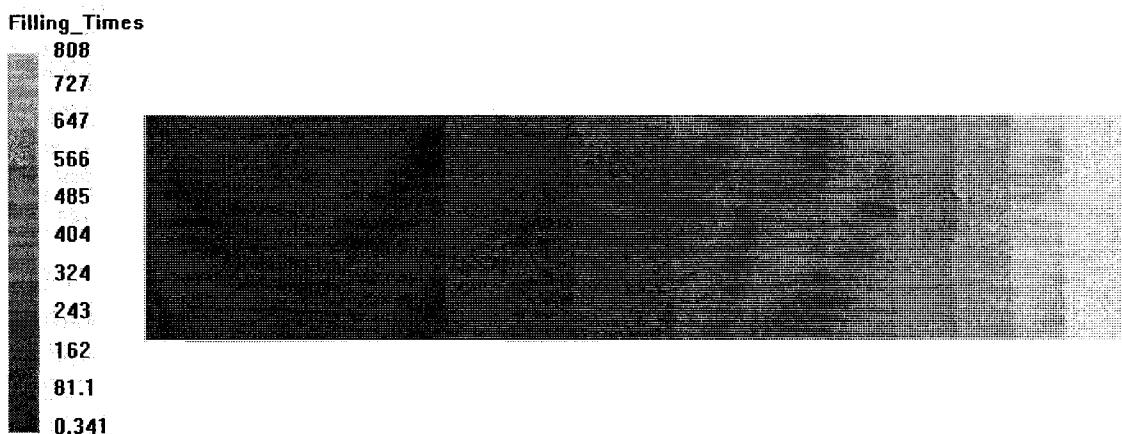


Figure 6.4 : Temps de remplissage de l'échantillon numérique d'acrylique.

Il est intéressant d'acquérir les temps de passage du front d'imprégnation pendant la simulation et de les comparer au modèle expérimental. À cette fin, 23 capteurs équidistants de 20 mm ont été placés entre le port d'injection et l'évent au milieu de l'échantillon. Ainsi, les temps de passage du front d'imprégnation évalués par l'utilisateur sont comparés aux temps compilés lors de la simulation. Ces temps sont présentés à la Figure 6.5.

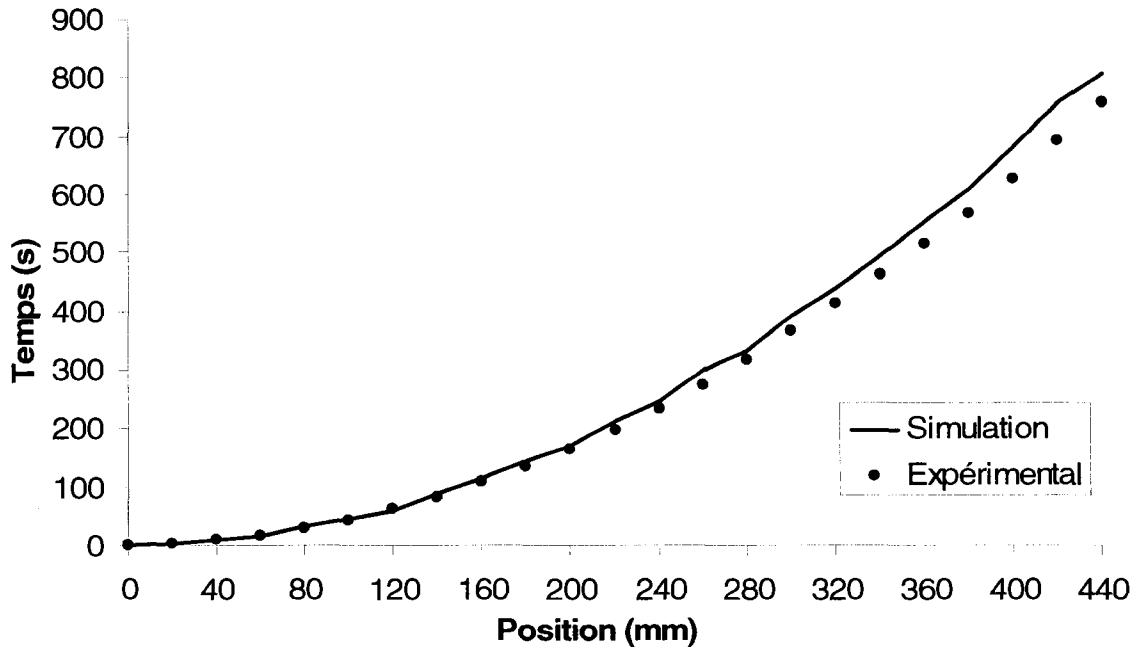


Figure 6.5 : Comparaison de l'évolution du front d'imprégnation expérimental et numérique.

Les temps de passage du front d'imprégnation semblent identiques pendant une majeure partie de l'infusion. Les différences de temps semblent s'accentuer à la fin de l'infusion, ce qui pourrait être occasionné par les différences notables d'épaisseur à faible pression, qui ont une influence importante sur la perméabilité locale du milieu poreux.

6.3 Infusion unidirectionnelle d'un échantillon comportant deux zones d'épaisseurs différentes

Une étude a été effectuée sur un échantillon rectangulaire avec deux zones d'épaisseurs différentes. L'objectif est ici de vérifier l'effet d'un changement de section sur l'épaisseur et de comparer les temps d'imprégnation expérimentaux et numériques. Tel qu'illustré à la Figure 6.6, l'échantillon est divisé en deux zones. Une première zone, constituée de 4 couches d'acrylique, s'étend du port d'injection jusqu'à 120 mm, point

intermédiaire entre les capteurs P2 et P3, situés respectivement à 80 et 160 mm. La deuxième zone, constituée de 8 couches d'acrylique, s'étend de 120 mm jusqu'à l'évent situé à 440 mm. Le maillage est constitué de 492 nœuds et 880 éléments triangulaires. L'emplacement du changement de section à 120 mm du port d'injection a été choisi afin d'être en mesure d'observer une variation d'épaisseur significative.

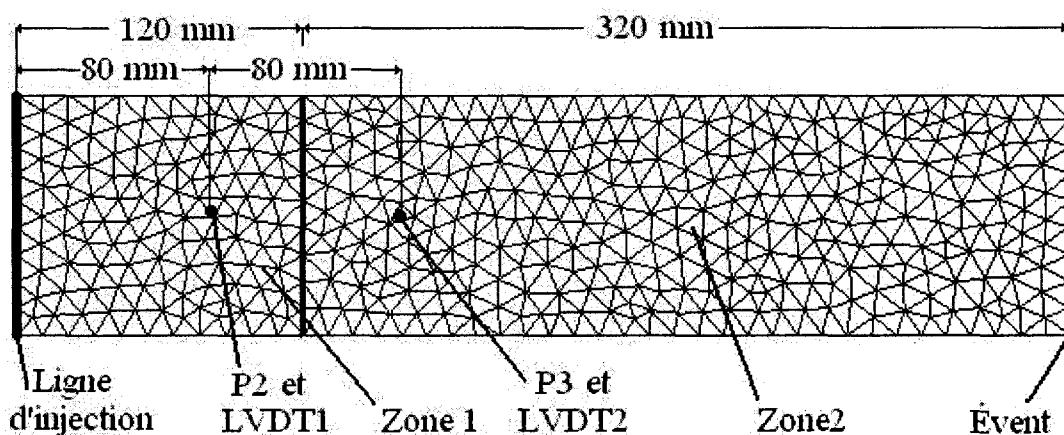


Figure 6.6 : Maillage de l'échantillon à deux épaisseurs.

Tableau 6.3 : Paramètres de la simulation numérique d'infusion à deux zones d'épaisseurs différentes

Paramètre	Valeur
Modèle d'expansion	$V_f = 0.09806 * P^{0.1014}$
Perméabilité	$K = 2.011 E^{-13} * V_f^{-3.3021}$
Densité de l'huile de silicone	0.960 g/cm ³
Viscosité de l'huile de silicone	0.127 Pa*s
Densité volumique de l'acrylique	1.41 g/cm ³
Densités surfaciques de l'acrylique	4 couches : 0.0665 g/cm ² 8 couches : 0.133 g/cm ²
Pression atmosphérique	101300 Pa
Pression au point d'injection	100880 Pa
Pression à l'évent	31230 Pa

Les paramètres utilisés dans la simulation numérique de l'infusion sont présentés au Tableau 6.3. Ils proviennent de la moyenne des résultats expérimentaux de caractérisation des chapitres 4 et 5. La première zone de l'échantillon a une densité surfacique moyenne de 0.0665 g/cm^2 , tandis que celle de la deuxième zone est le double, soit 0.133 g/cm^2 pour un nombre de couches deux fois plus élevé.

6.3.1 Résultats

L'expérience effectuée consiste à observer l'effet d'un changement de section sur l'épaisseur du renfort et sur l'écoulement du fluide. À partir de 120 mm, l'épaisseur du renfort est doublée. La quantité de fluide nécessaire pour imprégner le renfort est aussi le double, donc le temps requis pour remplir les pores supplémentaires augmente aussi. La Figure 6.7 montre l'avancement du front d'imprégnation dans le temps pour l'échantillon à deux épaisseurs. Le temps calculé est de 1111 secondes, ce qui est voisin du temps expérimental de 1060 secondes. La différence relative de 4.8% est considérée faible.

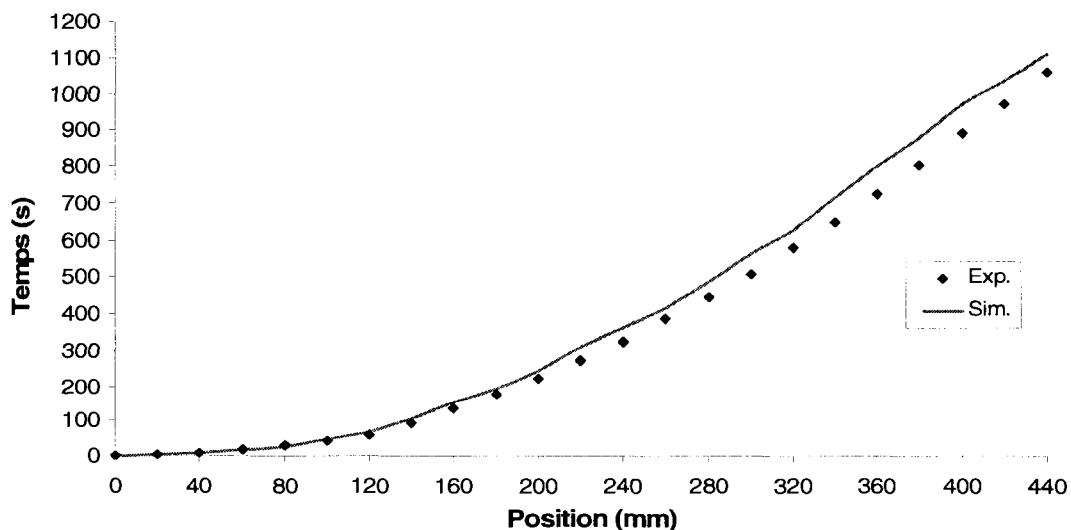


Figure 6.7 : Comparaison de l'évolution des fronts d'imprégnation expérimentaux et numériques d'un échantillon à deux épaisseurs.

Le front d'imprégnation numérique atteint le changement de section (situé à 120 mm du port d'injection) après 68 secondes, tandis qu'il est atteint expérimentalement après 60 secondes. Après ce point, un changement de pression interne survient, tel qu'on peut l'observer sur la courbe numérique du capteur P2 de la Figure 6.8. Le capteur de pression expérimental n'enregistre pas une variation aussi importante puisque le changement de section ne crée pas dans l'expérience une différence aussi précise que dans la simulation. En effet, les plis successifs de renfort ne sont pas parfaitement superposés. Ils sont lissés par la membrane qui les comprime. Aussi l'effet local du changement de section sur la pression est moins important. Néanmoins, les pressions expérimentales et numériques sont semblables pour le reste de l'infusion.

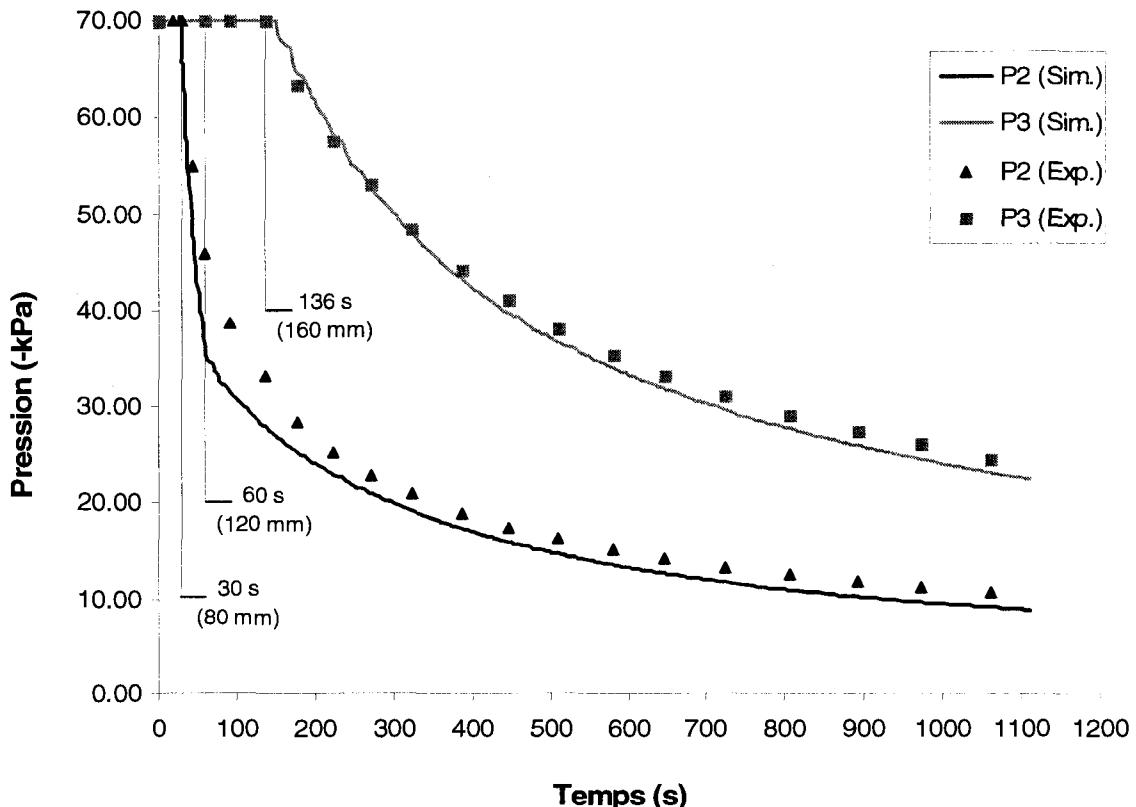


Figure 6.8 : Comparaison des chutes de pression numériques et expérimentales pour l'échantillon à deux sections.

Les épaisseurs expérimentales et numériques aux positions des deux capteurs LVDT à 80 et 160 mm sont comparées à la Figure 6.9. L'épaisseur enregistrée par le second capteur LVDT est deux fois plus élevée puisque le nombre de couches d'acrylique est doublé. On peut observer que les épaisseurs expérimentales et numériques sont semblables tout au long de l'expérience. L'épaisseur prévue par le capteur numérique LVDT2 à la fin de l'imprégnation est de 7.03 mm, alors que le capteur expérimental mesure 7.17 mm (erreur relative de 2%). La variation de la pression numérique à 60 secondes notée à la Figure 6.8 est aussi observée sur la Figure 6.9. L'augmentation rapide de l'épaisseur du renfort mesurée par le capteur LVDT1 numérique est liée à la pression locale appliquée.

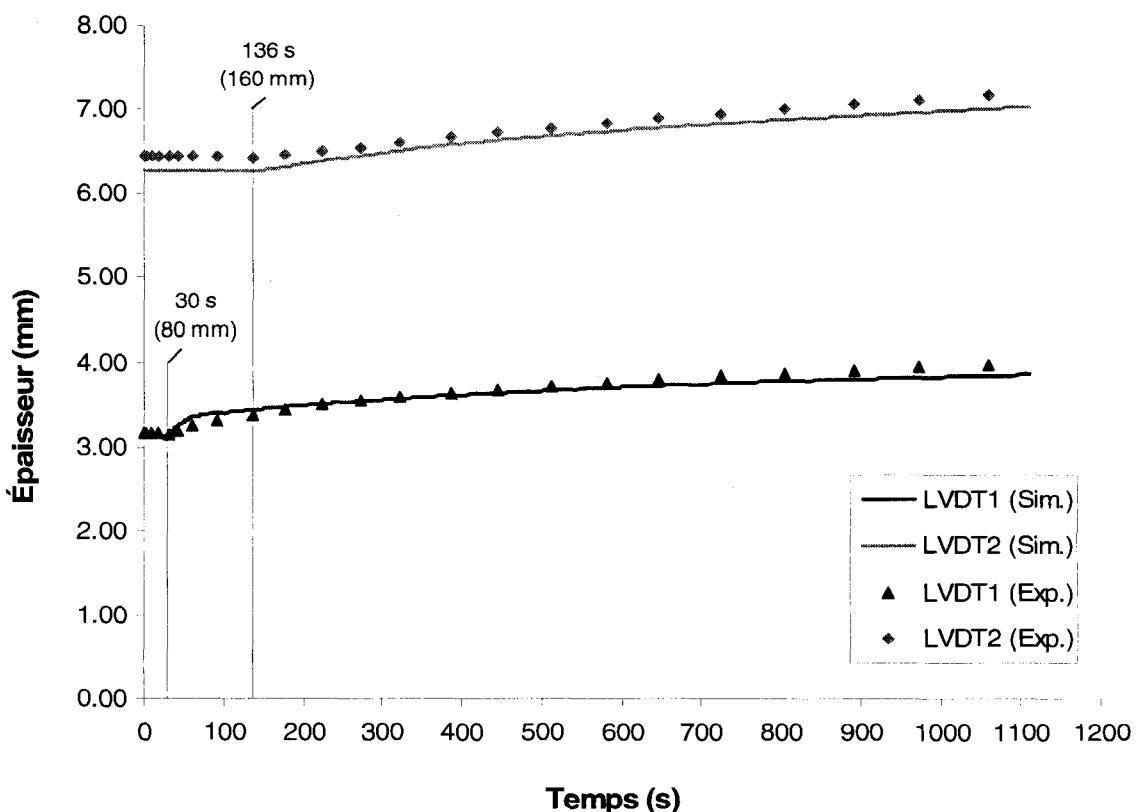


Figure 6.9 : Comparaison de l'expansion du renfort à deux sections.

L'infusion d'une pièce de section variable peut être simulée numériquement. Les épaisseurs prévues par la simulation sont semblables aux épaisseurs expérimentales. Les temps de passage du front d'imprégnation de la pièce dépendent du changement de section et peuvent être prédits par la simulation numérique. La perméabilité et le modèle de compaction obtenus dans le banc d'essai expérimental peuvent donc être utilisés pour la simulation numérique de pièces comportant des zones d'épaisseurs différentes.

6.4 Infusion d'une pièce à géométrie complexe

La simulation numérique du procédé d'infusion a pour objectif de déterminer les stratégies et paramètres d'infusion avant la fabrication réelle. Ceci permet de réduire le temps et le coût de développement de pièces. En effet, il est possible, grâce à la simulation, de déterminer l'emplacement optimal des ports d'entrée de la résine et des événements. Une étude a été réalisée sur l'infusion du carénage des roues d'Esteban IV, la voiture solaire de l'École Polytechnique de Montréal, dont un schéma est présenté à la Figure 6.10. Cette pièce a pour fonction de réduire la force de traînée occasionnée par l'écoulement de l'air autour des roues. Elle permet aussi de protéger les roues de l'environnement externe. Les dimensions de la pièce sont de 2m x 0.4m x 0.4m.

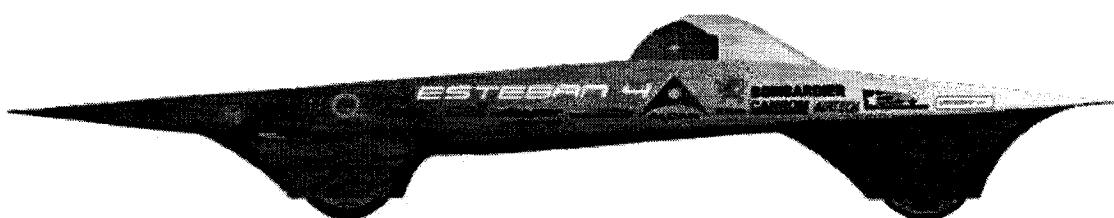


Figure 6.10 : Esteban IV, voiture solaire de l'École Polytechnique de Montréal.

L'objectif de ce travail est la validation du module VARI du logiciel de simulation PAM-RTM. De ce fait, il importe de réduire le nombre de paramètres variables. La résine vinyl ester et le renfort en fibres de verre tissées, qui sont utilisés pour la

fabrication du carénage, sont ici remplacés par l'huile de silicium et le mat d'acrylique utilisés tout au long des expériences. La comparaison du temps de remplissage expérimental et numérique est ainsi effectuée avec des matériaux au comportement moins variables en termes de viscosité pour le liquide et de densité de surface pour le renfort.

6.4.1 Implémentation des paramètres expérimentaux pour la simulation de l'infusion

Tout d'abord, avant l'infusion de la pièce, une étude numérique a été réalisée afin de déterminer des stratégies d'infusion adéquates. À partir d'un modèle numérique réalisé en CATIAV5, un maillage surfacique de la pièce a été généré pour utilisation avec le logiciel PAM-RTM. Puisque la pièce est symétrique, seul un côté a été simulé afin de réduire le temps de calcul. Ce maillage, constitué de 2717 nœuds et 5055 éléments, est présenté à la Figure 6.11.

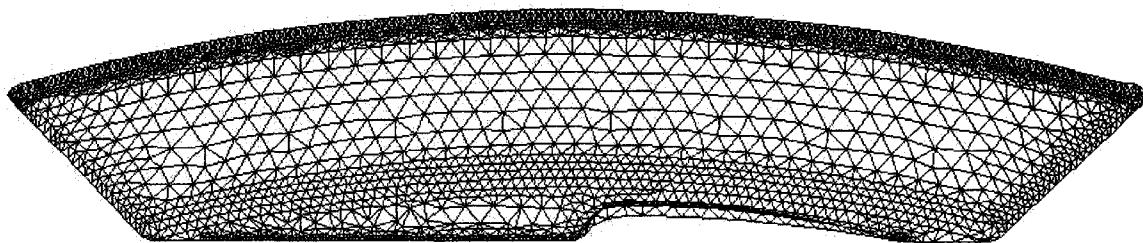


Figure 6.11 : Maillage du carénage.

Les paramètres expérimentaux présentés au Tableau 6.4 ont ensuite été utilisés dans le logiciel de simulation. Ils constituent une moyenne des résultats expérimentaux obtenus lors des expériences présentées dans les chapitres précédents.

Tableau 6.4 : Paramètres de la simulation numérique d'infusion dans le banc d'essai expérimental

Paramètre	Valeur
Modèle d'expansion	$V_f = 0.09806 * P^{0.1014}$
Perméabilité	$K = 2.011E^{-13} * V_f^{-3.3021}$
Densité de l'huile de silicone	0.960 g/cm ³
Viscosité de l'huile de silicone	0.127 Pa*s
Densité volumique de l'acrylique	1.41 g/cm ³
Densité surfacique de l'acrylique	0.0665 g/cm ²
Pression atmosphérique	101300 Pa
Pression au point d'injection	100880 Pa
Pression à l'évent	31230 Pa

6.4.2 Étude des stratégies d'infusion

Lors de la fabrication de pièces par le procédé d'infusion, différentes stratégies peuvent être adoptées pour fabriquer la pièce. L'objectif de cette étape est de réduire le temps requis pour imprégner totalement la pièce, tout en minimisant les risques d'inclusion d'air. Les différentes stratégies étudiées pour optimiser le remplissage des carénages sont l'infusion centrale par un point, par une ligne d'injection et l'infusion périphérique.

a) Point d'infusion central

Tout d'abord, l'infusion de la résine par un point central avec drainage vers une ligne d'évent périphérique a été étudiée. Cette stratégie est la plus simple à mettre en œuvre expérimentalement. Les temps de remplissage de la simulation sont présentés à la Figure 6.12.

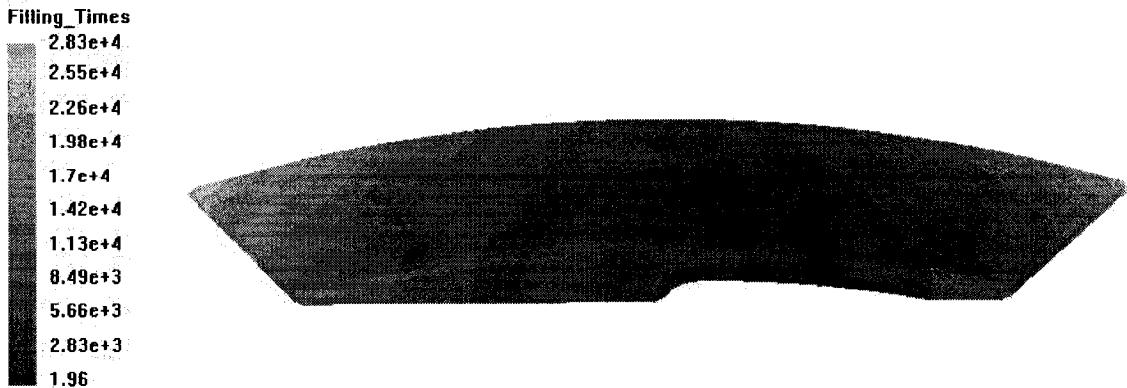


Figure 6.12 : Simulation de l’infusion du carénage par point d’injection central.

Le temps d’infusion en utilisant cette stratégie est de 28 310 secondes, ce qui est très lent. En effet, la distance qui sépare le point d’injection et les extrémités du moule est grande.

b) Ligne d’infusion centrale

Il est possible de réduire la distance entre le point d’injection et l’évent pour minimiser le temps d’imprégnation. Cette technique est très utilisée lors d’infusion de pièces de grande taille et consiste à déposer une torsade (cylindre percé) au dessus des fibres. Cependant, cet élément doit être retiré lors du démoulage et cause une zone riche en résine. Dans le cas de la simulation, un milieu perméable (« runner ») permet de laisser circuler la résine plus facilement et représente la torsade. Il a été ajouté à la simulation précédente au long de l’axe de symétrie tel qu’illustré à la Figure 6.13.

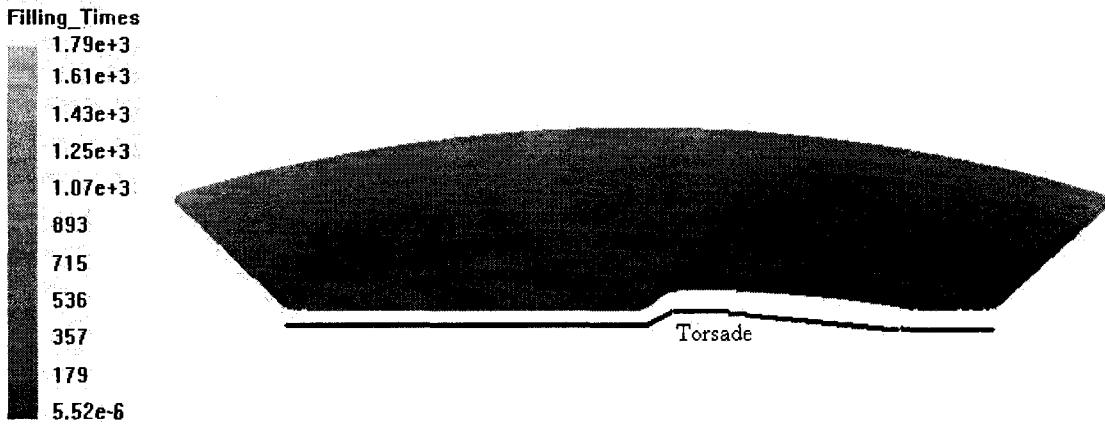


Figure 6.13 : Simulation de l'infusion du carénage par ligne d'injection centrale.

L'ajout d'une ligne d'infusion a permis de réduire le temps d'imprégnation totale de la pièce à 1 787 secondes. Le front d'imprégnation est plus linéaire, ce qui permet de remplir l'évent plus uniformément et réduit les risques d'inclusions d'air dans la pièce. Par contre, l'ajout de cette torsade implique un temps supplémentaire lors de la préparation de l'infusion et pendant le démoulage puisqu'elle doit être retirée.

c) Infusion périphérique

Cette stratégie d'infusion consiste à introduire la résine en périphérie de la pièce et à placer l'évent au centre. La périphérie de la pièce est imprégnée rapidement grâce à une torsade (« runner ») et le front d'imprégnation converge vers l'évent. De ce fait, cette stratégie d'infusion est plus rapide que le point d'injection central dans laquelle le front diverge. Par contre, il est difficile de déterminer si cette stratégie est plus rapide que la ligne d'injection. La simulation permet de comparer les deux et découvrir la plus optimale.

Lorsqu'on place l'évent à l'élément situé au centre de la pièce, la Figure 6.14 montre une zone sèche qui apparaît près de cet évent à la fin de l'imprégnation. En effet,

puisque la demi-pièce n'est pas symétrique, le temps requis pour atteindre le point central n'est pas identique pour chacun des côtés.

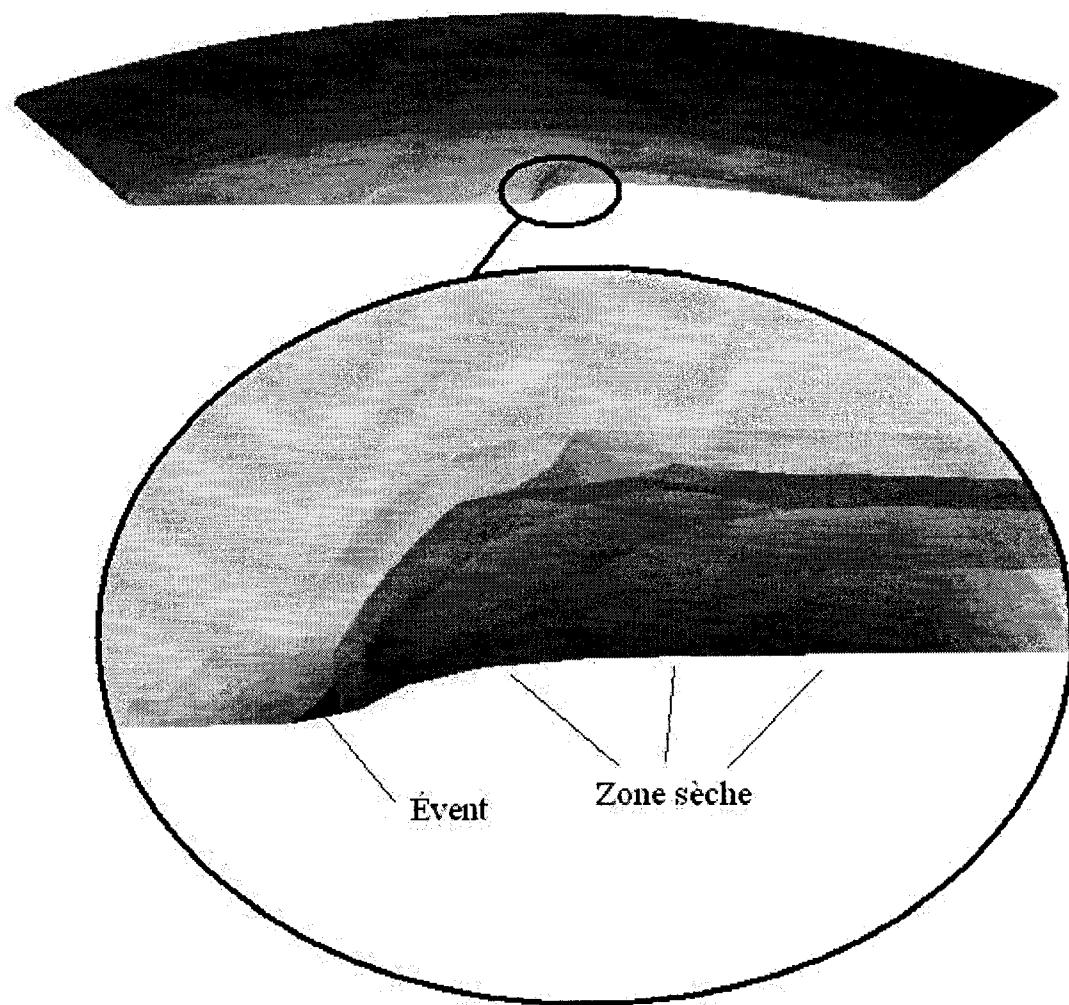


Figure 6.14 : Mauvais emplacement de l'évent qui cause une zone sèche.

Grâce à la simulation, il est possible de déplacer l'évent et de déterminer sa position optimale afin d'éviter l'apparition de défaut. L'évent a été déplacé tel qu'indiqué sur la Figure 6.15.

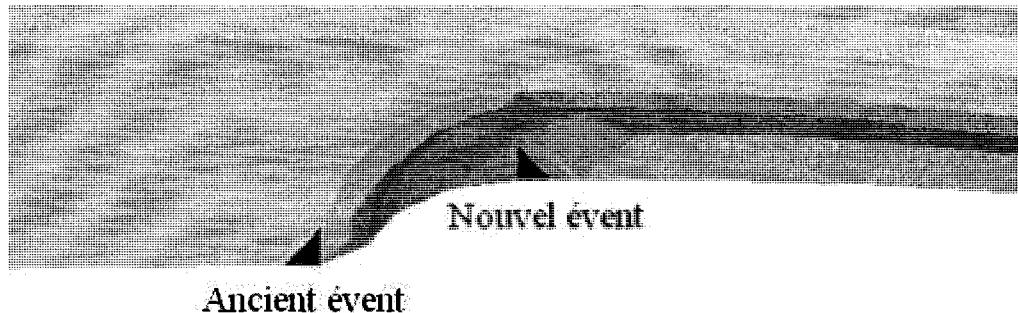


Figure 6.15 : Déplacement de l'évent au milieu de la zone sèche.

L'infusion périphérique du carénage est simulée avec le nouvel événement et les temps de passage du front d'imprégnation sont montrés à la Figure 6.16. Le remplissage est maintenant complété en 1 285 secondes. Cette stratégie est la meilleure parmi les différents cas étudiés et elle est la solution retenue pour l'essai expérimental.

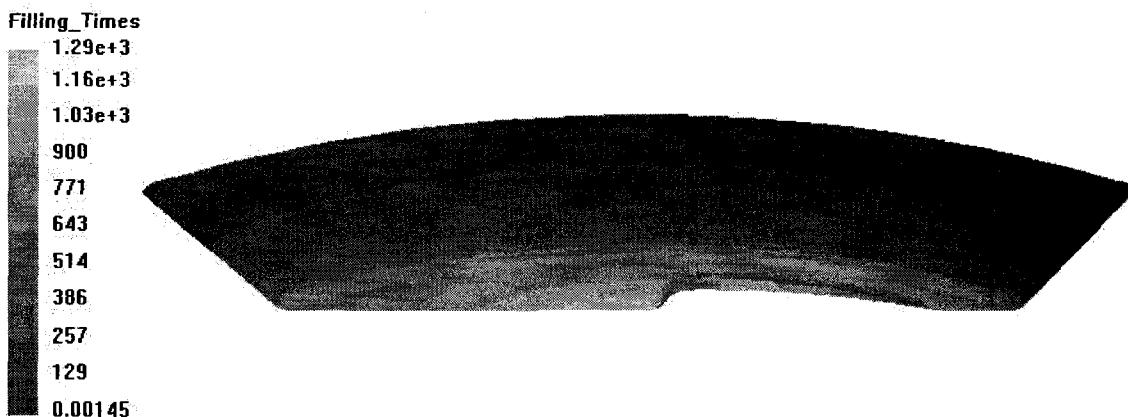
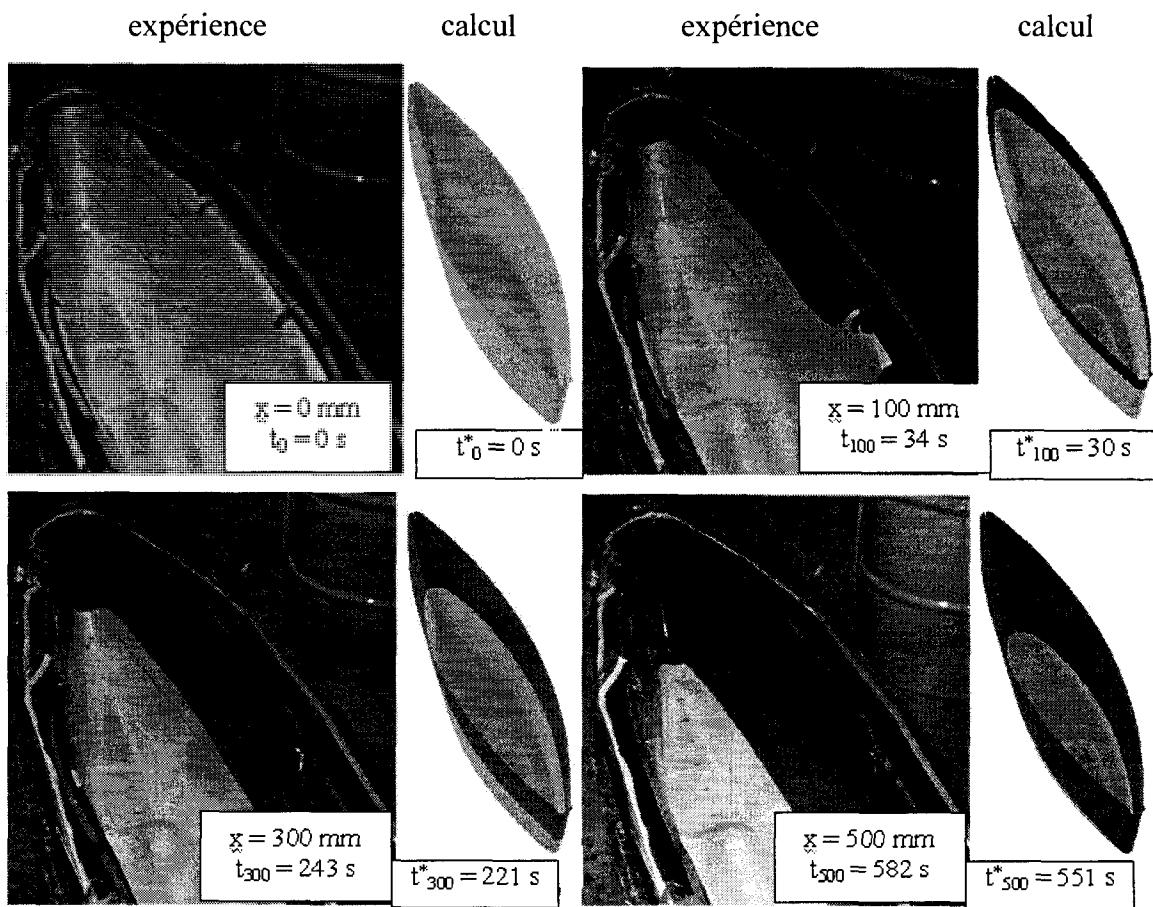


Figure 6.16 : Simulation de l'infusion périphérique du carénage.

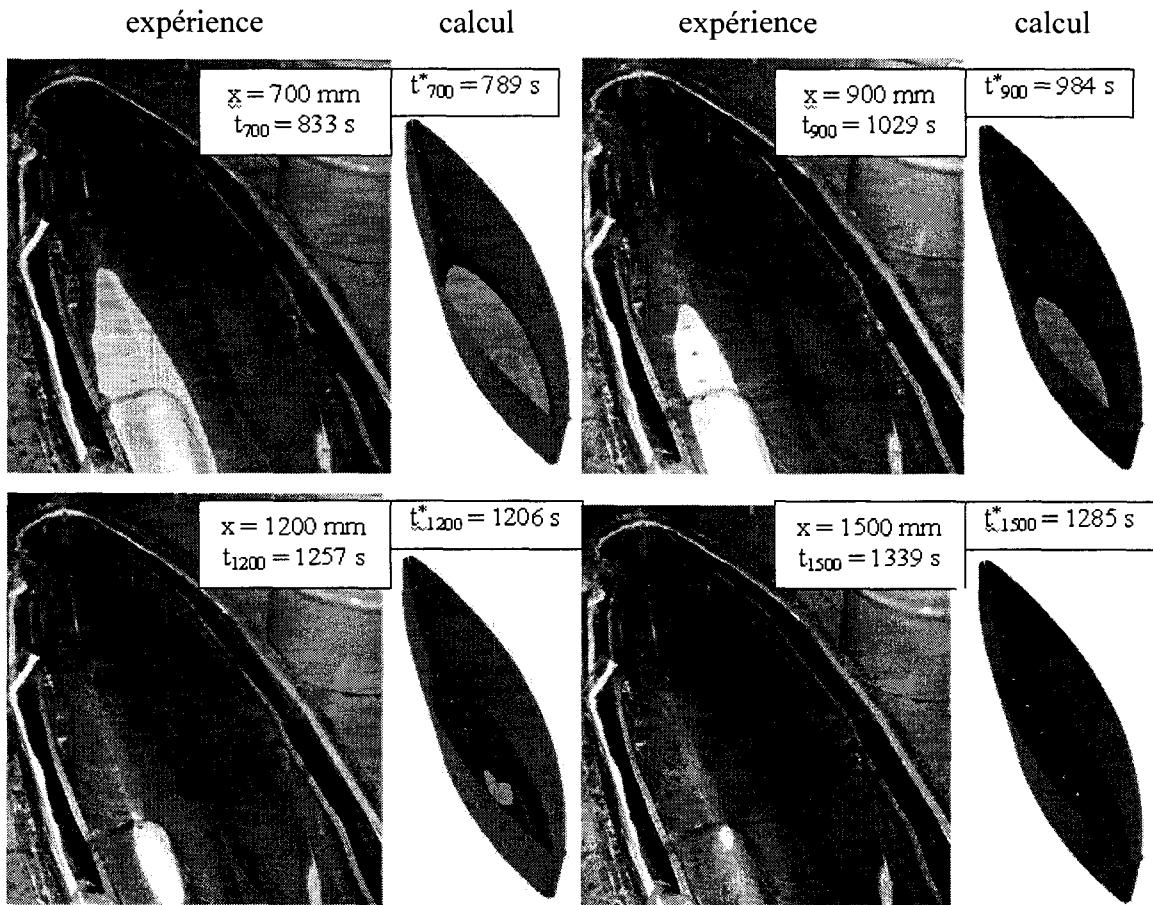
6.4.3 Infusion du carénage

L'infusion du carénage a été réalisée dans le moule présenté à la Figure 6.17. Elle a été effectuée à -70 kPa avec l'huile de silicium et le mat d'acrylique étudiés dans les chapitres précédents. Des torsades ont été ajoutées tout autour du bord du moule afin de

réaliser une infusion périphérique. L'évent a été percé dans le moule au point indiqué par les simulations. Des indicateurs visuels ont été ajoutés sur la membrane à 100, 300, 500, 700, 900, 1200 et 1500 mm à partir du point d'injection. La forme du front d'imprégnation expérimental est comparée à la forme numérique à la Figure 6.17.



(a) Positions pour $x = 0, 100, 300$ et 500 mm des fronts expérimentaux et numériques.



- (b) Positions pour $x = 700, 900, 1200$ et 1500 mm des fronts expérimentaux et numériques.

Figure 6.17 Comparaison de l'infusion et de la simulation du carénage.

On peut observer sur la Figure 6.17 que la forme du front d'imprégnation numérique est semblable à celle du front expérimental. La partie verticale du moule, qui s'étend sur 500 mm, est imprégnée parallèlement au port d'injection périphérique situé au dessus du moule. Ensuite, dans la partie horizontale du moule, le front de forme elliptique converge vers l'évent.

Tableau 6.5 : Temps de passage du front d'imprégnation

Position du front (mm)	0	100	300	500	700	900	1200	1500
Temps expérimental (s)	0	34	243	582	833	1029	1257	1339
Temps simulation (s)	0	30	221	551	789	984	1206	1285

Les temps de passage du front d'imprégnation sont présentés au Tableau 6.5 et sur la Figure 6.18. Ces temps dépendent de la forme complexe du moule de carénage et de la convergence du front d'imprégnation. Ils ne peuvent être représentés par une fonction. Le temps total d'infusion est de 1 339 s alors que le temps de la simulation est de 1 285 s. Une différence de 54 secondes, soit une erreur relative de 4.2%, est acceptable si l'on considère la variabilité du matériau en termes de compaction et perméabilité. Cette différence peut aussi être due à la variabilité de l'expansion du matériau qui peut changer dans les parties concaves du moule.

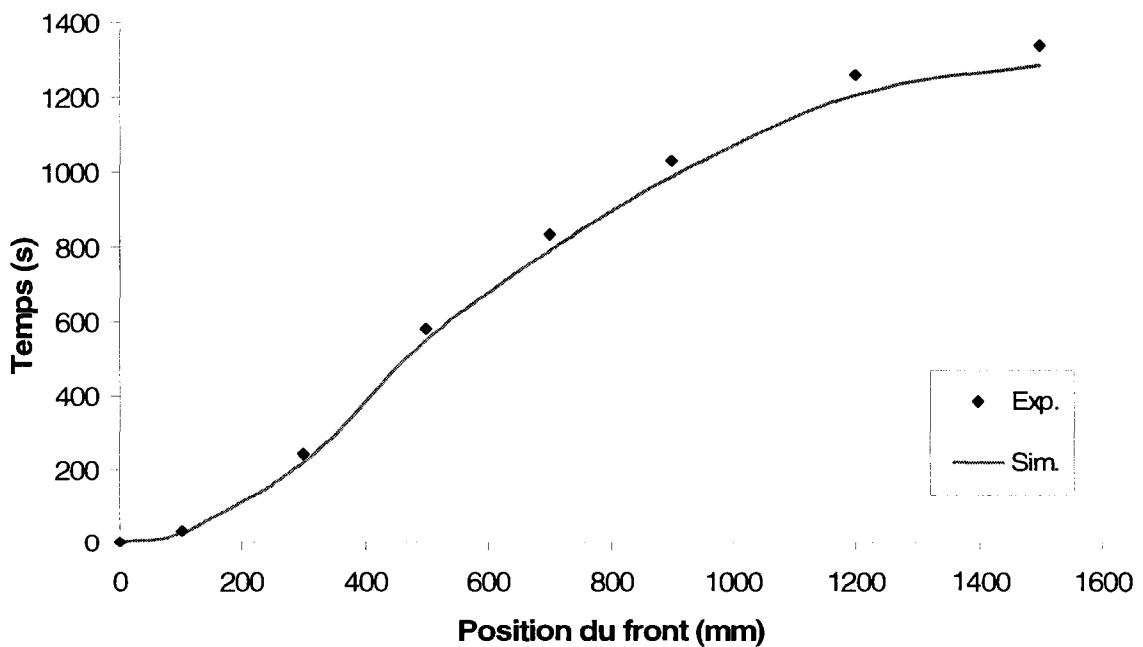


Figure 6.18 : Comparaison des temps d'imprégnation lors de l'infusion expérimentale et numérique du carénage.

6.5 Conclusion

Le banc d'essai expérimental a permis d'obtenir un modèle d'expansion et la perméabilité du mat d'acrylique. Ces paramètres ont été utilisés dans le module VARI du logiciel PAM-RTM. Un échantillon rectangulaire identique au renfort caractérisé dans le banc d'essai a été utilisé pour simuler l'expérience. La gamme de pression et d'épaisseur ainsi que les temps d'imprégnation prévus par la simulation sont semblables à ceux de l'infusion expérimentale. Par la suite, une pièce de géométrie complexe, le carénage de la voiture solaire de l'École Polytechnique, a fait l'objet d'une étude avec le module VARI pour la fabriquer par infusion. Ceci a permis de déterminer la meilleure stratégie d'infusion ainsi que l'emplacement des ports d'injection et de l'évent. Les positions des fronts d'imprégnation dans le temps sont semblables dans la simulation et dans l'infusion expérimentale. La variabilité du temps de remplissage du moule est de 4.2% et est considérée comme faible. La simulation peut être utilisée avec succès afin de réduire le temps et le coût de développement d'une pièce produite par infusion.

CONCLUSION

Une nouvelle méthode de caractérisation de la perméabilité et de la compaction de renforts fibreux pour les procédés de fabrication de composites par infusion a été développée dans ce mémoire de maîtrise. Grâce au nouveau banc d'essai de caractérisation expérimental de l'infusion, le modèle d'expansion du renfort et sa perméabilité sont obtenus pour une large gamme de porosités lors d'un seul essai. Les résultats de la caractérisation peuvent ensuite être utilisés dans un logiciel de simulation numérique afin de prédire l'imprégnation d'un renfort fibreux par infusion.

Un premier plan d'expériences a porté sur l'étude des cycles de compaction des renforts fibreux. Il a permis de mieux comprendre le cycle de compression-expansion propre à l'infusion et d'en tirer les conclusions suivantes :

- La déformation du renfort fibreux se fait de manière cyclique, dans laquelle on distingue une phase de compression et une phase d'expansion qui peuvent être représentées par une loi de puissance, mais qui ne sont pas identiques.
- La compaction permet une réorganisation du réseau fibreux qui augmente le taux de fibres. Le comportement du renfort d'acrylique tend à se stabiliser après trois cycles de compaction.
- L'expansion d'un renfort fibreux dépend de l'historique de compaction, c'est-à-dire de la pression de compaction maximale à laquelle il a été soumis avant relâchement.
- Les renforts mouillés se compriment plus facilement que les renforts secs et montrent un comportement plus répétitif.
- La caractérisation de la compression-expansion est légèrement différente entre deux plaques rigides et en infusion. Le banc d'essai d'infusion, qui permet d'obtenir un modèle adapté au phénomène réel, est donc plus adéquat.

Le second plan d'expériences concernait l'identification expérimentale de la perméabilité lors d'une infusion. En un seul essai, le modèle de compaction ainsi que la perméabilité du renfort sont obtenus pour une large gamme de porosités. Un essai se déroule en trois temps :

1) En premier lieu, un cycle de compaction à sec est effectué. Ceci permet de comprimer le renfort afin d'obtenir un résultat plus répétitif.

2) En second lieu, le port d'entrée est ouvert et le fluide imprègne le renfort. Les paramètres de pression, d'épaisseur et de masse infusée sont enregistrés par l'utilisateur dès que le front d'imprégnation croise une des lignes équidistantes identifiées sur le moule. Le modèle d'expansion du renfort est obtenu ensuite en couplant la pression locale appliquée à l'épaisseur résultante.

3) Enfin, l'évaluation de la perméabilité du renfort a lieu. Après l'infusion, le fluide continue de s'écouler à travers le renfort et un régime permanent s'établit. La pression, l'épaisseur et le débit deviennent alors constants. À partir de ces grandeurs, la perméabilité peut être évaluée localement grâce à la loi de Darcy pour une large gamme de porosité. Ce plan d'expériences a permis de vérifier les deux points suivants :

- La gamme de pression à l'intérieur d'un moule d'infusion unidirectionnel est quadratique.
- La perméabilité évaluée en fonction du taux de fibres peut être représentée par une loi de puissance.

Les paramètres expérimentaux ont ensuite été utilisés dans un logiciel de simulation numérique, PAM-RTM. Une infusion unidirectionnelle a été simulée et comparée à l'infusion expérimentale. La gamme de pression et l'épaisseur de l'échantillon sont semblables à l'expérience. Avec un écart relatif de 6,25%, le temps d'imprégnation numérique est légèrement plus élevé que le temps expérimental. Enfin, la simulation

numérique a été utilisée pour modéliser l'infusion du carénage d'Esteban IV, la voiture solaire de l'École Polytechnique. Grâce à la simulation, une stratégie d'infusion périphérique a été adoptée et l'évent a pu être placé à une position optimale. L'infusion numérique a ainsi été comparée à une infusion expérimentale :

- 1) L'écart relatif final sur les positions du front numérique dans le temps avec l'expérience ne dépasse pas 4.2%.
- 2) L'allure de ces deux fronts est similaire.
- 3) Une stratégie d'injection peut être déterminée numériquement et permet de réduire le temps de remplissage des moules.

Un certain nombre de limitations ont été observées. Le domaine d'observation des modèles de compaction et perméabilité sont limités par l'emplacement des capteurs. Il serait possible de raffiner le modèle en incluant un capteur de pression couplé au déplacement plus près du port d'entrée dans le moule. Le renfort étudié, un mat d'acrylique, montre une faible variabilité de sa densité de surface, d'expansion et de perméabilité. Les renforts industriels présentent en général une variabilité plus élevée. Ceux-ci devront faire l'objet d'études expérimentales afin d'en observer le comportement. De plus, les renforts infusés sont souvent couplés à une âme de mousse aux propriétés différentes. La modélisation de l'interaction entre compaction et écoulement pour ces matériaux lors de l'imprégnation permettra certainement de raffiner à terme les logiciels de simulation.

RÉFÉRENCES

1. Gutowski, T.G.P., *Advanced composites manufacturing* John Wiley & Sons ed. 1997: Wiley-Interscience. 581.
2. Rothe, R., et al. *Studies of the mutagenic effects of styrene to man: conclusions for the surveillance of styrene-exposed workers*. 1993. Berlin, Ger: Publ by Int Soc for Optical Engineering, Bellingham, WA, USA.
3. Joubaud, L., F. Trochu, and J. Le Corvec, *Analysis of resin flow under flexible cover in Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI)*. Journal of Advanced Materials, 2005. **37**(3): p. 3-10.
4. Williams, C., J. Summerscales, and S. Grove, *Resin Infusion under Flexible Tooling (RIFT): A review*. Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing, 1996. **27**(7): p. 517-524.
5. Marco, *U.S. Patent No. 2495640*. 1950.
6. Gotch, T.M., *Improved Production Process for Manufacture of GRP on British Rail*, in *11th Reinforced Plastics Conference*. 1978: Brighton.
7. Leconte, *Method and apparatus for producing a thin walled article of synthetic resin, in particular a large sized vehicle*. 1982.
8. Seemann, W.H., *Plastic transfer moulding techniques for the production of fibre reinforced plastic structures*. 1991.

9. van Wyk, C.M., *Note on compressibility of wool*. Textile Institute -- Journal, 1946. **37**(12): p. 285-292.
10. Robitaille, F., *Compaction à sec et saturée de renforts textiles utilisés pour la fabrication de pièces composites*, in *Département de génie Mécanique*. 1997, École Polytechnique de Montréal: Montréal. p. 213.
11. Chen, B., A.H.D. Cheng, and T.W. Chou, *Nonlinear compaction model for fibrous preforms*. Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001. **32**(5): p. 701-707.
12. Chen, B., E.J. Lang, and T.W. Chou, *Experimental and theoretical studies of fabric compaction behavior in resin transfer molding*. Materials Science and Engineering A, 2001. **317**(1-2): p. 188-196.
13. Pearce, N. and J. Summerscales, *Compressibility of a reinforcement fabric*. Composites Manufacturing, 1995. **6**(1): p. 15-21.
14. Bickerton, S., M.J. Buntain, and A.A. Somashekhar, *The viscoelastic compression behavior of liquid composite molding preforms*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2003. **34**(5): p. 431-444.
15. Kelly, P.A., R. Umer, and S. Bickerton, *Viscoelastic response of dry and wet fibrous materials during infusion processes*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006. **37**(6 SPEC ISS): p. 868-873.
16. Saunders, R.A., C. Lekakou, and M.G. Bader, *Compression in the processing of polymer composites. 2. Modelling of the viscoelastic compression of resin-*

- impregnated fibre networks.* Composites Science and Technology, 1999. **59**(10): p. 1483-1494.
17. Terzaghi, *Theoretical soil mechanics.* Theoretical Soil Mechanics. 1943. 510.
 18. Biot, M.A., *General solutions of equations of elasticity and consolidation for porous material.* American Society of Mechanical Engineers -- Transactions -- Journal of Applied Mechanics, 1956. **23**(1): p. 91-96.
 19. Robitaille, F. and R. Gauvin, *Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. I: Review of experimental results.* Polymer Composites, 1998. **19**(2): p. 198-216.
 20. Robitaille, F. and R. Gauvin, *Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. III: Reorganization of the fiber network.* Polymer Composites, 1999. **20**(1): p. 48-61.
 21. Williams, C.D., S.M. Grove, and J. Summerscales, *The compression response of fibre-reinforced plastic plates during manufacture by the resin infusion under flexible tooling method.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1998. **29**(1-2): p. 111-114.
 22. Carnaby, G.A. and N. Pan, *Theory of the compression hysteresis of fibrous assemblies.* Textile Research Journal, 1989. **59**(5): p. 275-284.
 23. Correia, N.C., et al., *Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005. **36**(12): p. 1645-1656.
 24. Darcy, H., *Les fontaines publiques de la ville de Dijon.* 1856: Dalmont.

25. Ferland, P., D. Guittard, and F. Trochu, *Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer molding*. Polymer Composites, 1996. **17**(1): p. 149-158.
26. Luthy, T., et al. *Dependence of the 1-D permeability of fibrous media on the fibre volume content: Comparison between measurement and simulation*. 1998. Montreal, Can: Computational Mechanics Publ, Ashurst, Engl.
27. Dullien, F.A.L., ed. *Porous Media - Fluid Transport and Pore Structure*. 1979, New York : Academic Press. 396p.
28. Gauvin, R., et al., *Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement*. Polymer Composites, 1996. **17**(1): p. 34-42.
29. Hoes, K., et al., *New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM*. Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002. **33**(7): p. 959-969.
30. Liu, Q., R.S. Parnas, and H.S. Giffard. *New set-up for in-plane permeability measurement*. 2005. Seattle, WA, United States: Soc. for the Advancement of Material and Process Engineering, Covina, CA 91724-3748, United States.
31. Ballata, W.O., S.M. Walsh, and S. Advani, *Determination of the transverse permeability of a fiber preform*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1999. **18**(16): p. 1450-1464.
32. Wu, X., J. Li, and R.A. Shenoi, *A new method to determine fiber transverse permeability*. Journal of Composite Materials, 2007. **41**(6): p. 747-756.

33. Diallo, M.L., R. Gauvin, and F. Trochu, *Experimental analysis and simulation of flow through multi-layer fiber reinforcements in liquid composite molding*. Polymer Composites, 1998. **19**(3): p. 246-256.
34. Acheson, J.A., P. Simacek, and S.G. Advani, *The implications of fiber compaction and saturation on fully coupled VARTM simulation*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004. **35**(2): p. 159-169.
35. Joubaud, L., V. Achim, and F. Trochu, *Numerical simulation of resin infusion and reinforcement consolidation under flexible cover*. Polymer Composites, 2005. **26**(4): p. 417-427.
36. Hammami, A. and B.R. Gebart, *Analysis of the vacuum infusion molding process*. Polymer Composites, 2000. **21**(1): p. 28-40.
37. Gutowski, T.G., T. Morigaki, and Z. Cai, *Consolidation of laminate composites*. Journal of Composite Materials, 1987. **21**(2): p. 172-188.
38. Kessels, J.F.A., A.S. Jonker, and R. Akkerman, *Fully 2 frac(1, 2) D flow modeling of resin infusion under flexible tooling using unstructured meshes and wet and dry compaction properties*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(1): p. 51-60.
39. Walsh, S.M. and C.E. Freese, *Numerical model of relaxation during vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM)*. Polymer Composites, 2005. **26**(5): p. 628-35.

40. Correia, N.C., et al., *Use of resin transfer molding simulation to predict flow, saturation, and compaction in the VARTM process*. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 2004. **126**(2): p. 210-215.
41. Hammami, A., *Key factors affecting permeability measurement in the vacuum infusion molding process*. Polymer Composites, 2002. **23**(6): p. 1057-1067.
42. Tackitt, K.D. and S.M. Walsh, *Experimental study of thickness gradient formation in the VARTM process*. Materials and Manufacturing Processes, 2005. **20**(4): p. 607-27.
43. American Society of Mechanical Engineers., *Instruments and apparatus. Part 16, Density determinations of solids and liquids*. Normes ASME (American Society of Mechanical Engineers) ; PTC19.16.
44. Robitaille, F. and R. Gauvin, *Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. II: Compaction and relaxation of dry and H₂O-saturated woven reinforcements*. Polymer Composites, 1998. **19**(5): p. 543-557.

ANNEXES

Annexe A : Procédure d'utilisation du moule de perméabilité 1D

Le moule de perméabilité 1D permet de mesurer la perméabilité de tissus ou de mats. De l'huile de silicone de viscosité connue est injectée sous pression à l'intérieur du moule. Les temps de passage du front d'imprégnation sont observés. La perméabilité est ensuite calculée. En ajustant l'épaisseur de la cavité ainsi que le nombre de couches, il est possible d'obtenir la courbe de perméabilité en fonction du taux de fibres.

1- Présentation du moule de perméabilité 1D :

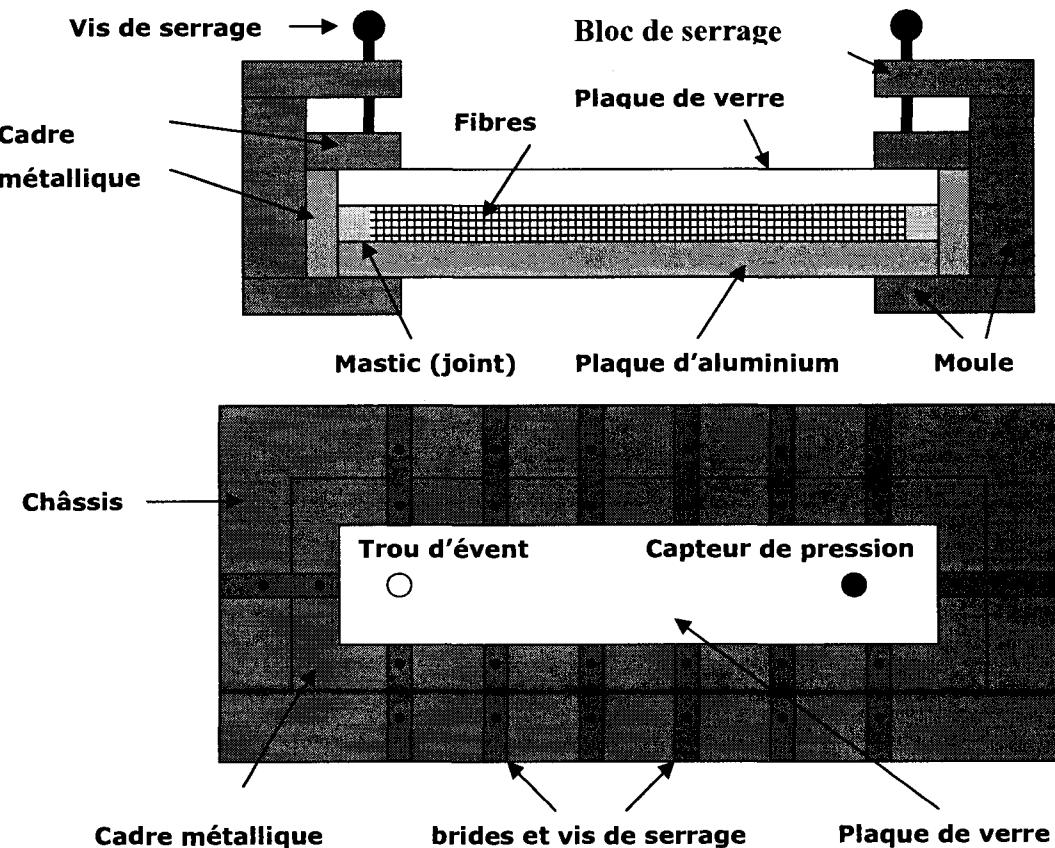


Figure A.1 : Représentation du moule de perméabilité 1D.

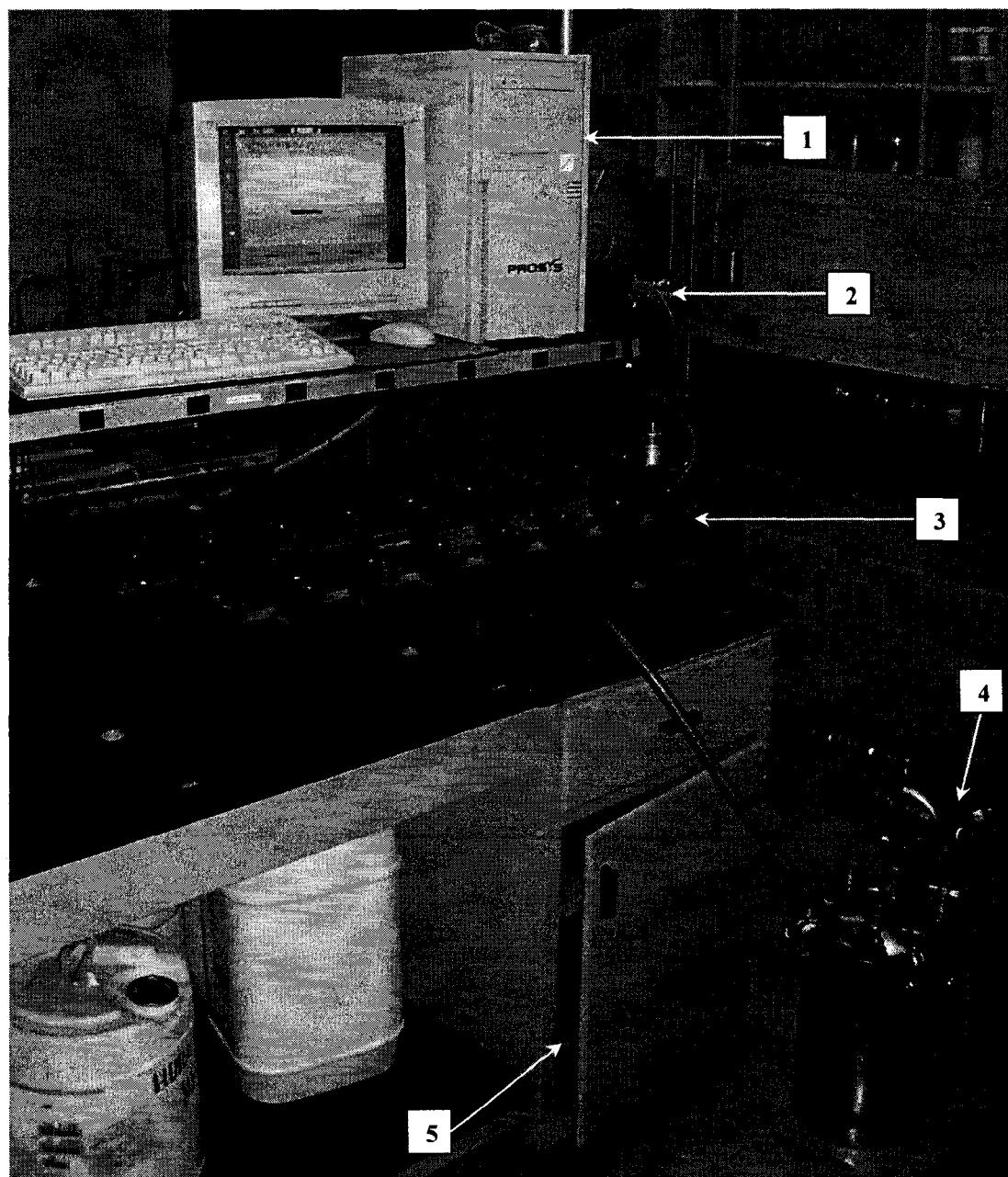


Figure A.2 : Banc d'essai de perméabilité 1D.

- 1- Ordinateur
- 2- Boîte d'acquisition
- 3- Moule de perméabilité 1D
- 4- Pot à pression
- 5- Armoire de rangement

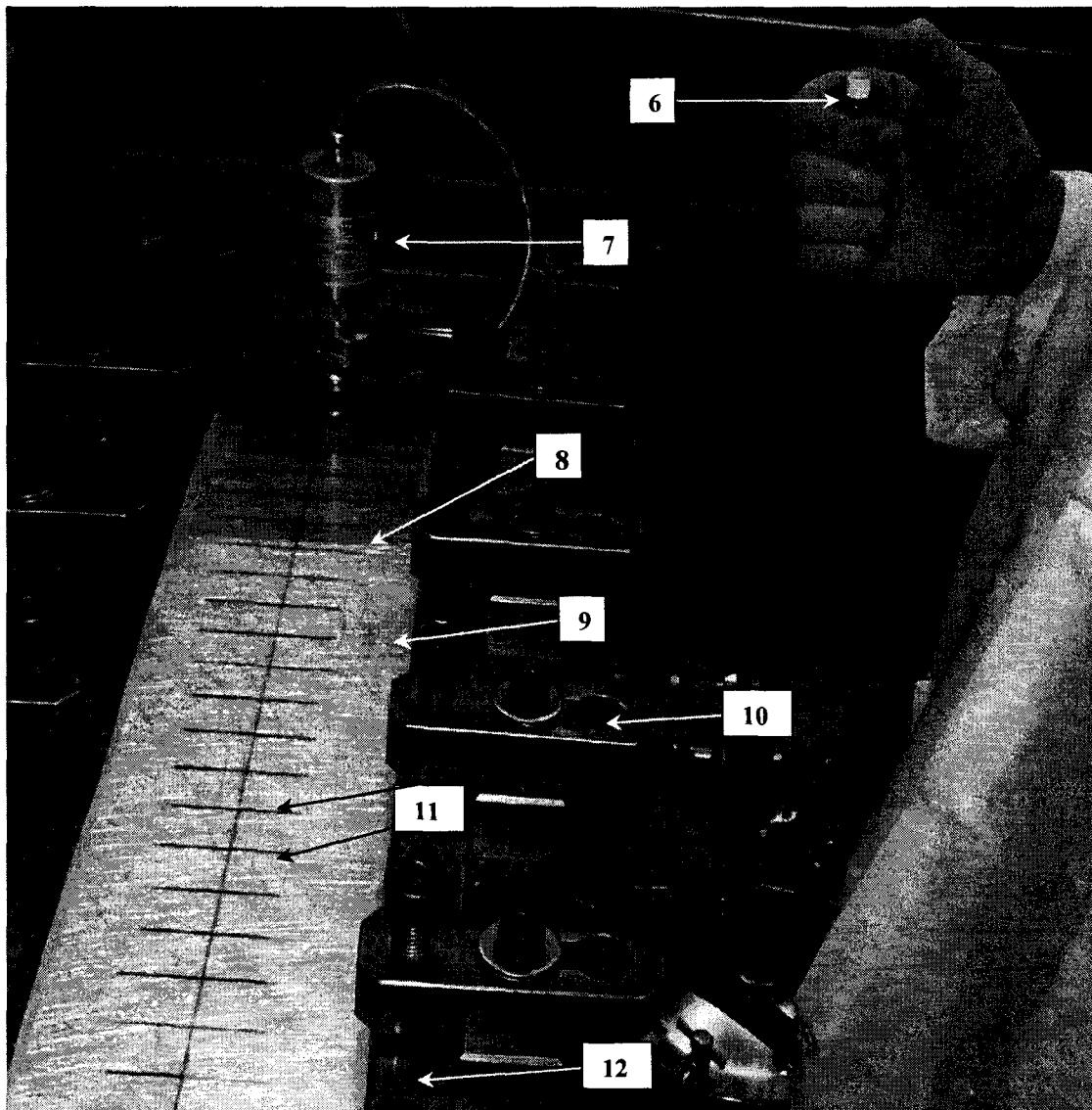


Figure A.3 : Observation du front d'imprégnation.

- 6- Bouton pressoir
- 7- Capteur de pression
- 8- Front d'avancement d'huile
- 9- Fibres
- 10- Bloc de serrage
- 11- Lignes équidistantes
- 12- Cadre métallique

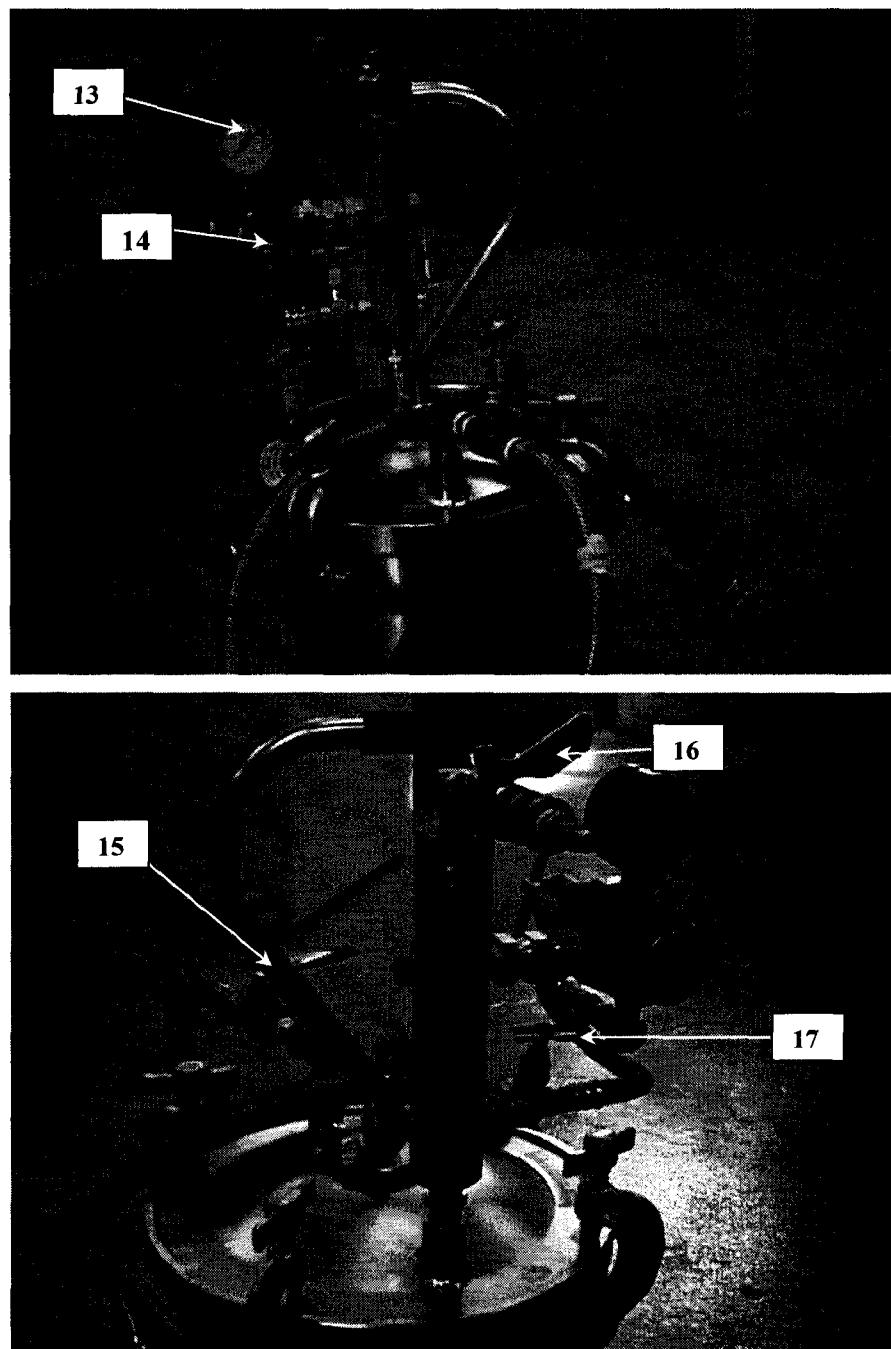


Figure A.4 : Pot à pression.

- 13- Manomètre
- 14- Robinet régulateur de pression
- 15- Valve de sortie de l'huile
- 16- Valve d'entrée d'air
- 17- Robinet de dépression

2- Manipulations

1. Calculer la hauteur de cavité h requise en fonction du taux de fibres et du nombre de couches désirées (voir procédure).
2. Choisir et installer le cadre et les cales pour obtenir la cavité désirée sachant que :

$$h_{cavité} = h_{cadre} - h_{verre} - h_{alu} - h_{cales}.$$
3. Calculer la pression désirée et vérifier qu'elle se situe à l'intérieur des limites d'utilisation du capteur. Le capteur a une limite de 2.11 bars.
4. Vérifier l'huile de silicone et le pot à pression :
 - Ouvrir le pot à pression et ajouter de l'huile au besoin (0.1 Pa*s).
 - Retirer l'air du conduit d'injection en vidant un peu d'huile dans l'évier.
 - Vérifier que le pot à pression peut atteindre la pression désirée. Dans le cas de fuites, l'étanchéité peut être améliorée grâce à une graisse.
5. Découper et peser les fibres :
 - Découper les fibres aux dimensions de 100×400 mm.
 - Peser les fibres. Il faut porter attention à la manipulation des fibres, car ceci peut affecter la variabilité des résultats.

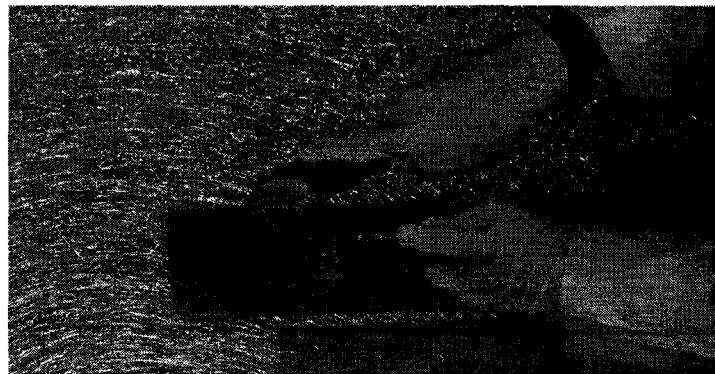


Figure A.5 : Découpe des fibres.

6. Sélectionner un joint d'étanchéité d'épaisseur légèrement supérieure à celle de la cavité et le placer dans le moule. Les joints sont situés dans une boîte en plastique dans l'armoire sous le moule.

7. Retirer le cadre métallique en prêtant attention au fil du capteur de pression.
8. Retirer la plaque de verre :
 - Utiliser la ventouse pour soulever la plaque de verre.
 - Manipuler la plaque de verre en utilisant le trou afin d'éviter les accidents.
 - Déposer soigneusement la plaque de verre en s'assurant de ne pas endommager le capteur de pression.

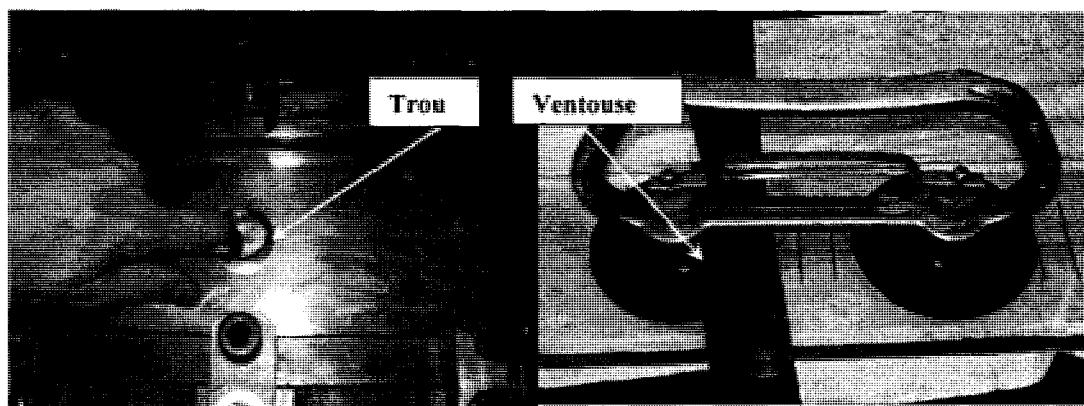


Figure A.6 : Manipulation de la plaque de verre.

9. Appliquer du mastic de chaque coté des fibres. L'épaisseur de mastic dépend de l'épaisseur de la cavité et du taux de fibres. L'utilisation du mastic permet d'éliminer les effets de bords (la superposition des fibres laisse des cavités produisant des écoulements préférentiels d'huile).



Figure A.7 : Application d'un joint de mastic.

10. Déposer avec soin les fibres à l'intérieur du moule entre les deux lignes indiquées.
11. Déposer la plaque de verre. Le capteur de pression est situé au dessus de l'entrée d'huile.
12. Déposer le cadre de serrage. Les vis de serrage entreront dans les trous du cadre métallique situés sur la face supérieure du cadre.
13. Aligner les blocs (A) et ensuite les serrer à 15 N*m (B) à l'aide d'un dynamomètre.

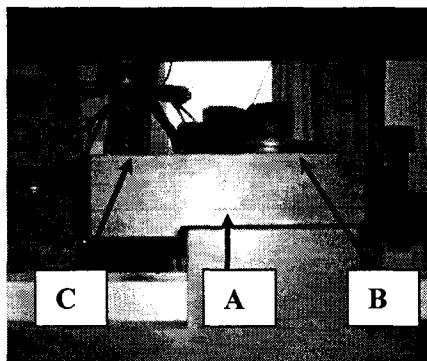


Figure A.8 : Bloc de serrage.

14. Appliquer un couple de 15 N*m sur les vis de serrage (C) :
- Note : Il est impératif de serrer les vis de manière ordonnée. La plaque de verre supporte la charge de serrage. Si l'on applique un chargement ponctuel, le verre se désagrégera, tel que déjà observé aux extrémités de la plaque. Le serrage doit donc être effectué en étoile en évitant de commencer par les extrémités.
15. Brancher le capteur de pression et le bouton pressoir dans la boîte d'acquisition en vérifiant que celle-ci est bien branchée (deux lumières rouges allumées derrière).

16. Fermer l'entrée d'huile.
17. Vérifier le serrage du pot à pression et brancher le tuyau de pression au pot de pression.
18. Ajuster le manomètre à la pression calculée en fermant progressivement le robinet régulateur de pression.
19. Ouvrir le programme PolyPer et vérifier le fonctionnement du capteur de pression et du bouton avant chaque essai : il serait dommage de perdre un essai pour un capteur mal branché.
20. Noter dans le programme le poids des fibres, la température de la pièce, car celle-ci affecte la viscosité de l'huile, et la pression du manomètre.
21. Effectuer l'essai.
22. Fermer l'entrée d'huile dès l'essai terminé et fermer la valve d'entrée d'air. Dévisser le robinet régulateur de pression.
23. Desserrer les vis du moule de manière ordonnée (en étoile). Jeter l'échantillon et nettoyer le moule et le joint.
24. Débrancher la boîte d'acquisition et ranger le bouton pressoir dans sa boîte.
25. Récupérer les données sur l'ordinateur d'acquisition à l'aide d'une puce USB. Les données sont stockées dans un tableur Excel. Un exemple de résultats obtenus est présenté à la section 6.

3- Sélection d'une hauteur de cavité

Le but d'un essai est de déterminer la perméabilité d'un renfort pour un certain taux de fibres V_f , déterminé de la manière suivante :

$$V_f = \frac{\rho_{surf} \cdot n}{\rho_{vol} \cdot h} \quad (\text{A.1})$$

où :

ρ_{surf} est la masse surfacique du renfort (g/m^2),

N est le nombre de plis utilisés,

ρ_{vol} est la masse volumique de la fibre (g/m^3),

H est la hauteur de la cavité en m.

Les paramètres ρ_{surf} et ρ_{vol} sont des propriétés intrinsèques du renfort et des fibres. À titre d'exemple, la masse volumique du verre est de $2,54 \cdot 10^6 \text{ g}/\text{m}^3$. Pour changer le taux volumique de fibres, l'utilisateur peut faire varier deux paramètres : le nombre de plis et la hauteur de la cavité. Cette dernière dépend du cadre en aluminium utilisé. Les hauteurs de cavité correspondant aux trois cadres disponibles sont répertoriées dans le Tableau A.1.

Tableau A.1 : Hauteurs de cavité disponibles

	Cadre 1	Cadre 2	Cadre 3
Hauteur de la cavité (mm)	2,08	2,27	4,64

Pour réduire ces hauteurs de cavité, on place des cales métalliques d'épaisseur calibrée sous la plaque d'aluminium. Ces cales ont un motif de découpe différent pour chaque épaisseur.

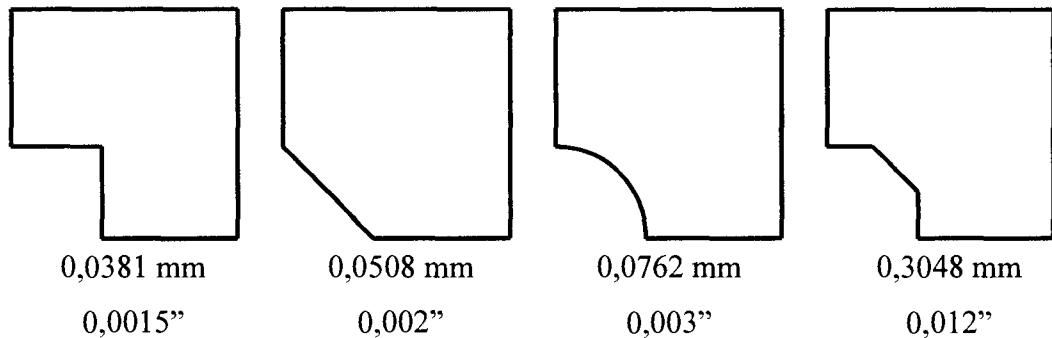


Figure A.9 : Épaisseur des différentes cales métalliques.

Exemple de sélection d'une cavité

Supposons que l'on possède un renfort en fibres de verre de masse surfacique $\rho_{surf} = 300 \text{ g/m}^2$ et que l'on cherche à mesurer sa perméabilité pour un taux de fibres $V_f = 30\%$. La détermination de la hauteur de la cavité et du nombre de couches se fait alors par itération. Par exemple, avec le cadre 2 et 6 couches de renfort, le taux de fibre est :

$$V_f = \frac{300 \cdot 6}{2,54 \cdot 10^6 \cdot 0,0027} = 31,22\%$$

En retirant une couche, le taux de fibres devient :

$$V_f = \frac{300 \cdot 5}{2,54 \cdot 10^6 \cdot 0,0027} = 26,02\%$$

Il reste alors à modifier la hauteur de la cavité. En utilisant une cale d'épaisseur 0,3048 mm, le taux de fibres devient :

$$V_f = \frac{300 \cdot 5}{2,54 \cdot 10^6 \cdot (0,0027 - 0,0003048)} = 30,05\%$$

Cependant, il convient de rappeler qu'il ne s'agit que d'une valeur théorique. En pratique, la masse surfacique du renfort possède une variabilité non négligeable. Il est donc important de peser les fibres avant chaque essai pour déterminer le taux de fibres réel.

4- Sélection de la pression d'injection

Cette section présente les étapes à suivre afin d'évaluer la pression constante d'injection à appliquer pour obtenir un essai représentatif de perméabilité 1D sur une plage de temps variant entre 2 à 3 minutes. Si l'essai est trop rapide, il est difficile d'enregistrer les données; s'il est trop lent, les forces capillaires ont une influence et modifient le régime d'écoulement de Darcy. Il est donc important d'identifier rapidement la plage d'injections pour avoir de bons résultats.

4.1- Mesures à pression constante

La pression constante est ajustée avec le manomètre du pot à pression

a) Sélection d'une première valeur de pression

Pour une injection unidirectionnelle à pression constante, la pression d'injection et le temps de remplissage sont reliés par l'équation suivante :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{L^2 \cdot \phi \cdot \mu}{K \cdot t} \quad (A.2)$$

où K est la perméabilité (m^2), L la longueur du renfort (m), ϕ la porosité, t le temps de remplissage (s), μ la viscosité ($\text{Pa} \cdot \text{s}$), et P la pression d'injection constante (Pa).

Dans cette formule, la perméabilité du renfort est inconnue au départ. Dans une première approximation, on peut évaluer celle-ci à partir des valeurs de perméabilité de renforts similaires présentées au Tableau A.2.

Tableau A.2 : Exemples de valeurs de perméabilité

Type de renfort	Volume de fibre	Ordre de grandeur de perméabilité (m^2)
Tissu	35 %	2 E-10
	45 %	6 E-11
mat	20 %	1 E-9
	30 %	3 E-10
	35 %	1.5 E-10
Mat de verre avec milieu de dispersion	15 %	3 E-9
	20 %	1.5 E-9
	30 %	5 E-10

Par exemple, pour un renfort tissé avec $V_f = 35\%$ ($\phi = 1 - V_f$), une première approximation de $K = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ permettra d'obtenir rapidement une pression P pour une injection de $t = 2$ min d'un échantillon de longueur $L = 400$ mm avec de l'huile de silicium de viscosité $\mu = 100$ cst = 0.1 Pa.s :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{0.4^2 \times 0.65 \times 0.1}{2 \cdot 10^{-10} \times 120} = 2.2 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 2.2 \text{ bars}$$

b) Ajustement de la pression

Il est possible que la pression nécessite un ajustement pour la seconde mesure : le temps d'injection aura été trop lent ou trop rapide. Il est maintenant possible d'effectuer un calcul avec une perméabilité plus représentative. En prenant le temps de remplissage t_1 et la pression P_1 (enregistrée par le capteur numérique et non celle de l'ajustement manuel du manomètre) de la première expérience, il est possible de calculer la pression P_2 pour un temps d'injection désiré t_2 soit entre 2 et 3 minutes.

$$P_2 = P_1 \frac{t_1}{t_2} \quad (\text{A.3})$$

L'expérience précédente est considérée trop rapide et on veut réduire la pression pour qu'elle se termine en 3 minutes. La pression d'injection ajustée pour la seconde expérience sera donc :

$$P_2 = 2.2 \cdot 10^5 \times \frac{120}{180} = 1.47 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

4.2 - Mesures à débit constant

Un débit constant est généralement obtenu en comprimant un piston à vitesse constante. Lors de mesures à écoulement constant, le temps de remplissage ne dépend pas de la perméabilité, mais directement du débit. Il est facile de calculer la valeur du débit d'injection D pour un temps de remplissage désiré :

$$D = \frac{L \cdot l \cdot h \cdot \phi}{t} \quad (\text{A.4})$$

où L et l sont la longueur et largeur de l'échantillon (m), h est la hauteur de la cavité du moule (m), ϕ la porosité et t le temps de remplissage (s). Par exemple, pour un

échantillon de 100 mm * 400 mm, au volume de fibres 35% dans une cavité du moule de 4 mm, le débit est :

$$D = \frac{0.4 \times 0.1 \times 4 \cdot 10^{-3} \times 0.65}{120} = 8.7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} \text{ ou } 0.87 \text{ cm}^3/\text{s}$$

La pression augmentera tout au long de l'essai jusqu'au remplissage de la pièce. Il est cependant possible que la pression maximale de l'appareil soit atteinte pour des renforts trop longs ou peu perméables. La pression restera alors constante pour le reste de l'essai. Il est aussi important de vérifier la plage d'utilisation du capteur de pression avant ce type d'essai (certains n'allant qu'à 2.11 bars).

5- Calcul de la perméabilité

La perméabilité est calculée grâce à trois méthodes telles que détaillées par Ferland et al. [25] :

1. La méthode élémentaire (K_{Elem}) est fondée sur les expressions suivantes exprimant respectivement la vitesse d'avancement du front $V(t)$, le gradient de pression dP/dx et la perméabilité K_{Elem} :

$$V(t_i) = \frac{1}{2} \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} + \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{dP}{dx}(t_i) = -\frac{P_0(t_i)}{x_i} \quad (\text{A.6})$$

$$K_{Elem}(t_i) = -\frac{\mu \cdot \phi \cdot V(t_i)}{dP/dx(t_i)} \quad (\text{A.7})$$

où x_i est la position du front d'avancement du fluide à un temps t_i , $P_0(t_i)$ la pression du fluide au port d'injection au temps t_i , μ la viscosité du fluide et ϕ la porosité du renfort.

2. La méthode du point unique (K_SP) utilise une simple paire d'observations (x_i, t_i) afin de calculer une approximation rapide de la perméabilité K_{sp} :

$$K_{sp} = \frac{\mu \phi x_i^2}{2I_i} \quad (\text{A.8})$$

avec

$$I_i = I_{i-1} + \left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) (t_i - t_{i-1}) \quad (\text{A.9})$$

3. Finalement, la méthode interpolée (K_Int), utilise la méthode des moindres carrés effectuée sur les données expérimentales et sur l'équation de conservation de la masse. Il en résulte la relation suivante :

$$K_{int} = \frac{a^2 \mu \phi}{2} \quad (\text{A.10})$$

$$a = \frac{\sum x_i \sqrt{I_i}}{\sum I_i} \quad (\text{A.11})$$

où I_i est défini par l'équation A.9.

6- Exemple de résultat

Les expériences sont enregistrées dans le logiciel Polyper et sont ensuite compilées dans un tableur Excel. Le Tableau A.3 résume les résultats présentés aux Figures A.10 à A.13. À 22.37% de taux de fibres, la perméabilité de l'acrylique est de $1.058 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$.

Tableau A.3 : Résultats d'une mesure de perméabilité pour le renfort d'acrylique

PERMEABILITY MEASUREMENT		
Transient Regime		
Constant Pressure		
Identification :		
Date :	Acrylik 1 07/27/05	
Names:	Bruno Croteau	
Location:	Polytechnique	
Contact :	Bruno.croteau-labouly@polymtl.ca 0	
Reinforcement properties		
Reinforcement	Acrylique	
Type	mat	
Orientation	none	
Volumic mass	1.410E+06	<i>g/m³</i>
Surfacic mass	178	<i>g/m²</i>
Number of plies	2	
Thickness	1.13	<i>mm</i>
Fibre Volume Fraction		%
Porosity		%
Fluid properties		
Fluid	Silicon Oil	
Viscosity	0.1	<i>Pa.s</i>
Injection parameters		
Injection pressure	1.660	<i>bar</i>
End of injection time	353.00	<i>s</i>
Maximum injected length	40.0	<i>cm</i>
Permeability result		
	Mean	
Measured Permeability (m^2)		
Normalized minimum squares error	0.07	%
Average relative error	2.06	%

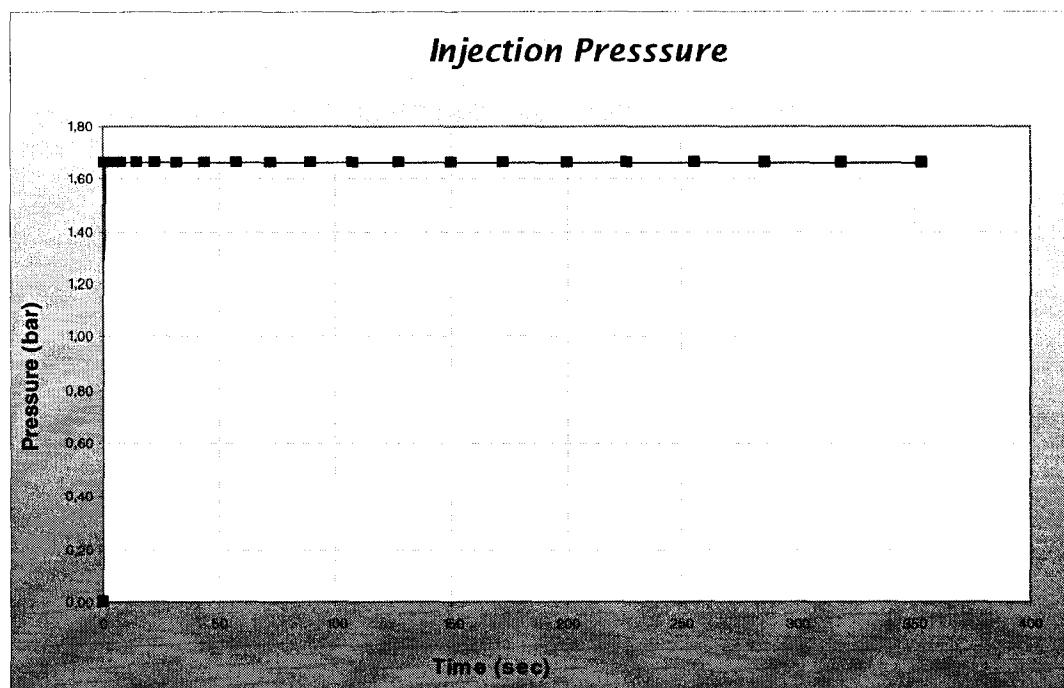


Figure A.10 : Pression d'injection de l'huile de silicone.

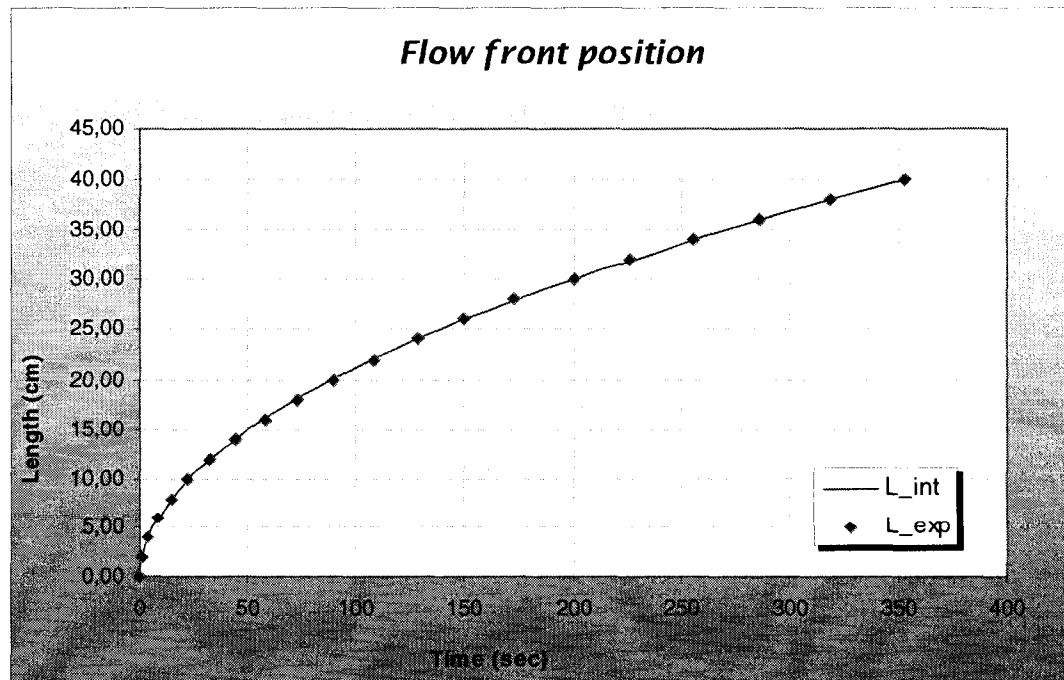


Figure A.11 : Progression du front d'imprégnation.

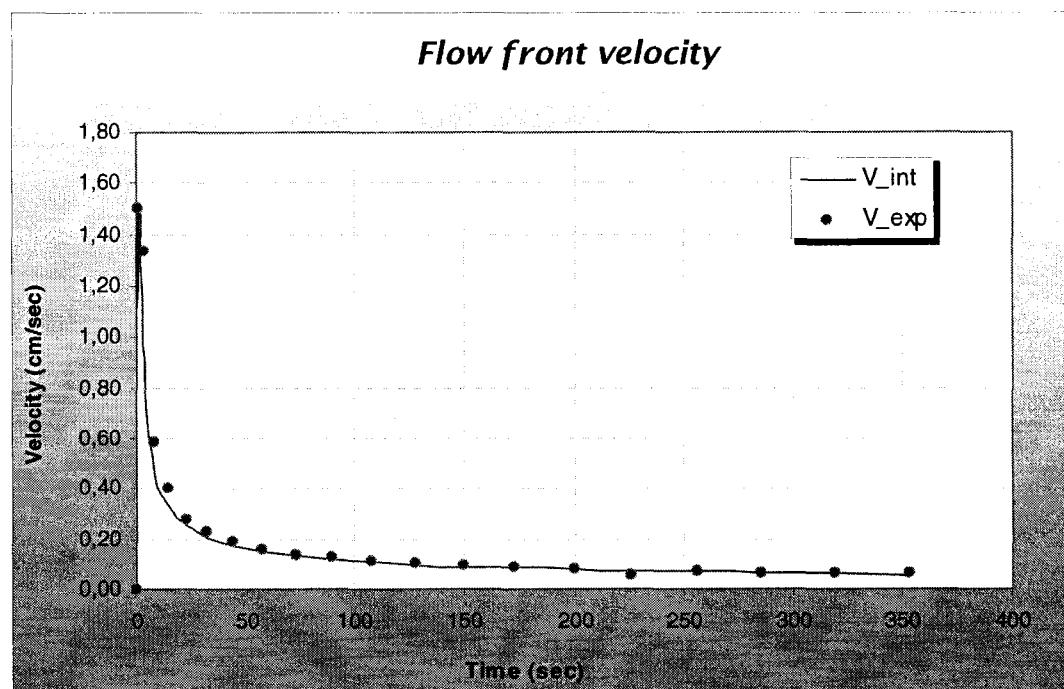


Figure A.12 : Vitesse du front d'imprégnation.

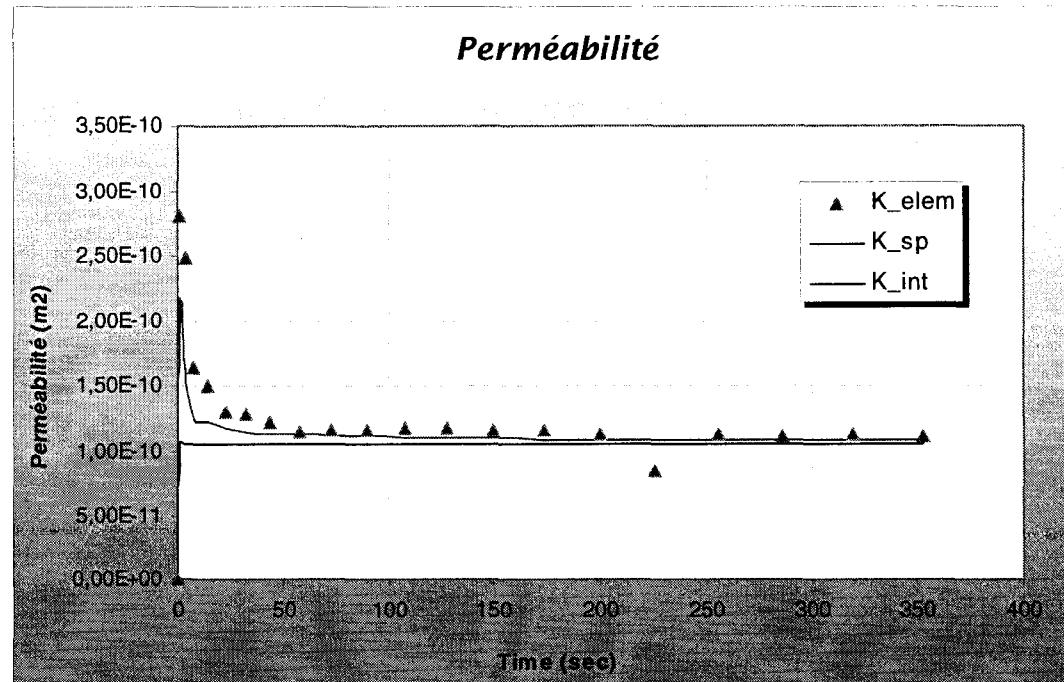


Figure A.13 : Perméabilité du renfort fibreux à $V_f = 22\%$.

Annexe B : Méthode expérimentale de caractérisation du procédé d'infusion de résine

1 Présentation du moule de perméabilité en infusion

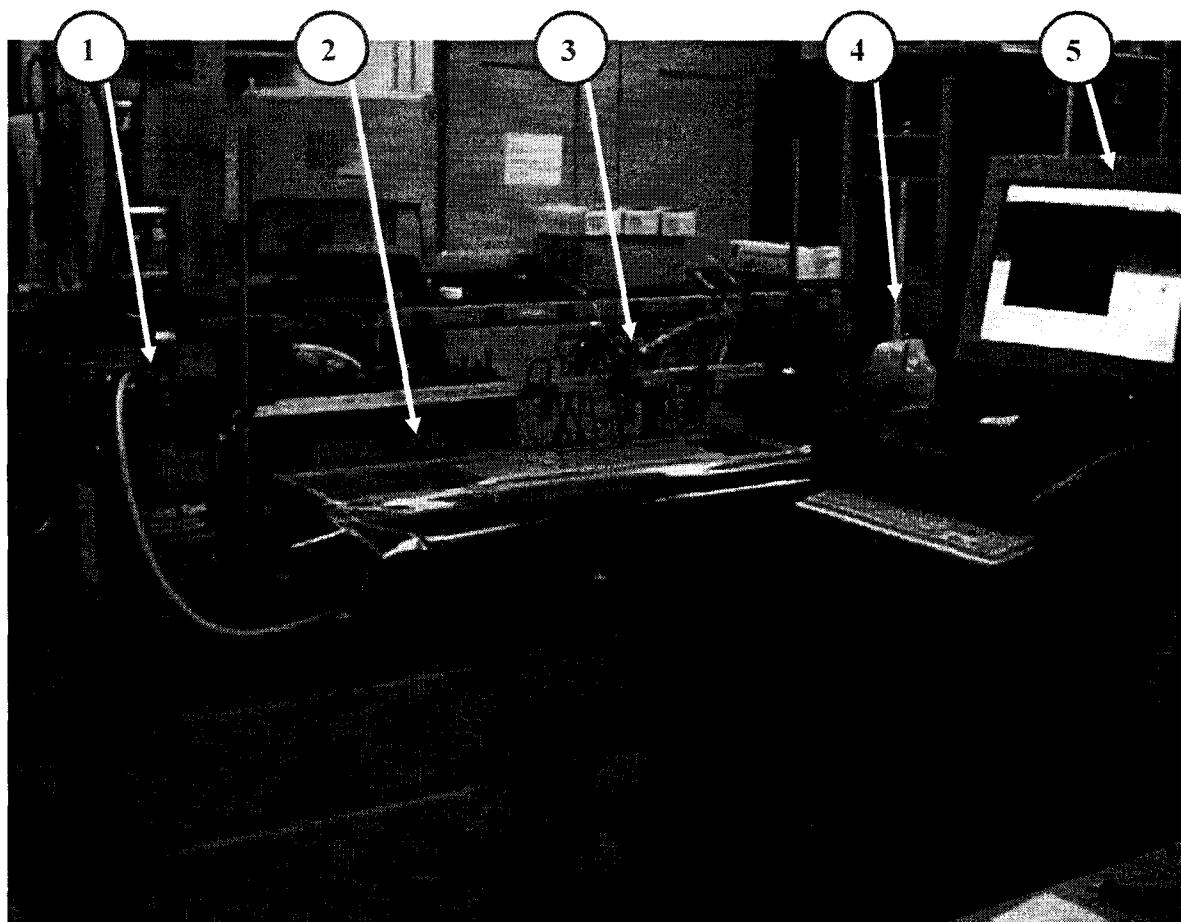


Figure B.1 : Banc d'essai pour caractériser la perméabilité en infusion.

1. Pot de pression
2. Moule de perméabilité
3. LVDT
4. Réservoir d'huile de silicone
5. Ordinateur d'acquisition de données

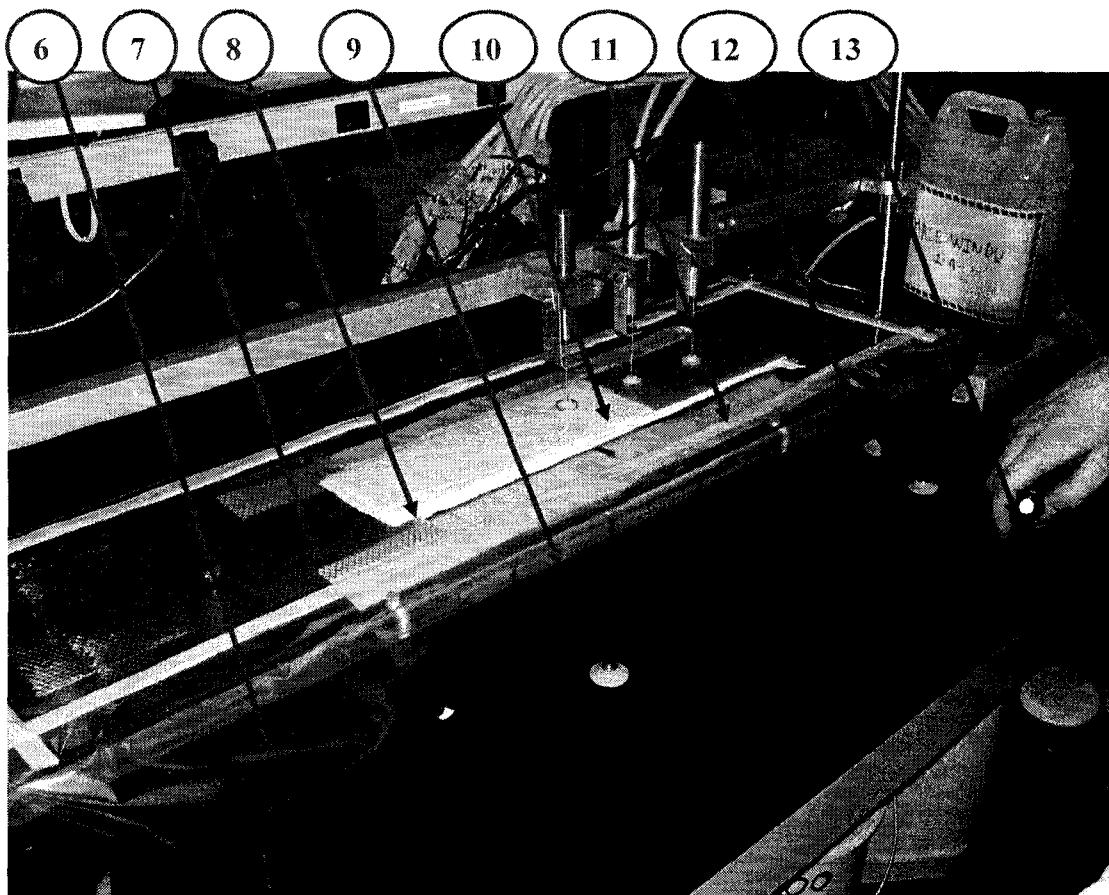


Figure B.2 : Moule de mesure de la perméabilité en infusion.

6. Membrane flexible
7. Milieu drainant
8. Renfort
9. Partie rigide du moule
10. Front d'écoulement
11. Joint de mastic
12. Joint d'étanchéité
13. Bouton pressoir



Figure B.3: Pot de vide.

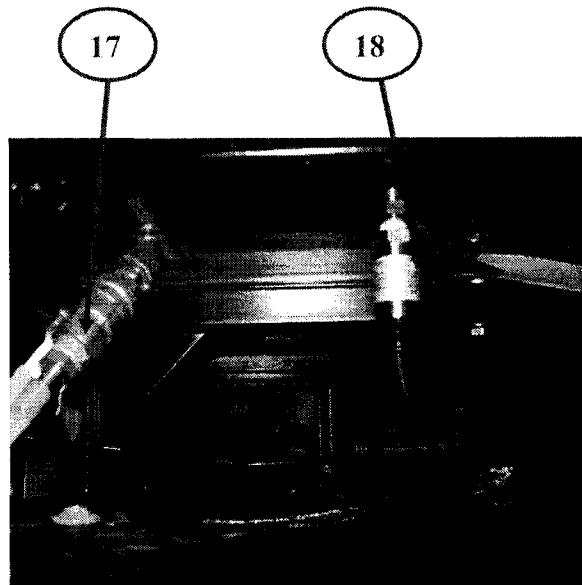


Figure B.4: Valve de vide et capteur de pression.

- 14. Régulateur de pression
- 15. Manomètre
- 16. Fixation de couvert de pot de vide
- 17. Valve de vide
- 18. Capteur de pression

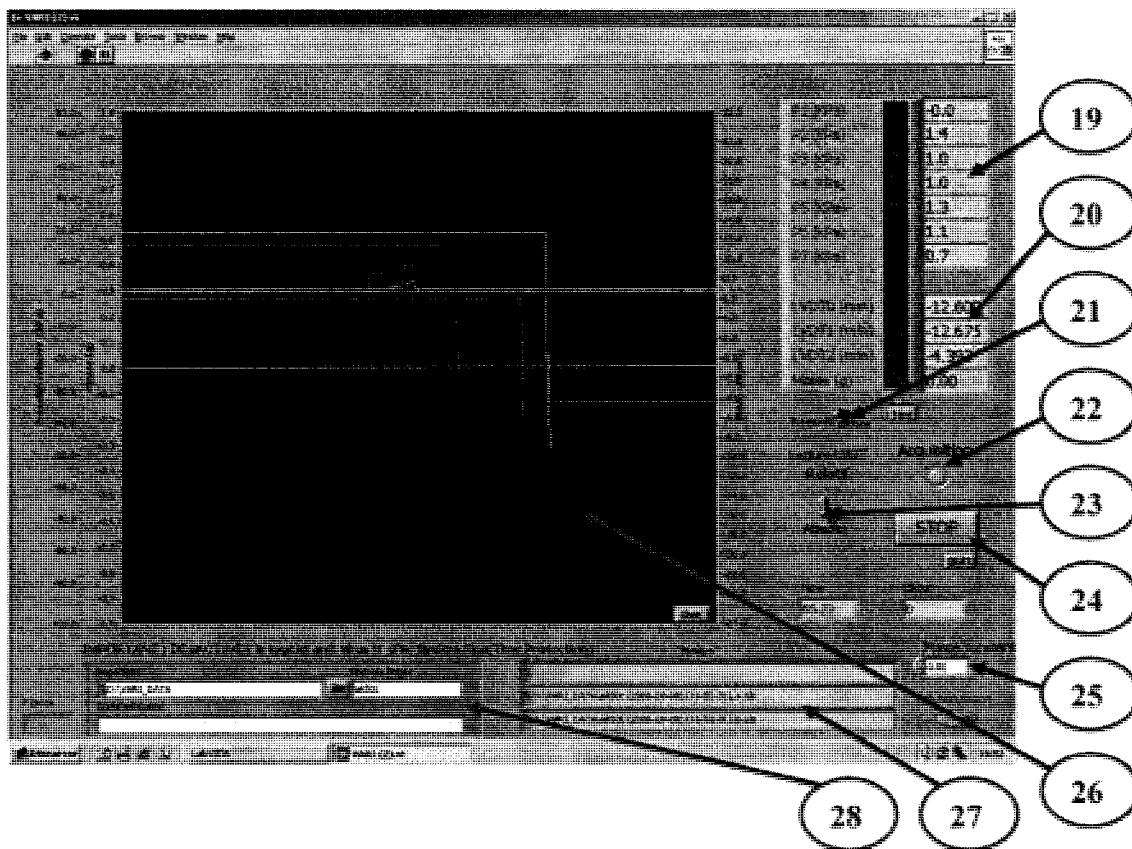


Figure B.5: Interface du logiciel d'acquisition.

19. Mesures de pression
20. Mesures de hauteur
21. Bouton de mise à zéro des capteurs de pression
22. Indicateur d'acquisition de données
23. Bouton de mise à zéro des capteurs de hauteur (LVDT)
24. Bouton d'arrêt d'acquisition de données
25. Zone d'inscription de la masse de l'échantillon
26. Affichage graphique des mesures
27. Emplacement et nom du fichier d'enregistrement
28. Titre du fichier d'enregistrement

2-Procédure expérimentale

1. Vérifier l'huile de silicone et le pot de vide :

- Vérifier le niveau d'huile dans le réservoir d'alimentation. Au besoin, remplir le bidon.
- Vérifier que le bout du tuyau à l'intérieur du réservoir d'alimentation ne dépasse pas au dessus de la surface du fluide.
- Vérifier que le pot à vide contient bien un récipient à l'intérieur.

2. Découper les fibres :

- Tracer les dimensions de l'échantillon (100 × 440 mm) sur les fibres.
- Découper les fibres en utilisant le couteau circulaire ou des ciseaux.
- Porter attention à la manipulation des fibres car ceci affecte la variabilité des résultats.

3. Découper la membrane flexible :

- Découper une membrane aux dimensions de 300 x 1000 mm.

4. Démarrer l'ordinateur (nom : utilisateur ; password : darcy) et le programme VARI, vérifier les capteurs de pression et les LVDT avant chaque essai. Ajuster les LVDT à leur niveau le plus bas (-5.96 mm pour le petit LVDT).

5. Peser les fibres :

- Tarer la balance et peser les fibres avec un cabaret.

6. Noter dans le logiciel VARI le poids des fibres et s'assurer que la température du laboratoire est de 23°C. La viscosité de l'huile dépend de sa température. Si la température n'est pas de 23°C, une correction devra être apportée à la valeur de la viscosité du fluide filtrant.

7. Mettre à zéro les capteurs de pression, à l'aide du bouton de l'interface du logiciel VARI indiqué sur la Figure B.5.
8. Mettre à zéro les capteurs LVDT, en sélectionnant « Relatif » sur l'interface du logiciel VARI, en s'assurant qu'ils sont positionnés au centre du moule et au dessus des capteurs de pression 2, 3 et 4.
9. Appliquer le joint d'étanchéité :
 - Enlever toute trace d'huile sur le moule avant d'appliquer le joint d'étanchéité.
 - Déposer le joint à environ 5 cm du bord du moule et s'assurer qu'il adhère bien à la surface.
 - Pour les coins, chevaucher deux bouts de joint d'étanchéité ou utiliser la technique des deux angles de 45 degrés, comme illustré aux Figures B.6 et B.7



Figure B.6: Chevauchement des joints d'étanchéité.

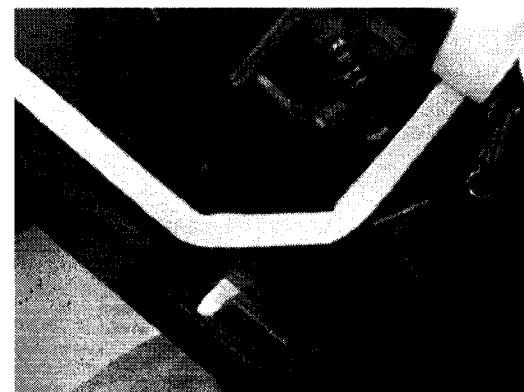


Figure B.7: Méthode des deux angles de 45 degrés.

10. Déposer le renfort sur le moule. Les extrémités de l'échantillon doivent être placées sur les lignes indiquant le premier et le sixième capteur de pression.

11. À partir des deux extrémités, déposer un milieu de dispersion pour assurer un bon acheminement de l'huile et du vide nécessaire lors de l'infusion.

Note : Placer le milieu de dispersion en s'assurant que les fibres inférieures sont dans le sens de circulation de la résine pour assurer un écoulement uniforme et un front d'huile perpendiculaire à l'écoulement. La Figure B.8 illustre un front d'écoulement modifié par l'orientation des fibres inférieures du milieu de dispersion.

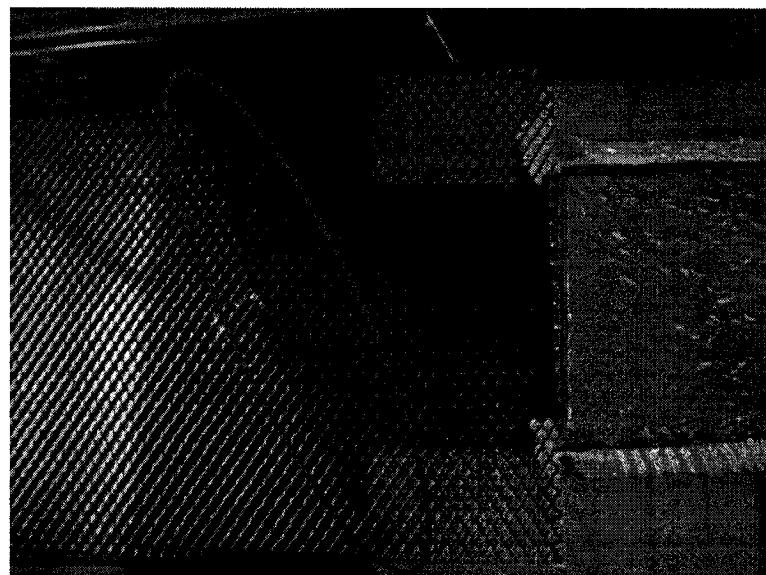


Figure B.8: Exemple de front d'écoulement inadéquat pour les mesures.

12. Appliquer un joint de mastic de chaque côté du renfort, tel que montré à la Figure B.8.

Note : Lors de l'écoulement en régime permanent, l'huile circule plus rapidement sur les côtés de l'échantillon. Pour contrer ces écoulements préférentiels, il faut ajouter une bande de mastic sur les côtés de l'échantillon. La Figure B.9 illustre un exemple d'écoulement préférentiel lors d'un essai en régime permanent, occasionné par l'absence de mastic sur les bords du renfort.

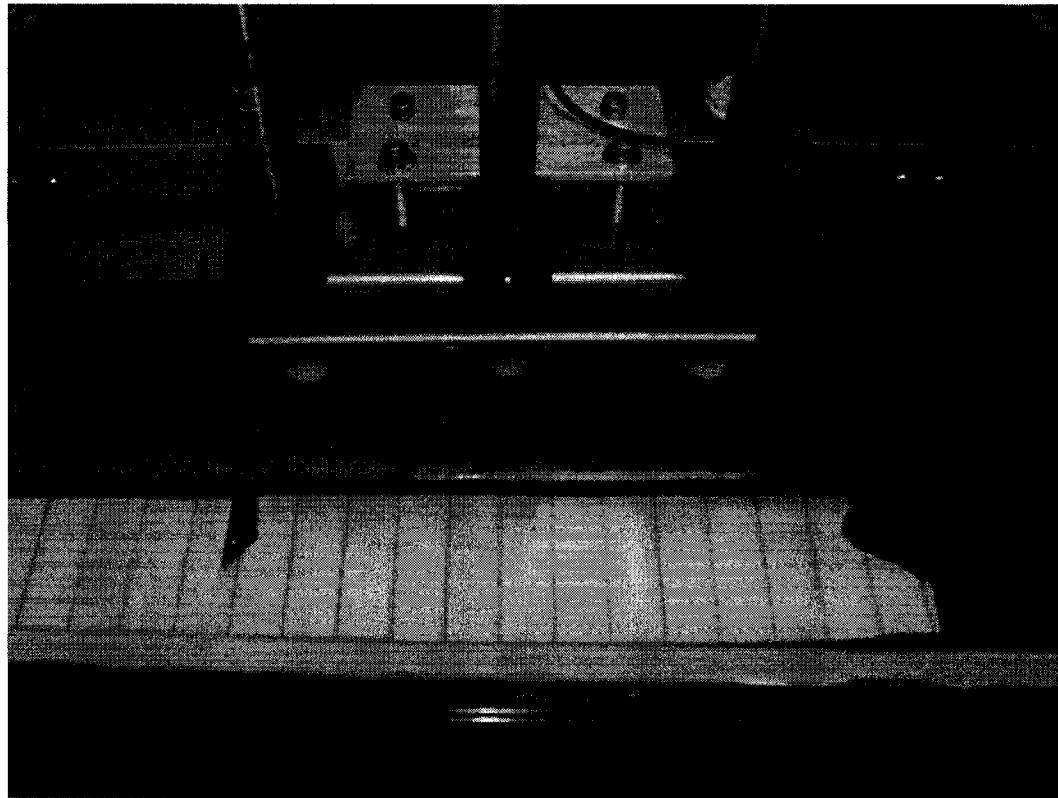


Figure B.9: Écoulement préférentiel sur les bords de la fibre.

13. Fermer l'entrée d'huile et la valve de contrôle du vide.

14. Appliquer la membrane de plastique sur le renfort et le joint, pour assurer une étanchéité parfaite.

Note : Il est préférable d'enrouler la membrane sur un petit tube avant de l'appliquer sur le joint. On s'assure ainsi d'appliquer la membrane de manière uniforme et on évite plus facilement les plis qui nuiraient à l'étanchéité. Cette technique est illustrée à la Figure B.10.

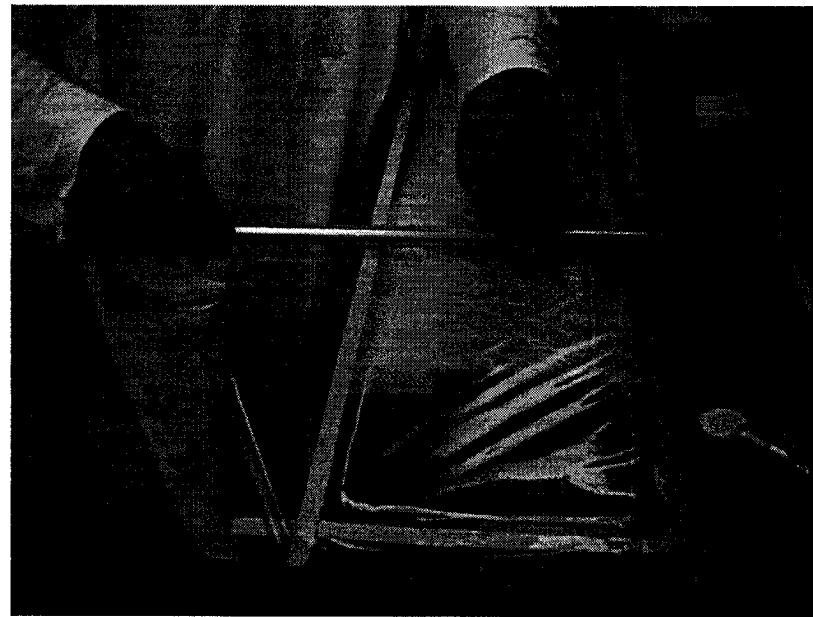


Figure B.10: Application de la membrane sur les fibres et le joint d'étanchéité.

Note : Lorsqu'il s'avère nécessaire de faire un pli dans la membrane, utiliser la technique illustrée à la Figure B.11.



Figure B.11: Technique utilisée pour effectuer un pli dans la membrane.

15. Brancher le bouton pressoir au fil marqué des lettres « PSHB ». Tester ensuite son bon fonctionnement.

16. S'assurer que la balance est branchée au fil marqué des lettres « BAL » et la tarer avec le réservoir d'huile de silicium sur la balance. Vérifier son fonctionnement sur l'interface VARI.

17. Vérifier le serrage du pot à vide et brancher le tuyau de vide au pot de vide.

18. Ouvrir progressivement la valve de vide, illustrée dans la Figure B.14, puis la refermer pour vérifier l'étanchéité du montage.

Note : On doit observer les pressions données par le programme VARI, il ne doit y avoir aucune fuite dans le système.

19. Ajuster le robinet régulateur de pression du pot de vide pour obtenir la pression désirée, selon les valeurs obtenues par le programme VARI.

20. Réaliser l'expérience :

Enregistrer chaque étape de l'expérience sous un fichier différent, sous la forme suivante : Matériau – Pression – #Essai – Type.

a) *Cycles de compression à sec*

Le cycle de compaction à sec permet d'obtenir la courbe décrivant le comportement du matériau lors de sa compaction :

1. Incrire le titre de fichier de sauvegarde dans le logiciel VARI (ex : AK-50-A-SEC).

2. Presser le bouton lorsque le test est prêt à démarrer; un indicateur vert s'allume sur l'interface logiciel pour indiquer le début de l'essai.
3. Effectuer 3 cycles de compression entre 0 kPa et la pression de test, en augmentant et diminuant progressivement la pression et en s'assurant de prendre au moins 10 mesures pour chaque compression et chaque décompression.
4. Terminer le test à l'aide du bouton « STOP » du logiciel VARI.

b) *Infusion de l'échantillon*

L'essai en régime transitoire permet d'observer l'évolution de la pression et de l'épaisseur lors d'une infusion :

1. Inscrire le titre de fichier de sauvegarde dans le logiciel VARI (ex : AK-50-A-TRANS).
2. Presser le bouton lorsque le test est prêt à démarrer; un indicateur vert s'allume sur l'interface logiciel pour indiquer le début de l'essai.
3. Ouvrir l'entrée d'huile.
4. Presser le bouton lorsque l'huile touche le début de l'échantillon.
5. Presser le bouton lorsque le front d'huile franchit chacune des marques du moule, placées à 2 cm l'une de l'autre.
6. Terminer le test à l'aide du bouton « STOP » du logiciel VARI.

c) *Perméabilité en régime permanent*

L'essai en régime permanent permet d'obtenir facilement la perméabilité du renfort pour différents taux volumiques de fibres :

- 3- Inscrire le titre de fichier de sauvegarde dans le logiciel VARI (ex : AK-50-A-PERM).
- 4- Presser le bouton lorsque le test est prêt à démarrer; un indicateur vert s'allume sur l'interface logiciel pour indiquer le début de l'essai.

- 5- S'assurer d'obtenir la pression désirée au capteur 6 (indiquant la pression à l'extrémité de l'échantillon), en diminuant la pression et non en l'augmentant; ceci permet de s'assurer que la compression du renfort se situe sur la courbe de décompression et non sur la courbe de compression, conformément aux essais en régime transitoire. Des essais sont normalement effectués à 30 kPa, 50 kPa et 70 kPa.
- 6- Une fois le régime permanent établi, prendre 20 mesures espacées de 10 secondes pour vérifier la permanence de l'écoulement.
- 7- Terminer le test à l'aide du bouton « STOP » du logiciel VARI.

21. Fermer l'entrée d'huile dès l'essai terminé et couper le vide.

22. Jeter l'échantillon, la membrane et le joint, puis nettoyer le moule.

23. Ranger le bouton pressoir dans sa boîte.

24. Récupérer les données.

Tableau B.1 : Exemple de données recueillies lors d'un essai

Nom :	Régime Transitoire													
	Massé échantillon (g) :		28.81											
Click	Position	Temps (s)	P1 (kPa)	P2 (kPa)	P3 (kPa)	P4 (kPa)	P5 (kPa)	P6 (kPa)	P7 (kPa)	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	Massé (g)	
1	0	4.345	-27.41	-69.635	-69.89	-69.819	-70.092	-70.27	-70.133	3.184	3.003	3.246	-25.22	
2	20	7.145	-11.598	-70.059	-70.202	-70.006	-70.162	-70.136	-70.1	3.184	3.002	3.246	-35.48	
3	40	13.551	-6.687	-70.033	-70.15	-69.941	-70.056	-70.113	-70.004	3.185	3.002	3.246	-42.53	
4	60	21.754	-4.809	-70.009	-70.143	-69.933	-70.156	-70.147	-69.981	3.184	3.003	3.246	-47.7	
5	80	34.254	-3.591	-70.057	-70.143	-69.985	-70.115	-70.146	-69.97	3.182	3.002	3.245	-54.24	
6	100	48.645	-2.824	-55.424	-70.158	-69.928	-70.062	-70.1	-69.987	3.2	3.002	3.246	-60.41	
7	120	65.446	-2.282	-44.602	-70.169	-69.946	-70.092	-70.137	-69.956	3.252	3.001	3.246	-65.8	
8	140	86.146	-1.959	-36.345	-70.173	-69.991	-70.125	-70.099	-69.994	3.31	3	3.244	-71.68	
9	160	112.846	-1.587	-29.913	-70.155	-69.947	-70.085	-70.112	-69.996	3.369	2.995	3.24	-78.19	
10	180	140.361	-1.487	-25.481	-60.916	-69.932	-70.113	-70.048	-70.014	3.428	3.017	3.239	-84.1	
11	200	169.158	-1.23	-22.27	-54.151	-69.914	-70.088	-70.067	-69.971	3.477	3.038	3.237	-89.83	
12	220	201.955	-1.089	-19.661	-48.076	-69.893	-70.074	-70.038	-69.967	3.525	3.063	3.236	-95.63	
13	240	239.246	-1.003	-17.457	-42.978	-69.956	-70.086	-70.104	-69.996	3.577	3.091	3.237	-102.17	
14	260	278.346	-0.905	-15.602	-38.879	-63.94	-70.085	-70.134	-70.002	3.624	3.119	3.251	-107.86	
15	280	320.956	-0.862	-14.068	-35.312	-58.365	-70.077	-70.094	-70.01	3.667	3.147	3.268	-113.43	
16	300	369.054	-0.759	-12.796	-32.248	-53.576	-70.095	-70.108	-70.038	3.714	3.176	3.288	-119.5	
17	320	415.746	-0.686	-11.719	-29.665	-49.453	-70.113	-70.1	-69.99	3.753	3.202	3.308	-125.18	
18	340	465.456	-0.634	-10.862	-27.365	-45.732	-69.944	-70.115	-70	3.791	3.231	3.329	-130.87	
19	360	518.754	-0.613	-9.981	-25.261	-42.316	-65.468	-70.061	-69.939	3.833	3.259	3.352	-136.56	
20	380	572.545	-0.529	-9.272	-23.44	-39.449	-60.692	-70.063	-69.978	3.867	3.286	3.372	-142.05	
21	400	629.546	-0.477	-8.631	-21.869	-36.808	-57.027	-70.055	-70.028	3.899	3.308	3.39	-147.51	
22	420	695.345	-0.511	-8.007	-20.297	-34.33	-53.121	-70.096	-70	3.935	3.334	3.412	-153.58	
23	440	762.546	-0.484	-7.465	-18.998	-32.213	-49.984	-70.068	-70.003	3.967	3.36	3.433	-159.39	

Régime Permanent

Temps (s)	P1 (kPa)	P2 (kPa)	P3 (kPa)	P4 (kPa)	P5 (kPa)	P6 (kPa)	P7 (kPa)	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	Massé (g)	Dépl (mm)	nm3/s
perm30	1115.05	-0.225	-3.155	-7.586	-13.02	-21.071	-29.479	-30.04	4.381	3.739	3.768	-275.2	0.044
perm50	524.658	-0.309	-4.691	-11.791	-20.684	-34.555	-49.805	-50.832	4.209	3.566	3.594	-245.9	0.0591
perm70	150.45	-0.422	-6.116	-15.629	-27.723	-47.109	-69.632	-71.068	4.113	3.471	3.508	-222.08	0.0744