

Titre: Caractérisation expérimentale et modélisation de la perméabilité de renforts à fibres continues déformés par cisaillement
Title: [Caractérisation expérimentale et modélisation de la perméabilité de renforts à fibres continues déformés par cisaillement](#)

Auteur: Cristian Fabian Demaria
Author: [Cristian Fabian Demaria](#)

Date: 2008

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Demaria, C. F. (2008). Caractérisation expérimentale et modélisation de la perméabilité de renforts à fibres continues déformés par cisaillement [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/8144/>

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

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8144/>
PolyPublie URL: <https://publications.polymtl.ca/8144/>

Directeurs de recherche: François Trochu
Advisors: [François Trochu](#)

Programme: Non spécifié
Program: [Non spécifié](#)

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE ET MODÉLISATION DE LA
PERMÉABILITÉ DE RENFORTS À FIBRES CONTINUES DÉFORMÉS PAR
CISAILLEMENT

CRISTIAN FABIAN DEMARIA

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE MÉCANIQUE)

AOÛT 2008

©Cristian F. Demaria, 2008.



Library and
Archives Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

ISBN: 978-0-494-46095-5

Our file *Notre référence*

ISBN: 978-0-494-46095-5

NOTICE:

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

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

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

Cette thèse intitulée :

CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE ET MODÉLISATION DE LA
PERMÉABILITÉ DE RENFORTS À FIBRES CONTINUES DÉFORMÉS PAR
CISAILLEMENT

présenté par : DEMARIA Cristian Fabian

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

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

Mme. ROSS Annie, Ph.D., président

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

Mme. PERIÉ-CURNIER Delphine, Ph.D., membre

Mme. HARISMENDY Isabel, Ph.D., membre

DÉDICACE

*à mes grands-parents,
à mes parents,
à mon frère,
à Caroline et à ma petite « cocotin » d'amour Florence,
à Edu, Karen, Luis et Nestor,
à mes amis*

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, j'aimerai remercier et exprimer toute ma gratitude envers mon directeur de recherche, M. François Trochu, pour la confiance manifestée à mon égard et pour m'avoir donné l'occasion d'intégrer le Centre de Recherche en Plasturgie et Composites (CREPEC) de l'École Polytechnique de Montréal. J'ai aussi beaucoup apprécié son support et son sens des relations humaines.

Je tiens aussi à remercier mes collègues des études supérieures, qui ont rendu agréable le travail au sein du département de génie mécanique, et plus particulièrement, à mon ami et compatriote, M. Eduardo Ruiz, pour ses conseils judicieux tout au long de mes études graduées.

Je désire également remercier les techniciens du département de génie mécanique, en particulier Jacques Beausoleil qui était toujours disponible pour résoudre mes problèmes techniques. Je ne peux oublier aussi la précieuse collaboration et grande disponibilité de Christian-Charles Martel dans la dernière étape de ce projet.

Mes remerciements vont également à la compagnie Dassault-Aviation, France, pour avoir contribué au support financier initial de ce projet. En particulier, merci à M. Arnaud Alix pour ses fructueuses suggestions et son support constant durant cette étude. Je remercie aussi les organismes subventionnaires CRSNG et FQRNT pour leur appui

au niveau du financement. Je ne peux ignorer non plus la précieuse collaboration et le support d'ESI Group, France de M. Yannick Benoit, notamment au niveau de l'emploi du logiciel quick Quick-Form.

Enfin, je souhaite remercier les membres du jury pour avoir accepté de réviser cette thèse.

RÉSUMÉ

Cette thèse est consacrée à l'étude de la perméabilité de renforts fibreux tissés. L'étude comporte une analyse de l'influence de la déformation par cisaillement des renforts durant le drapage de surfaces complexes. Le travail présente les développements théoriques, expérimentaux et numériques qui permettent de caractériser la perméabilité planaire de tissus cisaillés ou non-cisaillés. De plus, un modèle mathématique est proposé pour prédire la perméabilité de tissus cisaillés à partir de la connaissance de la perméabilité du tissu non-cisaillé. Un nouveau logiciel appelé PolyPer a été développé pour l'acquisition de données des mesures de perméabilité et le post-traitement des résultats. Cet outil est utilisé dans la suite des travaux. La conception d'un nouveau banc d'essai pour les mesures des perméabilités unidirectionnelles est présentée et discutée. Il est vérifié que la conception finale de ce moule présente les caractéristiques nécessaires pour obtenir une bonne précision lors d'une mesure de perméabilité. Une comparaison des approches unidirectionnelle et radiale pour mesurer la perméabilité a été réalisée. Les résultats sont présentés pour chaque technique de mesure et comparés par une analyse de dispersion. Une nouvelle approche est proposée pour corriger les variations de taux de fibres inévitables lorsque plusieurs mesures sont effectuées sur des échantillons différents et leur influence sur la perméabilité. Enfin, un travail sur le « banc d'essai » de perméabilité est introduit comme une étape vers la normalisation de la mesure de la perméabilité des renforts fibreux. Les résultats de mesures de perméabilité obtenues dans le régime non-saturé sont présentés et discutés.

ABSTRACT

This thesis is dedicated to study the permeability of woven fabrics. The study includes an analysis of the influence of reinforcements' deformation by shear which takes place during the draping of complex surfaces. It presents theoretical, experimental and numerical results on in-plane permeability characterization of both unsheared and sheared woven fabrics. A mathematical model is also proposed to predict the permeability of sheared woven fabrics from the permeability of the unsheared material. A new software called PolyPer was developed for data acquisition of permeability measurements and post-treatment of the results. This tool is then used in future work. The design of a new set-up for unidirectional permeability measurements is presented and discussed. It is verified that the final design of this mould has the characteristics necessary to get a good accuracy for a permeability measurement. A comparison of unidirectional and radial approaches to measure permeability was conducted. The results are presented for each measuring technique and compared by a dispersion analysis. A new approach is proposed to correct the inevitable changes of the fiber volume fraction occurring when several measures are carried out on different samples and their influence on the permeability. Finally, the permeability Benchmark study is introduced as a step towards the normalization of the permeability measurements of fibrous reinforcements. The results of permeability measurements obtained under non-saturated regimen are presented and discussed.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ.....	vii
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DE TABLEAUX	xiv
LISTE DES FIGURES.....	xvii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xxv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xxv
LISTE DES ANNEXES.....	xxvii
 INTRODUCTION.....	 1

CHAPITRE 1 : CARACTÉRISATION DE LA PERMÉABILITÉ D'UN TISSU SANS DÉFORMATION

1.1. Introduction	8
1.2. Revue bibliographique	12
1.3. Procédure expérimentale	14
1.3.1. Montage unidirectionnel	14
1.3.2. Montage bidirectionnel	18
1.4. Méthode de l'ellipse	20
1.5. Comparaison de la méthode itérative de l'ellipse avec la littérature.....	26
1.6. Plan de mesures.....	27
1.7. Résultats sans déformation.....	29
1.7.1. Perméabilités effectives pour la chaîne, la trame et un angle à 45°	29
1.7.2. Perméabilités principales, K_1 et K_2 , et angle du front β	31

1.8. Discussion des résultats.....	36
------------------------------------	----

CHAPITRE 2 : CARACTÉRISATION DE LA PERMÉABILITÉ DU TISSU SOUS DÉFORMATION

2.1. Introduction	42
2.2. Revue bibliographique	42
2.3. Procédure expérimentale.....	43
2.3.1. Définition de l'angle de cisaillement et prédition du taux de fibres	43
2.3.2. Outil et procédure pour induire la déformation du renfort.....	47
2.4. Plan de mesures.....	50
2.5. Résultats avec déformation	52
2.5.1. Perméabilités effectives selon la chaîne, la trame et la direction à 45°.....	52
2.5.2. Perméabilités principales $K1$ et $K2$, et angle β du front.....	55
2.6. Discussion des résultats.....	62

CHAPITRE 3 : PRÉDICTION DE LA PERMÉABILITÉ DE TISSUS CISAILLÉS

3.1. Introduction	72
3.2. Revue bibliographique	73
3.3. Modèle de prédition des perméabilités principales d'un tissu déformé	76
3.4. Prédition de l'angle d'écoulement β	84
3.5. Discussion des résultats.....	89
3.6. Applications dans les simulations numériques.....	98

CHAPITRE 4 : MISE À JOUR DES LOGICIELS POUR LES MESURES ET
CARACTÉRISATION DE LA PERMÉABILITÉ DE RENFORTS

4.1.	Introduction	106
4.2.	Présentation de <i>PolyPer</i>	107
4.2.1.	UniPer.....	109
4.2.2.	TransPer	113
4.2.3.	PrinPer.....	118
4.2.4.	CharacPer	119

CHAPITRE 5 : CONCEPTION D'UN NOUVEAU BANC D'ESSAI POUR
MESURER LA PERMEABILITE UNIDIRECTIONNELLE DE
RENFORTS FIBREUX

5.1.	Introduction	122
5.2.	Cahier des charges.....	123
5.2.1.	Fonction principale.....	123
5.2.2.	Fonction secondaire.....	123
5.2.3.	Contraintes	123
5.2.3.1.	Réutilisation des composants de l'ancien moule	123
5.2.3.2.	Système de fermeture rapide, simple et robuste.....	123
5.2.3.3.	Système simple et facile pour des éventuels déplacements	124
5.2.3.4.	Visualisation des deux fronts du fluide	124
5.2.3.5.	Pression d'injection maximale d'utilisation de 50 Psi	124
5.2.3.6.	Mesures d'échantillons de 500 mm à la pression d'injection maximale.....	124
5.2.3.7.	Ajustements pour les mesures d'échantillons de 500 mm et plus.....	125

5.3.	Configuration actuelle du moule pour les mesures unidirectionnelles	125
5.4.	Conception	128
5.4.1.	Réutilisation des composantes de l'ancien moule.....	129
5.4.2.	Système de fermeture	130
5.4.2.1.	Calcul de la force de fermeture	130
5.4.2.2.	Sélection des pistons pneumatiques	131
5.4.2.3.	Conception du nouveau cadre de fermeture.....	132
5.4.3.	Structure portante du moule	135
5.4.4.	Circuit d'air comprimé	138
5.5.	Présentation et discussion sur le nouveau banc d'essai.....	139
5.6.	Procédure d'utilisation du nouveau banc d'essai	140

CHAPITRE 6 : COMPARAISON DES TECHNIQUES DE MESURES
 UNIDIRECTIONNELLE ET RADIALE POUR LA
 CARACTERISATION DE LA PERMEABILITE DE RENFORTS

6.1.	Introduction	141
6.2.	Description du renfort utilisé.....	143
6.3.	Techniques expérimentales de mesure	144
6.3.1.	Banc d'essai radial à l'Université de Connecticut	145
6.3.2.	Banc d'essai unidirectionnel de l'École Polytechnique de Montréal.....	148
6.4.	Résultats expérimentaux selon la technique radiale.....	151
6.4.1.	Résultats expérimentaux selon la technique radiale.....	151
6.4.2.	Résultats expérimentaux selon la technique unidirectionnelle	153
6.4.3.	Méthode de Kozeny-Carman pour la correction des valeurs de perméabilité effectives au même taux de fibres.....	155
6.4.4.	Méthode log-log pour la correction des valeurs de perméabilité effectives au même taux de fibres	158

6.4.5. Obtention des perméabilités principales pour les mesures unidirectionnelles	160
6.5. Comparaison des résultats et analyse de dispersion.....	163

CHAPITRE 7 : LE BANC D'ESSAI DE PERMÉABILITÉ

7.1. Introduction	173
7.2. Objectif du banc d'essai de perméabilité	174
7.3. Partenaires invités au projet du banc d'essai de perméabilité	175
7.4. Description du moule de perméabilité utilisé dans ce projet	176
7.5. Description du fluide d'injection.....	177
7.6. Description des tissus	179
7.7. Détermination du taux de fibres	179
7.8. Convention sur l'orientation des fibres	180
7.9. Description de la procédure expérimentale.....	180
7.10. Résultats expérimentaux pour le renfort G986	182
7.10.1. Analyse statistique des résultats expérimentaux du renfort G986	188
7.10.2. Influence de la pression d'injection sur la perméabilité.....	194
7.11. Résultats expérimentaux pour le renfort G1113	196
7.11.1. Analyse statistique des résultats expérimentaux du renfort G1113	202
7.11.2. Influence de la pression d'injection sur la perméabilité.....	204
CONCLUSION	206
RÉFÉRENCES.....	212
ANNEXES	221

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1.1	Dimensions du moule et épaisseurs disponibles	18
Tableau 1.2	Caractéristiques du tissu carbone utilisé.	28
Tableau 1.3	Nombre de mesures de perméabilité pour le tissu non-déformé.....	28
Tableau 1.4	Perméabilité mesurée dans chaque direction pour un taux de fibres de 34,2%.....	30
Tableau 1.5	Perméabilité mesurée dans chaque direction pour un taux de fibres de 45,7%.....	30
Tableau 1.6	Perméabilité mesurée dans chaque direction pour un taux de fibres de 57,1%.....	30
Tableau 1.7	Valeurs des perméabilités principales et de l'orientation du fluide β ($Vf_o = 34,2\%$).	32
Tableau 1.8	Valeurs des perméabilités principales et de l'orientation du fluide β ($Vf_o = 45,7\%$).	32
Tableau 1.9	Valeurs des perméabilités principales et de l'orientation du fluide β ($Vf_o = 57,1\%$).	33
Tableau 2.1	Plan de mesures de perméabilité pour le tissu cisaillé.	51
Tableau 2.2	Résultats de mesure des perméabilités planaires en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres initial $Vf_o = 34,2\%$	53
Tableau 2.3	Résultats de mesure des perméabilités planaires en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$	54
Tableau 2.4	Résultats de mesure des perméabilités planaires en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres initial $Vf_o = 57,1\%$	54
Tableau 2.5	Résultats calculés des perméabilités principales et orientations de l'ellipse d'écoulement dans tous les cas considérés.....	62
Tableau 5.1	Caractéristiques principales du piston pneumatique choisi.....	132
Tableau 6.1	Principales propriétés des fibres de basalte.....	144

Tableau 6.2	Avantages et inconvénients des techniques unidirectionnelle et radiale.	145
Tableau 6.3	Résultats des mesures radiales de perméabilité [51].....	152
Tableau 6.4	Résultats moyens pour chaque plaque du moule [51].....	153
Tableau 6.5	Résultats des mesures unidirectionnelles de perméabilité	154
Tableau 6.6	Résultats des mesures unidirectionnelles de perméabilité brutes et corrigées.	160
Tableau 6.7	Valeurs moyennes de la perméabilité pour chaque direction mesurée. 161	
Tableau 6.8	Valeurs de perméabilités principales obtenues avec PrinPer à partir de valeurs moyennes corrigées selon les deux méthodes.	161
Tableau 6.9	Comparaison des perméabilités principales obtenues avec les deux techniques de mesures.....	163
Tableau 7.1	Liste des institutions participants au banc d'essai.	176
Tableau 7.2	Propriétés des tissus testés.....	179
Tableau 7.3	Taux de fibres moyen des matériaux caractérisés.....	181
Tableau 7.4	Valeurs de perméabilité effective dans la direction 0° et valeurs corrigées selon les deux méthodes.....	184
Tableau 7.5	Valeurs de perméabilité effective dans la direction 45° et valeurs corrigées selon les deux méthodes	185
Tableau 7.6	Valeurs de perméabilité effective dans la direction 90° et valeurs corrigées selon les deux méthodes.	185
Tableau 7.7	Valeurs de perméabilité moyennes pour chaque direction mesurée.	186
Tableau 7.8	Valeurs de perméabilités principales obtenues avec PrinPer à partir de valeurs moyennes corrigées selon les deux méthodes.	186
Tableau 7.9	Coefficients de variation calculés.	193
Tableau 7.10	Valeurs de perméabilité effectives dans la direction 0° et valeurs corrigées selon les deux méthodes.	198
Tableau 7.11	Valeurs de perméabilité effectives dans la direction 45° et valeurs corrigées selon les deux méthodes.	198

Tableau 7.12 Valeurs de perméabilité effectives dans la direction 90° et valeurs corrigées selon les deux méthodes.	198
Tableau 7.13 Valeurs moyennes de perméabilité dans chaque direction mesurée.	200
Tableau 7.14 Valeurs de perméabilités principales obtenues avec PrinPer à partir de valeurs moyennes corrigées selon les deux méthodes.	200
Tableau 7.15 Coefficients de variation calculés pour le renfort G1113.	202

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Étapes principales du procédé RTM.	9
Figure 1.2	Schéma du principe de la technique unidirectionnelle.....	15
Figure 1.3	Description du moule rectangulaire de perméabilité.....	16
Figure 1.4	Montage expérimental pour les mesures radiales.	19
Figure 1.5	Front d'écoulement elliptique représenté par les perméabilités effectives.	21
Figure 1.6	Valeurs des perméabilités effectives en fonction de la fraction volumique de fibres.	31
Figure 1.7	Valeurs des perméabilités principales en fonction de la fraction volumique de fibres.....	34
Figure 1.8	Ellipses d'écoulement obtenues pour une injection radiale.	35
Figure 1.9	Dépendance de la constante de Kozeny-Carman par rapport au taux de fibres.....	38
Figure 1.10	Perméabilités effectives en fonction du taux de fibres.....	38
Figure 1.11	Valeurs des perméabilités principales en fonction du taux de fibres obtenues en utilisant équation (1.16) et la méthode itérative de l'ellipse.	39
Figure 1.12	Rapport d'anisotropie en fonction du taux de fibres obtenu en utilisant l'équation (1.16) et la méthode itérative de l'ellipse.....	40
Figure 1.13	Orientation principale de l'écoulement en fonction du taux de fibres obtenue en utilisant l'équation (1.16) et la méthode itérative de l'ellipse.	40
Figure 2.1	Définition de l'angle de cisaillement.	44
Figure 2.2	Cisaillement d'une cellule unitaire.	45
Figure 2.3	Comparaison entre les taux de fibres théorique et expérimental en fonction de l'angle de cisaillement.	47

Figure 2.4	Outil expérimental utilisé pour induire déformation au tissu : (a) cadre de cisaillement ; et (b) système de serrage.....	48
Figure 2.5	Zone utile du tissu cisaillé dans laquelle l'échantillon cisaillé doit être découpé.....	49
Figure 2.6	Exemples de plissement apparaissant dans le tissu pour un angle de cisaillement proche de 40°.	50
Figure 2.7	Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 34,2\%$ et un angle de cisaillement de 35°.	55
Figure 2.8	Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$ et un angle de cisaillement de 10°.	56
Figure 2.9	Vérification de l'angle d'écoulement obtenu à partir d'une mesure radiale : $Vf_o = 45,7\%$, $\alpha = 10^\circ$, $\beta \cong 68^\circ$ (expérimental).....	57
Figure 2.10	Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$ et un angle de cisaillement de 20°.	58
Figure 2.11	Vérification de l'angle d'écoulement obtenu à partir d'une mesure radiale : $Vf_o = 45,7\%$, $\alpha = 20^\circ$, $\beta \cong 58^\circ$ (expérimental).....	58
Figure 2.12	Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$ et un angle de cisaillement de 30°.	59
Figure 2.13	Vérification de l'angle d'écoulement obtenu à partir d'une mesure radiale : $Vf_o = 45,7\%$, $\alpha = 30^\circ$, $\beta \cong 46^\circ$ (expérimental).....	59
Figure 2.14	Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$ et un angle de cisaillement de 35°.	60
Figure 2.15	Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 57,1\%$ et un angle de cisaillement de 20°.	61
Figure 2.16	Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 57,1\%$ et un angle de cisaillement de 35°.	61
Figure 2.17	Perméabilités effectives dans la direction 0° pour les tissus non-cisaillé et cisaillé (taux de fibres initial est 45,7%).	63

Figure 2.18	Perméabilités effectives dans la direction 45° pour les tissus non-cisaillé et cisaillé (taux de fibres initial 45,7%).....	64
Figure 2.19	Perméabilités effectives dans la direction 90° pour les tissus non-cisaillé et cisaillé (taux de fibres initial 45,7%).....	64
Figure 2.20	Évolution des coordonnées d'une ellipse arbitraire selon les directions 0° , 45° et 90° avec les demi-axes majeur $a = 100$ mm et mineur $b = 50$ mm. 66	66
Figure 2.21	Perméabilité principale majeure en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres $Vf_o = 45,7\%$	68
Figure 2.22	Perméabilité principale mineure en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres $Vf_o = 45,7\%$	69
Figure 2.23	Rapport des perméabilités principales en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres $Vf_o = 45,7\%$	69
Figure 2.24	Évolution de l'angle d'écoulement en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres $Vf_o = 45,7\%$	70
Figure 2.25	Image du front d'écoulement pendant une mesure effectuée selon la chaîne pour une déformation de 20°	71
Figure 3.1	Perméabilité principale K_1 du tissu cisaillé pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$. La perméabilité est affectée au moins par deux facteurs : un changement géométrique dénoté $F_{geo}(\alpha)$ et une variation du taux de fibres $FVf(\alpha)$	77
Figure 3.2	Perméabilité principale K_2 du tissu cisaillé pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$	77
Figure 3.3	Déformation d'une cellule unitaire après un cisaillement de α degrés... 80	80
Figure 3.4	Géométrie de la structure du tissu le G986 d'Hexcel Fabrics.....	85
Figure 3.5	Définition d'un nouveau système de coordonnées pour le tissu déformé.	86
Figure 3.6	Perméabilités principales prédictes en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres non-cisaillé $Vf_o = 34.2\%$	90

Figure 3.7	Perméabilités principales prédites en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres non-cisaillé $Vf_o = 45.7\%$	91
Figure 3.8	Perméabilités principales prédites en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres non-cisaillé $Vf_o = 57.1\%$	91
Figure 3.9	(a) Front d'écoulement observé pendant une injection radiale pour un angle de cisaillement $\alpha = 10^\circ$; (b) orientation du front d'écoulement prédite $\beta = 65^\circ$	94
Figure 3.10	Grille des orientations du front d'écoulement en fonction de α et Vf_o	95
Figure 3.11	Orientations du front d'écoulement obtenues à partir de l'équation (3.17).	95
Figure 3.12	Perméabilités effectives mesurées et estimées dans la direction 0° ($Vf_o = 45.7\%$).	96
Figure 3.13	Perméabilités effectives mesurées et estimées dans la direction 45° ($Vf_o = 45.7\%$).	97
Figure 3.14	Perméabilités effectives mesurées et estimées dans la direction 90° ($Vf_o = 45.7\%$).	97
Figure 3.15	Pièce utilisée pour l'analyse des effets de drapage dans le remplissage du moule. Le renfort est placé sur la surface du moule comme l'illustre la flèche direction de drapage (volume de la pièce : $1.2 \times 0.8 \times 0.6 \text{ m}^3$)....	99
Figure 3.16	Modèle d'éléments finis utilisé pour les simulations de drapage et de remplissage du moule.....	100
Figure 3.17	Résultats de l'analyse de drapage effectuée au moyen de Quik-Form. 101	
Figure 3.18	Perméabilité locale majeure K_1 estimée avec l'équation (3.14), qui décroît jusqu'à dix fois dans la zone de grande déformation.....	103
Figure 3.19	Perméabilité locale mineure K_2 estimée avec l'équation (3.14), qui décroît jusqu'à quinze fois dans la zone de grande déformation.	103
Figure 3.20	Orientation du front d'écoulement estimée avec l'équation (3.17) : (a) sans déformation le front est orienté à 72° par rapport à la chaîne; (b) Le front est orienté à 55° dans la zone de déformation maximale.....	104

Figure 3.21	Temps de remplissage prédit de 723 secondes (sans résultats de drapage).	104
Figure 3.22	Temps de remplissage prédit de 723 secondes (avec résultats de drapage).	105
Figure 3.23	Temps de remplissage prédit de 788 secondes après changement de la position de l'évent 1 (avec résultats de drapage)	105
Figure 4.1	Interface graphique de démarrage du logiciel PolyPer.	108
Figure 4.2	UniPer - Sous-fenêtre Paramètres généraux.....	110
Figure 4.3	UniPer - Sous-fenêtre Acquisition de données.	111
Figure 4.4	UniPer - Sous-fenêtre Résultats.	112
Figure 4.5	UniPer - Sous-fenêtre Graphiques.....	113
Figure 4.6	TransPer - Sous-fenêtre Paramètres Généraux.....	115
Figure 4.7	TransPer - Sous-fenêtre Résultats.	116
Figure 4.8	TransPer - Sous-fenêtre Graphiques.	117
Figure 4.9	PrinPer – Interface graphique pour l'interaction usager-logiciel.	119
Figure 4.10	CharacPer - Interface graphique pour l'interaction usager-logiciel.	121
Figure 5.1	Schéma de la configuration actuelle du moule pour les mesures de perméabilité.....	127
Figure 5.2	Photo du montage unidirectionnel pour les mesures de perméabilité... 128	
Figure 5.3	Composantes de l'ancien moule réutilisé : a) plaques de verre trempé ; b) cadre interne ; et c) cadre externe.....	129
Figure 5.4	Schéma du moule et de la zone de mesure.....	133
Figure 5.5	Solution adoptée pour le cadre de fermeture.....	133
Figure 5.6	Conditions frontières pour l'analyse par éléments finis : a) encastrement cadre/pistons; b) champ de pression.....	134
Figure 5.7	Résultats de déformation de l'analyse par éléments finis du cadre de fermeture.	135
Figure 5.8	Presse standard à deux colonnes.	136

Figure 5.9	Nouvelle structure portante pour recueillir le moule.	137
Figure 5.10	Résultats de l'analyse de déformation de la structure portante.	138
Figure 5.11	Nouveau banc d'essai pour les mesures de perméabilité unidirectionnelles.	140
Figure 6.1	Banc d'essai radial à l'Université de Connecticut [51].....	146
Figure 6.2	Disposition des capteurs pression pour chaque plaque : a) côté cavité du moule ; b) côté arrière.	147
Figure 6.3	Photo du montage du banc d'essai de perméabilité.	149
Figure 6.4	Composantes du moule unidirectionnel.	150
Figure 6.5	Schéma de la méthode de correction proposée à partir de la relation de Kozeny-Carman.	157
Figure 6.6	Régression linéaire pour corriger le taux de fibres.	158
Figure 6.7	Extrapolation des valeurs de perméabilités brutes au taux de fibres désiré.	159
Figure 6.8	Tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode K-C).162	
Figure 6.9	Tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode log-log).162	
Figure 6.10	Forme générale de répartition des résultats selon la loi normale	165
Figure 6.11	Représentation des bornes du 95% des résultats sous la courbe normale.	166
Figure 6.12	Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° (technique radiale).....	167
Figure 6.13	Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° (technique unidirectionnelle – correction K-C).	168
Figure 6.14	Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° (technique unidirectionnelle – correction log-log).	168
Figure 6.15	Comparaison des dispersions des perméabilités selon la direction 0°... 170	
Figure 6.16	Comparaison des dispersions des perméabilités selon la direction 0°... 171	

Figure 6.17	Nouveau tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode K-C).....	171
Figure 6.18	Nouveau tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode log-log).....	172
Figure 7.1	Évolution de la viscosité en fonction du taux de cisaillement pour l'huile de silicone 100 Cst de Dow Corning.....	177
Figure 7.2	Évolution de la viscosité en fonction de la température pour l'huile de silicone 100 Cst de Dow Corning.	178
Figure 7.3	Convention sur l'orientation des fibres.	180
Figure 7.4	Positions du front d'écoulement en fonction du temps pour les trois directions mesurées 0° , 45° et 90°	183
Figure 7.5	Tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode K-C) 187	
Figure 7.6	Tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode log-log)	187
Figure 7.7	Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° corrigée selon la méthode de Kozeny-Carman.	189
Figure 7.8	Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 45° corrigée selon la méthode de Kozeny-Carman.....	189
Figure 7.9	Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 90° corrigée selon la méthode de Kozeny-Carman.....	190
Figure 7.10	Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° corrigée selon la méthode log-log.....	190
Figure 7.11	Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° corrigée selon la méthode log-log.....	191
Figure 7.12	Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° corrigée selon la méthode log-log.....	191
Figure 7.13	Comparaison des dispersions des perméabilités effectives pour les trois directions mesurées et corrigées selon les deux méthodes.....	193

Figure 7.14	Valeurs des perméabilités effectives non-corrigées en fonction de la pression d'injection.	195
Figure 7.15	Valeurs des perméabilités effectives corrigées par la méthode de Kozeny-Carman en fonction de la pression d'injection.	196
Figure 7.16	Positions du front d'écoulement en fonction du temps pour les trois directions mesurées 0° , 45° et 90°	197
Figure 7.17	Tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode K-C). 201	
Figure 7.18	Tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode log-log).	201
Figure 7.19	Comparaison des dispersions des perméabilités effectives dans les trois directions mesurées et corrigées selon les deux méthodes considérées.203	
Figure 7.20	Comparaison de la correction des valeurs de perméabilités brutes selon les deux méthodes considérées dans la direction 0°	204
Figure 7.21	Valeurs des perméabilités effectives en fonction de la pression d'injection.....	205

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CRASP : Centre de Recherche Appliquée Sur les Composites

CREPEC : Centre de Recherche En Plasturgie Et Composites

LCM: Liquid Composite Molding

RTM: Resin Transfer Molding

SRIM: Structural Reaction Injection Molding

VARTM: Vacuum Assisted Resin transfer Molding

VARI: Vacuum Assisted Resin Infusion

LRI: Liquid Resin Infusion

ERM : méthode de l'Erreur Relative Moyenne.

K_1 : perméabilité principale dans le plan du renfort selon le grand axe.

K_2 : perméabilité principale dans le plan du renfort selon le petit axe.

K_3 : perméabilité principale dans la direction perpendiculaire au plan du renfort.

$K_{eff}^{0^\circ}$: perméabilité effective selon la direction x (ou la chaîne).

$K_{eff}^{45^\circ}$: perméabilité effective selon une direction à 45° par rapport à x .

$K_{eff}^{90^\circ}$: perméabilité effective selon la direction y (ou la trame).

K_1/K_2 : relation d'anisotropie

r_1 : axe semi-majeur d'une ellipse.

r_2 : axe semi- mineur d'une ellipse.

r_f : rayon de la section transversale d'une fibre.

P : représente un point donné dans le système $o\,x\,y$.

P^* : représente un point donné dans le système $o x^* y^*$.

R_z : matrice de rotation selon l'axe z .

Vf : taux de fibres ou fraction volumique de fibres

Vf_o : taux de fibres initial dans le cas du tissu non-déformé

$Vf(\alpha)$: taux de fibres dans le cas du tissu déformé

α : angle de cisaillement mesuré à partir de la direction de la trame.

β : angle de l'orientation de l'écoulement principale, K_I , par rapport à la chaîne.

k : constante de Kozeny dans la relation de Kozeny-Carman

$F_{Vf(\alpha)}$: facteur qui représente la variation du taux de fibres local après cisaillement.

$F_{geo(\alpha)}$: facteur qui tient compte de la réorientation des fibres après cisaillement.

$K_{I,2}(\alpha = 0^\circ)$: perméabilités principales dans le cas du tissu non-déformé.

$K_{I,2}(\alpha)$: perméabilités principales dans le cas du tissu déformé en cisaillement.

R_I : vecteur qui représente le demi-axe majeur du front d'écoulement.

R_2 : vecteur qui représente le demi-axe mineur du front d'écoulement.

ΔR_I : vecteur qui représente une variation du vecteur R_I .

ΔR_2 : vecteur qui représente une variation du vecteur R_2 .

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Vérification de la viscosité du fluide à injecter	221
Annexe B : Diagramme de calcul des perméabilités principales	222
Annexe C : Conception du cadre de cisaillement	223
Annexe D : Fiche technique des pistons peumatiques	234
Annexe E : Plan du circuit d'air comprimé.....	235
Annexe F : Procédure d'utilisation du moule de perméabilité 1D	239
Annexe G : Fiche technique des fibres de basalte.....	247

INTRODUCTION

Au cours des années, l'usage des matériaux composites à matrice polymère est devenu de plus en plus répandu et les procédés de fabrication sont également plus optimisés. À ce sujet, la simulation numérique de la mise en œuvre a contribué énormément à l'évolution des composites et à diminuer les coûts de fabrication. Dans les simulations numériques, la perméabilité du renfort est devenue l'un des paramètres critiques pour prédire l'écoulement de la résine à travers un milieu poreux. De plus, la déformation des renforts tissés dans la fabrication de pièces de forme complexe peut affecter ce paramètre localement, donc aussi les résultats des simulations numériques. Ainsi, la perméabilité d'un tissu doit être bien connue pour effectuer ce type d'analyses.

Problématique et introduction aux mesures de perméabilité

Le phénomène d'écoulement de la résine à travers un renfort fibreux est décrit par la loi de Darcy, qui régit l'écoulement d'un fluide newtonien en milieu poreux. Cette loi établit une relation entre la viscosité du fluide, le gradient de pression et la résistance à l'écoulement. Cette résistance à l'écoulement de la résine dans le renfort est caractérisée par la perméabilité du milieu poreux. Donc, avant de lancer une simulation numérique d'écoulement, la perméabilité doit être bien définie et caractérisée. Plusieurs techniques expérimentales sont actuellement disponibles pour la déterminer, et différents modèles mathématiques ont justement été développés pour la prédire, ce qui permet d'éviter les nombreux essais fastidieux habituellement requis pour sa caractérisation.

Parmi les nombreuses techniques expérimentales décrites dans la littérature, les deux plus utilisées sont: (a) l'injection radiale ou centrale et (b) l'injection longitudinale ou unidirectionnelle. Dans le cas de la première, il s'agit d'injecter la résine sous pression ou à débit constant dans un renfort placé et centré sur le point d'injection. Bien que cette technique donne en principe la perméabilité planaire en une seule mesure, certains inconvénients ont été rapportés, comme la faible reproductibilité des essais, la dépendance de la mesure par rapport à la forme et à la taille du trou d'injection, entre autres. Par contre, l'injection longitudinale permet d'obtenir la perméabilité du tissu dans une direction spécifique, par exemple le long des fibres orientées selon la chaîne ou la trame. Les principaux avantages de cette dernière technique sont sa bonne reproductibilité et le fait qu'il existe moins de sources d'erreurs associées à la mise en œuvre. Ceci explique la supériorité de l'injection unidirectionnelle par rapport à la méthode radiale. Cette technique a été adoptée et est appliquée régulièrement à l'École Polytechnique de Montréal depuis plusieurs années. Dans le cas d'un tissu isotrope, la perméabilité dans le plan du tissu reste la même dans toutes les directions et le front du fluide devient circulaire. Pour un tissu anisotrope, le front possède la forme d'une ellipse et la perméabilité doit être connue dans chaque direction d'intérêt. D'habitude, cette dernière est exprimée selon les rayons majeur et mineur de l'ellipse, et en fonction de la direction du rayon majeur par rapport à une fibre de référence, comme la chaîne du tissu par exemple. Afin de définir complètement la perméabilité planaire du tissu, il faut la mesurer le long des trois directions : par exemple, selon la chaîne, la trame et dans une direction faisant un angle de 45° avec la chaîne ou la trame. La caractérisation en

perméabilité d'un tissu anisotrope requiert au moins deux essais, parfois trois pour chaque direction mesurée, trois directions pour chaque taux de fibres et en général, un total de trois taux de fibres pour caractériser la perméabilité par rapport au taux de fibres. En termes numériques, nous avons :

$$2 \text{ (essais)} \times 3 \text{ (directions)} = 6 \text{ (essais)} \Rightarrow \text{pour un taux de fibres}$$

$$6 \text{ (essais)} \times 3 \text{ (taux de fibres)} = 18 \text{ (essais)} \Rightarrow \text{minimum}$$

Donc, il faut faire 18 essais afin de bien caractériser la perméabilité du tissu.

Dans le cas où un tissu tressé orthogonal est placé dans la cavité du moule avec des surfaces complexes, le tissu peut être soumis à une déformation au cours de laquelle les fibres ne restent plus orientées dans deux directions perpendiculaires. Puisque la perméabilité dépend du taux de fibres et de l'orientation des fibres, une réorientation de celles-ci produira évidemment un changement de la perméabilité, qui se traduira par une rotation de l'ellipse. Donc, la perméabilité doit être définie pour chaque degré de déformation. Une façon de procéder consiste à prendre trois degrés de déformation, par exemple 10° , 20° et 30° , c'est-à-dire les angles entre la chaîne et la trame resteront à 80° , 70° et 60° entre elles respectivement. Cette procédure demanderait au moins 54 essais (18×3) en plus des 18 essais initiaux requis pour le tissu non cisallé. À cause des nombreuses expériences requises pour définir complètement la perméabilité planaire d'un tissu anisotrope quelque soit son degré de déformation, la prédiction de ce

paramètre est de plus en plus étudiée et analysée. Enfin, cette valeur pourra ensuite être utilisée dans les simulations numériques de l'écoulement dans le milieu poreux constitué par le renfort fibreux.

Objectifs généraux

Les objectifs principaux de cette thèse consistent à étudier l'influence sur la perméabilité de la déformation par cisaillement d'un renfort tissé ou tressé et à développer des modèles mathématiques pour la prédiction de la perméabilité de tissus cisaillés afin de réduire le nombre d'essais requis pour une caractérisation complète du renfort (tissus non-cisaillés et cisaillés). La connaissance de la perméabilité d'un tissu cisaillé permettra de prédire l'effet du cisaillement local des fibres sur le remplissage d'un moule RTM. Ces travaux permettront à terme de prédire la perméabilité en fonction de l'angle de cisaillement et du taux de fibres, l'objectif ultime étant d'optimiser les stratégies de remplissage pour des pièces de forme plus complexes. Une des retombées de ce travail de recherche consistera à proposer une démarche vers la normalisation de la mesure de la perméabilité des renforts fibreux. Cette démarche sera accompagnée de la conception d'un moule et d'une procédure systématique à suivre pour réaliser une telle mesure, et enfin, une analyse systématique de la précision des mesures.

Organisation de la thèse

Cette thèse est consacrée à l'étude de la perméabilité de renforts fibreux tissés. L'étude comporte une analyse de l'influence de la déformation par cisaillement des renforts durant le drapage de surfaces complexes. Le travail présente les développements théoriques, expérimentaux et numériques qui permettent de caractériser la perméabilité planaire de tissus cisaillés ou non-cisaillés. De plus, un modèle mathématique est proposé pour prédire la perméabilité de tissus cisaillés à partir de la connaissance de la perméabilité du tissu non-cisaillé.

Cette étude se compose de cinq parties principales :

1. Dans la première partie, les **chapitres 1 à 3** présentent un travail sur la caractérisation du tenseur de perméabilité d'un tissu de carbone tressé. En premier, la perméabilité du renfort non-cisaillé est caractérisée en fonction du taux de fibres. Dans le chapitre 2, l'effet du cisaillement des tissus sur la perméabilité du renfort est analysé. A cette fin, un dispositif expérimental permettant d'assurer un cisaillement uniforme dans un échantillon de tissu a été mis au point et fabriqué. Dans ces étapes expérimentales, deux méthodes de mesure de perméabilité seront comparées et critiquées, la méthode unidirectionnelle et l'injection radiale. Une nouvelle approche fondée sur l'équation de l'ellipse est présentée pour l'obtention des perméabilités planaires principales – et ses orientations – à partir de trois mesures de perméabilité unidirectionnelles dans trois directions différentes du tissu. Le troisième chapitre porte sur la prédiction de la perméabilité en fonction du taux de fibres et de l'angle de cisaillement afin de réduire

les fastidieux et nombreux essais requis pour sa caractérisation expérimentale. Une application numérique en utilisant le modèle de prédiction est conduite à l'aide des logiciels commerciaux PAM-RTM et QUIK-FORM du groupe ESI-Group.

2. La deuxième partie, qui est présentée au **chapitre 4**, traite du dépouillement des résultats des mesures de perméabilité. L'acquisition de données des essais de perméabilité effectuées au début de ce travail (chapitres 1 et 2) a été réalisée au moyen d'un logiciel déjà existant développé avec Labview et enregistrée dans des fichiers « texte ». Les résultats ont été ensuite dépouillés avec des feuilles de calcul du logiciel Microsoft Excel créées par M. Eduardo Ruiz. Une fois la perméabilité calculée, les rapports des mesures ont été rédigés au moyen du logiciel Microsoft Word. Cette procédure demandait ainsi un temps très précieux pour la caractérisation complète d'un renfort. Le but de ce chapitre est donc de présenter le logiciel *PolyPer*, un outil informatique qui permet d'analyser et de caractériser la perméabilité d'un renfort fibreux quelconque en temps réel. Cet outil permet, entre autres, d'effectuer en temps réel l'acquisition de données, le calcul de la perméabilité et de générer le rapport d'une mesure de perméabilité.

3. Le **chapitre 5** présente la troisième partie qui porte sur la conception d'un nouveau banc d'essai pour les mesures des perméabilités unidirectionnelles. Cette étape a pour but de concevoir un banc d'essai de perméabilité satisfaisant les caractéristiques nécessaires pour obtenir une bonne précision lors d'une mesure de perméabilité. La

solution adoptée ainsi que des résultats d'analyses par éléments finis sont présentés et discutés.

4. La quatrième partie dans le **chapitre 6** présente les résultats des mesures de perméabilité effectuées dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Connecticut. Ce travail compare les résultats des mesures de perméabilité obtenues avec deux approches expérimentales différentes : la technique unidirectionnelle de l'École Polytechnique de Montréal et la méthode d'injection radiale développée à l'Université de Connecticut. Les résultats sont donnés pour chaque technique de mesure et comparés par un analyse de dispersion. Une nouvelle approche est présentée dans ce chapitre pour corriger les variations de taux de fibres inévitables lorsque plusieurs mesures sont effectuées sur des échantillons différents et leur influence sur la perméabilité.

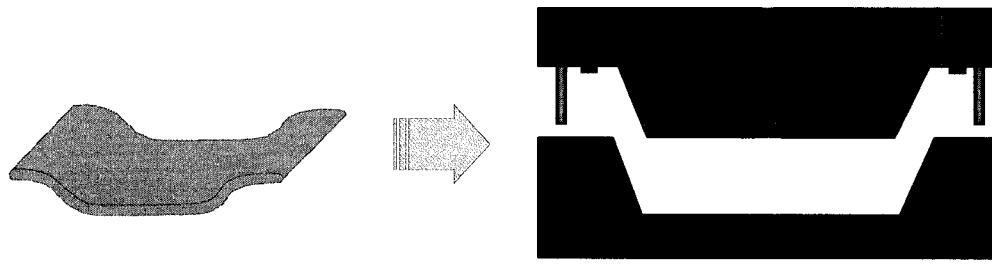
Enfin, la cinquième partie conclue avec un travail qui fait partie du projet « banc d'essai » de perméabilité, qui a été proposé comme une étape vers la normalisation de la mesure de la perméabilité des renforts fibreux. Ainsi, le **chapitre 7** présente les résultats de mesures de perméabilité obtenues pour les deux tissus caractérisés, le G986 (carbone) et le G1113 (verre). La perméabilité dans le régime non-saturé a été caractérisée et documentée. Une analyse de dispersion des résultats est aussi incluse dans cette section.

CHAPITRE 1

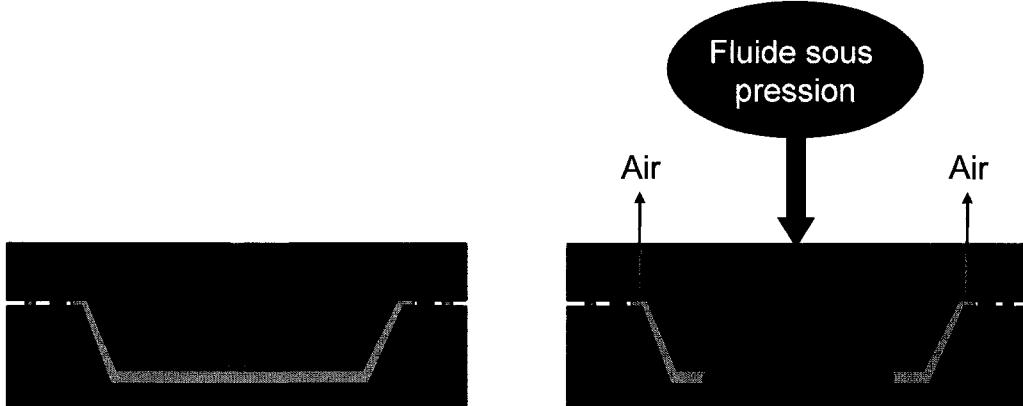
CARACTÉRISATION DE LA PERMÉABILITÉ D'UN TISSU NON-DEFORMÉ

1.1. Introduction

Les matériaux composites à matrice polymère occupent actuellement une grande place dans l'industrie, notamment dans le secteur des transports (aéronautique, automobile, naval, etc.). Parmi les méthodes industrielles permettant leur élaboration, deux techniques sont très utilisées : le moulage à moule ouvert ou à moule fermé. Les techniques de production avec des moules fermés tels que le moulage par injection sur renforts (RTM, SRIM), le moulage sous presse ou sous vide connaissent un fort développement depuis une dizaine d'années pour des raisons technologiques, économiques et environnementales. Parmi ces technologies, le RTM consiste à placer dans la cavité du moule avant fermeture une structure de renforts fibreux de forme adaptée. Ensuite, un fluide visqueux est injecté sous pression ou à débit contrôlé de manière à remplir la cavité du moule. Lorsque la pièce est cuite, le moule est ouvert et la pièce est démoulée. Les étapes typiques du moulage par RTM sont montrées dans la Figure 1. La réalisation par ces techniques de pièces composites à haute performance rencontre cependant des limites reliées à la taille et à l'épaisseur des pièces, ainsi qu'au drapage de formes complexes.

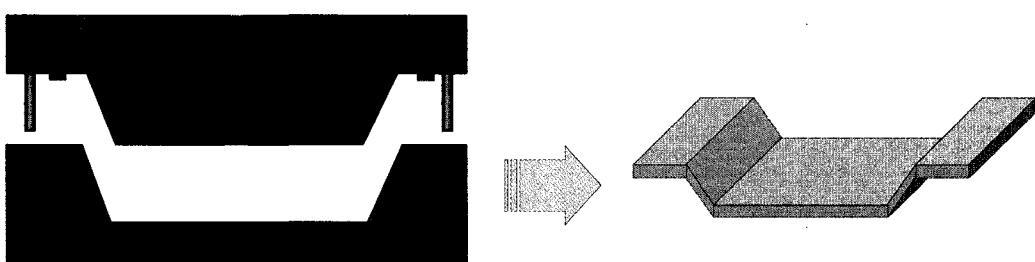


Placement du renfort dans la cavité du moule



Fermeture du moule

Injection du fluide sous pression



Démoulage de la pièce cuite

Figure 1.1 Étapes principales du procédé RTM.

Afin de maîtriser la fabrication de pièces de formes plus complexes, la simulation numérique devient un outil indispensable pour diminuer les coûts de mise au point des moules d'injection et optimiser leur performance. C'est dans ce but que s'inscrit la démarche de caractérisation complète du tissu de carbone déformable utilisé dans cette étude. Il s'agit de déterminer la perméabilité du tissu en fonction du taux de fibres dans une première étape, et de l'angle de cisaillement dans une deuxième. En effet, un cisaillement local entre la chaîne et la trame du tissu apparaît après la mise en place du renfort sur une surface de forme complexe. La connaissance de la perméabilité d'un tissu cisaillé permettra de prédire l'effet du cisaillement local des fibres sur le remplissage d'un moule RTM.

Actuellement, la simulation numérique du procédé RTM apporte des informations importantes pour optimiser le coût des moules et réduire le temps de production des pièces, en permettant de faire une conception convenable des moules et d'étudier la disposition des points d'injection, des événements, etc. Parmi les logiciels commerciaux disponibles sur le marché, «PAM-RTM» du groupe ESI-Group [1] permet d'étudier la faisabilité de la fabrication d'une pièce par injection sur renforts. À ce sujet, la simulation numérique de remplissage de la cavité du moule est notoirement l'option la plus populaire parmi les différentes possibilités du logiciel, comme par exemple l'analyse de préchauffage du moule, la cuisson de la pièce, etc. Le procédé consiste à imprégner un matériau fibreux, c'est-à-dire un tissu à fibre continues, coupées ou tressées, par un fluide visqueux, la résine. La résistance à l'écoulement de la résine à

travers le renfort est caractérisée par la perméabilité du milieu poreux. Le phénomène d'écoulement de la résine à travers un renfort fibreux est décrit par la loi de Darcy, qui régit l'écoulement d'un fluide newtonien en milieu poreux. Cette loi établit que la vitesse du fluide est reliée à la viscosité du fluide, au gradient de pression et à la perméabilité du renfort. Dans le cas unidimensionnel, cette équation est écrite sous la forme:

$$u = -\frac{K}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (1.1)$$

où u est la vitesse de l'écoulement (m.s^{-1}), K est la perméabilité du milieu poreux (m^2), μ la viscosité du fluide (Pa.s) et $\partial P / \partial x$ le gradient de pression dans la direction x (Pa.m^{-1}).

Dans l'espace tridimensionnel, la loi de Darcy s'écrit sous la forme tensorielle suivante :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial p}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

où les termes avec les indices x et y représentent les composantes du tenseur de perméabilité dans le plan du tissu. La direction z est toujours orientée selon l'épaisseur de la surface. Dans le cas de pièces de faible épaisseur (inférieures à 5 mm), la

composante du tenseur de perméabilité dans la direction z est souvent négligée ou supposée dix fois plus petite que les composantes de la perméabilité planaire.

Le but de cette première étape est de caractériser la perméabilité en fonction du taux de fibres d'un tissu sans déformation. Après une brève revue bibliographique, la démarche et la méthode de mesures seront présentées. De plus, une nouvelle approche est proposée pour déterminer les perméabilités principales dans le plan à partir de trois mesures unidirectionnelles. Les résultats sont présentés et corroborés par des injections radiales.

1.2. Revue bibliographique

À titre de définition, la perméabilité est « *la propriété qu'ont certains corps d'en laisser passer d'autres à travers leurs pores* » [2]. L'origine est attestée en 1620, au sens de « qualité de ce qui coule facilement » et en 1755 au sens moderne. Les premiers travaux sur la perméabilité d'un milieu poreux sont attribués à Henry Darcy (1803-1858) qui a défini la constante de proportionnalité K liant la vitesse de filtration au gradient de charge hydraulique en établissant la loi de Darcy en 1856 [3]. Dans la récente décennie, plusieurs chercheurs ont consacré leurs travaux à la recherche de ce paramètre dans le domaine de l'écoulement de la résine dans un milieu poreux. De plus, il existe une abondante littérature disponible sur ce sujet. Au sujet des mesures de perméabilité en laboratoire, diverses méthodes ont été développées. Bien qu'il n'existe

pas une procédure qui soit reconnue comme technique standard de mesure, deux méthodes sont largement utilisées : l'injection unidirectionnelle et l'injection radiale ou bidirectionnelle. La méthode unidirectionnelle consiste à mesurer la progression du front du fluide en enregistrant le temps et la pression d'injection à une position donnée, donc la vitesse peut être calculée et la perméabilité estimée. Cette tâche doit être répétée pour chaque direction dans le plan du tissu, ce qui demande de nombreuses mesures dans le cas de tissus anisotropes. Par contre, dans le cas d'un tissu isotrope, il suffit de mesurer la perméabilité dans une seule une seule direction, par exemple la chaîne.

Plusieurs chercheurs ont travaillé avec la technique bidirectionnelle pour diverses raisons [4-10], la principale étant l'avantage procuré par la possibilité d'évaluer la perméabilité dans les deux directions du plan à partir d'une seule mesure. Par contre, la méthode présente plusieurs difficultés de mise en œuvre. Le système d'acquisition de données requis est plus complexe et la non-uniformité de la forme du front observé crée des difficultés dans le traitement des données [11, 12]. De même, la déformation du renfort et/ou des couvercles du moule ainsi que la sensibilité du fluide à la taille et à la forme du port d'injection ont été reportés comme des inconvénients sérieux [10, 13]. Pour ces raisons, cette technique ne semble pas donner une reproductibilité fiable en raison de la quantité des sources d'erreurs à minimiser. Par conséquent, la technique adoptée tout au long ce travail pour les mesures de perméabilité est l'injection unidirectionnelle, même si des injections radiales ont été réalisées afin de corroborer et de visualiser la progression du front d'écoulement.

1.3. Procédure expérimentale

Une méthode simple et robuste pour mesurer la perméabilité d'un milieu poreux a été mise au point par le Centre de Recherche Appliquée Sur les composites (CRASP) conjointement avec Aérospatiale en 1996 (voir article de Ferland et al. [10]). C'est en utilisant cette approche que des mesures de perméabilité non-saturée ont été effectuées dans le cadre de ce travail au moyen d'une injection unidirectionnelle dans un moule rectangulaire. La méthode de dépouillement utilisée est fondée sur la loi de Darcy et suit l'approche proposée par Ferland et al. [10].

1.3.1. Montage unidirectionnel

Le principe de cette technique consiste à injecter un renfort fibreux compacté à un taux de fibre connu dans la cavité du moule, avec un liquide newtonien de viscosité connue à pression ou débit constant. Avec une lecture de la pression d'injection et en suivant l'évolution du front dans le temps, la perméabilité du renfort peut être ensuite déterminée en suivant la procédure de dépouillement de Ferland et al. [10]. La Figure 1.2 schématisé le principe de la technique de mesure unidirectionnelle.

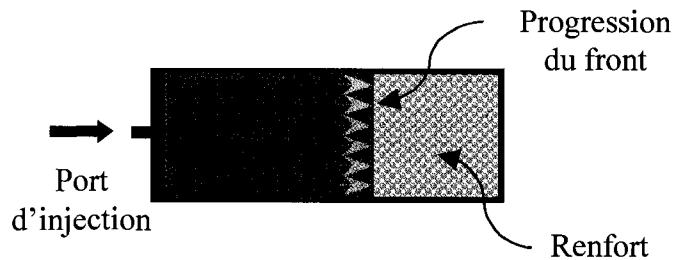


Figure 1.2 Schéma du principe de la technique unidirectionnelle.

Le moule utilisé pour toutes les mesures unidirectionnelles est représenté à la Figure 1.3.

Le banc d'essai consiste en un moule unidirectionnel rectangulaire comprenant quatre parties principales : a) deux plaques en verre trempé; b) un cadre intérieur en deux morceaux (cale en aluminium et couvercle en acier); et c) un cadre extérieur (en acier), qui maintient l'ensemble en place.

Le choix du verre trempé repose sur deux raisons principales. La première est la nécessité d'observer l'avancement du front lors des essais et de constater visuellement qu'il n'y a pas d'effet de bord le long des deux côtés de l'échantillon. La seconde raison est d'assurer une rigidité suffisante du moule afin d'éviter toute déformation susceptible de fausser les résultats de mesure. Le verre trempé est en effet beaucoup plus rigide que l'acrylique communément utilisé dans les laboratoires. Le module de Young du verre trempé est d'environ 70 Gpa comparé à 3 Gpa pour l'acrylique.

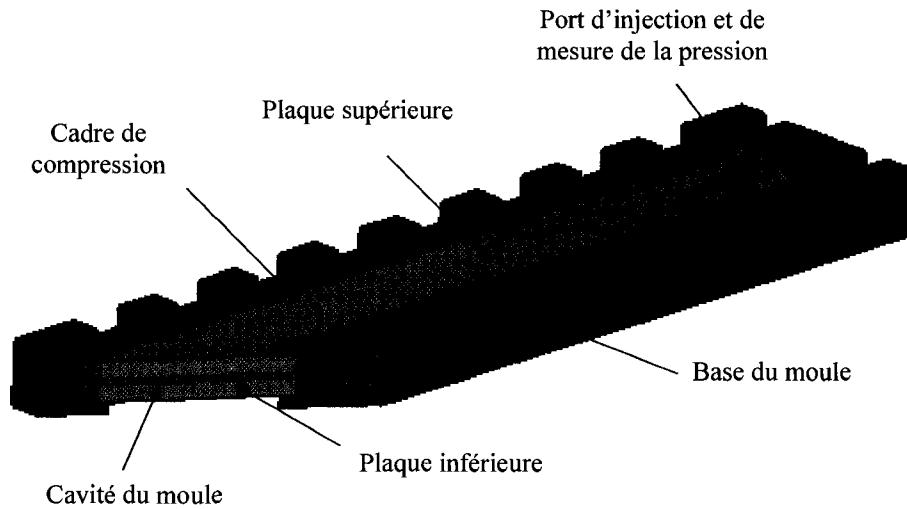


Figure 1.3 Description du moule rectangulaire de perméabilité.

Le renfort est déposé entre les deux plaques de la cavité du moule entre le capteur de pression et l'évent. Un joint en caoutchouc est ensuite installé sur la périphérie de la cavité du moule pour assurer l'étanchéité. Un scellant de silicone, qui est appliqué sur les deux côtés tout le long de la préforme, est utilisé pour éviter des éventuels effets de bord. Grâce à un espace libre laissé entre le trou d'injection et le tissu lors de l'injection, le front devient progressivement droit avant que le liquide n'atteigne le tissu. Le scellant de silicone, en fermant le moule, remplit l'espace libre laissé entre le joint de caoutchouc et le renfort pour combler une éventuelle irrégularité dans la découpe de l'échantillon. Il permet ainsi d'éviter l'écoulement préférentiel appelé « *effet de bord* » qui naît généralement dans cet espace.

La cale (première partie du cadre intérieur) entoure les plaques de verre. Le couvercle (deuxième partie du cadre intérieur) est à cheval sur la plaque de verre supérieure et la cale. L'ensemble est maintenu en place dans le cadre extérieur. Des tiges filetées viennent s'appuyer sur le couvercle en passant à travers des brides amovibles (20 au total) disposées à tous les 115 mm et fixées au cadre extérieur par des vis. L'ensemble tiges-brides constitue le système de fermeture du moule. Chacune des tiges est serrée progressivement jusqu'à mettre en contact le couvercle et la cale en procédant d'une extrémité longitudinale vers l'autre et en alternant le serrage d'un côté et de l'autre dans la direction latérale. On est alors assuré que l'épaisseur de la cavité restante correspond bien à la hauteur de la cale moins l'épaisseur des deux vitres. Le Tableau 1.1 résume les dimensions du moule ainsi que des différents cadres et des épaisseurs disponibles au laboratoire afin d'obtenir l'épaisseur de la cavité du moule requis.

La pression d'injection et la position du front d'écoulement sont relevés simultanément en fonction du temps (des lignes sont dessinées directement sur le moule et disposées à des intervalles réguliers par rapport au point d'injection). Les essais sont finalement dépouillés avec des feuilles de calcul Microsoft Excel développées par M. Eduardo Ruiz à partir de la méthode de Ferland et al. [10].

Tableau 1.1 Dimensions du moule et épaisseurs disponibles.

	Dimensions		
	Longueur (mm)	Largueur (mm)	Épaisseur (mm)
Cavité du moule	934	135	*
Échantillon (recommandées)	400/600	100/110	**
Cadre N°1	934	135	2.09
Cadre N°2	934	135	2.28
Cadre N°3	934	135	4.66
Épaisseurs:			
N°1		934	135
N°2		934	135
N°3		934	135
N°4		934	135

* variable en fonction de la combinaison du cadre et des épaisseurs à utiliser

** défini par la cavité du moule à utiliser

1.3.2. Montage bidirectionnel

La technique bidirectionnelle consiste à injecter la résine sous pression ou débit constant dans un renfort placé et centré sur le point d'injection. Le matériel utilisé pour les mesures radiales est représenté schématiquement à la Figure 1.4. Le moule est constitué de deux plaques, la plaque inférieure en aluminium et la plaque supérieure en verre trempé permettant la visualisation de la position du front dans le temps. Un transparent avec une grille rectangulaire au cm est disposé sur l'ébauche et centré sur le point d'injection afin de faciliter la lecture de la position du front d'écoulement dans les

deux directions. La progression du front d'écoulement est filmée par une caméra vidéo placée au-dessus du moule. Ceci permet de relever simultanément en fonction du temps, la position du front selon le grand axe et le petit axe. En même temps, la pression d'injection est enregistrée par l'ordinateur pour un traitement postérieur des données.

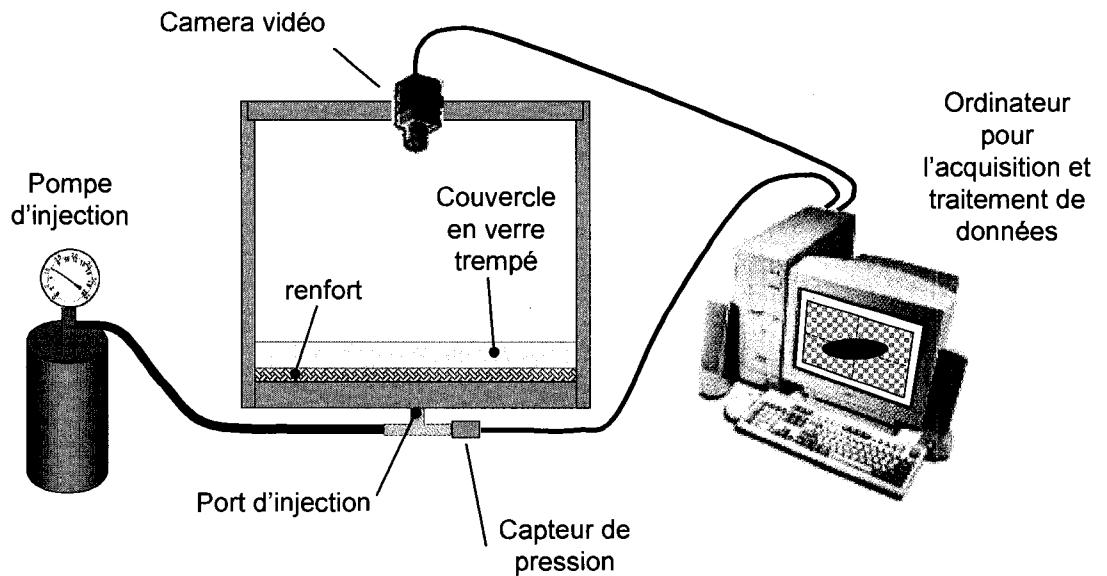


Figure 1.4 Montage expérimental pour les mesures radiales.

Dans le cas d'un écoulement isotrope, la vitesse d'écoulement étant en principe la même dans toutes les directions, la perméabilité peut être obtenue directement en utilisant la loi de Darcy. Par contre, si l'écoulement est anisotrope, la technique de dépouillement des résultats est fondée sur la méthode développée par Greeve et al. [7] et complétée postérieurement à posteriori par Chan et al. [14, 15]. Cette méthode repose sur une transformation du système de coordonnées (x, y) en un *système isotrope équivalent* (x_e, y_e) . En d'autres termes, cette transformation permet de se ramener au cas isotrope. Le

front d'écoulement elliptique à partir d'une injection circulaire tel qu'observé expérimentalement est transformé mathématiquement en un écoulement isotrope avec une injection à partir d'un trou elliptique.

1.4. Méthode de l'ellipse

Quand le renfort est isotrope, la forme du front d'écoulement est circulaire. L'excentricité de l'ellipse d'écoulement est alors égale à l'unité. Dans ce cas, la perméabilité K est la même dans toutes les directions et il faut mesurer seulement dans une direction pour trouver la valeur de K . Dans le cas général où le renfort est anisotrope, la perméabilité K ne reste pas la même dans toutes les directions et le front d'écoulement devient elliptique.

Bien que la technique bidirectionnelle donne en principe la perméabilité planaire en une seule mesure, certains inconvénients comme la faible reproductivité des essais et les nombreuses sources d'erreurs associées à sa mise en œuvre ont conduit à adopter la technique unidirectionnelle. La tâche sera ainsi de reconstruire l'ellipse qui représente le front d'écoulement à partir des mesures unidirectionnelles. Il a été démontré par Bear [16] que la racine carrée de la perméabilité effective suit une ellipse tel qu'indiqué sur la Figure 1.5, où apparaissent les demi-axes majeur et mineur des perméabilités principales K_1 et K_2 , respectivement.

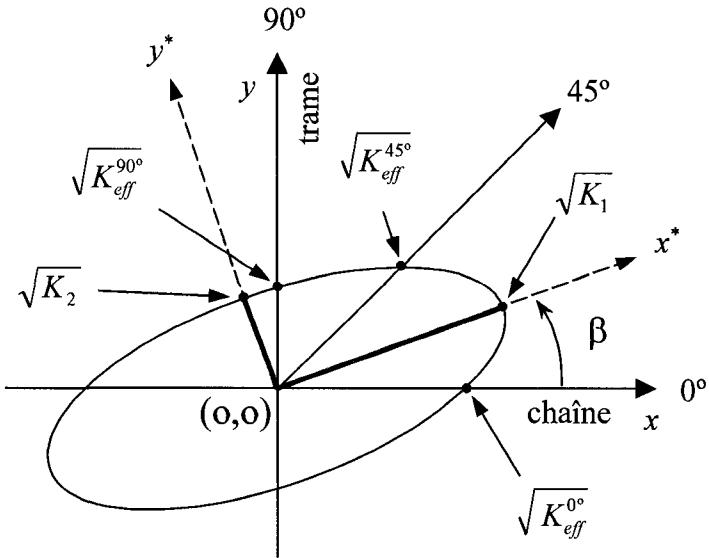


Figure 1.5 Front d'écoulement elliptique représenté par les perméabilités effectives.

Connaissant les valeurs des perméabilités effectives $K_{eff}^{0°}$ (chaîne) et $K_{eff}^{90°}$ (trame), il faut aussi mesurer la perméabilité dans une autre direction, par exemple $45°$, afin de disposer d'au moins trois points de mesure en vue de reconstituer l'ellipse d'écoulement. En effet, nous pouvons construire une infinité d'ellipses centrées à $(0,0)$ qui passent par deux points donnés, mais une seule ellipse peut être obtenue à partir de trois points expérimentaux. Cette approche consiste à vérifier l'équation d'une ellipse pour chacun des trois points donnés, ce qui donne un système de 3 équations à 3 inconnues, dont la résolution permettra de trouver par une méthode itérative les valeurs des constantes K_1 (a : axe majeur), K_2 (b : axe mineur) et de l'angle β de la direction principale d'écoulement du fluide par rapport à la chaîne.

L'équation générale d'une ellipse centrée à l'origine avec l'axe majeur parallèle à l'axe x est donnée par :

$$\frac{x^2}{r_1^2} + \frac{y^2}{r_2^2} = 1 \text{ ou } \frac{(x^*)^2}{r_1^2} + \frac{(y^*)^2}{r_2^2} = 1 \quad (1.3)$$

où x et y sont les coordonnées sur le système $o x y$ et r_1, r_2 les demi-axes majeur et mineur respectivement. Pour passer d'un système de coordonnées à un autre, il faut effectuer une rotation d'angle β . La rotation β selon l'axe z est définie comme étant positive dans le sens antihoraire. Une rotation plane est décrite par une équation matricielle de la forme :

$$P^* = (R_z)P \quad (1.4)$$

où P représente un point courant dans le système $o x y$, P^* un point courant dans le système $o x^* y^*$, et R_z est la matrice de rotation selon l'axe z . L'équation (1.4) s'exprime encore sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

En développant, les expressions suivantes sont obtenues pour x^* et y^* :

$$\begin{aligned} x^* &= x \cos\beta + y \sin\beta \\ y^* &= -x \sin\beta + y \cos\beta \end{aligned} \quad (1.6)$$

En insérant les expressions de x^* et y^* dans l'équation (1.3) et en réarrangeant les termes, l'équation est réécrite sous la forme :

$$\frac{x^2 \cos^2\beta + y^2 \sin^2\beta}{r_1^2} + 2xy \sin\beta \cos\beta \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) + \frac{x^2 \sin^2\beta + y^2 \cos^2\beta}{r_2^2} = 1 \quad (1.7)$$

ou en terme de perméabilités :

$$\frac{K_{eff,x}^i \cos^2\beta + K_{eff,y}^i \sin^2\beta}{K_1} + 2 \sqrt{K_{eff,x}^i K_{eff,y}^i} \sin\beta \cos\beta \left(\frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2} \right) + \frac{K_{eff,x}^i \sin^2\beta + K_{eff,y}^i \cos^2\beta}{K_2} = 1 \quad (1.8)$$

où $K_{eff,x}^i$ et $K_{eff,y}^i$ représentent les coordonnées des perméabilités effectives le long des directions x et y respectivement, et i est la direction mesurée, c'est-à-dire $i = 0^\circ, 45^\circ$ et 90° . En autres termes, pour les trois directions mesurées, les données sont les suivantes :

$$K_{eff,x}^{0^\circ} = K_{eff}^{0^\circ} \quad ; \quad K_{eff,y}^{0^\circ} = 0$$

$$K_{eff,x}^{45^\circ} = \frac{K_{eff}^{45^\circ}}{2} \quad ; \quad K_{eff,y}^{45^\circ} = \frac{K_{eff}^{45^\circ}}{2}$$

$$K_{eff,x}^{90^\circ} = 0 \quad ; \quad K_{eff,y}^{90^\circ} = K_{eff}^{90^\circ}$$

Pour simplifier les équations, les notations suivantes sont introduites :

$$a^i = x^2 \cos^2 \beta + y^2 \sin^2 \beta = K_{eff,x}^i \cos^2 \beta + K_{eff,y}^i \sin^2 \beta$$

$$b^i = x^2 \sin^2 \beta + y^2 \cos^2 \beta = K_{eff,x}^i \sin^2 \beta + K_{eff,y}^i \cos^2 \beta$$

$$c^i = 2 \sqrt{K_{eff,x}^i K_{eff,y}^i} \sin \beta \cos \beta \quad (1.9)$$

$$A = \frac{1}{r_1^2} = \frac{1}{K_1}$$

$$B = \frac{1}{r_2^2} = \frac{1}{K_2}$$

$$C = \frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} = \frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2}$$

L'équation (1.8) peut alors être réécrite sous la forme suivante :

$$a^i A + b^i B + c^i C = I \quad (1.10)$$

Par conséquent, un système d'équations 3x3 peut être obtenu à partir de trois valeurs de perméabilité effective. Finalement, le système à résoudre est :

$$\begin{aligned}
 a^{0^\circ} A + b^{0^\circ} B &= 1 \\
 a^{45^\circ} A + b^{45^\circ} B + c^{45^\circ} C &= 1 \\
 a^{90^\circ} A + b^{90^\circ} B &= 1
 \end{aligned} \tag{1.11}$$

ou sous forme matricielle par rapport aux inconnues A, B et C :

$$\begin{bmatrix}
 K_{eff}^{0^\circ} \cos^2 \beta & K_{eff}^{0^\circ} \sin^2 \beta & 0 \\
 \frac{K_{eff}^{45^\circ}}{2} & \frac{K_{eff}^{45^\circ}}{2} & \frac{K_{eff}^{45^\circ}}{2} \sin 2\beta \\
 K_{eff}^{90^\circ} \sin^2 \beta & K_{eff}^{90^\circ} \cos^2 \beta & 0
 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{K_1} \\ \frac{1}{K_2} \\ \frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1.12}$$

Notons que l'angle β est aussi inconnu dans le système (1.12), lequel reste cependant un système avec trois inconnues K_1, K_2 et β .

Dans le cas général, par exemple $0^\circ/60^\circ/120^\circ$, il est mathématiquement impossible d'isoler l'inconnue β qui est présente dans tous les termes de manière à permettre une résolution explicite du système linéaire 1.12. Donc, la condition $\beta = 0.1^\circ$ est imposée pour commencer la méthode et par itération sur β , le système est résolu jusqu'à ce que la condition $C=B-A$ soit respectée. Finalement, les perméabilités principales et leur orientation sont déduites de A, B et β . Cette approche est appelée *méthode itérative de l'ellipse*. Il faut noter que dans le cas particulier des directions $0^\circ/45^\circ/90^\circ$, des simplifications peuvent être faites et, après considérations mathématiques et

trigonométriques, le système se réduit à trois équations pour obtenir directement les trois inconnues A , B et β tel que proposé par Weitzenböck et al. [17]. Cette approche est valide si les directions mesurées restent à 45° l'une de l'autre, par exemple $0^\circ/45^\circ/90^\circ$.

La *méthode itérative de l'ellipse* fondée sur la reconstruction de l'ellipse est plus générale et diffère de celle de Weitzenböck et al. [17].

1.5. Comparaison de la méthode itérative de l'ellipse avec la littérature

Les résultats expérimentaux obtenus par dérivation de la perméabilité principale à partir de mesures unidirectionnelles sont peu abondants dans la littérature. Gebart et Lidström [18] et Lundström et al. [19] ont effectués des mesures unidirectionnelles à 0° , 45° et 90° pour divers types de renforts, tel que le mat Vetrotex Unifilo U812, le tissu de carbone Brochier Injectex 21091, la fibre de verre Devold DBT 800 et l'Ahlström 2400 tex. Ils ont utilisé deux méthodes différentes de celle proposée dans ce travail pour la dérivation des perméabilités principales. Gebart et Lidström [18] utilisèrent la méthode de la résistance à l'écoulement, c'est-à-dire l'inverse du tenseur de la perméabilité, pour déterminer les perméabilités principales à partir de trois mesures unidirectionnelles. De même, Lundström et al. [19] suivirent une approche proposée par Parnas et Salem [20], où la perméabilité effective est mesurée dans une direction. Ensuite, les perméabilités principales, K_1 et K_2 , le rapport d'anisotropie K_1/K_2 et l'orientation β du fluide sont reliées entre elles par un système d'équations. Les perméabilités principales et l'orientation β peuvent ainsi être déterminées à partir de trois essais unidirectionnels.

En utilisant des résultats expérimentaux publiés par Weitzenbock et al. [17] et Parnas et al. [19] pour les perméabilités effectives selon les trois directions 0° , 45° et 90° , la méthode itérative de l'ellipse a été employée pour obtenir les perméabilités principales et ses orientations. Les valeurs obtenues sont les mêmes que celles de Weitzenbock et al. [17] et Parnas et al. [19].

En premier, Weitzenböck et al. [17] a remarqué que de petites variations des perméabilités effectives, $K_{eff}^{0^\circ}$, $K_{eff}^{45^\circ}$ et $K_{eff}^{90^\circ}$, causent un changement notable des perméabilités principales et ses orientations. En fait, dans ce travail une variation de l'ordre de $\pm 5\%$ de la perméabilité effective dans la direction 90° , $K_{eff}^{90^\circ}$, provoque une variation de l'ordre de $\pm 8\%$ de l'orientation principal d'écoulement β prédict. De même, une variation de $\pm 5\%$ de $K_{eff}^{0^\circ}$ provoque une variation de l'ordre de $\pm 2\%$ de l'angle β , tandis qu'une variation de $\pm 5\%$ de $K_{eff}^{45^\circ}$ affecte β de -9% à $+13\%$.

1.6. Plan de mesures

Le renfort utilisé dans cette étude est un tissu de carbone équilibré (même nombre de fils selon la chaîne et la trame) de masse surfacique 299 gr/m^2 . Le Tableau 1.2 résume les paramètres donnés par le fabriquant.

Tableau 1.2 Caractéristiques du tissu carbone utilisé.

Type:	Tissu de carbone tressé
Nom:	satin équilibré
Densité surfacique:	299 (gr/m ²)
Densité volumique:	1.77E6 (gr/m ³)

Les mesures ont été effectuées sur un banc de mesure de perméabilité planaire unidirectionnel pour lequel une épaisseur de cavité de 1.48 mm a été utilisée pour toutes les mesures. Pour caractériser la perméabilité du tissu en fonction du taux de fibres, trois groupes de mesures ont été planifiés pour chaque direction. Le Tableau 1.3 détaille le nombre de mesures pour la caractérisation complète en perméabilité du tissu de carbone non-déformé en indiquant le nombre minimum d'essais requis dans chaque cas.

Tableau 1.3 Nombre de mesures de perméabilité pour le tissu non-déformé.

	Direction à mesurer		
	0° (chaîne)	45°	90° (trame)
taux de fibres 34.2 (%) (3 couches)	2	2	2
45.7 (%) (4 couches)	2	1	2
57.1 (%) (5 couches)	2	1	2

Donc, les fractions volumiques de fibres mesurées ont été respectivement de 34,2% (3 couches), 45,7% (4 couches) et 57,1% (5 couches). Les injections ont été effectuées à pression constante et le fluide utilisé est une huile de silicium de viscosité 0.104 Pa.s

(104 Cst). Cette dernière valeur a été vérifiée dans le laboratoire à température ambiante (voir annexe A).

1.7. Résultats sans déformation

Les résultats expérimentaux sont présentés dans la section suivante, tant les valeurs des perméabilités effectives que les perméabilités principales K_1 , K_2 et l'angle β du front d'écoulement. Noter que la chaîne – « *warp* » en anglais – est définie ici comme étant dans le sens de déroulement du rouleau de renfort, tandis que la trame – « *weft* » en anglais - correspond à la direction perpendiculaire (largeur du rouleau).

1.7.1. Perméabilités effectives pour la chaîne, la trame et un angle à 45°

Les résultats des mesures de perméabilité unidirectionnelle planaire pour les trois taux de fibres testés sont regroupés dans les Tableaux 1.4 à 1.6 ci-dessous. Dans la plupart des cas, trois essais ont été effectués afin de bien vérifier la reproductibilité des résultats.

Tableau 1.4 Perméabilité mesurée dans chaque direction pour un taux de fibres de 34,2%.

Vf = 34.2%	Perméabilité (m ²)		
	0° (chaîne)	45°	90° (trame)
1	7.790E-10	1.011E-09	1.051E-09
2	8.020E-10	9.990E-10	1.017E-09
3	8.120E-10	9.870E-10	1.024E-09
<i>moyenne</i>	<i>7.977E-10</i>	<i>9.990E-10</i>	<i>1.031E-09</i>
<i>écart-type</i>	<i>1.692E-11</i>	<i>1.200E-11</i>	<i>1.795E-11</i>

Tableau 1.5 Perméabilité mesurée dans chaque direction pour un taux de fibres de 45,7%.

Vf = 45.7%	Perméabilité (m ²)		
	0° (chaîne)	45°	90° (trame)
1	2.10E-10	2.500E-10	2.55E-10
2	2.09E-10		2.57E-10
3	1.97E-10		2.66E-10
<i>moyenne</i>	<i>2.053E-10</i>	<i>2.500E-10</i>	<i>2.593E-10</i>
<i>écart-type</i>	<i>7.234E-12</i>		<i>5.859E-12</i>

Tableau 1.6 Perméabilité mesurée dans chaque direction pour un taux de fibres de 57,1%.

Vf = 57.1%	Perméabilité (m ²)		
	0° (chaîne)	45°	90° (trame)
1	4.80E-11	6.80E-11	6.90E-11
2	4.10E-11		7.20E-11
3	4.70E-11		7.10E-11
<i>moyenne</i>	<i>4.533E-11</i>	<i>6.800E-11</i>	<i>7.067E-11</i>
<i>écart-type</i>	<i>3.786E-12</i>		<i>1.528E-12</i>

Ces résultats sont regroupés dans la Figure 1.6. Les valeurs des perméabilités effectives pour la direction à 45° ne sont pas affichées puisqu'elles présentent un comportement très proche des résultats dans la direction de la trame. Comme d'habitude, la perméabilité montre une décroissance exponentielle avec le taux de fibres. Il faut noter aussi que le matériau présente un degré d'anisotropie par rapport aux deux directions des fibres, la chaîne et la trame, bien que le tissu soit équilibré.

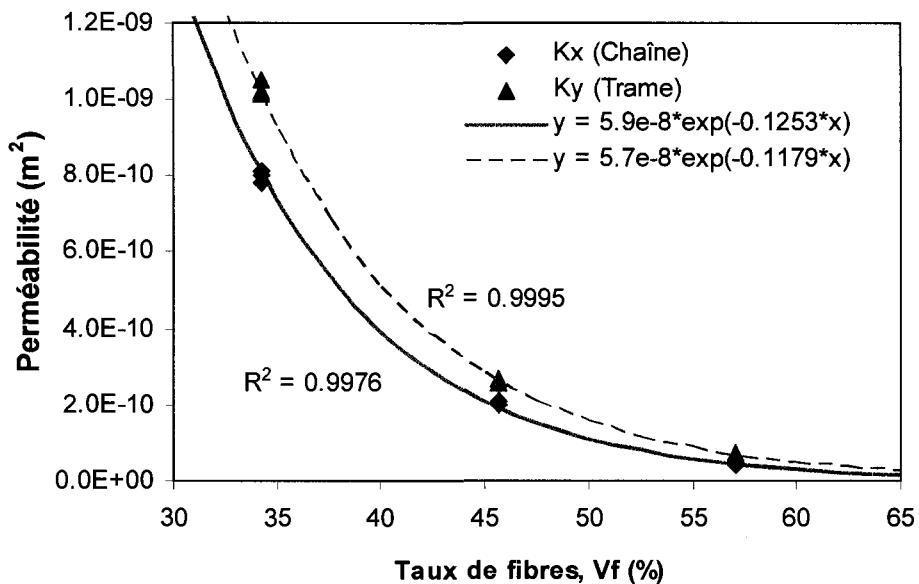


Figure 1.6 Valeurs des perméabilités effectives en fonction de la fraction volumique de fibres.

1.7.2. Perméabilités principales, K_1 et K_2 , et angle du front β

Les valeurs théoriques K_1 et K_2 obtenues pour les perméabilités principales sont regroupées dans les Tableaux 1.7 à 1.9. Pour corroborer ces résultats, des mesures unidirectionnelles ont été effectuées pour un taux de fibres de 34,2% sur des

échantillons coupés dans une direction faisant un angle de 70° avec la chaîne. Les valeurs expérimentales pour un taux de fibres de 34,2% apparaissent dans le Tableau 1.7 plus bas, juste en dessous des valeurs identifiées par la méthode de l'ellipse. La corrélation entre les deux valeurs étant excellente pour un taux de fibres de 34,2%, tant pour K_1 que pour K_2 . Ces résultats viennent donc confirmer la validité de l'approche originale développée ici pour mesurer la perméabilité d'un tissu anisotrope uniquement à partir de résultats d'injection unidirectionnelle.

Tableau 1.7 Valeurs des perméabilités principales et de l'orientation du fluide β ($Vf_o = 34,2\%$).

$Vf_o = 34.2\%$	Perméabilité (m^2)		
	K_1 (m^2)	K_2 (m^2)	β (°)
Valeurs identifiées	1.07E-09	7.74E-10	71.0
Valeurs expérimentales	1.05E-09	8.12E-10	~ 70

Tableau 1.8 Valeurs des perméabilités principales et de l'orientation du fluide β ($Vf_o = 45,7\%$).

$Vf_o = 45.7\%$	Perméabilité (m^2)		
	K_1 (m^2)	K_2 (m^2)	β (°)
Valeurs identifiées	2.67E-10	2.00E-10	72.2
Valeurs expérimentales	---	---	---

Tableau 1.9 Valeurs des perméabilités principales et de l'orientation du fluide β ($Vf_o = 57,1\%$).

$Vf_o = 57,1\%$	Perméabilité (m^2)		
	K_1 (m^2)	K_2 (m^2)	β ($^\circ$)
Valeurs identifiées	7.76E-11	4.29E-11	69.7
Valeurs expérimentales	---	---	---

Ces résultats montrent bien que l'angle β de l'axe principal de l'ellipse d'écoulement avec la chaîne du tissu est indépendant du taux de fibres. Ce résultat est d'ailleurs corroboré par des expériences d'injection radiale, dont les résultats sont montrés à la Figure 1.8 de la page suivante. Comme dans la Figure 1.6 précédemment, les courbes exponentielles de la Figure 1.7 illustrent la dépendance des perméabilités principales en fonction du taux de fibres.

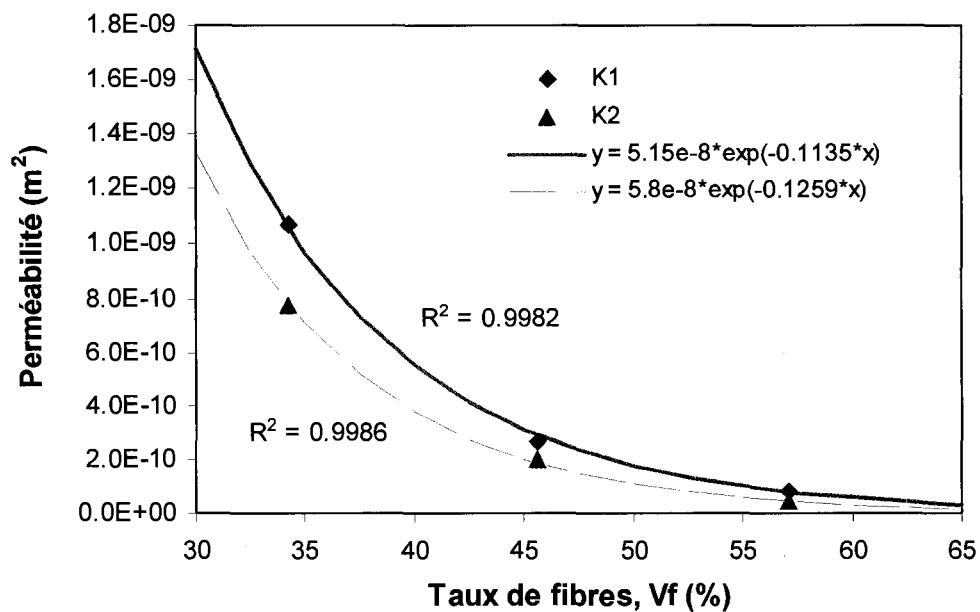


Figure 1.7 Valeurs des perméabilités principales en fonction de la fraction volumique de fibres.

Les photographies de l'écoulement obtenues pour différents temps expérimentaux ont donné une ellipse inclinée d'environ 72° selon la chaîne. Ce résultat contribue aussi à valider l'approche expérimentale préconisée ici.

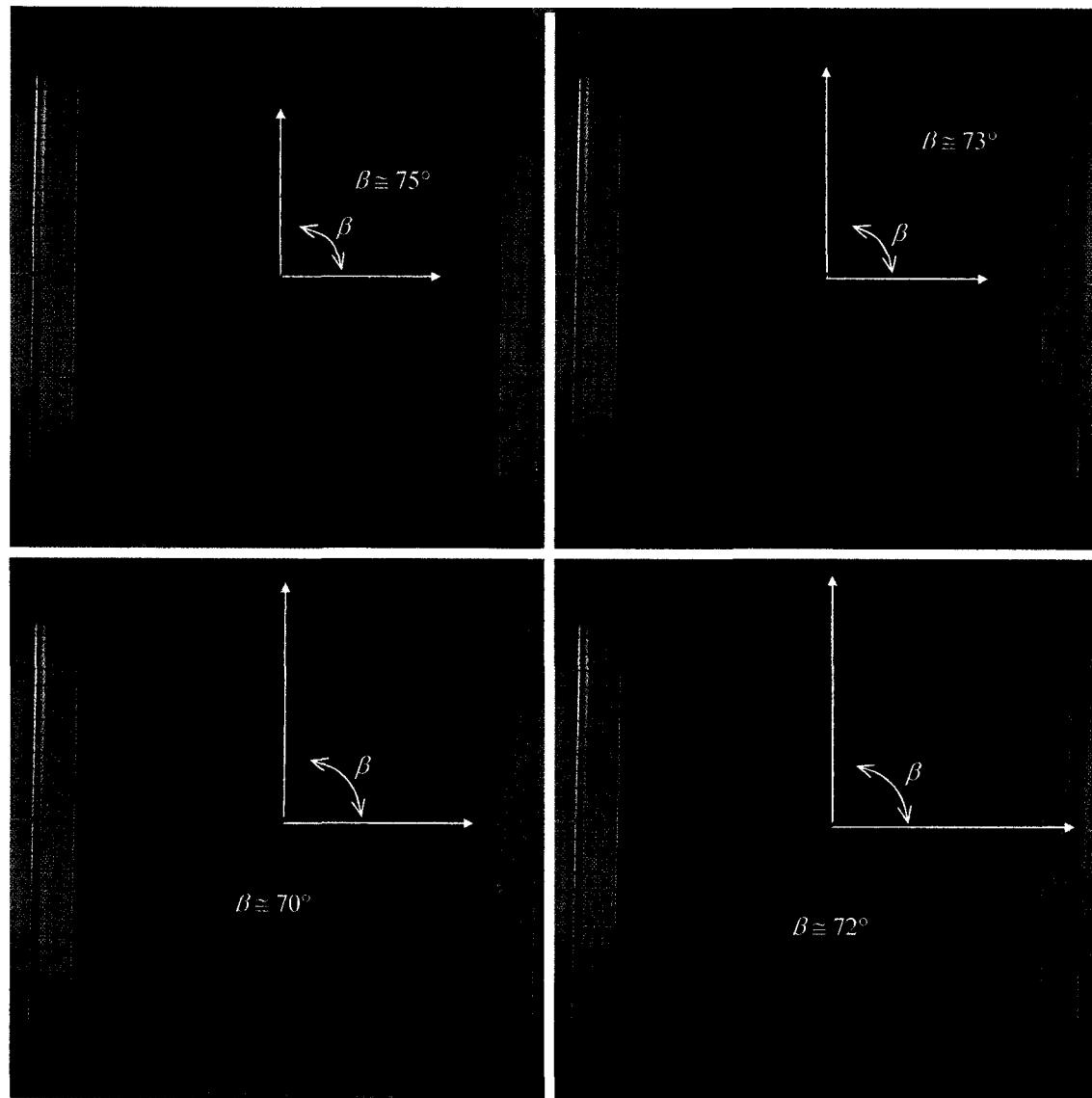


Figure 1.8 Ellipses d'écoulement obtenues pour une injection radiale.

1.8. Discussion des résultats

Ces premiers résultats de perméabilité sur le tissu non-déformé se montrent très reproductibles. En général, cette reproductibilité peut être attribuée au fait que le front du fluide observé pendant les essais a été très régulier et parallèle aux lignes dessinées sur la plaque de verre trempé. De plus, la précision sur les valeurs des perméabilités effectives est estimée à 5% en termes d'erreur relative moyenne (ERM). Cette erreur est définie comme une moyenne des différences entre la position réelle du front $L_{exp,i}$ et la longueur calculée $L_{int,i}$ par la loi de Darcy tel que proposé par Ferland et al. [10] :

$$ERM = \frac{L_{int,i} - L_{exp,i}}{L_{int,i}} * 100 \text{ (\%)} , \quad 0 \leq i \leq n \quad (1.13)$$

où l'indice i correspond à une position du front d'écoulement donnée dans le temps, et n est le nombre de positions du front enregistrées. La longueur interpolée, $L_{int,i}$, est définie à partir de la loi de Darcy par l'intégration de la pression dans le temps en appliquant la méthode des moindres carrés. On obtient l'expression suivante :

$$L_{int,i} = \frac{\sum_{k=0}^n \left(L_{exp,k} \sqrt{\int_0^{t_k} P_{inj}(t_k) dt} \right)_{t_i}}{\sum_{k=0}^n \left(\int_0^{t_k} P_{inj}(t_k) dt \right)} \int_0^{t_i} P_{inj}(t_i) dt ; \quad 0 \leq i \leq n \quad (1.14)$$

Ces résultats expérimentaux, c'est-à-dire, $K_{eff}^{0^\circ}$, $K_{eff}^{45^\circ}$ et $K_{eff}^{90^\circ}$, peuvent être représentés par l'équation de Kozeny-Carman, qui fournit un modèle permettant d'exprimer la perméabilité en fonction du taux de fibres [21] :

$$K = \frac{r_f^2}{4k} \frac{(1-Vf)^3}{Vf^2} \quad (1.15)$$

où r_f est le rayon de la fibre, Vf le taux de fibres, et k est la constante de Kozeny. Cette valeur ne reste pas constante quand le taux de fibres varie [21]. En fait, la valeur de k décroît généralement avec l'augmentation du taux de fibres. Le terme $r_f^2/4k$ est dérivé à partir d'essais expérimentaux réalisés pour différents taux de fibres et direction mesurée. Ces valeurs sont illustrées à la Figure 1.9 et elles sont représentées par une tendance polynomiale. L'équation de Kozeny-Carman peut ainsi être réécrite sous la forme :

$$K_{eff}^i = (C_1^i Vf^2 + C_2^i Vf + C_3^i) * \frac{(1-Vf)^3}{Vf^2} ; \text{ pour } i = 0^\circ, 45^\circ \text{ et } 90^\circ \quad (1.16)$$

où C_1^i , C_2^i et C_3^i sont les coefficients du polynôme pour chaque direction.

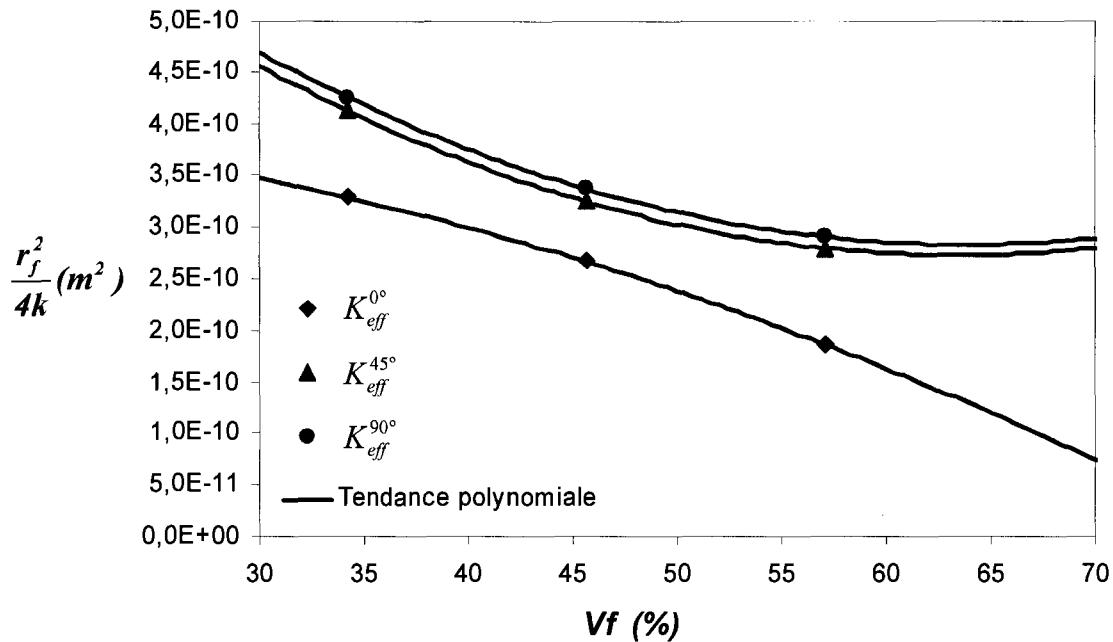


Figure 1.9 Dépendance de la constante de Kozeny-Carman par rapport au taux de fibres.

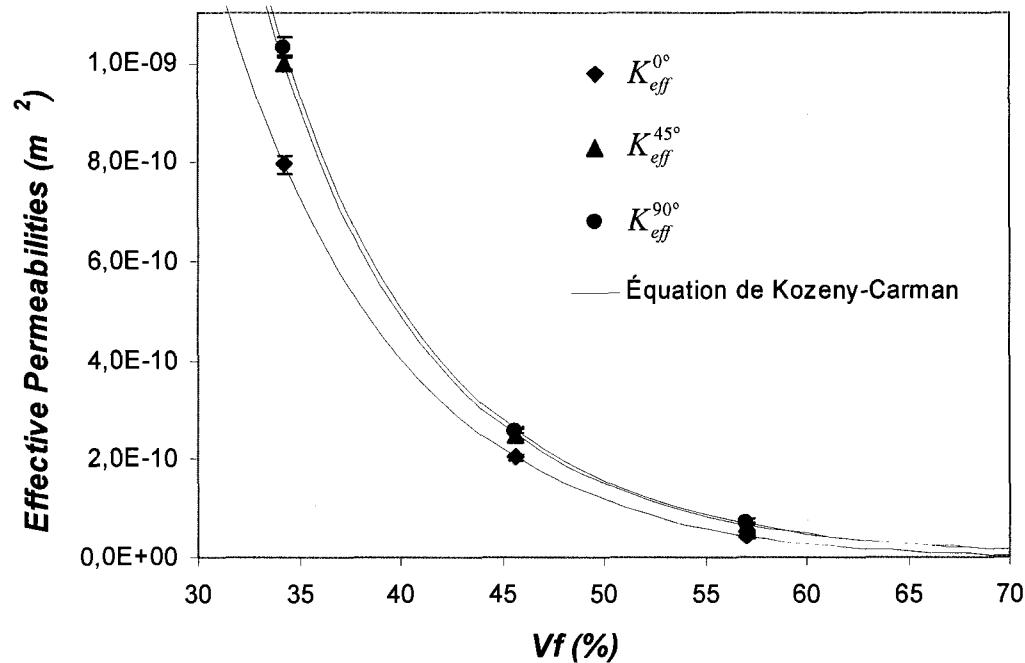


Figure 1.10 Perméabilités effectives en fonction du taux de fibres.

La Figure 1.10 montre les perméabilités effectives pour les trois directions mesurées en fonction du taux de fibres. Il faut noter que la perméabilité dans la direction à 45° est pratiquement la même que dans la direction à 90° , quelque soit le taux de fibres considéré. Ces deux perméabilités restent également toujours plus grandes que dans la direction à 0° , et ce d'autant plus que le taux de fibres est faible. On peut déduire de cette observation que la direction principale de l'écoulement est orientée entre ces deux directions, c'est-à-dire, entre 45° et 90° . Tant les perméabilités principales que l'orientation principale d'écoulement peuvent être obtenues à partir de l'équation (1.16) écrite pour chaque direction en utilisant la méthode itérative de l'ellipse. Un diagramme de la procédure de calcul est donné à l'annexe B. Les résultats obtenus sont donnés dans les Figures 1.11 à 1.13.

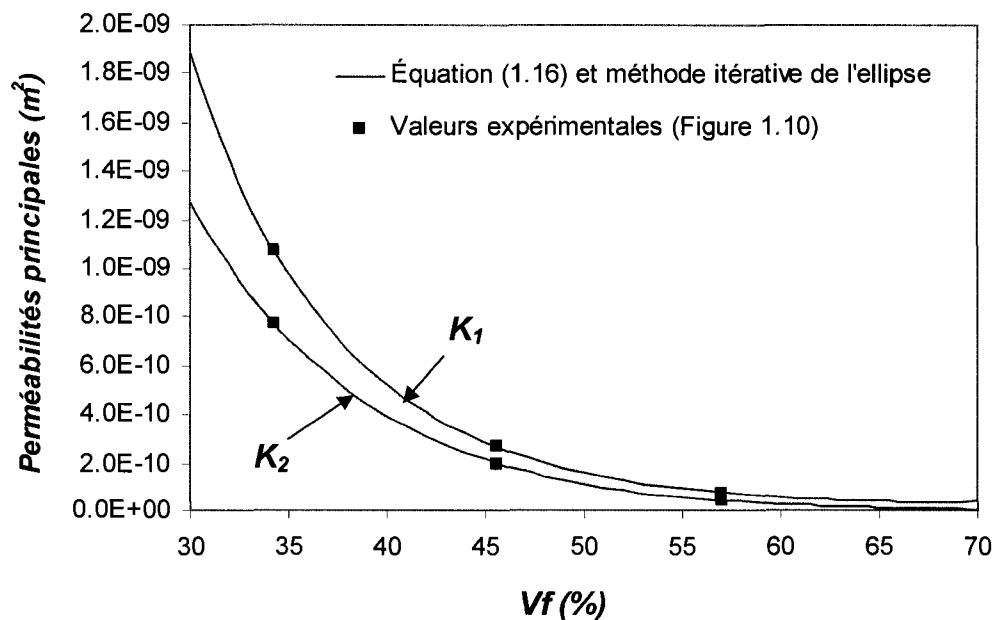


Figure 1.11 Valeurs des perméabilités principales en fonction du taux de fibres obtenues en utilisant équation (1.16) et la méthode itérative de l'ellipse.

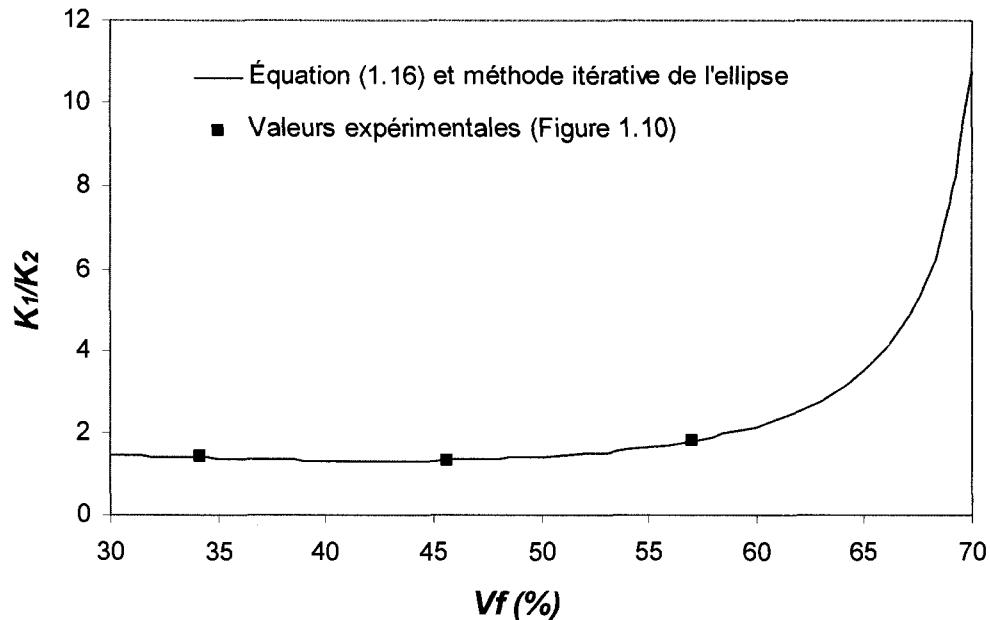


Figure 1.12 Rapport d'anisotropie en fonction du taux de fibres obtenu en utilisant l'équation (1.16) et la méthode itérative de l'ellipse.

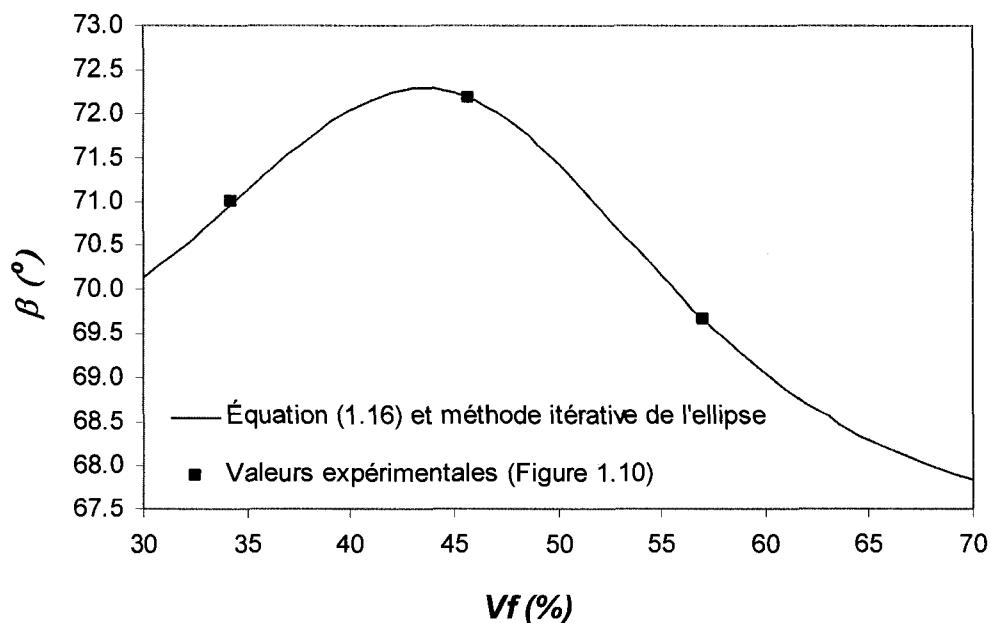


Figure 1.13 Orientation principale de l'écoulement en fonction du taux de fibres obtenue en utilisant l'équation (1.16) et la méthode itérative de l'ellipse.

Bien que les résultats pour l'angle dans la Figure 1.13 présentent un comportement particulier par rapport au taux de fibres, cet angle peut être bien considéré constant et égal à 70° dans une plage de $\pm 2^\circ$. Cette observation vient confirmer l'hypothèse que l'angle du front d'écoulement est indépendant par rapport au taux de fibres.

CHAPITRE 2

CARACTÉRISATION DE LA PERMÉABILITÉ D'UN TISSU DÉFORMÉ EN CISAILLEMENT

2.1. Introduction

L'utilisation des matériaux composites dans diverses industries a augmenté considérablement et la fabrication de pièces complexes est devenue une exigence quotidienne. Lorsqu'un renfort tissé est drapé sur une géométrie complexe, le tissu subit une certaine déformation dans son plan qui se traduit en général par un cisaillement local de ses fibres. Cette déformation perturbe l'écoulement de la résine dans la cavité du moule. Évidemment, le cisaillement local des fibres affecte directement la perméabilité du renfort, puisque le nouvel arrangement des fibres modifie localement le taux de fibres, donc la perméabilité globale et les directions principales de l'écoulement. L'objectif de ce deuxième chapitre est de mesurer la perméabilité du tissu soumis à différentes déformations contrôlées afin d'en déduire la perméabilité du tissu déformé.

2.2. Revue bibliographique

Bien qu'il existe plusieurs modes de déformation des tissus, le cisaillement des fibres constitue un des principaux mécanismes de déformation. Au niveau de la perméabilité d'un renfort tissé déformé en cisaillement, le phénomène est caractérisé par une rotation et une déformation de l'ellipse d'écoulement tel qu'observé entre autres par

Wang et al. [24] et Hammami et al. [25]. Dans cette déformation, les fibres sont réorientées localement, ce qui modifie évidemment le taux de fibres. L'expérience montre clairement que les perméabilités principales et leurs orientations dépendent de l'orientation des fibres [25-29]. Heardman et al. [26] suggèrent que le taux de fibres soit modifié pour prendre en compte le réarrangement des fibres. La perméabilité d'un tissu déformé par cisaillement peut ainsi être reliée à deux facteurs : la variation locale du taux de fibres et le réarrangement des fibres, c'est-à-dire le changement de leur orientation.

La connaissance et la prédiction de la perméabilité planaire des tissus déformés constitue une tâche importante pour la conception des composites et la simulation numérique des procédés de fabrication des composites par moulage [25, 30-31].

2.3. Procédure expérimentale

2.3.1. Définition de l'angle de cisaillement et prédiction du taux de fibres

Si la déformation par cisaillement est considérée comme le mode principal de déformation d'un tissu tissé, le degré de cette déformation peut être déterminé par l'angle de cisaillement. La Figure 2.1 montre l'angle de cisaillement défini dans le présent travail par rapport à la trame après une rotation des fibres de la trame en direction de la chaîne. Il faut noter que les fibres dans la direction de la chaîne restent inchangées dans la rotation.

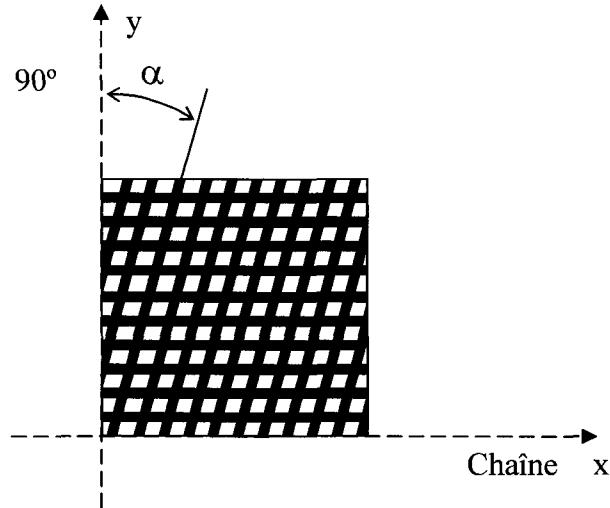


Figure 2.1 Définition de l'angle de cisaillement.

Puisque la déformation par cisaillement affecte le taux de fibres local, et par conséquent la perméabilité du renfort, le taux de fibres du tissu cisaillé doit être calculé avant de lancer la simulation numérique. Le nouveau taux de fibres est déterminé au moyen de l'équation suivante :

$$Vf_\alpha = \frac{Vf_o}{\cos \alpha} \quad (2.1)$$

où Vf_α dénote le taux de fibres du renfort cisaillé, Vf_o est le taux de fibres du renfort non-cisaillé et α l'angle de cisaillement. L'équation (2.1) a été discutée déjà par Fong et al. [32, 33], qui a supposé que les hypothèses suivantes étaient vérifiées :

- ✓ La déformation par glissement et plissement du renfort (« wrinkling ») ne sont pas considérés.
- ✓ La longueur des côtés d'une cellule unitaire du renfort reste constante après déformation.
- ✓ L'épaisseur de la cellule unitaire reste constante.

La Figure 2.2 montre l'allure d'une cellule unitaire déformée qui respecte ces hypothèses. Noter que lorsque l'angle de cisaillement augmente, l'aire de la cellule unitaire diminue d'un facteur $\cos\alpha$. Comme la quantité physique de fibres reste constante pendant la rotation de la cellule unitaire et que l'aire diminue, par conséquent le taux de fibres augmente.

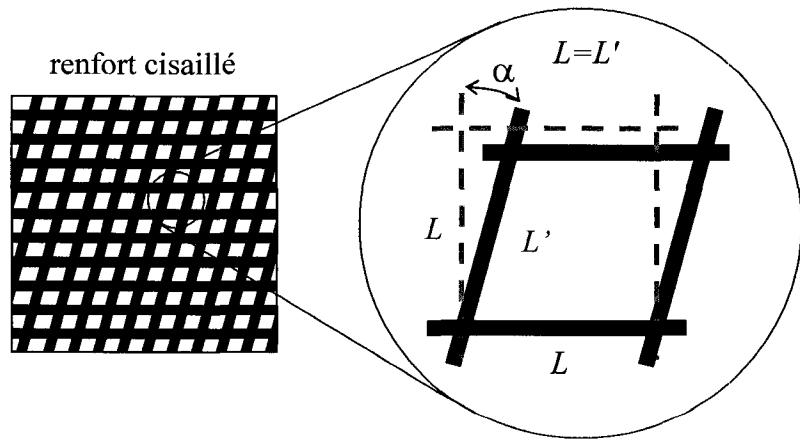


Figure 2.2 Cisaillement d'une cellule unitaire.

Puisque la perméabilité d'un renfort est en général directement associée à la fraction volumique de fibres, la variation du taux de fibres obtenue a été vérifiée en comparant les résultats de l'équation (2.1) avec les valeurs mesurées. En fait, avant d'effectuer les mesures de perméabilité, le poids de chaque échantillon est mesuré. Tel qu'illustré à la Figure 2.3, une très bonne correspondance a été observée entre les valeurs théoriques et expérimentales du taux de fibres. La densité superficielle indiquée par le fabricant (299 gr/m²) dans le cas du renfort non-cisaillé a été vérifiée dans notre laboratoire (298.2 gr/m²). L'excellente corrélation qu'on peut observer entre les deux courbes de la figure 2.3 peut être attribuée aux facteurs suivants :

- La densité superficielle du tissu indiquée par le fabricant est précise.
- Il est facile de manipuler et de cisailler les échantillons et aucun effet de retour (ou de « ressort ») n'a été observé après le cisaillement.
- Les échantillons ont été coupés et manipulés avec soin lors de la pesée.

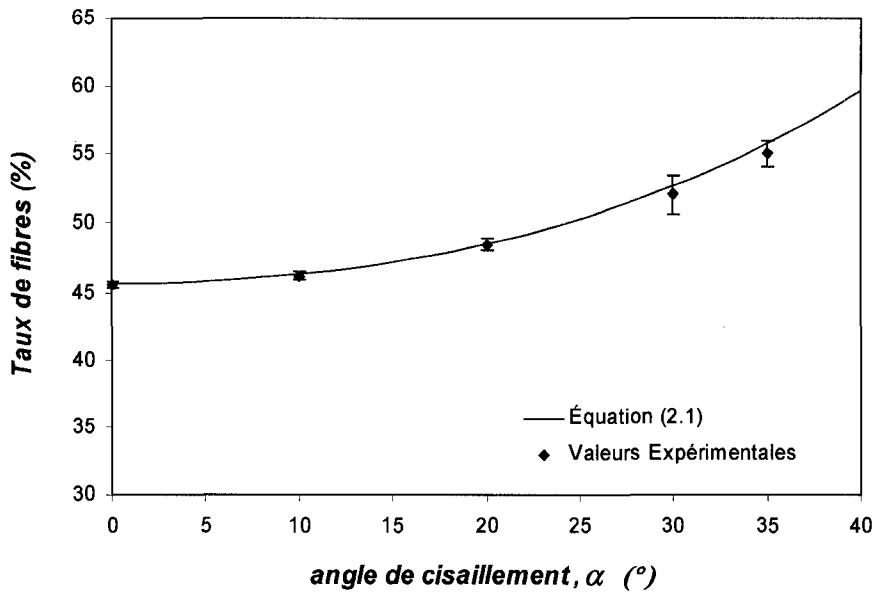


Figure 2.3 Comparaison entre les taux de fibres théorique et expérimental en fonction de l'angle de cisaillement.

2.3.2. Outil et procédure pour induire la déformation du renfort

Dans le but de mesurer la perméabilité du tissu soumis à différentes déformations contrôlées, un outil spécial a été développé pour cisailier le renfort. En suivant une approche proposée par Ueda et Gutowski [27], l'outil consiste en un cadre articulé formé de quatre barres en aluminium sur lesquelles l'échantillon est fixé. La procédure suivie est décrite dans le rapport de Laberge-Lebel et al. [34] (voir annexe C). La Figure 2.4 montre l'outil utilisé pour induire la déformation du tissu ainsi que le système de serrage pour retenir le renfort en place et maintenir les fibres parallèles aux barres.

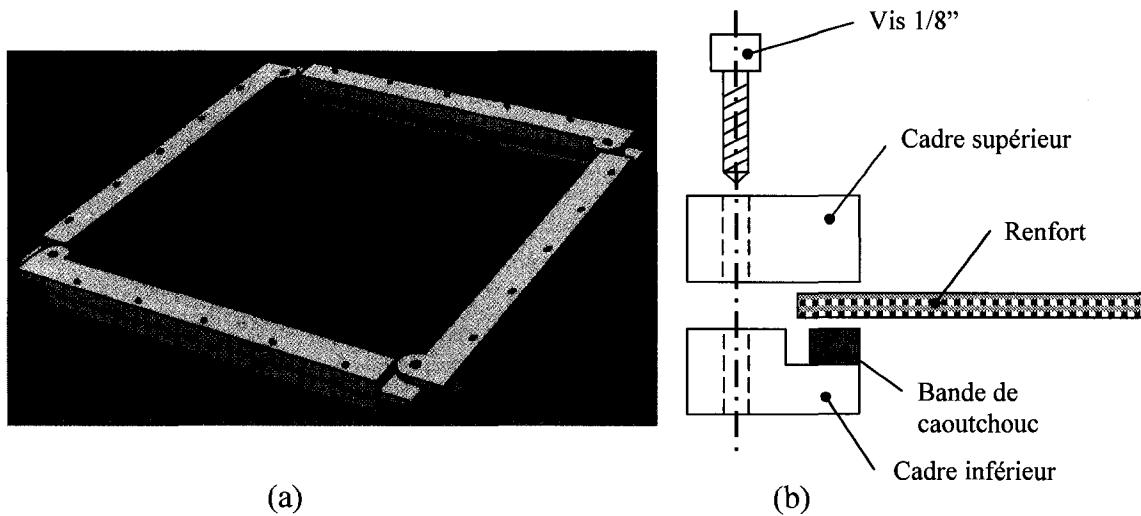


Figure 2.4 Outil expérimental utilisé pour induire déformation au tissu : (a) cadre de cisaillement ; et (b) système de serrage.

Bien que cet outil permette d'obtenir de bons résultats, quelques limitations ont cependant été observées. Premièrement, la zone utile pour couper le renfort cisaillé diminue quand l'angle de cisaillement augmente. En effet, les fibres tendent à rester perpendiculaires aux barres de compression. Le changement de direction des fibres au voisinage des barres de serrage résulte en une flexion hors plan. La Figure 2.5 illustre ce phénomène tel qu'observé dans la procédure de cisaillement utilisée.

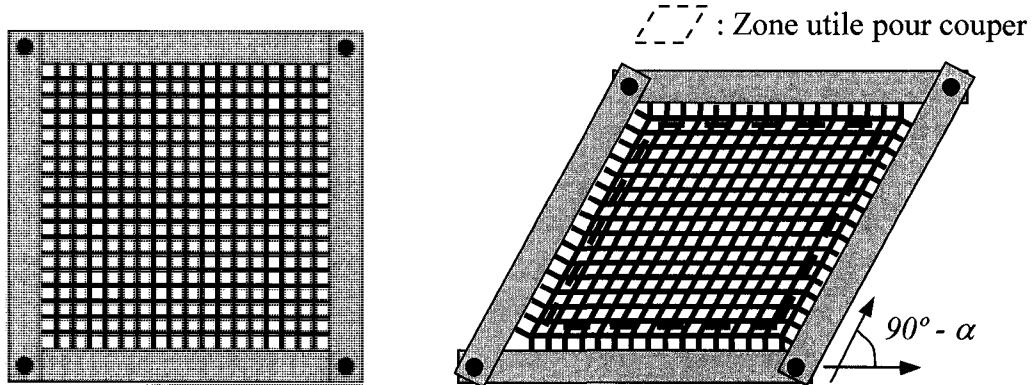


Figure 2.5 Zone utile du tissu cisaillé dans laquelle l'échantillon cisaillé doit être découpé.

Plus l'angle de cisaillement augmente, plus la flexion est générée vers l'intérieur de l'échantillon, et donc plus la zone utile diminue. Ce phénomène devient plus remarquable pour les grands angles de cisaillement, soit de 20° et plus.

Une deuxième limitation est liée au plissement des fibres lorsqu'elles sont soumises à de grandes déformations, un phénomène connu sous le terme « *wrinkling* » en anglais. En fait, après une certaine rotation des fibres orientées selon la trame en direction de la chaîne, les interstices ou canaux formés entre deux fils adjacents se ferment et les fibres se touchent. Une augmentation de l'angle de cisaillement produira évidemment un chevauchement des fibres et induira une ondulation au renfort. La Figure 2.6 montre l'apparition du phénomène après une déformation du tissu proche de 40° . Bien qu'un angle de cisaillement plus grand que 40° ait été obtenu manuellement sans plissement, il n'a pas été possible de retenir le tissu déformé à cet angle à cause de l'effet de

relaxation. Pour cette raison, l'angle de cisaillement maximal pour les essais a été fixé à 35° afin d'éviter tout plissement des fibres.

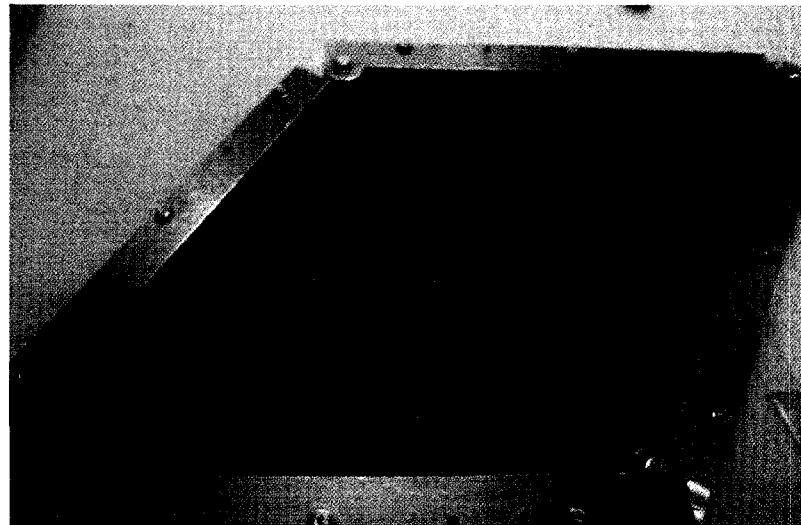


Figure 2.6 Exemples de plissement apparaissant dans le tissu pour un angle de cisaillement proche de 40°.

2.4. Plan de mesures

Au chapitre 1, la perméabilité planaire du renfort tissé a été caractérisée en fonction du taux de fibres sans déformation. Afin d'analyser l'influence du cisaillement des fibres sur la perméabilité du renfort, des mesures ont été effectuées pour différents angles de cisaillements à partir des trois fractions volumiques de fibres déjà considérées, soit $Vf_o = 34,2\%$, $Vf_o = 45,7\%$ et $Vf_o = 57,1\%$. Le tableau 2.1 résume le plan de mesures à suivre pour caractériser la perméabilité du tissu déformé ainsi que la quantité minimale d'essais à réaliser dans chaque cas.

Tableau 2.1 Plan de mesures de perméabilité pour le tissu cisaillé.

		Direction à mesurer		
		0° (chaîne)	45°	90° (trame)
34.2 (%)	$\alpha = 10^\circ$	---	---	---
	$\alpha = 20^\circ$	---	---	---
	$\alpha = 30^\circ$	---	---	---
	$\alpha = 35^\circ$	2	2	2
45.7 (%)	$\alpha = 10^\circ$	2	2	2
	$\alpha = 20^\circ$	2	2	2
	$\alpha = 30^\circ$	2	2	2
	$\alpha = 35^\circ$	2	2	2
57.1 (%)	$\alpha = 10^\circ$	---	---	---
	$\alpha = 20^\circ$	2	2	2
	$\alpha = 30^\circ$	---	---	---
	$\alpha = 35^\circ$	2	2	2

D'après l'observation du Tableau 2.1, le comportement de la perméabilité d'un tissu déformé a été étudié principalement pour un taux de fibres initial égal à 45,7%. De plus, quelques mesures ont été effectuées pour les autres taux de fibres à certains angles de cisaillement. En général, les échantillons ont été coupés de 400 mm par 100 mm ou de 300 mm par 100 mm dans le cas d'un angle de cisaillement de 35°. Chaque échantillon a été pesé. Après que les échantillons aient été placés dans la cavité du moule; l'angle formé entre la trame et la chaîne a été mesuré manuellement au moins sur dix points afin de vérifier que le degré de déformation est celui voulu.

De même, des échantillons de 300 mm par 250 mm ont été coupés et de mesures bidirectionnelles ont été effectuées afin de visualiser l'orientation principale de l'ellipse d'écoulement. Dans tous les cas, les essais tant unidirectionnels que bidirectionnels ont été réalisés à pression constante. Le fluide utilisé est de l'huile de silicone de viscosité 104 Cst (voir annexe A).

2.5. Résultats avec déformation

Les résultats expérimentaux pour le tissu déformé sont présentés dans la section suivante, tant pour les valeurs des perméabilités effectives que pour les perméabilités principales K_1 , K_2 et l'angle β du front d'écoulement.

2.5.1. Perméabilités effectives selon la chaîne, la trame et la direction à 45°

Les résultats de mesure des perméabilités effectives ($K_{eff}^{0°}$, $K_{eff}^{45°}$, $K_{eff}^{90°}$) pour des échantillons découpés dans les directions 0°, 90° et à 45° sont regroupés dans les tableaux ci-dessous pour les angles de cisaillement étudiés. Le Tableau 2.2 montre les résultats obtenus pour les échantillons avec un taux de fibres initial $Vf_o = 34,2\%$ et une déformation en cisaillement de 35°.

Tableau 2.2 Résultats de mesure des perméabilités planaires en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres initial $Vf_o = 34,2\%$.

$Vf_o = 34,2\%$		Perméabilité (m^2)				
Angle de cisaillement (°)	Direction mesurée	N° de Mesure			moyenne	écart-type
		1	2	3		
0	0°	7.790E-10	8.020E-10	8.120E-10	7.977E-10	1.692E-11
	45°	1.011E-09	9.990E-10	9.870E-10	9.990E-10	1.200E-11
	90°	1.051E-09	1.017E-09	1.024E-09	1.031E-09	1.795E-11
35	0°	1.286E-10	1.335E-10	---	1.311E-10	3.465E-12
	45°	2.723E-10	3.332E-10	2.319E-10	2.791E-10	5.099E-11
	90°	1.174E-10	9.608E-11	1.117E-10	1.084E-10	1.104E-11

De même, les résultats des perméabilités effectives en fonction de l'angle de cisaillement pour les taux de fibres initiaux $Vf_o = 45,7\%$ et $Vf_o = 57,1\%$ sont regroupés aux tableaux 2.3 et 2.4 respectivement. Pour les trois taux de fibres étudiés, les résultats des perméabilités effectives obtenues au chapitre 1 pour le matériau non-déformé ont été inclus à titre de comparaison.

Tableau 2.3 Résultats de mesure des perméabilités planaires en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$.

$Vf_o = 45,7\%$		Perméabilité (m^2)				
Angle de cisaillement (°)	Direction mesurée	N° de Mesure			moyenne	écart-type
		1	2	3		
0	0°	2.100E-10	2.090E-10	1.970E-10	2.053E-10	7.234E-12
	45°	2.500E-10	---	---	2.500E-10	---
	90°	2.550E-10	2.570E-10	2.660E-10	2.593E-10	5.859E-12
10	0°	1.270E-10	1.720E-10	1.280E-10	1.423E-10	2.570E-11
	45°	1.980E-10	1.940E-10	---	1.960E-10	2.828E-12
	90°	1.950E-10	1.920E-10	---	1.935E-10	2.121E-12
20	0°	8.100E-11	8.400E-11	---	8.250E-11	2.121E-12
	45°	1.270E-10	1.510E-10	1.480E-10	1.420E-10	1.308E-11
	90°	1.060E-10	1.050E-10	---	1.055E-10	7.071E-13
30	0°	3.300E-11	4.300E-11	3.800E-11	3.800E-11	5.000E-12
	45°	5.600E-11	6.300E-11	5.700E-11	5.867E-11	3.786E-12
	90°	3.300E-11	4.500E-11	3.900E-11	3.900E-11	6.000E-12
35	0°	3.104E-11	3.463E-11	---	3.284E-11	2.539E-12
	45°	5.439E-11	6.554E-11	---	5.997E-11	7.884E-12
	90°	2.388E-11	2.581E-11	---	2.485E-11	1.365E-12

Tableau 2.4 Résultats de mesure des perméabilités planaires en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres initial $Vf_o = 57,1\%$.

$Vf_o = 57,1\%$		Perméabilité (m^2)				
Angle de cisaillement (°)	Direction mesurée	N° de Mesure			moyenne	écart-type
		1	2	3		
0	0°	4.800E-11	4.100E-11	4.700E-11	4.533E-11	3.786E-12
	45°	6.800E-11	---	---	6.800E-11	---
	90°	6.900E-11	7.200E-11	7.100E-11	7.067E-11	1.528E-12
20	0°	1.460E-11	1.505E-11	---	1.483E-11	3.182E-13
	45°	3.909E-11	3.661E-11	---	3.785E-11	1.754E-12
	90°	2.448E-11	2.343E-11	---	2.396E-11	7.425E-13
35	0°	5.545E-12	6.493E-12	4.907E-12	5.648E-12	7.980E-13
	45°	8.979E-12	8.471E-12	---	8.725E-12	3.592E-13
	90°	5.176E-12	4.422E-12	---	4.799E-12	5.332E-13

2.5.2. Perméabilités principales K_1 et K_2 , et angle β du front

De la même façon qu'à la section 1.7.2, les valeurs K_1 et K_2 de la perméabilité dans les directions principales ont été calculées à partir des perméabilités effectives selon les trois directions mesurées 0° , 90° et 45° au moyen d'un logiciel développé avec MATLAB. Le front d'écoulement, ainsi que son orientation principale défini comme étant l'angle β de la direction du grand axe de l'ellipse d'écoulement avec la chaîne, sont donnés dans les pages suivantes pour le plan de mesures considéré. La Figure 2.7 montre le front du flux calculé pour un taux de fibres initial $Vf_o = 34,2\%$ cisaillé à 35° .

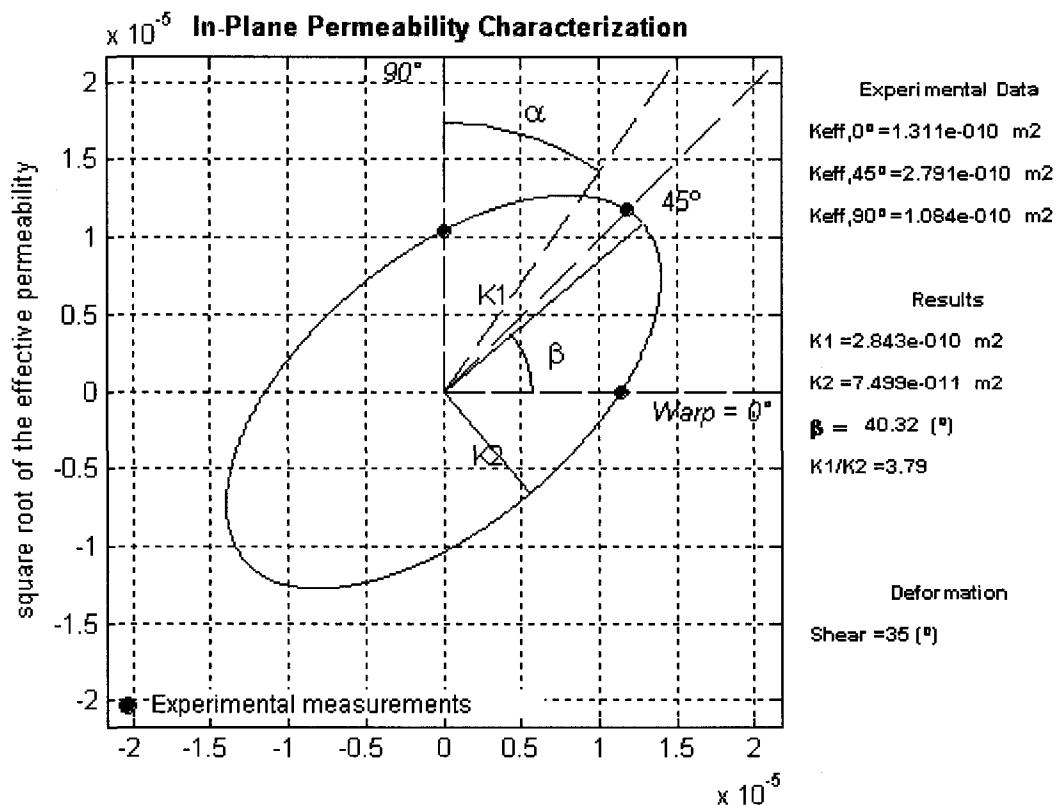


Figure 2.7 Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 34,2\%$ et un angle de cisaillage de 35° .

Une étude plus détaillée de la perméabilité en fonction du cisaillement a été réalisée pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$. En fait, quatre angles de cisaillement ont été évalués : 10° , 20° , 30° et 35° . Des injections centrales ont été effectuées pour comparer l'angle β calculé avec le logiciel avec l'angle observé expérimentalement. D'une manière générale, une bonne corrélation à quelques degrés près est obtenue entre les valeurs calculées et observées. Ces résultats sont illustrés aux Figures 2.8 à 2.14.

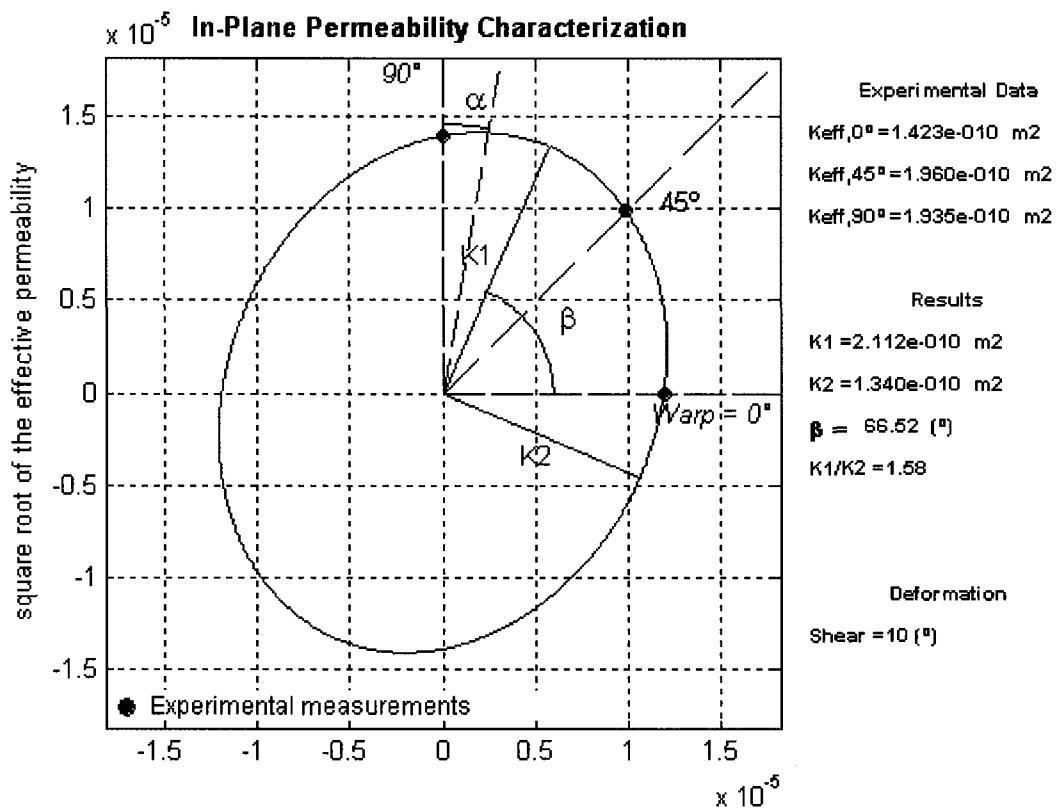


Figure 2.8 Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$ et un angle de cisaillement de 10° .

Les images des Figures 2.9, 2.11 et 2.13 ont été obtenues pour deux temps de remplissage différents. Ensuite, une ellipse a été dessinée sur les images afin de retrouver le front d'écoulement. À partir de ces ellipses, indiquées sur les images en ligne pointillée, l'orientation principale d'écoulement a été estimée.

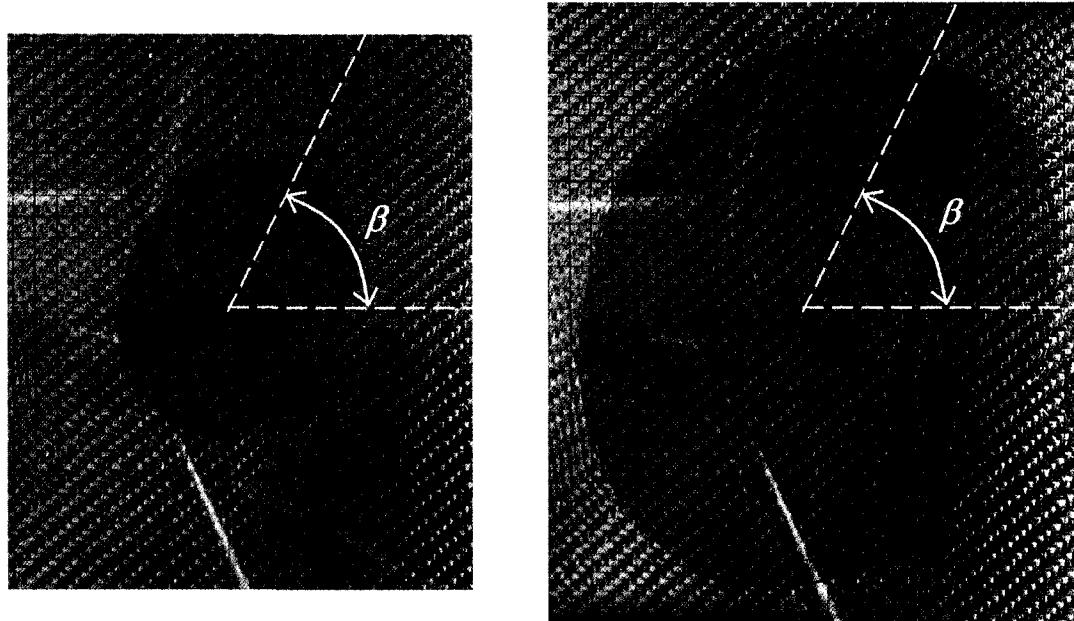


Figure 2.9 Vérification de l'angle d'écoulement obtenu à partir d'une mesure radiale : $Vf_o = 45,7\%$, $\alpha = 10^\circ$, $\beta \cong 68^\circ$ (expérimental).

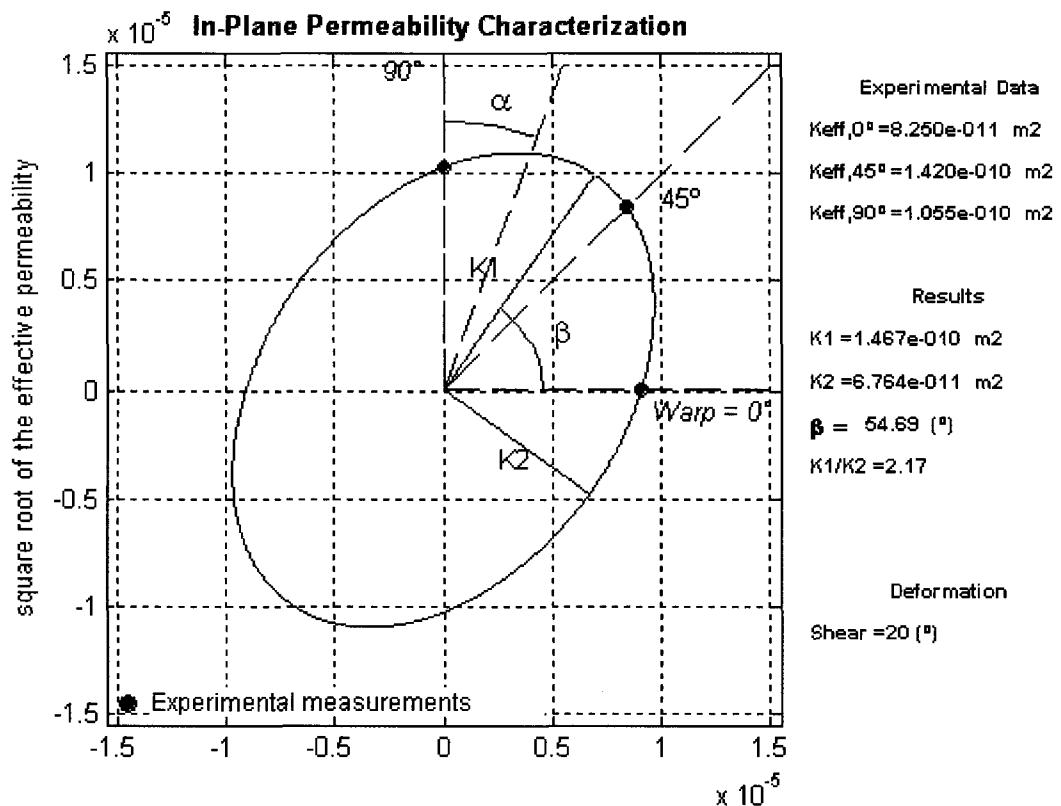


Figure 2.10 Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$ et un angle de cisaillement de 20° .

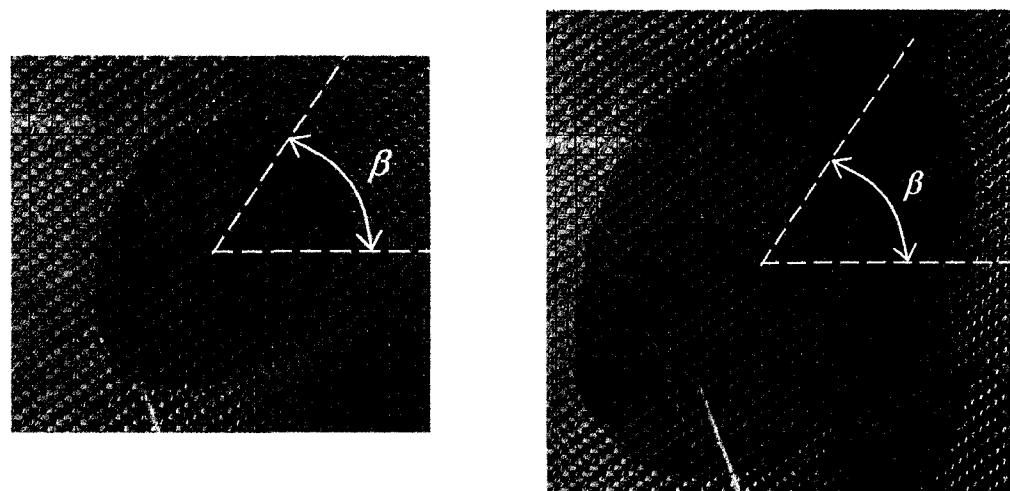


Figure 2.11 Vérification de l'angle d'écoulement obtenu à partir d'une mesure radiale : $Vf_o = 45,7\%$, $\alpha = 20^\circ$, $\beta \approx 58^\circ$ (expérimental).

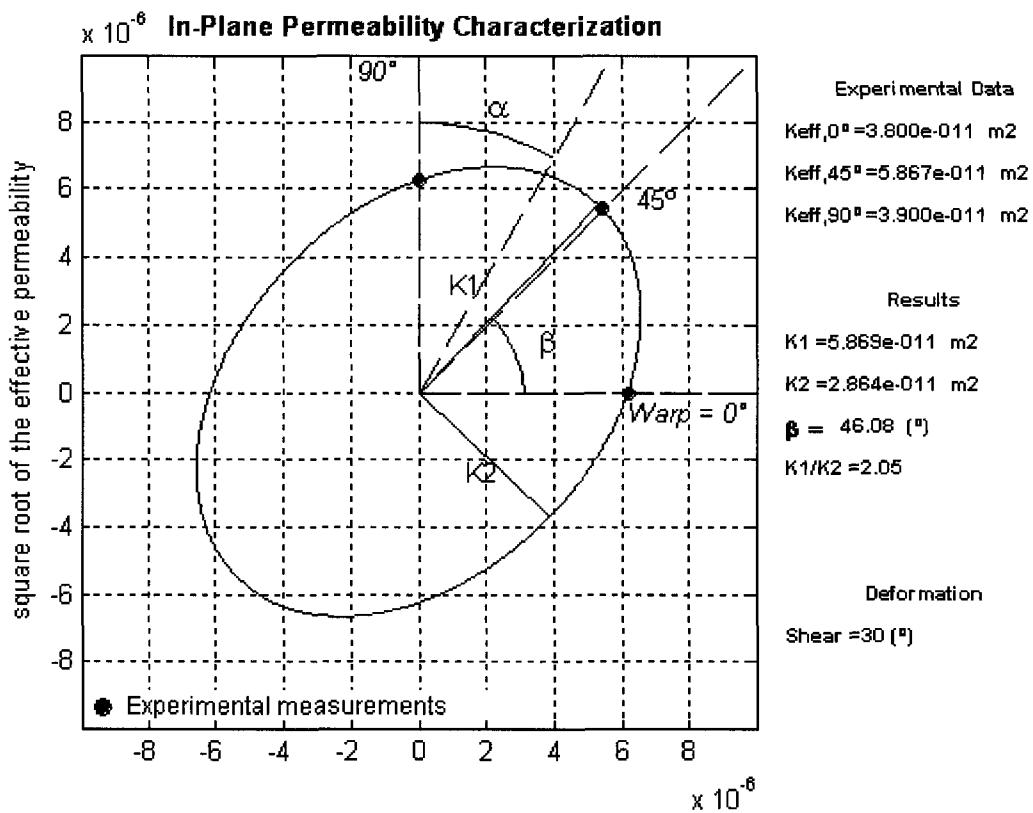


Figure 2.12 Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$ et un angle de cisaillement de 30° .

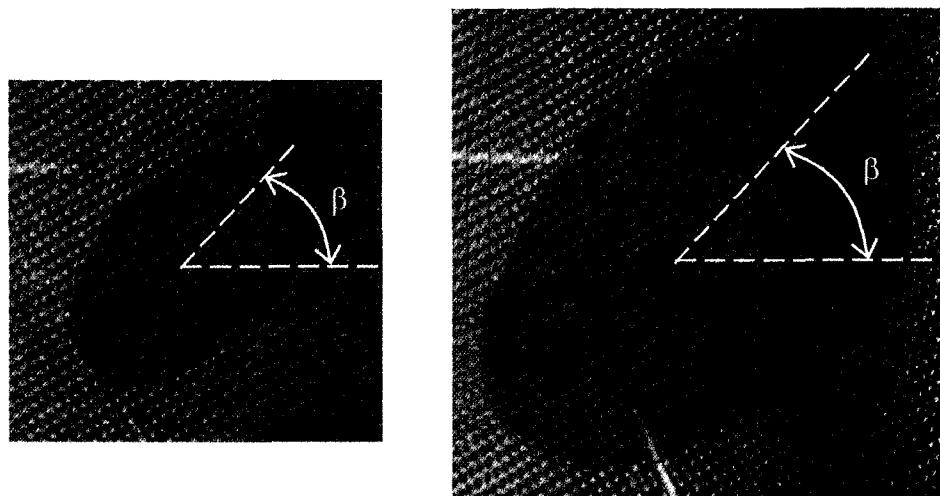


Figure 2.13 Vérification de l'angle d'écoulement obtenu à partir d'une mesure radiale : $Vf_o = 45,7\%$, $\alpha = 30^\circ$, $\beta \approx 46^\circ$ (expérimental).

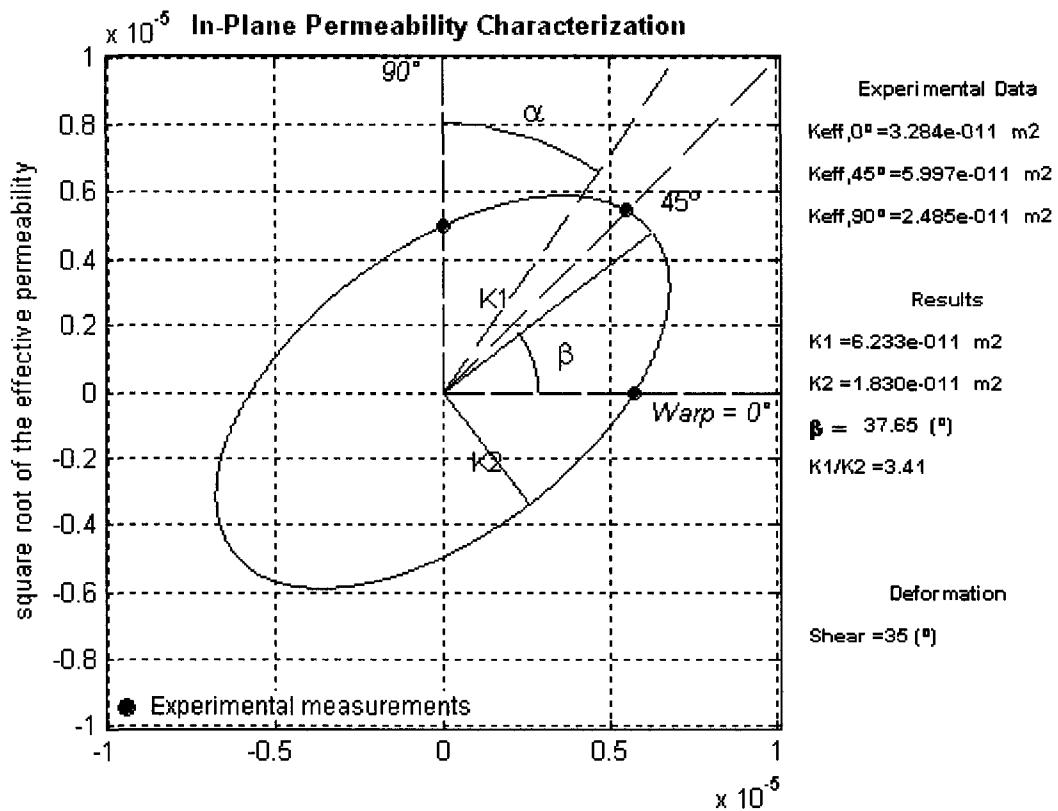


Figure 2.14 Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$ et un angle de cisaillement de 35° .

Enfin, les fronts d'écoulement pour un taux de fibres initial $Vf_o = 57,1\%$ sont montrés dans les Figures 2.15 et 2.16 pour des angles de cisaillement de 20° et 35° respectivement. Les valeurs K_1 et K_2 des perméabilités principales et l'angle β de l'axe principal de l'ellipse d'écoulement avec la chaîne sont regroupés dans le Tableau 2.5.

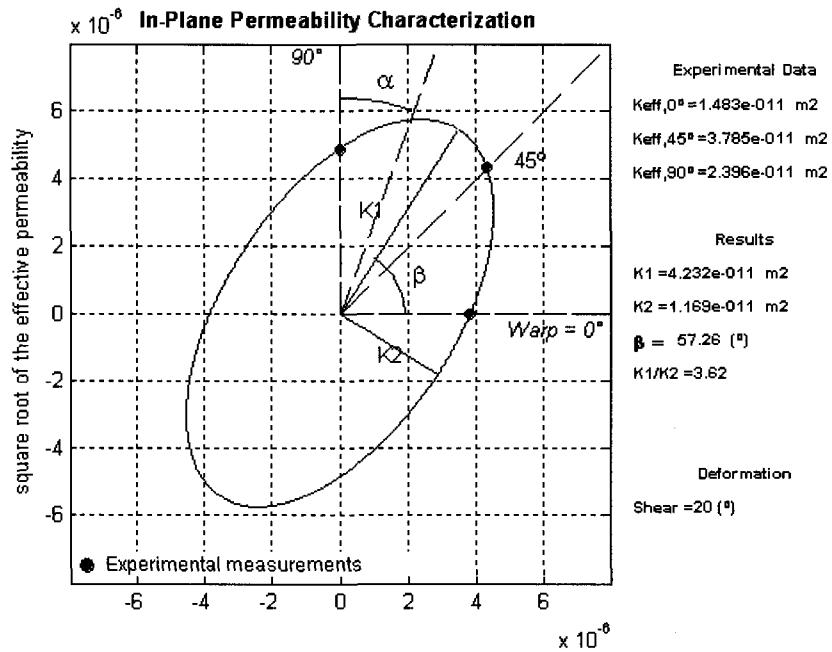


Figure 2.15 Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 57,1\%$ et un angle de cisaillement de 20° .

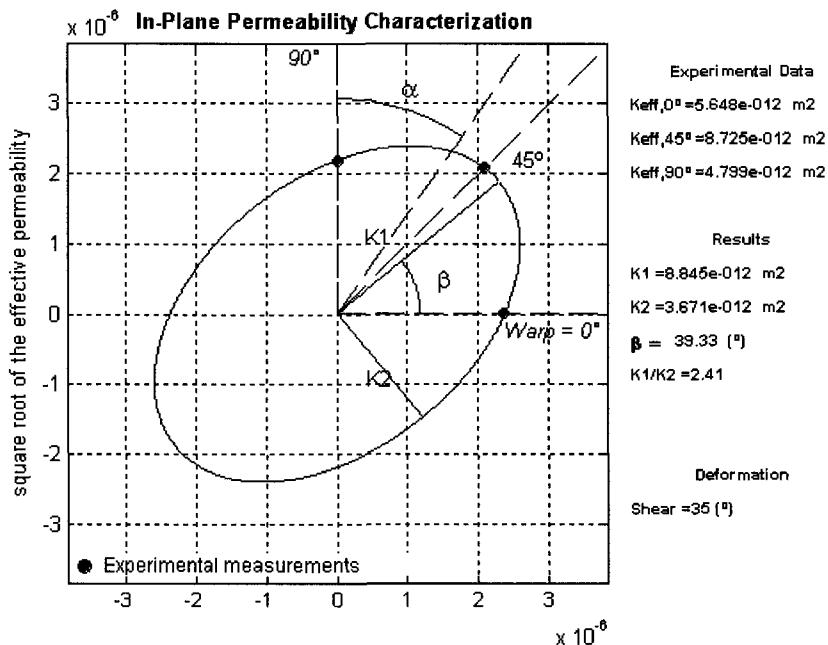


Figure 2.16 Front d'écoulement obtenu pour un taux de fibres initial $Vf_o = 57,1\%$ et un angle de cisaillement de 35° .

Tableau 2.5 Résultats calculés des perméabilités principales et orientations de l'ellipse d'écoulement dans tous les cas considérés.

Perméabilité dans les directions principales					
		$K_1 (m^2)$	$K_2 (m^2)$	$\beta (°)$	K_1/K_2
$Vf_o = 34.2\%$					
$\alpha (°)$	0	1.07E-09	7.74E-10	71	1.38
$\alpha (°)$	35	2.84E-10	7.50E-11	40.3	3.79
$Vf_o = 45,7\%$					
$\alpha (°)$	0	2.67E-10	2.01E-10	72.2	1.33
$\alpha (°)$	10	2.11E-10	1.34E-10	66.5	1.57
$\alpha (°)$	20	1.47E-10	6.76E-11	54.7	2.17
$\alpha (°)$	30	5.87E-11	2.86E-11	46.1	2.05
$\alpha (°)$	35	6.23E-11	1.83E-11	37.7	3.41
$Vf_o = 57,1\%$					
$\alpha (°)$	0	7.76E-11	4.29E-11	69.7	1.81
$\alpha (°)$	20	4.23E-11	1.17E-11	57.3	3.62
$\alpha (°)$	35	8.84E-12	3.67E-12	39.3	2.41

2.6. Discussion des résultats

Une première analyse des résultats montre que la perméabilité diminue à mesure que le taux de cisaillement augmente, ce qui est prévisible puisque le taux de fibres augmente. Quant à l'angle β du grand axe de l'ellipse d'écoulement avec la chaîne, il diminue, c'est-à-dire que le grand axe se déplace dans la direction de la chaîne du tissu. Ce résultat est aussi prévisible, puisque le cisaillement tend toujours, en particulier dans le cas d'un tissu équilibré, à orienter le grand axe de l'ellipse d'écoulement dans la direction de la bissectrice entre la chaîne et la trame du tissu. Une analyse plus fine

étudie le comportement des perméabilités effectives en fonction de l'angle de cisaillement. L'analyse est réalisée sur les mesures au taux de fibres initial $Vf_0 = 45,7\%$. Le comportement en fonction du taux de fibres est illustré aux Figures 2.17 à 2.19 par rapport à celui du tissu non-cisaillé dans les trois directions (chaîne, 45° et la trame). Ce dernier a été obtenu à partir de l'équation (1.16) et a été présenté à la Figure 1.10.

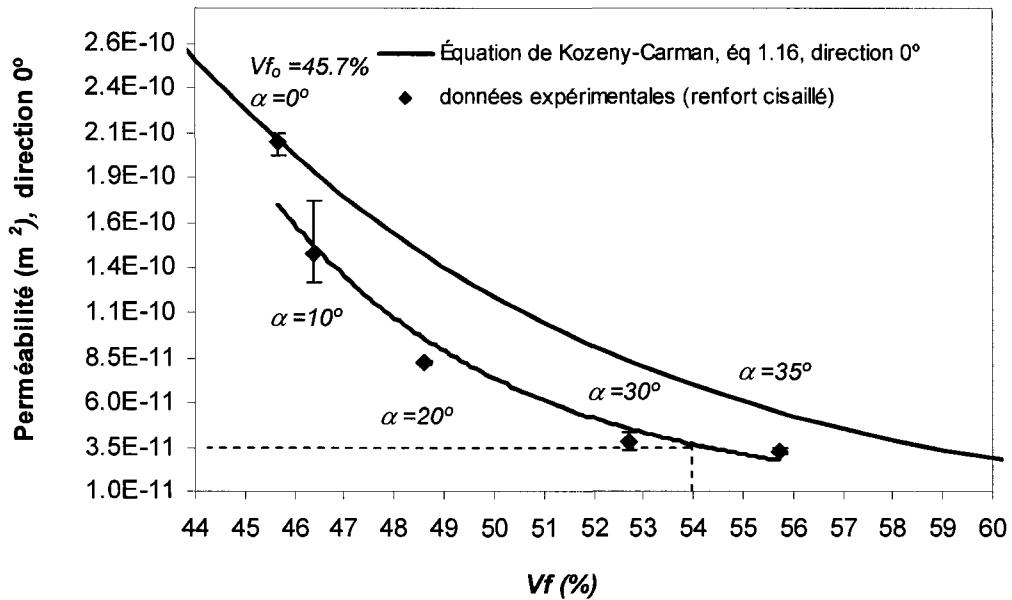


Figure 2.17 Permeabilités effectives dans la direction 0° pour les tissus non-cisaillé et cisaillé (taux de fibres initial est $45,7\%$).

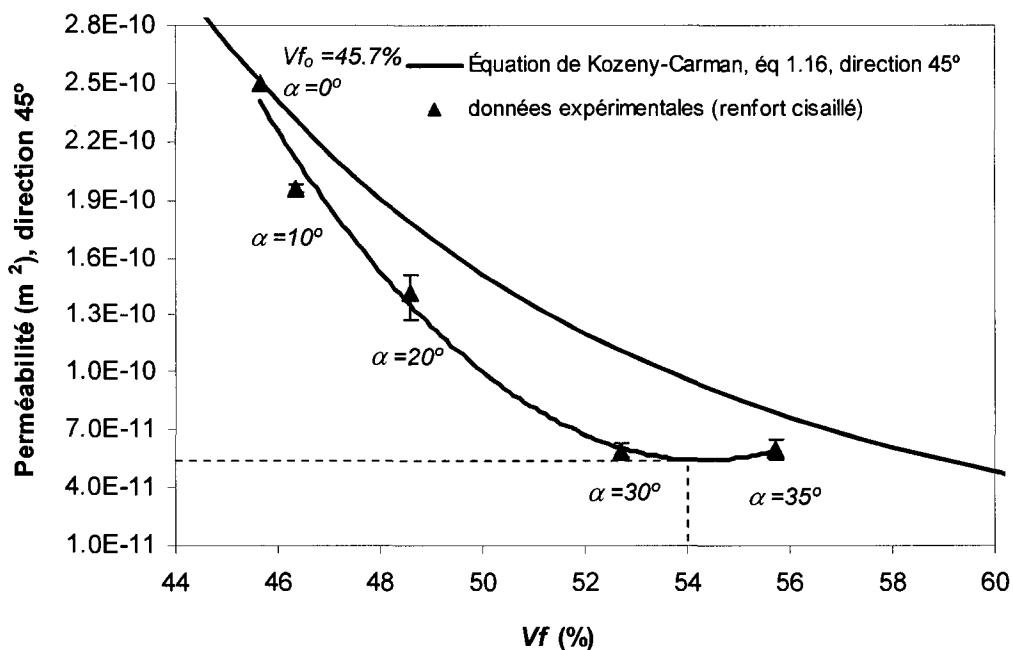


Figure 2.18 Perméabilités effectives dans la direction 45° pour les tissus non-cisaillé et cisaillé (taux de fibres initial 45,7%).

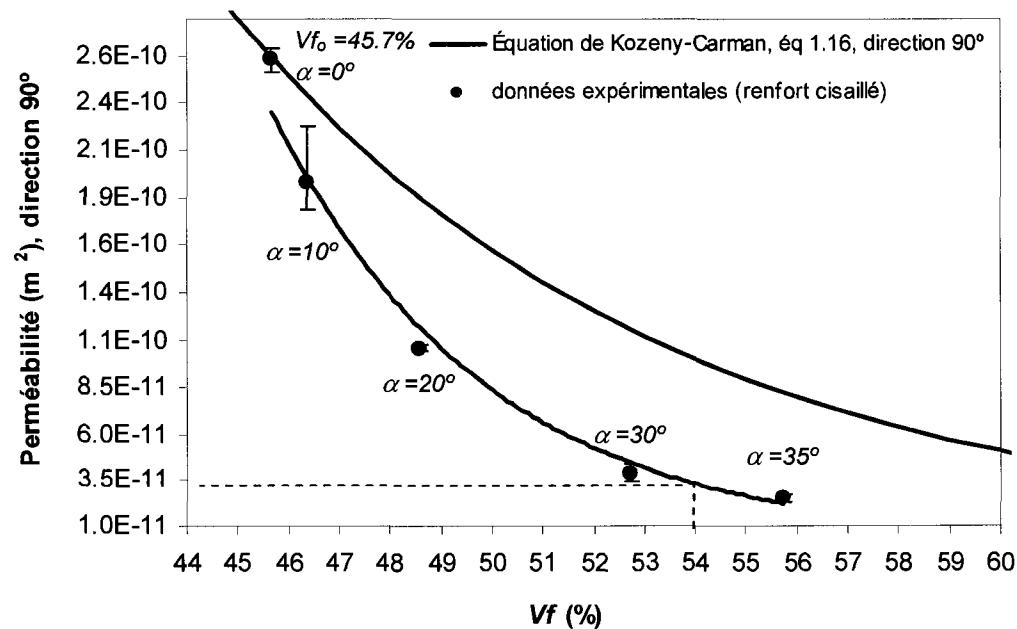


Figure 2.19 Perméabilités effectives dans la direction 90° pour les tissus non-cisaillé et cisaillé (taux de fibres initial 45,7%).

En observant les figures précédentes, deux phénomènes peuvent être observés. En premier lieu, il existe une claire évidence que la perméabilité n'est pas affectée seulement par l'augmentation du taux de fibres, mais aussi par la déformation de la géométrie du tissu produit par réorientation des fibres après cisaillement. En fait, le taux de fibres initial $Vf_o = 45,7\%$ augmente à $Vf_\alpha = 48,6\%$ par exemple pour une déformation $\alpha = 20^\circ$. La perméabilité du tissu non-cisaillé trouvée au chapitre précédent correspondant à ce taux de fibres, c'est-à-dire $Vf = 48,6\%$, reste plus importante que celle mesurée pour le tissu cisaillé. Ceci peut être vérifié dans les trois directions de mesure. En d'autres termes, la perméabilité du tissu cisaillé est toujours plus faible à taux de fibres égal que celle du tissu non-cisaillé.

Un deuxième phénomène est relié au comportement présenté dans chaque direction mesurée. Dans les directions à 0° et 90° la perméabilité décroît quand l'angle de cisaillement augmente, mais dans la direction à 45° la perméabilité connaît un léger incrément après une déformation de 30° (voir Figure 2.18). Ceci peut être expliqué en analysant la rotation d'une ellipse quelconque centrée au point $(0, 0)$ (voir Figure 1.5). Si les longueurs des rayons de l'ellipse selon les trois directions sont tracées en fonction de l'angle de rotation β comme représenté à la Figure 2.20, certains comportements intéressants peuvent être observés. Pour $Vf_o = 45,7\%$ et $\alpha = 0^\circ$, l'orientation du front elliptique β est égale à $72,2^\circ$ (voir tableau 1.7). Après une déformation d'un angle $\alpha = 35^\circ$, la direction principale d'écoulement est orientée à $37,7^\circ$ tel que donné au Tableau

2.5. En observant la Figure 2.20, pour un angle d'écoulement entre $37.7^\circ < \beta < 72^\circ$ les directions 0° et 90° présentent un comportement inverse. En fait, les coordonnées dans la direction 0° décroissent doucement et d'une façon pratiquement linéaire. Par contre, dans la direction à 90° , le comportement présente une pente plus prononcée. Mais dans les deux directions, les pentes ne changent pas de signe. Dans le cas à 45° , les coordonnées montrent un maximum pour $\beta = 45^\circ$. Si la relation entre β et α est considérée linéaire, cette valeur maximum correspond à $\alpha = 31^\circ$.

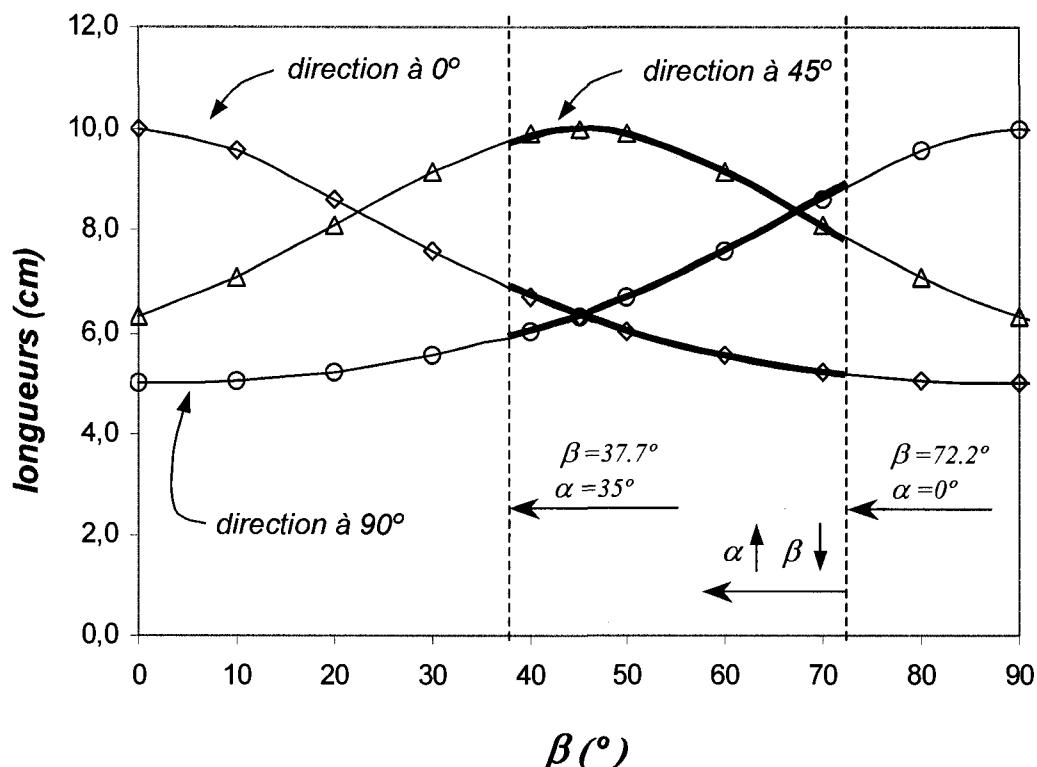


Figure 2.20 Évolution des coordonnées d'une ellipse arbitraire selon les directions 0° , 45° et 90° avec les demi-axes majeur $a = 100$ mm et mineur $b = 50$ mm.

D'après la Figure 2.18, la perméabilité la plus faible dans la direction à 45° se trouve à peu près pour un taux de fibres $Vf \approx 54\%$, ce qui veut dire que $\alpha = \cos^{-1}(45.7/54) \approx 32^\circ$. De plus, les coordonnées dans les directions 0° et 90° pour $\beta = 45^\circ$ sont presque les mêmes. Ceci vient corroborer les valeurs de perméabilités données par les courbes de tendance des mesures dans les deux directions pour un taux de fibres $Vf \approx 54\%$, soit $K_{eff}^{0^\circ} \approx K_{eff}^{90^\circ} \approx 3.25e-11 \text{ m}^2$ (voir Figures 2.17 et 2.19). Cet accord peut expliquer le comportement particulier de la perméabilité dans la direction 45° et aussi la rotation de l'ellipse de perméabilité suivant le cisaillement imposé au tissu.

Les valeurs des perméabilités principales K_1 et K_2 obtenues à partir des mesures expérimentales sont affichées dans les Figures 2.21 et 2.22 en fonction de l'angle de cisaillement. Ces valeurs sont interpolées par des courbes de tendance classiques avec le logiciel MS Excel. Les deux perméabilités principales diminuent quand l'angle de cisaillement augmente. La perméabilité principale diminue pratiquement de façon linéaire en exhibant une valeur plus grande pour $\alpha = 35^\circ$ que pour $\alpha = 30^\circ$. À cet angle, c'est-à-dire pour $30^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$, la perméabilité K_1 est largement influencée par la perméabilité effective selon la direction 45° . En effet, pour $\alpha = 30^\circ$, la direction principale d'écoulement est orientée presque à 45° . Dans ce cas, la perméabilité principale K_1 et la perméabilité effective selon la direction 45° deviennent à peu près identiques (voir Figures 2.18 et 2.21). La perméabilité principale mineure K_2 montre une diminution exponentielle plus régulière. L'évolution du rapport des perméabilités

principales, c'est-à-dire le degré d'anisotropie, est illustrée dans la Figure 2.22. L'angle d'écoulement principal β est donné à la Figure 2.23 en fonction de l'angle de cisaillement α . Le comportement suit bien une tendance logarithmique. Il faut noter qu'une variation importante de K_1 pour $\alpha > 30^\circ$ n'affecte pas l'évolution de l'angle β comme dans le cas du degré d'anisotropie K_1/K_2 . En général, ces valeurs de perméabilités principales sont bien représentées par des courbes de tendance classiques. La bonne corrélation de résultats peut être attribuée à l'absence du phénomène de plissement de fibres, la réduction au minimum des sources d'erreurs possibles et le soin apporté dans la réalisation de chaque mesure.

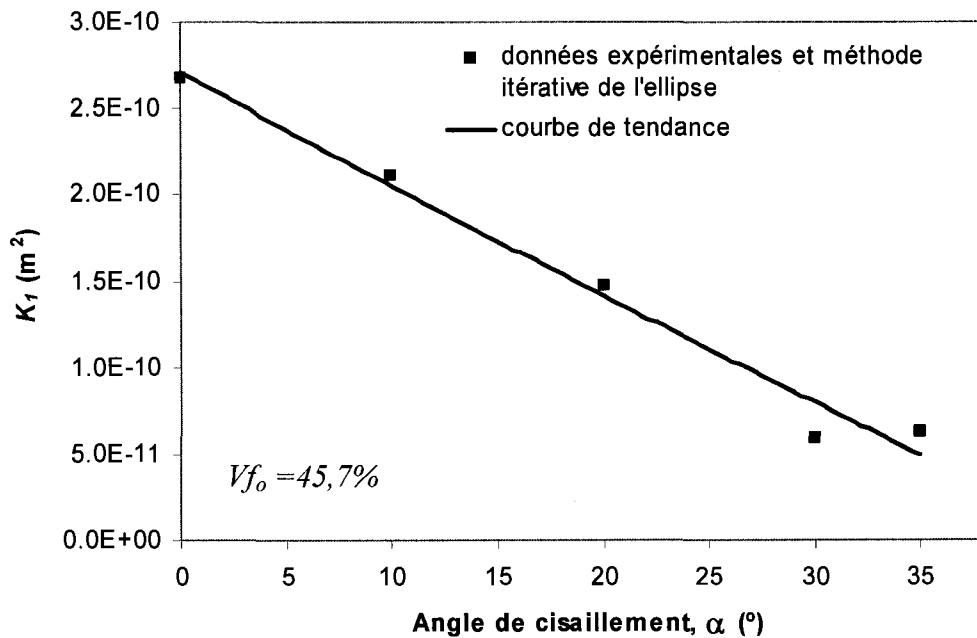


Figure 2.21 Perméabilité principale majeure en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres $Vf_o = 45,7\%$.

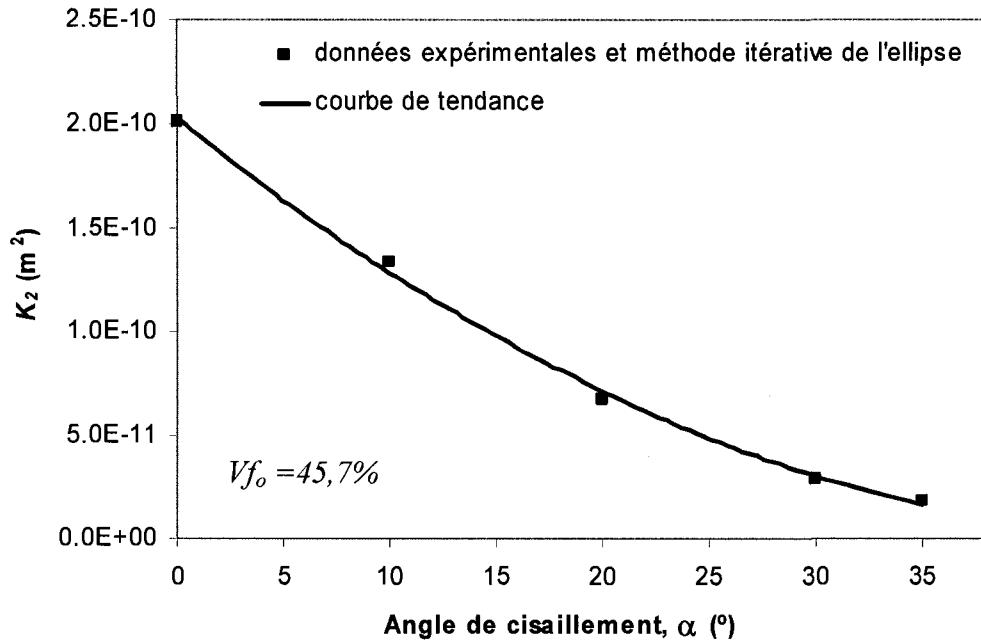


Figure 2.22 Perméabilité principale mineure en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres $Vf_o = 45,7\%$.

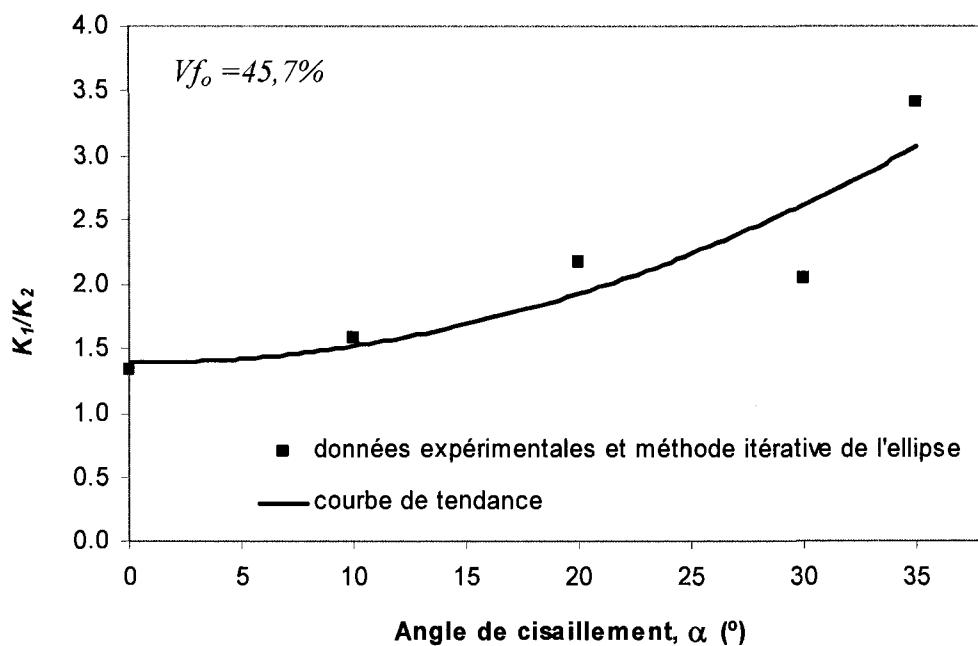


Figure 2.23 Rapport des perméabilités principales en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres $Vf_o = 45,7\%$.

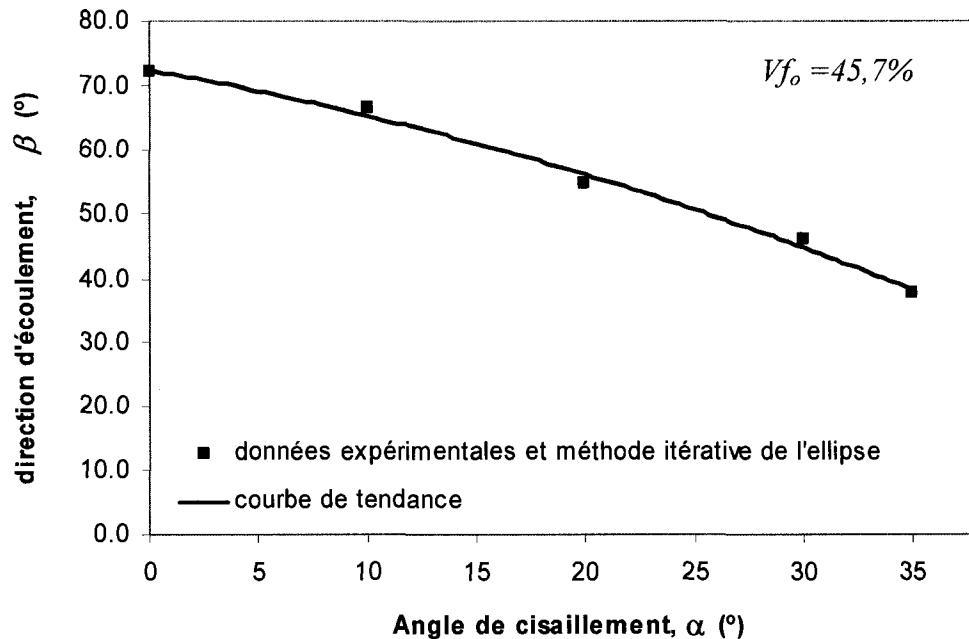


Figure 2.24 Évolution de l'angle d'écoulement en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres $Vf_o = 45,7\%$.

Finalement, la Figure 2.25 montre une bonne prédition du front du fluide à partir des perméabilités principales et de leurs orientations tel que décrit précédemment. Il faut remarquer que dans le cas d'un front incliné à cause du cisaillement des échantillons, les passages du front ont été enregistrés au centre de l'échantillon. Différentes inclinaisons du front ont été observées selon la direction mesurée et l'angle de cisaillement imposé à l'échantillon, ce qui démontre la dépendance de la perméabilité par rapport à l'orientation des fibres.

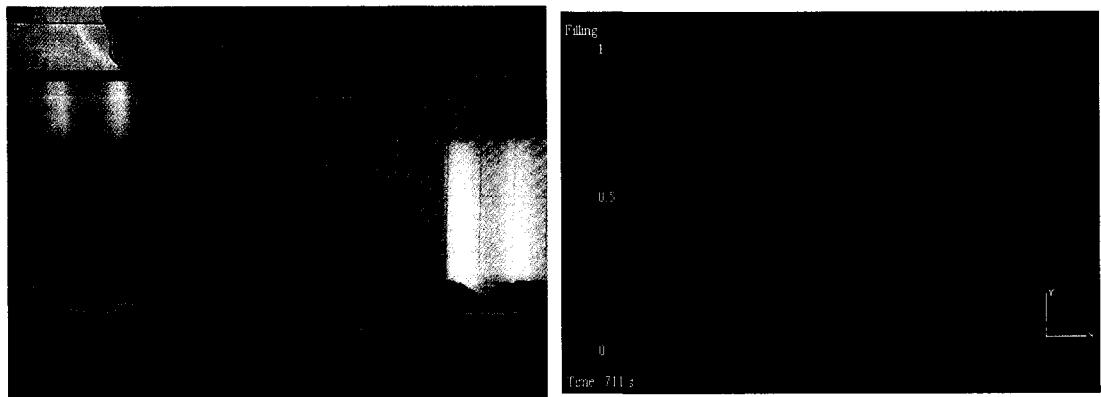


Figure 2.25 Image du front d'écoulement pendant une mesure effectuée selon la chaîne pour une déformation de 20° .

CHAPITRE 3

PRÉDICTION DE LA PERMÉABILITÉ DE TISSUS CISAILLÉS

3.1. Introduction

La forte évolution et la popularité des matériaux composites à matrice polymère ont conduit plusieurs universités et entreprises à développer des logiciels capables de simuler les procédés de fabrication. Grâce aux progrès technologiques des ordinateurs, les simulations numériques sont devenues une pratique quotidienne pour les ingénieurs.

Au sujet du procédé de moulage par transfert de résine, le code numérique pour prédire le remplissage de la cavité du moule est fondé sur le principe de conservation de la masse et la loi de Darcy. Cette dernière loi établit que la vitesse macroscopique du flux de résine est proportionnelle au gradient de pression d'injection. Le coefficient de proportionnalité est une propriété du renfort, la perméabilité divisée par la viscosité du fluide. Une bonne connaissance de la perméabilité permettra d'assurer la qualité et la fiabilité des simulations numériques.

Le but de ce chapitre est la prédiction de la perméabilité des tissus déformés en cisaillement afin de réduire le nombre des essais de caractérisation requis. Un modèle semi-empirique est présenté, qui est ensuite appliqué aux simulations numériques.

3.2. Revue bibliographique

Plusieurs approches pour prédire les perméabilités principales planaires de tissus déformés ont été proposées en connaissant la perméabilité du tissu non-déformé [15, 26-27, 29, 35-38]. Ueda et Gutowski [27] ont présenté un modèle simple fondé sur l'orientation des « *crimp channels* ». Ces canaux sont formés par l'entrelacement des fibres dans les directions de la trame et la chaîne au-dessus et au-dessous du renfort. En d'autres termes, le tissu est modélisé par une pile de deux couches indépendantes ayant chacune les axes principaux du flux orientés selon les directions parallèle et perpendiculaire aux canaux de la couche au-dessus et de la couche au-dessous. Le modèle ne requiert qu'une seule mesure de perméabilité bidirectionnelle à partir de laquelle la perméabilité est prédite pour un angle de cisaillement quelconque. Leurs résultats ont montré une bonne corrélation avec les mesures expérimentales jusqu'à un angle de cisaillement égal à 20°. Pour des déformations plus grandes, les résultats divergent. Rudd et al. [35] et Heardman et al. [26] ont considéré un tissu bidirectionnel constitué d'un ensemble de couches de fibres unidirectionnelles, dans lequel chaque couche possède une perméabilité majeure et mineure. Les auteurs ont analysé séparément les deux facteurs qui affectent la perméabilité des tissus sous déformation, c'est-à-dire la variation locale du taux de fibres et la réorientation des fibres. Rudd et al. [35] utilisèrent une loi de puissance pour représenter les perméabilités principales en fonction du taux de fibres. L'effet de cisaillement a été considéré par la rotation de chaque couche unidirectionnelle dans la pile pendant le drapage. Dans le travail de Heardman et al. [26], le taux de fibres a été pris en compte au moyen de l'équation de

Kozeny-Carman (voir équation 1.15). L'effet de la réorientation des fibres est établi en utilisant un système de coordonnées commun pour l'ensemble des couches. Ils ont posé l'hypothèse que certains paramètres de la relation de Kozeny-Carman restent constants dans une petite plage de taux de fibres. De même, la perméabilité dans la direction parallèle aux fibres était vingt fois plus haute que dans la direction perpendiculaire. Le modèle était recommandé pour des tissus isotropes dans l'état non-déformé. Simacek et Advani [37] divisèrent le milieu poreux en deux sous-domaines : les fibres et les interstices ou macro-pores. Le flux dans les canaux ouverts entre les fibres (macro-pores) est modélisé par l'équation de Navier-Stokes, tandis que la loi de Darcy gouverne l'écoulement à l'intérieur des fibres (micro-pores). Les équations sont résolues sur une cellule unitaire déformée pour différents angles de cisaillement. Les résultats sont ainsi interpolés pour obtenir le tenseur de perméabilité locale pour une déformation quelconque. Les essais de perméabilité ont été effectués pour un renfort tissé et équilibré pour différents angles de cisaillement jusqu'à 30°. Leurs prédictions montrèrent une tendance plus faible par rapport aux données expérimentales. Ceci a été attribué à la difficulté de trouver un modèle géométrique approprié pour représenter le tissu. Lai et al. [29] ont proposé un modèle fondé sur l'hypothèse que la tangente au front du flux dans la direction de la chaîne reste parallèle à la trame après cisaillement. Ce modèle était valide seulement dans le cas où la direction d'écoulement principale serait alignée selon la chaîne ou la trame, c'est-à-dire quand l'angle de la direction principale d'écoulement β défini aux chapitres précédents est 0° ou 90°. Puisque cette hypothèse

n'est pas valide pour les renforts tissés, un facteur correctif dépendant de la structure géométrique du tissu doit être déterminé de façon expérimentale.

D'autres chercheurs ont fondé leurs modèles sur l'étude d'une cellule unitaire [36, 38]. Slade et al. [36] examinèrent le flux d'écoulement à travers les renforts déformés pour déterminer le changement dans la direction d'écoulement et la variation du degré d'anisotropie. Leur modèle numérique était fondé sur la déformation d'une cellule unitaire idéale pour décrire l'écoulement dans le milieu poreux. En revanche, Endruweit [38] propose une approche phénoménologique pour estimer les perméabilités principales de tissus déformés en fonction de la géométrie du tissu et des perméabilités principales du tissu non-déformé. En premier lieu, un facteur de conversion reliant la porosité du tissu déformé par rapport à celle du tissu non-déformé est défini. Ensuite, le modèle est formulé en combinant l'équation de Kozeny-Carman dans les deux cas du tissu non-déformé et déformé. Une extension de ce modèle pour les renforts anisotropes dans l'état non-déformé est aussi présentée par Endruweit et Ermanni [39]. Dans ce travail, le modèle présenté suit l'approche proposée par Chan et Hwang [15], où une transformation des coordonnées circulaires dans un système de référence elliptique est utilisée pour obtenir les perméabilités principales. En conclusion, une revue de la littérature montre que la perméabilité principale mineure K_2 diminue presque toujours pour un tissu cisaillé. En revanche, la perméabilité principale majeure K_1 présente un comportement plus complexe. Quand un renfort est soumis à de petites déformations,

certains auteurs rapportent une augmentation de K_l [26, 37-39] et d'autres une diminution [29, 40].

3.3. Modèle de prédiction des perméabilités principales d'un tissu déformé

Aucun modèle analytique ne semble prédire d'une façon fiable la perméabilité planaire de tissus déformés pour tous les types de renforcements. Différentes techniques fondées sur les « *crimp channels* » [27], multicouches unidirectionnels [26, 41], déformation de la cellule unitaire [15, 38] et l'analyse géométrique de l'ellipse ont été décrites dans la littérature. Il existe assez d'évidences montrant que la perméabilité n'est pas affectée seulement par la variation du taux de fibres, mais aussi par la réorientation des fibres dans le plan du laminé et en dehors de ce plan. Les Figures 3.1 et 3.2 montrent les résultats des perméabilités principales K_l et K_2 pour le tissu de carbone déformé à différents angles de cisaillement en fonction du taux de fibres. A partir d'un taux de fibres initial $Vf_0 = 45.7\%$, les perméabilités principales pour le renfort cisaillé illustrent un comportement légèrement plus faible que celui du tissu non-cisaillé. Donc, la perméabilité semble être affectée par les deux facteurs discutés auparavant.

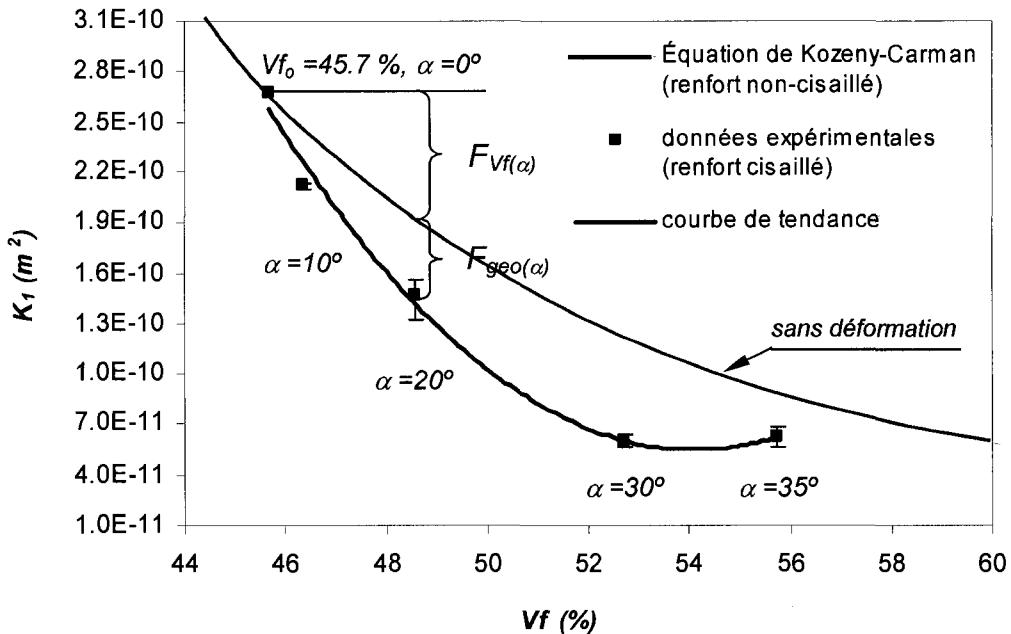


Figure 3.1 Perméabilité principale K_1 du tissu cisaillé pour un taux de fibres initial $Vf_0 = 45,7\%$. La perméabilité est affectée au moins par deux facteurs : un changement géométrique dénoté $F_{geo}(\alpha)$ et une variation du taux de fibres $F_{Vf}(\alpha)$.

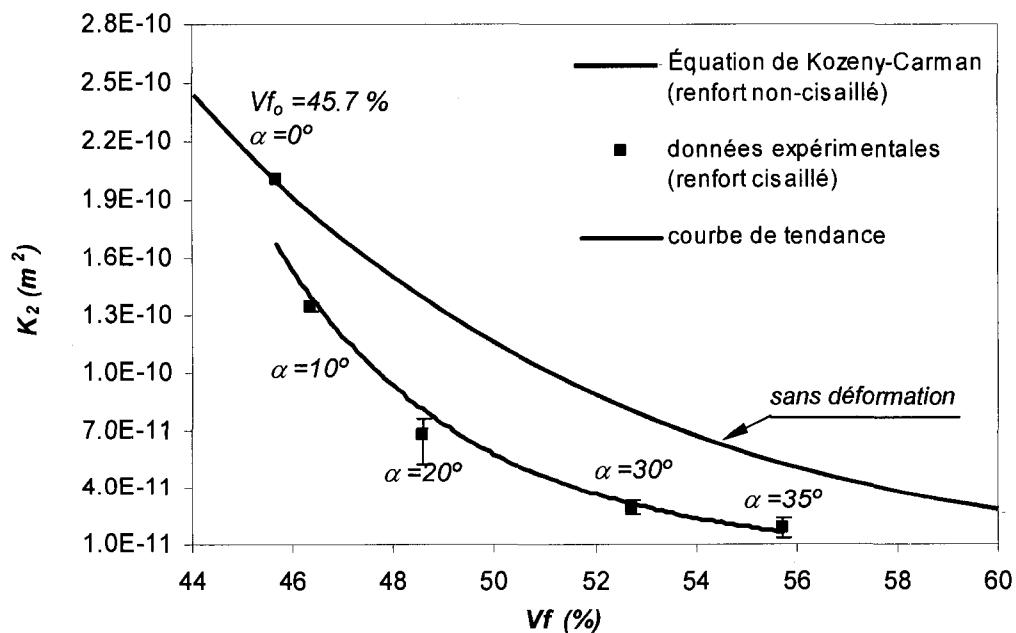


Figure 3.2 Perméabilité principale K_2 du tissu cisaillé pour un taux de fibres initial $Vf_0 = 45,7\%$.

La perméabilité du renfort cisaillé peut ainsi être modélisée à partir de la perméabilité du matériau non-déformé et de deux facteurs de correction. Le premier facteur noté $F_{Vf(\alpha)}$ représente la variation du taux de fibres local après cisaillement. Le deuxième facteur $F_{geo(\alpha)}$ tient compte de la réorientation des fibres, donc dépend de la géométrie du tissu cisaillé. Les perméabilités du tissu cisaillé selon les directions principales d'écoulement peuvent donc s'exprimer sous la forme :

$$K_{1,2}(\alpha) = K_{1,2}(\alpha = 0^\circ) F_{Vf}(\alpha) F_{geo}(\alpha) \quad (3.1)$$

où les indices 1 et 2 représentent les directions principales majeure et mineure respectivement et $K_{1,2}(\alpha=0^\circ)$ est la perméabilité du tissu non-cisaillé dans les deux directions principales. Tel que proposé par les auteurs dans [38, 41], le terme $K_{1,2}(\alpha=0^\circ)$ peut être modélisé en fonction du taux de fibres par la relation de Kozeny-Carman comme suit :

$$K_{1,2}(\alpha = 0^\circ) = \frac{rf^2}{4k} \frac{(1 - Vf_o)^3}{(Vf_o)^2} \quad (3.2)$$

où Vf_o représente le taux de fibres initial, c'est-à-dire sans cisaillement. De la même façon, l'équation de Kozeny-Carman peut être utilisée pour décrire le changement de la perméabilité en fonction du taux de fibres du matériau déformé :

$$K_{1,2}(\alpha = 0^\circ) F_{Vf(\alpha)} = \frac{rf^2}{4k} \frac{(1-Vf(\alpha))^3}{(Vf(\alpha))^2} \quad (3.3)$$

Il est raisonnable de supposer que le terme $rf^2/4k$ reste constant pendant la déformation puisque la plage de variation des taux de fibres de Vf_o à $Vf(\alpha)$ est relativement petite. Tel qu'introduit au chapitre 2, le taux de fibres $Vf(\alpha)$ est lié au taux initial Vf_o par le cosinus de l'angle de cisaillement :

$$Vf(\alpha) = \frac{Vf_o}{\cos \alpha} \quad (3.4)$$

le taux de fibres augmente avec le cisaillement. En portant l'expression (3.4) dans (3.3) et par combinaison avec (3.2), l'équation suivante est obtenue :

$$K_{1,2}(\alpha = 0^\circ) F_{Vf(\alpha)} = \frac{K_{1,2}(\alpha = 0^\circ)}{\cos \alpha} \left(\frac{\cos \alpha - Vf_o}{1 - Vf_o} \right)^3 \quad (3.5)$$

qui donne les perméabilités principales du tissu cisaillé en considérant seulement la variation du taux de fibres. Finalement, le facteur correctif $F_{Vf(\alpha)}$ dû à la variation du taux de fibres s'écrit comme suit :

$$F_{Vf(\alpha)} = \frac{1}{\cos \alpha} \left(\frac{\cos \alpha - Vf_o}{1 - Vf_o} \right)^3 \quad (3.6)$$

Tel que discuté par Endruweit [38], une cellule unitaire déformée peut être considérée pour tenir compte de la réorientation des fibres après cisaillement. D'après la Figure 2.25 du chapitre 2, la perméabilité dépend de l'orientation de fibres, c'est-à-dire de la réorientation des fibres après déformation par cisaillement. Pour cette raison, une cellule unitaire anisotrope est proposée pour analyser les variations géométriques dans les directions principales de l'écoulement. La Figure 3.3 montre une cellule unitaire du tissu sous une déformation de α degrés, mais conservant le même degré d'anisotropie au taux de fibres considéré. Autrement dit, les dimensions de la cellule unitaire a et b sont liées au degré d'anisotropie de perméabilité obtenue pour le tissu non-cisaillé.

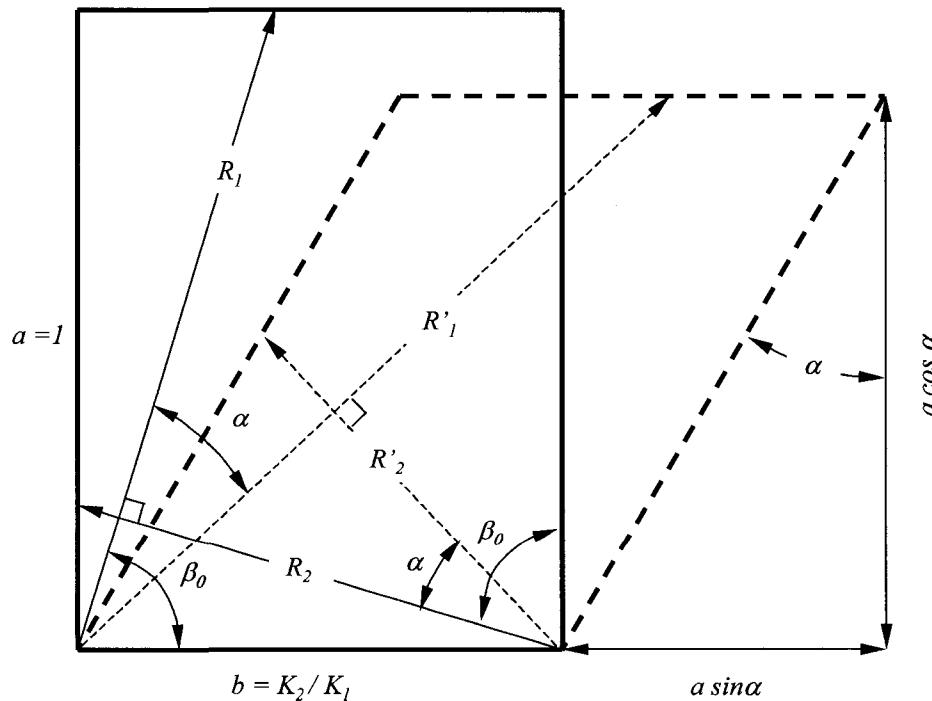


Figure 3.3 Déformation d'une cellule unitaire après un cisaillement de α degrés.

Les vecteurs R_1 et R_2 représentent les demi-axes majeur et mineur du front d'écoulement elliptique dans la cellule unitaire non-déformée. Les axes R_1 et R_2 sont orientés à des angles β_o et $\beta_o + 90^\circ$ respectivement par rapport à la chaîne; ces paramètres sont donc reliés à chaque côté de la cellule unitaire par les expressions suivantes :

$$R_1 = \frac{a}{\cos(90 - \beta_o)}, \quad R_2 = \frac{b}{\cos(90 - \beta_o)} \quad (3.7)$$

où a et b dénotent les longueurs des arêtes de la cellule unitaire, et β_o est l'angle formé entre le grand axe de l'ellipse d'écoulement et la chaîne pour le tissu non-cisaillé. Si la cellule est déformée par un angle de cisaillement de α degrés, R_1 et R_2 deviennent :

$$R'_1 = R_1 + \Delta R_1 = \frac{a \cos \alpha}{\sin(\beta_o - \alpha)}, \quad R'_2 = R_2 - \Delta R_2 = \frac{b \sin(90 - \alpha)}{\sin \beta_o} \quad (3.8)$$

En portant les expressions (3.7) dans (3.8), les variations des vecteurs R_1 et R_2 peuvent être exprimées comme :

$$\Delta R_1 = \frac{a \cos \alpha}{\sin(\beta_o - \alpha)} - \frac{a}{\cos(90 - \beta_o)}, \quad \Delta R_2 = \frac{b}{\cos(90 - \beta_o)} - \frac{b \sin(90 - \alpha)}{\sin \beta_o} \quad (3.9)$$

Quand la cellule unitaire est ainsi déformée, la première direction principale augmente virtuellement par le facteur ΔR_1 , tandis que la seconde direction décroît de ΔR_2 . Dans le cas d'une cellule unitaire normalisée, c'est-à-dire pour un renfort isotrope quand il n'est pas déformé, $R_1 = R_2 = 1$. Les nouvelles directions deviennent donc respectivement $R'_1 = 1 + \Delta R_1$ et $R'_2 = 1 - \Delta R_2$. Le facteur correctif $F_{geo(\alpha)}$ de la perméabilité du tissu cisaillé est supposé décroître proportionnellement à la réduction de l'aire de la cellule unitaire. Donc, $F_{geo(\alpha)}$ peut être obtenue comme suit à partir de la relation des variations des vecteurs R'_1 et R'_2 :

$$F_{geo(\alpha)} = \frac{R'_2}{R'_1} = \frac{1 - \Delta R_2}{1 + \Delta R_1} = \frac{1 - \frac{b}{\cos(90 - \beta_o)} + \frac{b \sin(90 - \alpha)}{\sin \beta_o}}{1 + \frac{\alpha \cos \alpha}{\sin(\beta_o - \alpha)} - \frac{\alpha}{\cos(90 - \beta_o)}} \quad (3.10)$$

A partir des résultats des perméabilités principales obtenus en fonction de l'angle de cisaillement, il est trouvé que les perméabilités K_1 et K_2 cisaillées varient différemment par rapport à ses valeurs non-cisaillées. Bien qu'il n'y ait pas de dérivation mathématique, la variation de la perméabilité principale mineure K_2 en fonction du degré de déformation a été trouvée près du carré de celle de la perméabilité principale majeure. Etant donné que les perméabilités principales sont affectées également par l'augmentation du taux de fibres qui résulte de la déformation par cisaillement, cette différence observée peut être attribuée au facteur géométrique. Ainsi, la direction

principale majeure est affectée directement par le facteur $F_{geo(\alpha)}$, tandis que la seconde direction principale doit être corrigée par le carré du facteur $F_{geo(\alpha)}$. En d'autres termes, la perméabilité dans la direction principale majeure est affectée proportionnellement à la déformation de la cellule unitaire. En revanche, la perméabilité dans la direction principale mineure est modifiée par le carré de cette déformation. Tel que discuté au chapitre 1, la racine carrée de la perméabilité effective suit une ellipse (voir Bear [16]). Donc, le carré du facteur correctif $F_{geo(\alpha)}$ devrait être utilisé pour obtenir la perméabilité à partir de ces considérations géométriques. D'autre part, la racine carrée de la perméabilité dans une direction quelconque est égale au rayon géométrique de l'ellipse dans cette direction. Donc, les rayons géométriques dans les directions principales peuvent être écrits sous la forme :

$$\sqrt{K_1} = a F_{geo(\alpha)}, \quad \sqrt{K_2} = b F_{geo(\alpha)} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} F_{geo(\alpha)} = 1 \text{ pour} \\ \text{le tissu non-} \\ \text{cisaillé} \end{array} \quad (3.11)$$

où K_1 et K_2 sont les perméabilités principales, et a, b sont les rayons majeur et mineur du front elliptique d'écoulement. Par conséquent, si les rayons principaux de l'ellipse sont transformées par un facteur $F_{geo(\alpha)}$ pendant la déformation, la perméabilité est affectée comme suit :

$$K_1 = (a F_{geo(\alpha)})^2, \quad K_2 = (b F_{geo(\alpha)})^2 \quad (3.12)$$

Finalement, l'équation (3.1) peut s'exprimer pour chaque perméabilité principale sous la forme :

$$K_1(\alpha) = \frac{K_1(\alpha = 0^\circ)}{\cos \alpha} \left(\frac{\cos \alpha - Vf_o}{1 - Vf_o} \right)^3 \left(\frac{1 - \Delta R_2}{1 + \Delta R_1} \right)^2 \quad (3.13)$$

$$K_2(\alpha) = \frac{K_2(\alpha = 0^\circ)}{\cos \alpha} \left(\frac{\cos \alpha - Vf_o}{1 - Vf_o} \right)^3 \left(\frac{1 - \Delta R_2}{1 + \Delta R_1} \right)^4$$

Les équations (3.13) donnent ainsi les perméabilités majeure et mineure d'un tissu déformé en fonction des perméabilités principales du tissu non-déformé, du taux de fibres initial Vf_o et de l'angle de cisaillement α .

3.4. Prédiction de l'angle d'écoulement β

Différentes approches pour prédire la réorientation du front elliptique après déformation par cisaillement peuvent être trouvées dans la littérature. Dans les travaux de Heardman et al. [26] et de Ueda et Gutowski [27], l'orientation des axes principaux de perméabilité est décrite en fonction de la perméabilité des tissus déformés. Lai et Young [29] proposèrent une approche fondée sur le rapport des perméabilités principales du tissu non-déformé, plus un paramètre inconnu à déterminer à partir de l'interpolation de valeurs expérimentales. Endruweit et Ermanni [39] présentèrent une formule empirique qui dépend des perméabilités principales du matériau non-déformé et de l'angle de cisaillement.

L'approche proposée dans ce travail est fondée sur la réorientation géométrique des fibres après cisaillement. En fait, il a été noté que la direction du front dépend fortement de la déformation de la cellule unitaire. La Figure 3.4 illustre la géométrie de la structure du tissu de carbone étudié dans ce travail. Elle montre l'orientation à 45° des canaux formés par l'entrelacement des fibres orthogonales, appelés « *crimp channels* » par Ueda et Gutowski [27]. Après cisaillement du tissu d'un certain angle, par exemple $\alpha=10^\circ$, ces canaux et la diagonale à 45° de la cellule unitaire déformée sont cisaillés par un angle $\alpha/2$. Un nouveau système de coordonnées est donc proposé selon les directions 0° , $45^\circ - \alpha/2$ et $90^\circ - \alpha$. Si le tissu est cisaillé par rotation des fibres selon la trame, le front elliptique tournerait dans la même direction que les fibres. Pendant l'opération de cisaillement, une bonne correspondance a été observée entre la structure géométrique du tissu (chaîne, trame et direction des canaux) et une cellule unitaire (0° , 90° et diagonale principale).

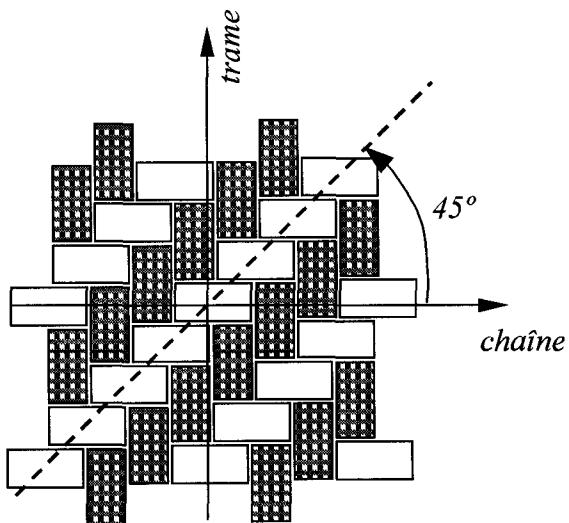


Figure 3.4 Géométrie de la structure du tissu le G986 d'Hexcel Fabrics.

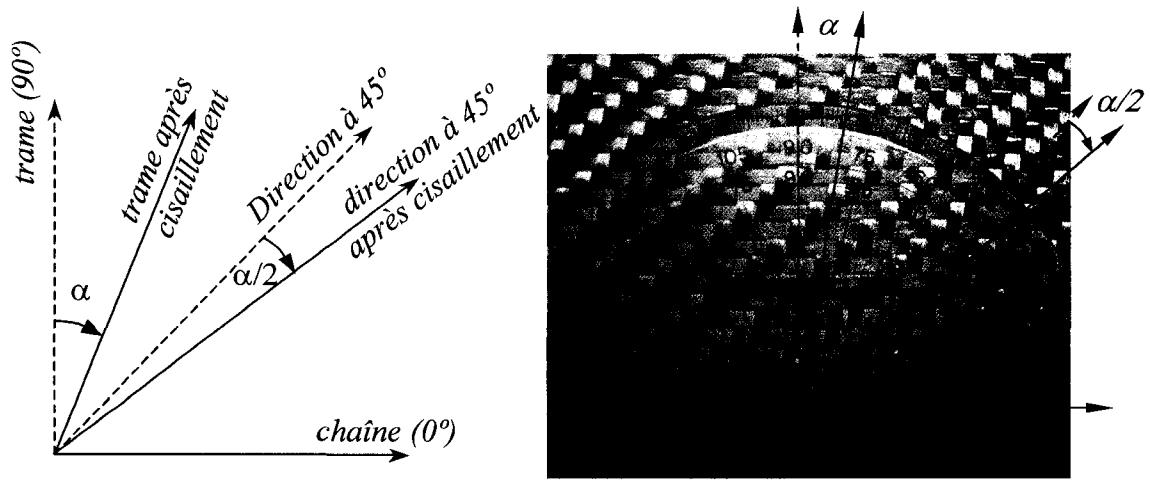


Figure 3.5 Définition d'un nouveau système de coordonnées pour le tissu déformé.

Au chapitre 1, la perméabilité effective du matériau non-déformé a été modélisée en fonction du taux de fibres dans les directions 0° , 45° et 90° . En considérant la rotation des axes pendant le cisaillement, le taux de fibres du modèle de perméabilité peut être corrigé par le facteur correctif $(\cos\alpha)^{-1}$ (voir équation (1.16)). La perméabilité effective s'exprimée alors dans les nouvelles directions comme suit :

$$K_{\text{eff}}^j = \left(C_1^j \left(\frac{Vf_o}{\cos\alpha} \right)^2 + C_2^j \frac{Vf_o}{\cos\alpha} + C_3^j \right) \frac{\left(1 - \frac{Vf_o}{\cos\alpha} \right)^3}{\left(\frac{Vf_o}{\cos\alpha} \right)^2}; \text{ avec } j = 0^\circ, 45^\circ - \frac{\alpha}{2} \text{ et } 90^\circ - \alpha \quad (3.14)$$

où C_1^i , C_2^i et C_3^i sont les coefficients du polynôme décrivant le terme $r_f^2/4k$ pour les directions $i = 0^\circ$, 45° et 90° . De cette façon, la perméabilité effective dans la direction

$90-\alpha$ est décomposée maintenant dans les directions 90° et 0° par multiplication par les facteurs $\cos\alpha$ et $\sin\alpha$, respectivement. De la même façon, la perméabilité effective dans la direction $45^\circ - \alpha/2$ est décomposée et multipliée par les facteurs $\cos(\alpha/2)$ et $\sin(\alpha/2)$ dans les directions 90° et 0° . Bref, les coordonnées de la perméabilité effective dans la direction j peuvent être obtenues sous la forme:

$$\begin{aligned} K_{eff,x}^{0^\circ} &= K_{eff}^{0^\circ} & ; & \quad K_{eff,y}^{0^\circ} = 0 \\ K_{eff,x}^{45^\circ-\alpha/2} &= K_{eff}^{45^\circ-\alpha/2} \sin(\alpha/2) & ; & \quad K_{eff,y}^{45^\circ-\alpha/2} = K_{eff}^{45^\circ-\alpha/2} \cos(\alpha/2) \quad (3.15) \\ K_{eff,x}^{90^\circ-\alpha} &= K_{eff}^{90^\circ-\alpha} \sin\alpha & ; & \quad K_{eff,y}^{90^\circ-\alpha} = K_{eff}^{90^\circ-\alpha} \cos\alpha \end{aligned}$$

où $K_{eff}^{0^\circ}$, $K_{eff}^{45^\circ-\alpha/2}$ et $K_{eff}^{90^\circ-\alpha}$ dénotent les perméabilités effectives dans les directions 0° , $45^\circ - \alpha/2$ et $90^\circ - \alpha$ ainsi obtenues par l'équation (3.14). Donc l'équation (1.8) du chapitre 1 peut être réécrite en utilisant les coordonnées de la perméabilité effective données par l'équation (3.15) pour un angle de cisaillement α quelconque. Avec les trois équations ainsi modifiées pour un angle donné, le système à trois inconnues équivaut à celui du chapitre 1 devient :

$$[M][b] = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

où

$$[M] = \begin{bmatrix} K_{eff,x}^{0^\circ} \cos^2 \beta & K_{eff,x}^{0^\circ} \sin^2 \beta & 0 \\ K_{eff,x}^{45^\circ-\alpha/2} \cos^2 \beta + K_{eff,y}^{45^\circ-\alpha/2} \sin^2 \beta & K_{eff,x}^{45^\circ-\alpha/2} \sin^2 \beta + K_{eff,y}^{45^\circ-\alpha/2} \cos^2 \beta & \sqrt{K_{eff,x}^{45^\circ-\alpha/2} K_{eff,y}^{45^\circ-\alpha/2}} \sin 2\beta \\ K_{eff,x}^{90^\circ-\alpha} \cos^2 \beta + K_{eff,y}^{90^\circ-\alpha} \sin^2 \beta & K_{eff,x}^{90^\circ-\alpha} \sin^2 \beta + K_{eff,y}^{90^\circ-\alpha} \cos^2 \beta & 0 \end{bmatrix}$$

et

$$[b] = \begin{bmatrix} \frac{1}{K_1} \\ \frac{1}{K_2} \\ \frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1} \end{bmatrix}$$

La résolution itérative du système (3.16) permet d'estimer la nouvelle orientation β du front d'écoulement.

Une solution alternative est aussi proposée pour prédire la direction principale d'écoulement. Bien qu'il n'y ait pas de dérivation mathématique, une formule empirique peut être déduite à partir des valeurs expérimentales pour décrire l'angle d'écoulement β :

$$\beta(\alpha) = (\beta_o)^{\cos^2\left(\frac{2}{3}\alpha\right)} \quad (3.17)$$

Finalement, les perméabilités principales étant données par l'équation (3.13) et l'orientation du front d'écoulement connue soit par l'équation (3.16) ou (3.17), les

perméabilités effectives selon les directions 0° , 45° et 90° peuvent être déduites au moyen des équations proposées par Weitzenböck et al. [17] pour un angle de cisaillement α par une rotation du tenseur de perméabilité (3.18) :

$$K_{\text{eff}}^{0^\circ}(\alpha) = \frac{K_1(\alpha)K_2(\alpha)}{K_2(\alpha)\cos^2(\beta(\alpha)) + K_1(\alpha)\sin^2(\beta(\alpha))}$$

$$K_{\text{eff}}^{45^\circ}(\alpha) = \frac{K_1(\alpha)K_2(\alpha)}{K_1(\alpha)\cos^2(\beta(\alpha) + 45^\circ) + K_2(\alpha)\sin^2(\beta(\alpha) + 45^\circ)} \quad (3.18)$$

$$K_{\text{eff}}^{90^\circ}(\alpha) = \frac{K_1(\alpha)K_2(\alpha)}{K_2(\alpha)\cos^2(\beta(\alpha) + 90^\circ) + K_1(\alpha)\sin^2(\beta(\alpha) + 90^\circ)}$$

où $K_1(\alpha)$ et $K_2(\alpha)$ sont les perméabilités principales dans le plan du matériau et $\beta(\alpha)$ représente l'orientation du front d'écoulement en fonction de l'angle de cisaillement.

3.5. Discussion des résultats

L'approche présentée ci-dessus requiert une caractérisation de la perméabilité planaire du matériau non-déformé. Étant fondé sur le changement du taux de fibres et la réorientation des fibres après une déformation par cisaillement, le modèle doit prédire en principe les perméabilités principales planaires jusqu'à l'angle géométrique de blocage ou « *locking angle* », c'est-à-dire l'angle pour lequel deux fibres adjacentes selon la

trame ou la chaîne se touchent entre elles. Cette condition est imposée afin d'éviter le plissement des fibres. Les Figures 3.6 à 3.8 montrent les valeurs prédictes pour $K_1(\alpha)$ et $K_2(\alpha)$ dans le cas du tissu mesuré. Les perméabilités pour les trois taux de fibres considérés ont été mesurées sous déformation et les résultats sont reportés dans les Figures 3.6, 3.7 et 3.8 respectivement en fonction de l'angle de cisaillement. En général, il existe une bonne corrélation entre les perméabilités mesurées et les valeurs prédictes quel que soit le taux de fibres considéré.

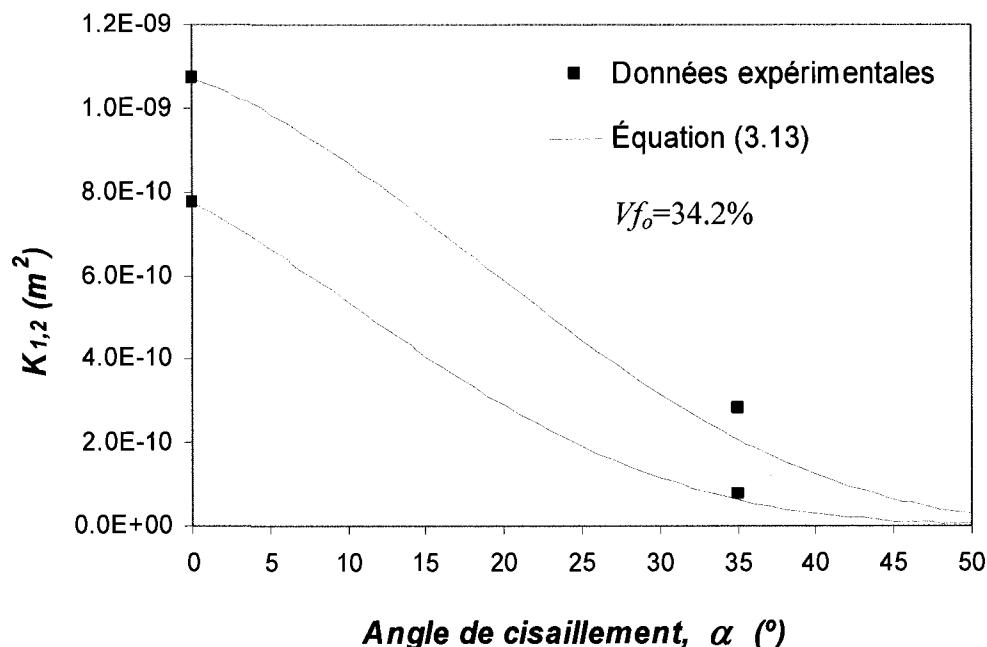


Figure 3.6 Perméabilités principales prédictes en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres non-cisaillé $Vf_0 = 34.2\%$.

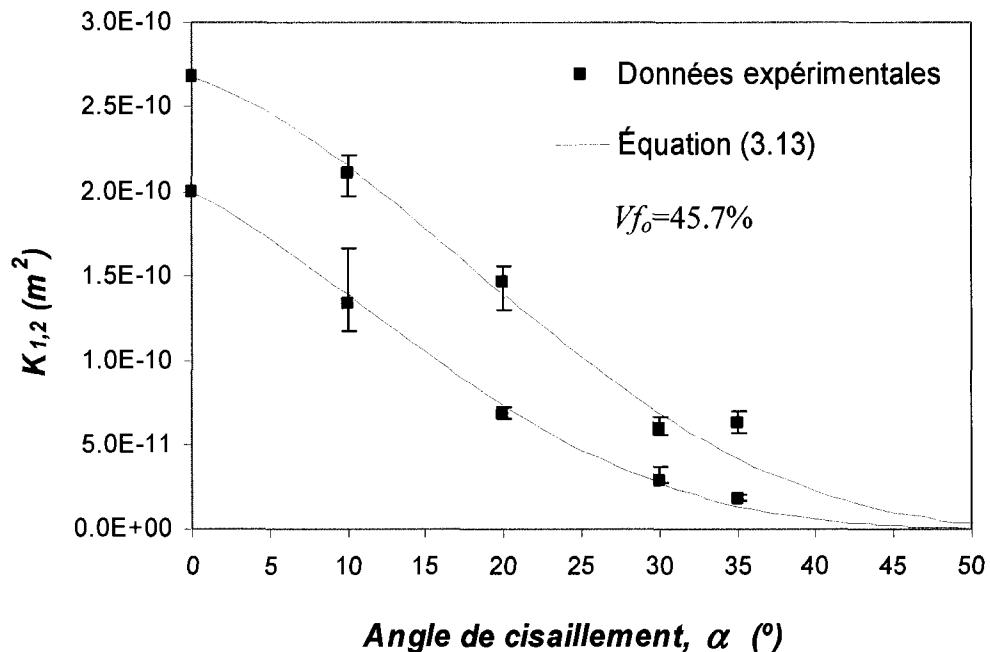


Figure 3.7 Perméabilités principales prédites en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres non-cisaillé $Vf_0 = 45.7\%$.

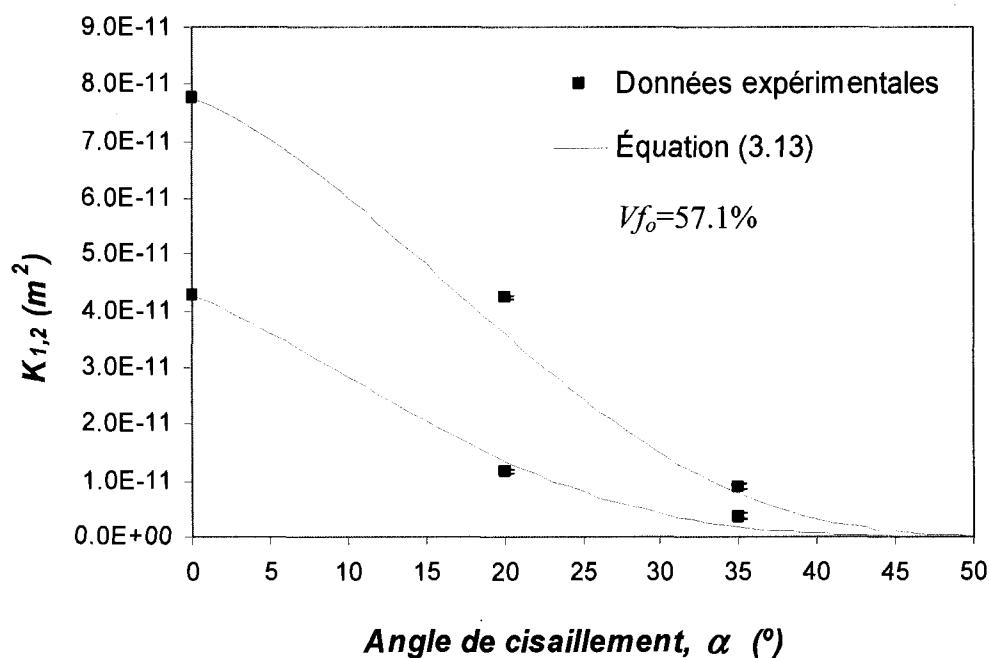


Figure 3.8 Perméabilités principales prédites en fonction de l'angle de cisaillement pour un taux de fibres non-cisaillé $Vf_0 = 57.1\%$.

La perméabilité dans les deux directions principales présente un comportement stable en décroissance. La diminution de K_2 par rapport à l'angle de cisaillement correspond bien à la majorité des travaux publiés. Dans le cas de la perméabilité principale K_1 , la littérature montre différents comportements, dont une croissance de K_1 pour de petits angles de déformation dans [26, 37-39] et une diminution continue par rapport à l'angle de cisaillement dans [29, 40]. Heardman et al. [26] attribuent cet incrément à l'orientation des fibres qui permet de considérer le flux de résine comme unidirectionnel. Un travail plus récent de Markus et Ulrich [40] sur la caractérisation de la perméabilité d'un tissu de carbone sous déformation a donné des résultats pour K_1 similaires à ceux de la présente étude. En fait, le tissu de carbone mesuré par les auteurs [40] possède des propriétés similaires à celui utilisé dans ce travail. Tel qu'illustré à la Figure 3.1, un léger incrément de K_1 a été observé quand le tissu est cisaillé à $\alpha = 35^\circ$. A ce niveau de déformation, la direction principale d'un flux radial est presque alignée à 45° , c'est-à-dire $\beta \approx 45^\circ$. Malheureusement, les résultats de Markus et Ulrich [40] ne montrent pas les valeurs expérimentales pour des déformations plus grandes que 30° , donc il n'est pas possible d'observer cette tendance. Les auteurs concluent que l'incrément du taux de fibres qui résulte du cisaillement ne semble pas jouer un rôle important sur la perméabilité. Par contre, pour le tissu de carbone mesuré dans ce travail, la variation du taux de fibres à cause du cisaillement joue un rôle critique reléguant l'effet de la réorientation de fibres à un deuxième plan. Ceci peut être observé clairement à la Figure 3.1. Une explication de ce comportement peut être donnée en introduisant les concepts de tissus fermés et ouverts.

Un tissu non-déformé est dénommé *fermé* quand il présente une structure géométrique où le rapport entre la distance entre deux fibres adjacentes et le rayon ou la largeur de celles-ci est relativement faible, de l'ordre de 0,2 et moins. Par contre, la structure géométrique d'un tissu *ouvert* présente des canaux plus larges entre les fibres. Quand un tissu fermé est cisallé, la perméabilité principale majeure semble être plus influencée par la variation du taux de fibres quand l'angle de cisaillement augmente. En réalité, les canaux entre les fibres tendent à se fermer pour des déformations plus faibles que pour les tissus ouverts. Une diminution continue de K_l pour les tissus fermés alors que l'effet de la réorientation de fibres devient plus significatif dans les structures ouvertes soumises à de petites déformations, ce qui explique l'augmentation de K_l à faibles degrés de déformation.

Étant fondé sur la structure géométrique de la cellule unitaire du tissu, le modèle peut prédire la réorientation du front d'écoulement à partir de considérations géométriques (voir Figure 3.5). La Figure 3.9 montre un exemple de la procédure pour un angle de cisaillement de 10°. Dans la Figure 3.9a, l'orientation principale du front est obtenue par ajustement d'une ellipse qui représente au mieux le front d'écoulement enregistré pendant une mesure bidirectionnelle. On trouve une orientation de l'axe majeur de cette ellipse à un angle $\beta = 68^\circ$ par rapport à la direction 0° de la chaîne du tissu. L'orientation du front prédicta par la méthode de l'ellipse est donnée à la Figure 3.9b. Un angle $\beta = 64.7^\circ$ est obtenu, ce qui est très voisin des observations expérimentales.

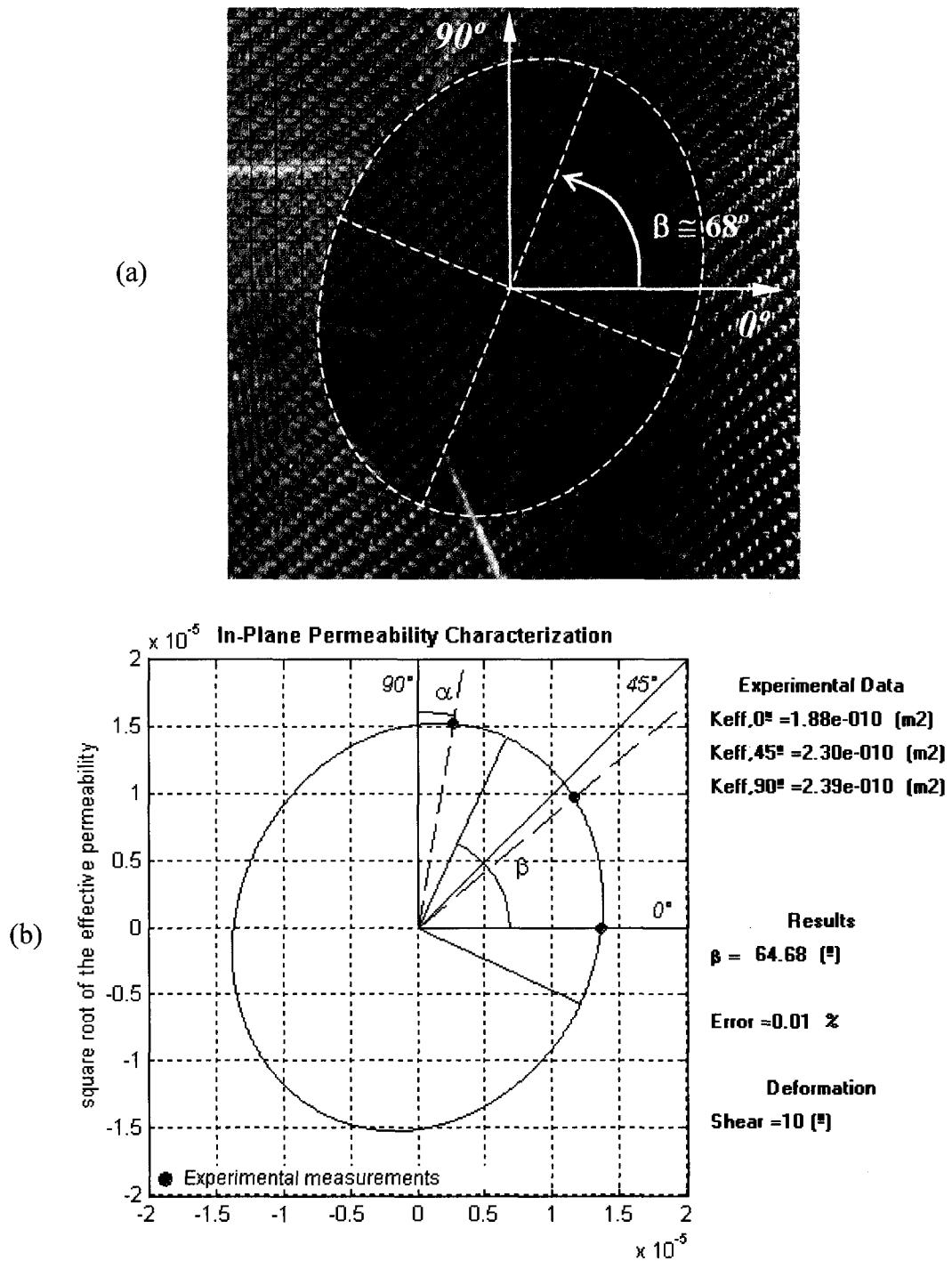


Figure 3.9 (a) Front d'écoulement observé pendant une injection radiale pour un angle de cisaillement $\alpha = 10^\circ$; (b) orientation du front d'écoulement prédicta $\beta = 65^\circ$.

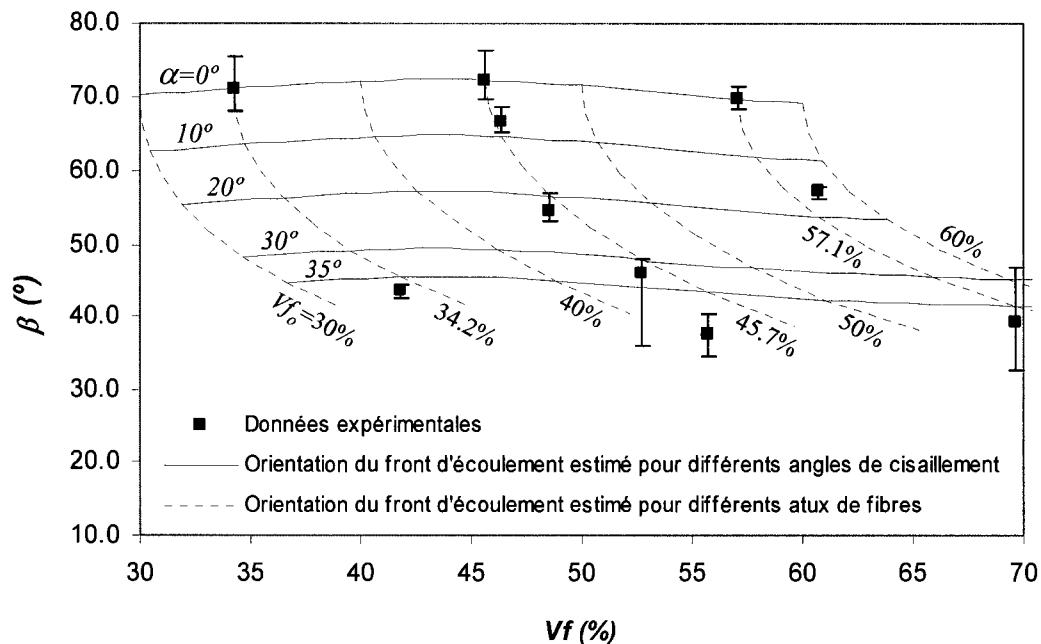


Figure 3.10 Grille des orientations du front d'écoulement en fonction de α et Vf_o .

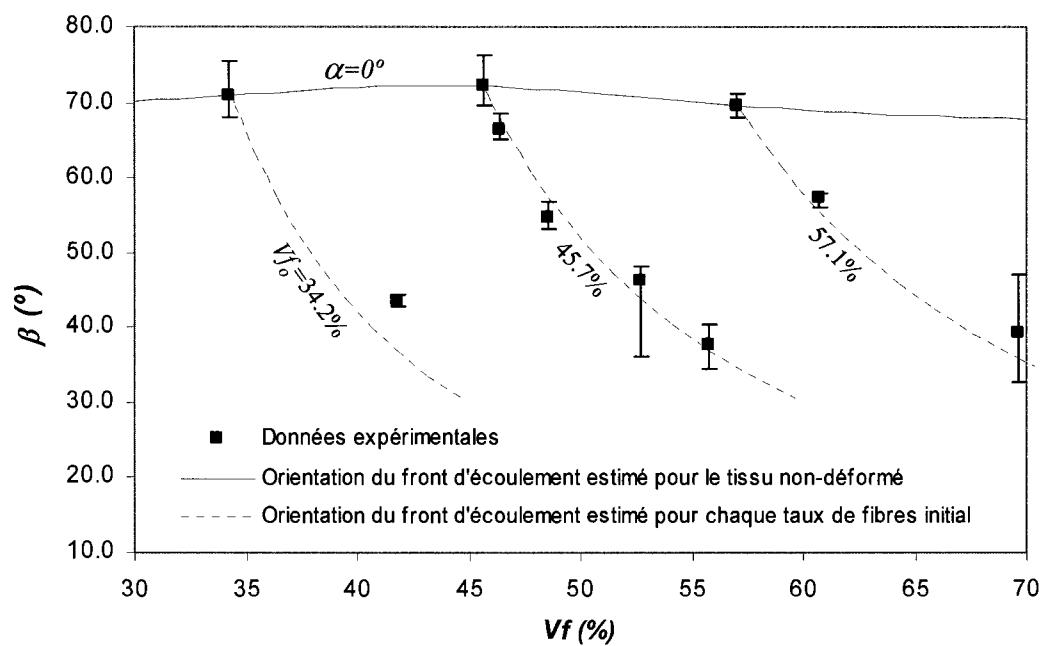


Figure 3.11 Orientations du front d'écoulement obtenues à partir de l'équation (3.17).

En dépit de quelques dispersions, les valeurs estimées montrent un bon comportement jusqu'à une déformation de 30° (voir Figure 3.10). Ce graphique à mode de carte permet, par exemple pour un taux de fibres initial et un degré de déformation donné, de retrouver l'orientation principale de l'écoulement elliptique. De plus, la Figure 3.11 montre que l'équation empirique (3.17) décrit bien les valeurs observées expérimentalement de l'orientation β de l'ellipse d'écoulement.

Ayant prédit les perméabilités principales K_1 , K_2 et l'orientation de la direction principale d'écoulement, il reste à modéliser la perméabilité effective selon les directions 0° , 45° et 90° exprimées par les équations (3.18). Les perméabilités effectives données aux Figures 3.12. à 3.14 en fonction du cisaillement montrent une bonne corrélation entre les valeurs expérimentales et prédictives.

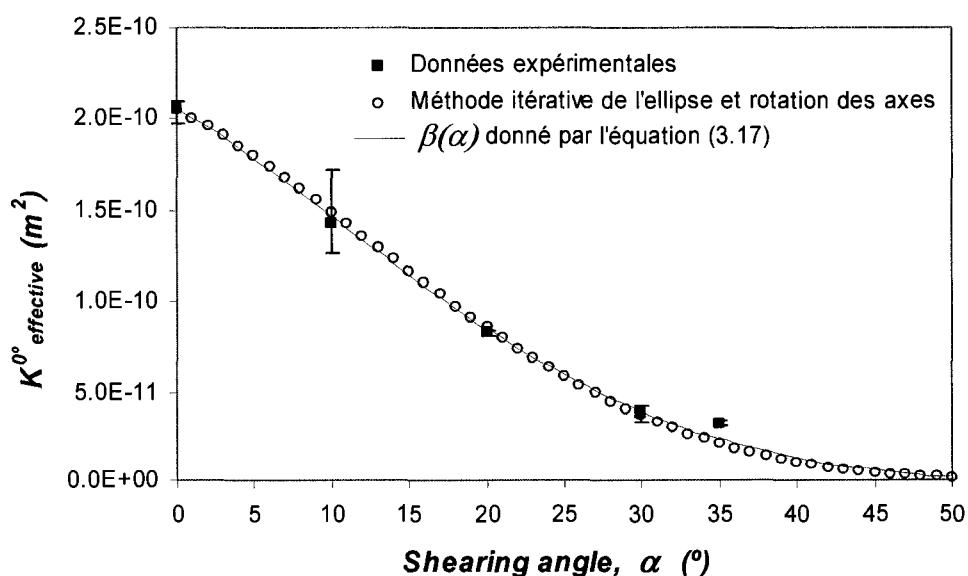


Figure 3.12 Perméabilités effectives mesurées et estimées dans la direction 0° ($Vf_o = 45.7\%$).

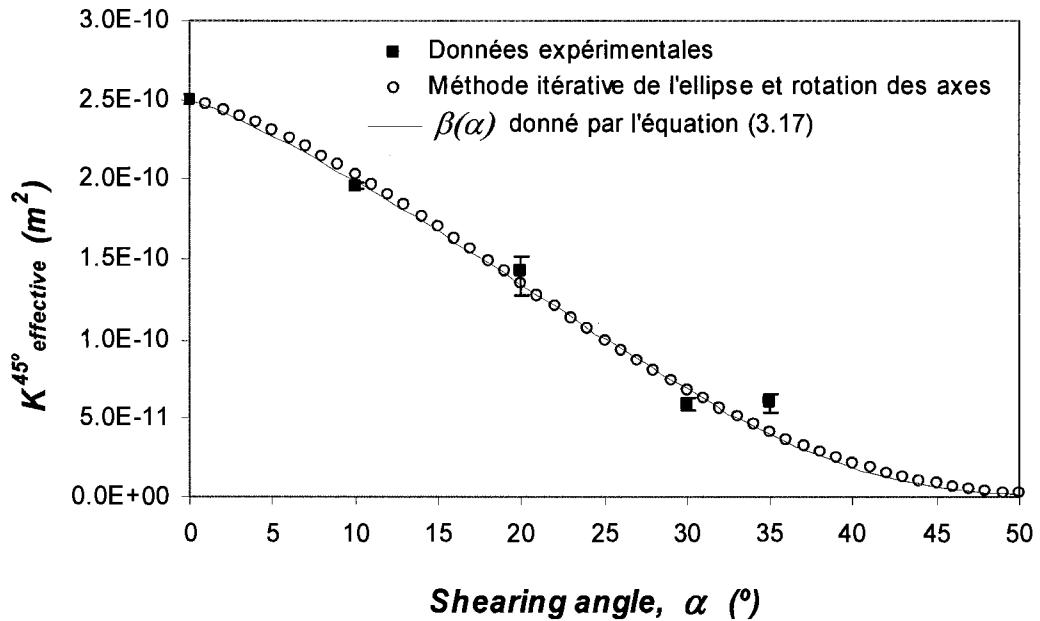


Figure 3.13 Perméabilités effectives mesurées et estimées dans la direction 45° ($Vf_o = 45.7\%$).

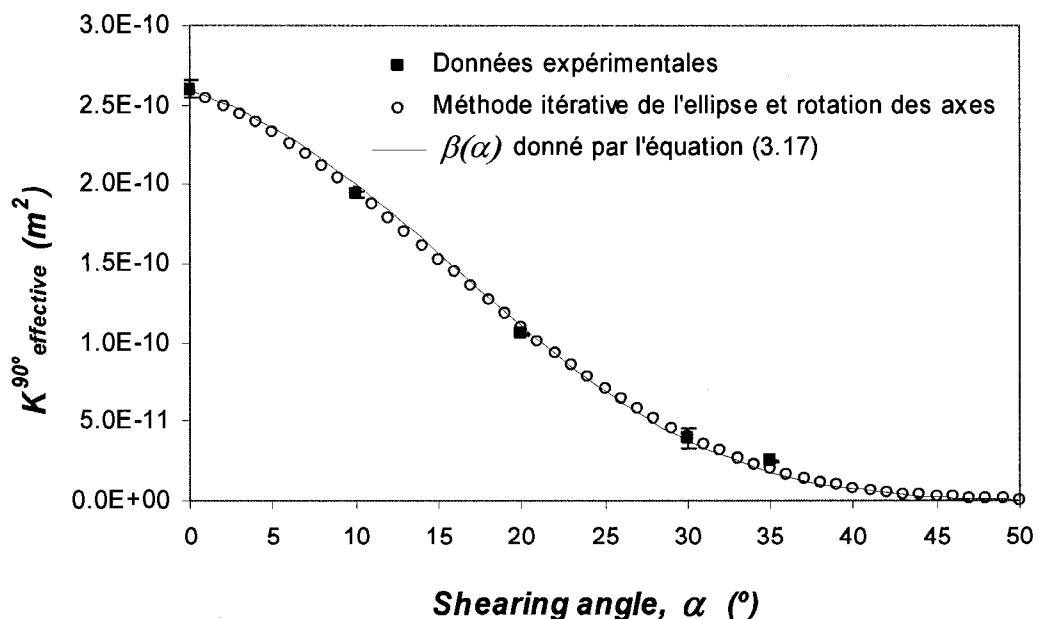


Figure 3.14 Perméabilités effectives mesurées et estimées dans la direction 90° ($Vf_o = 45.7\%$).

3.6. Applications dans les simulations numériques

La simulation numérique des procédés de moulage comme le RTM est devenue un outil essentiel pour l'ingénieur concepteur des moules d'injection. Quand un tissu tissé est drapé sur une surface complexe, la prédiction de l'orientation locale des fibres est très importante tant pour la simulation numérique que pour prédire les propriétés mécaniques du matériau composite. Plusieurs chercheurs ont étudié et analysé la réorientation de fibres qui résulte du drapage au moment de la mise en place du renfort et après la fermeture du moule. Une série d'algorithmes de drapage ont été mis au point dans les dernières années [42-46]. Généralement, les prédictions de drapage sont fondées sur les algorithmes « *fisherman's net* » ou « *mosaic type* », qui consistent fondamentalement à placer un réseau de fibres non-extensibles le long des lignes géodésiques d'une surface complexe [43].

Le but des simulations numériques présentées ici est de démontrer l'influence du drapage sur le remplissage de la cavité du moule. Les prédictions des orientations locales de fibres ont été simulées pour une pièce réelle au moyen du logiciel commercial Quik-Form et les simulations de remplissage ont été effectuées à l'aide du logiciel PamRTM, deux logiciels distribués par le groupe ESI-Group [1]. La pièce modélisée pour cette analyse est un garde-boue de camion de dimensions 1300 mm par 870 mm tel que montré à la Figure 3.15. Le renfort tissé a été drapé virtuellement au moyen de Quik-Form sur le maillage qui représente la surface du moule à partir d'un point de contact initial.

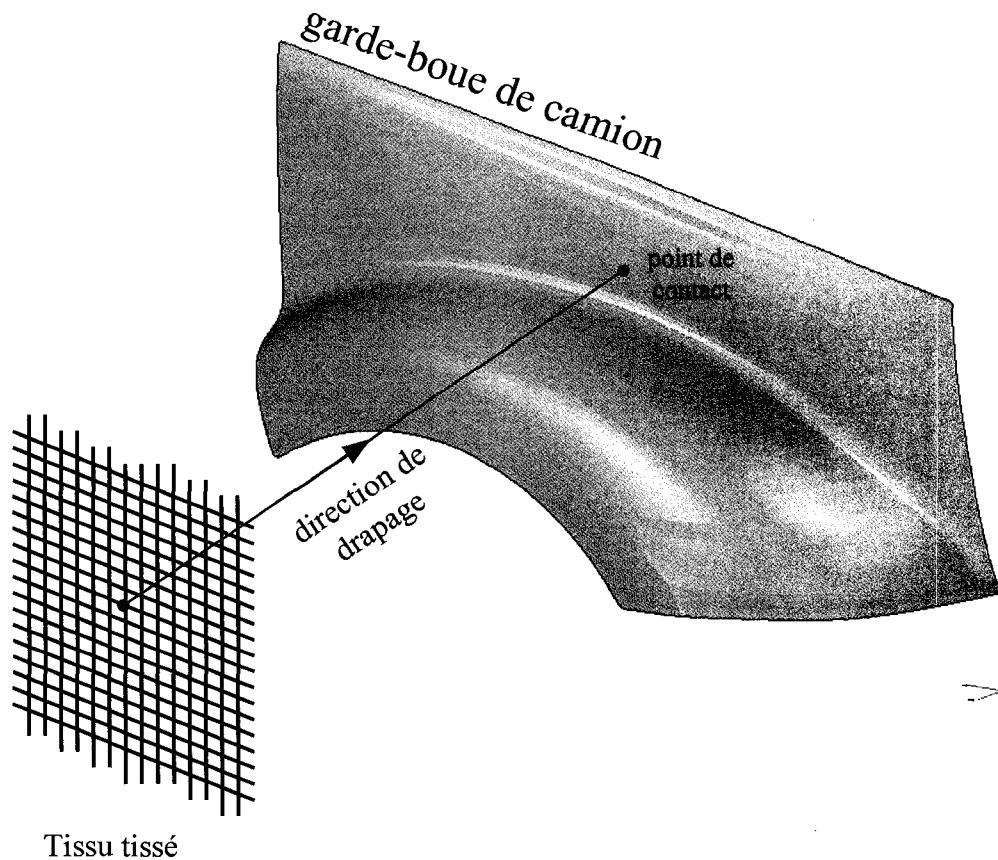


Figure 3.15 Pièce utilisée pour l'analyse des effets de drapage dans le remplissage du moule. Le renfort est placé sur la surface du moule comme l'illustre la flèche direction de drapage (volume de la pièce : $1.2 \times 0.8 \times 0.6 \text{ m}^3$).

Le maillage utilisé pour les simulations de drapage et de remplissage est montré à la Figure 3.16. Il contient 20841 éléments finis triangulaires à trois nœuds pour représenter convenablement la courbure de la pièce. Un port d'injection a été placé au centre de la pièce et cinq événements ont été modélisés dans les coins.

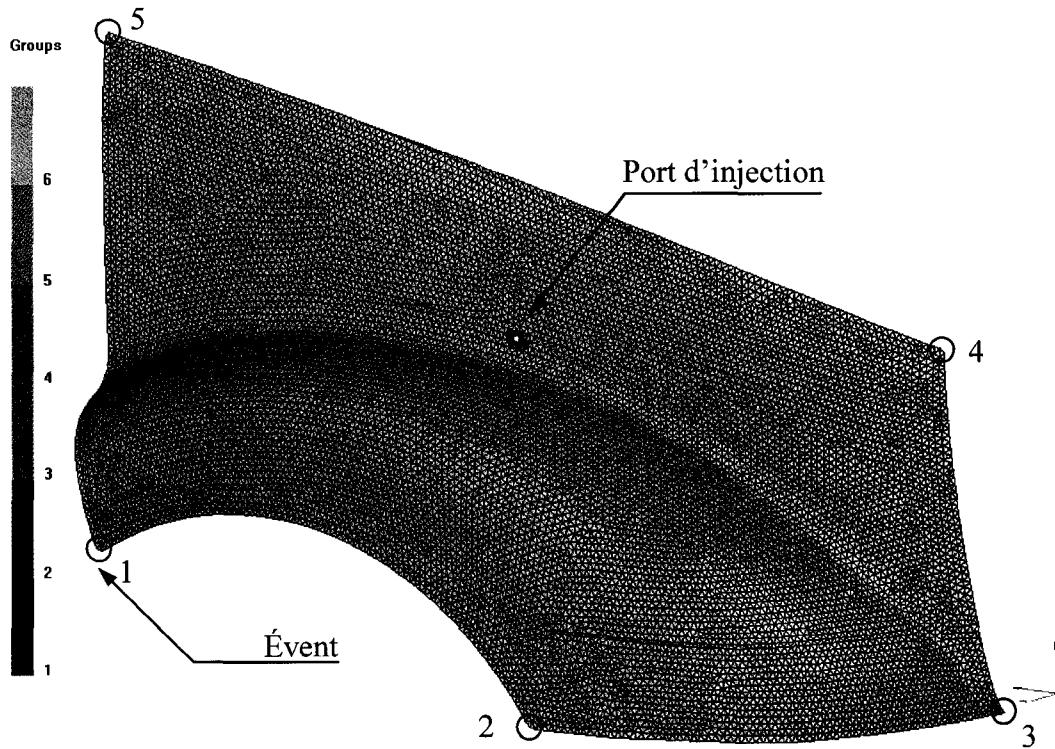


Figure 3.16 Modèle d'éléments finis utilisé pour les simulations de drapage et de remplissage du moule.

La première tâche avant de lancer la simulation de remplissage consiste à prédire les orientations locales des fibres après la mise au moule. Le modèle ou maillage de la pièce a été lu avec Quik-Form en introduisant les conditions frontières suivantes : (a) point de contact renfort-surface du moule est donné au centre de la pièce ; (b) orientations initiales de fibres au point de contact par rapport au système de coordonnées global, c'est-à-dire l'orientation de la chaîne par rapport à l'axe X et de la trame par rapport à l'axe Y. Le résultat de la simulation de drapage est donné à la Figure 3.17 montre que l'angle de cisaillement maximal prédict est 38° .

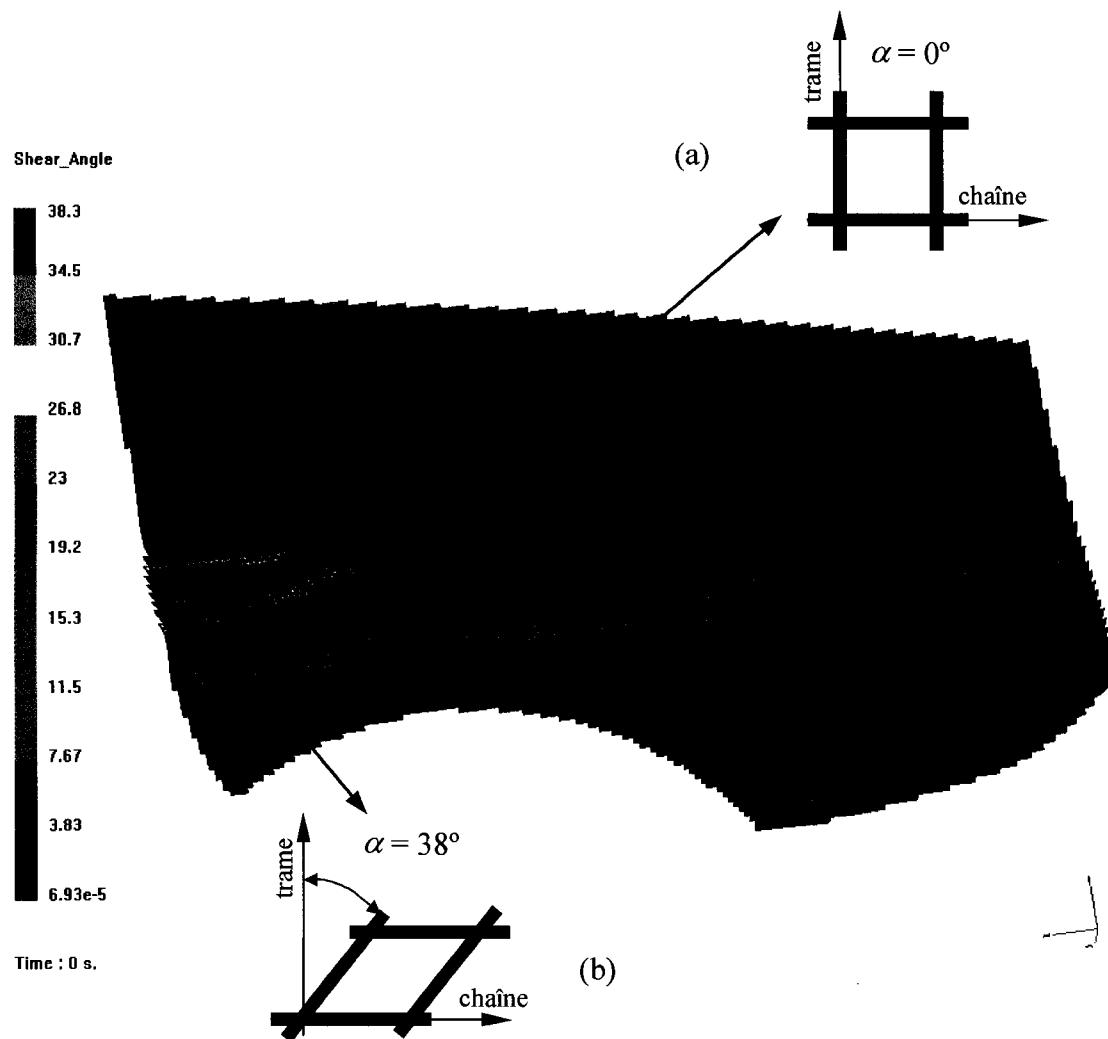


Figure 3.17 Résultats de l'analyse de drapage effectuée au moyen de Quik-Form.

A proximité du point de contact, l'angle de cisaillement prédict est 0° . En effet, cette zone ne montre pas de grandes courbures dans les deux directions, c'est-à-dire selon la chaîne et la trame. Par contre, un angle de cisaillement maximal de l'ordre de 38° est prédict dans la zone de double courbure.

Les perméabilités principales et ses orientations données par les équations (3.13) et (3.17) et le taux de fibres local ont été calculés à partir des résultats de drapage et appliqués à chaque élément fini du maillage. Les Figures 3.18 à 3.20 illustrent les perméabilités principales majeure et mineure respectivement, ainsi que les orientations des fibres sur la surface de la pièce. Une diminution de la perméabilité majeure K_1 par un facteur de dix dans la zone de grande déformation est observée tandis que la perméabilité mineure K_2 décroît jusqu'à quinze fois. Les simulations de remplissage de la cavité du moule sans et avec drapage sont montrées aux Figures 3.21 et 3.22 respectivement. Le temps de remplissage total est estimé à 723 secondes au moment où le flux arrive à l'évent 3. La simulation de remplissage sans considérer les résultats de drapage prédit une imprégnation complète du renfort en 723 secondes (voir Figure 3.21) pendant qu'une zone sèche importante est observée près de l'évent 1 (Figure 3.22.). Ceci démontre clairement l'influence d'une plus petite perméabilité et porosité – à cause du cisaillement des fibres – sur le remplissage du renfort dans la cavité du moule. En déplaçant l'évent 1 près de la zone drapée, une nouvelle simulation est réalisée pour observer l'influence de ce changement sur la stratégie d'injection. Le temps de remplissage devient maintenant 788 secondes, c'est-à-dire 9% de plus pour remplir complètement la cavité sans bulles d'air ou zone sèche (voir Figure 3.23). Cet exemple illustre bien comment le seul changement de la position d'un évent est critique pour assurer une imprégnation complète du renfort.



Figure 3.18 Perméabilité locale majeure K_1 estimée avec l'équation (3.14), qui décroît jusqu'à dix fois dans la zone de grande déformation.



Figure 3.19 Perméabilité locale mineure K_2 estimée avec l'équation (3.14), qui décroît jusqu'à quinze fois dans la zone de grande déformation.

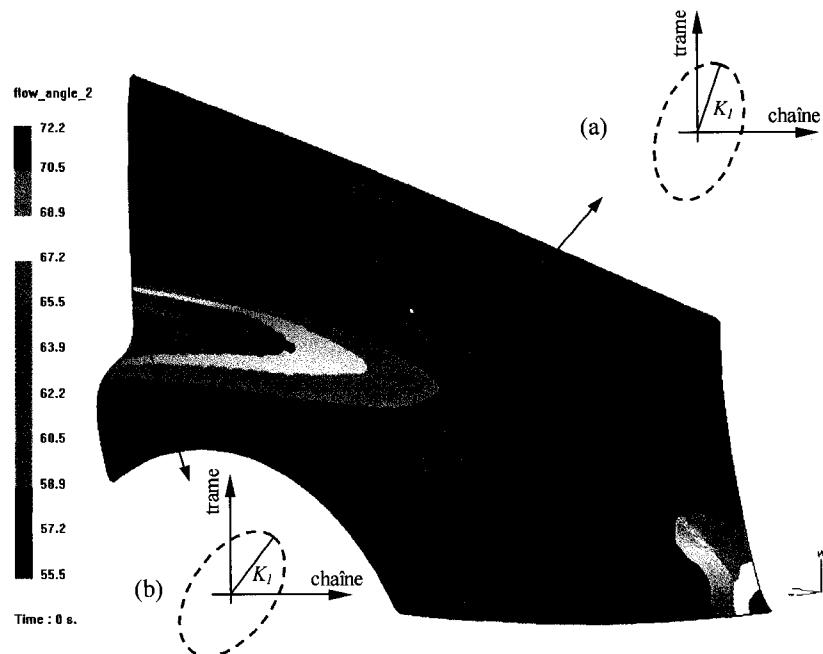


Figure 3.20 Orientation du front d'écoulement estimée avec l'équation (3.17) : (a) sans déformation le front est orienté à 72° par rapport à la chaîne; (b) Le front est orienté à 55° dans la zone de déformation maximale.

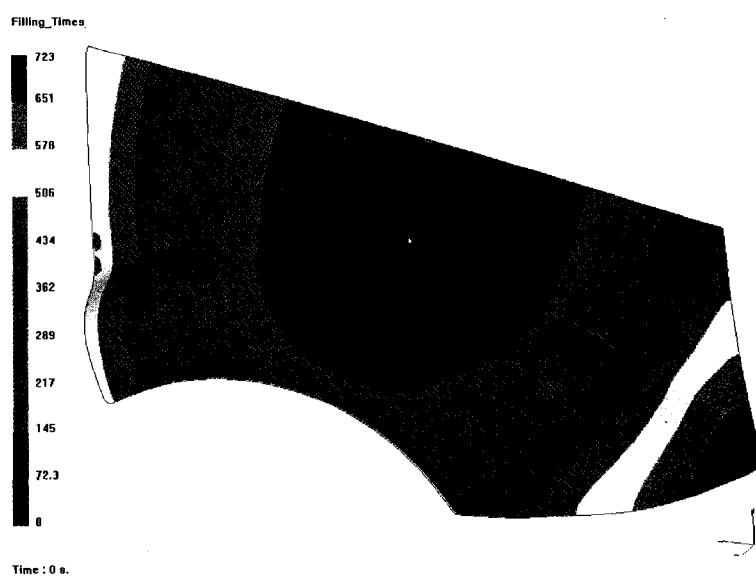


Figure 3.21 Temps de remplissage prédict de 723 secondes (sans résultats de drapage).

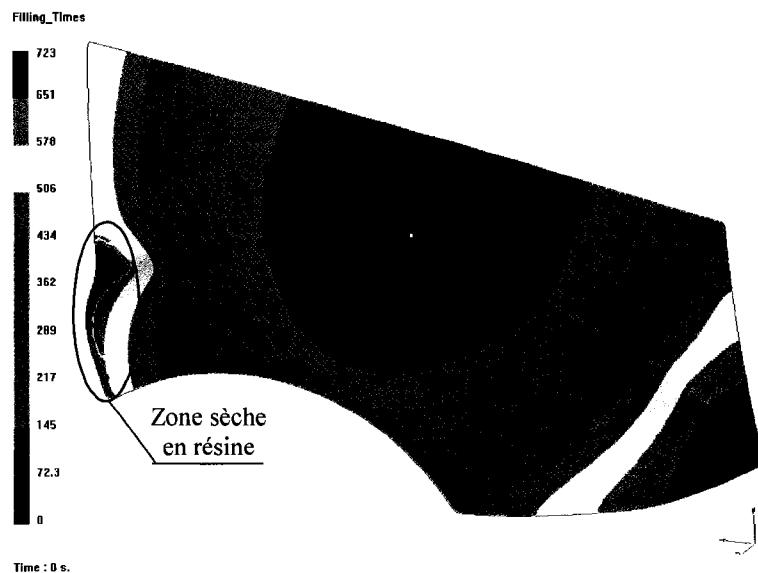


Figure 3.22 Temps de remplissage prédict de 723 secondes (avec résultats de drapage).

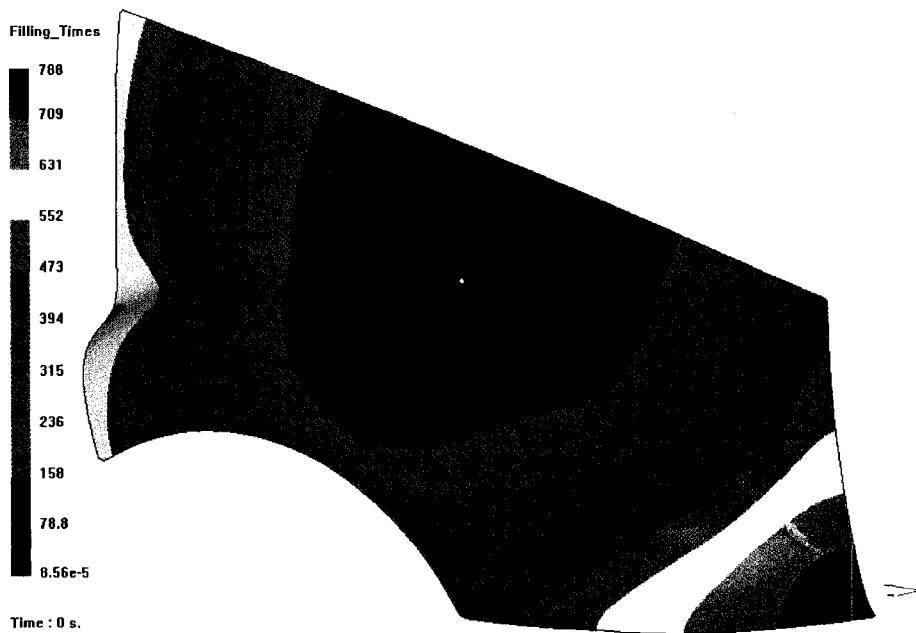


Figure 3.23 Temps de remplissage prédict de 788 secondes après changement de la position de l'évent 1 (avec résultats de drapage)

CHAPITRE 4

MISE À JOUR DES LOGICIELS POUR LES MESURES ET CARACTÉRISATION DE LA PERMÉABILITÉ DES RENFORTS FIBREUX

4.1. Introduction

Les simulations par ordinateur des techniques de moulage par transfert de résine ont connu un fort développement dans les dernières années. Les codes numériques pour la prédition du remplissage de la cavité du moule sont de plus en plus optimisés afin d'assurer une bonne fiabilité. De même, la connaissance de certains paramètres et propriétés tant du renfort que de la résine devient essentielle. Dans ce sujet, la perméabilité du renfort est étudiée en fonction du taux de fibres.

L'acquisition de données des essais de perméabilité effectuées au début de ce travail (chapitres 1 et 2) a été réalisée au moyen d'un logiciel déjà existant développé avec Labview et enregistrée dans des fichiers « texte ». Les résultats ont été ensuite dépouillés avec des feuilles de calcul du logiciel Microsoft Excel créées par M. Eduardo Ruiz. Une fois la perméabilité calculée, les rapports des mesures ont été rédigés au moyen du logiciel Microsoft Word. Cette procédure demandait ainsi un temps très précieux pour la caractérisation complète d'un renfort.

Le but de ce chapitre est donc de présenter le logiciel *PolyPer*, un outil informatique qui permet d'analyser et de caractériser la perméabilité d'un renfort fibreux quelconque en

temps réel. Cet outil permet, entre autres, d'effectuer en temps réel l'acquisition de données, le calcul de la perméabilité et de générer le rapport technique d'une mesure de perméabilité.

4.2. Présentation de *PolyPer*

Étant une étape de la mise à jour du laboratoire de perméabilité, le logiciel *PolyPer* a été conçu pour la mesure et l'analyse de la perméabilité en temps réel, soit dans le plan comme à travers de l'épaisseur. De plus, la perméabilité peut être caractérisée en fonction du taux de fibres et son comportement modélisé par une équation déterminée à partir des essais expérimentaux.

PolyPer a été programmé complètement en *Microsoft Visual Basic 6.0*. Il est constitué de quatre modules *UniPer*, *TransPer*, *PrinPer* et *CharacPer*. Les interfaces graphiques d'interaction usager-logiciel sont disponibles dans trois langues – français, anglais et espagnol – et accessibles par des touches rapides telles que F5, F6 et F7. La Figure 4.1 montre l'interface graphique du logiciel *PolyPer*, ce qui permet de lancer l'un des logiciels mentionnés ci-dessus par les boutons à tel effet. Deux versions de *PolyPer* sont conçues pour l'usager, une version *Laboratoire* et une version *Bureau*. Dans la première version, les modules *UniPer* et *TransPer* permettent de faire l'acquisition des données au moyen du port série RS-232 tandis que dans la version bureau ces fonctions sont désactivées.

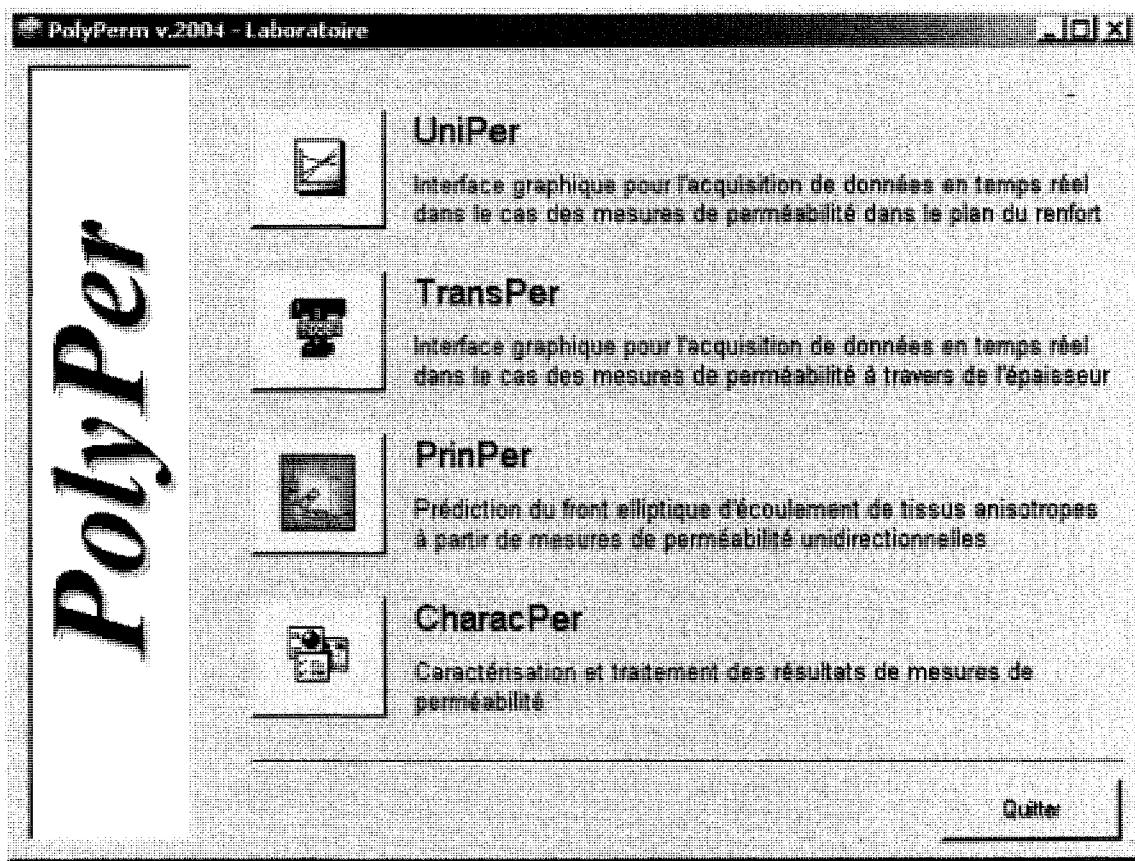


Figure 4.1 Interface graphique de démarrage du logiciel PolyPer.

Il faut noter que dans la version *Laboratoire* les modules *UniPer* et *TransPer* ne peuvent être lancés en même temps en raison de l'impossibilité de partager un même port série RS232 unique. En revanche, la version *Bureau* permet de travailler avec les quatre logiciels en même temps.

4.2.1. UniPer

Le logiciel UniPer est la continuation et mise à jour du logiciel « Permea1D ». Ce logiciel constitue le module principal de PolyPer. Il permet d'enregistrer par action de l'usager la progression du front d'écoulement dans le cas d'un flux unidirectionnel et de calculer la perméabilité en temps réel à chaque position du front. Les mesures de perméabilités peuvent être effectuées dans deux configurations du moule possibles : (a) la configuration **RTM** (moule à parois rigides) qui provient de l'anglais « *Resin Transfer Moulding* »; et (b) une deuxième configuration dénommée **VARI** (« *Vacuum Assisted Resin Injection* »). L'usager peut également importer des données expérimentales mesurées et enregistrées avec *Labview* pour calculer la perméabilité et faire un post-traitement des résultats. Il peut aussi exporter des données aux formats *Ms Word* et *Ms Excel*. La langue des rapports ainsi générés peut être fixée par défaut entre le français, l'anglais et l'espagnol selon les préférences de l'usager.

L'interface graphique de UniPer présente quatre sous-fenêtres accédées par les étiquettes *Paramètres généraux*, *Acquisition de données*, *Résultats* et *Graphiques* telles que montrées aux Figures 4.2. à 4.5. La fenêtre *Paramètres généraux* permet de définir les paramètres généraux de l'essai comme les propriétés et dimensions de l'échantillon, les propriétés du fluide à injecter, paramètres d'injection, divisions dessinées le long le moule, etc...

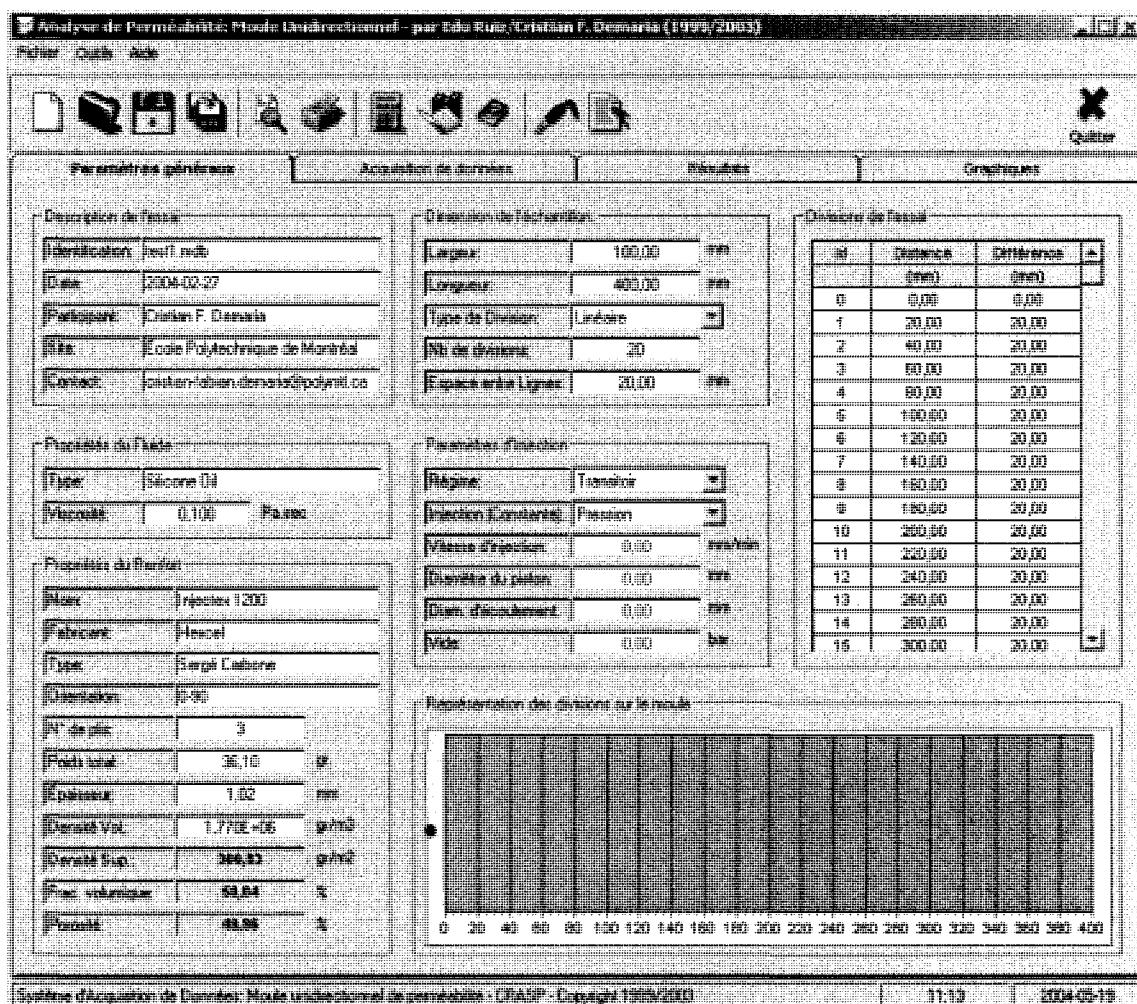


Figure 4.2 UniPer - Sous-fenêtre Paramètres généraux.

La fenêtre *Acquisition de données* permet à l'usager de lancer l'acquisition de données de l'essai. De même, en fonction de la configuration choisie, l'usager peut lancer un test du système d'acquisition pour contrôler que la connexion au port série s'effectue correctement, que les capteurs de pression sont bien branchés, etc... A chaque passage du front, la perméabilité est recalculée et visualisée dans la fenêtre.

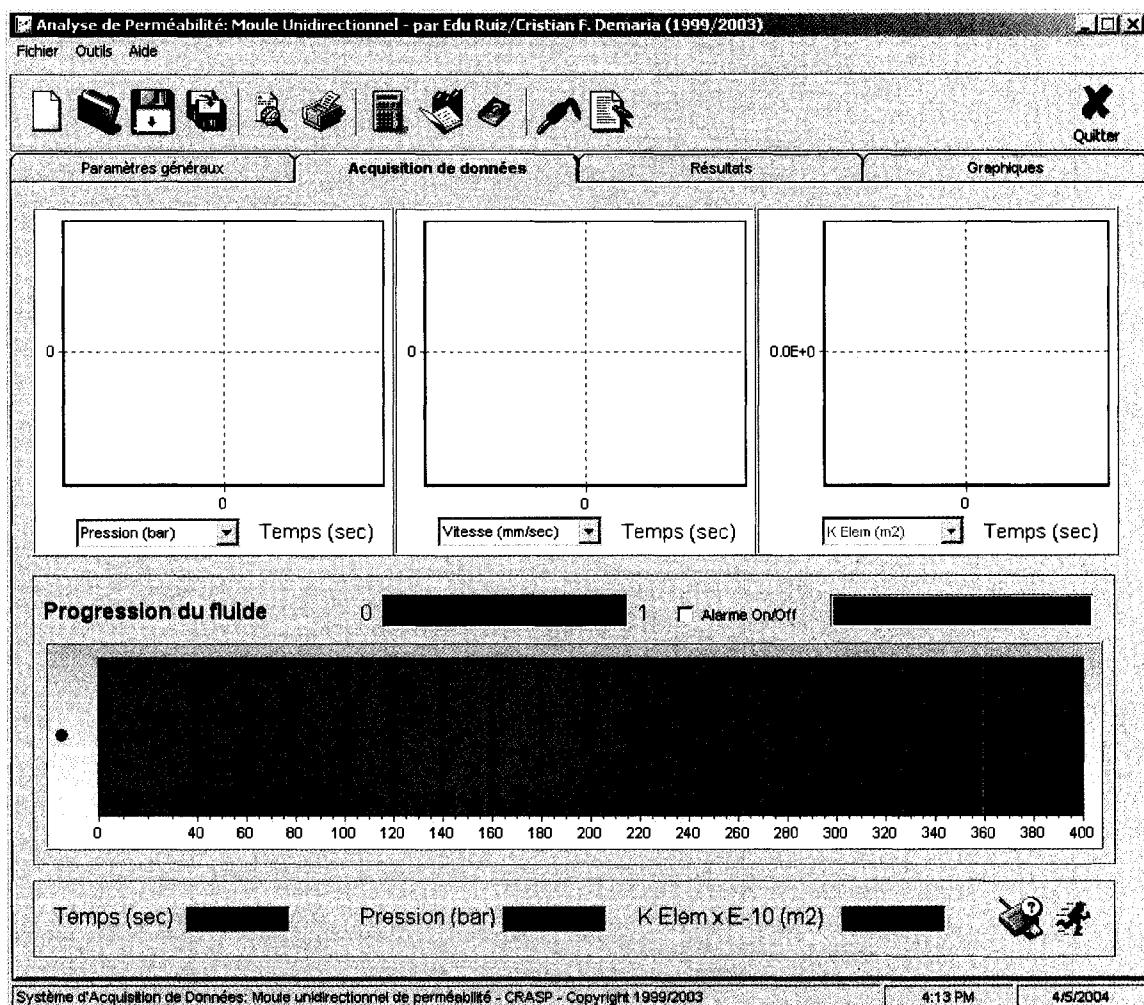


Figure 4.3 UniPer - Sous-fenêtre Acquisition de données.

Une troisième fenêtre montre le tableau des résultats et donne la valeur de la perméabilité mesurée après l'essai. Des valeurs enregistrées pendant l'essai telles que le temps et la pression d'injection sont affichées dans cette fenêtre ainsi que les calculs intermédiaires (L_Int, dL_Exp, V_Exp, etc.) Cette fenêtre permet d'enlever des passages, de récupérer des valeurs originales et d'exporter les données dans *Ms Excel*.

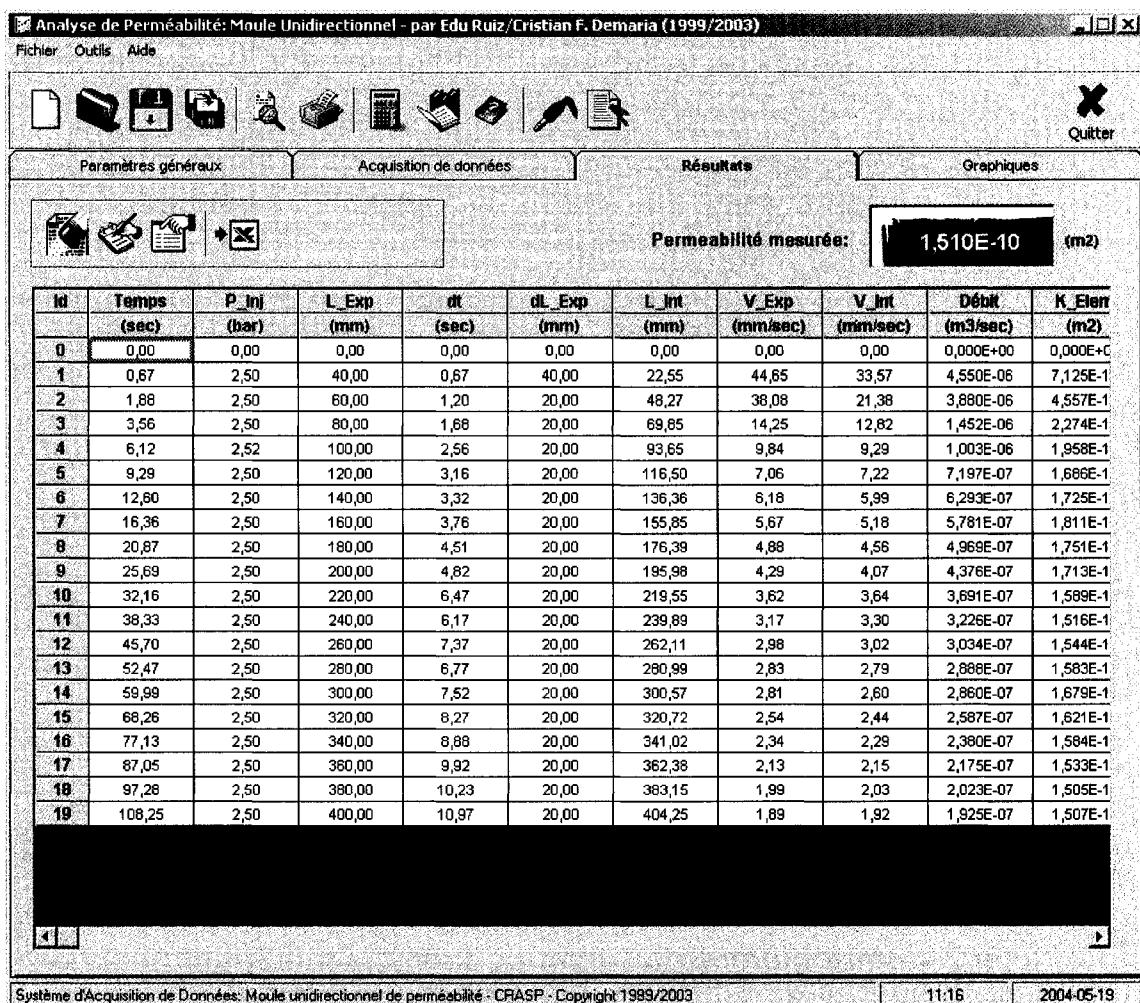


Figure 4.4 UniPer - Sous-fenêtre Résultats.

La dernière fenêtre illustre l'évolution des certains résultats et paramètres en fonction du temps de mesure au moyen de quatre graphiques. De cette façon, l'évolution de la perméabilité, la pression d'injection, la position et la vitesse du front d'écoulement peuvent être visualisés en fonction du temps pendant la réalisation de l'expérience.

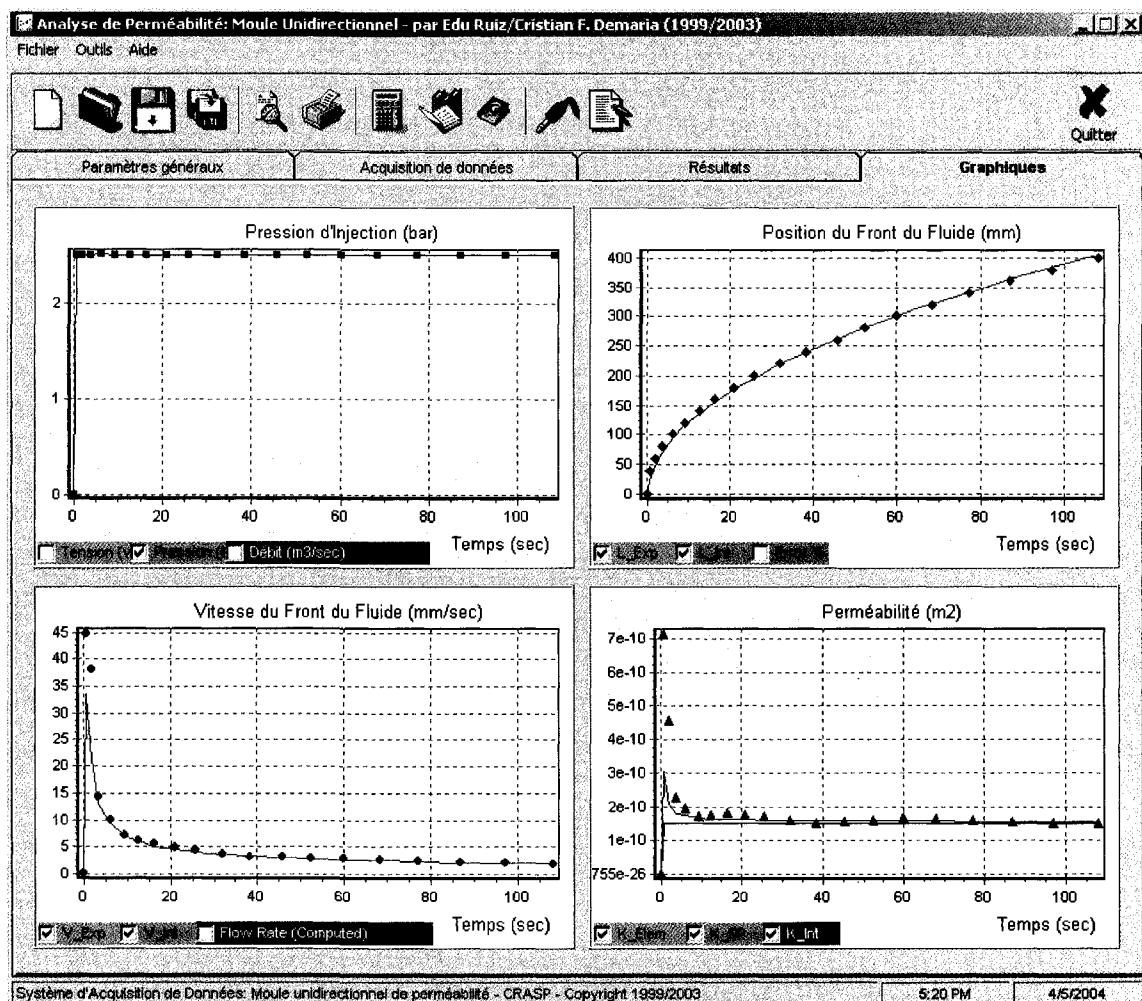


Figure 4.5 UniPer - Sous-fenêtre Graphiques.

4.2.2. TransPer

Le logiciel TransPer, dont le nom vient de l'anglais **Trans** pour « *transverse* » et **Per** pour « *Permeability* », est conçu pour la mesure et le calcul de la perméabilité dans la direction transversale par rapport au plan du renfort. Dans le cas de pièces composites de faible épaisseur, normalement plus petite que 5mm, la perméabilité transverse est

négligée généralement par rapport aux perméabilités dans le plan du renfort. Mais quand la pièce devient épaisse, la connaissance de cette valeur est importante pour prédire la progression du flux de résine dans le plan du renfort et à travers son épaisseur.

D'une façon similaire à UniPer, *TransPer* possède des outils pour la génération des rapports aux formats *Ms Word* et *Ms Excel*, ainsi que d'une base de données pour enregistrer la calibration des capteurs de pression et des articles pertinents au sujet. De plus, il permet d'accéder à une calculatrice scientifique et à une liste de facteurs de conversion.

L'interface graphique de *TransPer* présente trois sous-fenêtres accédées par les étiquettes *Paramètres Généraux*, *Résultats* et *Graphiques* telles qu'illustrées aux Figures 4.6 à 4.8.

La fenêtre *Paramètres généraux* permet de définir les paramètres généraux de l'essai comme les propriétés et les dimensions de l'échantillon, les propriétés du fluide à injecter et les paramètres d'injection, etc.

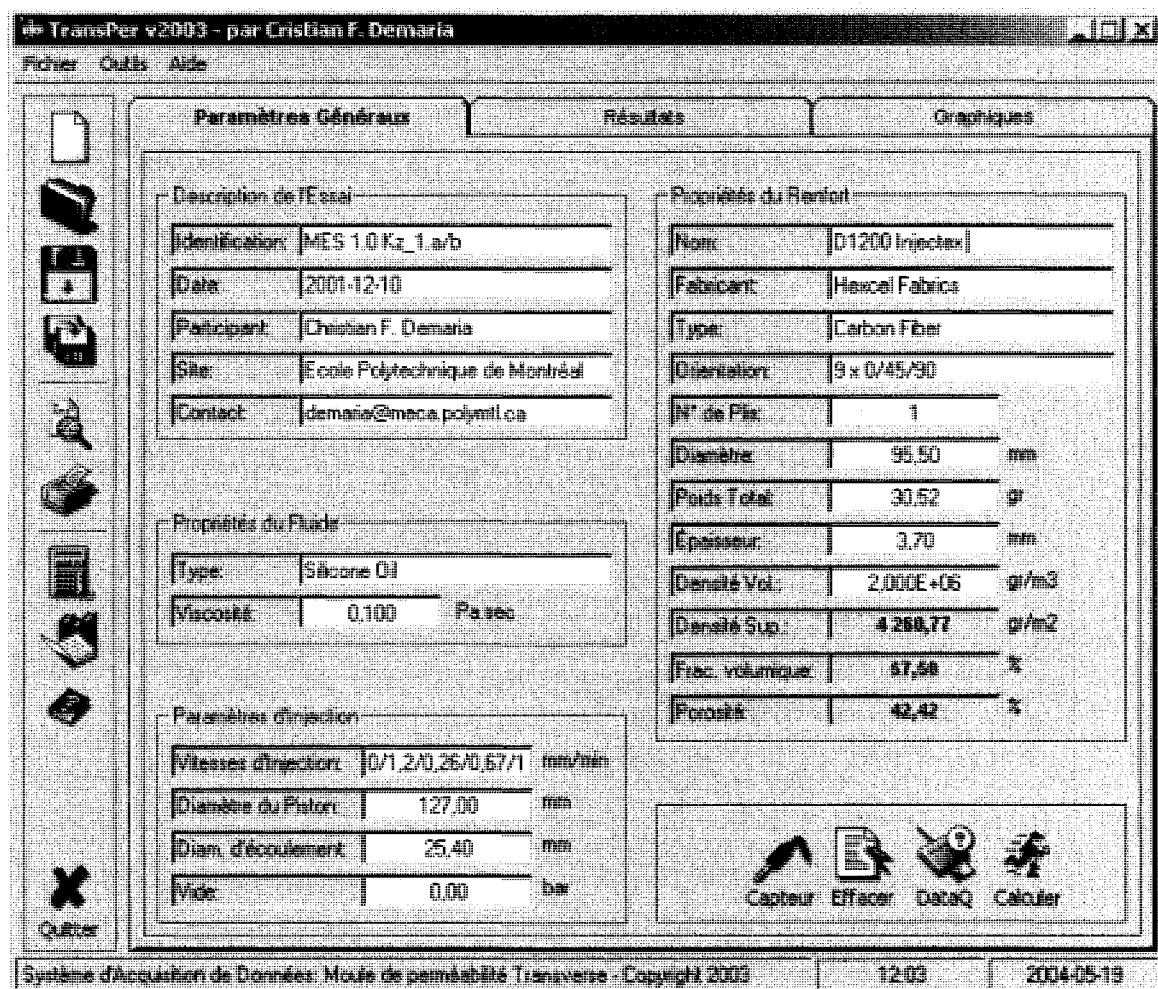


Figure 4.6 TransPer - Sous-fenêtre Paramètres Généraux.

Une deuxième fenêtre montre le tableau avec les calculs ainsi que les résultats de la perméabilité mesurée à la fin de l'essai. Elle permet d'enlever des passages, de refaire un calcul de perméabilité et de récupérer les valeurs originales. De même, les résultats peuvent être exportés vers *Ms Excel*.

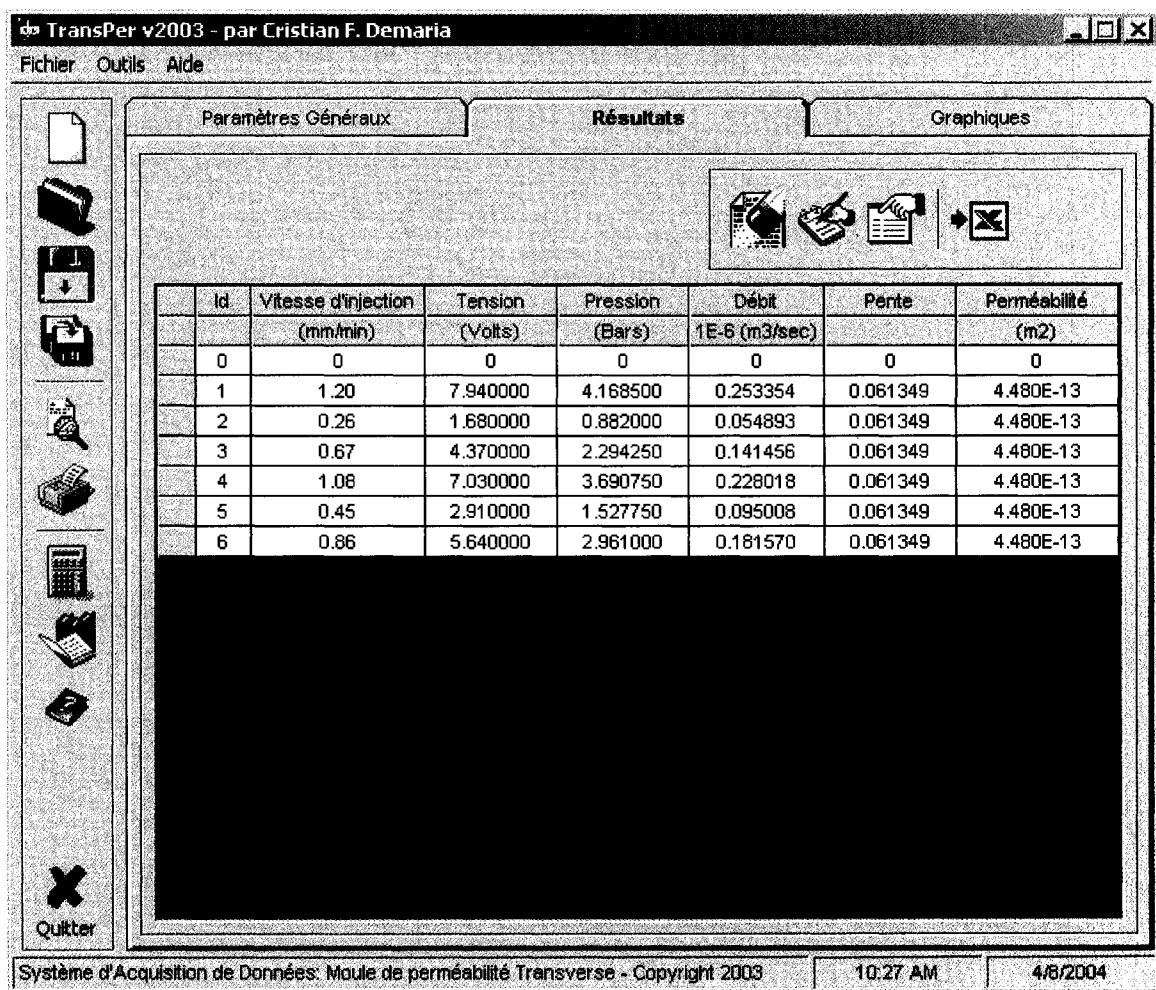


Figure 4.7 TransPer - Sous-fenêtre Résultats.

La troisième et dernière fenêtre donne le rapport entre le débit et la pression d'injection, qui est utilisé dans le calcul de la perméabilité transversale. De même, un histogramme montre la pression d'injection en fonction du temps. Enfin, la perméabilité mesurée K_3 est affichée en m^2 .

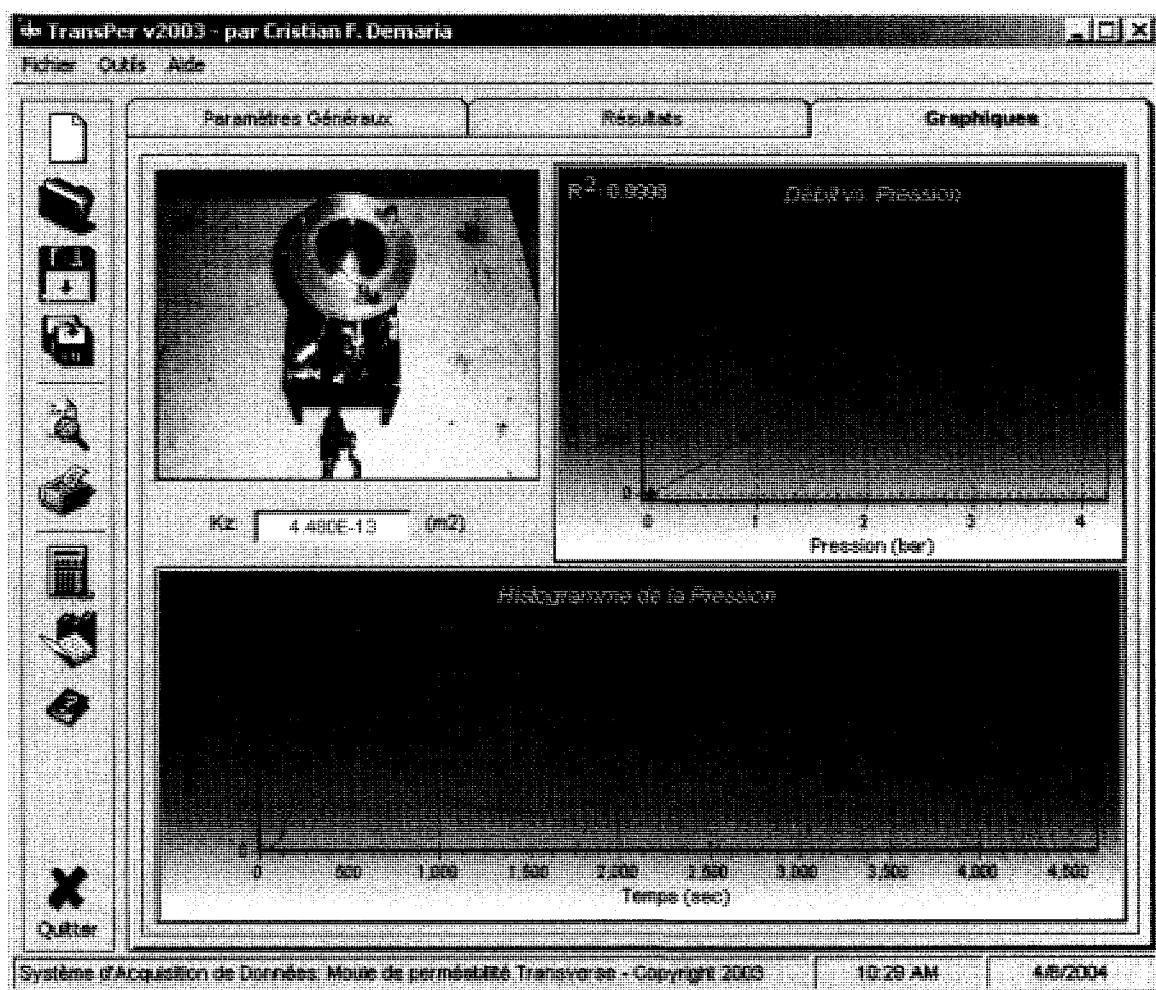


Figure 4.8 TransPer - Sous-fenêtre Graphiques.

4.2.3. PrinPer

Étant déjà discuté au chapitre 1, les perméabilités principales dans le plan d'un renfort anisotrope peuvent être obtenues à partir de trois valeurs des perméabilités effectives mesurées selon trois directions. PrinPer permet ainsi d'obtenir les perméabilités K_1 et K_2 et l'orientation principale β de l'écoulement à partir des valeurs des perméabilités effectives $K_{eff}^{0^\circ}$, $K_{eff}^{45^\circ}$ et $K_{eff}^{90^\circ}$. Le code est fondé sur la méthode itérative de l'ellipse présentée au chapitre 1. De plus, une deuxième méthode est aussi disponible pour obtenir les perméabilités principales fondée sur les équations de Weitzenböck et al. [17].

PrinPer permet également de créer des rapports aux formats *Ms Word* et *Ms Excel*, d'accéder à une base de données d'articles pertinents sur le sujet et à des outils tel qu'une calculatrice scientifique.

L'interaction de l'usager avec PrinPer est réalisée au moyen de l'interface graphique illustrée à la Figure 4.9, qui présente une seule fenêtre à partir de laquelle toutes les fonctions sont accédées.

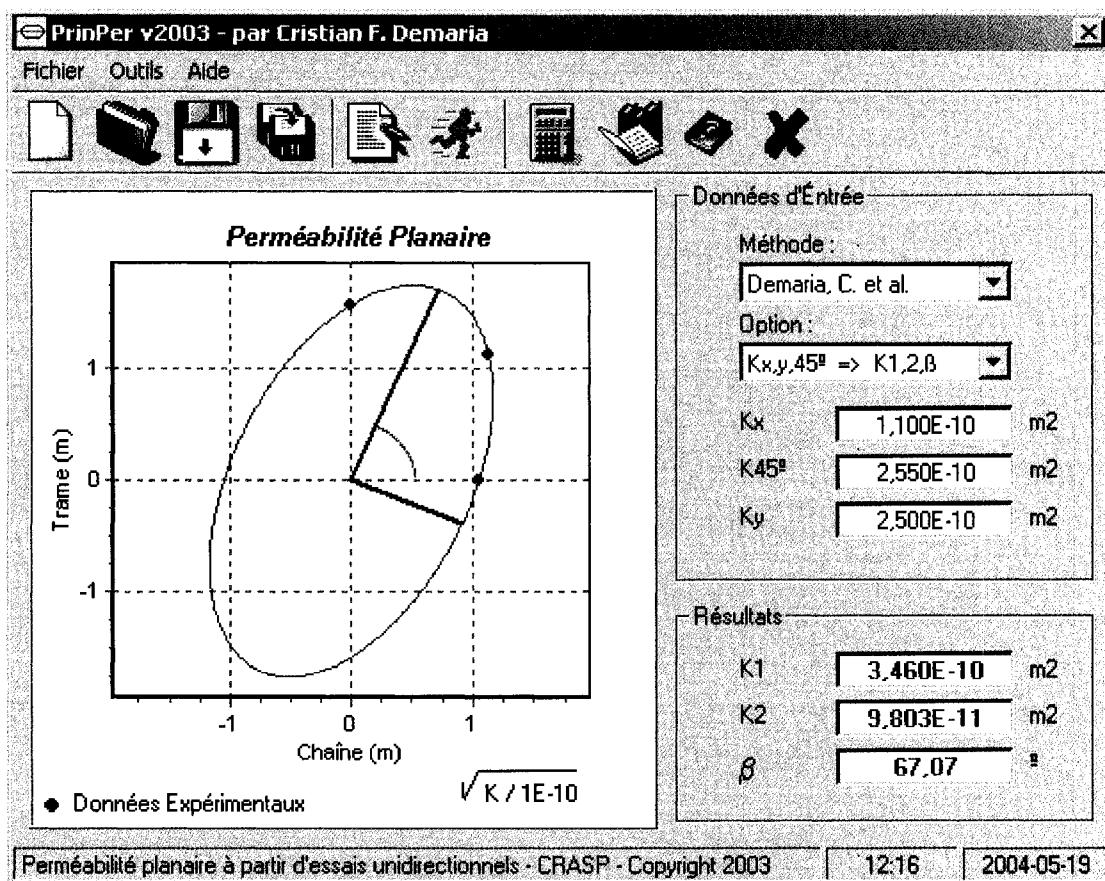


Figure 4.9 PrinPer – Interface graphique pour l’interaction usager-logiciel.

4.2.4. CharacPer

Le logiciel *CharacPer* est conçu pour la caractérisation et le post-traitement des résultats de perméabilités. En effet, la connaissance de la perméabilité en fonction du taux de fibres est requise au moment de lancer une simulation, comme c'est le cas pour une pièce présentant plusieurs taux de fibres dans des zones différentes de sa géométrie. Le logiciel permet de créer une base de données avec les résultats des mesures de perméabilité effectuées à différents taux de fibres et de trouver ainsi son comportement

en fonction de ce dernier. Ce comportement peut être modélisé soit par des équations de régression exponentielle ou de puissance, soit par la relation de Kozeny-Carman tel que discuté auparavant.

CharacPer dispose aussi des outils pour la génération de rapports aux formats *Ms Word* et *Ms Excel*, d'une calculatrice scientifique et d'une base de données d'articles. L'interface graphique d'interaction usager-logiciel est illustrée à la Figure 4.10. La sous-fenêtre *Paramètres Généraux* permet à l'usager d'importer des résultats des mesures de perméabilité afin de créer une base de données qui permettra de trouver une équation modélisant la perméabilité en fonction du taux de fibres ou de la porosité. Les résultats des valeurs de perméabilité sont tracés dans un graphique en fonction du taux de fibres et interpolées par des modèles soit exponentiel ou de puissance, ou par la relation de Kozeny-Carman. De plus, les coefficients des équations trouvées peuvent également être modifiés au besoin.

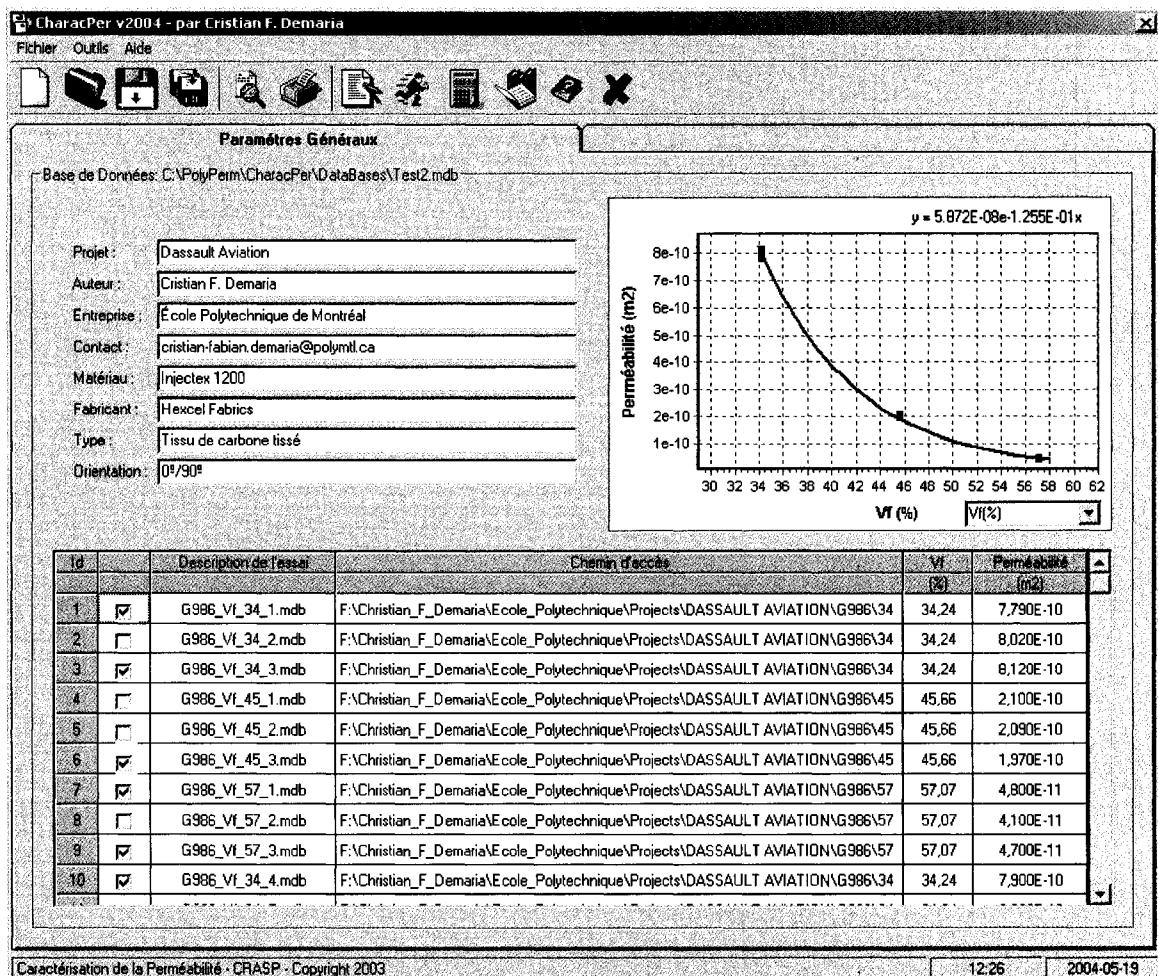


Figure 4.10 CharacPer - Interface graphique pour l'interaction usager-logiciel.

CHAPITRE 5

CONCEPTION D'UN NOUVEAU BANC D'ESSAI POUR MESURER LA PERMEABILITE UNIDIRECTIONNELLE DE RENFORTS FIBREUX

5.1. Introduction

Au cours des dernières années, la simulation numérique des procédés de fabrication de matériaux composites dans les procédés de moulage par transfert de résine (RTM) ou d'infusion (VARI) est devenue une pratique courante dans l'industrie. Dans ce but, la connaissance de la perméabilité des renforts est un paramètre critique pour prédire l'écoulement de la résine à travers un milieu poreux fibreux.

Actuellement, la caractérisation de la perméabilité dans le plan du renfort se fait à l'aide d'un moule unidirectionnel qui remplit nos besoins, mais qui peut être grandement amélioré du point de vue pratique. Dans une première étape, un nouveau système de fermeture sera étudié afin de minimiser le temps de préparation requis entre chaque mesure. Un système de récupération d'huile est aussi envisagé pour respecter les exigences de propreté des laboratoires.

Le but de ce cinquième chapitre est de concevoir un nouveau moule permettant de mesurer la perméabilité de renforts fibreux par la méthode unidirectionnelle. Des solutions adoptées ainsi que des résultats d'analyses par éléments finis sont présentés et discutés.

5.2. Cahier des charges

5.2.1. Fonction principale

Le moule aura pour fonction principale de mesurer la perméabilité de renforts fibreux selon la méthode unidirectionnelle.

5.2.2. Fonction secondaire

Afin de respecter les consignes de propreté des laboratoires, le moule devra être muni d'un système de récupération de l'huile utilisée dans la mesure en provenance du moule lors de son ouverture ainsi que de l'huile qui pourrait éventuellement s'écouler lors du remplissage du pot de pression.

5.2.3. Contraintes

5.2.3.1. Réutilisation des composants de l'ancien moule

Le moule de perméabilité devra être conçu en réutilisant au maximum les composantes de l'ancien moule afin d'en diminuer les coûts de fabrication et de mise à jour.

5.2.3.2. Système de fermeture rapide, simple et robuste

Le moule de perméabilité devra posséder un système de fermeture simple et robuste, tout en visant en premier lieu la rapidité afin de combler cette déficience principale du système actuel qui requiert un boulonnage soigneux de 40 vis.

5.2.3.3. Système simple et facile pour des éventuels déplacements

La structure portante du moule et le moule devront être facile à déplacer.

5.2.3.4. Visualisation des deux fronts du fluide

Le moule devra permettre la visualisation des deux fronts de résine, c'est-à-dire les fronts dans les parties supérieure et inférieure de la cavité, afin de subvenir aux besoins de telles mesures lorsqu'elles seront nécessaires.

5.2.3.5. Pression d'injection maximale d'utilisation de 50 Psi

Dans certaines conditions, par exemple pour les mesures à haut taux de fibres, des pressions d'injection plus élevées peuvent être requises. La pression d'injection maximale fixée pour la conception est de 50 Psi, pression pour laquelle la déformation du moule ne devra pas dépasser 0.1 mm.

5.2.3.6. Mesures d'échantillons de 500 mm à la pression d'injection maximale

Le moule devra permettre les mesures de perméabilité unidirectionnelle pour des échantillons de 500 mm de longueur à la pression d'injection maximale avec une déformation maximale de 0.1 mm.

5.2.3.7. Ajustements pour les mesures d'échantillons de 500 mm et plus.

Le moule devra avoir des ajustements pour permettre de faire des mesures de perméabilité sur des renforts plus longs que 500 mm, mais à des pressions d'injection inférieures.

5.3. Configuration actuelle du moule pour les mesures unidirectionnelles

La Figure 5.1 représente schématiquement la configuration actuelle du moule utilisé pour réaliser les mesures unidirectionnelles de perméabilité. Le banc d'essai unidirectionnel, c'est-à-dire le moule et le système d'acquisition de données, est montré à la Figure 5.2. Le moule de forme rectangulaire comprend 4 parties :

- deux plaques en verre trempé;
- un cadre intérieur en 2 morceaux (cale en aluminium et couvercle en acier);
- un cadre extérieur (en acier), qui maintient l'ensemble en place.

Les plaques en verre trempé de dimension 130 mm x 930 mm et d'épaisseur 19 mm constituent les parties mâle et femelle de notre moule. Le choix du verre trempé repose sur deux raisons principales. La première est la nécessité d'observer le front d'avancement lors des essais et de constater visuellement qu'il n'y a pas d'effet de bord le long des côtés de l'échantillon. La seconde raison est d'assurer une rigidité suffisante du moule afin d'éviter toute déformation susceptible de fausser les résultats de mesure. Le verre trempé est en effet beaucoup plus rigide que l'acrylique communément utilisé

dans les laboratoires. Le module de Young du verre trempé est d'environ 70 Gpa comparé à 3 Gpa pour l'acrylique.

Le liquide est injecté par un trou d'un diamètre de 1 cm percé dans la plaque inférieure. Deux trous de même dimension sont percés dans la plaque supérieure : l'un sert d'évent; l'autre permet de fixer le capteur de pression.

Le renfort est disposé d'abord entre les deux plaques. Le long des parois latérales du moule, on installe ensuite un joint très fluide en latex et un joint plus rigide en caoutchouc naturel. Le renfort est placé dans le moule entre le capteur de pression et l'évent. Grâce à un espace libre laissé entre le trou d'injection et le tissu lors de l'injection, le front devient progressivement linéaire avant que le liquide n'atteigne le tissu. Le latex, en fermant le moule, remplit l'espace libre laissé entre le caoutchouc et le renfort pour combler une éventuelle irrégularité dans la découpe de l'échantillon. Il permet ainsi d'éviter l'écoulement préférentiel appelé « effet de bord », qui naît généralement dans cet espace. Le joint en caoutchouc assure l'étanchéité du moule.

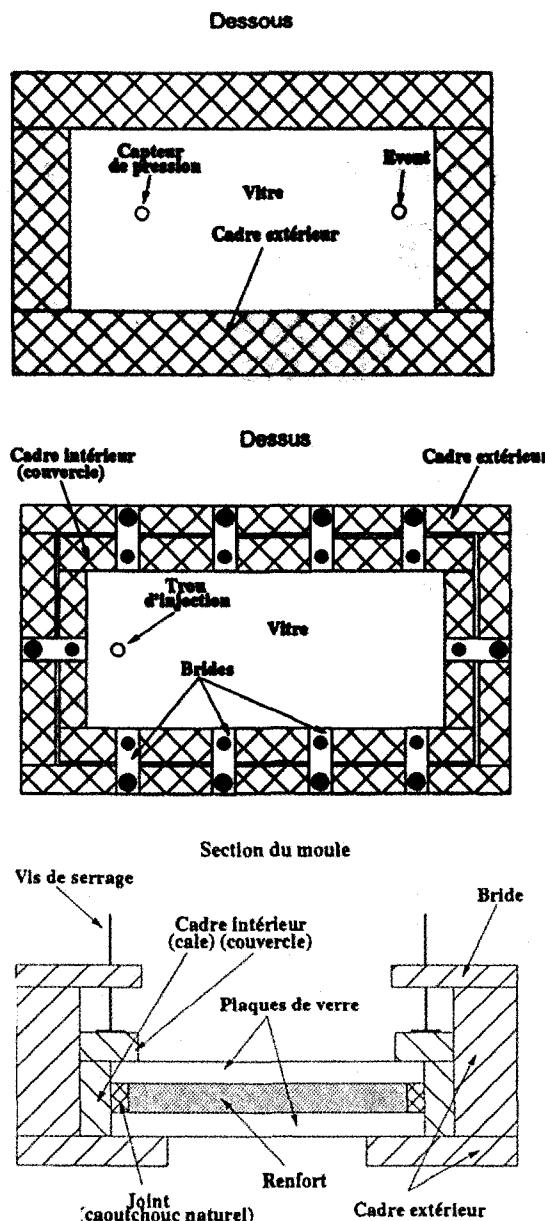


Figure 5.1 Schéma de la configuration actuelle du moule pour les mesures de perméabilité.

La cale (première partie du cadre intérieur) entoure les plaques de verre. Le couvercle (deuxième partie du cadre intérieur) est à cheval sur la plaque de verre supérieure et la

cale. L'ensemble est maintenu en place dans le cadre extérieur. Des tiges filetées viennent s'appuyer sur le couvercle. Elles passent à travers des brides amovibles (20 au total), disposées à tous les 115 mm et fixées au cadre extérieur par des vis. L'ensemble tiges-brides constitue le système de fermeture du moule. On serre chacune des tiges pour assurer un contact entre le couvercle et la cale. On est alors assuré que l'épaisseur de la cavité restante correspond bien à la hauteur de la cale moins l'épaisseur des deux vitres.

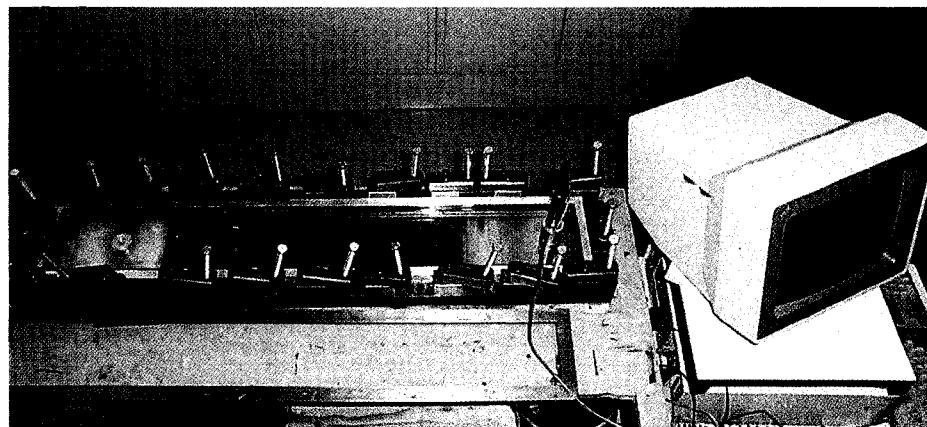


Figure 5.2 Photo du montage unidirectionnel pour les mesures de perméabilité.

5.4. Conception

Cette section décrit les étapes de la conception et les solutions adoptées en fonction des critères de conception établis auparavant. Cette conception comprend la sélection des matériaux ainsi que les calculs effectués à cette fin.

5.4.1. Réutilisation des composantes de l'ancien moule

Étant donné que la méthode de mesure de perméabilité reste inchangée (mesure unidirectionnelle), la largeur et la longueur des échantillons à mesurer demeurent les mêmes, soit en général 100 mm x 400 mm. Ceci permet de réutiliser les plaques de verre trempé actuelles ainsi que les cadres interne et externe, même si la longueur actuelle dépasse beaucoup la longueur minimale requise, soit 500 mm (100 mm pour la zone d'injection + 400 mm pour la longueur de l'échantillon). Cette longueur plus grande permettra d'effectuer des essais pour des préformes plus longues. La Figure 5.3 montre les composantes de l'ancien moule qui seront réutilisées. Cette décision fixe les contraintes sur les dimensions générales du système de fermeture et celles de la structure portante.

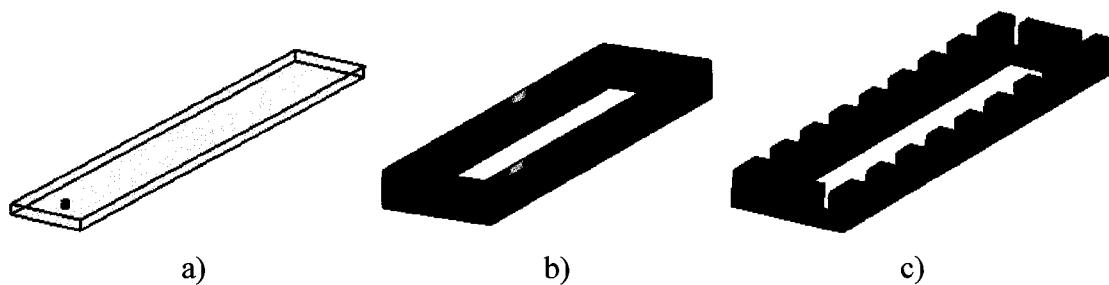


Figure 5.3 Composantes de l'ancien moule réutilisé : a) plaques de verre trempé ; b) cadre interne ; et c) cadre externe.

5.4.2. Système de fermeture

Le système de fermeture conçu pour l'ancien moule (fermeture avec 20 vis au total) demande un temps important tant pour la fermeture que pour l'ouverture du moule. Dans le but de minimiser le temps de préparation entre chaque mesure, on a cherché à trouver des solutions au problème de fermeture. Nous nous sommes orientés dès le début vers des systèmes offrant la possibilité de fermer automatiquement le moule sans nécessiter des manipulations répétitives comme la fermeture avec des vis. Notons que le système à vis requiert un serrage graduel de celles-ci afin de garder les deux plaques parallèles pendant la fermeture du moule. Un système de fermeture au moyen de pistons pneumatiques ou hydrauliques a été donc envisagé comme une solution plus appropriée.

Après une vaste recherche, le choix du système de fermeture s'est finalement porté sur des pistons pneumatiques pour deux raison principales : a) le coût d'un système hydraulique est entre deux et trois fois plus élevé que pour un système pneumatique équivalent; et b) la disponibilité dans les laboratoires de l'École Polytechnique d'une ligne d'air comprimé continue de 100 Psi.

5.4.2.1. Calcul de la force de fermeture

Le système de fermeture, c'est-à-dire les pistons pneumatiques, doit fournir une force de fermeture minimale de façon à contrer la pression d'injection. Cette force est

calculée simplement comme $F = PA$, où P est la pression d'injection maximale d'opération, soit 50 Psi et A est l'aire interne du moule. Pour une aire de 113 mm x 600 mm, l'aire de mesure et de visualisation de l'avancement du front du fluide, la force de fermeture minimale est donc 23372 N.

5.4.2.2. Sélection des pistons pneumatiques

Les pistons pneumatiques remplissent toutes les conditions requises pour le nouveau moule de perméabilité. La sélection du modèle de piston s'est faite selon deux critères : la force de poussée et la distance de course. La force de poussée des pistons doit au moins être égale à la force nécessaire à la fermeture du moule, donc $F_{min} = 23372$ N. La distance de course du piston est importante du point de vue de la manipulation et de la mise en place des échantillons dans la cavité du moule. Les pistons doivent donc avoir une distance de course suffisante pour libérer l'espace au-dessus du moule afin de permettre des manipulations aisées.

Parmi les pistons pneumatiques disponibles commercialement, deux pistons de 12575 N en poussée (valeur nominale pour une pression d'air comprimé de 100 Psi), donc 25150 N en total, ont été choisis. La marge de sécurité est définie ici comme le ratio de la force de poussé disponible des pistons sur la force de fermeture requise. Ce rapport vaut 1.08 pour le choix effectué. De plus, ceux-ci ont une distance de course de 18 1/2" (470 mm), ce qui rend les manipulations aisées pour la préparation d'échantillons pour les mesures

de perméabilité (voir fiche technique complète dans l'annexe D). Les caractéristiques principales des pistons sont résumées au Tableau 5.1.

Tableau 5.1 Caractéristiques principales du piston pneumatique choisi.

Diamètre du piston interne	6 "
Force en poussée	2827 lbs
Course	18 ½ "

5.4.2.3. Conception du nouveau cadre de fermeture

Les dimensions du cadre de fermeture ont été fixées dans la section 4.4.1 à 130 mm x 930 mm. Pour effectuer des mesures de perméabilité fiables et reproductibles, l'épaisseur de la cavité du moule doit demeurer constante et invariable pendant la mesure. Autrement dit, une fois que le moule est fermé, le cadre de fermeture ne doit pas idéalement se déformer à cause de la pression interne appliquée. Dans ce travail, la déflexion maximale acceptée est de 0.1mm pour une pression interne constante de 50 Psi.

La Figure 5.4 montre un schéma du moule et de la zone de mesure. Cette zone de mesure représente l'échantillon à mesurer, et en conséquence, elle doit être libre de tout obstacle afin de permettre une visualisation claire de l'avancement du fluide. Ceci limite la position des pistons, soit le premier avant le début de cette zone (position A) et le deuxième après la position B. Étant donné que la longueur des échantillons peut varier

d'habitude entre 400 mm et 500 mm, la position du deuxième piston doit tenir compte de cette donnée.

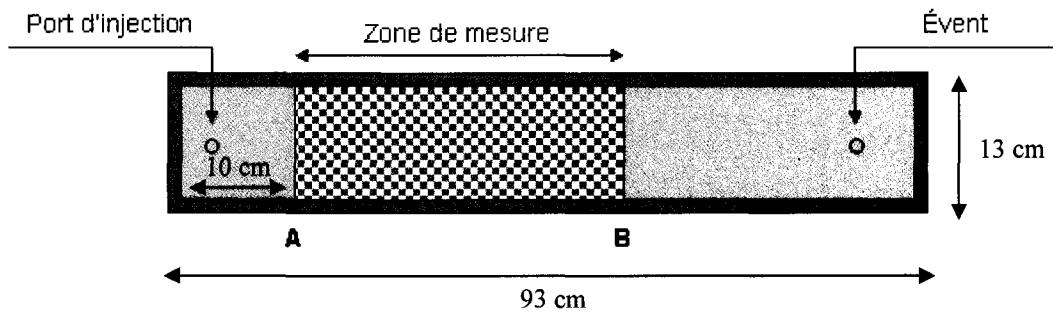


Figure 5.4 Schéma du moule et de la zone de mesure.

La conception finalement adoptée pour le cadre de fermeture est montrée à la Figure 5.5.

La poussée du premier piston s'exerce sur une plaque fixée au cadre au début de la zone de mesure, tandis que celle du deuxième piston est appliquée sur une plaque similaire qui peut éventuellement être déplacée. Dans ce but, des trous supplémentaires ont été prévus tel qu'illustre à la Figure 5.5.

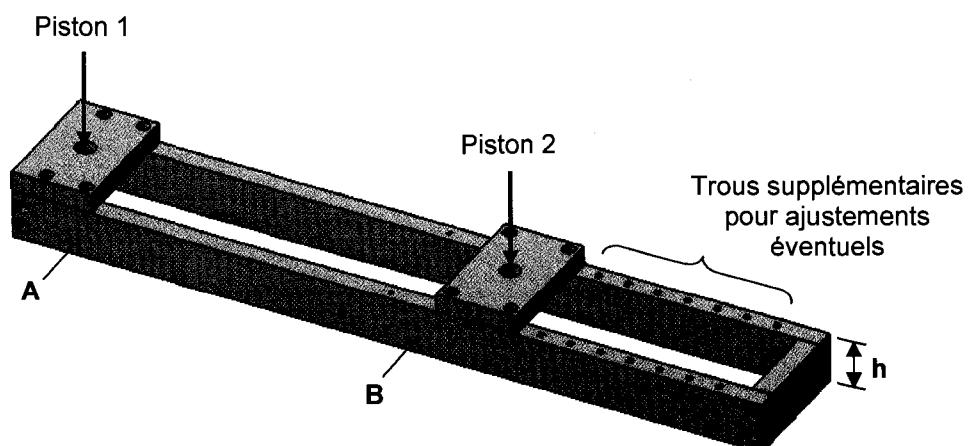


Figure 5.5 Solution adoptée pour le cadre de fermeture.

Les épaisseurs des plaques et des barres ont été choisies en fonction des épaisseurs standards trouvées sur le marché, soit 25,4 mm (1 in). Par contre, la hauteur h du cadre a été validée par une analyse d'éléments finis en fonction de la déformation maximale établie à 0,1 mm. Cette analyse a été effectuée à l'aide du logiciel Catia V5 R17 en considérant une hauteur h de 63,5 mm (2,5 in). La Figure 5.6 montre les conditions aux frontières utilisées dans cette étude. La force des pistons a été appliquée sur les plaques d'encrage des pistons dans le cas de préformes allant jusqu'à 500 mm. Pour les besoins de l'analyse, cette force est simulée par un encastrement aux points de raccord entre les pistons et les plaques tel qu'illustré à la Figure 5.6a. La Figure 5.6b donne le champ de pression utilisé dans les calculs. Cette distribution linéaire de pression représente le gradient de pression lors d'une mesure de perméabilité transitoire effectuée à pression constante. Notez qu'avant la zone de mesure, une pression constante de 50 Psi est considérée, qui diminue ensuite jusqu'à la pression atmosphérique.

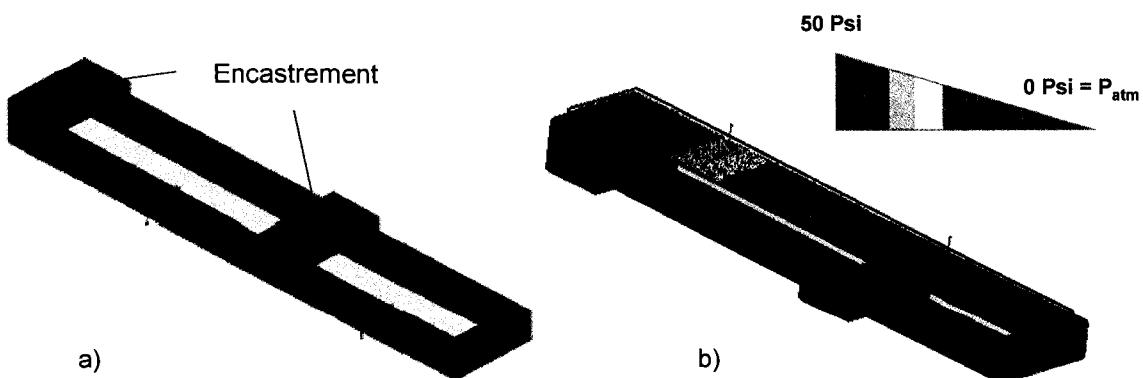


Figure 5.6 Conditions frontières pour l'analyse par éléments finis : a) encastrement cadre/pistons; b) champ de pression.

Le résultat de déformation de l'analyse par éléments finis est donné à la Figure 5.7. La déflexion maximale est estimée de 0,086 mm au centre des deux pistons, ce qui était à priori prévisible. Cette valeur de déformation satisfait aux contraintes du cahier des charges, et par conséquent, on gardera la hauteur de 63.5 mm pour le cadre.

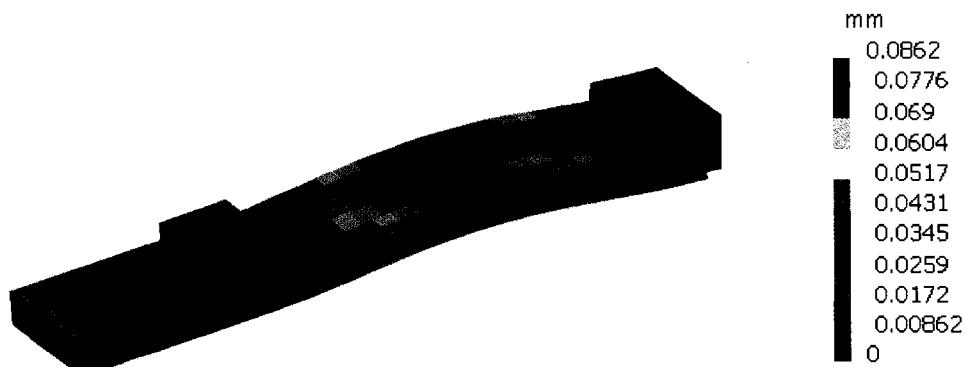


Figure 5.7 Résultats de déformation de l'analyse par éléments finis du cadre de fermeture.

5.4.3. Structure portante du moule

La structure portante a la double finalité de supporter le moule pendant les mesures ou lors de ses déplacements, ainsi que d'assurer une fermeture correcte de la cavité sous l'action des pistons. Le type de structure choisie est celle d'une presse standard à deux colonnes telle qu'illustre à la Figure 5.8.

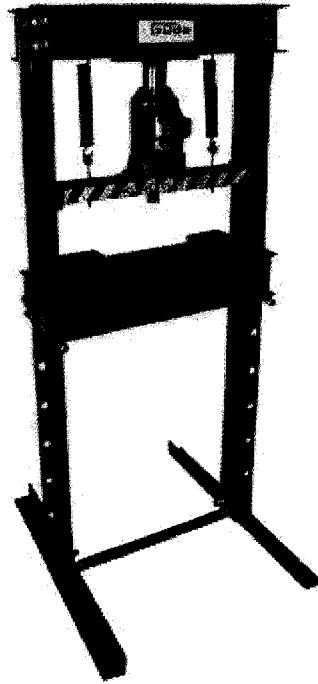


Figure 5.8 Presse standard à deux colonnes.

Bien qu'il existe une vaste gamme de modèles disponibles sur le marché, aucune presse ne remplissait nos besoins. Dans ce but, une nouvelle structure a été conçue sur mesure pour accueillir le moule et faciliter en même temps les manipulations. Les dimensions générales de la structure sont de 1300 mm x 915 mm par une hauteur de 1500 mm. La structure est munie de 4 roues pour faciliter son déplacement. Un dégagement d de 1100 mm a été laissé entre les colonnes pour l'emplacement du moule. La plateforme qui supporte le moule est constituée de deux poutres en C à une hauteur $hf = 1000$ mm par rapport au plancher. Ceci donne un accès à une personne moyenne pour la préparation des échantillons et nettoyage du moule.

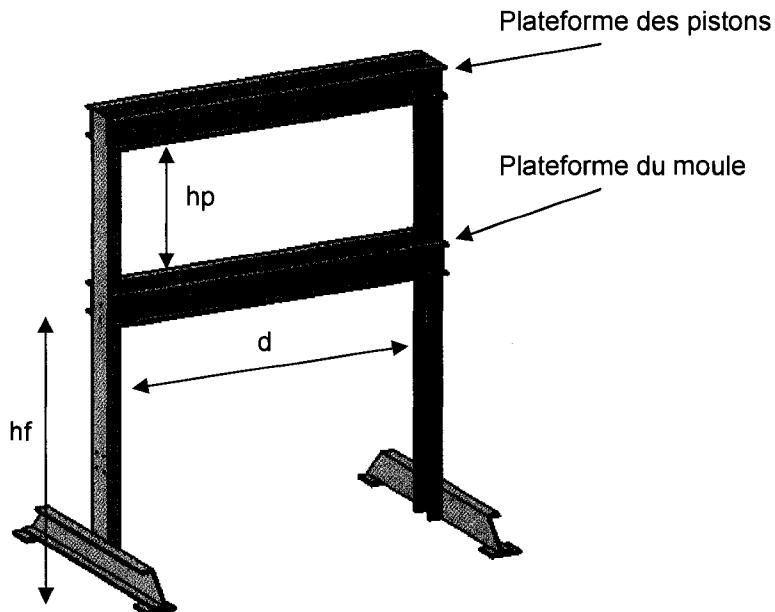


Figure 5.9 Nouvelle structure portante pour recueillir le moule.

La distance hp égale à 482.6 mm (19 in) est définie principalement par la course des pistons. Étant donné que la structure est entièrement soudée, cette distance est critique et doit rester identique tout le long du moule afin d'assurer le parallélisme des deux plateformes. Des tolérances de parallélisme d'environ 15/1000 ont été vérifiées lors de la fabrication.

Des analyses par la méthode des éléments finis ont été réalisées sur la structure de la Figure 5.9 dans le cas où les pistons poussent à une pleine charge de 25150 N. Le logiciel utilisé pour cette analyse est Ansys Workbench 10. La déformation maximale estimée de 0.825 mm est située au centre des poutres en C qui supportent le moule (voir

Figure 5.10). Du point de vue de la résistance mécanique de la structure, le facteur de sécurité minimal calculé est 2.76, ce qui permet son utilisation à pleine charge sans danger.

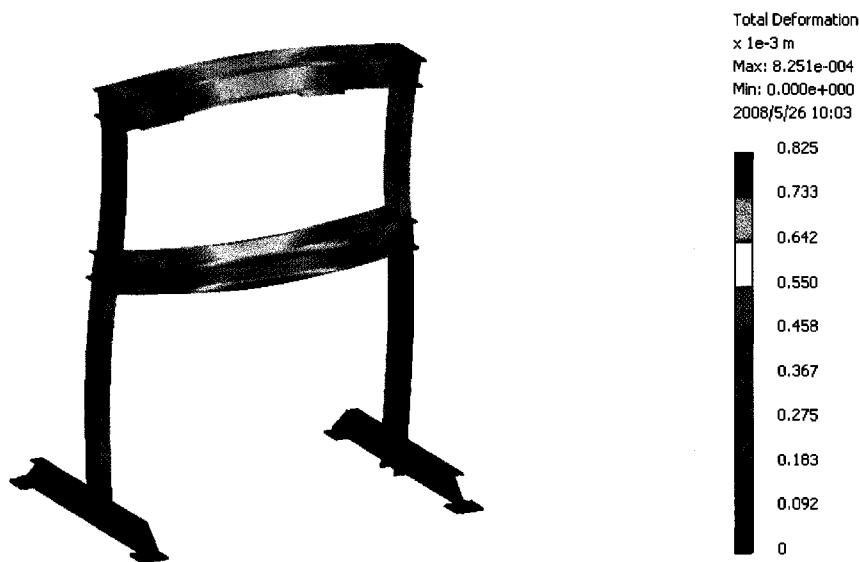


Figure 5.10 Résultats de l'analyse de déformation de la structure portante.

5.4.4. Circuit d'air comprimé

L'opération du nouveau moule de perméabilité se fait à partir du panneau qui contrôle le circuit d'air comprimé servant à actionner les pistons et le cadre de fermeture. Les pièces principales de ce système sont la valve à ressort, les contrôleurs de débit et le régulateur de pression. Un plan complet du circuit d'air est fourni à l'annexe E de même qu'une description plus détaillée de chacune de ses composantes.

5.5. Présentation et discussion sur le nouveau banc d'essai

La conception finale du banc d'essai pour les mesures de perméabilité unidirectionnelle est présentée à la Figure 5.11. Les premiers essais de mise en marche ont montré une bonne performance en général. La structure, qui supporte toutes les composantes du banc d'essai, est équipée de quatre roues pour faciliter ses déplacements. Ces roues sont munies d'un système de blocage pour permettre une bonne stabilité pendant l'emploi.

L'utilisation des cylindres pneumatiques pour le système de fermeture du moule a considérablement diminué le temps nécessaire à la réalisation des mesures de perméabilité. Le temps requis entre deux mesures est passé de 45 min à 10 min. Ceci ne prend pas en compte la durée de la mesure ni les éventuelles réouvertures du moule dans les cas d'une application incorrecte du scellant de silicone.

La longue course des pistons donne à l'opérateur un accès facile à la cavité du moule, tant pour la manipulation des échantillons avant les mesures que pour le nettoyage après l'essai. Un système de récupération de l'huile a été installé au-dessous du moule et du pot d'huile, ce qui aide beaucoup à maintenir la propreté du laboratoire.

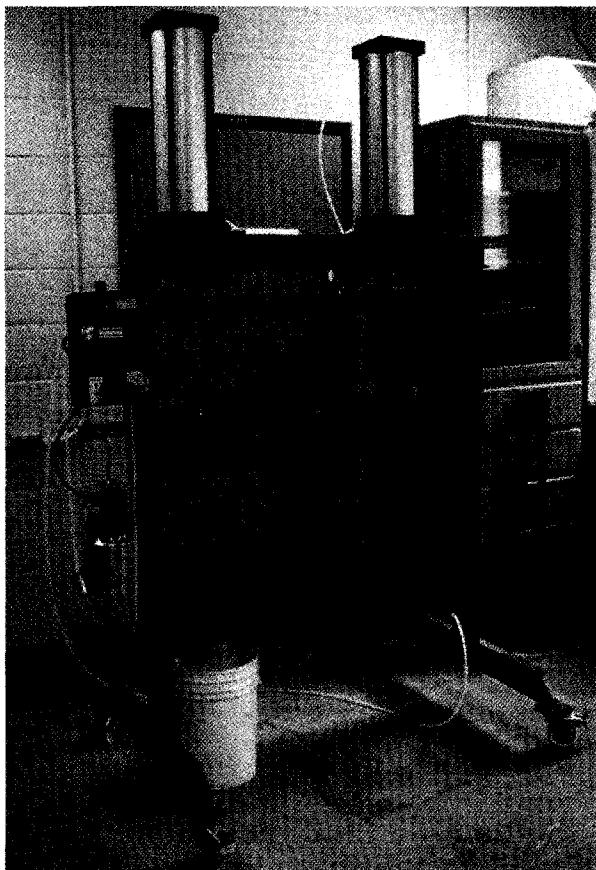


Figure 5.11 Nouveau banc d'essai pour les mesures de perméabilité unidirectionnelles.

5.6. Procédure d'utilisation du nouveau banc d'essai

Le système a été conçu pour être simple d'utilisation. Tous les contrôles se trouvent sur le panneau de commande situé à gauche de la structure. La procédure d'utilisation de l'appareil est décrite à l'annexe F.

CHAPITRE 6

COMPARAISON DES TECHNIQUES DE MESURES UNIDIRECTIONNELLE ET RADIALE POUR LA CARACTERISATION DE LA PERMEABILITE DE RENFORTS

6.1. Introduction

La fabrication des matériaux composites par injection ou infusion de la résine a connue une forte croissance sans cesse dans les dernières années. Ainsi, des procédés tels que *RTM*, *VARTM*, *VARI*, etc. sont de plus en plus utilisés pour des raisons technologiques, économiques et environnementales. Actuellement, la fabrication entraîne divers défis tels que l'imprégnation de pièces de grande taille ou de géométrie complexes. Dans ces cas, la conception des moules et le choix de la stratégie d'injection réalisés souvent par essais-erreurs devient impraticable.

D'une manière similaire, la modélisation numérique de ces procédés a connu un fort développement grâce aux progrès technologiques des ordinateurs. La demande des industriels a beaucoup contribué au développement des outils de simulation, qui permet entre autres, de réduire les coûts et les temps de conception des pièces composites. Dans ce but, la perméabilité des renforts reste un paramètre critique pour une conception fiable, et par conséquence, pour la réussite de la pièce finale.

Ce chapitre présente les résultats des mesures de perméabilité effectuées dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Connecticut [47] avec l'aide du professeur Richard Parnas. L'objectif de ce travail est de comparer les résultats des mesures de perméabilité obtenues avec deux techniques expérimentales différentes : l'approche unidirectionnelle et la radiale. Le renfort utilisé tout le long de cette étude est un tissu de fibres de basalte où aucune déformation par cisaillement n'est considérée.

Dans une première étape, des mesures de perméabilité ont été effectuées sur un banc d'essai radial à l'université de Connecticut par l'étudiant au doctorat Quiang Liu. Ces mesures ont permis de caractériser le tenseur de perméabilité d'un tissu tissé. D'une manière similaire, les perméabilités effectives ainsi que les perméabilités principales ont été mesurées à l'École Polytechnique de Montréal sur un banc d'essai unidirectionnel. Dans cette étape, le renfort utilisé ainsi que les montages expérimentaux respectifs sont présentés. Les résultats sont donnés pour chaque technique de mesure et comparés par une analyse de dispersion.

Finalement, une nouvelle série de mesures a été réalisée à l'École Polytechnique de Montréal selon la méthode unidirectionnelle. Un grand nombre de mesures a été effectué dans une seule direction, la chaîne, afin de permettre une analyse de dispersion plus précise. Les résultats sont présentés et discutés.

6.2. Description du renfort utilisé

Le renfort utilisé dans ce travail est un tissu sergé 3/1 de fibres de basalte fabriqué par la société canadienne Albarrie [48]. Le basalte est une roche volcanique issue d'un magma refroidi rapidement au contact de l'eau ou de l'air. C'est le constituant principal de la couche supérieure de la croûte océanique. Le mot basalte est emprunté du latin « basaltæ », lui-même probablement dérivé d'un terme éthiopien signifiant roche noire [49]. Le basalte est un matériau excellent au point de vue du comportement en température, des propriétés d'isolation thermique et acoustique, de la résistance mécanique, des caractéristiques électriques et de l'environnement.

Les fibres minérales de basalte ne sont pas nouvelles ; elles ont une histoire intéressante qui remonte aux efforts de développements principalement des Etats du nord-ouest des Etats-Unis et de l'URSS dans les années 60. A cette époque, on recherchait une meilleure fibre pour renforcer les composites pour des buts de défense [50]. Dans la dernière décennie, les fibres de basalte ont connu un fort intérêt dans la fabrication des composites à faible coût. En effet, l'avantage du basalte par rapport à d'autres fibres antifeu telles que silice, carbone, céramique, verre micacé est son prix intéressant, même si, au niveau des propriétés, il se situe à mi-chemin entre le verre E et ces concurrents hautes performances.

Les principales propriétés du basalte qui concernent les mesures de perméabilités dont sa densité surfacique et volumique sont données au Tableau 6.1. La fiche technique du renfort est donnée à l'annexe G.

Tableau 6.1 Principales propriétés des fibres de basalte.

Matériau	Fibres de basalte
Densité surfacique (gr/m ²)	750
Densité volumique (gr/m ³)	2.70E+06

6.3. Techniques expérimentales de mesure

Bien qu'il existe des modèles et des techniques prédictives de la perméabilité de renforts fibreux dans la littérature, sa valeur est souvent obtenue par des mesures expérimentales. Parmi les méthodes pour sa caractérisation, deux techniques sont largement utilisées : l'injection unidirectionnelle et l'injection radiale ou bidirectionnelle. Au chapitre 1, une vaste discussion a été effectuée sur ce sujet. Néanmoins, un résumé de leurs avantages et de leurs inconvénients est donné au Tableau 6.2. Une description des montages expérimentaux utilisés dans cette étude est présentée dans cette section.

Tableau 6.2 Avantages et inconvénients des techniques unidirectionnelle et radiale.

Unidirectionnelle
<u>Avantage :</u>
Caractérisation en régimes saturé et non-saturé Montage expérimental plus simple Bonne reproductibilité des essais Moins de sources d'erreurs
<u>Inconvénients :</u>
Trois mesures sont requises pour déterminer les perméabilités principales Possibles effets de bord Limitation de pressions élevées à faible taux de fibres (phénomène de "wash-out")
Radiale
<u>Avantage :</u>
Obtention des perméabilités principales à partir d'une seule mesure Il n'y a pas d'effets de bord Aucun phénomène de "wash-out"
<u>Inconvénients :</u>
Caractérisation en régimes non-saturé seulement En général, les banc d'essais sont beaucoup plus chers Faible reproductibilité des essais Déflexion des plaques du moule Le traitement des données est plus complexe Influence de la forme et de la taille du trou d'injection

6.3.1. Banc d'essai radial à l'Université de Connecticut

Un nouveau banc d'essai radial a été conçu à l'Université de Connecticut dans le cadre de la thèse de doctorat de M. Quiang Liu [51]. La Figure 6.1 montre le montage avec toutes ses composantes.

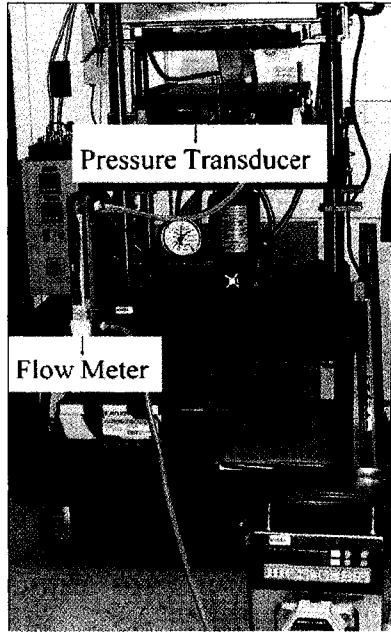


Figure 6.1 Banc d'essai radial à l'Université de Connecticut [51].

Le moule est constitué de deux plaques en acier pour minimiser les inconvénients de déformation des couvercles. Les dimensions générales sont 400 mm x 400 mm et une épaisseur de 32 mm. En arrière des plaques, des canaux de 19 mm de large sont disposés à tous les 22.5°. Entre 6 à 7 capteurs de pression peuvent être installés par rangée ou canal. Dans le cas des renforts non-conducteurs de l'électricité, les 96 capteurs de pression qui sont disponibles dans chaque plaque sont installés de façon à ce que leur tête soit à niveau avec la surface du moule. Pour des matériaux conducteurs tels que les tissus de carbone, les capteurs sont montés légèrement au-dessous de la surface de la cavité du moule afin d'éviter le contact avec le tissu. La Figure 6.2 montre clairement la disposition des capteurs dans chaque plaque.

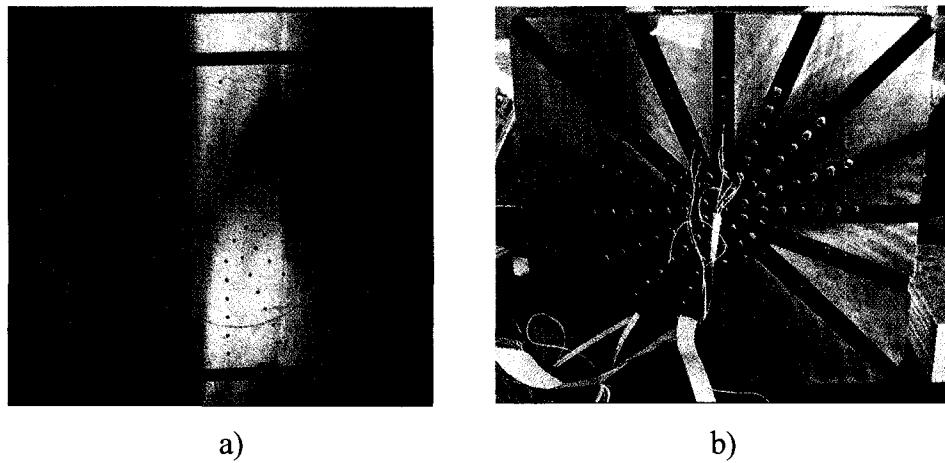


Figure 6.2 Disposition des capteurs pression pour chaque plaque : a) côté cavité du moule ; b) côté arrière.

L’acquisition de données des 192 capteurs est réalisée par deux cartes PCI-DIO 96 [52] de 96 canaux numériques chacune. L’information ainsi collectée est traitée par ordinateur à l’aide d’un logiciel conçu avec Labview à telle fin. La configuration des deux plaques est identique à l’exception du trou d’injection central qui est placé au centre de la plaque inférieure. Le diamètre du trou d’injection est de 3.19 mm. Dans la plaque supérieure, un capteur de pression est positionné directement sur le port d’injection pour détecter l’arrivée du fluide et lancer l’acquisition.

Les capteurs de pression ont été spécialement conçus pour ce moule. Pendant la mesure, chaque capteur est soumis à un voltage d’excitation de 5V. À ce moment, l’état du capteur affiché sur l’écran est « On ». Quand le fluide arrive au capteur, le voltage diminue au-dessous de 1V. Ceci permet de détecter l’arrivée du fluide à une position

donnée et l'état du capteur change à « Off ». Des informations plus détaillées sur la conception des capteurs sont disponibles au document original [51].

Le fluide utilisé est le DCS (« *Diluted Corn Syrup* »), un mélange préparé à base d'eau distillée et de sirop de maïs qui présente un comportement newtonien. Le rapport sirop/eau est de 11:3, ce qui donne un mélange avec une viscosité de l'ordre de 0.1 Pa.s à température ambiante. Cette viscosité est mesurée avant et après l'injection et sa moyenne est utilisée dans le calcul de la perméabilité.

6.3.2. Banc d'essai unidirectionnel de l'École Polytechnique de Montréal

Le banc d'essai utilisé dans le cadre de ce projet a été conçu et présenté au chapitre 5. Le montage du moule unidirectionnel est illustré à la Figure 6.3. La structure du banc d'essai est constituée par des poutres en C soudées. La fermeture du moule se fait sous l'action de pistons pneumatiques qui totalisent une force de fermeture de 26 kN. Pour des raisons de sécurité, la pression maximale d'injection est de 50 Psi, ce qui couvre la plage des pressions habituellement utilisées dans des procédés RTM classiques.

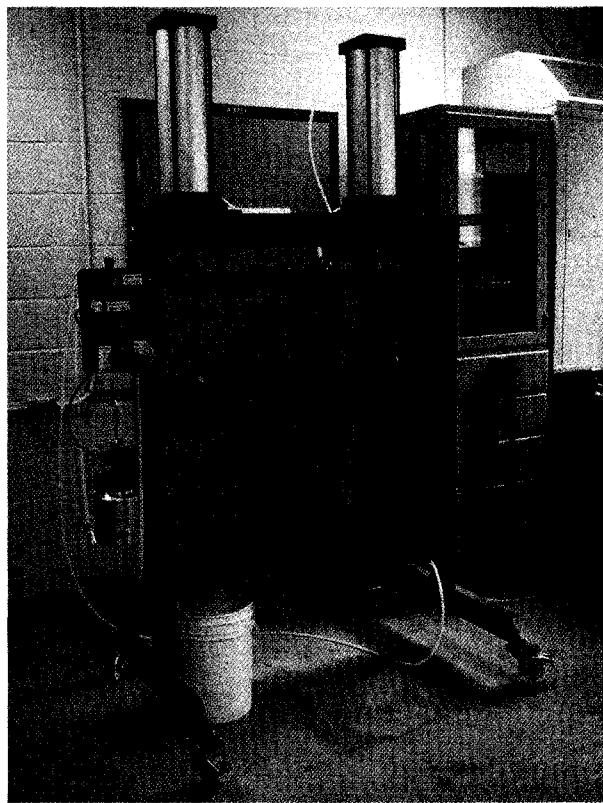


Figure 6.3 Photo du montage du banc d'essai de perméabilité.

Le moule est constitué de deux plaques rectangulaires de dimensions 130 mm x 930 mm placées dans un cadre en aluminium (cadre conteneur). Ces deux plaques, celle du bas et celle du haut, sont faites respectivement d'aluminium et de verre trempé. Un cadre en acier (cadre de fermeture) est utilisé afin d'assurer la fermeture du moule à l'aide de pistons pneumatiques. Un schéma des composantes est illustré à la Figure 6.4.

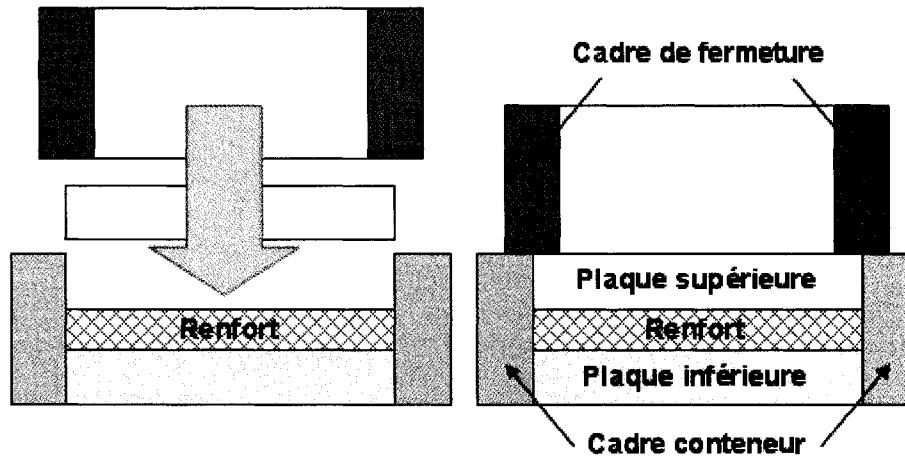


Figure 6.4 Composantes du moule unidirectionnel.

L'épaisseur de la cavité du moule est obtenue en soustrayant l'épaisseur des deux plaques de la hauteur du cadre en aluminium. Afin d'obtenir différentes épaisseurs de cavité, l'École Polytechnique de Montréal dispose de plusieurs modèles de cadre.

Le laboratoire de perméabilité où les essais sont effectués est une salle à température contrôlée, qui est maintenue à 23 °C. On peut donc supposer que la température du moule est la même que celle de l'air ambiant. Le fluide utilisé pour toutes les mesures de perméabilité est une huile de silicone 100 Cst commercialisé par la société Dow Corning. Ce fluide présente aussi un comportement newtonien.

6.4. Résultats expérimentaux selon la technique radiale

Les résultats des mesures de perméabilité sont présentés et discutés dans cette section. Tout d'abord, les résultats obtenus avec la méthode radiale sont reproduites tels que documentés dans le travail de Liu [51]. Ensuite, les valeurs de perméabilité obtenues avec la méthode unidirectionnelle sont présentées et analysées. Finalement, une comparaison est réalisée à l'aide des analyses de dispersion.

6.4.1. Résultats expérimentaux selon la technique radiale

La profondeur de la cavité du moule a été fixée à 4.66 mm pour toutes les mesures effectuées. Pour chaque échantillon, six couches du tissu de basalte ont été découpées et empilées. Un taux de fibres moyen est calculé à partir des propriétés données au Tableau 6.1. Il est égal à 35.75%. Notez que le poids des échantillons n'ont pas été pris en compte dans cette série de mesures, et par conséquence, la densité surfacique est supposée constante.

Une série de 64 mesures de perméabilité ont été effectuées en respectant les mêmes paramètres d'injection entre les mesures. Les résultats sont reproduits au Tableau 6.3. La notation K_{xx} et K_{yy} utilisée par Liu [51] représentent les perméabilités principales qui sont symbolisées dans cette thèse par K_1 et K_2 respectivement. La variable « *Theta* », dénoté par β dans ce travail, est l'angle formé entre la direction principale et la direction de la chaîne.

Tableau 6.3 Résultats des mesures radiales de perméabilité [51].

ID	loga	Theta	Kxx	Kyy	loga	Theta	Kxx	Kyy
0405-1	0.096884	0.2929				0.094419	3.534825	
0405-2	0.155295	-4.64367				0.184949	-3.46451	
0405-3	0.118772	-10.7997				0.12824	-13.9062	
0413-1	0.12339	-7.60775	1327.71	999.3391	0.130963	0.458852	1333.058	986.0208
0413-2	0.082298	4.778073	1464.382	1211.592	0.12432	-12.8065	1529.482	1148.748
0413-3	0.134586	-13.1252	1131.291	829.8284	0.136112	-15.3828	1128.189	824.6497
0413-4	0.118422	-6.3469	1438.07	1094.858	0.143615	2.653053	1479.664	1063.037
0413-5	0.085425	3.529526				0.090684	-2.62158	
0415-1	0.147156	9.128619	988.46	704.3735	0.128191	7.034799	963.0309	716.885
0415-2	0.143744	-9.28756	1210.698	869.544	0.130483	-7.13512	1196.146	885.7302
0415-3	0.115867	-16.0956	1087.025	832.4784	0.126767	-8.08547	1095.077	817.8572
0425-3	0.12533	-9.92542	1166.669	874.2131	0.144511	-6.40781	1187.123	851.1083
0425-4	0.149627	-8.61709	946.8445	670.8907	0.136656	-7.93446	932.1263	680.4857
0425-5	0.156897	-3.9895	970.4042	676.1695	0.157225	-9.12721	965.2786	672.0912
0425-6	0.162523	-5.77286	909.8429	625.8108	0.173183	-5.5768	919.5475	617.1509
0505-2	0.141866	4.19954	794.0194	572.7496	0.147382	3.150276	793.8746	565.4182
0505-4	0.156375	-6.08167	1147.404	800.4631	0.153408	-5.85912	1139.017	800.0583
0505-5	0.135911	4.357775				0.130618	3.892419	
0510-1	0.169134	-1.37515				0.196449	-8.81238	
0510-2	0.188523	-2.34084	1103.739	715.0611	0.228292	-5.93528	1144.623	676.6592
0510-3	0.156072	-4.65644				0.161365	-5.74544	
0510-5	0.097557	-10.9875	840.7552	671.6026	0.117252	-18.5966	856.3115	653.7021
0510-6	0.099127	-7.42883				0.102821	-8.84625	
0510-7	0.104302	-4.57701	651.0305	512.0349	0.129272	-8.08746	667.8574	495.9196
0510-8	0.11747	-12.7466	786.8963	600.4088	0.132987	-11.5266	800.8383	589.6001
0515-1	0.103383	-8.45864				0.126876	-10.8707	
0515-2	0.152292	0.533493				0.133806	-3.49147	
0515-3	0.161858	-6.10946				0.184855	-8.14595	
0515-4	0.143553	2.164104	608.0418	436.8988	0.128362	-4.44055	592.9894	441.2498
0515-5	0.104893	-7.68522	1045.127	820.8742	0.132563	-13.9625	1080.51	796.2809
0524-1	0.111119	-3.53377	965.5759	747.5966	0.136437	-6.22945	981.6216	716.9808
0524-2	0.125217	-2.40683	876.9897	657.3208	0.145748	-5.17275	890.0151	636.2816
0524-3	0.138448	-10.2389	863.3397	627.6738	0.140705	-13.7643	858.8403	621.1655
0524-4	0.157735	-1.89087	845.9137	588.2893	0.124039	-7.80246	809.2447	608.1916
0527-1	0.092032	-18.5545	749.8615	606.6646	0.110951	-17.7215	763.0673	591.033
0527-2	0.163418	-1.01776	907.2625	622.7521	0.174676	-5.09244	911.6676	609.7626
0527-3	0.161282	1.364053	956.7595	659.9654	0.150417	-0.40696	929.0343	657.0742
0527-4	0.132615	0.002001	958.1004	705.9861	0.142005	-3.61445	961.1701	693.0993
0527-5	0.124071	3.452776	762.0299	572.6661	0.126605	-1.85193	757.608	566.0298
0527-7	0.082586	-7.18659	608.7373	503.32	0.088367	-14.6389	810.3306	497.9648
0602-1	0.19178	4.400352	826.8025	531.6454	0.174371	1.004715	804.9239	538.7454
0602-2	0.132474	0.949793	922.4366	679.9266	0.137678	-1.34246	919.2681	669.5213
0602-3	0.150146	-2.04782	920.634	651.5397	0.122258	-3.70563	880.4144	664.3997
0602-4	0.177295	3.151192	830.3892	552.0601	0.179017	-1.30154	823.753	545.4809
0602-5	0.152641	-3.89749	821.4869	578.0425	0.154554	-6.1433	818.0934	573.1246
0602-6	0.159989	3.419829	737.779	510.4315	0.155793	-0.83498	728.8182	509.1267
0602-7	0.172373	3.038696	618.9771	416.1994	0.159513	2.599716	607.1098	420.4885
0602-8	0.146938	-3.41204	562.8731	401.3027	0.141268	-8.84545	559.5409	404.1694
0602-9	0.10533	-3.70237	568.492	446.0606	0.11083	-7.69841	567.1411	439.4011
0804-2	0.097433	-13.0929				0.120444	-22.0135	
0804-3	0.130552	-8.07827	682.1636	505.0522	0.142366	-14.9565	690.7132	497.6586
0804-4	0.10719	-9.85397	690.1814	539.2291	0.125748	-14.7002	703.5549	526.6836
0804-5	0.094332	-5.15549	643.3769	517.7664	0.11767	-9.58761	658.4257	502.1536
0804-6	0.12335	-5.40437	614.2626	462.3854	0.110447	-8.99647	602.3723	467.109
0806-1	0.197314	-2.18888	494.5834	313.9967	0.188062	-1.71618	484.2067	314.0282
0806-2	0.147229	-3.20385	663.1552	472.4827	0.141823	-6.96007	653.8379	471.6792
0806-3	0.194454	-0.33747	703.1658	449.3692	0.198139	-4.20772	702.7259	445.2941
0806-4	0.199817	11.50932	703.1469	443.8425	0.167293	7.425814	672.663	457.6198
0806-5	0.137705	-2.281	715.0206	520.7316	0.135805	-6.69624	709.3933	518.8983
0806-6	0.112573	-0.50719	725.5196	559.856	0.132532	-4.48361	736.9124	543.1054
0806-7	0.18173	1.212631	730.8484	480.9474	0.176093	-2.28846	720.4829	480.3201
0806-8	0.165523	3.801168	793.3537	541.931	0.171597	0.426039	791.74	533.3167
0806-9	0.10093	-10.7489	701.3705	555.9261	0.090406	-20.2769	686.8201	557.7466
0806-10	0.142373	-0.0207	825.3663	594.6674	0.16387	-8.33454	838.1319	574.701

Étant donné que le taux de fibres considéré est le même pour toutes les mesures, la valeur des perméabilités principales K_{xx} et K_{yy} peut être obtenue directement à partir de la moyenne. D'une manière similaire, l'angle principal d'écoulement est obtenu. Ces résultats moyennés sont montrés pour chaque plaque du moule au Tableau 6.4 accompagnés par ses écart-types. Notez que la perméabilité est exprimée en Darcy pour la simplicité de lecture ($1 \text{ m}^2 = 1.01325 \times 10^{12}$). Une première analyse de ces résultats met en évidence une grande variation des perméabilités par rapport à ses moyennes, ce qui est discuté dans les sections suivantes.

Tableau 6.4 Résultats moyens pour chaque plaque du moule [51].

	Anisotropie	Angle θ (°)	K_{xx}	K_{yy}
Plaque inférieure	1.374 ± 0.097	-3.47 ± 5.60	857.85 ± 218.88	625.71 ± 174.19
Plaque supérieure	1.389 ± 0.091	-6.34 ± 6.35	858.43 ± 227.46	617.98 ± 166.71

6.4.2. Résultats expérimentaux selon la technique unidirectionnelle

Une série de mesures a été effectuée avec l'approche unidirectionnelle dans trois directions du renfort : 0° (chaîne), 45° et 90° (trame). En effet, tel que discuté auparavant, cette technique requiert des trois valeurs de perméabilité mesures dans trois directions pour retrouver les composantes principales du tenseur perméabilité.

La cavité du moule a été fixée à 4.62 mm pour toutes les mesures. Les échantillons, ayant six couches, ont été découpés de 110 mm x 400 mm. A différence de la technique

précédente, les échantillons ont été pesés avant chaque mesure et sa densité surfacique calculée. En conséquence, le taux volumique de fibres peut varier d'une mesure à l'autre.

Les résultats des mesures de perméabilité unidirectionnelles sont donnés au Tableau 6.5 pour chaque direction mesurée. Les taux de fibres calculés montrent une importante variation de l'ordre de 10%. Bien que cette variation ne puisse pas être attribuée entièrement à des variations de la densité surfacique des tissus, elle ne doit pas être négligée. En effet, d'autres facteurs tels que la perte de fils pendant la manipulation des échantillons durant la découpe et le pesage influencent la densité calculée, et par conséquence, le taux de fibres.

Tableau 6.5 Résultats des mesures unidirectionnelles de perméabilité.

Direction	ID essai	Vf (%)	Perméabilité (m ²)	Perméabilité (Darcy)
0°				
(chaîne)	0826-1	37.95	8.597E-10	871
	0829-1	37.37	8.349E-10	846
	0829-3	37.56	8.408E-10	852
	0901-1	37.9	8.034E-10	814
	0902-2	34.94	1.336E-09	1354
	0902-3	36.04	1.168E-09	1183
	0902-4	35.83	1.108E-09	1123
45°				
	0830-3	36.71	7.55E-10	765
	0831-1	36.89	8.24E-10	835
	0831-2	39.11	6.11E-10	619
	0831-3	39.71	5.55E-10	562
	0831-4	40.07	5.46E-10	553
90°				
(trame)	0829-4	37.32	6.000E-10	608
	0830-1	38.56	5.569E-10	564
	0830-2	38.68	5.493E-10	557

À partir des résultats du Tableau 6.5, les perméabilités principales peuvent ensuite être obtenues en fonction des moyennes des perméabilités effectives selon chaque direction mesurée. Afin de pouvoir effectuer soit une analyse de dispersion ou calculer la moyenne d'un groupe de valeurs, il faut s'assurer que ces valeurs soient de même nature. Dans le cas des mesures de perméabilité, le taux de fibre doit être le même pour effectuer une analyse fiable, car la perméabilité dépend de celui-ci. Dans ce but, deux méthodes ont été utilisées. Une première méthode, qui est proposée dans cette thèse, repose sur la relation de Kozeny-Carman. Tel que proposé par Liu [51], la deuxième méthode est utilisée et comparée.

6.4.3. Méthode de Kozeny-Carman pour la correction des valeurs de perméabilité effectives au même taux de fibres

L'approche proposée ici repose sur la relation de Kozeny-Carman, qui provient de l'étude des milieux poreux granulaires. Cette relation bien connue entre perméabilité et propriétés des pores fut proposée par Kozeny (1927) et modifiée par Carman (1937). L'équation résultante est largement connue sous le nom Kozeny-Carman (K-C), bien que ses auteurs n'aient jamais publié ensemble [54]. Dans le domaine des matériaux composites, cette relation donne la perméabilité d'un renfort fibreux en fonction de la porosité ou du taux volumique de fibres sous la forme suivante :

$$K = \frac{r_f^2}{4k} \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \quad (6.1)$$

où r_f est le rayon de la fibre, V_f le taux volumique de fibres, et k est la constante de Kozeny. Bien que la valeur de k change avec le taux volumique de fibres, on fait l'hypothèse que ce paramètre peut être approché par une constante dans une plage de taux volumique de fibres de l'ordre de $\pm 5\%$. Le terme $r_f^2/4k$ est dérivé d'abord à partir des essais expérimentaux réalisés, c'est-à-dire qu'on peut estimer la valeur de ce terme à partir de la perméabilité effective mesurée et du taux volumique de fibres correspondant.

$$\frac{r_f^2}{4k} = K_{mesuré} \frac{Vf_{mesuré}^2}{(1 - Vf_{mesuré})^3} \quad (6.2)$$

La perméabilité corrigée est ensuite calculée pour le taux volumique de fibres désiré soit dans le cas présent pour le taux de fibres moyen :

$$K_{corrigée} = \frac{r_f^2}{4k} \frac{(1 - Vf_{désiré})^3}{Vf_{désiré}^2} \quad (6.3)$$

Un schéma de cette méthodologie est donné à la Figure 6.5.

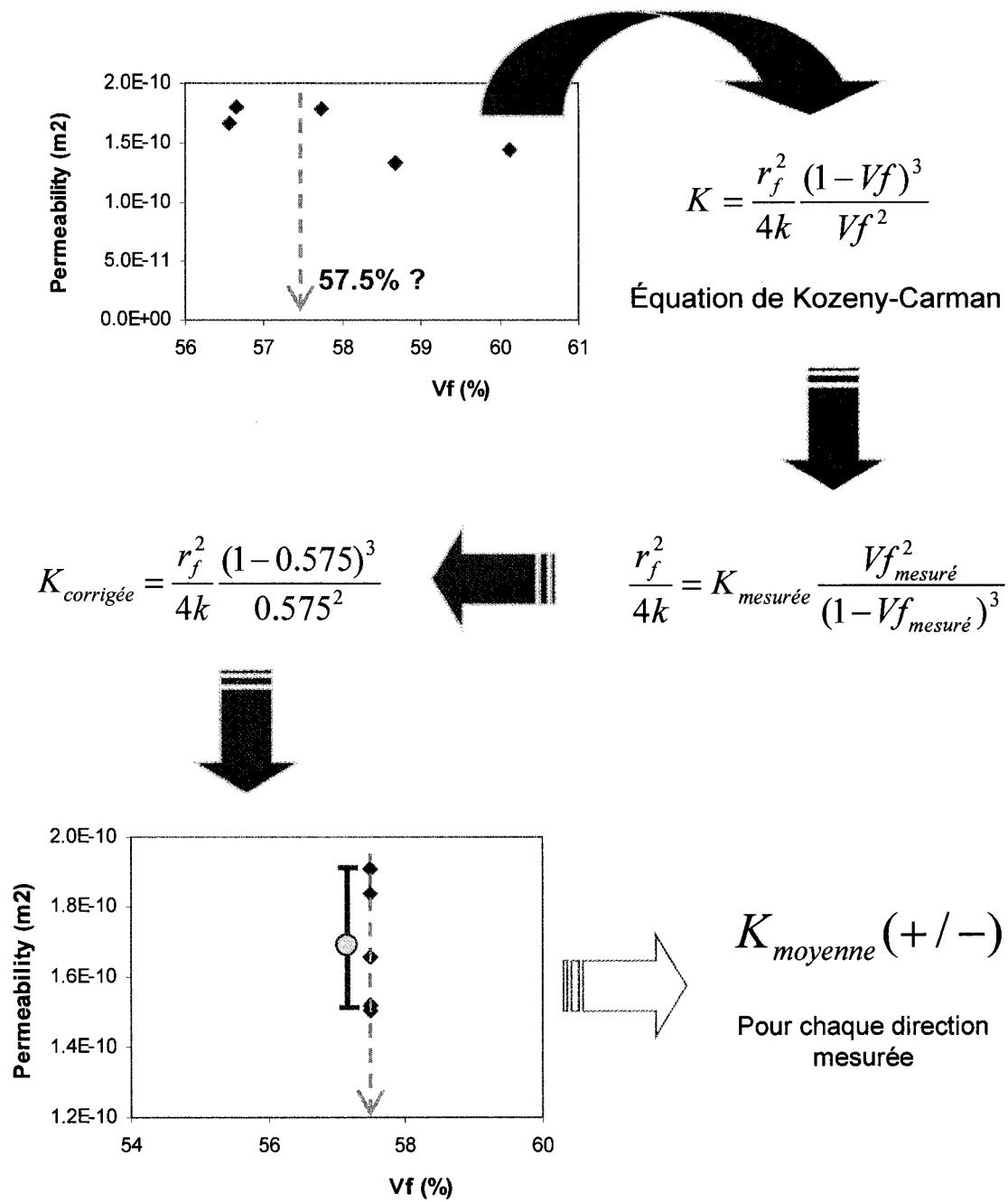


Figure 6.5 Schéma de la méthode de correction proposée à partir de la relation de Kozeny-Carman.

6.4.4. Méthode log-log pour la correction des valeurs de perméabilité effectives au même taux de fibres

La deuxième méthode, utilisée à titre de comparaison, consiste à extrapoler la valeur de la perméabilité équivalente pour chaque taux de fibres désiré. Cette approche est fondée sur les travaux de Hoes et al. [53]. Liu [51] propose de tracer le logarithme naturel de la perméabilité en fonction du logarithme naturel du taux de fibres. En effet, la perméabilité montre une dépendance par rapport au taux de fibres qui peut être approchée par une fonction exponentielle inverse. Quand cette dépendance est tracée sur des axes log-log, une droite est obtenue. À titre d'exemple, la Figure 6.6 illustre cette étape pour une série de mesures effectuées sur des renforts en fibres de basalte.

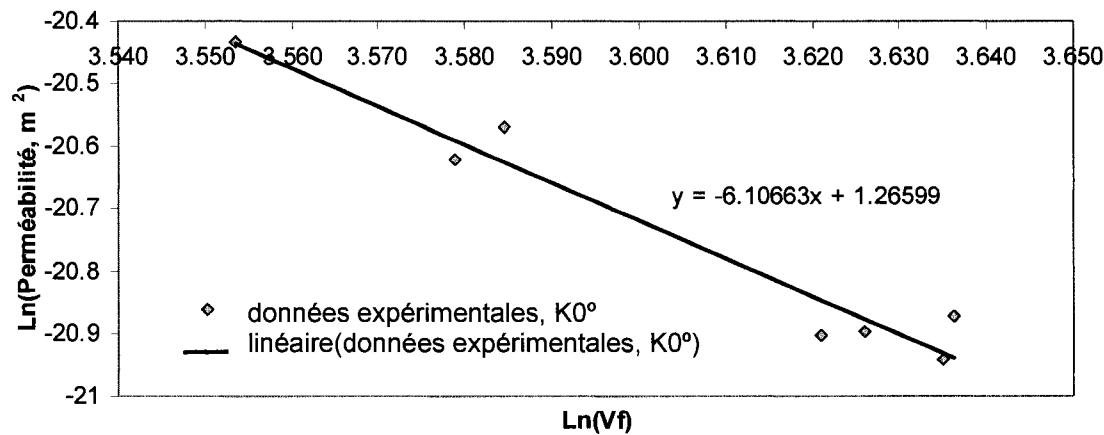


Figure 6.6 Régression linéaire pour corriger le taux de fibres.

La perméabilité de chaque résultat est extrapolée au taux de fibres désiré en appliquant la relation linéaire illustrée à la Figure 6.6 obtenue par régression linéaire des valeurs expérimentales. Il suffit d'effectuer les trois opérations suivantes pour tous les résultats

afin de les ramener à un même taux de fibres. Cette opération illustrée à la Figure 6.6 comprend les trois étapes suivantes :

a) Obtenir l'équation de la droite par régression linéaire, qui est la tendance de l'ensemble des observations :

$$y = mx + b \quad (6.4)$$

b) Traduire la relation linéaire en fonction de l'écart algébrique h selon l'ordonnée par rapport à la courbe.

$$y = mx + (b + h) \quad (6.5)$$

c) Calculer la perméabilité au taux de fibres moyen avec la nouvelle relation linéaire obtenue.

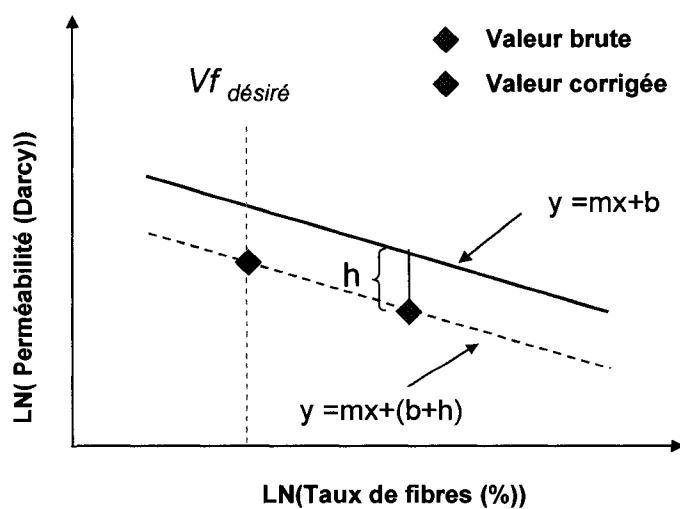


Figure 6.7 Extrapolation des valeurs de perméabilités brutes au taux de fibres désiré.

6.4.5. Obtention des perméabilités principales pour les mesures unidirectionnelles

Une fois toutes les valeurs ramenées au même taux de fibres, soit ici 38%, les moyennes des perméabilités effectives dans chaque direction peuvent être calculées. Les perméabilités principales K_1 et K_2 sont ensuite obtenues en suivant la méthode de l'ellipse présentée au chapitre 1. Le Tableau 6.6 donne les résultats de mesures brutes et corrigées par le deux méthodes décrites aux sections précédentes. D'une manière similaire, les perméabilités moyennes calculées pour chaque direction mesurée et les perméabilités principales d'écoulement sont résumées aux Tableaux 6.7 et 6.8 respectivement.

Tableau 6.6 Résultats des mesures unidirectionnelles de perméabilité brutes et corrigées.

Direction	ID essai	Données expérimentales			Méthode K-C			Méthode log-log			
		Vf (%)	Perméabilité (m ²)	(Darcy)	r ² /4k (m ²)	Kcorrigée (Darcy)	Ln(Vf)	Ln(K)	Kcorrigée (m ²)	(Darcy)	
0° (chaîne)	0826-1	37.95	8.597E-10	871	5.18E-10	8.56E-10	868	3.636	-20.87	8.55E-10	866
	0829-1	37.37	8.349E-10	846	4.75E-10	7.84E-10	795	3.621	-20.90	7.50E-10	760
	0829-3	37.56	8.408E-10	852	4.87E-10	8.05E-10	816	3.626	-20.90	7.83E-10	794
	0901-1	37.9	8.034E-10	814	4.82E-10	7.96E-10	807	3.635	-20.94	7.92E-10	802
	0902-2	34.94	1.336E-09	1354	5.92E-10	9.78E-10	991	3.554	-20.43	8.02E-10	813
	0902-3	36.04	1.168E-09	1183	5.80E-10	9.58E-10	971	3.585	-20.57	8.64E-10	876
	0902-4	35.83	1.108E-09	1123	5.38E-10	8.89E-10	901	3.579	-20.62	7.64E-10	774
45°	0830-3	36.71	7.55E-10	765	4.01E-10	6.63E-10	672	3.603	-21.00	7.55E-10	765
	0831-1	36.89	8.24E-10	835	4.46E-10	7.37E-10	747	3.608	-20.92	8.41E-10	852
	0831-2	39.11	6.11E-10	619	4.14E-10	6.84E-10	693	3.666	-21.22	8.04E-10	815
	0831-3	39.71	5.55E-10	562	3.99E-10	6.59E-10	668	3.682	-21.31	7.87E-10	797
	0831-4	40.07	5.46E-10	553	4.07E-10	6.72E-10	681	3.691	-21.33	7.99E-10	810
90° (trame)	0829-4	37.32	6.000E-10	608	3.40E-10	5.61E-10	568	3.620	-21.23	6.00E-10	608
	0830-1	38.56	5.569E-10	564	3.57E-10	5.90E-10	598	3.652	-21.31	6.02E-10	610
	0830-2	38.68	5.493E-10	557	3.56E-10	5.89E-10	597	3.655	-21.32	5.99E-10	606

Tableau 6.7 Valeurs moyennes de la perméabilité pour chaque direction mesurée.

	Correction K-C (m ²)	Correction K-C (Darcy)	Correction log-log (m ²)	Correction log-log (Darcy)
K_{eff}^0	8.67E-10	878	8.01E-10	812
K_{eff}^{45}	6.83E-10	692	6.86E-10	695
K_{eff}^{90}	5.80E-10	588	5.75E-10	583

Tableau 6.8 Valeurs de perméabilités principales obtenues avec PrinPer à partir de valeurs moyennes corrigées selon les deux méthodes.

	Correction K-C m ²	Correction K-C Darcy	Correction log-log m ²	Correction log-log Darcy
K_1	8.68E-10	879	8.03E-10	814
K_2	5.80E-10	587	5.74E-10	582
β		177.55°		4.14°
K_1/K_2		1.50		1.40

À partir des ces résultats, une différence remarquable est observée entre les deux méthodes. Les perméabilités principales estimées après correction par K-C sont plus élevées que celles obtenues pour la méthode log-log. Une différence de l'ordre de 7% est observée dans le cas de la perméabilité principale K_1 tandis que pour K_2 cette différence est au-dessous de 1%. L'effet que cette variation est plus importante pour K_1 que pour K_2 est expliquée par la sensibilité de la méthode de l'ellipse, ce qui a été déjà discuté au chapitre 1. D'une manière similaire, l'orientation de l'écoulement elliptique

montre une différence d'environ 7°. Les ellipses de perméabilité obtenues avec *PrinPer* sont illustrées graphiquement aux Figures 6.8 et 6.9 pour les deux méthodes.

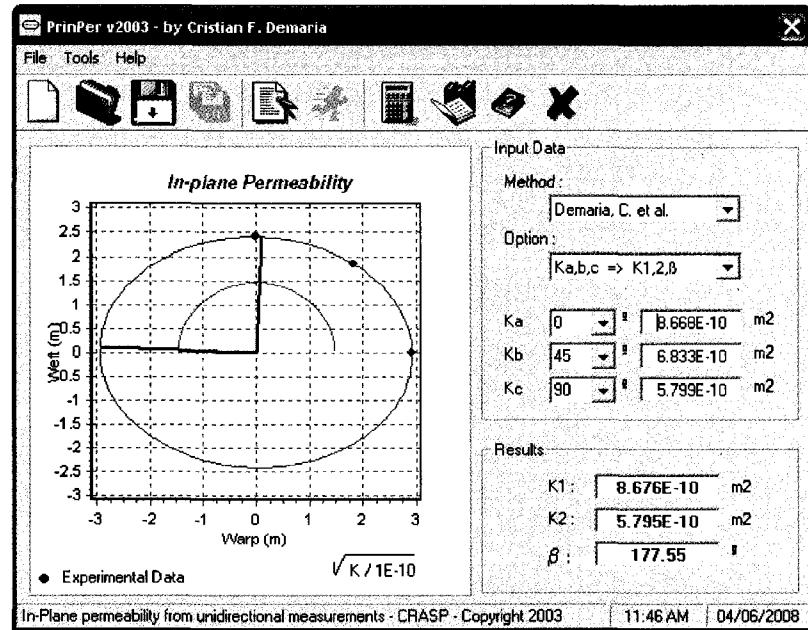


Figure 6.8 Tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode K-C).

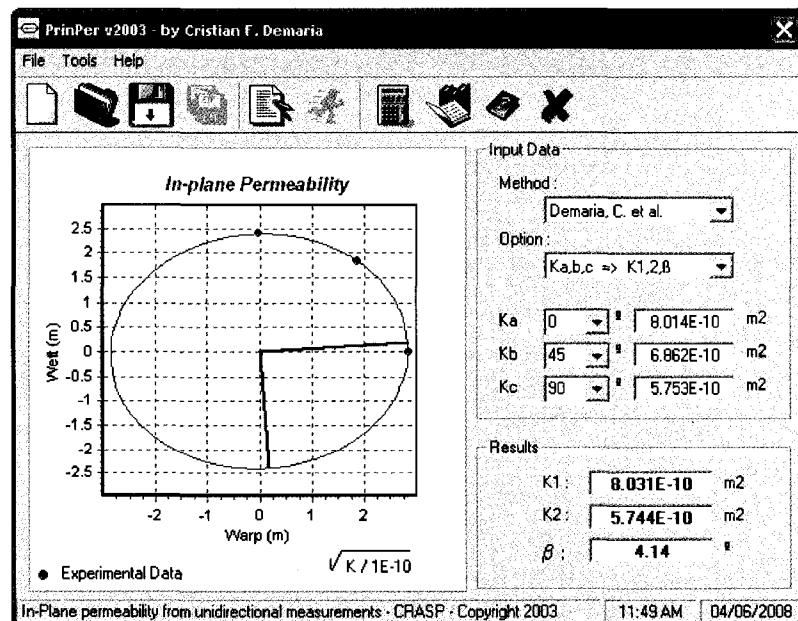


Figure 6.9 Tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode log-log).

6.5. Comparaison des résultats et analyse de dispersion

Les résultats de perméabilités principales obtenues pour les deux techniques de mesure sont regroupés au Tableau 6.9. Pour de raisons de simplicité, les valeurs de perméabilités ne sont données qu'en Darcy. Notez que les valeurs pour la méthode de mesure radiale données au Tableau 6.9 représentent une moyenne des valeurs affichées au Tableau 6.4 pour les plaques supérieure et inférieure.

Tableau 6.9 Comparaison des perméabilités principales obtenues avec les deux techniques de mesures.

	Radiale	Unidirectionnelle	
		K-C	log-log
K_1 (darcy)	858	879	814
K_2 (Darcy)	622	587	582
β (°)	-4.91	-2.45	4.14
K_1/K_2	1.38	1.50	1.40

En général, une bonne corrélation est observée entre les valeurs de perméabilités obtenues avec les deux techniques de mesures. Malgré les différences observées, elles restent dans l'intervalle d'erreur propre aux techniques expérimentales de mesure. Les résultats obtenus pour la technique unidirectionnelle en utilisant la méthode de correction proposée dans cette thèse sont bien en accord avec ceux obtenus avec la méthode radiale. Dans le cas de la perméabilité principale K_1 , une différence de l'ordre de 2% est observée par rapport à celle obtenue avec la technique radiale. En faisant la

même comparaison pour la méthode log-log, cette différence est de 5%. D'une manière similaire, une différence de 5% et 6% est obtenue pour la perméabilité principale K_2 .

Une bonne corrélation est aussi observée pour l'orientation principale de l'écoulement elliptique. Celle-ci, qui est donnée par l'angle formé entre la perméabilité principale K_1 et la direction de la chaîne (0°), est trouvée presque alignée avec la direction 0° . Autrement dit, l'ellipse de perméabilité est orientée dans la direction des fibres de la chaîne. Une différence d'environ 2° et 10° est trouvée pour les méthodes K-C et log-log respectivement. Ces résultats permettent de démontrer la fiabilité de la méthode de correction K-C proposée ici.

Tel que mentionné au chapitre 1, la reproductibilité de résultats obtenus par ces deux techniques de mesure, dont la méthode radiale et l'unidirectionnelle, a été toujours sujet de discussion. Afin de la comparer, une analyse de dispersion a été effectuée pour les mesures réalisées selon la direction 0° .

Une fois toutes les valeurs ramenées au même taux de fibres, il est possible de procéder à l'analyse de dispersion. Pour ce faire, une loi normale a été utilisée afin de créer la courbe de dispersion selon une distribution Gaussienne. Cette distribution normale est représentée par l'équation suivante :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{\left(\frac{-(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (6.6)$$

où x est la perméabilité pour un essai individuel, \bar{x} la perméabilité moyenne pour la direction courante et σ l'écart-type.

En appliquant l'équation (6.6) à un certain nombre de valeurs, la courbe de la Figure 6.10 donne l'allure de la dispersion obtenue pour la loi de probabilité normale.

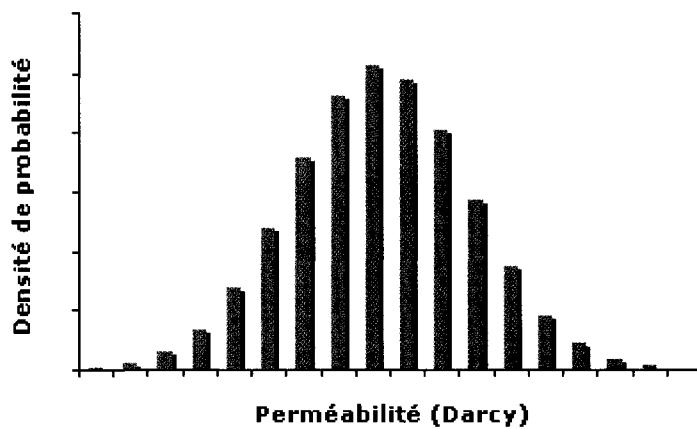


Figure 6.10 Forme générale de répartition des résultats selon la loi normale

La Figure 6.10 permet de visualiser la densité de probabilité sur l'ordonnée en fonction de la perméabilité sur l'abscisse. La densité de probabilité n'est qu'une valeur statistique utilisée pour calculer la probabilité en intégrant l'équation (6.6) de la loi normale. Toutefois, la probabilité est habituellement cherchée dans les tables de la loi normale.

Les valeurs de probabilité avec la loi normale se calculent habituellement dans des intervalles de confiance de 95% ou 99%. Dans le présent travail, les valeurs de probabilité sont calculées pour un niveau de confiance de 95%. La Figure 6.11 illustre graphiquement la signification de ce pourcentage.

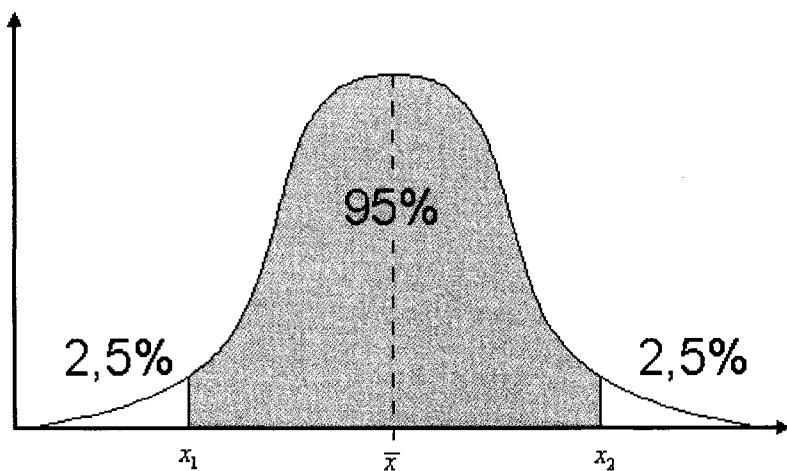


Figure 6.11 Représentation des bornes du 95% des résultats sous la courbe normale.

Pour trouver les limites de la plage de valeurs dans laquelle ils se trouvent 95% des résultats, il faut appliquer l'équation (6.7) à l'aide de la cote Z correspondant à 95% des tables de la loi normale. La cote Z est une mesure statistique qui tient compte de la moyenne et de l'écart-type d'un groupe de résultats. Pour 95% des valeurs, les cotes Z sont de -1,96 et 1,96 pour les limites inférieure et supérieure respectivement. L'équation qui permet d'évaluer cette déviation est :

$$x = (Z\sigma) + \bar{x} \quad (6.7)$$

où x est la valeur de la borne, z la cote Z de cette valeur de borne, σ l'écart type et \bar{x} la valeur moyenne de la perméabilité.

Les résultats de dispersion avec ces intervalles de confiance sont donnés aux Figures 6.12 à 6.14 pour les techniques de mesure. La Figure 6.12 montre la dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° (approche radiale) avec son intervalle de confiance de 95%, soit de 418 à 1289 Darcy. Ceci permet d'affirmer qu'il y a 95 % des chances que des résultats des mesures de perméabilité dans la direction 0° soient regroupés dans cette plage.

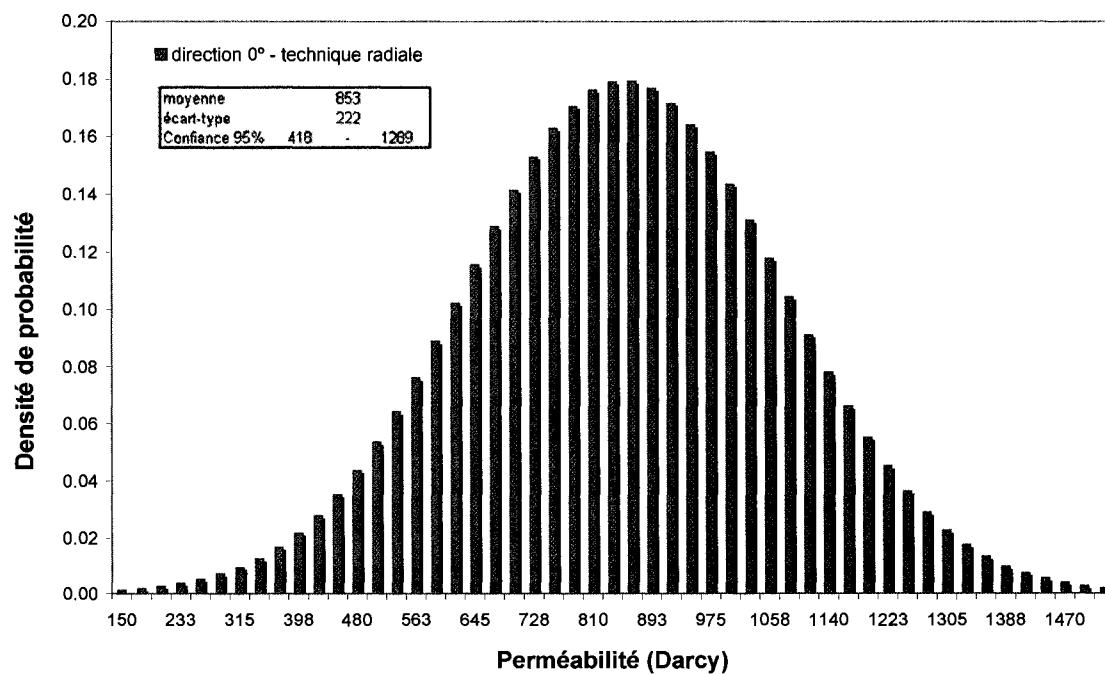


Figure 6.12 Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° (technique radiale)

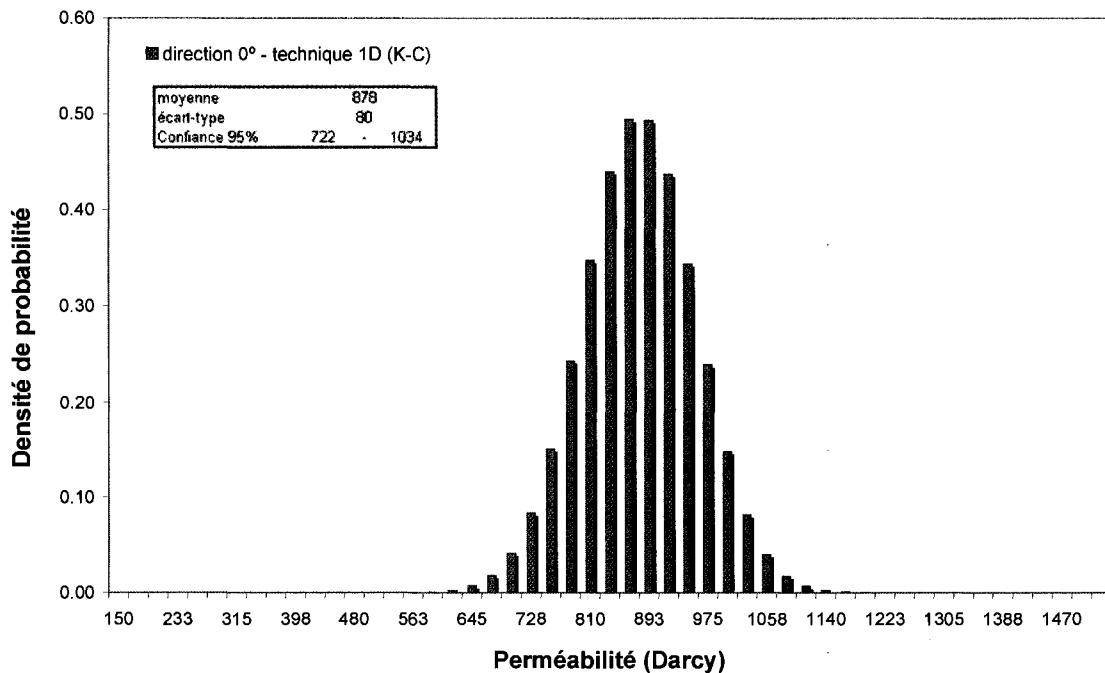


Figure 6.13 Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° (technique unidirectionnelle – correction K-C).

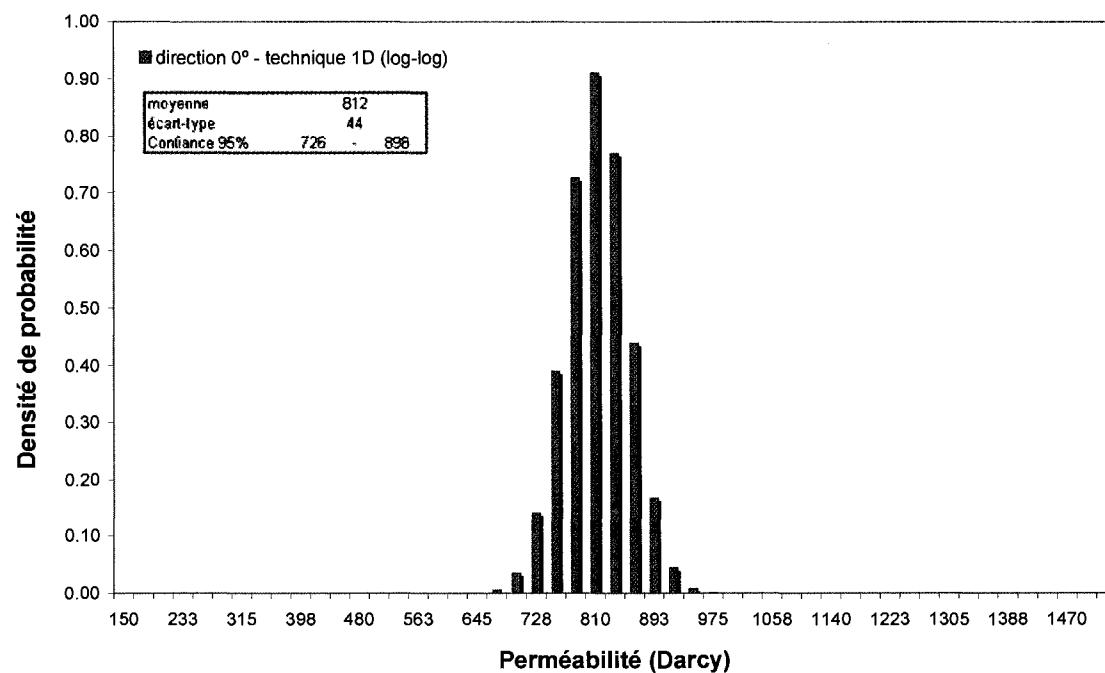


Figure 6.14 Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° (technique unidirectionnelle – correction log-log).

D'une manière similaire, la dispersion obtenue pour la technique unidirectionnelle en utilisant les méthodes de correction K-C et log-log est présentée aux Figures 6.13 et 6.14. D'après la Figure 6.13, l'intervalle de confiance pour la méthode de correction K-C est de 722 à 1034 Darcy. De même, l'intervalle de confiance pour la méthode log-log est de 726 à 898 Darcy tel qu'observé à la Figure 6.14.

Finalement, la Figure 6.15 présente une comparaison des dispersions obtenues dans cette étude. Ces résultats montrent une claire différence entre les deux techniques de mesure. La dispersion de résultats est largement plus grande pour la technique radiale. L'écart-type obtenu pour cette dernière est 222 Darcy, tandis que pour la technique unidirectionnelle est 80 Darcy pour la méthode K-C et 44 Darcy pour la méthode log-log. En effet, plus l'écart-type est élevé, plus grande est la dispersion des observations d'une variable.

Tel que discuté par Liu [51], cette grande différence trouvée entre les deux technique de mesure peut être attribuée au fait que seulement 7 mesures ont été réalisées dans la direction 0°. Dans ce but, une nouvelle série de mesures de perméabilité a été effectuée dans cette direction. Au total, 33 mesures sont maintenant analysées et comparées à la Figure 6.16. Les résultats montrent encore une différence entre les deux techniques. Les nouveaux écart-types pour la technique unidirectionnelle sont maintenant 142 Darcy (méthode K-C) et 160 Darcy (méthode log-log). Notez que dans le cas de la méthode K-C, la variation de la moyenne est au-dessous de 1%. En revanche, cette variation est de

l'ordre de 31% pour la méthode log-log, ce qui démontre que la méthode proposée est plus efficace que la méthode log-log.

Une variation de la perméabilité autour de sa moyenne a une influence directe sur le tenseur principal de perméabilité. Ainsi, si on retrace les ellipses en considérant ces nouvelles valeurs moyennes pour la direction 0° , de nouveaux tenseurs elliptiques sont obtenus tel qu'illustré aux Figures 6.17 et 6.18. On peut observer que le tenseur elliptique trouvé avec la méthode K-C et celui pour la méthode radiale sont presque les mêmes, tandis que pour la méthode log-log, une différence de l'ordre de 14% est observée dans la valeur principale K_I . De plus, l'orientation de l'écoulement estimée montre une différence d'environ 42° . Ceci permet de démontrer la fiabilité de la méthode proposée ici.

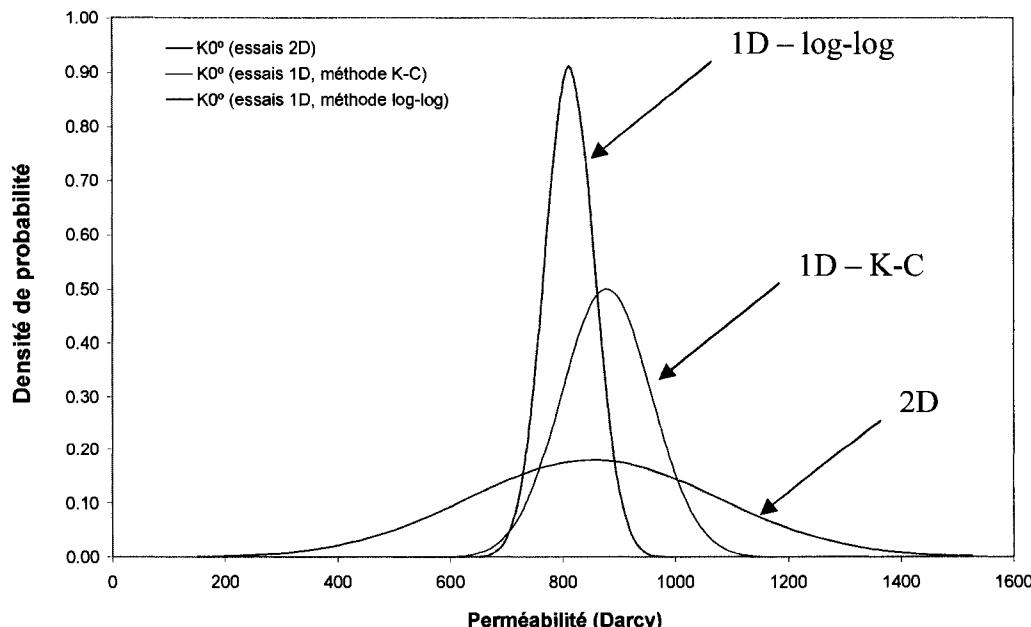


Figure 6.15 Comparaison des dispersions des perméabilités selon la direction 0° .

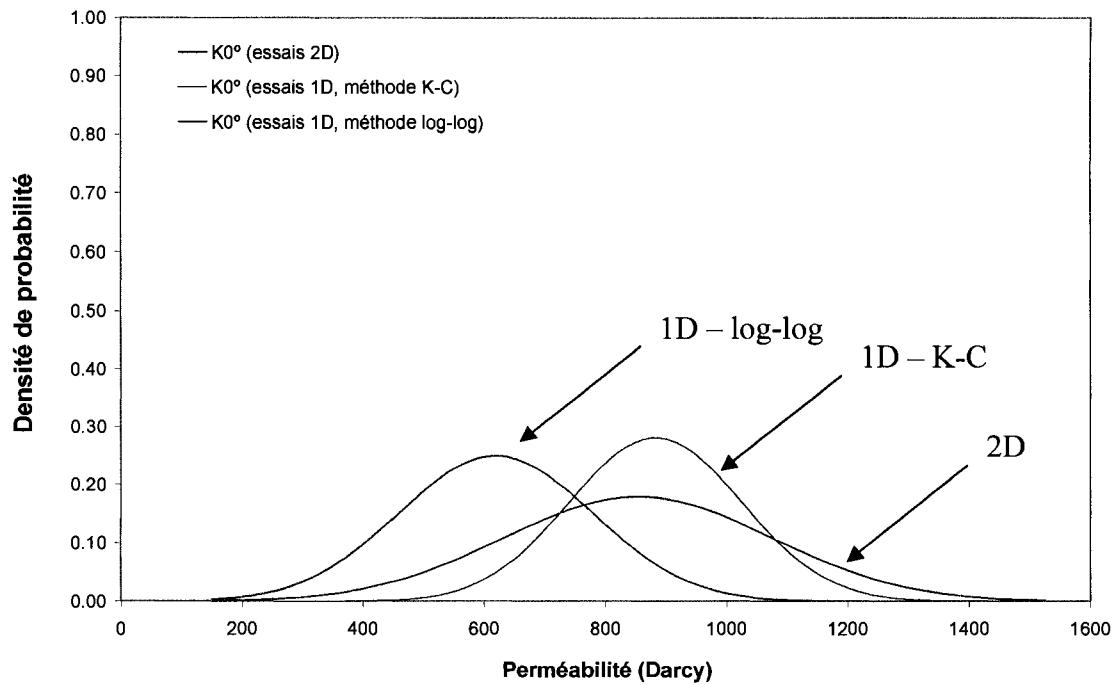


Figure 6.16 Comparaison des dispersions des perméabilités selon la direction 0° .

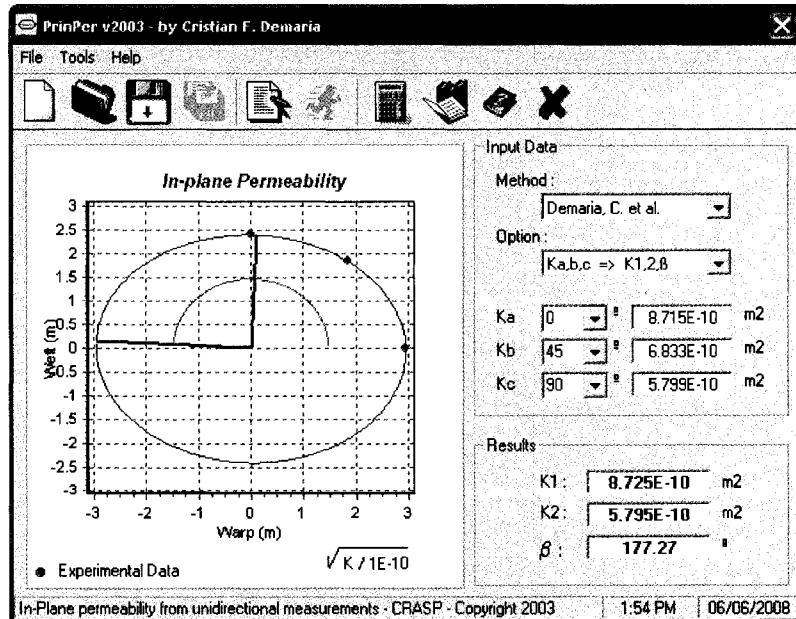


Figure 6.17 Nouveau tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode K-C).

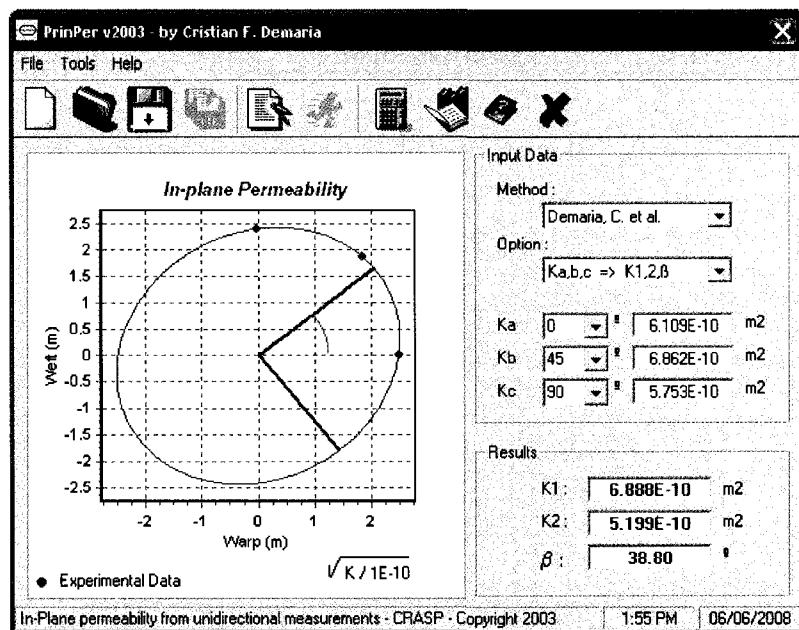


Figure 6.18 Nouveau tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode log-log).

De résultats similaires ont été trouvés dans les deux autres directions mesurées, c'est-à-dire à 45° et à 90° . Cependant, pour des raisons de simplicité de lecture, ils ne sont pas présentés dans cette thèse.

CHAPITRE 7

LE BANC D'ESSAI DE PERMÉABILITÉ

7.1. Introduction

La perméabilité d'un milieu poreux a été définie par Henry Darcy comme « la facilité avec laquelle un fluide soumis à un gradient de pression macroscopique s'écoule dans un milieu poreux ». Il s'agit d'une caractéristique qui dépend seulement de la géométrie d'un milieu poreux donné. Cette propriété est particulièrement importante dans le domaine des matériaux composites. En effet, quand un composite est fabriqué par des procédés LCM (Liquid Composite Moulding) tels que le RTM, VARTM, LRI, RFI, etc., la connaissance de la perméabilité des renforts fibreux permet de prédire le temps de remplissage et d'évaluer la performance du procédé de fabrication. Ce type de simulation numérique est utilisé de plus en plus dans l'industrie pour prédire l'apparition de défauts tels que les zones sèches ou les porosités dans la pièce qui résultent d'une stratégie d'injection inadéquate, par exemple une mauvaise position des ports d'injection et des événements dans le moule. Ainsi, lors des simulations numériques de remplissage, la perméabilité des renforts fibreux demeure un paramètre clé.

Ce chapitre présente les résultats des essais de perméabilité effectués sur deux tissus : le G986 (carbone) et le G1113 (verre). Les renforts en fibres de verre et de carbone constituent les deux principales familles de matériaux utilisés. Toutes les mesures ont été réalisées à pression constante sur un banc d'essai unidirectionnel. La perméabilité dans

le régime non-saturé a été caractérisée et documentée. Une analyse de dispersion des résultats est aussi incluse dans cette section.

7.2. Objectif du banc d'essai de perméabilité

Dans la récente décennie, la perméabilité des renforts fibreux a été un sujet de recherche très actif pour plusieurs chercheurs dans le monde [6-8, 10-20, 22-31, 55-65]. De plus, il existe une abondante littérature disponible sur ce sujet. Parmi les techniques de mesure de la perméabilité, deux méthodes sont largement utilisées : l'injection unidirectionnelle et l'injection radiale ou bidirectionnelle. Plusieurs travaux ont été aussi consacrés à l'étude des paramètres qui affectent la mesure de la perméabilité tels que la nature du fluide injecté, la pression ou le débit d'injection, etc. Cependant, il n'existe pas à l'heure actuelle une procédure qui soit reconnue comme technique standard de mesure.

Le banc d'essai de perméabilité a donc été proposé comme une étape vers la normalisation de la mesure de perméabilité des renforts fibreux dans le domaine des matériaux composites. Dans ce but, plusieurs universités et instituts de recherche qui travaillent sur ce sujet depuis plusieurs années ont été invités à participer à cette étude afin d'échanger et de comparer les résultats de mesures effectuées sur les mêmes renforts.

Dans une première étape et avec l'appui de la compagnie Hexcel Fabrics, deux tissus ont été proposés spécialement pour ce projet : le tissu de carbone G986 et le G1113, un tissu en fibres de verre. Dans une deuxième étape, l'étude portera sur un autre renfort de carbone, le NC2, qui a une structure différente des deux premiers. Le NC2 (« non crimp ») ne comporte pas les ondulations des renforts tissés puisque les torons sont disposés en deux couches unidirectionnelles superposées reliées par réseau de fils de liaison.

7.3. Partenaires invités au projet du banc d'essai de perméabilité

Afin de pouvoir comparer des résultats de mesures de perméabilité effectuées par des méthodes et configurations de moules différentes, plusieurs universités ont été invitées à caractériser la perméabilité des tissus proposés. Le Tableau 7.1 donne une liste des institutions participantes de cette étude ainsi que leurs responsables.

Tableau 7.1 Liste des institutions participants au banc d'essai.

Nom	Université/Institute	Pays	Courriel
Advani, Suresh	University of Delaware	US	advani@me.udel.edu
Akkerman, Remko	University of Twente	Netherlands	r.akkerman@utwente.nl
Binetruy, Christophe	Mines de Douai	France	binetruy@ensm-douai.fr
Bréard, Joel	Université du Havre	France	joel.breard@univ-lehavre.fr
Chatel, Sylvain	EADS CCR	France	sylvain.chatel@eads.net
Correira Nuno	INEGI-UMEC	Portugal	nuno.correia@inegi.up.pt
Ermanni, Paolo	Polytechnique Zurich	Suisse	Ermanni@imes.mavt.ethz.ch
Gilliot Anatole	DLR-Airbus	Germany	anatole.gilliot@airbus.com
Henrat, Patrick	Hexcel Reinforcements	France	Patrick.Henrat@hexcel.com
Labordus, Maarten	Lightweight Structures BV	Netherlands	m.labordus@ind.tno.nl
Laine, Bertrand	ONERA	France	Bertrand.laine@onera.fr
Lomov, Stepan V.	KU Leuven	Belgium	Stepan.Lomov@mtm.kuleuven.ac.be
Long, Andrew	University of Nottingham	UK	andrew.long@nottingham.ac.uk
Lundstrom, Staffan	Lulea University	Sweden	staffan.lundstrom@ltu.se
Michaud, Véronique	Polytechnique Lausane	Switzerland	veronique.michaud@epfl.ch
Parnas Richard	UCONN	US	rparnas@ims.uconn.edu
Sol, Hugo	Free University of Bruxelles	Belgium	hugos@vub.ac.be
Talvensaari, Henna	Transfercenter für Kunststofftechnik / PCCL	Austria	talvensaari@pccl.at
Trochu, François	Polytechnique Montréal	Canada	francois.trochu@polymtl.ca
Vautrin, Alain	Mines de St Etienne	France	vautrin@emse.fr
Ziegmann Gerhard	TU Clausthal	Germany	ziegmann@puk.tu-clausthal.de

7.4. Description du moule de perméabilité utilisé dans ce projet

Le banc d'essai utilisé dans le cadre de ce projet a été conçu et présenté au chapitre 5. Le lecteur est prié de se référer à la section 6.3.2 de cette thèse pour une description plus détaillée de la configuration du moule. L'épaisseur de la cavité du moule a été fixée à 3,1 mm pour tous les essais. Le laboratoire de perméabilité où les essais ont été effectués est une salle à température contrôlée et elle est maintenue à 23 °C. On suppose donc que la température du moule est la même que celle de l'air ambiant.

7.5. Description du fluide d'injection

Le fluide utilisé pour toutes les mesures de perméabilité est une huile de silicone 100 Cst commercialisé par la société Dow Corning. Ce fluide présente un comportement newtonien, c'est-à-dire que sa viscosité ne change pas avec le taux de cisaillement. La viscosité a été caractérisée en fonction de la température au Laboratoire de rhéologie de l'École Polytechnique de Montréal. Des essais effectués à différents taux de cisaillement corroborent le comportement newtonien observé à la Figure 7.1.

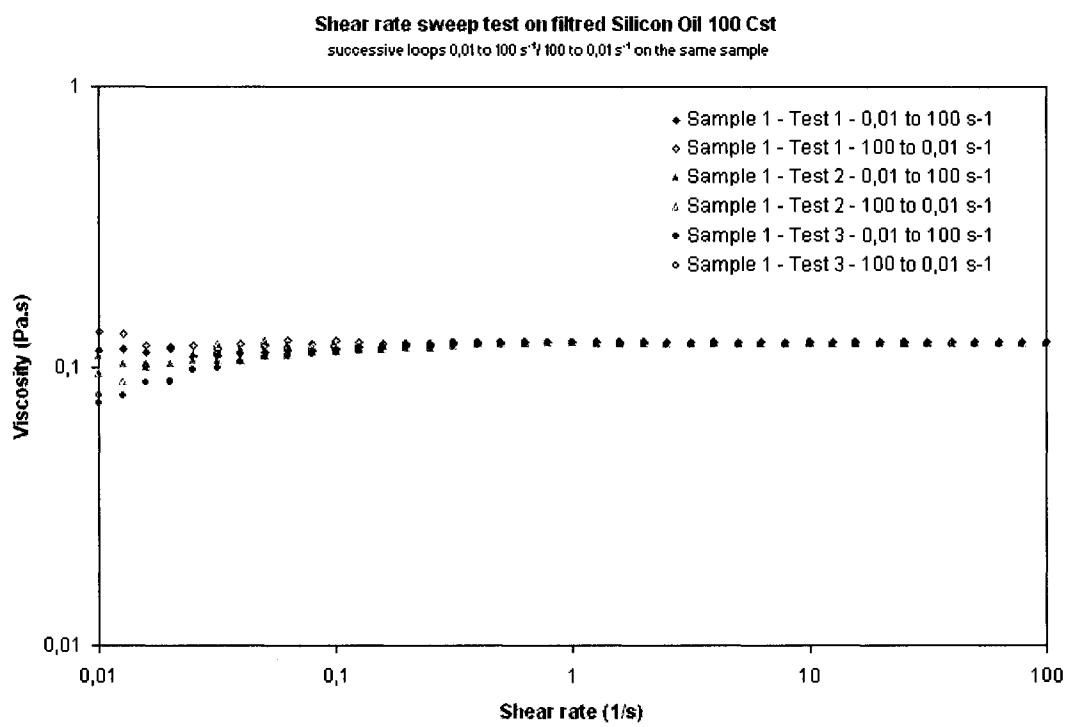


Figure 7.1 Évolution de la viscosité en fonction du taux de cisaillement pour l'huile de silicone 100 Cst de Dow Corning.

D'une manière similaire, la Figure 7.2 montre l'évolution de la viscosité en fonction de la température. Cette évolution est utilisée dans les calculs de perméabilité.

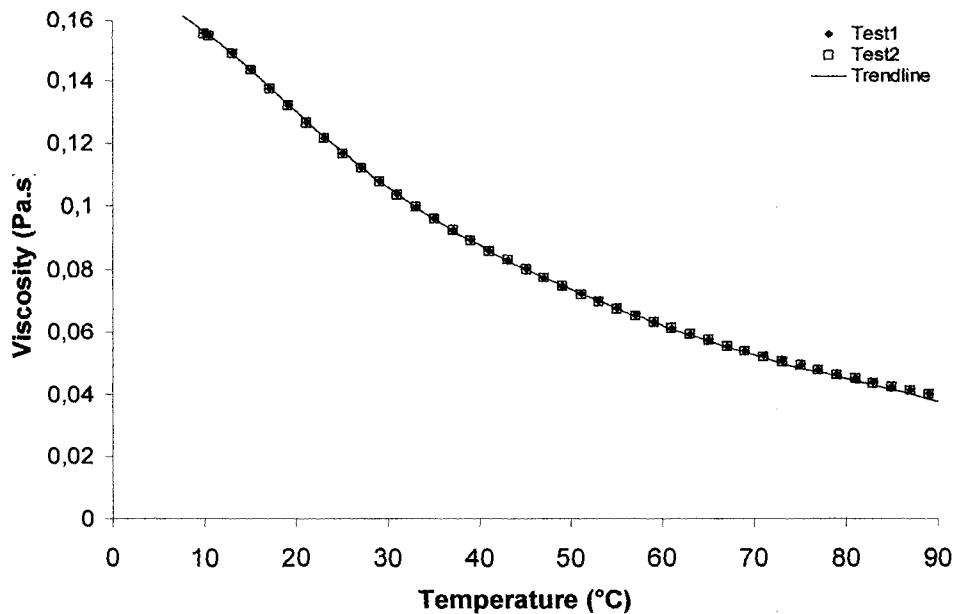


Figure 7.2 Évolution de la viscosité en fonction de la température pour l'huile de silicium 100 Cst de Dow Corning.

La température du fluide a été obtenue en plaçant un thermocouple à l'entrée du port d'injection. Avec cette donnée, la viscosité peut être calculée pour chaque essai en fonction de la température.

7.6. Description des tissus

Deux tissus ont été caractérisés dans la première étape du projet. Les deux tissus fournis par la société Hexcel Fabrics pour cette étude sont le tissu de carbone G986 et le tissu de verre G1113. Les caractéristiques spécifiques de ces deux matériaux sont présentées au Tableau 7.2. Notons que la densité surfacique est obtenue par pesage des échantillons avant chaque mesure de perméabilité.

Tableau 7.2 Propriétés des tissus testés.

Nom	G986	G1113
Type	Carbone	Verre
Densité surfacique (gr/m ²)	~299	~384
Densité volumique (gr/m ³)	1.77E+06	2.56E+06

7.7. Détermination du taux de fibres

Pour chaque essai, l'échantillon a été pesé et la densité surfacique calculée. Ainsi, le taux de fibre V_f est donné par la relation suivante :

$$V_f = \frac{n \rho_s}{h \rho_v} \quad (7.1)$$

où n est le nombre de couches dans l'échantillon, ρ_s représente la densité surfacique du renfort, h est l'épaisseur de la cavité du moule et ρ_v la masse volumique des fibres.

7.8. Convention sur l'orientation des fibres

La convention utilisée pour l'orientation des fibres est illustrée à la Figure 7.3. La direction du 0° , ou direction de la chaîne, est celle de la bordure cousue du rouleau du tissu.

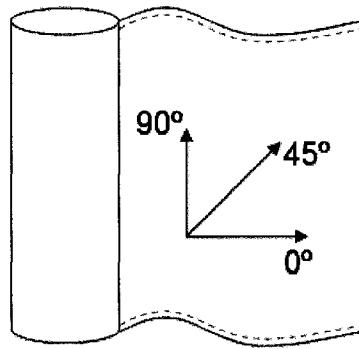


Figure 7.3 Convention sur l'orientation des fibres.

7.9. Description de la procédure expérimentale

La technique de mesure de la perméabilité mise au point et utilisée depuis des années par l'École Polytechnique de Montréal (EPM) se résume en trois étapes principales. Une description détaillée de cette procédure est donnée en annexe F. Ces étapes sont :

1. Préparation du moule et des échantillons.
2. Visualisation de l'écoulement et enregistrement des données.

3. Analyse des résultats.

Premièrement, l'échantillon est découpé selon la direction de mesure de la perméabilité, par exemple dans la direction de la chaîne. Les dimensions des échantillons sont toujours de 100 mm x 400 mm. Les échantillons sont ensuite pesés afin de déterminer la densité surfacique. Le taux de fibres peut donc être obtenu par la relation (7.1). Les taux de fibre et le nombre de couches des échantillons sont indiqués au Tableau 7.3.

Tableau 7.3 Taux de fibres moyen des matériaux caractérisés

Matériau	G986	G1113
Taux de fibres moyen (%)	~46	~50
Nombre de couches	9	10

Après nettoyage de la surface du moule, un joint en caoutchouc est placé autour de la cavité du moule pour assurer son étanchéité après fermeture. Les échantillons sont ensuite placés à l'intérieur de la cavité du moule près du port d'injection. Ceci permet au fluide d'arriver uniformément sur l'échantillon. Autrement dit, l'imprégnation du renfort se fait par une ligne d'injection plutôt qu'à partir d'un point d'injection.

Afin d'éviter des effets de bord indésirables qui peuvent se produire entre le joint de caoutchouc et l'échantillon, un scellant en silicone est appliqué sur les deux côtés longitudinaux du moule afin de remplir cet espace. Le scellant permet aussi de garder en

place l'échantillon une fois le moule fermé et l'injection lancée. La plaque de verre est ensuite insérée dans le cadre en aluminium, puis le moule est fermé.

Deuxièmement, l'évolution du front d'écoulement par rapport au temps est observée et enregistrée à l'aide d'un ordinateur. Après avoir vérifié que le scellant a été bien appliqué et les espaces remplis, le fluide est injecté à pression constante. Pendant l'avancement du fluide, les positions du front d'écoulement, le temps et la pression sont enregistrées afin de pouvoir en déduire la perméabilité du renfort à chaque instant. Finalement, une valeur finale de la perméabilité peut être déterminée pour l'essai.

7.10. Résultats expérimentaux pour le renfort G986

Cette section présente les résultats des mesures expérimentales de perméabilité (exprimés en m^2 et Darcy) pour le tissu de carbone G986 effectuées toutes en régime transitoire ou non-saturé. La Figure 7.4 illustre les positions du front de l'huile de silicone en fonction du temps pour trois essais selon les directions 0° , 45° et 90° . En général, la direction de la trame (90°) semble être la plus perméable des trois directions mesurées. En revanche, la chaîne (0°) présente la perméabilité la plus basse.

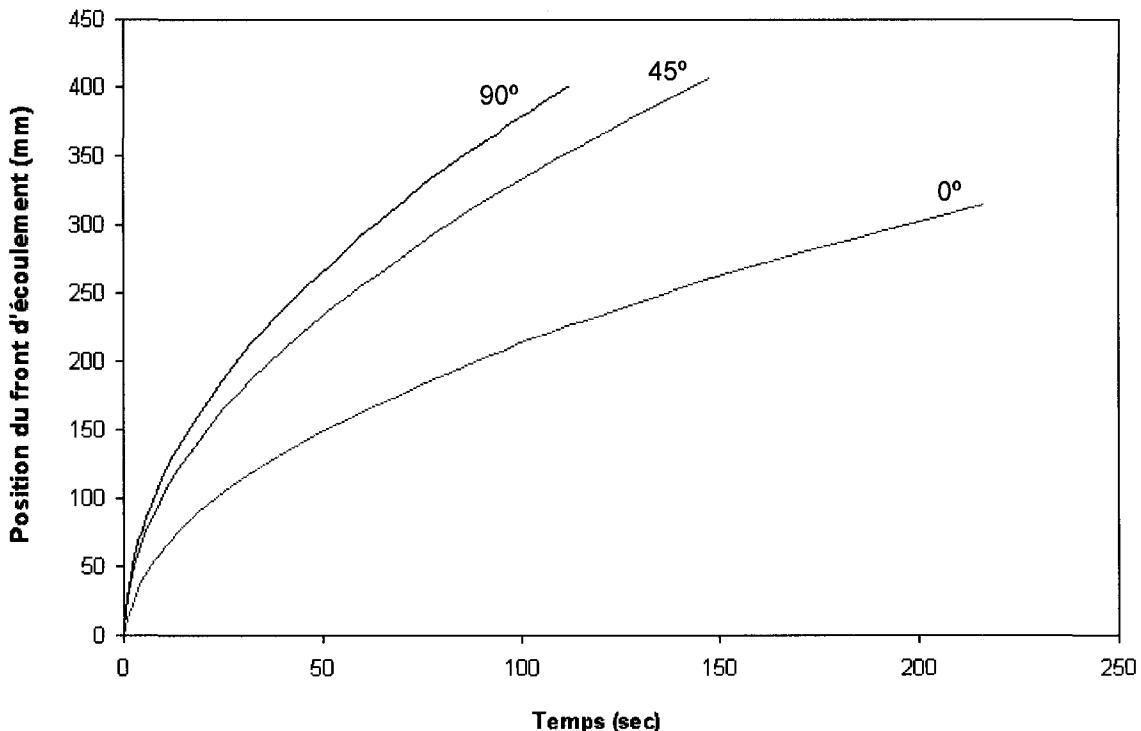


Figure 7.4 Positions du front d'écoulement en fonction du temps pour les trois directions mesurées 0° , 45° et 90° .

Les perméabilités insaturées mesurées en trois directions dans le plan (0° , 45° , 90°) sont résumées dans les Tableaux 7.4 à 7.6. Ces résultats ont été obtenus pour différents taux volumiques de fibres dans chaque direction. La masse surfacique de chaque échantillon de renfort est calculée à partir du poids mesuré de l'échantillon. En conséquence, le taux volumique de fibres peut varier d'une mesure à l'autre.

Pour trouver la perméabilité moyenne dans chaque direction 0° , 45° et 90° , les perméabilités doivent être corrigées pour le taux volumique de fibres désiré, soit ici

46%. À cette fin, deux méthodes ont été utilisées : a) la méthode de Kozeny-Carman et b) la méthode log-log. Ces méthodes ont été présentées au chapitre précédent.

Tableau 7.4 Valeurs de perméabilité effective dans la direction 0° et valeurs corrigées selon les deux méthodes.

Direction	Id essai	Vf (%)	Perméabilité		Vf _{corrige} (%)	Kozeny-Carman		Log-Log	
			(m ²)	(Darcy)		Perméabilité (m ²)	(Darcy)	Perméabilité (m ²)	(Darcy)
0°									
	BEN_G986_00_01	46.52	2.241E-10	227	46.00	2.359E-10	239	2.411E-10	244
	BEN_G986_00_02	46.67	2.167E-10	220	46.00	2.316E-10	235	2.383E-10	242
	BEN_G986_00_03	45.81	1.960E-10	199	46.00	1.923E-10	195	1.894E-10	192
	BEN_G986_00_04	45.90	1.896E-10	192	46.00	1.877E-10	190	1.862E-10	189
	BEN_G986_00_05	45.93	2.229E-10	226	46.00	2.214E-10	224	2.205E-10	223
	BEN_G986_00_06	46.12	2.306E-10	234	46.00	2.334E-10	236	2.347E-10	238
	BEN_G986_00_07	46.22	2.268E-10	230	46.00	2.318E-10	235	2.342E-10	237
	BEN_G986_00_08	45.91	2.745E-10	278	46.00	2.721E-10	276	2.714E-10	275
	BEN_G986_00_09	46.34	1.710E-10	173	46.00	1.769E-10	179	1.823E-10	185
	BEN_G986_00_10	45.78	2.671E-10	271	46.00	2.613E-10	265	2.594E-10	263
	BEN_G986_00_11	46.31	1.910E-10	194	46.00	1.970E-10	200	2.013E-10	204
	BEN_G986_00_12	46.51	1.887E-10	191	46.00	1.985E-10	201	2.054E-10	208
	BEN_G986_00_13	46.26	2.975E-10	301	46.00	3.053E-10	309	3.062E-10	310
	BEN_G986_00_14	46.21	2.501E-10	253	46.00	2.554E-10	259	2.572E-10	261
	BEN_G986_00_15	45.95	2.475E-10	251	46.00	2.463E-10	250	2.458E-10	249
	BEN_G986_00_20	46.40	2.461E-10	249	46.00	2.560E-10	259	2.593E-10	263
	BEN_G986_00_21	46.92	1.712E-10	173	46.00	1.875E-10	190	2.003E-10	203
	BEN_G986_00_22	46.40	2.376E-10	241	46.00	2.472E-10	250	2.508E-10	254
	BEN_G986_00_23	46.62	2.005E-10	203	46.00	2.132E-10	216	2.206E-10	224
	BEN_G986_00_24	45.91	1.706E-10	173	46.00	1.691E-10	171	1.675E-10	170
	BEN_G986_00_25	46.28	2.440E-10	247	46.00	2.509E-10	254	2.533E-10	257
	BEN_G986_00_26	46.03	2.625E-10	266	46.00	2.633E-10	267	2.635E-10	267
	BEN_G986_00_27	46.48	2.349E-10	238	46.00	2.463E-10	250	2.507E-10	254
	BEN_G986_00_28	46.13	1.836E-10	186	46.00	1.860E-10	188	1.880E-10	190
	BEN_G986_00_29	46.29	2.096E-10	212	46.00	2.157E-10	219	2.193E-10	222
	BEN_G986_00_30	46.51	1.462E-10	148	46.00	1.538E-10	156	1.629E-10	165
	BEN_G986_00_31	46.59	2.202E-10	223	46.00	2.335E-10	237	2.394E-10	243
	BEN_G986_00_32	46.23	2.443E-10	248	46.00	2.499E-10	253	2.520E-10	255
	BEN_G986_00_33	46.41	2.932E-10	297	46.00	3.054E-10	309	3.067E-10	311
	BEN_G986_00_34	46.19	2.316E-10	235	46.00	2.360E-10	239	2.380E-10	241

Tableau 7.5 Valeurs de perméabilité effective dans la direction 45° et valeurs corrigées selon les deux méthodes

Direction	Id essai	Vf (%)	Perméabilité		Vf _{corrige} (%)	Kozeny-Carman Perméabilité (m ²) (Darcy)		Log-Log Perméabilité (m ²) (Darcy)	
			(m ²)	(Darcy)		(m ²)	(Darcy)	(m ²)	(Darcy)
45°									
	BEN_G986_45_01	46.28	2.433E-10	247	46.00	2.501E-10	253	2.507E-10	254
	BEN_G986_45_02	46.51	1.966E-10	199	46.00	2.068E-10	210	2.098E-10	213
	BEN_G986_45_03	45.89	2.206E-10	224	46.00	2.182E-10	221	2.176E-10	221
	BEN_G986_45_04	46.28	2.444E-10	248	46.00	2.513E-10	255	2.518E-10	255

Tableau 7.6 Valeurs de perméabilité effective dans la direction 90° et valeurs corrigées selon les deux méthodes.

Direction	Id essai	Vf (%)	Perméabilité		Vf _{corrige} (%)	Kozeny-Carman Perméabilité (m ²) (Darcy)		Log-Log Perméabilité (m ²) (Darcy)	
			(m ²)	(Darcy)		(m ²)	(Darcy)	(m ²)	(Darcy)
90°									
	BEN_G986_90_01	46.05	3.910E-10	396	46.00	5.280E-10	535	3.973E-10	403
	BEN_G986_90_02	46.08	4.217E-10	427	46.00	5.712E-10	579	4.317E-10	437
	BEN_G986_90_03	45.89	3.533E-10	358	46.00	4.696E-10	476	3.391E-10	344
	BEN_G986_90_04	46.35	3.147E-10	319	46.00	4.378E-10	444	3.564E-10	361
	BEN_G986_90_05	46.06	3.733E-10	378	46.00	5.046E-10	511	3.808E-10	386

À partir de ces valeurs corrigées, on peut calculer pour chaque direction la perméabilité moyenne pour un même taux volumique de fibres. Ces valeurs moyennes de perméabilité sont regroupées dans le Tableau 7.7. Pour obtenir les perméabilités principales moyennes (c'est-à-dire les composantes K_{xx} et K_{yy} du tenseur de perméabilité planaire), les valeurs des perméabilités moyennes trouvées dans les trois directions ont été traitées avec le module *PrinPer* présenté au chapitre 4. Ce logiciel permet de retrouver le front d'écoulement elliptique à partir de trois mesures de perméabilité effectuées dans trois directions différentes. On obtient ainsi les

perméabilités principales moyennes K_1 et K_2 du Tableau 7.8. La Figure 7.5 illustre graphiquement l'ellipse de perméabilité construite à partir des valeurs des perméabilités principales obtenues avec *PrinPer* (méthode de correction K-C). D'une manière similaire, l'ellipse de perméabilité estimée par *PrinPer* pour des valeurs corrigées selon la méthode log-log est donnée à la Figure 7.6. Tel qu'observé pour ce renfort, les deux méthodes de correction conduisent à des valeurs de perméabilité principales très similaires.

Tableau 7.7 Valeurs de perméabilité moyennes pour chaque direction mesurée.

	Correction K-C		Correction log-log	
	m^2	Darcy	m^2	Darcy
K_{eff}^0	2.287E-10	231.71	2.286E-10	231.65
K_{eff}^{45}	2.316E-10	234.67	2.317E-10	234.74
K_{eff}^{90}	3.738E-10	378.71	3.797E-10	378.74

Tableau 7.8 Valeurs de perméabilités principales obtenues avec *PrinPer* à partir de valeurs moyennes corrigées selon les deux méthodes.

	Correction K-C		Correction log-log	
	m^2	Darcy	m^2	Darcy
K_1	4.234E-10	428.92	4.322E-10	438.04
K_2	2.134E-10	216.23	2.130E-10	215.84
β		111.55°		111.50°
K_1/K_2		1.98		2.03

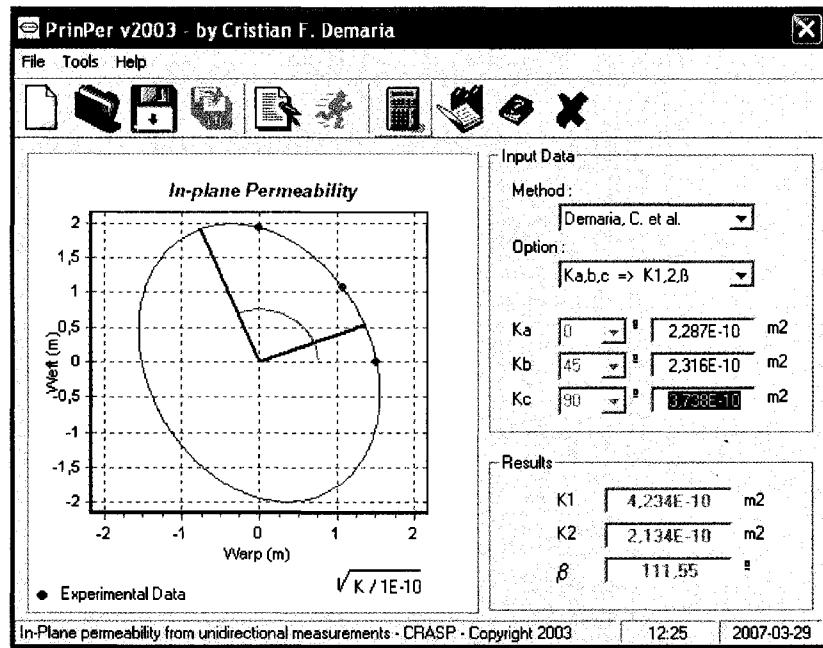


Figure 7.5 Tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode K-C)

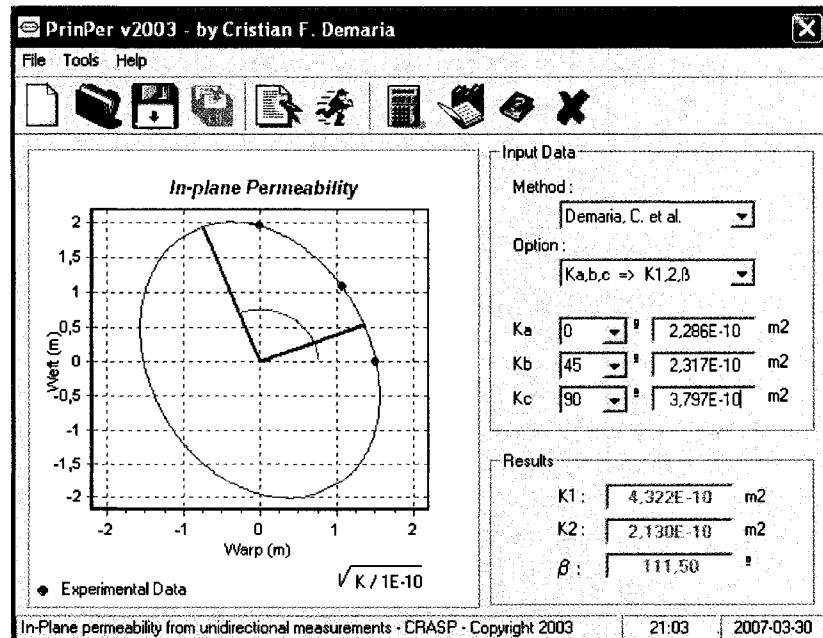


Figure 7.6 Tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode log-log)

7.10.1. Analyse statistique des résultats expérimentaux du renfort G986

Une fois toutes les valeurs ramenées au même taux de fibres, il est possible de procéder à l'analyse de dispersion. Pour ce faire, une loi normale a été utilisée afin de créer la courbe de dispersion.

Les résultats de dispersion et les intervalles de confiance sont donnés aux Figures 7.7 à 7.12 pour les deux méthodes de correction des valeurs de perméabilité. Les Figures 7.7 à 7.9 montrent la dispersion obtenue pour les trois directions mesurées (0° , 45° et 90°) en utilisant la méthode de correction de Kozeny-Carman. D'une manière similaire, la dispersion obtenue en utilisant la méthode log-log est présentée aux Figures 7.10 à 7.12 pour les trois directions mesurées. A partir des Figures 7.7 et 7.10, il est possible d'affirmer qu'il y a 95 % des chances que des résultats des mesures de perméabilité dans la direction 0° soient regroupés dans une plage s'étendant de 158 Darcy à 306 Darcy. Pour la direction 45° , cette plage est de 190 à 279 Darcy (Figures 7.8 et 7.11). De même, l'intervalle de confiance pour la direction 90° est trouvé de 302 à 458 Darcy tel qu'observé aux Figures 7.9 et 7.12.

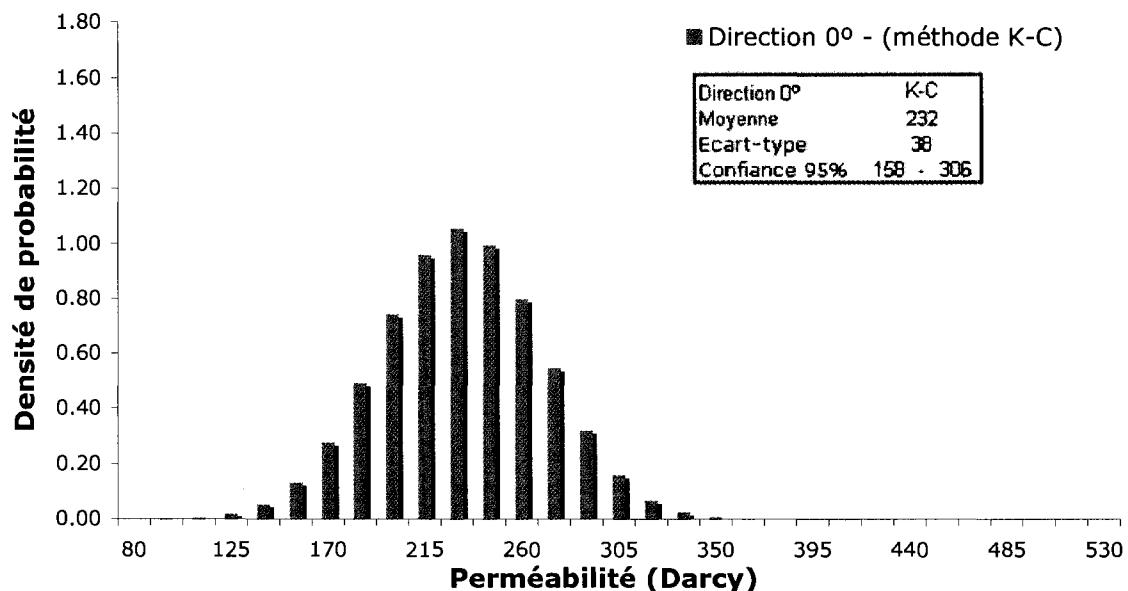


Figure 7.7 Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° corrigée selon la méthode de Kozeny-Carman.

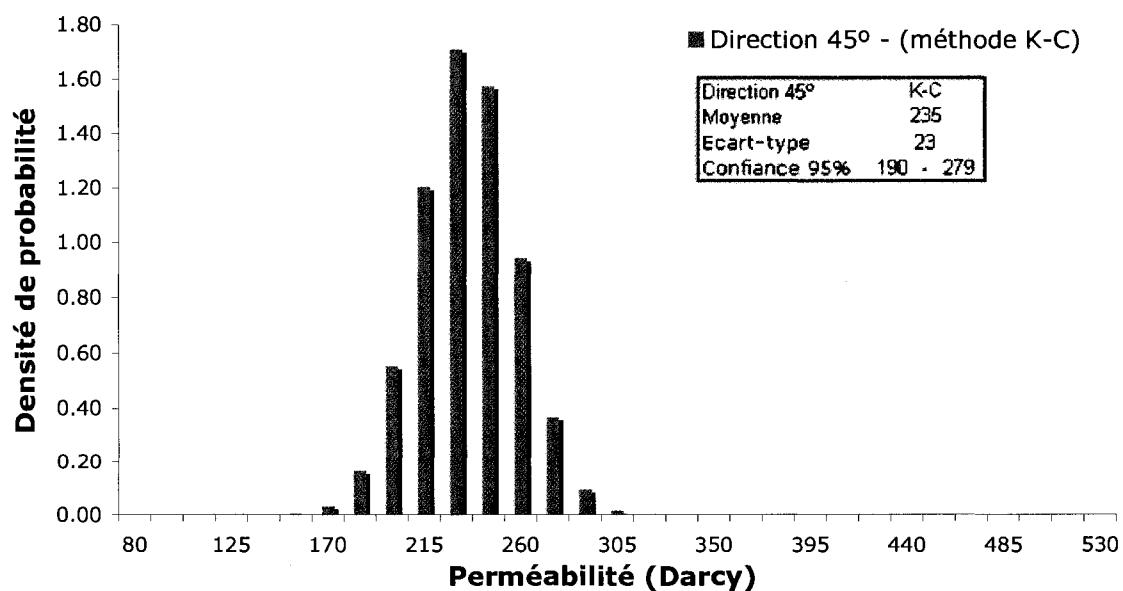


Figure 7.8 Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 45° corrigée selon la méthode de Kozeny-Carman.

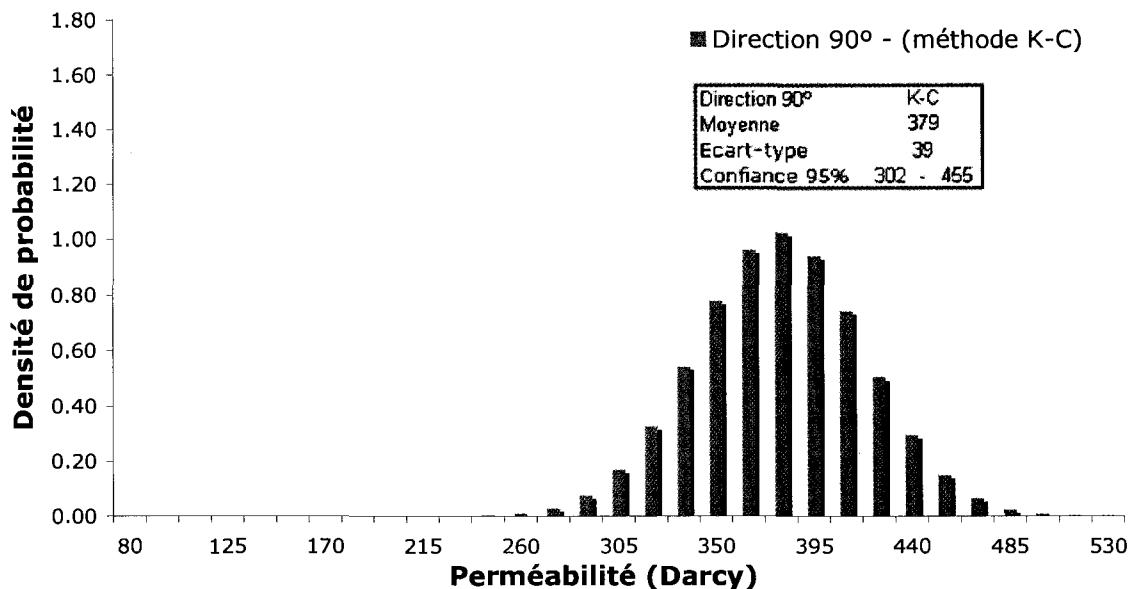


Figure 7.9 Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 90° corrigée selon la méthode de Kozeny-Carman.

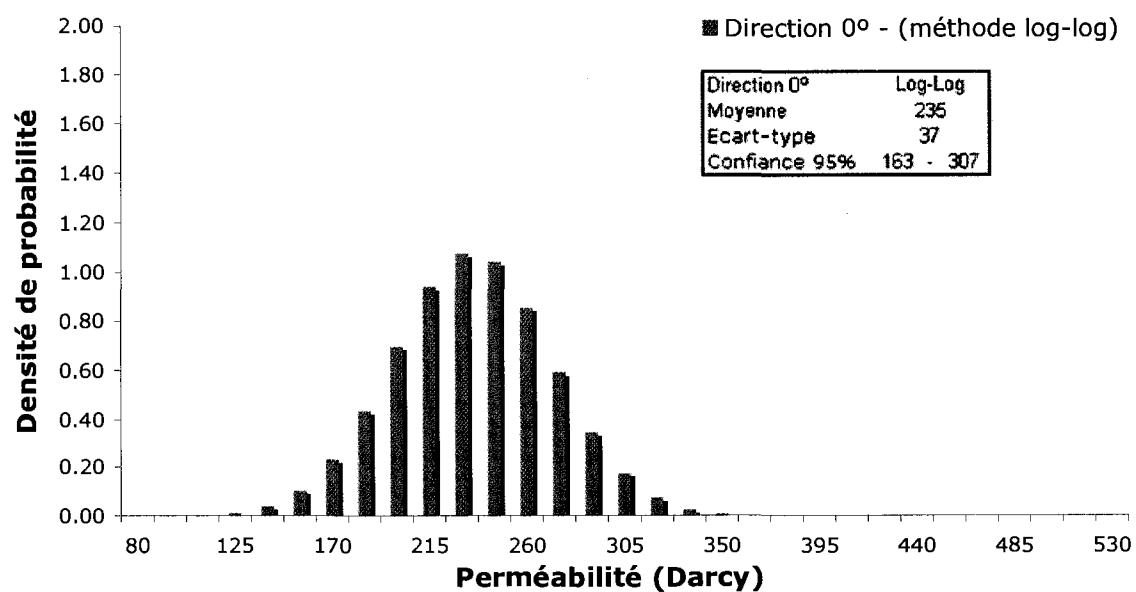


Figure 7.10 Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° corrigée selon la méthode log-log.

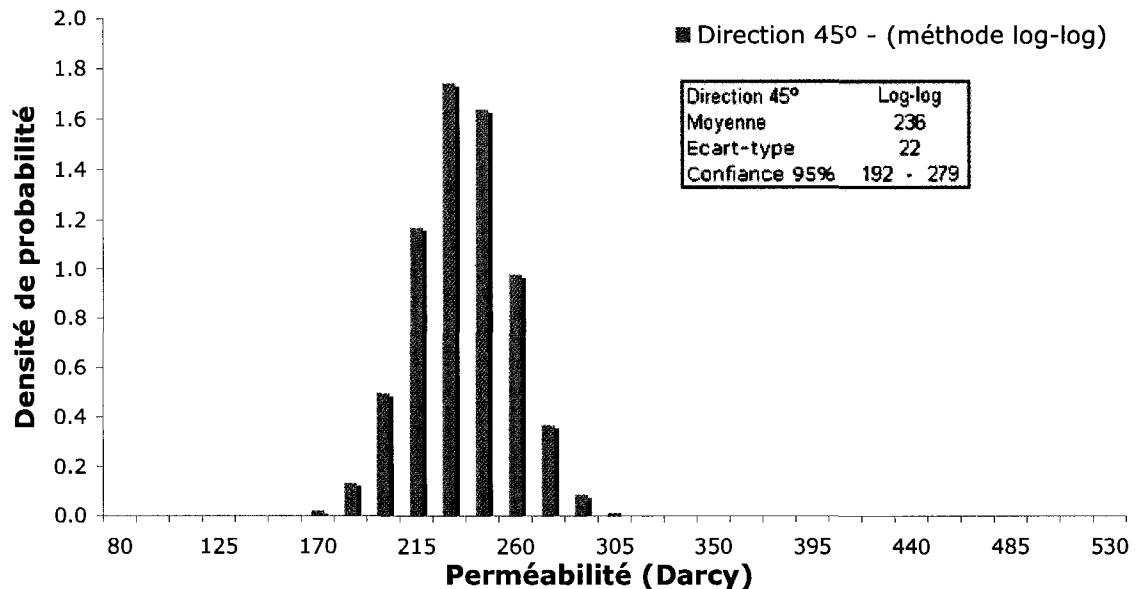


Figure 7.11 Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° corrigée selon la méthode log-log.

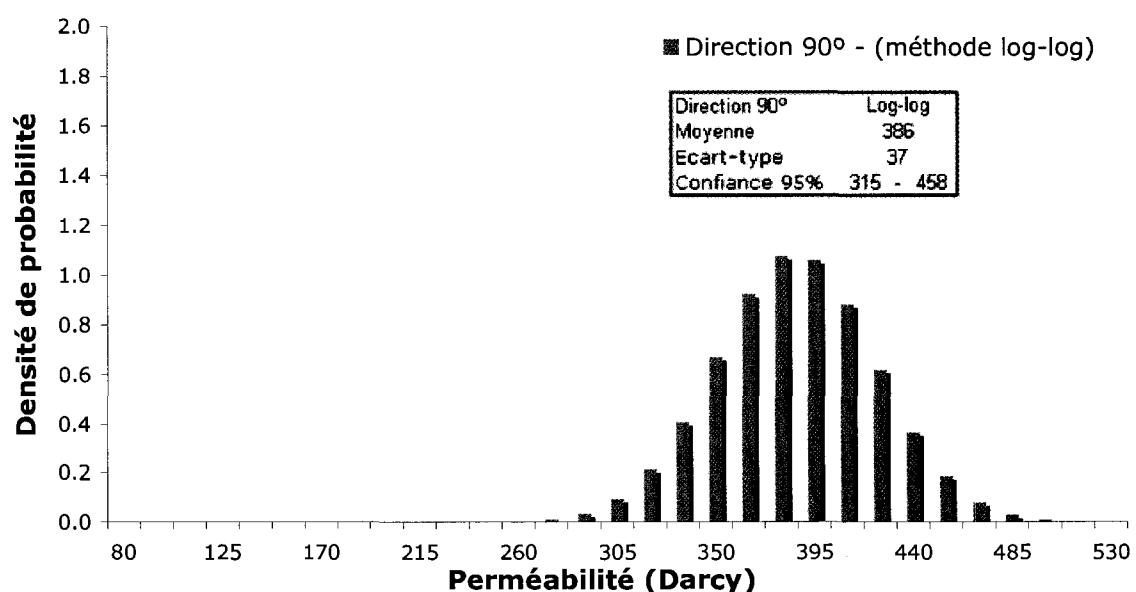


Figure 7.12 Dispersion complète de la perméabilité dans la direction 0° corrigée selon la méthode log-log.

Finalement, la Figure 7.13 présente une comparaison des dispersions obtenues selon les deux méthodes de correction pour les trois directions mesurées. En général, les deux méthodes de correction montrent une allure des distributions très semblable. Par contre, les dispersions varient selon la direction considérée. A partir des écart-types calculés pour chaque direction, on pourrait conclure que la dispersion la plus élevée est obtenue dans la direction à 90° et la moins élevée dans la direction à 45° . En effet, plus l'écart-type est élevé, plus grande est la dispersion des observations d'une variable. Cependant, pour plusieurs variables différentes ou populations observées, un plus grand écart-type ne signifie pas nécessairement une plus grande dispersion.

Bien que la variable analysée ici soit toujours la même, la perméabilité, trois populations d'observations peuvent être considérées selon la direction de mesure. Ainsi, afin de pouvoir comparer ces dispersions, un coefficient de variation est utilisé. Le coefficient de variation, ou écart-type relatif, est une mesure de dispersion des observations d'une variable quantitative d'intervalle. C'est une mesure neutre qui est calculée en divisant l'écart-type par la moyenne. Il est exprimé souvent en pourcentage. Sans unité, il permet de comparer facilement la dispersion des variables ou populations différentes. Cette approche est plus appropriée que l'écart-type parce qu'elle ne dépend pas de l'amplitude des observations, tout en donnant une bonne représentation de la réalité [58].

Le Tableau 7.9 donne les coefficients de variation pour chaque direction et chaque méthode de correction calculés à partir des écart-types et des moyennes montrés aux

tableaux des Figures 7.7 à 7.12. On peut observer maintenant que la dispersion la plus élevée est obtenue dans la direction à 0° . Ceci s'explique parce que cette population est plus nombreuse et regroupe des mesures effectuées à différentes pression d'injection allant de 10 Psi jusqu'à 45 Psi. Cette variation de la pression d'injection envisage d'observer son influence sur la perméabilité.

Tableau 7.9 Coefficients de variation calculés.

Direction	Coef. de variation (%)	
	K-C	log-log
0°	16.4	15.8
45°	9.8	9.3
90°	10.3	9.6

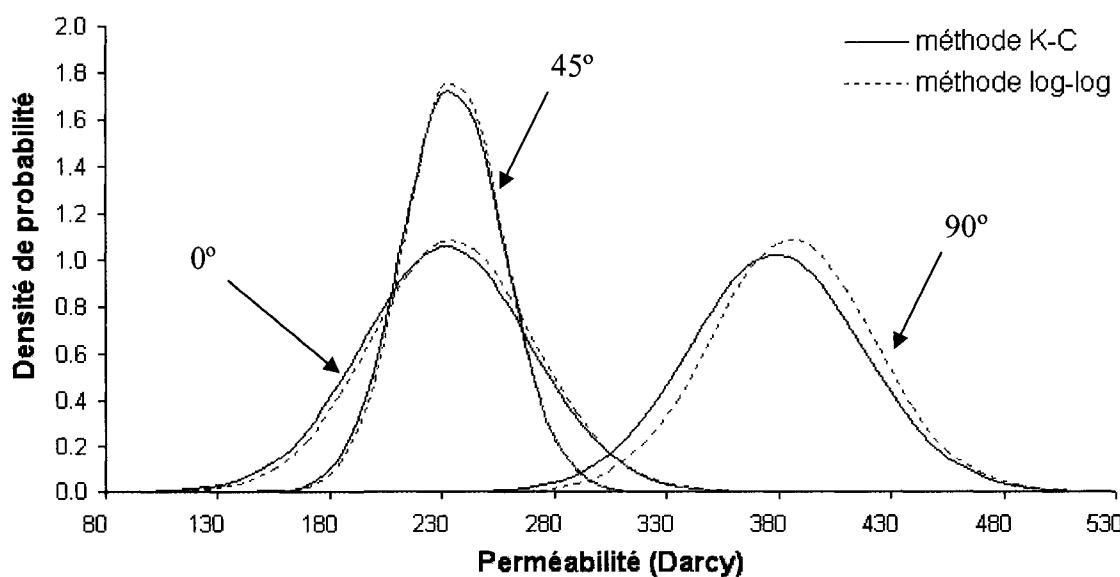


Figure 7.13 Comparaison des dispersions des perméabilités effectives pour les trois directions mesurées et corrigées selon les deux méthodes.

7.10.2. Influence de la pression d'injection sur la perméabilité

Afin d'analyser l'influence de la pression d'injection sur la valeur de la perméabilité mesurée, une série de mesures de perméabilité ont été effectuées à différentes pression d'injection. En choisissant la direction à 0° , la pression d'injection a varié entre 10 Psi et 45 Psi. Les résultats de perméabilité sont donnés au Tableau 7.4. La Figure 7.14 montre la perméabilité effective brute mesurée, c'est-à-dire sans correction, en fonction de la pression d'injection. D'une manière similaire, la perméabilité effective corrigée par la méthode de Kozeny-Carman est illustrée à la Figure 7.15 en fonction de la pression d'injection.

Bien qu'une grande dispersion des résultats soit observée à la Figure 7.14, la tendance montre une légère augmentation de la valeur de la perméabilité mesurée par rapport à la pression d'injection. Cette dépendance de la perméabilité par rapport à la pression d'injection a été remarquée déjà par plusieurs chercheurs [67-70]. Au contraire, Lundstrom et al. [19] ont trouvé que la perméabilité est indépendante de la pression d'injection.

À partir de la tendance montrée à la Figure 7.14, la variation de la perméabilité non-corrigée est de l'ordre de 7% dans la plage des pressions utilisées. Tel que discuté par Shojaei et al. [67], ce pourcentage reste dans l'intervalle d'erreur propre à la méthode expérimentale de mesure. Ceci est également confirmé dans le cas des valeurs de

perméabilité corrigées par la méthode K-C où la variation est d'environ 3%. D'après ces résultats, on peut conclure que, pour ce tissu de carbone, la perméabilité est indépendante de la pression d'injection.

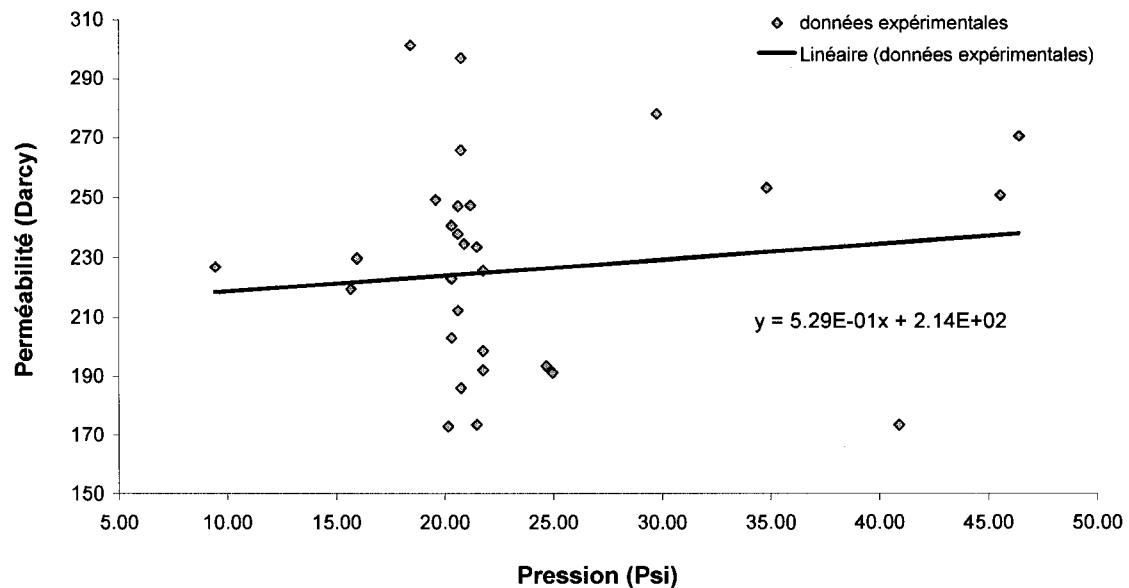


Figure 7.14 Valeurs des perméabilités effectives non-corrigées en fonction de la pression d'injection.

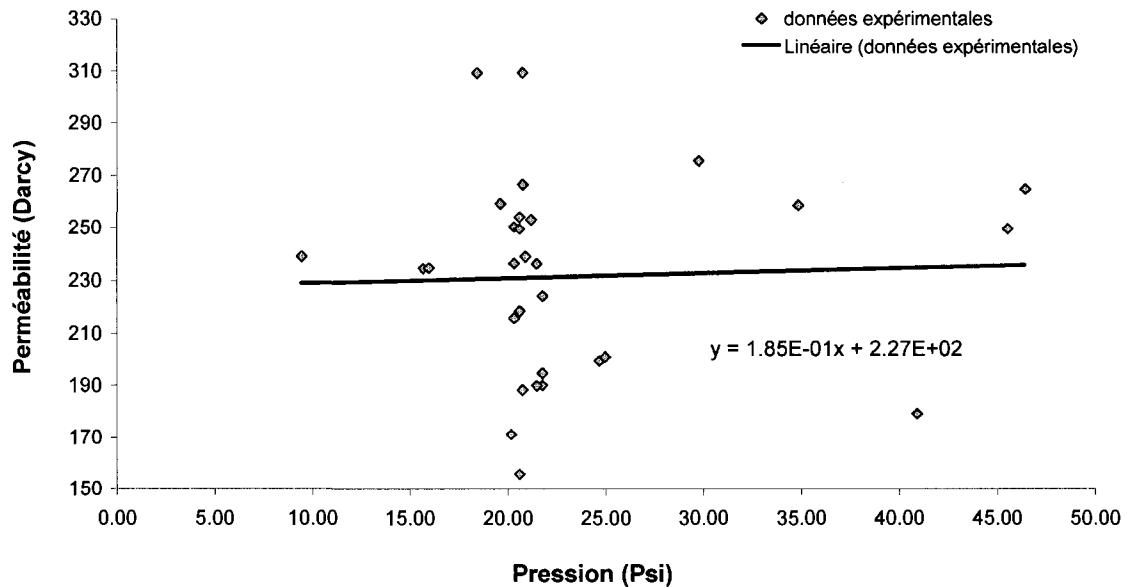


Figure 7.15 Valeurs des perméabilités effectives corrigées par la méthode de Kozeny-Carman en fonction de la pression d'injection.

7.11. Résultats expérimentaux pour le renfort G1113

Les résultats des mesures de perméabilité pour le tissu en fibres de verre G1113 sont traités dans cette section. Les unités des valeurs de perméabilité sont le m^2 et le Darcy, autant pour les valeurs corrigées que pour les valeurs brutes. Comme précédemment, les valeurs ont été corrigées par les méthodes K-C et Log-log pour un taux de fibres de 49%. Les analyses statistiques sont aussi présentes.

La Figure 7.16 illustre les positions du front de l'huile de silicone en fonction du temps pour trois essais selon les directions 0°, 45° et 90°. Contrairement au tissu de carbone, la

direction de la chaîne (0°) semble ici la plus perméable des trois directions mesurées tandis que la direction de la trame (90°) donne des perméabilités plus faibles.

Les perméabilités insaturées mesurées en trois directions dans le plan ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) sont résumées dans les Tableaux 7.10 à 7.12. D'une manière similaire, les valeurs brutes de perméabilité ont été corrigées par les deux méthodes pour les ramener au même taux de fibres de 49%.

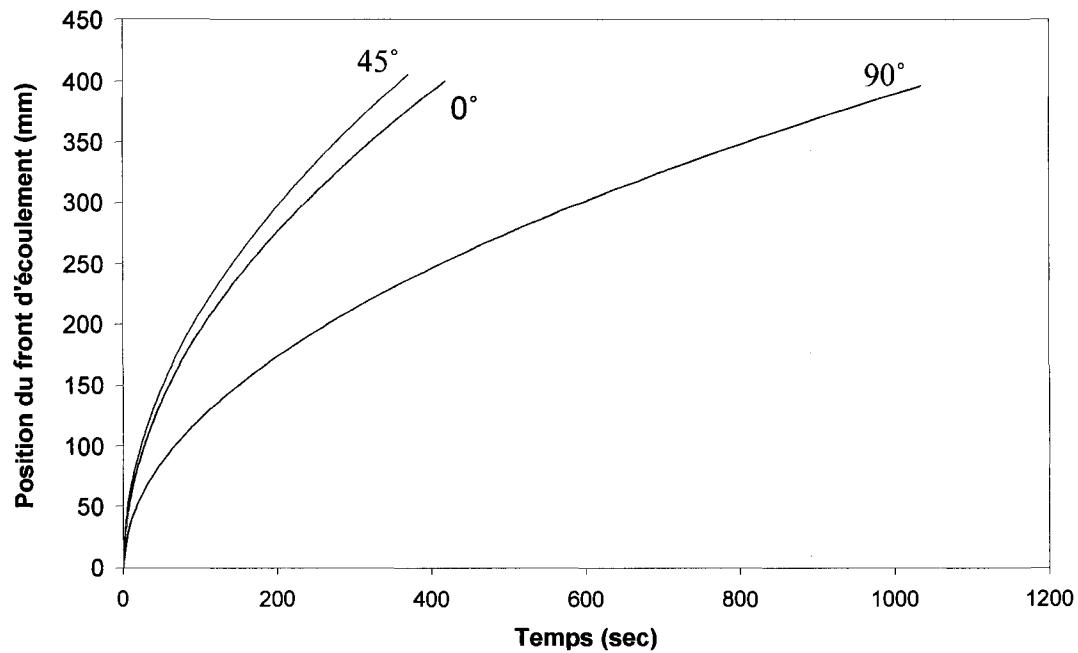


Figure 7.16 Positions du front d'écoulement en fonction du temps pour les trois directions mesurées $0^\circ, 45^\circ$ et 90° .

Tableau 7.10 Valeurs de perméabilité effectives dans la direction 0° et valeurs corrigées selon les deux méthodes.

Direction	Id essai	Vf (%)	Perméabilité		Vf _{corrige} (%)	Kozeny-Carman Perméabilité		Log-Log Perméabilité	
			(m ²)	(Darcy)		(m ²)	(Darcy)	(m ²)	(Darcy)
0°									
	BEN_G1113_00_01	49.17	1.028E-10	104	49.00	1.046E-10	106	9.438E-11	96
	BEN_G1113_00_02	48.65	8.463E-11	86	49.00	8.173E-11	83	9.998E-11	101
	BEN_G1113_00_03	48.86	9.496E-11	96	49.00	9.364E-11	95	1.014E-10	103
	BEN_G1113_00_04	48.71	7.804E-11	79	49.00	7.582E-11	77	9.094E-11	92
	BEN_G1113_00_05	49.00	9.988E-11	101	49.00	9.988E-11	101	9.988E-11	101

Tableau 7.11 Valeurs de perméabilité effectives dans la direction 45° et valeurs corrigées selon les deux méthodes.

Direction	Id essai	Vf (%)	Perméabilité		Vf _{corrige} (%)	Kozeny-Carman Perméabilité		Log-Log Perméabilité	
			(m ²)	(Darcy)		(m ²)	(Darcy)	(m ²)	(Darcy)
45°									
	BEN_G1113_45_01	49.21	4.527E-11	46	49.00	4.623E-11	47	6.796E-11	69
	BEN_G1113_45_02	49.20	4.364E-11	44	49.00	4.452E-11	45	6.545E-11	66
	BEN_G1113_45_03	49.20	4.881E-11	49	49.00	4.979E-11	50	7.062E-11	72

Tableau 7.12 Valeurs de perméabilité effectives dans la direction 90° et valeurs corrigées selon les deux méthodes.

Direction	Id essai	Vf (%)	Perméabilité		Vf _{corrige} (%)	Kozeny-Carman Perméabilité		Log-Log Perméabilité	
			(m ²)	(Darcy)		(m ²)	(Darcy)	(m ²)	(Darcy)
90°									
	BEN_G1113_90_01	49.21	2.832E-11	29	49.00	2.892E-11	29	3.180E-11	32
	BEN_G1113_90_02	49.11	2.601E-11	26	50.00	2.630E-11	27	2.788E-11	28
	BEN_G1113_90_03	48.80	3.551E-11	36	51.00	3.481E-11	35	3.179E-11	32
	BEN_G1113_90_04	49.10	3.602E-11	36	52.00	3.638E-11	37	3.773E-11	38

À partir de ces valeurs corrigées, la perméabilité moyenne est calculée pour chaque direction et pour un même taux volumique de fibres. Ces valeurs moyennes de perméabilité sont regroupées dans le Tableau 7.13. À l'aide du logiciel PrinPer, les perméabilités principales sont estimées et présentées au Tableau 7.14 pour les deux méthodes. Contrairement au tissu G986, une différence importante est trouvée dans les valeurs estimées par PrinPer. Dans le cas de la perméabilité principale K_1 , son estimation est environ 20 % plus élevée pour des valeurs corrigées par la méthode log-log. De plus, l'orientation principale d'écoulement est décalée de 15° soit de 8 %. En ce qui concerne la perméabilité principale K_2 , elle reste dans un écart de 3 % de différence.

Cette différence est attribuable aux valeurs de perméabilité dans la direction 45°. En effet, les valeurs moyennes dans cette direction présentent une variabilité de 30 % selon la méthode de correction utilisée. En examinant les valeurs données au Tableau 7.11, on peut observer une forte influence de la méthode de correction. Ainsi, par exemple, la valeur de perméabilité brute pour l'essai BEN_G1113_45_01, dont 46 Darcy, devient 47 Darcy avec la méthode de correction K-C et 69 Darcy pour la méthode log-log. Ceci représente une variation de l'ordre de 2 % et de 33% respectivement. En revanche, la correction du taux de fibres est d'environ 0.5 %, ceci conduit à supposer que la méthode de correction log-log est loin de la réalité dans ce cas particulier.

Si on analyse les valeurs du Tableau 7.11, les taux de fibres obtenus pour les trois essais sont presque identiques (49.21%, 49.20% et 49.20%), ce qui dans la méthode log-log

($\ln(K)$ vs $\ln(V_f)$) donne une tendance linéaire proche de la verticale. Ceci explique la grande variation obtenue. Ainsi, une première limitation de cette approche peut ici être mise en évidence. Seulement les résultats obtenus à partir des valeurs corrigées par la méthode K-C seront donc considérés pour ce tissu.

Tableau 7.13 Valeurs moyennes de perméabilité dans chaque direction mesurée.

	Correction K-C		Correction log-log	
	m^2	Darcy	m^2	Darcy
K_{eff}^0	9.113E-11	92	9.723E-11	99
K_{eff}^{45}	4.685E-11	47	6.796E-11	69
K_{eff}^{90}	3.160E-11	32	3.210E-11	33

Tableau 7.14 Valeurs de perméabilités principales obtenues avec *PrinPer* à partir de valeurs moyennes corrigées selon les deux méthodes.

	Correction K-C		Correction log-log	
	m^2	Darcy	m^2	Darcy
K_1	9.113E-11	92	1.152E-10	117
K_2	3.160E-11	32	3.053E-11	31
β		179.9*		14.96*
K_1/K_2		0.35		0.27

Les Figures 7.17 et 7.18 illustrent graphiquement l'ellipse de perméabilité construite à partir des valeurs des perméabilités principales obtenues avec *PrinPer* avec les deux méthodes.

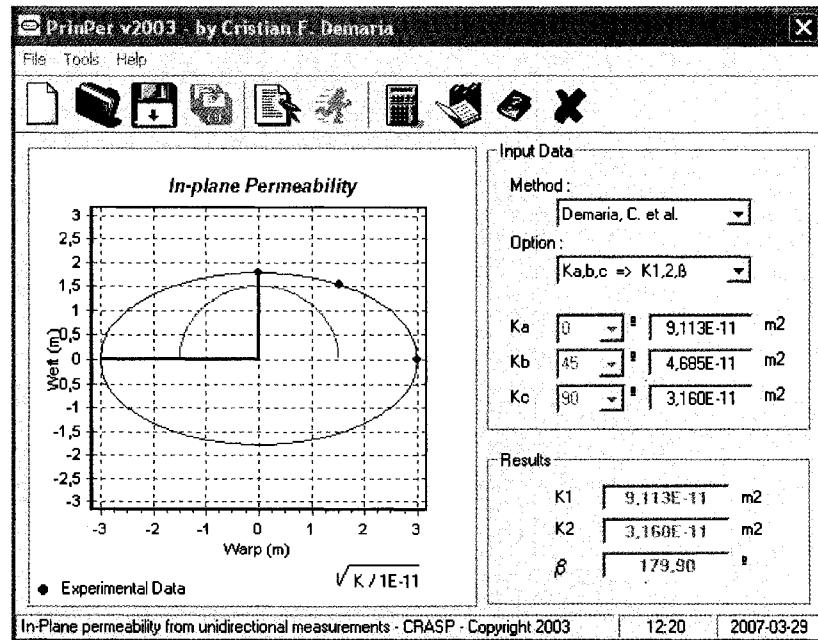


Figure 7.17 Tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode K-C).

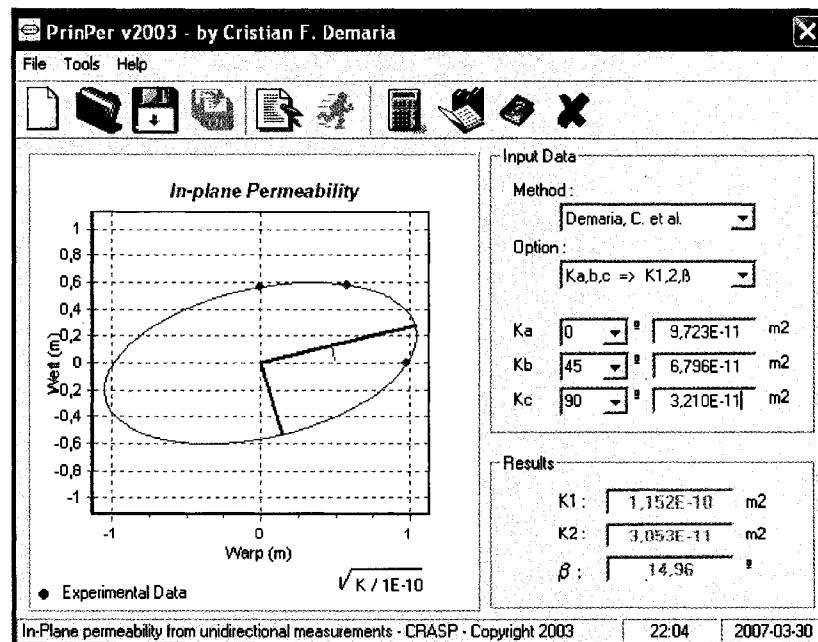


Figure 7.18 Tenseur elliptique de perméabilité estimé par PrinPer (méthode log-log).

7.11.1. Analyse statistique des résultats expérimentaux du renfort G1113

Cette section présente une analyse statistique des résultats obtenus pour le renfort en fibres de verre G1113, similaire à celle effectuée pour le carbone G986. Le Tableau 7.15 donne les coefficients de variation pour chaque direction et chaque méthode de correction calculés à partir des écart-types et les moyennes. La direction 90° donne la dispersion la plus élevée. Comme pour le tissu G986, les dispersions les plus faibles sont obtenues dans la direction à 45°.

Tableau 7.15 Coefficients de variation calculés pour le renfort G1113.

Direction	Coef. de variation (%)	
	K-C	log-log
0°	13.0	5.1
45°	6.3	4.4
90°	15.6	12.2

Finalement, la Figure 7.19 présente une comparaison des dispersions obtenues selon les deux méthodes de correction pour les trois directions mesurées. Une grande différence est observée entre les deux méthodes. La raison en a déjà été discutée auparavant.

Pour la direction à 90°, les distributions ont des allures très proches. Par contre, les deux autres directions présentent des comportements différents. Dans le cas de la direction à 45°, les dispersions sont du même ordre de grandeur. Cependant, elles sont décalées à

cause de la variation observée et discutée à la section précédente. En revanche, les dispersions dans la direction à 0° sont très différentes, même si les valeurs moyennes restent proches l'une de l'autre. Ceci peut être expliqué dans la Figure 7.20. Les valeurs brutes corrigées par la méthode log-log pour un taux de fibres de 49 % restent dans les limites des deux lignes pointillées. Ces lignes représentent le modèle exponentiel $K = f(V_f)$ rapporté aux valeurs brutes. En comparant la plage des valeurs corrigées avec la méthode log-log et celle corrigée par K-C, on retrouve une différence de dispersion plus faible pour la méthode log-log. Par contre, la tendance pour cette méthode a une pente positive, ce qui n'est pas en accord du point de vue physique du phénomène.

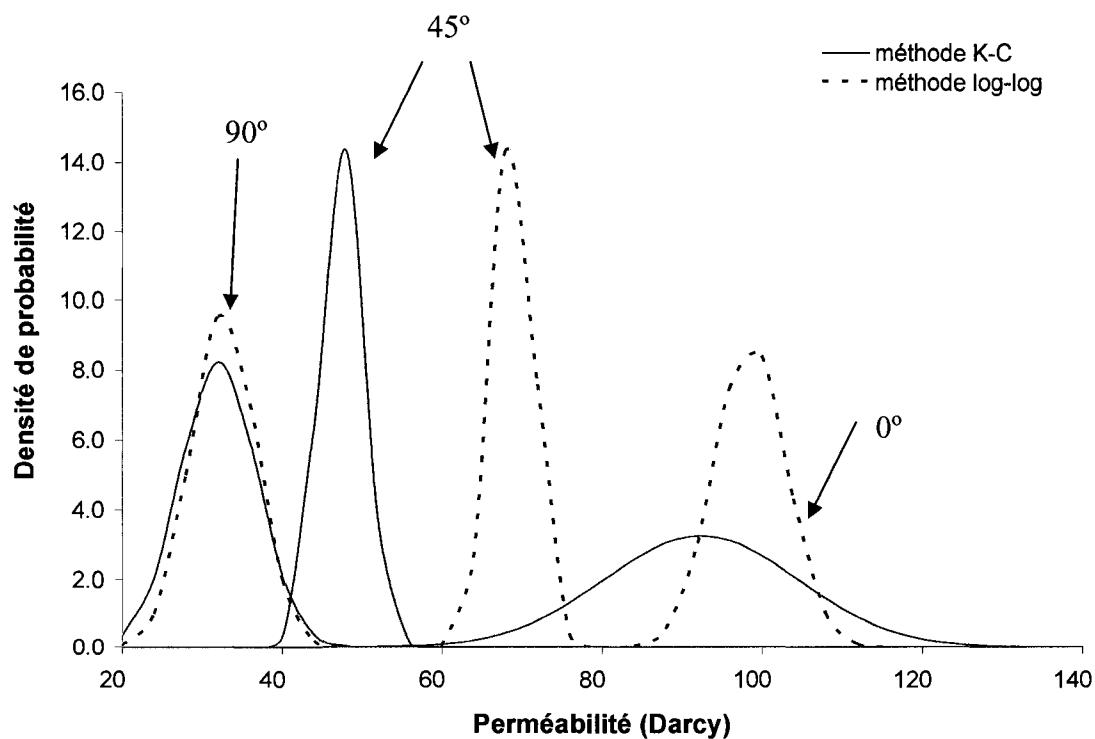


Figure 7.19 Comparaison des dispersions des perméabilités effectives dans les trois directions mesurées et corrigées selon les deux méthodes considérées.

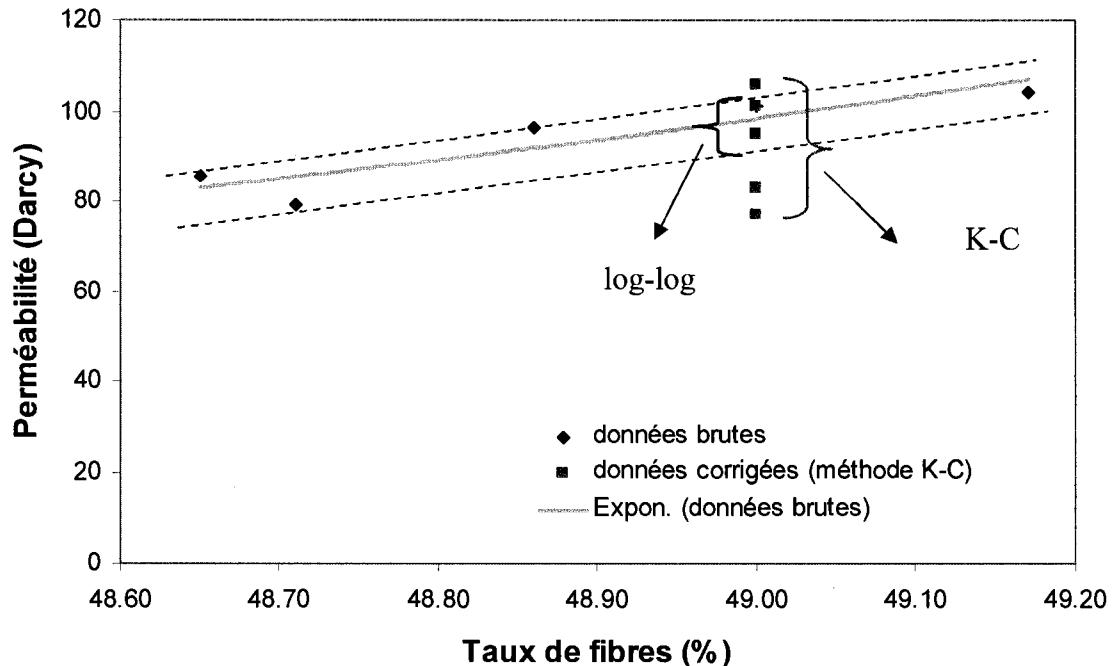


Figure 7.20 Comparaison de la correction des valeurs de perméabilités brutes selon les deux méthodes considérées dans la direction 0°.

7.11.2. Influence de la pression d'injection sur la perméabilité

D'une manière similaire, une série de mesures de perméabilité ont été effectuées à différentes pressions d'injection dans la direction 0°. Les résultats montrent un comportement similaire à celui observé pour le renfort G986. Les perméabilités brutes et corrigées sont reportées à la Figure 7.21 en fonction de la pression d'injection. Les droites des moindres carrés ont été tracées pour les données brutes et pour les données corrigées selon les deux approches considérées. La variation de la perméabilité avec la pression reste inférieure à l'erreur expérimentale. On peut donc conclure aussi pour ce

tissu que la pression d'injection n'a pas d'influence sur les valeurs de la perméabilité mesurée.

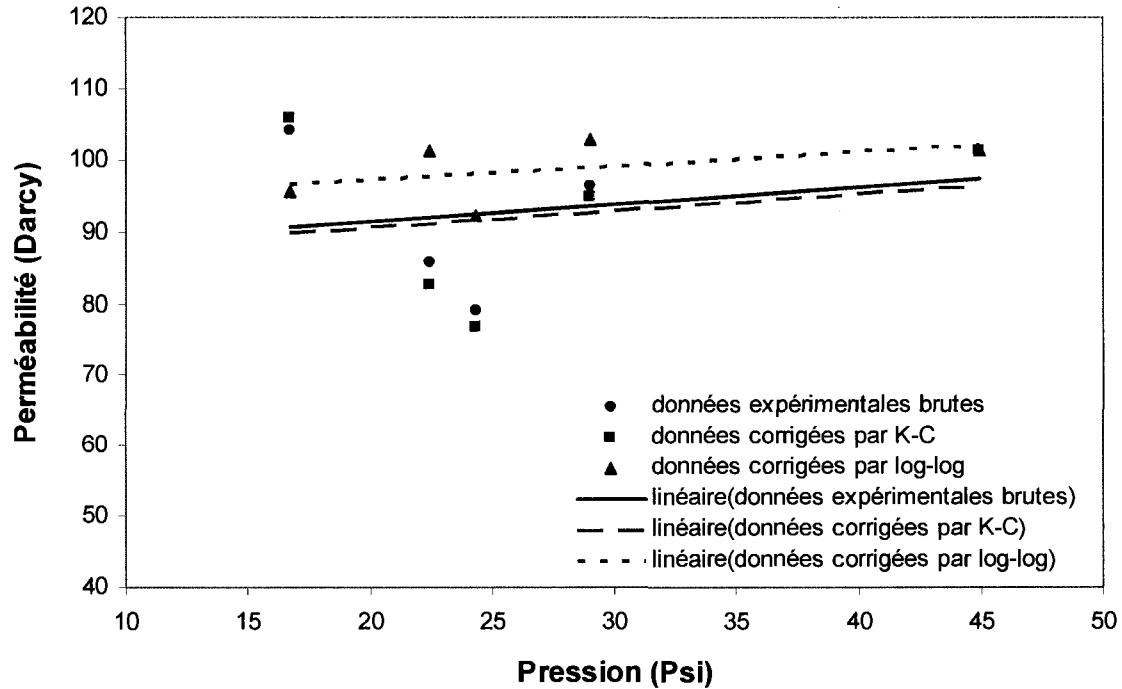


Figure 7.21 Valeurs des perméabilités effectives en fonction de la pression d'injection.

CONCLUSION

Ce travail est consacré à l'étude de la perméabilité de renforts fibreux tissés. Connaître la perméabilité permet, entre autres, de simuler le remplissage de la cavité d'un moule. La perméabilité, qui est principalement obtenue par des méthodes expérimentales, est affectée par plusieurs facteurs autant reliés à la technique de mesure qu'à la fabrication des composites. Ainsi, quand un tissu tissé est placé dans la cavité d'un moule de forme complexe, le matériau subit une déformation. L'angle initialement orthogonal entre les fibres selon la chaîne et la trame n'est plus égal à 90°. La perméabilité d'un tissu déformé doit être connue ou prédictive pour effectuer des simulations numériques précises des différents procédés de moulage par transfert de résine.

L'objectif initial était d'étudier l'influence sur la perméabilité de la déformation par cisaillement des renforts qui a lieu durant le drapage de surfaces complexes. Tout d'abord, le travail se consacre à mesurer et caractériser la perméabilité d'un tissu de carbone sans déformation en fonction du taux de fibres. Le tissu est ensuite soumis à différents degrés de déformation par cisaillement et la perméabilité est mesurée. Après cette étape expérimentale, un modèle de prédiction semi-empirique des perméabilités principales et de l'orientation des fibres est développé pour le tissu déformé.

Un deuxième objectif portait sur la proposition d'une norme de la mesure de perméabilité. Dans ce but, les résultats du travail sur le « banc d'essai » de perméabilité ont été présentés pour deux renforts fibreux. Ce travail fait partie d'une démarche vers la normalisation de ces mesures.

De mesures unidirectionnelles ont été effectuées pour mesurer la perméabilité du tissu non-cisaillé en fonction du taux de fibres. A cette fin, trois mesures de perméabilité sont requises dans trois directions pour chaque taux de fibres analysé. La méthode itérative de l'ellipse est présentée pour obtenir les perméabilités principales planaires et l'orientation principale de l'écoulement à partir de la connaissance des perméabilités effectives dans les trois directions. Les résultats de l'approche proposée ont été confirmés par des observations visuelles d'injections radiales montrant une bonne corrélation avec les perméabilités identifiées par la méthode itérative de l'ellipse. La méthode permet de trouver le tenseur de perméabilité elliptique même si les directions de la chaîne et de la trame ne restent pas orthogonales entre elles. Même si de bons résultats ont été obtenus, la méthode itérative de l'ellipse a été trouvée sensible aux petites variations des perméabilités effectives. Des valeurs précises de perméabilité effective doivent être connues afin d'assurer des résultats acceptables.

Après avoir développé un outil capable d'induire une déformation uniforme au tissu, la perméabilité effective a été étudiée en fonction du degré de déformation. Des mesures tant unidirectionnelles que bidirectionnelles ont été effectuées sur le tissu cisaillé avec

différents angles de cisaillement et différents taux de fibres. Les perméabilités principales et ses orientations ont été ainsi caractérisées en fonction de l'angle de cisaillement et du taux de fibres. L'équation de Kozeny-Carman semble décrire correctement les données expérimentales dans le cas du tissu non-déformé dans la plage des taux de fibres analysés. D'habitude, la constante de Kozeny dans la relation de Kozeny-Carman est supposée constante par rapport au taux de fibres. En fait, on a pu constater que la variation de cette constante en fonction du taux de fibres a une influence importante sur les résultats obtenus par cette relation.

Cette recherche montre clairement que la perméabilité n'est pas affectée seulement par la variation du taux de fibres qui résulte de la déformation en cisaillement du renfort, mais aussi par la réorientation des fibres qui a lieu dans cette déformation. Les perméabilités principales dépendent de l'orientation initiale du front elliptique. En général, tant pour le tissu non-cisaillé que cisaillé, l'orientation principale de l'écoulement reste pratiquement constante pour un angle de cisaillement donné. Ceci permet de considérer la perméabilité comme indépendante du taux de fibres pour un angle de cisaillement donné (dans une plage de $\pm 2^\circ$).

Ensuite, un modèle semi-empirique pour prédire la perméabilité de renforts tissés cisaillés est présenté. Il est fondé sur les deux facteurs qui affectent la perméabilité des tissus cisaillés : le changement du taux de fibres et la réorientation des fibres après drapage. Le modèle requiert la connaissance des perméabilités principales ainsi que des

orientations du tissu non-cisaillé. Dans le cas du tissu utilisé dans le présent travail, la variation du taux de fibres qui résulte du drapage joue un rôle plus important que la réorientation de fibres. Ceci peut être attribué aux petits canaux existants entre deux fibres adjacentes du tissu de carbone utilisé. L'orientation principale de l'écoulement est estimée au moyen de la méthode de l'ellipse décrite au chapitre 1. De plus, une équation est aussi dérivée des résultats expérimentaux pour décrire la variation de l'orientation principale de l'écoulement en fonction de l'angle de cisaillement. En général, une bonne corrélation a été trouvée entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites.

Enfin, le modèle proposé ici a été introduit dans le logiciel Pam-RTM afin d'observer l'influence du drapage lors d'une simulation de remplissage d'une pièce réelle. Des simulations numériques ont été effectuées dans les deux cas, du tissu non-cisaillé et cisaillé. Dans le deuxième cas, le degré de déformation locale – ou l'angle de cisaillement local – a été estimé au moyen du logiciel QuiK-Form. D'après les simulations, l'influence du drapage dans les zones de grande courbure tend à créer une zone sèche dans la pièce. En d'autres termes, la pièce est seulement remplie partiellement. Cette étude démontre qu'une bonne stratégie de positionnement des ports d'injection et des événements est déterminante pour réussir à fabriquer des composites à haute performance par injection sur renfort.

Au chapitre 4, le logiciel PolyPer est présenté en conclusion des chapitres 1 à 3. Ce logiciel permet de systématiser, améliorer et simplifier les travaux nécessaires pour mesurer la perméabilité des renforts fibreux utilisés dans la fabrication des composites à haute performance. PolyPer est un des outils qui vont contribuer à la mise à jour du laboratoire de mesure de perméabilité du Centre de Recherche En Plasturgie Et Composites (CREPEC). Dans cet esprit, un nouveau banc d'essai a été conçu et présenté au chapitre 5. Le nouveau moule a permis, entre autres, de réduire le temps d'opération entre mesure et mesure passant de 45 min à 10 min. Grâce au système de fermeture réglable, différentes longueurs des échantillons peuvent être mesurés tout en gardant une déformation au-dessous de 0.1 mm. Les premiers essais de mise en marche ont montré une bonne performance en général.

Après avoir mis au point tant le nouveau moule que le système d'acquisition de données, dont PolyPer, un tissu de fibres de basalte a été caractérisé dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Connecticut. Le but premier est de comparer les résultats des mesures de perméabilité effectuées par les techniques unidirectionnelle et radiale. Dans une première étape, des mesures de perméabilité ont été effectuées pour le renfort de fibres de basalte sur un moule radial disponible à l'Université de Connecticut. Ensuite, ce renfort a été caractérisé par la technique unidirectionnelle à l'École Polytechnique de Montréal. En suivant la procédure de mesure adoptée à l'EPM depuis plusieurs années, le pesage des échantillons a montré une variation importante de la densité surfacique, et par conséquence, du taux de fibres d'environ de 12%. Étant donné

que la perméabilité est reliée directement au taux de fibres, elle doit être corrigée pour un même taux de fibres afin de pouvoir calculer sa moyenne. Dans ce but, une nouvelle approche a été proposée pour ramener celle-ci au même taux de fibres. L'approche est fondée sur la relation de Kozeny-Carman. En général, les résultats de perméabilité obtenus avec les deux techniques de mesures montrent une bonne corrélation. Une deuxième série de mesures unidirectionnelles effectuées dans la direction 0° a permis de démontrer une bonne fiabilité de la méthode proposé ici. A titre de comparaison, une analyse de dispersion a été effectuée à partir des résultats obtenus pour les deux techniques. Les résultats ont montré une dispersion plus grande dans le cas de la technique radiale, ce qui confirme que la technique unidirectionnelle a une meilleure reproductibilité des essais.

Enfin, les résultats de perméabilité obtenus pour les tissus G986 et le G1113 ont été présentés dans le chapitre 7. L'influence de la pression d'injection sur la perméabilité a été étudiée. Pour les deux tissus caractérisés, la perméabilité varie légèrement avec la pression d'injection. Cependant, cette variation reste dans l'intervalle d'erreur propre de la technique de mesure, ce qui permet de conclure que la pression d'injection n'influe pas la perméabilité des deux tissus étudiés. Bien qu'aucune comparaison ne soit présentée pour des raisons de confidentialité, une bonne corrélation de nos résultats a été trouvée avec certains partenaires participant au projet. Cependant, une large divergence a été trouvée considérant les résultats de tous les participants, avec une variation de la

valeur de la perméabilité de l'ordre de 10 fois et plus, ce qui met en évidence l'impératif besoin de normaliser cette mesure.

La conclusion générale de cette étude est que la perméabilité est une grandeur mesurable d'une manière reproductible, à condition que des précautions suffisantes soient prises tant au niveau de la prise des mesures que de la méthode utilisée et du traitement des données brutes. La contribution principale de ce travail réside dans le développement et la validation d'une nouvelle approche de mesure du tenseur de perméabilité qui permet de caractériser complètement la perméabilité d'un renfort tissé anisotrope au moyen de trois mesures unidirectionnelles. Cette méthode a été étendue au cas des renforts tissés. Une seconde contribution porte sur la méthode de correction de la perméabilité en fonction du taux de fibres fondée sur l'équation de Kozeny-Carman. Enfin, les autres contributions portent sur le logiciel de traitement des résultats bruts de perméabilité, la conception d'un nouveau banc d'essai plus performant pour les mesures unidirectionnelles et la comparaison avec la méthode d'injection radiale développée par l'Université de Connecticut.

RÉFÉRENCES

1. ESI-Group International Ltd., <http://www.esi-group.com>
2. <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/FRDIC/DICPERME.HTM>
Jean Margat, 1999
3. Darcy, H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont, Paris. 1856.
4. Gonzalez, V. M. Polymer Processing with Glass Reinforcement: University of Minnesota; 1987.
5. Adams, K. L.; Miller, B., and Rebenfeld, L. Forced In-plane Flow of an Epoxy Resin in Fibrous Networks. *Polymer Engineering and Science*. 1986; 16(20):1434-1441.
6. Adams, K. L. and Rebenfeld, L. In-plane Flow of Fluids in Fabrics: Structure/Flow Characterization. *Textile Research Journal*. 1987; 57(11):647-654.
7. Greve, B. N. and Soh, S. K. Directional Permeability Measurement of Fiber-Glass Reinforcements . *SAE Special Publications* (812). 1990.
8. Adams, K. L., Russel, W. B. and Rebenfeld, L. Radial Penetration of a Viscous Liquid into a Planar Anisotropic Porous Medium. 1988 Apr; 14, (2): 203-215 .
9. Rudd, C. D.; Harrison, A.; Rice, E. V.; Kendall, K. N.; Bulmer, L. J.; Longbottom, A. C., and Owen, M. J. Integrated Design for RTM Components. *Proc. ASM/ESD Advanced Composites Conference*; Chicago. 215-230. ISBN: 0-87170-451-X.
10. Ferland, P; Guittard, D, and Trochu, F. Concurrent Methods for Permeability Measurement in Resin Transfer Molding. *Polymer Composites*. 1996; 17(1):149-158; ISSN: 0272-8397.

11. Weitzenbock, J. R.; Shenoi, R. A., and Wilson, P. A. Radial flow permeability measurement. Part A: Theory. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 1999 Jun; 30(6):781-796.
12. Gauvin, R; Trochu, F; Lemenn, Y, and Diallo, L. Permeability Measurement and Flow Simulation Through Fiber Reinforcement. Polymer Composites. 1996; 17(1): 34-42; ISSN: 0272-8397.
13. Hirt, D. E.; Adams, K. L.; Prud'homme, R. K., and Rebenfeld, L. In-plane Radial Fluid Flow Characterization of Fibrous Materials. J. Therm. Insul. 1987; (10):153-172.
14. Chan, A. W.; Larive, D. E., and Morgan, R. J. Anisotropic permeability of fiber preforms: constant flow rate measurement. Journal of Composites Materials. 1993; 27(10):996-1008.
15. Chan, A. W. and Hwang, S. T. Anisotropic in-plane permeability of fabric media. Polymer Engineering and Science. 1991; 31(16):1233-1339.
16. Bear, J. Dynamics of fluids in porous media. 1972.
17. Weitzenbock, J R; Shenoi, R A, and Wilson, P A. Measurement of Principal Permeability With the Channel Flow Experiment. Polymer Composites. 1999; 20(2):321; ISSN: 0272-8397.
18. Gebart, B R and Lidstrom, P. Measurement of in-Plane Permeability of Anisotropic Fiber Reinforcements. Polymer Composites. 1996; 17(1): 43; ISSN: 0272-8397.
19. Lundstrom, T. S.; Stenberg, R.; Bergstrom, R.; Partanen, H., and Birkeland, P. A. In-plane permeability measurements: a nordic round-robin study. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2000 Jan; 31 (1):29-43.

20. Parnas, Richard S. and Salem, Andrew J. Comparison of the unidirectional and radial in-plane flow of fluids through woven composite reinforcements. *Polymer Composites*. 1993 Oct; 14(5):383-394.
21. Gutowski, Timothy George Peter. *Advanced composites manufacturing*. New York, Toronto: John Wiley & Sons; 1997. xii, 581 p .
22. Potter, K. D. The influence of accurate stretch data for reinforcements on the production of complex structural mouldings. 1979 Jul; 10, (3): 161-173.
23. Mohammed, U. ; Lekakou, C., and Bader, MG. *Proc FPCM 5*, Plymouth, UK. 1999: 53.
24. Wang J.; Paton, R., and Page, J. R. The draping of woven fabric preforms and prepgs for production of polymer composite components. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999 Jun; 30(6):757-765.
25. Hammami, A; Trochu, F; Gauvin, R, and Wirth, S. Directional Permeability Measurement of Deformed Reinforcement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1996; 15(6):552-562; ISSN: 0731-6844.
26. Heardman, E. ; Lekakou, C., and Bader, M. G. In-plane permeability of sheared fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2001 Jul; 32(7):933-940.
27. Ueda, S. and Gutowski, T. Anisotropic permeability of deformed fabric. *Composites Manufacturing*. 1993.
28. Rudd, C. D.; Long, A. C., and McGeehin, P. Design for Manufacturing in Liquid Composite Moulding. International Conference on Design and Manufacture Using Composites, ATMAM-94; Montreal, Quebec.
29. Lai, C. L. and Young, W. B. Model resin permeation of fibre reinforcements after

- shear deformation. 1999; 18, (5): 642–648.
30. Gauvin, R and Trochu, F. Key Issues in Numerical Simulation for Liquid Composite Molding Processes. *Polymer Composites*. 1998; 19(3): 233-240; ISSN: 0272-8397.
 31. Bickerton, Simon; imaeck, Pavel; Guglielmi, Sarah E., and Advani, Suresh G. Investigation of draping and its effects on the mold filling process during manufacturing of a compound curved composite part. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1997; 28(9-10):801-816.
 32. Fong, L. and Advani, S. G. The role of drapability of fiber preforms in resin transfer molding. *Proc. of 9th ASC Conf*; 1994: 1246.
 33. Fong, L.; Advani, S. G., and Fickie, K. The Deformation of Bidirectional Fabric in Composite Processing Using Resin Transfer Moulding. 1995; ARO report.
 34. Laberge-Lebel, L.; Ruiz, E., and Trochu, F. Développement d'outils de caractérisation pour la fabrication des composites. 2001.
 35. Rudd, C. D.; Long, A. C.; McGeehin, P.; Cucinella, F., and Bulmer, L. J. Processing and mechanical properties of bi-directional preforms for liquid composite moulding. 1995; 6, (3): 211–219.
 36. Slade, J.; Sozer, E. M., and Advani, S. G. Fluid impregnation of deformed preforms. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2000; 19(7):552-568.
 37. Simacek, Pavel and Advani, Suresh G. Permeability model for a woven fabric. *Polymer Composites*. 1996 Dec; 17(6):887-899.
 38. Endruweit, A. Investigation of the Influence of Local Inhomogeneities in the Textile Permeability on the Resin Flow in Liquid Composites Moulding Processses: Swiss Federal Institute of Technology Zurich; 2003ETH No. 14990.

39. Endruweit, A. and Ermanni, P. The in-plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. In Press, Corrected Proof.
40. Louis, Markus and Huber, Ulrich. Investigation of shearing effects on the permeability of woven fabrics and implementation into LCM simulation. *Composites Science and Technology*. 2003 Nov; 63(14):2081-2088.
41. Smith, P.; Rudd, C. D., and Long, A. C. The effect of shear deformation on the processing and mechanical properties of aligned reinforcements. *Composites Science and Technology*. 1997; 57(3):327-344.
42. Van Der Ween, F. Algorithms for draping fabrics on doubly curved surfaces. *Int. J. Numerical Methods in Engineering* . 1991; 31:1415-1426.
43. Trochu, F., Hammami, A., and Benoit, Y. Prediction of fibre orientation and net shape definition of complex composite parts. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1996; 27(4):319-328.
44. Smiley, A. J. and Pipes, R. B. Fibre Placement During the Forming of Continuous Fibre Reinforced Thermoplastics. Philadelphia, PA.; 1987; EM87-129.
45. Van West, B. P.; Keefe, M., and Pipes, R. B. The Draping of bidirectional Fabrics over Arbitrary Surfaces. American Society for Composites; 1988: 463-472.
46. Van West, B. P.; Pipes, R. B., and Keefe, M. A simulation of the draping of bidirectional fabrics over arbitrary surfaces. *Journal of the Textile Institute*. 1990; 81:448-460.
47. <http://www.uconn.edu/>

48. <http://www.albarrie.com/>
49. http://web13754.vs.netbenefit.net/html/pdf/glossaire_composite_biodeg_carma2.pdf
50. <http://www.basaltex.com/files/cms1/TUT55-DOSS-Basalt1.pdf>
51. Liu, Q., Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites – Processing and Properties, Université de Connecticut, 2006.
52. <http://www.measurementcomputing.com>
53. Hoes, K., Dinescu, D., Sol, H. Vanheule, M., Parnas, R. Luo, Y. and Verpoest, I., New Set-up for Measurement of Permeability Properties of Fibrous Reinforcements for RTM. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2002; 33(?):959-969.
54. Chapuis, R. and Aubertin, M., Predicting the Coefficient of Permeability of Soils Using the Kozeny-Carman Equation, Ecole Polytechnique de Montréal, 2003.
55. Han, K. K., Lee, C. W. and Rice, B. P. Measurements of the permeability of fiber performs and applications. Composites Science and Technology. 2000.
56. Willaims, J. G., Morris, C. E. M. and Ennis, B. C. Liquid Flow through aligned Fiber Beds, *Polymer Engineering and Science*, v14, n6, p. 413-419, 1974.
57. Martin, G. Q. and Son, J. S. Fluid mechanics of moldfilling for fiber reinforced plastics, In *Proceedings of the 2nd Conference on Advanced Composites*, p. 149-157, Dearborn, MI, 1986.

58. Foley, M. F. and Gutowski, T. The effect of process variables on permeability in the flexible resin transfer molding (FRTM) process. In *23rd International SAMPE Technical Conference*, 1991.
59. Pollard, M. Permeabilities of fiber mats used in resin transfer molding, In *24th International SAMPE Technical Conference*, p. T408-T420, 1992.
60. Lekakou, C., Johari, M. A. K., Norman, D. and Bader, M.G. Measurement techniques and effects on in-plane permeability of woven clothes in resin transfer molding, *Composites: Part A*, 27A, p. 401-408, 1996.
61. Hammond, V. H. and Loos, A. C. The effects of fluid type and viscosity on the steady-state and advancing front permeability behavior of textile performs, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v 16, n1, p. 50-72, 1997.
62. Dungan, F. D. and Sastry, A.M. Saturated and unsaturated polymer flows: Microphenomena and modeling, *Journal of Composite Materials*, 35, 2002.
63. Skartsis, L., Khomami, B. and Kardos, J. L. Resin flow through fiber beds during composite manufacturing processes. Part II: Numerical and Experimental Studies of Newtonian Flow Through Ideal and Actual Fiber Beds. *Polymer Engineering and Science*, February 1992, Vol 32, No 4.
64. Parnas, R. S., Howard, J. G., Luce, T. L. and Advani, S.G. Permeability Characterization. Part 1: A Proposed Standard Reference Fabric for Permeability, *Polymer Composites*, 16(6), 429-45, 1995.
65. Parnas, R. S., Flynn K. M. and DalFavero, M. E. A Permeability Database for Composites Manufacturing, *Polymer Composites*, 18(5), 623-33, 1997.

66. <http://biblioxtu.uqar.qc.ca/stat/Fichesstat/Dispersion/CoefVariation.htm>
67. Shojaei, A., Trochu, F., Ghaffarian, S. R., Karimian, S. M. H. and Lessard, L. An Experimental Study of Saturated and Unsaturated Permeabilities in Resin Transfer Molding Based on Unidirectional Flow Measurements, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23(14), 1515-1536, 2004.
68. Young WB, Rupel K, Han K, Lee LJ, Liou MJ. Analysis of resin injection in molds with preplaced fiber mats. II: Numerical simulation and experiments of mold filling, *Polymer Composites*, 12(1), 30-38, 1991.
69. Chan A.W., Larive D.E. and Morgan R.J. Anisotropic permeability of fiber preforms: constant flow rate measurement. *Journal of Composite Materials*, 27(10), 996-1008, 1993.
70. Visconti I.C., Langella A. and Durante M. The influence of injection pressure on the permeability of unidirectional fiber preform in RTM. In: Proceeding of 8th European Conference on Composite Materials, ECCM-8, Naples, Italy, 1998, 737-743.

ANNEXES

ANNEXE A : VERIFICATION DE LA VISCOSITE DU FLUIDE A INJECTER

Actuellement, pour des raisons pratiques (reliées au coût et à la facilité de mise en œuvre), les mesures de perméabilités des renforts fibreux sont effectuées avec de l'huile de silicone, qui présente le comportement d'un fluide Newtonien à température ambiante (c'est-à-dire que la viscosité du fluide est indépendante de la vitesse). D'après les données de la fiche technique, cette huile a une viscosité de 100 Cp à 24°C.

Dans un premier temps, il est apparu primordial de vérifier si l'on pouvait considérer cette huile comme un fluide Newtonien et de déterminer sa viscosité à la température du laboratoire, soit 23 °C. La Figure ci-dessous montre les résultats de vérification de la viscosité de l'huile de silicone effectuée dans le laboratoire à 23 °C. La valeur de la viscosité mesurée (104 Cst) est utilisée dans le dépouillement des résultats de mesure de perméabilité.

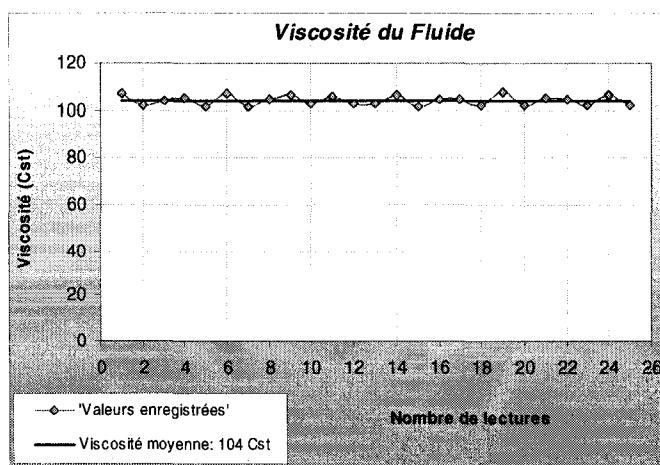


Figure A.1 Résultats d'une mesure de viscosité de l'huile de silicone effectuée à 23°C.

**ANNEXE B : DIAGRAMME DE CALCUL DES PERMEABILITES
PRINCIPALES**

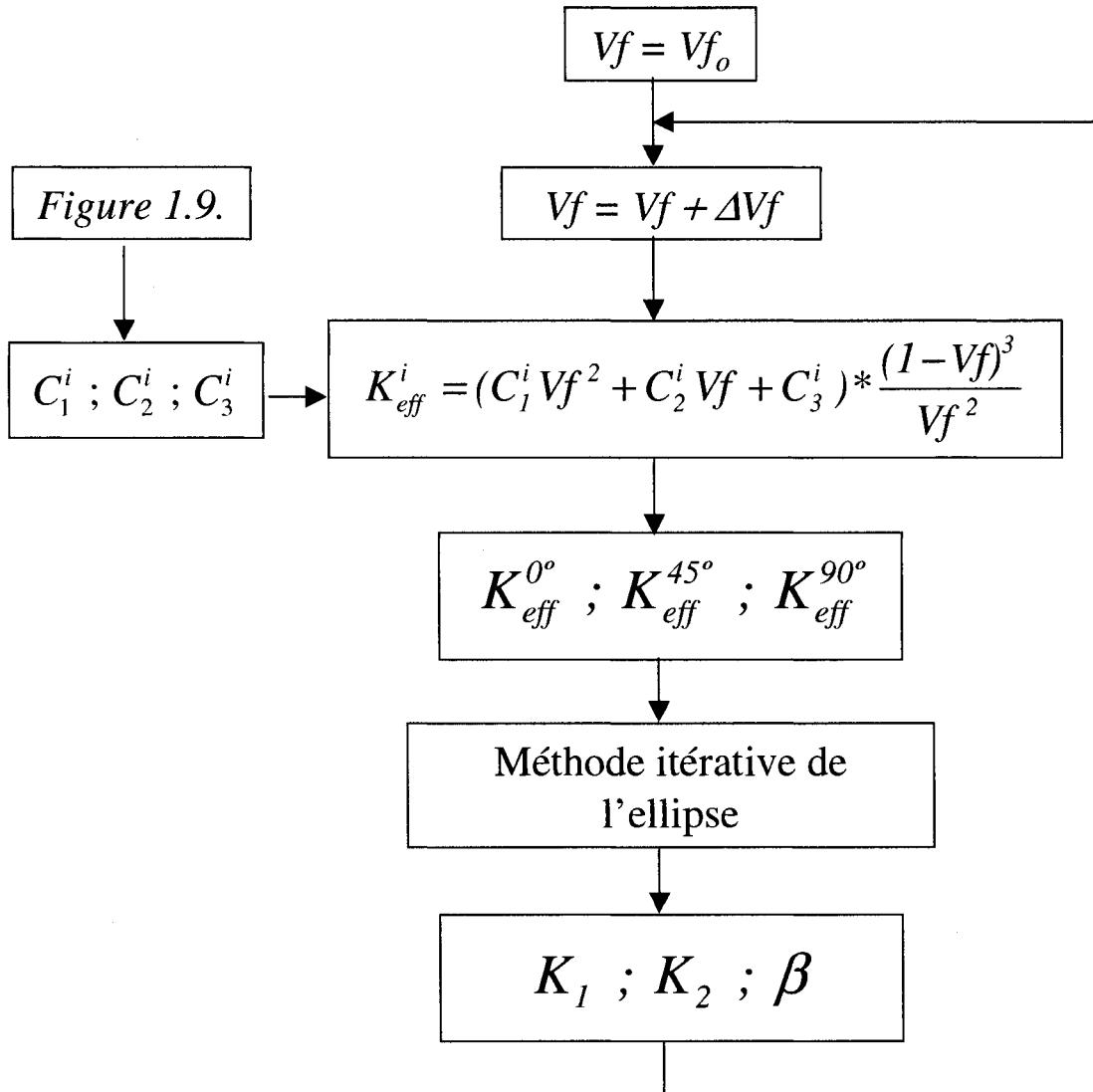


Figure B.1 Diagramme de la procédure de calcul des perméabilités principales à partir des perméabilités effectives selon trois directions.

ANNEXE C : CONCEPTION DU CADRE DE CISAILLEMENT

C.1 Introduction

Cette annexe résume le travail accompli durant l'été au moyen de la bourse du CRSNG par Laberge-Lebel et al. [34] au Centre de Recherche Appliquée Sur les Polymères (CRASP). On y montre la solution trouvée pour le cisaillement des renforts tissés.

C.2 Cadre de cisaillement

L'objectif du projet est de cisailier un renfort fibreux afin d'en déterminer la perméabilité. Plusieurs contraintes doivent être prises en compte dans la conception d'un outil permettant de déformer d'une manière contrôlée un renfort tissé.

Premièrement, la perméabilité doit être mesurée jusqu'à l'angle de blocage des fibres, soit l'angle maximal de cisaillement qu'un renfort peut admettre avant de se déformer à l'extérieur de son plan (pli). Le système doit donc permettre de créer des déformations jusqu'à des angles importants. Dans cette étude, l'angle de cisaillement maximum a été fixé à 60°. Par ailleurs, le banc d'essai pour la mesure de la perméabilité consiste en un moule unidirectionnel rectangulaire (voir Figure C.1).

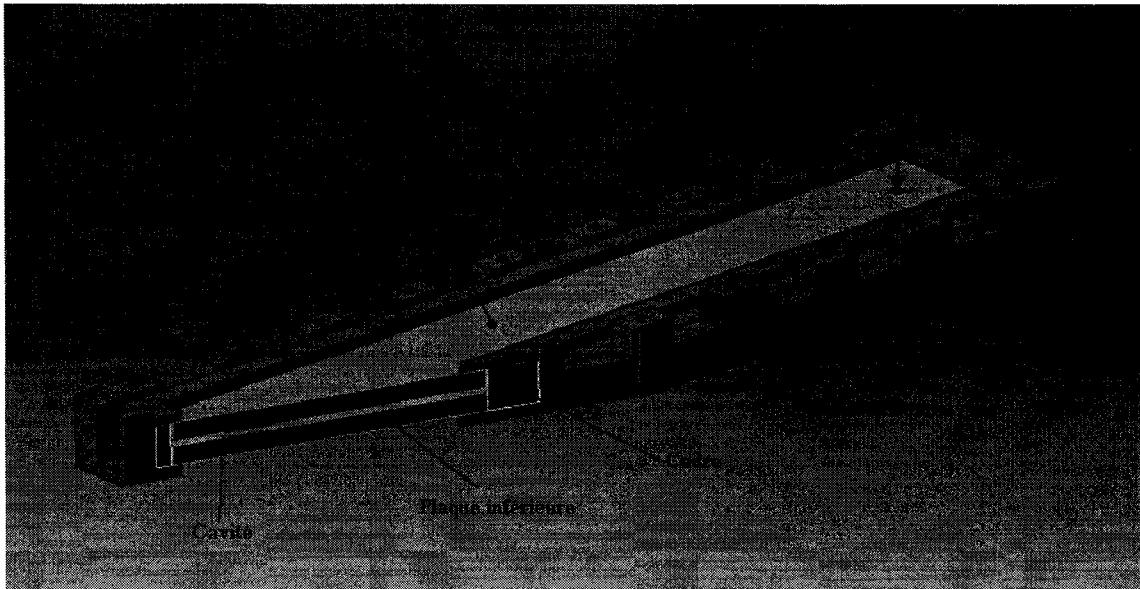


Figure C.1. Description du moule rectangulaire de perméabilité.

Un fluide est injecté à pression constante à travers le renfort fibreux compacté à un taux de fibres connu dans la cavité du moule. Avec une lecture de la pression d'injection et en enregistrant l'évolution du front dans le temps, il est possible de déterminer la perméabilité du renfort à partir de la loi de Darcy. Pour avoir de bons résultats, la préforme doit mesurer de 300 à 400 mm par 100 mm. De plus, la fibre doit se déformer en gardant une certaine planéité. Finalement, le système de cisaillement doit posséder une rigidité et être robuste afin de permettre des manipulations aisées.

C.3 Solution retenue

La solution retenue consiste en un cadre articulé en aluminium en dessous duquel on fixe la fibre. Les dimensions ont été déterminées afin de pouvoir couper deux préformes perpendiculaires, une de 400 mm et l'autre de 300 mm de longueur, en s'assurant d'avoir les dégagements nécessaires au passage du couteau de découpe et de manière de permettre un angle de cisaillement jusqu'à 60° (voir Figure C.2).

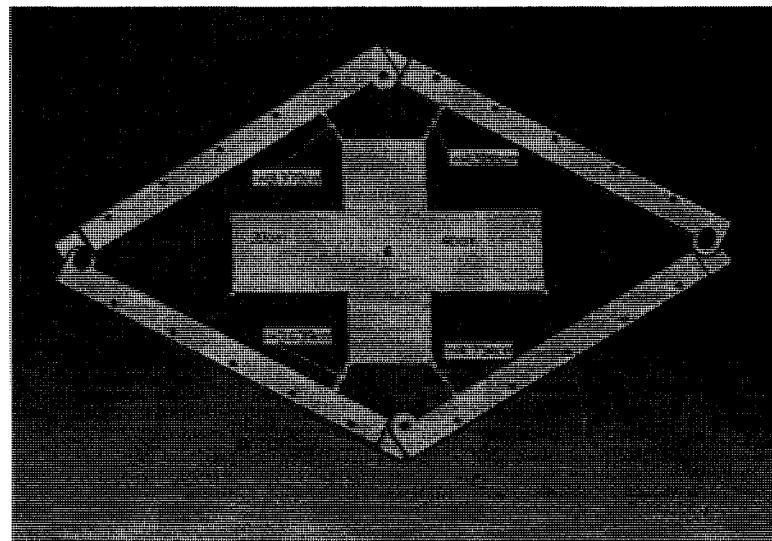


Figure C.2 : Design du cadre.

L'action de cisaillement est assurée par des rotules positionnés au quatre coins du cadre, qui permettent une rotation selon un axe perpendiculaire au plan du renfort. La rotation se fait sur le pivot vis que l'on peut serrer afin de fixer le cadre à un angle voulu (voir Figure C.3).

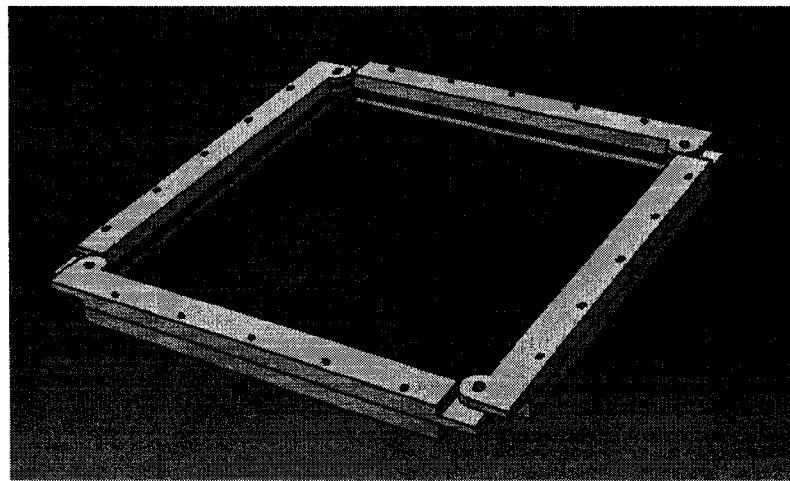


Figure C.3 : Cadre de cisaillement.

Pour fixer le renfort, quatre barres viennent serrer la fibre contre le cadre articulé. Cinq vis par arrête sont disponibles pour effectuer le serrage. Les barres sont munies sur une face d'une bande de mousse plastique pour donner une emprise sur la fibre tandis que l'aluminium du cadre vient en contact avec la fibre (voir Figure C.4). Ceci prévient la déformation du renfort tout en autorisant un certain glissement.

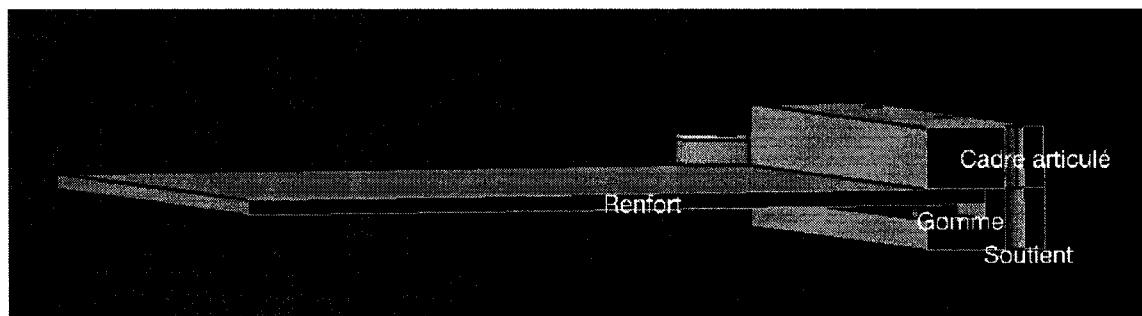


Figure C.4 : Fixation de la fibre.

Pour terminer, le cadre de cisaillement nécessite un préforme initiale de 500 mm par 500 mm.

C.4 Instrumentation

Plusieurs accessoires sont nécessaires pour préparer les échantillons de tissu cisailé : une planche de fixation, des planches de découpe, des gabarits de découpe, un couteau rotatif et un rapporteur d'angle (voir Figure C.5).

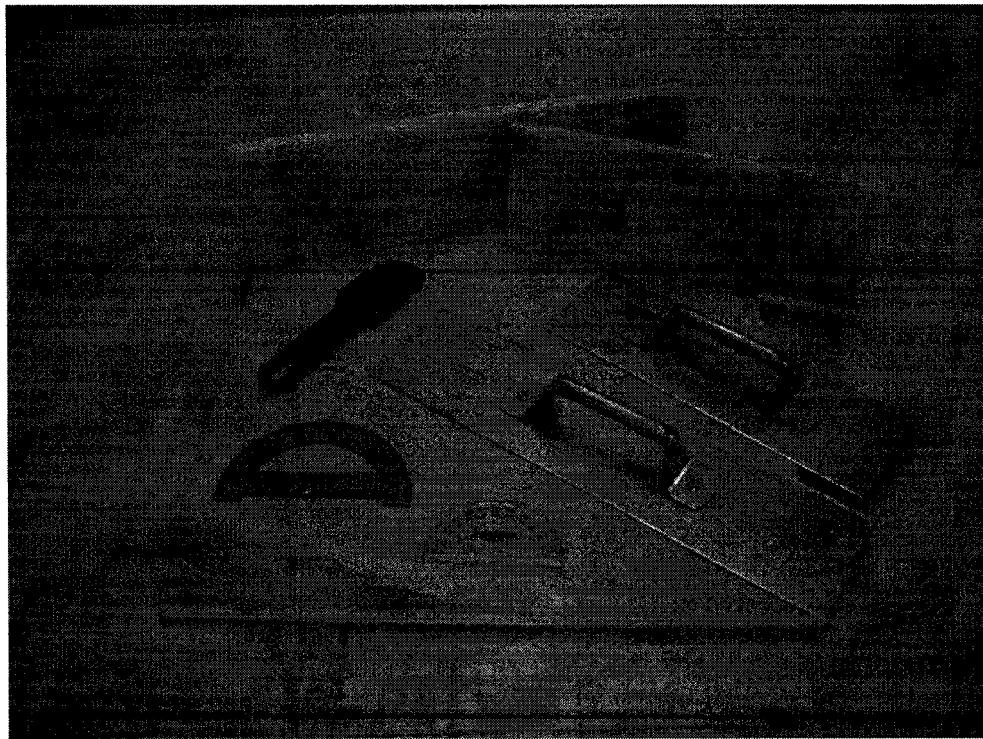


Figure C.5: Accessoires requis pour découper les échantillons de tissu cisailé.

C.5 Procédure

Voici la procédure à suivre afin d'obtenir un échantillon utilisable :

Découper un ou plusieurs morceau(x) de tissu de 500 mm par 500 mm

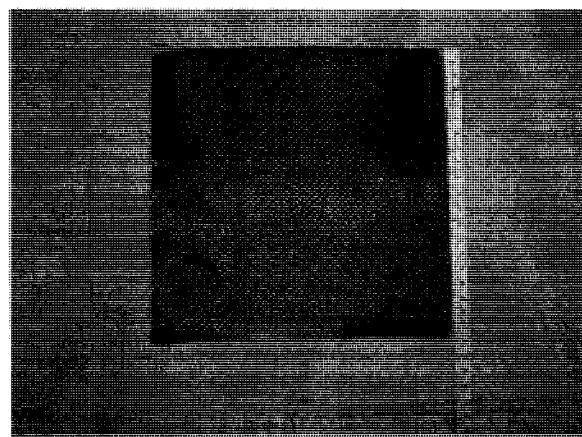


Figure C.6 : Découpe des fibres.

Placer les supports autour de la planche de fixation à leur emplacement prédéterminé



Figure C.7 : Installation des supports.

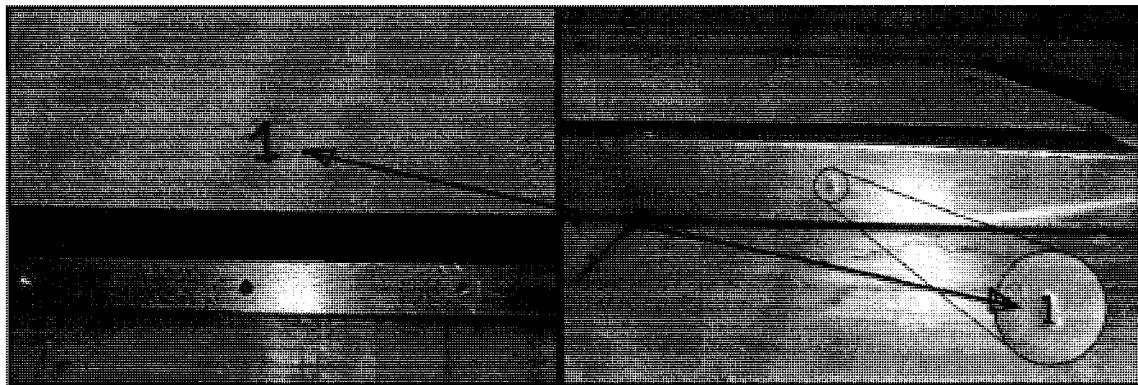


Figure AIII-8 : Alignement des supports avec les numéros de la planche de fixation.

Placer le ou les morceau(x) de tissu en s'assurant que les fils de trame et de chaîne sont parallèles aux côtés de la planche de fixation (Figure C.9).

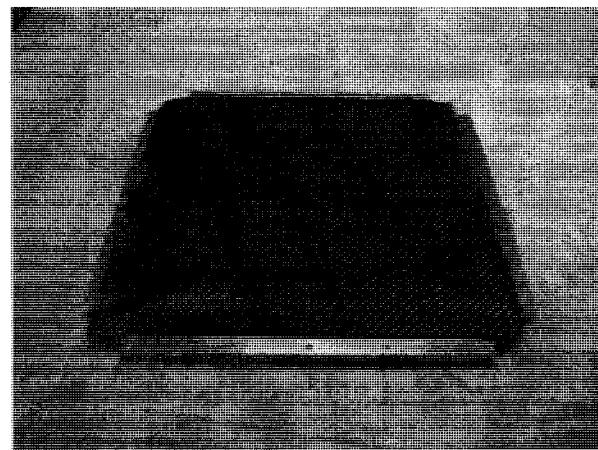


Figure C.9 : Installation de la fibre.

Déposer et visser le cadre en s'assurant que les arrêtes correspondent avec les soutiens. Cette correspondance est assurée par des numéros burinés sur chacune des pièces (Figure C.10).

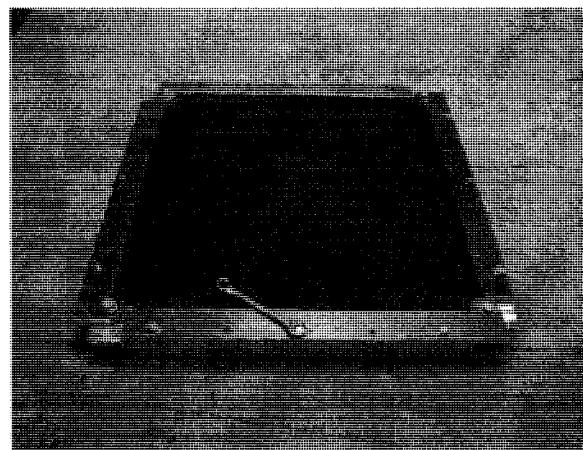


Figure C.10 : Installation du cadre.

Tracer la diagonale selon laquelle la préforme sera prélevée, retirer le cadre et cisailleur à l'angle voulu.

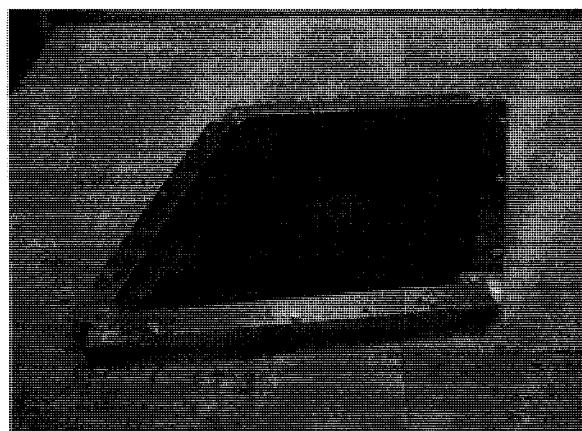


Figure C.-11 : Cisaillement des fibres.

Fixer le cadre dans sa position en vissant les vis des rotules aux quatre coins (Figure C.12).

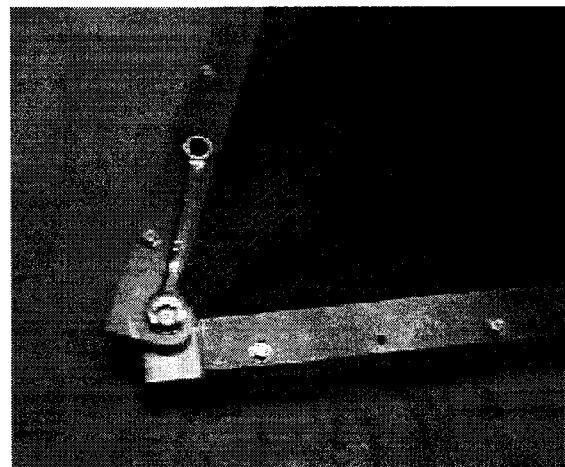


Figure C.12 : Serrage des rotules

Positionner la planche à découper sur une ligne préalablement dessinée sur une table (Figure C.13).

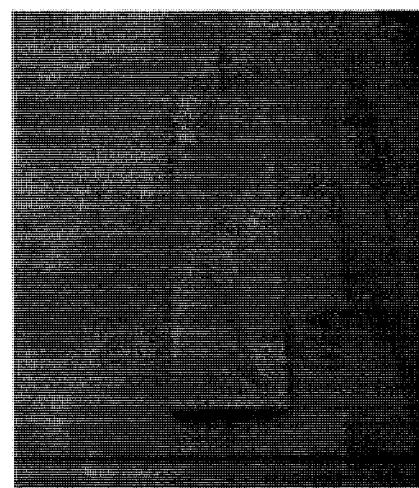


Figure C.13 : Positionnement de la planche à découper.

Couvrir la planche à découper avec le cadre en s'assurant que la diagonale du cadre soit superposée sur la ligne dessinée en 7.

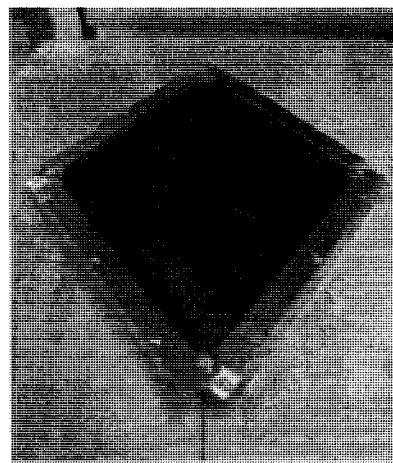


Figure C.14 : Positionnement du cadre cisailé

Découper la préforme en positionnant bien le gabarit de coupe au-dessus de la planche à découper (Figure C.15).

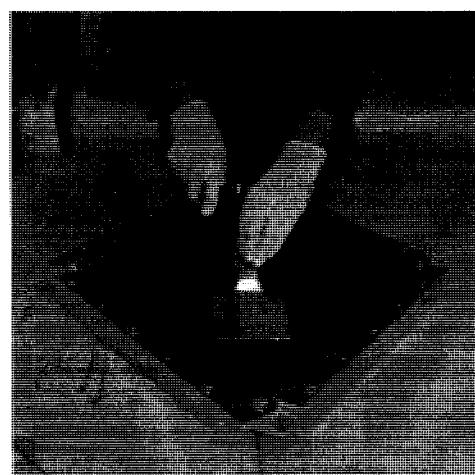


Figure C.15 : Découpe de la préforme.

Retirer délicatement le cadre. Afin de s'assurer d'avoir le bon angle de cisaillement après manipulation de la préforme, il faut que celle-ci conserve les mêmes dimensions que dans la coupe originale (Figure C.16).

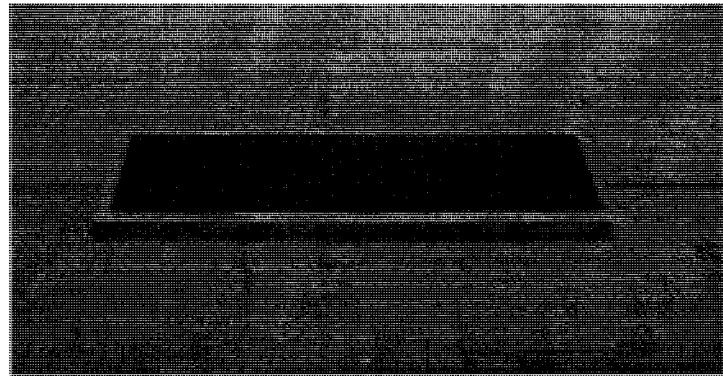


Figure C.16 : Échantillon découpé.

ANNEXE D : FICHE TECHNIQUE DES PISTONS PEUMATIQUES

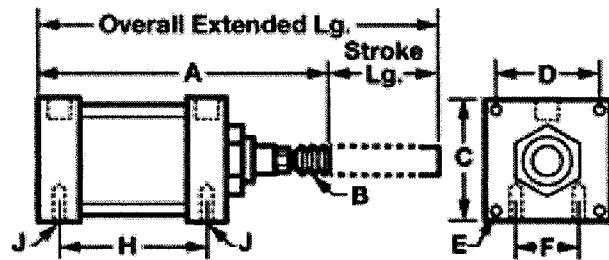


Figure D.1 Dimensions générales des pistons pneumatiques choisis.

Diamètre du piston		6 "
Force (100 psi)	Poussee (lbs) Traction(lbs)	2827 2678
Connexions		¾ " NPT
Longueur (piston rétracté) (A)		26 ¾ "
Tige, longueur et type de filetage (B)		1"- 14 x 1 5/8"
Base (C)		6 ½ "
Distance entre les trous de montage (D)		4 7/8"
Trous de montage (E)		½ "-20
(F)		3 1/4"
(H)		21 5/8"
(J)		3/4"-10

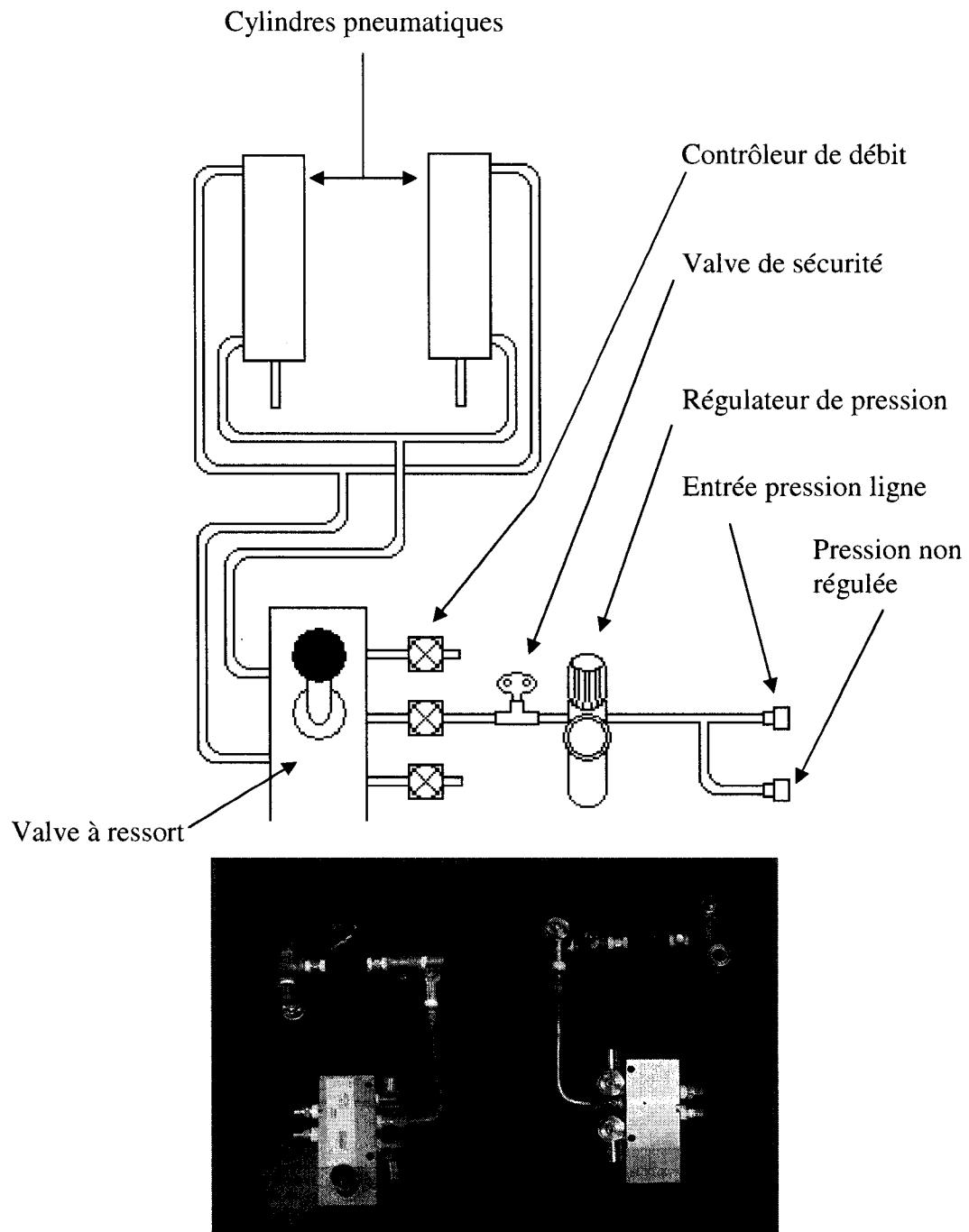
ANNEXE E : PLAN DU CIRCUIT D'AIR COMPRIMÉ

Figure E.1 : Circuit d'air comprimé et ses composantes.

E.1 Valve à ressort

Le mouvement des pistons est commandé par une valve à 4 voies, 3 positions et 5 ports de connexion. Celle-ci est en position fermée en son centre, où elle revient automatiquement, lui permettant de conserver la pression dans les pistons afin de les garder en position. Dans les deux autres positions, elle envoie la pression d'un côté et libère la pression de l'autre. La Figure E.2 montre cette valve et le fonctionnement de chacune de ses positions.

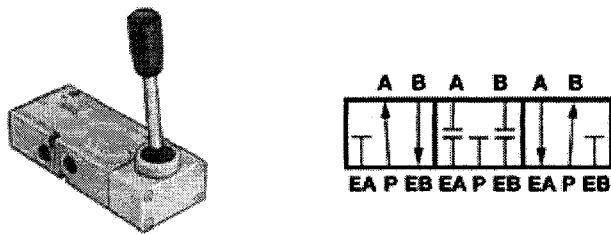


Figure E.2 : Valve à ressort.

E.2 Contrôleur de débit

L'utilisation de contrôleurs de débit est très utile avec des cylindres pneumatiques, car ils contrôlent la vitesse du mouvement des pistons et permettent d'assurer un déplacement régulier sans a' coups. Les contrôleurs utilisés fonctionnent dans un sens précis, ce qui requiert un bon positionnement. En tout, il existe trois contrôleurs de débit dans le système. Le premier sert à contrôler le débit lorsque la pression est donnée dans le sens de montée ou de descente. Il est branché directement à l'entrée de la pression sur la valve. Les deux autres sont branchés en sortie de la valve qui contrôle

indépendamment la vitesse de montée et de descente. La Figure E.1 montre ces connexions.

E.3 Régulateur de pression

Le régulateur de pression sert à contrôler la pression à injecter dans les pistons. Ainsi, s'il est nécessaire d'avoir une plus ou moins grande pression dans les cylindres, c'est le régulateur de pression qui s'en charge. Comme le montre la Figure E.1., le régulateur se trouve juste avant le contrôleur de débit connecté à l'entrée de pression dans la valve.

E.4 Pression non régulée pour le pot de pression

Un connecteur rapide est prévu pour alimenter le pot d'injection. La Figure E.1 montre que ce connecteur est situé avant le régulateur; donc il n'est pas affecté par celui-ci. C'est plutôt à l'aide du régulateur de pression sur le pot d'injection que la pression voulue est ajustée.

E.5 Connexion des cylindres

Les deux cylindres sont connectés ensemble ce qui permet d'avoir une pression constante dans ceux-ci comme le montre la Figure E.3. Ceci facilite les manipulations, car une seule valve suffit alors pour actionner les deux pistons.

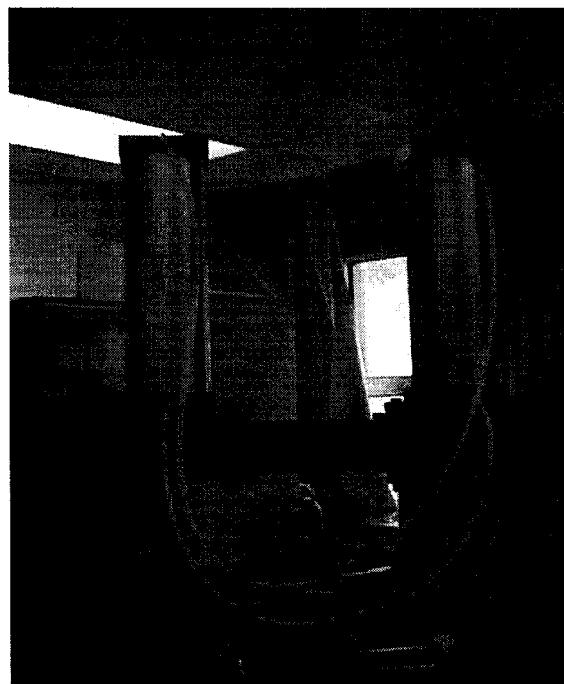


Figure E.3 Connexion des pistons

ANNEXE F : PROCÉDURE D'UTILISATION DU MOULE DE PERMÉABILITÉ 1D

La procédure d'utilisation du nouveau banc d'essai unidirectionnel pour mesurer la perméabilité des renforts fibreux est définie par les étapes suivantes :

1-Connecter la pression au système. Un connecteur rapide supérieur est prévu à cet effet.



Figure F.1 Connexion du système à la ligne d'air comprimé.

2-Connecter le pot de pression au connecteur rapide prévu à tel effet. Vérifier les connexions d'huile et les faire si nécessaire.



Figure F.2 Connexion du pot de pression au système.

3-Vérifier le niveau d'huile dans le pot de pression. À titre d'information, un pot plein d'huile équivaut à 10 mesures de perméabilité.



Figure F.3 Vérification de la quantité d'huile dans le pot de pression.

4-Dessiner ou vérifier les lignes sur la plaque de verre. Celles-ci doivent commencer à 100 mm du bord et être distancées de 2 cm. La ligne centrale sert de repère visuel pour la prise de données.



Figure F.4 Dessin des lignes sur la plaque de verre supérieure.

5-Remonter le cadre de fermeture à sa position élevée et enclencher les câbles de sécurité.

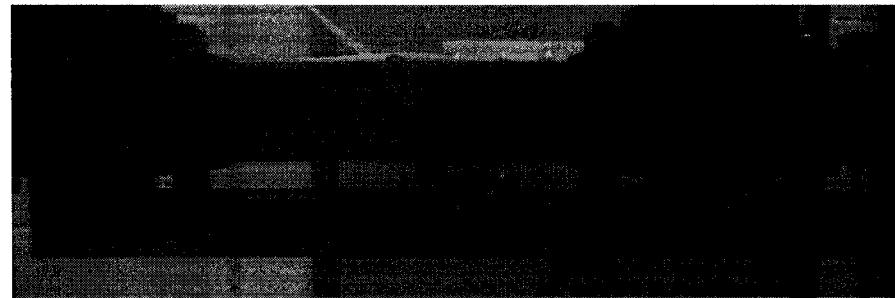


Figure F.5 Dispositif de sécurité par une corde en acier.

6-Préparer l'intérieur du moule en nettoyant bien les parois.

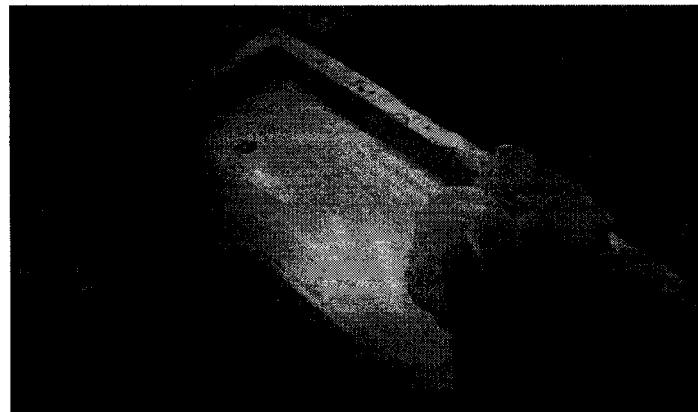


Figure F.6 Nettoyage de la cavité du moule.

7- Placer le joint de caoutchouc à l'intérieur du moule (voir Figure F.7).

8-Positionner la préforme en prenant soin de l'aligner avec la ligne de départ. Notez que toute manipulation de préforme sans précaution peut influencer les mesures de perméabilité.



Figure F.7 Positionnement du joint de caoutchouc et de la préforme dans la cavité du moule.

9- Appliquer un scellant de silicone de chaque côté de la préforme. L'utilisation de cette silicone a pour but d'éviter les effets de bords.



Figure F.8 Utilisation du scellant de silicone aux bords de la préforme.

10-Déposer la plaque de verre dans la cavité.

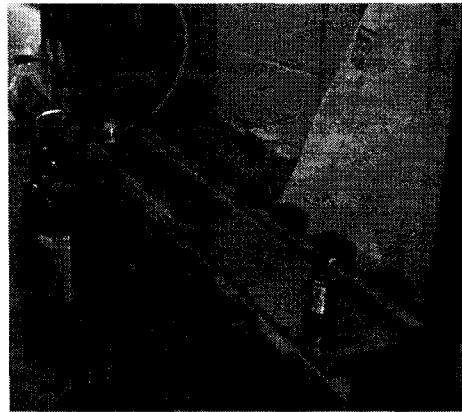


Figure F.9 Photo de la plaque de verre dans la cavité du moule.

11-Déposer le cadre amovible au-dessus de la plaque de verre.



Figure F.10 Positionnement du cadre amovible avant la fermeture.

12-Détacher les câbles de sécurité et faire descendre le cadre de fermeture. Une fois appuyé, garder la valve en position de fermeture jusqu'à l'obtention de la pression de fermeture voulue en lisant la pression interne sur le panneau de commande.



Figure F.11 Positionnement du cadre amovible avant la fermeture.

13-Démarrer l'injection en actionnant la valve d'huile sur le panneau de contrôle.

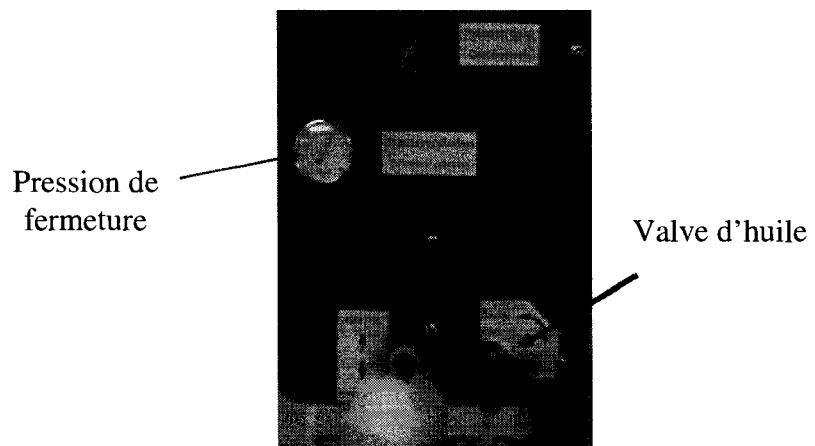


Figure F.12 Positionnement du cadre amovible avant la fermeture.

14-Effectuer la mesure de perméabilité en appuyant sur le bouton lors du passage de l'huile au niveau des lignes tracées sur la plaque de verre.

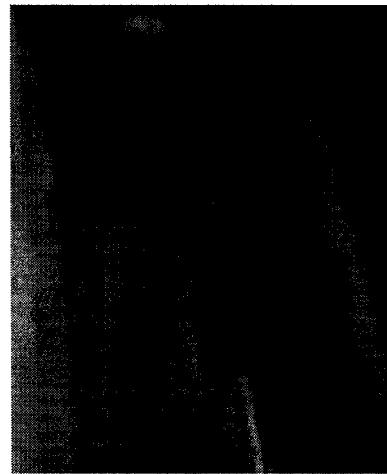


Figure F.13 Visualisation de l'avance du front du fluide.

15-Fermer la valve d'huile après le passage de la dernière ligne.

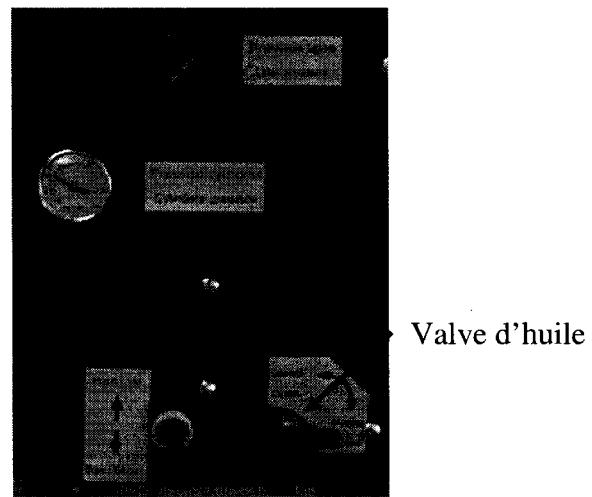


Figure F.14 Valve de fermeture sur le panneau de contrôle.

16-Remonter le cadre de fermeture en actionnant la valve des pistons vers le haut et attacher les câbles de sécurité.

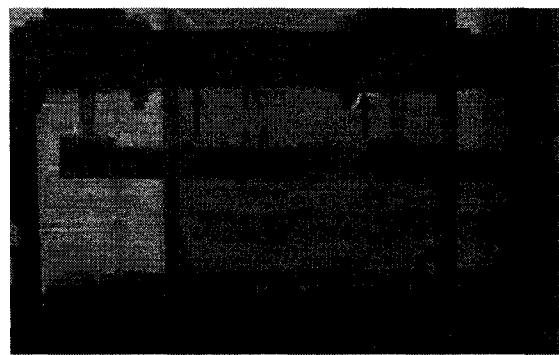


Figure F.14 Système de fermeture à la position ouverte.

17-Enlever le cadre de fermeture amovible et la plaque de verre afin de procéder au nettoyage. Il est préférable d'amener la plaque de verre directement au lavabo afin d'éviter de mettre de l'huile et du mastic sur les tables de travail et de découpe.

BASALT CONTINUOUS FIBER

ANNEXE G : FICHE TECHNIQUE DES FIBRES DE BASALTE



Basalt continuous fibers are made from basalt rocks using a single component raw material in a single stage process. Once the continuous basalt fibers have been produced, they are converted into a suitable form for their intended application.

Basalt roving is produced by assembling a bundle of strands into a single large strand, which is then wound into a stable, cylindrical package. These basalt fiber strands of yarns are covered with a special sizing agent to provide sufficient integrity required for further processing.

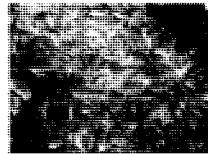
Basalt twisted yarn is produced by twisting the basalt roving. Twist provides additional integrity to the yarn before it is subjected to weaving.

The main advantages of basalt continuous fiber, roving and yarn, are higher operating temperature, Young's modulus and chemical resistance compared to fiberglass. They are suitable to replace fiberglass roving and yarn as reinforcement elements for various composite materials.

Due to its good high temperature resistance and excellent mechanical properties basalt fiber may also be considered as a replacement for asbestos and expensive carbon fibers.

BASALT CUT FIBER

248



Description

Basalt Cut Fiber is a continuous basalt fiber filament which has been chopped to a specific fiber length in a dry cutting process.

The fibers are coated with a sizing treatment which makes them highly compatible with epoxy and phenolic resins.

Product	Basalt Cut Fiber - 2 mm
---------	-------------------------

Properties

Moisture content	less than 1%
Binder content	1.0 - 1.5 %
Filament diameter	9 μ m
Strand length tolerance	1.9 - 2.1 mm 90 % 2.1 - 10 mm 8 % more than 10 mm 2 %

Please check the Internet site <http://www.albarrie.com/basalt/index.htm> for updated information about general properties of basalt fiber.

BASALT CONTINUOUS FIBER



Basalt Continuous Strand

Filament diameter	[μm]	9.0
Break tenacity	[cN/tex]	35 - 40
Density	[g/cm ³]	2.65
Linear density	[tex]	50
Moisture recovery	[%]	1.0
Sizing agent content	[%]	1.0 - 2.0

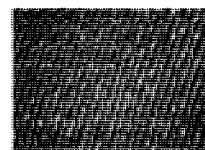
Basalt Roving

Linear density	[tex]	330 ± 10%
Breaking load	[N]	107



Basalt Cut Fiber

Fiber length	[mm]	50 - 70
	[mm]	2
	[mm]	6



Woven Basalt Fabrics

Weight	[g/m ²]	750
Weave		twill 3/1
Count	[picks/dm]	118/78
Yarn	[tex]	330

Basalt Fiber

new fiber for demanding applications

Physical Properties Comparison

Property	Unit	Basalt	E - Glass	S - Glass
Density	g/cm ³	2.6	2.57	2.48
Thermal Linear Expansion 0-300°C	ppm/C	8.0	5.4	2.9

Mechanical Properties Comparison

Property	Unit	Basalt	E - Glass	S - Glass
Tensile Strength	MPa	4840	3450	4710
Elastic Modulus	GPa	89	77	89
Elongation at Break	%	3.15	4.7	5.6

Basalt Fiber Laminates

Composite test panel was fabricated by resin transfer molding. The panel consisted of 5 plies of wide weave basalt fabric and the resulting composite was roughly equal to a [0/90] laminate. The resin used was Shell EPON-862 with curing agent W. The fiber volume in the composite was approximately 44%.

Characteristics of Basalt Laminate

Width	24.9 mm	(0.979")
Thickness	3.25 mm	(0.126")
Failure Load	46,205 kN	(10,368 lb)
Ultimate Strength	578.8 MPa	(83,952 kpsi)
Elastic Modulus	33.94 GPa	(4,92 Mpsi)
Poisson's Ratio	0.193	

Comparative Characteristics of Basalt and E-Glass Laminates

Quasi-isotropic Composite	Basalt Laminate	E-Glass Laminate
Elastic Modulus	34 GPa (4.9 Mpsi)	17.1 GPa (2.5 Mpsi)
Ultimate Strength	579 MPa (84 kpsi)	207 MPa (30 kpsi)

Mechanical properties determined according the ASTM D 3032. Results for Basalt fiber compiled by the Washington State University (December 1987). Results for glass fibers compiled from Owens Corning Technical Literature. Results for Basalt Laminate compiled by Basalt Industrial Research Laboratory, Northwestern University, Evanston, IL.