

Titre: Caractérisation et simulation du procédé d'infusion indirecte de
résine pour fabriquer des pièces composites de grande dimension

Auteur: Zaynab Grofti
Author:

Date: 2021

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Grofti, Z. (2021). Caractérisation et simulation du procédé d'infusion indirecte de
résine pour fabriquer des pièces composites de grande dimension [Mémoire de
maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/9179/>

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

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/9179/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** François Trochu, Rachid Boukhili, & Philippe Causse
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Caractérisation et simulation du procédé d'infusion indirecte de résine pour
fabriquer des pièces composites de grande dimension**

ZAYNAB GROFTI

Département de génie mécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie mécanique

Août 2021

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Caractérisation et simulation du procédé d'infusion indirecte de résine pour fabriquer des pièces composites de grande dimension

présenté par **Zaynab GROFTI**

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

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

Cédric BÉGUIN, président

François TROCHU, membre et directeur de recherche

Rachid BOUKHILI, membre et codirecteur de recherche

Philippe CAUSSE, membre et codirecteur de recherche

Simon JONCAS, membre

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance au professeur François Trochu pour m'avoir proposé ce sujet de recherche et m'avoir soutenu avec bienveillance tout au long de ma maîtrise. Je le remercie surtout pour sa patience, sa disponibilité et ses judicieux conseils qui ont fait mûrir ma réflexion. J'aimerais également remercier le professeur Rachid Boukhili pour sa confiance et sa disponibilité, et le professeur Philippe Causse pour ses remarques pertinentes et nos échanges toujours fructueux.

Je tiens également à remercier l'Institut de l'énergie Trottier, le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), le Fonds de Recherche du Québec sur la Nature et les Technologies (FRQNT), ainsi que l'organisme Mitacs pour leur appui financier.

Merci également à tous les membres de l'équipe et aux collègues avec qui j'ai eu la chance de collaborer et qui ont grandement contribué à l'accomplissement de ce travail : Christian-Charles Martel, Bin Yang, Yuwei Feng, Yanchu Ma, Ariana Zelaya Matamoros, Sun Yixun et Wei Huang. En particulier, merci au professeur Jihui Wang et à Bin, Yuwei et Yanchu pour leur convivialité et leur accueil chaleureux lors de mon séjour à Wuhan.

Je désire aussi remercier mes proches et amis qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma maîtrise. Je remercie particulièrement mes parents et ma sœur Nada pour leur amour en abondance et leurs encouragements. Enfin, je tiens à remercier Reda pour sa confiance et son soutien inestimable.

RÉSUMÉ

Les pales d'éolienne sont fabriquées en matériaux composites par un procédé de moulage liquide appelé infusion de résine. Ce procédé consiste à disposer un renfort fibreux sec sur un moule rigide avant de le recouvrir par une pellicule plastique flexible scellée autour du périmètre du moule. Un vide est appliqué dans la cavité ainsi créée et une résine thermodurcissable imprègne alors la préforme sous l'effet du gradient de pression. Quand une couche d'un matériau drainant, c'est-à-dire d'un matériau de perméabilité beaucoup plus grande, est déposée au-dessus de la préforme, ce procédé est appelé « infusion indirecte » par opposition avec l'« infusion directe » en l'absence d'un tel milieu drainant. L'infusion indirecte permet la fabrication de pièces de grande taille comme les pales d'éolienne, mais sa maîtrise implique une compréhension avancée des phénomènes qui gouvernent les mécanismes d'imprégnation, une caractérisation complète des matériaux utilisés, et des simulations numériques complètes, robustes et exactes.

Cependant, les approches expérimentales présentement utilisées pour caractériser les renforts fibreux ne reflètent pas fidèlement les phénomènes particuliers à l'infusion de résine, comme la décompaction du renfort pendant le remplissage, et l'interaction avec les milieux drainants de haute perméabilité. De plus, les outils actuels de simulation numérique ne reproduisent pas précisément tous les détails du procédé. Des temps de calcul prohibitifs ne permettent pas non plus de réaliser facilement des simulations tridimensionnelles pour optimiser la fabrication de pièces aussi grandes et complexes comme les pales d'éolienne. L'objectif de cette recherche est donc de suggérer une approche expérimentale simple et robuste pour caractériser la compressibilité et la perméabilité des renforts fibreux utilisés pour fabriquer des pales d'éolienne. Une stratégie de simulation permettant de prédire rapidement et fidèlement les temps de remplissage des pièces est également proposée.

Ce mémoire débute par un état de l'art de la fabrication des pales d'éolienne. Une revue de la littérature scientifique illustre ensuite les propriétés critiques régissant le procédé d'infusion de résine, ainsi que les aspects théoriques, numériques et expérimentaux permettant de l'optimiser. On détaille ensuite l'approche expérimentale, qui consiste à obtenir un modèle de compressibilité des matériaux à caractériser en moule rigide, puis à mesurer leur perméabilité dans des conditions reproduisant le plus fidèlement possible le procédé de fabrication industrielle. Ensuite, une stratégie de simulation 2D reproduisant simplement et avec robustesse des écoulements en infusion indirecte permet d'identifier la perméabilité transverse des préformes.

Les résultats expérimentaux et numériques démontrent l'utilité de l'approche présentée. Les modèles de compressibilité et de perméabilité obtenus permettent de prédire rapidement l'évolution du front d'écoulement et le temps de remplissage de pièces d'épaisseurs différentes sans recourir à des simulations 3D longues et complexes. En conclusion, une analyse de sensibilité illustre l'influence des divers paramètres empiriques mesurés. Le début de l'étape d'infiltration est principalement régi par la perméabilité planaire du milieu drainant, et la perméabilité du renfort fibreux ne domine l'imprégnation que lorsque le milieu drainant est entièrement saturé. Il est donc impératif de caractériser finement ce milieu, dans des conditions représentatives du procédé d'infusion de résine, afin de prédire le plus fidèlement possible la fabrication des pales d'éolienne. Finalement, une stratégie de simulation, fondée principalement sur des simulations bidimensionnelles globales et complétée par des simulations tridimensionnelles locales, est suggérée pour prédire les temps de remplissage des composantes des pales d'éolienne.

ABSTRACT

Wind turbine blades are made of composite materials by a liquid molding process called resin infusion. This process consists of placing a dry fibrous reinforcement in a rigid mold cavity and covering it with a flexible plastic film sealed around its edges. Vacuum is then applied in the cavity to drive the flow of a thermosetting resin that impregnates the preform. A distribution medium, namely a layer of much larger permeability than the preform, can be laid out above the preform to facilitate the resin flow and manufacture large parts such as wind turbine blades. This process is then called “indirect infusion” as opposed to “direct infusion” when no distribution medium is used. Mastering indirect infusion requires understanding the phenomena that govern the impregnation mechanism, a comprehensive characterization of the reinforcing materials and distribution media, and accurate and robust numerical simulations.

The experimental approaches currently used to characterize the fibrous reinforcements do not fully reflect the phenomena specific to resin infusion, such as the decompaction of the fibrous reinforcement during filling, and the interaction with the high permeability distribution media. In addition, current process simulation software does not accurately reproduce all the details of resin infusion, and prohibitive calculation times do not allow three-dimensional simulations to be easily carried out to optimize the manufacture of large and complex composite parts. The objective of this research consists of proposing a simple and robust experimental approach to characterize the compressibility and permeability of the fibrous reinforcements used to manufacture wind turbine blades. A simulation strategy for quick and accurate predictions of filling times is also proposed.

This thesis begins by presenting the state of the art on the manufacture of wind turbine blades. A scientific literature review then introduces the critical properties governing indirect resin infusion, as well as the theoretical, numerical and experimental aspects of process optimization. The experimental approach is then detailed. It consists of obtaining the compressibility model of the fibrous reinforcement in rigid mold experiments, then its flexible permeability by direct infusion under conditions similar to industrial manufacturing processes. Next, a simple and robust 2D simulation strategy allows identifying the transverse permeability of the preform by reproducing flows in indirect infusion.

The experimental and numerical results show that the experimental approach is robust, and that the compressibility and permeability models provide a quick prediction of flow front progression and filling time, without resorting to long and complex 3D flow simulations. A sensitivity analysis is also conducted to illustrate the influence of various measured empirical parameters. The analysis highlights that the onset of the liquid flow is mainly governed by the in-plane permeability of the distribution medium, and that the permeability of the fibrous reinforcement only becomes critical once the distribution medium is fully saturated. Therefore, to accurately predict the manufacture of real parts, it is imperative to characterize the distribution medium in conditions representative of the real infusion process. Finally, a simulation strategy, based mainly on global two-dimensional simulations and complemented by local three-dimensional simulations, is suggested to predict the filling times of wind turbine blade components.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XV
LISTE DES ANNEXES.....	XXVII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART.....	5
2.1 Matériaux composites	5
2.1.1 Fibres	5
2.1.2 Matrices.....	6
2.2 Procédés de fabrication des matériaux composites	6
2.2.1 Moulage manuel.....	7
2.2.2 Moulage par transfert de résine (RTM).....	7
2.2.3 Infusion de résine (VARI).....	8
2.2.4 SCRIMP®	9
2.2.5 Autoclave	10
2.3 Application au domaine de l'énergie éolienne	11
2.3.1 Matériaux utilisés	11
2.3.2 Composantes des pales.....	12
2.3.3 Simulation numérique de la fabrication	16
CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE	18

3.1	Compressibilité.....	18
3.2	Perméabilité.....	22
3.2.1	Perméabilité planaire insaturée	23
3.2.2	Perméabilité planaire saturée	26
3.2.3	Perméabilité transverse	27
3.3	Particularités du procédé d'infusion de résine	27
3.3.1	Décompaction du renfort.....	27
3.3.2	Influence du milieu de distribution	29
3.4	Méthodes de simulation actuelles	30
3.4.1	Simulation du RTM.....	30
3.4.2	Simulation du VARI.....	32
3.5	Analyse critique.....	38
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE.....		41
4.1	Sélection des renforts	41
4.2	Sélection du fluide.....	43
4.3	Compressibilité.....	45
4.4	Infusion directe.....	48
4.5	Infusion indirecte.....	51
4.6	Simulation numérique	51
4.6.1	Logiciel de simulation.....	52
4.6.2	Maillage.....	53
4.7	Originalité de l'approche proposée	54
CHAPITRE 5 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX		56
5.1	Milieu de distribution	56

5.1.1	Compressibilité.....	56
5.1.2	Infusion directe.....	58
5.2	Renfort 2D.....	64
5.2.1	Compressibilité.....	64
5.2.2	Infusion directe.....	67
5.2.3	Infusion indirecte.....	72
5.3	Renfort 1D.....	77
5.4	Mélange de renforts.....	80
5.4.1	Compressibilité.....	80
5.4.2	Infusion directe.....	82
5.4.3	Infusion indirecte.....	87
5.5	Conclusion.....	92
5.5.1	Milieu de distribution.....	92
5.5.2	Renfort 2D.....	93
5.5.3	Mélange de renforts.....	94
CHAPITRE 6	SIMULATIONS NUMÉRIQUES.....	95
6.1	Milieu de distribution.....	95
6.2	Renfort 2D.....	97
6.2.1	Infusions directes.....	97
6.2.2	Infusions indirectes	98
6.3	Mélange de renforts.....	126
6.3.1	Infusions directes.....	126
6.3.2	Infusions indirectes	127
CHAPITRE 7	DISCUSSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS	149

7.1	Discussion	149
7.2	Stratégie de simulation suggérée.....	152
CHAPITRE 8	CONCLUSION	154
RÉFÉRENCES.....		156
ANNEXES		160

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4-1. Paramètres de l'application Visual-RTM du logiciel PAM-RTM	52
Tableau 5-1. Valeurs moyennes de la pression d'infusion, de l'épaisseur, du taux volumique de fibres, et de la perméabilité du milieu de distribution calculée à pressions constante ou variable	64
Tableau 5-2. Valeurs moyennes de la pression d'infusion, de l'épaisseur, du taux volumique de fibres et de la perméabilité des renforts 2D.....	71
Tableau 5-3. Temps de remplissage caractéristiques du milieu drainant, des fibres recouvertes par le milieu drainant, et du renfort entier, lors de l'infusion indirecte des renforts 2D.....	77
Tableau 5-4. Valeurs moyennes de la pression d'infusion, de l'épaisseur, du taux volumique de fibres et de la perméabilité du mélange de renforts	85
Tableau 5-5. Temps de remplissage caractéristiques du milieu drainant, des fibres recouvertes par le milieu drainant, et du renfort entier, lors des infusions indirectes du mélange de renfort ..	91
Tableau 6-1. Paramètres des simulations d'infusion directe du milieu de distribution, et erreurs sur les temps de remplissage obtenus.....	95
Tableau 6-2. Paramètres des simulations d'infusion directe du renfort 2D, et erreurs obtenues sur le temps de remplissage.....	97
Tableau 6-3. Paramètres de l'analyse de convergence réalisée pour les infusions indirectes du renfort 2D, à une pression de vide avoisinant 75 kPa	98
Tableau 6-4. Influence de la taille du maillage sur le nombre d'éléments et les temps CPU s et caractéristiques de l'infusion indirecte du renfort 2D, à une pression de vide avoisinant 75 kPa	99
Tableau 6-5. Paramètres des simulations pour identifier la perméabilité transverse apparente du renfort 2D, à des pressions d'infusion avoisinant 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa	101
Tableau 6-6. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes, et du renfort entier, pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 50 kPa	102

Tableau 6-7. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D, à des pressions de vide avoisinant 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa.....	112
Tableau 6-8. Paramètres des simulations de l'infusion indirecte du renfort 2D à des pressions d'infusion variables avoisinant 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa.....	116
Tableau 6-9. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D, à des pressions d'infusion variables avoisinant 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa.....	120
Tableau 6-10. Paramètres de la simulation de « référence » de l'analyse de sensibilité, pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 75 kPa ..	121
Tableau 6-11. Paramètres des simulations d'infusion directe du mélange de renforts et erreurs obtenues sur le temps de remplissage par rapport aux mesures	127
Tableau 6-12. Paramètres de l'analyse de convergence réalisée pour les infusions indirectes du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 75 kPa	128
Tableau 6-13. Influence de la taille du maillage sur le nombre d'éléments et le temps CPU et les temps de remplissage caractéristiques de l'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide avoisinant 75 kPa	128
Tableau 6-14. Paramètres des simulations d'identification de la perméabilité transverse du mélange de renforts à des pressions d'infusion avoisinant 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa.....	130
Tableau 6-15. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts, à des pressions de vide avoisinant 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa	137
Tableau 6-16. Paramètres des simulations de l'infusion indirecte du mélange de renforts à des pressions d'infusion variables avoisinant 50 kPa et 75 kPa.....	140
Tableau 6-17. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts, à des pressions d'infusion variables avoisinant 50 kPa et 75 kPa	143

Tableau 6-18. Paramètres de la simulation de « référence » de l'analyse de sensibilité pour les simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide avoisinant 75 kPa.....	143
---	-----

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1. Représentation schématique du moulage manuel (Robinson, 2008).....	7
Figure 2-2. Représentation schématique du RTM (Robinson, 2008)	8
Figure 2-3. Représentation schématique du VARI (Joubaud, 2003)	9
Figure 2-4. Représentation schématique de l'infusion indirecte (Robinson, 2008).....	10
Figure 2-5. Représentation schématique de la fabrication en autoclave (Robinson, 2008)	11
Figure 2-6. Coupe transversale d'une pale d'éolienne contenant un caisson de longeron (Sørensen et al., 2021).....	12
Figure 2-7. Coupe transversale d'une pale d'éolienne constituée de longerons et de panneaux de cisaillement fabriquées séparément (Ounis & Balehouane, 2016)	13
Figure 2-8. Coupe transversale d'une pale d'éolienne fabriquée en une seule pièce (Stiesdal et al., 2006).....	13
Figure 2-9. Composantes typiques d'une pale d'éolienne (Thomsen, 2009)	14
Figure 2-10. Illustration des chutes de pli dans un laminé composite (Fan, Wang, & Chen, 2016)	16
Figure 3-1. Comportement viscoélastique des renforts fibreux (Cours MEC6318, Polytechnique Montréal).....	19
Figure 3-2. Influence de la lubrification sur la courbe de compaction d'un renfort fibreux (Cours MEC6318, Polytechnique Montréal)	20
Figure 3-3. Régimes de déformation sous pression des renforts tissés (Croteau-Labouly, 2008).21	
Figure 3-4. Montage expérimental pour mesurer la perméabilité planaire insaturée (Ferland, Guittard, & Trochu, 1996).....	24
Figure 3-5. Relaxation de la préforme lors d'une infusion (Cours MEC6318, Polytechnique Montréal).....	28
Figure 3-6. Temps de remplissage en fonction de la perméabilité planaire (a) du milieu de distribution de résine et (b) de la préforme (Sun et al., 1998).....	30

Figure 3-7. Algorithme de simulation du VARI (Joubaud, Trochu, & Corvec, 2002)	32
Figure 3-8. Diagramme du banc d'essai expérimental d'infusion (Croteau-Labouly, 2008)	34
Figure 3-9. Séquence d'empilement pour les mesures de la perméabilité planaire flexible du milieu de distribution (Sun et al., 1998)	35
Figure 3-10. (a) <i>Lead-lag</i> et (b) temps de remplissage en fonction de la perméabilité transverse du milieu drainant (Sun et al., 1998)	37
Figure 3-11. Algorithme d'identification simultanée de la perméabilité planaire du milieu drainant, et de la perméabilité transverse du renfort (Gokce et al., 2005)	38
Figure 4-1. Photographies du renfort bidirectionnel non tissé TG-09-N : avant (gauche), arrière (droite)	42
Figure 4-2. Photographie du renfort unidirectionnel TG-27-U	42
Figure 4-3. Photographies du milieu de distribution (gauche) et du tissu d'arrachement (droite)	43
Figure 4-4. Viscosité de l'huile de silicone en fonction de la température	44
Figure 4-5. Photographie de la machine de test universelle et des plateaux de compaction	45
Figure 4-6. Exemple de résultat de conformité	46
Figure 4-7. Illustration des 3 cycles de compaction à sec d'un renfort fibreux	47
Figure 4-8. Exemple de courbes de compaction brute et corrigée obtenues pour 10 plis de renfort bidirectionnel. La loi de puissance du modèle de compaction est identifiée	47
Figure 4-9. Photographie de la plaque de plexiglas utilisée comme moule d'infusion	48
Figure 4-10. Photographie des capteurs de pression disposés sous la plaque de plexiglas	49
Figure 4-11. Photographie d'une expérience d'infusion directe	50
Figure 4-12. Coupe transversale des échantillons au milieu de la préforme, afin d'étudier le remplissage à travers un plan de coupe vertical intégrant le milieu drainant et le renfort	53
Figure 4-13. Maillage de simulation des infusions indirectes	54
Figure 5-1. Courbes de compaction obtenues lors des trois cycles de compaction à sec du milieu de distribution	57

Figure 5-2. Modèle de compressibilité du milieu de distribution	58
Figure 5-3. Position du front d'écoulement en fonction du temps lors de 3 infusions directes du milieu de distribution à une pression de vide de 50 kPa	59
Figure 5-4. Position du front d'écoulement en fonction du temps lors de 11 infusions directes du milieu de distribution à une pression de vide de 50 kPa	60
Figure 5-5. Position moyenne du front d'écoulement en fonction du temps lors des infusions directes du milieu de distribution à une pression de vide de 50 kPa.....	61
Figure 5-6. Position moyenne au carré du front d'écoulement en fonction du temps lors des infusions directes du milieu drainant à une pression de vide de 50 kPa	61
Figure 5-7. Évolution de la pression expérimentale mesurée au port d'injection lors d'une infusion directe du milieu de distribution à une pression de vide de 50 kPa	62
Figure 5-8. Position moyenne du front d'écoulement en fonction du temps lors des infusions directes du milieu de distribution à des pressions de vide de 100 kPa, 75 kPa et 50 kPa.....	63
Figure 5-9. Courbes de compaction du renfort 2D à sec et après lubrification.....	65
Figure 5-10. Troisième cycle de compaction à sec d'échantillons de 10 ou 5 plis de renforts 2D provenant de deux lots différents	66
Figure 5-11. Modèles de compressibilité d'échantillons provenant des deux lots de renfort 2D ..	67
Figure 5-12. Position du front d'écoulement en fonction du temps lors de 6 infusions directes du renfort 2D provenant de deux lots différents, à une pression de vide de 75 kPa	68
Figure 5-13. Position moyenne au carré du front en fonction du temps, lors de l'infusion directe de renforts 2D provenant de deux lots différents à une pression de vide de 75 kPa.....	69
Figure 5-14. Fronts d'écoulement expérimentaux et lors de l'infusion directe des renforts 2D provenant de deux lots différents à une pression de vide de 75 kPa.....	69
Figure 5-15. Position moyenne du front d'écoulement en fonction du temps lors de l'infusion directe des renforts 2D à des pressions de vide de 100 kPa, 75 kPa et 50 kPa	70
Figure 5-16. Modèle de perméabilité planaire flexible du renfort 2D	71

Figure 5-17. Position du front d'écoulement dans le milieu drainant en fonction du temps lors de l'infusion indirecte des renforts 2D à une pression de vide de 75 kPa	72
Figure 5-18. Position du front d'écoulement dans les fibres en fonction du temps lors de l'infusion indirecte des renforts 2D à une pression de vide de 75 kPa.....	73
Figure 5-19. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et le renfort 2D lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa	74
Figure 5-20. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et le renfort 2D lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa	74
Figure 5-21. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et 5 plis de renfort 2D lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa	75
Figure 5-22. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et à travers 10 plis de renforts 2D lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa	76
Figure 5-23. Troisième cycle de compaction à sec d'échantillons de 10 ou 5 plis de renfort 1D .	78
Figure 5-24. Modèle de compressibilité du renfort 1D	78
Figure 5-25. Position des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et le renfort 1D lors d'une infusion indirecte réalisée à une pression de vide de 100 kPa	79
Figure 5-26. Courbes de compaction du mélange de renforts à sec et après lubrification.....	81
Figure 5-27. Troisième cycle de compaction à sec d'échantillons constitués de 3 plis de renfort 1D en alternance avec 2 plis de renforts 2D provenant de lots différents.....	81
Figure 5-28. Modèles de compressibilité des échantillons constitués de 3 plis de renfort 1D en alternance avec 2 plis de renforts 2D provenant de lots différents	82
Figure 5-29. Position du front d'écoulement en fonction du temps lors de 4 infusions directes réalisées avec une alternance de 3 plis de renfort 1D, et de 2 plis de renfort 2D provenant de lots différents, à une pression de vide de 75 kPa	83
Figure 5-30. Fronts d'écoulement expérimentaux et lors des infusions directes réalisées avec une alternance de 3 plis de renfort 1D, et de 2 plis de renfort 2D provenant de lots différents, à une pression de vide de 75 kPa	84

Figure 5-31. Position moyenne du front d'écoulement en fonction du temps lors des infusions directes du mélange de renforts à des pressions de vide de 100 kPa, 75 kPa et 50 kPa	84
Figure 5-32. Modèle de perméabilité planaire flexible du mélange de renforts	85
Figure 5-33. Comparaison des modèles de perméabilité planaire flexible du renfort 2D et du mélange de renforts	86
Figure 5-34. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et le mélange de renforts lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa.....	87
Figure 5-35. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et le mélange de renforts lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa.....	88
Figure 5-36. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et les échantillons constitués de 3 plis de renfort 1D alternés avec 2 plis de renfort 2D lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa.....	88
Figure 5-37. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et les échantillons constitués de 6 plis de renfort 1D alternés avec 5 plis de renfort 2D, lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa.....	89
Figure 5-38. Positions du front expérimental dans un échantillon de 11 plis du mélange de renforts, lors d'une infusion indirecte à une pression de vide avoisinant 100 kPa.....	90
Figure 6-1. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion directe du renfort 2D à une pression de vide de 50 kPa et fronts prédits numériquement à pression constante et variable	96
Figure 6-2. Temps de CPU et de remplissages caractéristiques normalisés en fonction du nombre d'éléments pour l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 75 kPa	100
Figure 6-3. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes, et du renfort entier, pour les simulations de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 50 kPa.....	103

Figure 6-4. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement pour le rapport de perméabilité $K_z/K_x = 10$	104
Figure 6-5. Front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa et fronts prédits numériquement pour les rapports de perméabilité $K_z/K_x = [10^{-2}, 10^{-1}, 1]$	105
Figure 6-6. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,46E-12 \text{ m}^2$	106
Figure 6-7. Comparaison du front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa et du front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,46E-12 \text{ m}^2$	107
Figure 6-8. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 75 kPa	108
Figure 6-9. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 100 kPa	109
Figure 6-10. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,06E-12 \text{ m}^2$	110
Figure 6-11. Front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,06E-12 \text{ m}^2$	110
Figure 6-12. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 1,59E-12 \text{ m}^2$	111

Figure 6-13. Front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 1,59E-12 \text{ m}^2$	111
Figure 6-14. Modèle de perméabilité transverse apparente du renfort 2D.....	113
Figure 6-15. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte de 10 plis de renfort 2D à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 1,59E-12 \text{ m}^2$	114
Figure 6-16. Front expérimental dans les 10 plis de renfort 2D lors de leur infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 1,59E-12 \text{ m}^2$	114
Figure 6-17. Évolution de la pression expérimentale mesurée au port d'injection lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à des pressions de vide de 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa.....	115
Figure 6-18. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable	117
Figure 6-19. Front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable.....	117
Figure 6-20. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable	118
Figure 6-21. Front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable.....	118
Figure 6-22. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable	119
Figure 6-23. Front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable.....	119

Figure 6-24. Sensibilité des simulations de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 75 kPa par rapport à l'épaisseur du milieu drainant (gauche) et du renfort (droite)	122
Figure 6-25. Sensibilité des simulations de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 75 kPa par rapport à la perméabilité planaire du milieu drainant (gauche) et du renfort (droite)	123
Figure 6-26. Sensibilité des simulations de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 75 kPa par rapport à la perméabilité transverse du milieu drainant (gauche) et du renfort (droite)	124
Figure 6-27. Temps CPU et temps de remplissages caractéristiques en fonction du nombre d'éléments pour simuler l'infusion indirecte du mélange de renforts, à une pression de vide avoisinant 75 kPa	129
Figure 6-28. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide avoisinant 50 kPa	131
Figure 6-29. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide avoisinant 75 kPa	131
Figure 6-30. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide avoisinant 100 kPa	132
Figure 6-31. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,88E-13 \text{ m}^2$	134
Figure 6-32. Front expérimental dans le mélange de renforts lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,88E-13 \text{ m}^2$	134
Figure 6-33. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,72E-13 \text{ m}^2$	135

- Figure 6-34. Front expérimental dans le mélange de renforts lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,72E-13 \text{ m}^2$ 135
- Figure 6-35. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 4,08E-13 \text{ m}^2$ 136
- Figure 6-36. Front expérimental dans le mélange de renforts lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 4,08E-13 \text{ m}^2$ 136
- Figure 6-37. Front expérimental dans les 11 plis du mélange de renforts lors de leur infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa et fronts prédits numériquement avec les perméabilités transverses $K_z = 4,08E-13 \text{ m}^2$ et $K_z = 1,28E-13 \text{ m}^2$ 138
- Figure 6-38. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte de 11 plis du mélange de renforts à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 1,28E-13 \text{ m}^2$ 138
- Figure 6-39. Évolution de la pression expérimentale mesurée au port d'injection lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts à des pressions de vide de 50 kPa et 75 kPa 139
- Figure 6-40. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable 141
- Figure 6-41. Front expérimental dans le mélange de renforts lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable.. 141
- Figure 6-42. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable 142
- Figure 6-43. Front expérimental dans le mélange de renforts lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable.. 142

Figure 6-44. Sensibilité des simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 75 kPa par rapport à l'épaisseur du milieu drainant (gauche) et du renfort (droite)	144
Figure 6-45. Sensibilité des simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 75 kPa par rapport à la perméabilité planaire du milieu drainant (gauche) et du renfort (droite)	145
Figure 6-46. Sensibilité des simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 75 kPa par rapport à la perméabilité transverse du milieu drainant (gauche) et du renfort (droite)	146
Figure 7-1. Illustration de la stratégie de simulation proposée	153
Figure C-1. Photographies de l'utilisation du ruban adhésif Flashbreaker (gauche) et des plis découpés (droite)	173
Figure C-2. Photographie de la presse hydraulique	174
Figure C-3. Photographies de l'emporte-pièce	174
Figure C-4. Photographies de la machine de test universelle Instron 4505	175
Figure C-5. Cycle de chargement programmé dans le logiciel Test Loop.....	176
Figure C-6. Balance de précision utilisée pour peser les échantillons de compressibilité.....	177
Figure C-7. Échantillon déposé au centre du plateau de compaction inférieur.....	178
Figure C-8. Exemple des résultats de compressibilité obtenus dans le logiciel Test Loop	179
Figure C-9. Exemple des résultats de compressibilité présentés dans le tableur Excel	180
Figure C-10. Exemple de résultat de test de conformité	181
Figure C-11. Exemple de résultats obtenus suite aux 6 cycles de compaction-relaxation-décompaction	181
Figure C-12. Logarithme de la force en fonction du logarithme de la position lors du troisième de compaction à sec	182
Figure D-1. Découpe des échantillons à infuser	184

Figure D-2. Rectangles découpés de milieu drainant (gauche), de tissu d'arrachement (centre) et de renfort fibreux (droite).....	184
Figure D-3. Plaque de plexiglas utilisée comme moule d'infusion	185
Figure D-4. Montage expérimental lors d'une expérience d'infusion directe.....	185
Figure D-5. Schéma du montage d'infusion expérimental	186
Figure D-6. Drapage du renfort à la fin de l'étape 2.....	186
Figure D-7. Drapage du renfort et du milieu drainant à la fin de l'étape 4	187
Figure D-8. Montage expérimental à la fin de l'étape 6	187
Figure D-9. Configuration de la ligne d'infusion à la fin de l'étape 8	188
Figure D-10. Configuration de la ligne de vide à la fin de l'étape 9	189
Figure D-11. Fermeture partielle du moule à la fin de l'étape 10.....	190
Figure D-12. Fermeture totale du moule à la fin de l'étape 11	190
Figure D-13. Connexion de la valve d'entrée de la ligne d'infusion.....	191
Figure D-14. Montage expérimental après que le vide est tiré dans la cavité.....	191
Figure D-15. Fin de l'expérience d'infusion	193
Figure E-1. Données de pression contenues dans la feuille Excel de calcul de perméabilité	194
Figure E-2. Évolution des pressions mesurées lors de l'acquisition de données (gauche) et de l'infusion (droite)	195
Figure E-3. Tableau de calcul des perméabilités flexibles du renfort fibreux	196
Figure E-4. Graphiques générés automatiquement lors de calcul de la perméabilité du renfort fibreux	199
Figure E-5. Tableau de calcul des perméabilités flexibles du milieu drainant en considérant une pression d'infusion constante	200
Figure E-6. Graphiques générés automatiquement lors du calcul de la perméabilité du milieu drainant en considérant une pression d'infusion constante	200

Figure E-7. Tableau de calcul des perméabilités flexibles du milieu drainant en considérant la différence de pression réelle.....	201
Figure E-8. Graphiques générés automatiquement lors du calcul de la perméabilité du milieu drainant en considérant la différence de pression réelle	202

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – FICHES TECHNIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS	160
Renfort unidirectionnel TG-27-U.....	160
Renfort bidirectionnel non tissé TG-09-N	161
Milieu de distribution Greenflow 75	162
Tissu d'arrachement Release Ply B.....	163
Huile de silicone Xiameter™ PMX-200 100 cSt.....	164
ANNEXE B – LISTE DES CONSOMMABLES ET DES FOURNISSEURS	168
Spirale d'infusion en polyéthylène.....	169
Membrane polymère Wrightlon 7400	170
Ruban d'étanchéité AT200Y.....	171
Ruban adhésif Flashbreaker	172
ANNEXE C – TESTS DE COMPRESSIBILITÉ.....	173
Préparation des échantillons.....	173
Machine de test.....	175
Procédure expérimentale	176
Analyse des résultats	178
ANNEXE D – EXPÉRIENCES D'INFUSION DIRECTE ET INDIRECTE	183
Préparation des échantillons.....	183
Moule de perméabilité.....	183
Procédure expérimentale	185
Manipulations :.....	186
ANNEXE E – GUIDE D'UTILISATION DE LA FICHE EXCEL DE CALCUL DE PERMÉABILITÉ	194

Données de pression :	194
Calculs de perméabilité	195
Pression d'infusion constante.....	195
Pression d'infusion réelle	199

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'énergie éolienne connaît une croissance importante partout dans le monde. Le Québec et le Canada possèdent un potentiel éolien considérable compte tenu de l'immensité du territoire. La puissance éolienne intégrable au réseau d'Hydro-Québec a en effet été évaluée en juin 2005 à 3 600 MW (Hélimax Énergie & AWS Truewind, 2005) et des mesures concrètes ont depuis été mises en place pour encadrer le développement de l'énergie éolienne au Québec. Toutefois, un frein au développement de cette énergie reste son coût relativement élevé, que l'on espère abaisser de l'ordre de 40% d'ici 2030, et 50% d'ici 2050 (Wiser et al., 2016). À cette fin, cinq axes prioritaires ont été identifiés, comme par exemple, l'augmentation de la taille des rotors et l'amélioration de la fiabilité et de la durée de vie des composantes.

À l'avenir, les éoliennes devront donc être équipées de pales en matériaux composites plus légères et plus rigides, se rapprochant de la performance des applications aéronautiques les plus exigeantes. Les matériaux composites sont privilégiés, car ils offrent des avantages considérables par rapport aux matériaux métalliques, tels qu'un rapport poids-rigidité réduit et une durée de vie en fatigue accrue. De plus, des combinaisons uniques de matériaux et de procédés de fabrication répondent à un grand nombre d'applications à haute performance. En raison de cette diversité, il est impératif de prendre en compte non seulement les structures à concevoir, mais également les matériaux et les méthodes de fabrication utilisés. L'optimisation des structures composites demande par conséquent une maîtrise du cycle de production et un choix adéquat des paramètres de fabrication.

La fabrication de structures composites de grande dimension comme les pales d'éolienne pose de nombreux problèmes, car leur taille importante rend beaucoup plus difficile l'optimisation du procédé de fabrication et l'amélioration de la qualité des pièces finales. En effet, les procédés classiques de fabrication des composites à haute performance comme l'autoclave ne sont pas économiquement viables à une si grande échelle, et les pales sont produites par un procédé de moulage par transfert de résine assisté par le vide. Ce procédé, couramment appelé infusion de résine, consiste à disposer un renfort fibreux dans un moule sous une bâche plastique (Griffin, 2002; Veers et al., 2003). Après avoir scellé la bâche autour du périmètre de la préforme, une pompe est utilisée pour créer un vide dans la cavité du moule. La résine est alors infusée dans la préforme sous l'action de la pression atmosphérique (Robinson, 2008).

Pour adapter l'infusion de résine aux pièces de grande taille, des milieux drainants de haute perméabilité sont généralement disposés en peau de la préforme. La résine circule alors initialement dans ces milieux avant d'imprégner le renfort fibreux à travers son épaisseur. Ce procédé, appelé « infusion indirecte » par opposition à l'« infusion directe » sans milieu drainant, permet d'accélérer l'infusion et d'imprégner entièrement la préforme avant le gel de la résine.

Néanmoins, pour maîtriser le procédé d'infusion indirecte et éviter l'apparition de défauts de lors de l'imprégnation, il faut faire bon usage des milieux drainants et optimiser les paramètres critiques, tels que la pression d'infusion et les positions des lignes d'injection et de vide. Ceci nécessite d'établir les lois qui gouvernent les mécanismes d'écoulement, de déterminer les paramètres empiriques qui caractérisent les matériaux utilisés, et finalement d'optimiser la stratégie d'infusion par simulation numérique.

Les méthodes expérimentales actuellement utilisées pour caractériser les renforts fibreux ne reproduisent toutefois pas fidèlement les phénomènes particuliers au procédé d'infusion de résine. La perméabilité, par exemple, qui représente la capacité d'un milieu poreux à se laisser imprégner par un fluide, est généralement caractérisée dans des moules rigides. Cette approche ne permet pas de tenir compte du couplage hydromécanique entre l'écoulement et la compaction lors de l'infusion de résine, ni des effets d'emboîtement des couches successives de fibres (*nesting*), ou des conditions de contact particulières entre le renfort fibreux et la bâche à vide. La perméabilité des milieux drainants, plus spécifiquement, ne peut être adéquatement caractérisée en moule rigide, en raison de la forte porosité de ce type de matériaux.

De plus, les outils de simulation numérique présentement disponibles ne permettent pas de reproduire fidèlement tous les détails du procédé dans des pièces de grande taille, comme la décompaction du renfort fibreux pendant l'écoulement et le rôle joué par le milieu drainant. Finalement, les temps de calcul nécessaires pour simuler précisément le procédé d'infusion de résine deviennent rapidement prohibitifs pour les structures de grande taille, lorsqu'il s'agit de simuler en trois dimensions l'infusion à travers des renforts possédant des propriétés différentes.

Par conséquent, les fabricants d'éoliennes développent généralement les nouveaux modèles de pales par une approche d'essais et erreurs. Ceci engendre des coûts considérables en raison de la taille des moules, des quantités de matériaux utilisés et du coût de la main-d'œuvre. Cette approche limite aussi la cadence de développement et de production et nuit à la qualité des pales fabriquées.

L'objectif du projet de maîtrise est donc de combler les lacunes des méthodes actuelles de caractérisation et de simulation en développant une procédure simplifiée et robuste pour simuler et optimiser la fabrication des pales d'éolienne. Puisque le procédé de fabrication diffère d'une composante de pale à une autre, le projet portera une attention particulière à la simulation des longerons monolithiques unidirectionnels, conçus pour rigidifier les pales d'éolienne en flexion.

L'objectif principal du projet implique des travaux dans les deux directions suivantes :

- Développer une procédure de caractérisation simple et robuste des renforts fibreux et du milieu drainant, qui prend en compte les phénomènes physiques qui interviennent pendant l'infusion de résine, comme la décompaction du renfort et le rôle joué par le milieu drainant placé en peau.
- Simplifier la procédure de simulation du procédé d'infusion indirecte (avec milieu drainant).

Pour atteindre ces objectifs, une démarche de recherche a été mise en place afin de caractériser les propriétés critiques qui régissent le procédé d'infusion de résine, notamment la compressibilité et la perméabilité des renforts fibreux. Une approche de simulation 2D a également été élaborée pour prédire rapidement et fidèlement les temps de remplissage en infusion indirecte. Cette démarche de recherche est présentée dans le mémoire comme suit :

1. Le Chapitre 1 présente la problématique et les objectifs du mémoire.
2. Le Chapitre 2 décrit l'état de l'art actuel sur la fabrication industrielle des matériaux composites. Les fibres et les matrices polymères généralement utilisées sont énumérées, ainsi que les principaux procédés de fabrication de composites renforcés par des fibres continues. On donne également des précisions sur les applications des matériaux composites dans le domaine éolien et sur les principales composantes constituant les pales.
3. Le Chapitre 3 passe en revue la littérature scientifique pertinente sur la compressibilité et la perméabilité des renforts fibreux. Il décrit également les procédures pour caractériser ces propriétés. Les particularités du procédé d'infusion indirecte de résine avec un milieu de distribution sont indiquées. Enfin, on termine en faisant le point sur les méthodes de simulation actuelles.

4. Le Chapitre 4 détaille la méthodologie employée pour caractériser la compressibilité et la perméabilité planaire des renforts fibreux. Il décrit également la démarche de simulation suivie pour identifier la perméabilité transverse des préformes, ainsi que l'analyse de sensibilité grâce à la simulation numérique.
5. Le Chapitre 5 présente les résultats expérimentaux sur la compressibilité et la perméabilité du milieu drainant et des renforts fibreux utilisés. On discute également des limitations de la méthodologie et des difficultés expérimentales rencontrées, en mettant en relief les défis liés à la mesure de la perméabilité du milieu drainant et à l'influence du rapport de perméabilité des matériaux utilisés (milieu drainant et renfort fibreux) sur la performance de l'infusion.
6. Le Chapitre 6 présente les résultats des simulations numériques et les analyses menées pour identifier la perméabilité transverse des préformes. Des analyses de sensibilité sont également effectuées pour illustrer l'impact des différentes propriétés des matériaux sur les temps de remplissage du milieu drainant et des renforts fibreux, et identifier les paramètres critiques du procédé d'infusion de résine.
7. Finalement, le Chapitre 7 discute des principales conclusions du mémoire et des limitations de l'approche proposée. Des recommandations sont également proposées et une stratégie de simulation de la fabrication des longerons de pale d'éolienne est suggérée. Cette stratégie est principalement basée sur des simulations bidirectionnelles agrémentées par des simulations 3D locales.

Les cinq annexes au mémoire fournissent plus d'informations sur la procédure expérimentale. Les annexes A et B donnent respectivement les fiches techniques des matériaux utilisés et la liste des consommables. Les annexes C et D détaillent respectivement les expériences de compressibilité et d'infusion (directe et indirecte). Enfin, l'annexe D contient un guide d'utilisation de la fiche Excel conçue pour calculer la perméabilité des matériaux de renfort ou du milieu drainant.

CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART

2.1 Matériaux composites

Les matériaux composites renforcés de fibres sont constitués de fibres à haute résistance et de module élastique élevé, imprégnées par une matrice polymère. Les fibres et la matrice ainsi liées conservent leurs propriétés physiques et chimiques intrinsèques, mais produisent une combinaison de propriétés qui ne peuvent pas être atteintes séparément par les constituants (Mallick, 2007). De nombreux polymères renforcés de fibres offrent, par exemple, des combinaisons de résistance et de module comparables ou meilleures que beaucoup de matériaux métalliques traditionnels, avec des rapports résistance-masse et module-masse nettement supérieurs.

Dans les composites, les fibres confèrent généralement la résistance mécanique, tandis que la matrice, dont la résistance est plus faible, transmet les efforts aux fibres, les protège des dommages environnementaux et donne sa forme au produit final (Bonnard, 2016; Mallick, 2007). Les sections 2.1.1 et 2.1.2 ci-dessous donnent un aperçu des fibres et des matrices les plus utilisées, ainsi que leur influence sur les propriétés du composite.

2.1.1 Fibres

Les fibres sont les principaux composants d'un composite et occupent la plus grande fraction volumique. Les principales fibres utilisées dans les applications commerciales sont en verre, carbone ou aramide (Kevlar®). D'autres matériaux, tels que le bore, le carbure de silicium et l'aluminium oxyde, sont également utilisés pour les renforts, mais en quantités limitées (Mallick, 2007). Ces fibres peuvent être continues ou discontinues (fibres courtes). En effet, dans les composites à haute performance, les fibres continues sont privilégiées, mais dans d'autres applications moins exigeantes, des fibres de quelques centimètres à quelques fractions de millimètres confèrent une résistance mécanique suffisante au composite.

Les fibres continues, dont la longueur peut atteindre plusieurs mètres, sont généralement rassemblées en mèches ou torons, puis regroupées en renfort selon une géométrie plus ou moins complexe. Cette géométrie, qui peut être unidirectionnelle, bidirectionnelle ou multidirectionnelle, est obtenue par tissage ou par d'autres procédés de l'industrie textile (Bonnard, 2016).

Pour une couche de renfort unidirectionnel, la résistance et le module sont maximaux dans la direction longitudinale des fibres et minimaux dans la direction transversale. Pour une couche bidirectionnelle, la résistance et le module peuvent être modifiés en utilisant différentes quantités de fibres dans les directions longitudinale et transversale. D'autre part, puisque les couches de renfort sont généralement empilées pour obtenir un stratifié, l'orientation des fibres dans chaque couche et la séquence d'empilement peuvent être ajustées pour conférer aux pièces finales une large gamme de propriétés physiques et mécaniques.

2.1.2 Matrices

Le rôle de la matrice dans un composite renforcé de fibres est de maintenir ces dernières en place, transférer les contraintes entre les fibres, protéger la surface des fibres et constituer une barrière contre les environnements défavorables comme les produits chimiques et l'humidité (Mallick, 2007). La matrice joue un rôle mineur dans la résistance à la traction dans la direction longitudinale d'une structure composite, mais son choix exerce une influence majeure sur la résistance transversale à la traction et sur les propriétés de cisaillement inter laminaire.

Les matrices utilisées dans l'industrie sont minérales, métalliques ou polymériques (thermoplastique ou thermodurcissable). Parmi celles-ci, les polymères thermodurcissables, tels que les époxydes, les polyesters et les esters vinyliques, sont les plus couramment utilisés dans les composites renforcés de fibres continues, principalement en raison de leur mise en forme à faible viscosité et leur fabrication possible à température et pression ambiantes.

2.2 Procédés de fabrication des matériaux composites

Tout autant que le choix des fibres et des matrices utilisées, le choix du procédé de fabrication est critique, car contrairement aux matériaux métalliques, le matériau et la structure sont fabriqués simultanément. Les sections ci-dessous présentent les procédés les plus communs pour fabriquer des composites à matrice thermodurcissable renforcée par des fibres longues. Ils incluent le moulage manuel (*wet layup*), le moulage par transfert de résine (RTM), le moulage par transfert de résine assisté par vide (VARTM) et l'autoclave. Une description de chaque procédé, incluant ses avantages et ses inconvénients, est présentée.

2.2.1 Moulage manuel

Ce procédé consiste à placer des fibres, sous la forme de renforts tissés, tricotés, cousus ou liés, dans un demi-moule rigide, puis de les imprégner de résine manuellement avec des rouleaux, des brosses ou des raclettes (Figure 2-1). Les pièces ainsi fabriquées possèdent des taux volumiques de fibres entre 40% et 50% (Robinson, 2008). La plupart des combinaisons de préforme et de résine peuvent être fabriquées par ce procédé, mais les tissus lourds peuvent être difficiles à imbiber.

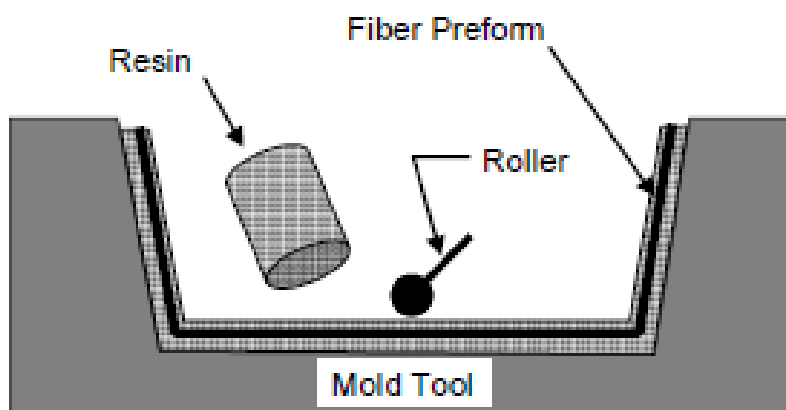


Figure 2-1. Représentation schématique du moulage manuel (Robinson, 2008)

L'un des principaux avantages de cette méthode est son coût. En effet, comparativement aux autres procédés de fabrication, le moulage manuel ne nécessite pas de moules rigides et étanches. Les coûts d'outillage sont alors très bas. Cependant, les inconvénients majeurs de cette méthode sont le taux volumique de fibres qui demeure toujours faible et la qualité de la pièce qui dépend fortement de l'expérience de l'opérateur. De plus, ce dernier est exposé à des composants organiques volatils, potentiellement nocifs et de plus en plus réglementés.

2.2.2 Moulage par transfert de résine (RTM)

Le RTM, pour *Resin Transfer Molding*, est un procédé de moulage liquide qui consiste à placer une préforme tissée, cousue ou orientée de manière aléatoire, sur un moule rigide. Une seconde surface rigide est utilisée pour compacter le tissu et former un joint étanche (Alms, Garnier, Glancey, & Advani, 2010) et une pression de serrage élevée est utilisée pour maintenir les deux moitiés de moule ensemble (Robinson, 2008). Ensuite, une résine polymère est injectée à pression positive constante ou à débit constant, jusqu'à saturation de la préforme (Figure 2-2).

Un évent permet à l'air contenu dans la préforme d'être expulsé de la cavité du moule lorsqu'il est remplacé par la résine. Le moule est ensuite chauffé pour durcir rapidement la pièce, puis il est ouvert et la pièce est retirée. Les fractions volumiques de fibres dans le procédé RTM sont généralement comprises entre 50% et 60% (Robinson, 2008).

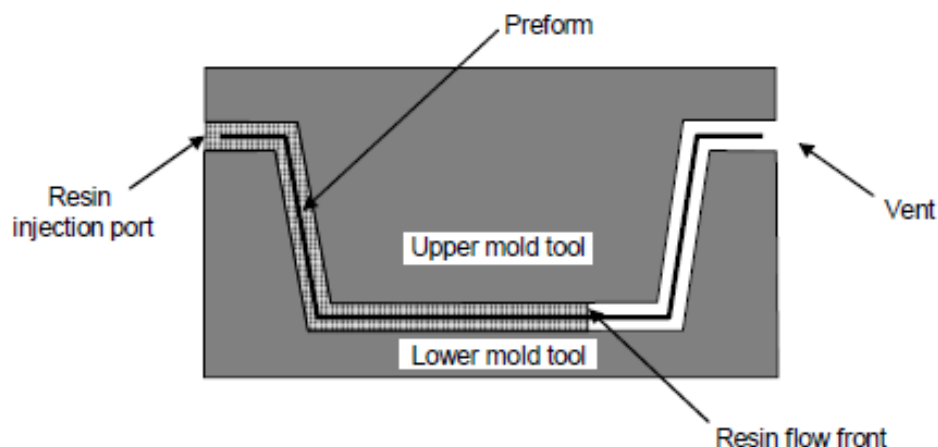


Figure 2-2. Représentation schématique du RTM (Robinson, 2008)

Les principaux avantages du RTM sont le confinement des émissions nocives et la capacité à produire rapidement un plus grand nombre de pièces que par le procédé de moulage manuel. Toutefois, en raison des pressions d'injection élevées, les moules doivent être rigides pour résister à la déformation. Ces exigences limitent le procédé à la production de pièces de taille petite à moyenne, car les coûts deviennent rapidement prohibitifs pour fabriquer des moules de grande dimension.

2.2.3 Infusion de résine (VARI)

Le procédé de moulage par transfert de résine assisté par le vide (VARTM), pour *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*, est une variante du RTM qui permet de fabriquer par moulage liquide des structures de grande dimension traditionnellement fabriquées à la main. Ce procédé est aussi appelé infusion de résine ou VARI, pour *Vacuum Assisted Resin Infusion*.

L'infusion de résine consiste à remplacer la seconde moitié du moule rigide par une bâche d'emballage qui est scellée autour du périmètre de la préforme. Après mise en place de la bâche, une pompe à vide est utilisée pour créer une pression négative dans la cavité du moule et la résine est injectée dans la préforme à la pression atmosphérique (Figure 2-3).

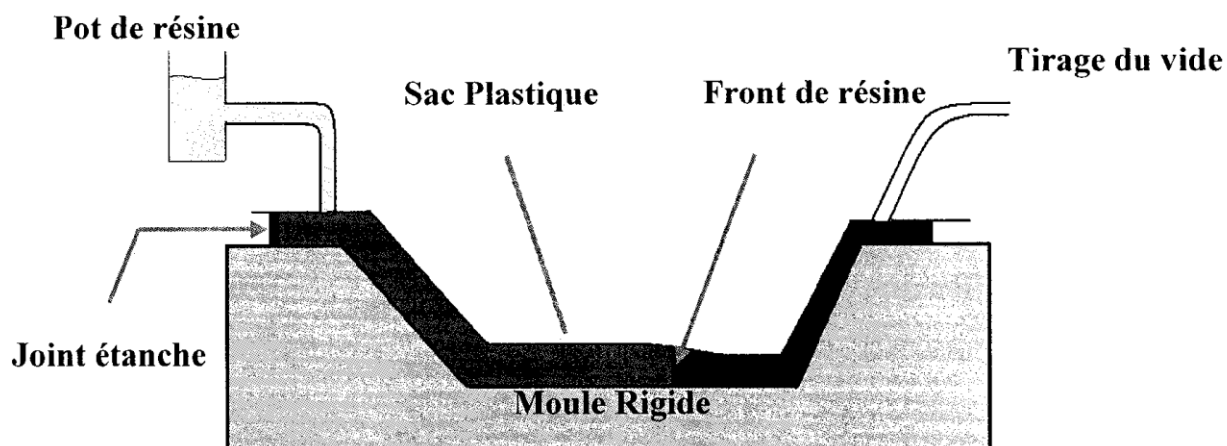


Figure 2-3. Représentation schématique du VARI (Joubaud, 2003)

Des structures de plus grande dimension, comme des bateaux et des pales d'éolienne, peuvent être fabriquées par infusion, et la fraction volumique de fibres des pièces fabriquées avec ce procédé est généralement comprise entre 50% et 55% (Robinson, 2008). Le procédé d'infusion de résine présente aussi l'avantage de fournir un système fermé qui réduit l'exposition aux émissions nocives. Il est toutefois limité aux résines thermodurcissables ayant une viscosité faible à température ambiante. De plus, bien que le coût des moules soit réduit significativement, le coût des consommables est plus élevé qu'avec le procédé RTM.

2.2.4 SCRIMP®

En 1990, la compagnie Seemann Composites Inc. a déposé un brevet pour un procédé de fabrication dérivé du VARI (Seemann, 1990). Ce procédé, appelé SCRIMP® (*Seeman Composites Resin Infusion Molding Process*®), adapte l'infusion de résine aux pièces de grande taille en utilisant un milieu de distribution disposé en peau de la préforme pour faciliter l'imprégnation du renfort (Figure 2-4). Le polymère liquide circule initialement dans ce milieu de distribution avant d'imprégner la préforme à travers son épaisseur. Le milieu de distribution est arrêté avant d'atteindre la ligne de vide pour empêcher la résine de s'écouler directement dans la sortie et permettre ainsi de saturer entièrement la préforme. En plaçant une couche de tissu d'arrachement (*peel ply*) entre le stratifié et le milieu de distribution, ce dernier peut être retiré de la pièce finale après durcissement.

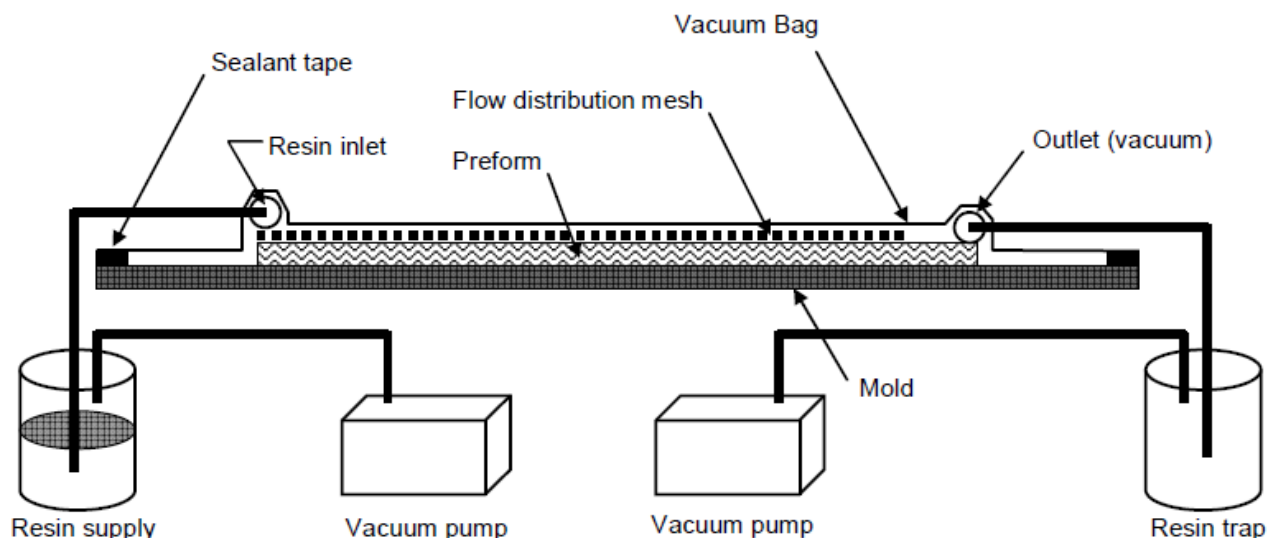


Figure 2-4. Représentation schématique de l'infusion indirecte (Robinson, 2008)

Le procédé SCRIMP[®], plus communément appelé « infusion indirecte » par opposition à l'« infusion directe » en l'absence de milieu de distribution, permet d'effectuer des infusions plus rapides et assure une répartition plus uniforme de la pression et du taux volumique de fibres (Desilets, 2011). Ses inconvénients sont l'augmentation des déchets (milieu de distribution et tissu d'arrachement) et l'impression du maillage de distribution sur la surface de la pièce finie.

2.2.5 Autoclave

Finalement, le traitement en autoclave consiste à placer des renforts préimprégnés de résine sur un moule rigide, suivis d'une couche d'arrachement et d'une couche de tissu respirant (*breather*). Le moule est ensuite recouvert d'une bâche à vide et scellé autour du périmètre. L'ensemble est placé dans un autoclave qui applique de la chaleur et de la pression pour consolider et cuire la pièce (Figure 2-5). La température de durcissement est typiquement de l'ordre de 150 °C avec des pressions de compactage comprises entre 5 et 7 atm (Robinson, 2008). Pendant le durcissement, les substances volatiles sont retirées du moule et la couche de *breather* absorbe l'excès de résine. Le traitement en autoclave produit des pièces d'excellente qualité, dont les taux volumiques de fibres sont compris entre 60% et 65% (Robinson, 2008). Les coûts des fibres préimprégnées et du fonctionnement des autoclaves sont cependant élevés, ce qui limite son utilisation principalement à l'industrie de l'aérospatiale et aux équipements de sport.

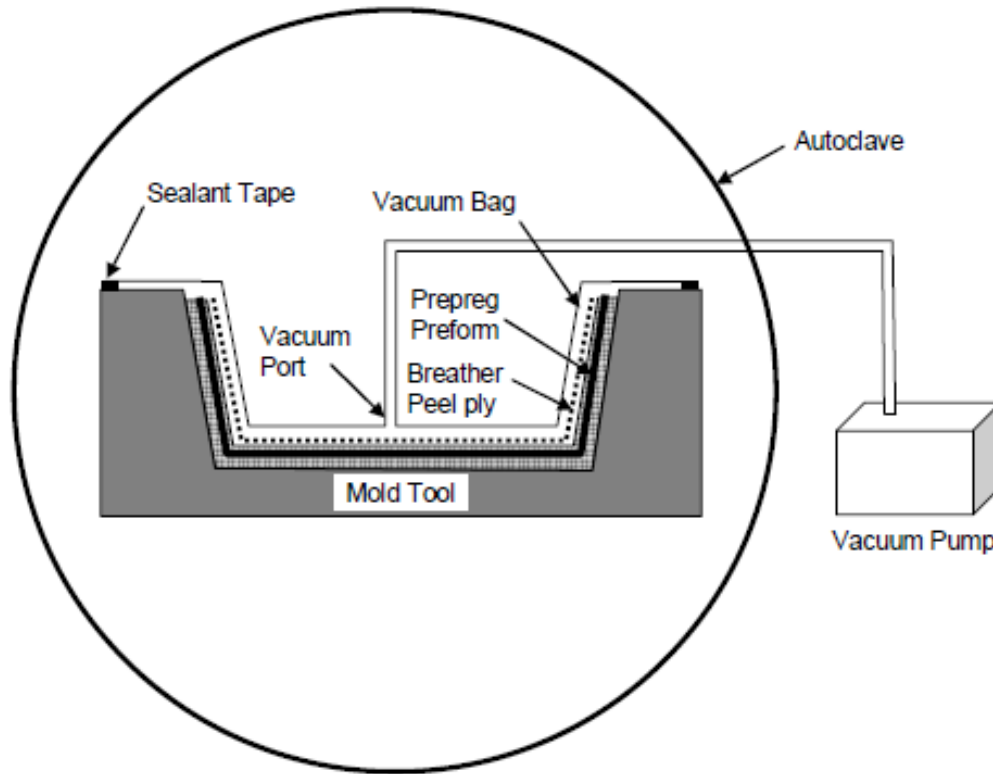


Figure 2-5. Représentation schématique de la fabrication en autoclave (Robinson, 2008)

2.3 Application au domaine de l'énergie éolienne

2.3.1 Matériaux utilisés

Les tours d'éolienne sont généralement fabriquées en matériaux métalliques ou en béton, alors que les pales et les nacelles d'éolienne sont en matériaux composites. Les pales constituent l'élément le plus important et le plus coûteux d'une éolienne (Mishnaevsky et al., 2017). Typiquement, les fibres de verre E sont utilisées comme renfort principal lors de la fabrication des pales, avec une fraction massique autour de 70% à 75% (Mishnaevsky et al., 2017). Ces fibres sont généralement infusées avec des résines thermodurcissables d'époxy ou de polyester insaturé. Des âmes en mousse polymère de PVC, en bois de balsa ou moins communément des âmes en nid d'abeille, sont également utilisées dans la fabrication des pièces sandwichs constituant les pales.

De nombreux travaux ont été effectués pour remplacer les fibres de verre E habituelles par des fibres plus résistantes, telles que les fibres de verre S ou les fibres de carbone. Le coût prohibitif de ces dernières demeure cependant un frein à leur utilisation extensive dans des applications industrielles. Toutefois, les fibres de carbone sont considérées comme une alternative prometteuse et les sociétés Vestäs (Danemark) et Siemens Gamesa (Espagne) les utilisent même déjà pour réduire la masse de leurs plus grandes pales (Mishnaevsky et al., 2017).

2.3.2 Composantes des pales

Les pales d'éolienne sont constituées de deux faces (à haute et à basse pression), généralement rigidifiées et reliées entre elles par des longerons et des panneaux de cisaillement. Les fabricants d'éolienne utilisent différentes approches pour concevoir et produire les composantes des pales : certains fabriquent des caissons de longeron qu'ils adhèrent aux peaux après leur production (Figure 2-6), alors que d'autres les fabriquent comme des constituants séparés. Les longerons sont alors utilisés comme inserts lors de la fabrication des peaux, tandis que les panneaux de cisaillement sont collés à l'assemblage ultérieurement (Figure 2-7). Finalement un petit groupe de fabricants adopte une technique consistant à fabriquer l'ensemble de la structure de la pale en un seul processus (Figure 2-8).

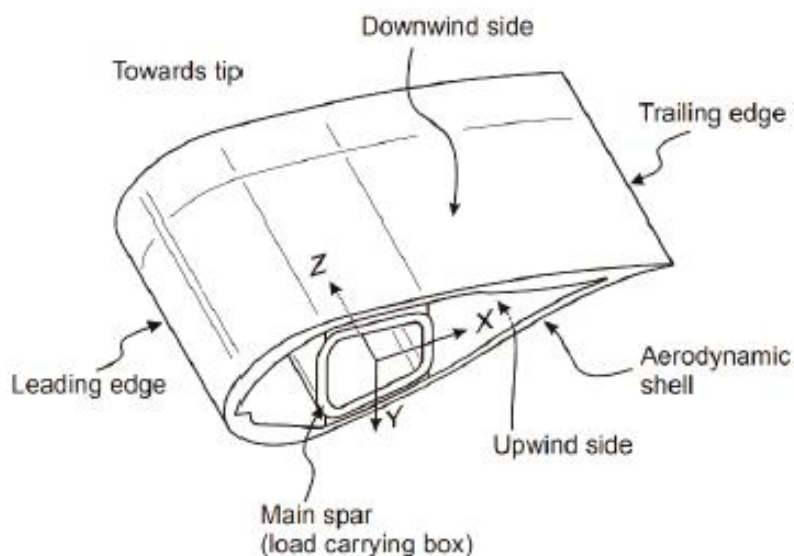


Figure 2-6. Coupe transversale d'une pale d'éolienne contenant un caisson de longeron (Sørensen et al., 2021)

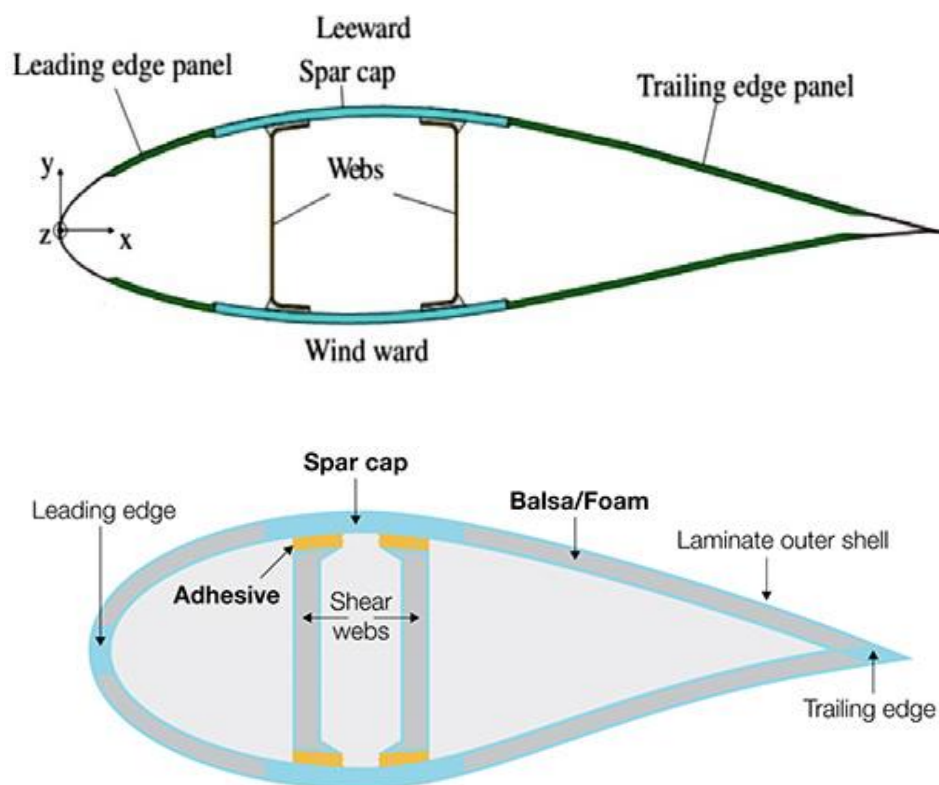


Figure 2-7. Coupe transversale d'une pale d'éolienne constituée de longerons et de panneaux de cisaillement fabriqués séparément (Ounis & Balehouane, 2016)

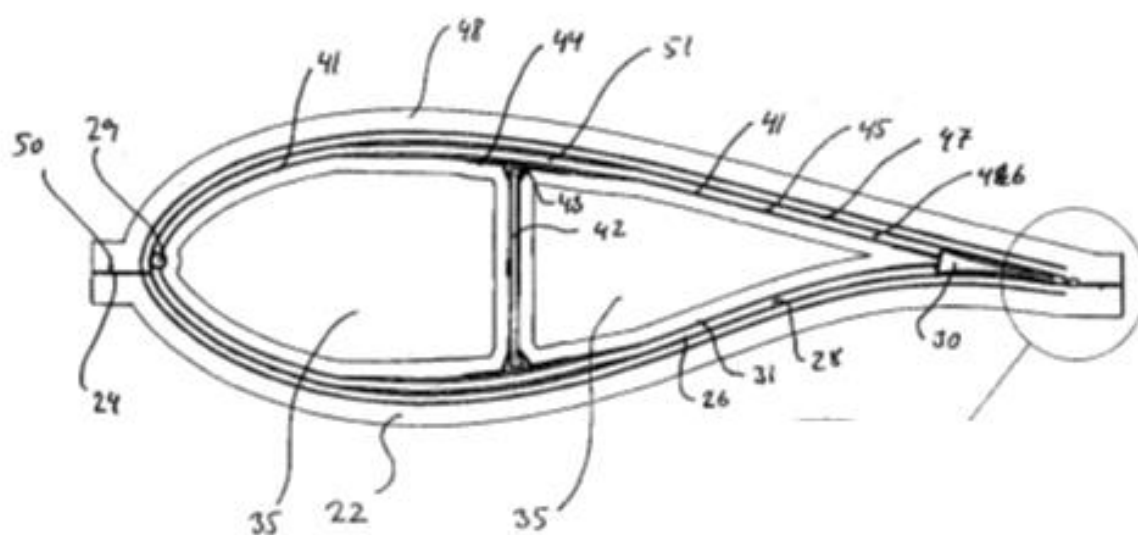


Figure 2-8. Coupe transversale d'une pale d'éolienne fabriquée en une seule pièce (Stiesdal et al., 2006)

Durant leur utilisation, les pales d'éolienne sont soumises à différents cas de chargements cycliques (Thomsen, 2009). Des charges dans le sens du battement (*flapwise bending*) sont causées par la pression du vent et sont supportées par les longerons et les panneaux de cisaillement (Figure 2-9, 1 et 2); alors que des charges dans le sens de la corde (*edgewise bending*) résultant des forces de gravité et du couple de rotation sont supportées par les bords du profilé (Figure 2-9, 3). Pour cette raison, chaque constituant de la pale possède des spécifications de conception différentes.

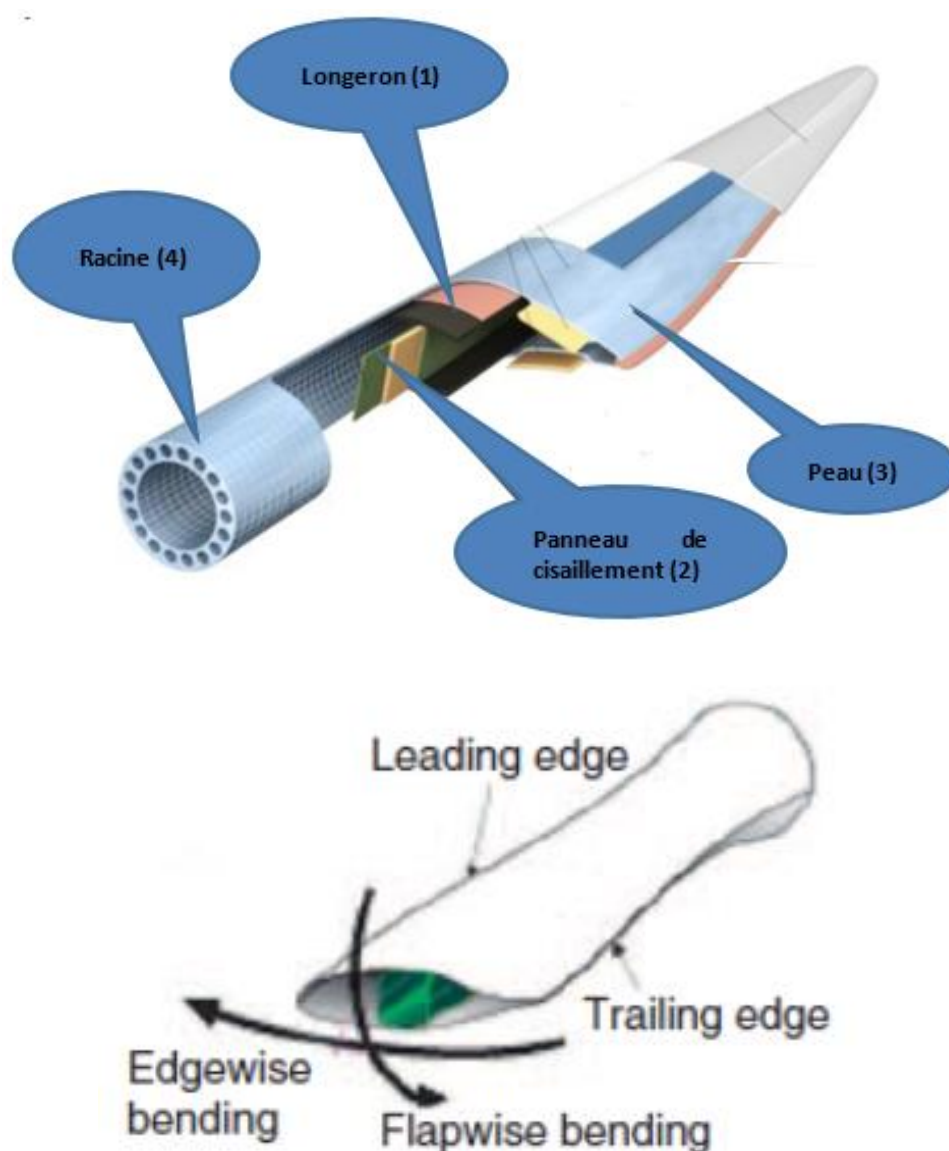


Figure 2-9. Composantes typiques d'une pale d'éolienne (Thomsen, 2009)

2.3.2.1 Longerons

Les longerons s'étendent de la base de la pale à sa pointe. Leur fonction principale est de supporter le moment de flexion des pales. Ils sont donc généralement fabriqués sous la forme de stratifiés monolithiques épais constitués majoritairement de couches unidirectionnelles pour assurer la rigidité en flexion (Thomsen, 2009). Quelques plis sont également placés en biais pour assurer la résistance au flambement de la semelle chargée en compression.

Bien que la technologie de l'autoclave permette à certains fabricants comme Vestäs de produire des longerons de haute performance, ses coûts demeurent élevés et le procédé d'infusion de résine indirecte est le plus couramment utilisé (Mishnaevsky et al., 2017). Ceci pose de nombreux problèmes techniques, car les longerons peuvent être très épais à la racine avec une épaisseur dépassant généralement 50–60 mm à l'état consolidé, mais deviennent beaucoup plus fins à mesure que l'on se rapproche de la pointe de la pale (Mishnaevsky et al., 2017). Il est donc difficile d'assurer en pratique une imprégnation uniforme de la résine et d'éviter la formation de rides, de bulles d'air et de zones sèches lors de l'écoulement.

D'autre part, compte tenu de l'épaisseur élevée des longerons, il devient nécessaire économiquement d'utiliser des tissus lourds possédant des torons de grand diamètre (Broad, 2012; Griffin, 2002). Cependant, l'utilisation de tissus plus lourds implique des chutes de pli (*ply drops*) plus importantes qui créent des canaux d'écoulement préférentiel, dans lesquels la résine peut s'écouler plus rapidement lors de l'infusion de résine (Figure 2-10). La maîtrise de la phase d'imprégnation requiert par conséquent d'optimiser la position des lignes d'injection et de vide, ainsi que celle du milieu de distribution de haute perméabilité utilisé pour accélérer le procédé d'infusion.

2.3.2.2 Panneaux de cisaillement

De manière similaire aux longerons, les panneaux de cisaillement s'étendent sur toute la longueur de la pale. Ils ont pour fonction de supporter les forces de cisaillement et sont fabriqués en tant que structures sandwich, avec un noyau en polymère ou en balsa et des couches de fibres orientées à $\pm 45^\circ$ par rapport à la direction longitudinale de la pale (Thomsen, 2009). Des canaux d'écoulement sont généralement usinés sur la surface du noyau et à travers son épaisseur, pour accélérer l'écoulement et assurer une imprégnation plus uniforme des deux peaux.

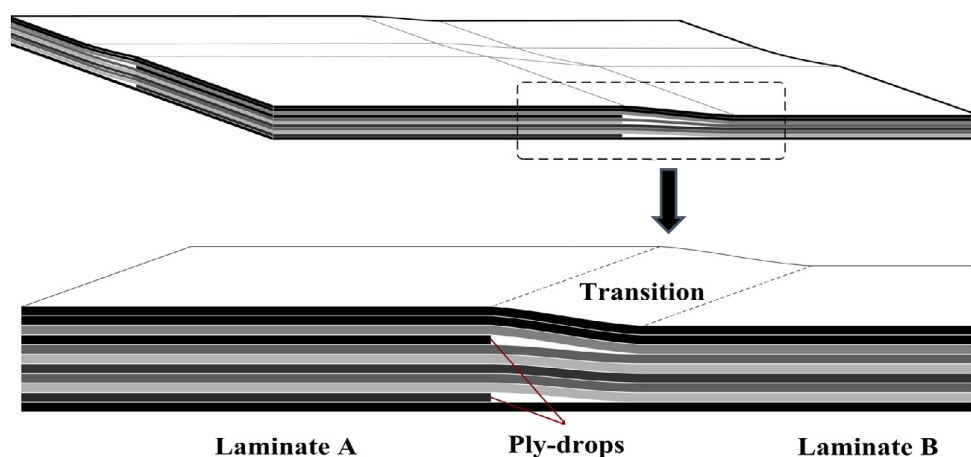


Figure 2-10. Illustration des chutes de pli dans un laminé composite (Fan, Wang, & Chen, 2016)

2.3.2.3 Peaux

Finalement, les peaux sont principalement conçues pour résister au flambement élastique et maintenir un profil aérodynamique optimal (Mishnaevsky et al., 2017). Elles sont aussi constituées de structures sandwich et fabriquées par infusion de résine. Au niveau de la base de la pale, une racine en composite est utilisée comme insert. Cette racine prend généralement la forme d'un stratifié monolithique unidirectionnel dont l'épaisseur peut dépasser 80 mm à l'état consolidé (Mishnaevsky et al., 2017). Elle doit donc être fabriquée séparément selon une approche similaire à celle employée pour les longerons. Ces derniers sont également employés comme inserts sur toute la longueur de la pale, tandis que le reste de la structure sandwich est comblé par une âme en mousse polymère ou en bois de balsa. De manière similaire aux panneaux de cisaillement, des canaux sont usinés dans l'âme, et un milieu de distribution est utilisé en peau de la préforme pour permettre l'infusion.

2.3.3 Simulation numérique de la fabrication

Plusieurs défis majeurs se posent dans la fabrication des pales d'éolienne par infusion indirecte de résine :

- L'épaisseur importante des préformes implique que le front d'écoulement n'est pas uniforme à travers l'épaisseur. Des stratégies d'infusion séquentielle où divers ports d'injection sont ouverts successivement sont donc requises.

- Les renforts utilisés sont très denses, et donc très peu perméables. Les temps de remplissage sont par conséquent longs, et les stratégies d'infusion doivent être optimisées pour assurer l'imprégnation complète des renforts fibreux avant le gel de la résine.
- Les propriétés à l'écoulement des matériaux employés, telles que la compressibilité et la perméabilité, sont très différentes.
- La distribution de température n'est pas homogène pendant l'infusion.
- Des composantes fonctionnelles, telles que des systèmes de dégivrage ou de protection contre la foudre, sont parfois directement intégrées lors de la fabrication des pales par infusion.
- Enfin, le recours à des canaux d'écoulement usinés dans l'âme et à des milieux de distribution placés en peau de la préforme rend plus complexes les stratégies d'infusion.

La phase de développement de nouveaux modèles de pales par « essais et erreurs » est donc longue et coûteuse, car plusieurs prototypes doivent être fabriqués pour optimiser la stratégie d'infusion. Les simulations numériques par éléments finis représentent par conséquent un fort potentiel économique de réduction des coûts. Elles peuvent permettre, entre autres, de définir les positions optimales des lignes d'infusion et de vide, d'optimiser l'emploi des milieux de distribution et des canaux d'écoulement préférentiels et d'identifier localement les défauts potentiels. À cette fin, des simulations 2.5D dans le plan des pièces permettraient d'obtenir des résultats rapides et quantitatifs sur les stratégies d'infusion à grande échelle. Des simulations 2D permettraient d'étudier le remplissage dans l'ensemble de la pièce. Finalement, des simulations 3D permettraient d'effectuer des études plus détaillées dans des parties de pièce de dimension moyenne.

La précision de ces simulations dépend d'une bonne compréhension et modélisation des phénomènes régissant l'infusion. Elle est aussi limitée par la pertinence et la fiabilité des essais de caractérisation requis, qui ne sont pas standardisés. L'intégration « en avant-première » de la simulation dans le processus de développement des pales n'est donc pas encore complètement réalisée, et les problèmes de fabrication sont toujours plus fréquemment améliorés *à posteriori*. De nouvelles approches de caractérisation et de simulation sont par conséquent nécessaires.

CHAPITRE 3 REVUE DE LITTÉRATURE

La fabrication des pales d'éolienne par infusion de résine peut être améliorée en optimisant la stratégie d'infusion utilisée. Ceci implique la disposition optimale des ports d'entrée et de vide, et l'utilisation adéquate des matériaux de distribution employés pour accélérer l'écoulement. Les expériences par essais et erreurs généralement utilisées pour optimiser l'infusion sont coûteuses, et le recours à des simulations numériques peut engendrer des économies significatives. Ces outils permettraient notamment de comparer différentes stratégies d'infusion, afin de trouver celles qui garantissent une imprégnation complète de la pièce avant le gel de la résine, de minimiser le temps de remplissage et d'obtenir le taux volumique de fibres souhaité.

La précision des simulations numériques dépend cependant de l'exactitude des paramètres expérimentaux fournis en entrée. Ce chapitre présente donc une revue de littérature sur les paramètres critiques qui régissent l'infusion de résine, comme la compressibilité de la préforme et la perméabilité des renforts. Il décrit également les phénomènes qui caractérisent ce procédé, ainsi que les méthodes numériques précédemment développées dans la littérature pour le simuler.

3.1 Compressibilité

Les renforts fibreux sont composés de fibres et de vides interstitiels. Les fibres constituent le squelette solide du renfort, tandis que les pores interstitiels interconnectés permettent l'écoulement de la résine liquide, et donc l'imprégnation du renfort. Le rapport du volume occupé par les fibres sur le volume total du renfort donne le taux volumique de fibres V_f :

$$V_f = \frac{d_s n}{\rho_v h} \quad (3.1)$$

où n est le nombre de couches du renfort, h son épaisseur, d_s sa densité surfacique et enfin, ρ_v est la densité volumique des fibres. Ces densités sont des propriétés intrinsèques du renfort.

La porosité φ du matériau, quant à elle, correspond à l'espace occupé par les vides interstitiels du renfort fibreux :

$$\varphi = 1 - V_f \quad (3.2)$$

Lors de l'imprégnation, tout l'espace libre du milieu poreux devient occupé par de la résine. Le taux volumique de fibres a donc une influence considérable sur les propriétés mécaniques de la pièce résultante, car son augmentation permet de diminuer les charges appliquées sur la matrice en les redistribuant sur les fibres. Il est donc essentiel de comprimer le renfort fibreux avant l'imprégnation de la résine pour augmenter le taux volumique de fibres de la pièce et améliorer ses propriétés mécaniques.

Le comportement d'une préforme soumise à une contrainte de compaction à travers son épaisseur n'obéit pas à une loi générale. La préforme présente en effet un comportement viscoélastique qui dépend de la géométrie du renfort (Chen, Baoxing, Lang, & Chou, 2001), de la vitesse de compaction (Hammami, 2001) et du cycle de compaction appliqué (Yenilmez, Senan, & Murat Sozer, 2009) (Figure 3-1). Elle possède également un comportement plastique relié à la réorganisation du réseau fibreux et à l'emboîtement des couches successives de renfort. Chen, Baoxing et al. (2001) ont démontré que le nombre de plis du renfort exerce une influence sur ces effets d'emboîtement, mais ils suggèrent que ces effets sont généralement moyennés au-delà d'un certain nombre de plis, évalué à 10 pour les renforts caractérisés. D'autre part, les fibres présentent un comportement hystérétique et la décompaction du matériau ne peut pas être représentée par le même modèle (Carnaby & Pan, 1989; Yong et al., 2021) (Figure 3-1). La réponse des fibres à une même pression appliquée varie également d'un cycle de chargement au suivant et des taux volumiques de fibres plus élevés peuvent être atteints en appliquant plusieurs cycles de compaction (Williams, Grove, & Summerscales, 1998).

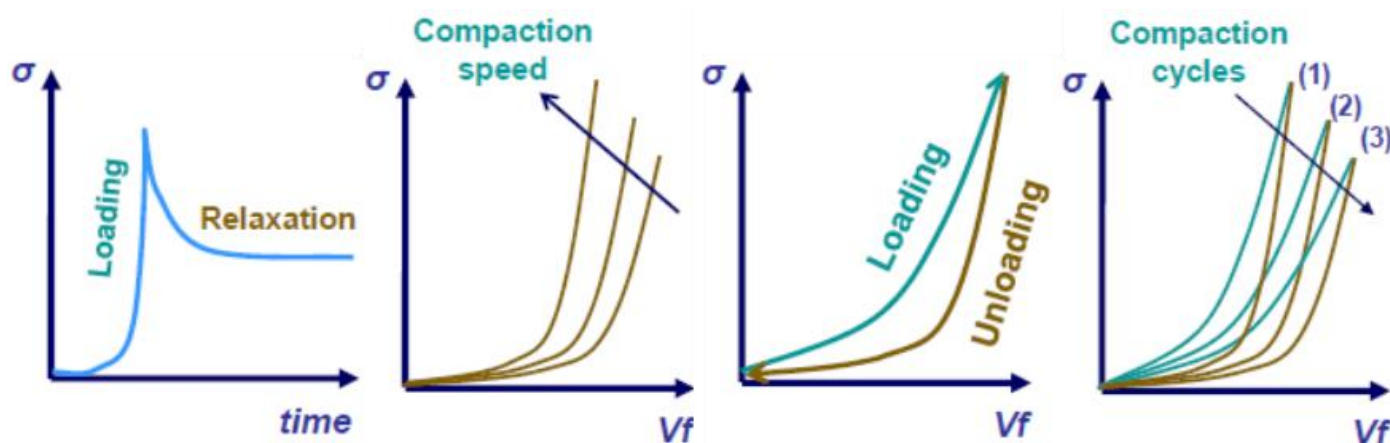


Figure 3-1. Comportement viscoélastique des renforts fibreux (Cours MEC6318, Polytechnique Montréal)

Finalement, tel qu'illustré dans la Figure 3-2, la réponse à la compaction d'un renfort change lorsqu'il est imprégné, car la lubrification favorise la réorganisation du réseau fibreux et l'emboîtement des plis (Hammami, 2001; Lawrence et al., 2007; Yenilmez et al., 2009).

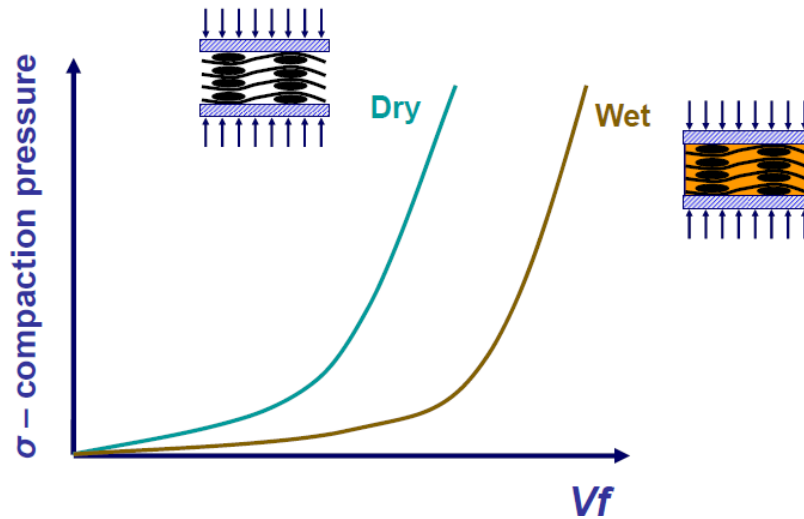


Figure 3-2. Influence de la lubrification sur la courbe de compaction d'un renfort fibreux (Cours MEC6318, Polytechnique Montréal)

Compte tenu de la complexité des phénomènes qui régissent la compaction des renforts, plusieurs auteurs ont proposé des modèles empiriques pour la représenter. Gutowski (1997) a développé un modèle mathématique fondé sur la théorie des poutres et considérant une ondulation régulière des fibres. Chen, B., Cheng et Chou (2001) ont divisé la compaction des renforts en trois phases : un régime linéaire régi par la compression des pores intra-plis à faible pression, un régime non-linéaire caractérisé par la compression des pores inter-plis à des pressions intermédiaires, puis finalement un régime linéaire qui correspond à la compression des fibres à forte pression (Figure 3-3).

La majorité des auteurs suggèrent toutefois un modèle empirique de la compressibilité des renforts dans lequel le taux volumique de fibres V_f dépend d'une manière exponentielle de la pression de compaction appliquée σ_f (Yong et al., 2021):

$$V_f = A\sigma_f^B \quad (3.3)$$

où A est le volume de fibres correspondant à une pression unitaire de compaction et B est l'indice de rigidité de compaction.

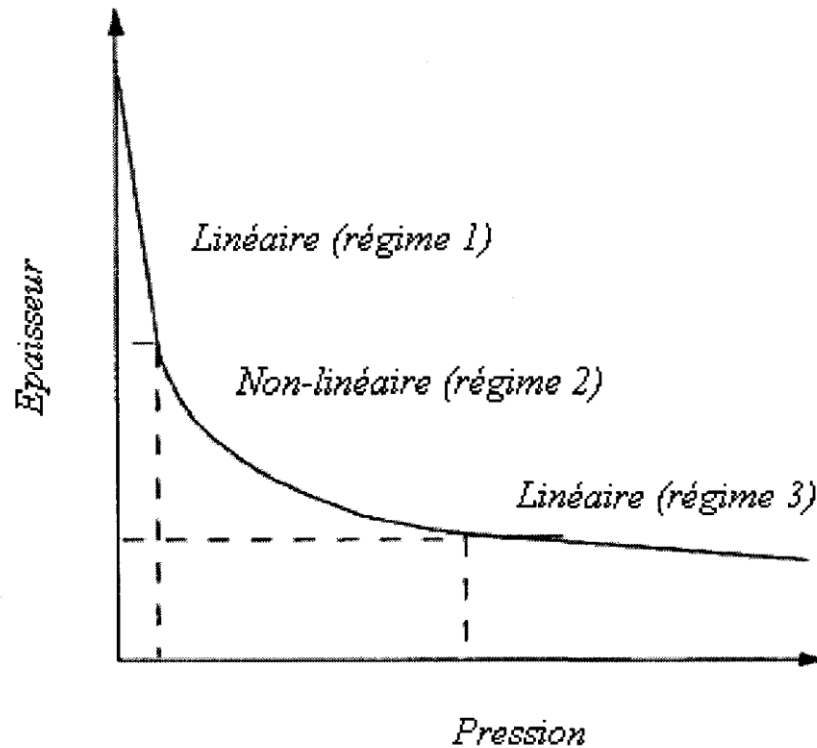


Figure 3-3. Régimes de déformation sous pression
des renforts tissés (Croteau-Labouly, 2008)

Dans le cas où des fibres saturées de résine sont comprimées, la pression de compaction est donnée par la loi de Terzaghi (1943) :

$$\sigma_{tot} = \sigma_f + p_i \quad (3.4)$$

où σ_{tot} est la contrainte totale externe appliquée sur le milieu poreux saturé et p_i est la pression interstitielle. Cette équation signifie que lorsqu'une contrainte est appliquée à un renfort saturé, une partie de la contrainte totale est supportée par les fibres et l'autre partie par la pression hydrostatique du fluide. Cette relation d'équilibre est fondamentale pour modéliser les procédés d'infusion, car la pression de vide initialement appliquée au renfort est progressivement relaxée au fur et à mesure que la pression de la résine augmente pendant l'imprégnation (Croteau-Labouly, 2008).

3.2 Perméabilité

Les procédés de moulage liquide des renforts fibreux sont généralement modélisés comme des écoulements en milieu poreux. Darcy (1856) a étudié ce type d'écoulement dans des lits de sable et a introduit une loi donnant le débit de liquide par unité d'aire q en fonction du gradient de pression ∇p :

$$q = -\frac{\bar{K}}{\mu} \nabla p \quad (3.5)$$

où \bar{K} est la perméabilité du milieu poreux et μ est la viscosité du fluide. La vitesse q , dite de Darcy, ne correspond pas à la vitesse du fluide filtrant, car elle ne tient pas compte de l'espace occupé par le renfort fibreux. La porosité φ étant la fraction du volume que devra remplir le fluide, la vitesse du front de résine u_f dans un écoulement unidirectionnel en milieu poreux est reliée à la vitesse de Darcy par la relation suivante :

$$u_f = \frac{q}{\varphi} \quad (3.6)$$

La loi de Darcy donne une approximation satisfaisante de l'écoulement d'un fluide au travers d'un milieux poreux si l'on considère les hypothèses suivantes (Croteau-Labouly, 2008) :

- a) L'écoulement est laminaire et le nombre de Reynolds est faible.
- b) Le fluide est newtonien et incompressible, donc la viscosité ne varie pas avec le taux de cisaillement et la densité demeure constante.
- c) La tension de surface et les effets capillaires sont négligés.

La perméabilité d'un milieux poreux caractérise son aptitude à se laisser imprégner par un fluide (Croteau-Labouly, 2008). Elle correspond à la conductivité hydraulique du milieu poreux et son unité est le m^2 (Joubaud, 2003). Bien qu'elle puisse être constante dans le cas d'un milieu isotrope, elle est donnée dans le cas général par un tenseur de deuxième ordre pour les renforts fibreux :

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Ce tenseur peut être diagonalisé pour obtenir les valeurs des trois perméabilités principales :

$$K' = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

On suppose généralement que les deux perméabilités principales K_1 et K_2 se trouvent dans le plan du renfort, et elles sont dites planaires. Le motif d'écoulement dans le plan est donc une ellipse orientée selon un angle β qui peut être défini comme l'angle entre la direction de chaîne et la direction d'écoulement (Vernet et al., 2014). Si l'on détermine les coordonnées de cette ellipse, la perméabilité dans n'importe quelle direction dans le plan peut ensuite être déterminée par une simple transformation de coordonnées (Robinson, 2008). La perméabilité K_3 , dite transverse, caractérise quant à elle l'écoulement à travers l'épaisseur du renfort.

Lorsqu'un renfort fibreux est comprimé, sa porosité diminue et son imprégnation par un fluide devient alors plus difficile. De nombreux modèles ont été proposés pour déterminer analytiquement la perméabilité des renforts fibreux en fonction du taux volumique de fibres, comme ceux de Kozeny-Carman (Carman, 1997; Kozeny, 1927) et de Gutowski (1997). Ces modèles analytiques sont néanmoins limités à une faible gamme de porosité et à des géométries idéales de réseaux cylindriques ou elliptiques qui sont des approximations des architectures de préformes réelles (Gokce, Chohra, Advani, & Walsh, 2005; Robinson, 2008). Par conséquent, les meilleurs résultats sont obtenus grâce à des modèles empiriques reposant sur des mesures à partir des matériaux réels considérés sur une gamme de fractions volumiques de fibres représentative des procédés de fabrication étudiés. Le modèle de type puissance ci-dessous est le plus répandu :

$$K = CV_f^D \quad (3.9)$$

où C et D sont des paramètres empiriques qui sont identifiés par les méthodes expérimentales qui seront présentées dans les sections suivantes.

3.2.1 Perméabilité planaire insaturée

Cette méthode permet d'identifier la perméabilité planaire d'un renfort à un taux volumique de fibres défini. Elle consiste à injecter de la résine dans une préforme sèche placée dans un moule rigide, et à suivre l'évolution du front d'écoulement dans le temps (Figure 3-4).

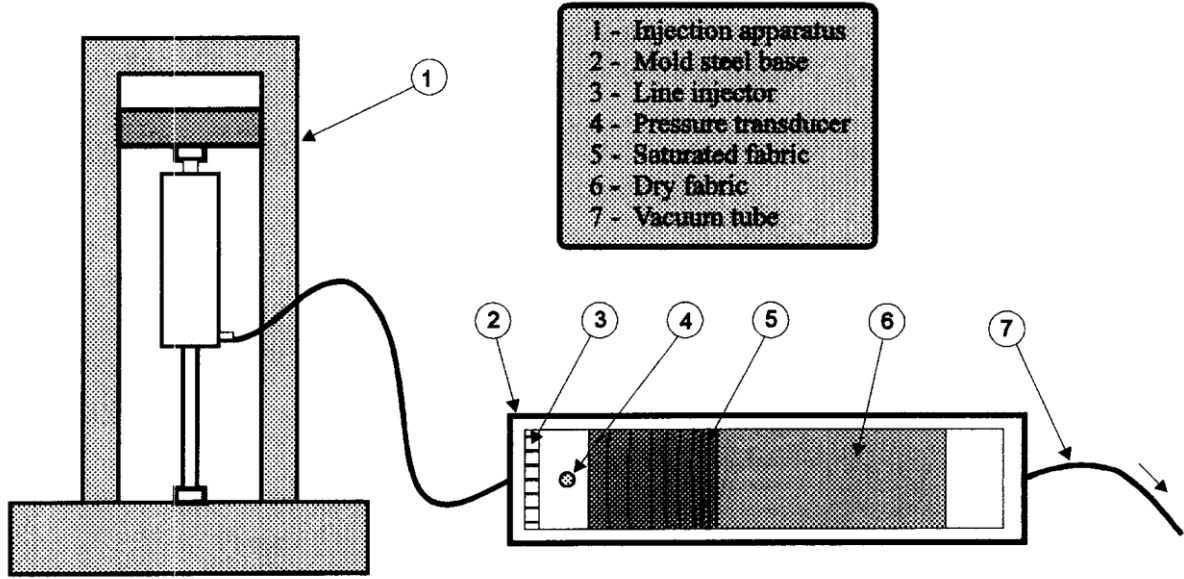


Figure 3-4. Montage expérimental pour mesurer la perméabilité planaire insaturée
(Ferland, Guittard, & Trochu, 1996)

Pendant l'injection dans un moule à section constante, la loi de conservation de la masse stipule que le volume du fluide incompressible qui entre dans un volume de contrôle est égal au volume de fluide sortant (Ferland et al., 1996). Le débit volumique q et la vitesse interne u_f restent donc constants tant que la porosité ϕ et les pressions d'entrée (P_{inj}) et de sortie ($P_{out} = 0$) sont maintenues (équation (3.6)). La loi de conservation de la masse implique aussi que la solution du problème de Darcy donne un champ de pression qui décroît linéairement du port d'entrée de la résine à la position du front $x_f(t)$:

$$\nabla p = \frac{P_{out}(t) - P_{inj}(t)}{x_f(t)} = -\frac{\Delta P}{x_f(t)} \quad (3.10)$$

La perméabilité dans la direction mesurée K_{xx} peut donc être déterminée avec la loi de Darcy, car celle-ci stipule qu'une tendance linéaire peut être ajustée lorsque la position du front d'écoulement au carré est tracée en fonction du temps (Vernet et al., 2014) :

$$K_{xx} = -q \frac{\mu}{\nabla p} = \frac{x_f(t)^2 \mu \phi}{2 \Delta P t} \quad (3.11)$$

Un ajustement aux moindres-carrés peut également être appliqué aux données expérimentales afin d'estimer une valeur de perméabilité qui minimise l'erreur sur l'ensemble de l'écoulement (Ferland et al., 1996). En combinant l'équation (3.10) et la loi de Darcy (3.5) et en intégrant sur la longueur du renfort :

$$\begin{aligned}
 \frac{dx_f}{dt} &= \frac{K}{\varphi\mu} \frac{\Delta P(t)}{x_f} \\
 x_f dx_f &= \frac{K}{\varphi\mu} \Delta P(t) dt \\
 \int_0^L x_f dx_f &= \frac{K}{\varphi\mu} \int_0^t \Delta P(t) dt \\
 x_f^2 &= \frac{2K}{\varphi\mu} \int_0^t \Delta P(t) dt = \frac{2K}{\varphi\mu} I(t) \\
 x_f &= \left[\frac{2K}{\varphi\mu} I(t) \right]^{1/2} = a\sqrt{I(t)}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

L'intégrale approximée de $I(t)$, nommée I_i , est obtenue par la règle d'intégration trapézoïdale :

$$I_i = I_{i-1} + \left(\frac{\Delta P_{i-1} + \Delta P_i}{2} \right) (t_i - t_{i-1}) \tag{3.13}$$

où ΔP_i est la différence de pression à l'instant t_i . La constante a est trouvée par la méthode des moindres carrés :

$$a = \sqrt{\frac{2K}{\varphi\mu}} \approx \frac{\sum x_i \sqrt{I_i}}{\sum I_i} \tag{3.14}$$

La valeur de perméabilité K_{int} ainsi obtenue représente le meilleur ajustement global obtenu à partir de toutes les positions enregistrées pendant l'expérience (Ferland et al., 1996) :

$$K_{int} = \frac{a^2 \varphi \mu}{2} \tag{3.15}$$

Alternativement, le débit volumétrique Q_{inj} peut être maintenu constant, et la perméabilité est alors déterminée à partir de la dérivée de la pression à l'entrée par rapport au temps :

$$K_{xx} = \frac{\mu}{\frac{dP_i}{dt}} \left(\frac{Q_{inj}}{hw} \right)^2 \quad (3.16)$$

où h est la hauteur de la préforme et w est sa largeur.

Deux variantes de cette méthode, dite insaturée, sont documentées dans la littérature. La première, développée par Ferland et al. (1996), consiste à évaluer la perméabilité grâce à la mesure du front d'avancement unidirectionnel du fluide à l'intérieur d'une cavité d'épaisseur constante. La seconde approche consiste à observer l'évolution radiale d'un front d'écoulement à partir d'un point d'injection central (Gauvin, Trochu, Lemenn, & Diallo, 1996).

L'approche radiale présente l'avantage de fournir les deux perméabilités principales K_1 et K_2 à partir d'une seule expérience, alors que l'approche unidirectionnelle nécessite d'effectuer des expériences dans trois directions distinctes afin de retrouver les coordonnées de l'ellipse de perméabilités planaires. Cependant, l'approche unidirectionnelle est plus robuste et mieux reproductible en raison de la simplicité et du coût peu élevé du montage expérimental (Demaría, Ruiz, & Trochu, 2007). C'est donc cette dernière qui a été employée dans le Benchmark II pour déterminer la perméabilité planaire des renforts textiles (Vernet et al., 2014).

3.2.2 Perméabilité planaire saturée

La deuxième méthode de caractérisation de la perméabilité planaire consiste à la mesurer dans une préforme saturée dans laquelle l'écoulement a atteint un régime permanent (Robinson, 2008). La perméabilité K_{xx} est alors donnée dans la direction de la mesure par :

$$K_{xx} = \frac{\mu Q l}{hw \Delta P} \quad (3.17)$$

où l est la longueur de la préforme, h son épaisseur et w sa largeur. Dans ce cas, la perméabilité peut être mesurée soit en appliquant un débit constant et en mesurant la variation de pression sur la longueur de la préforme, soit en appliquant une différence de pression constante et en mesurant le débit volumétrique.

La méthode saturée est parfois préférée pour caractériser un renfort sur une large gamme de taux volumique de fibres, car elle permet de réaliser plusieurs mesures avec le même échantillon, tandis qu'un nouvel échantillon est requis pour chaque mesure avec la méthode insaturée (Robinson,

2008). Toutefois, les valeurs de perméabilité obtenues avec les deux méthodes sont différentes. En effet, le champ de pression associé à un flux saturé est différent de celui d'un flux insaturé en raison des effets de capillarité (Drapier, Monatte, Elbouazzaoui, & Henrat, 2005; Ouagne & Bréard, 2010). L'infusion de résine étant caractérisée par un écoulement insaturé, les expériences de caractérisation de la perméabilité planaire insaturée sont donc privilégiées pour obtenir des mesures représentatives du procédé de fabrication.

3.2.3 Perméabilité transverse

De manière similaire, la perméabilité transverse peut être obtenue en injectant des renforts fibreux saturés ou insaturés à travers leur épaisseur. Toutefois, les mesures de perméabilité saturée sont les plus répandues dans la littérature, car la position du front d'écoulement insaturé est difficile à localiser à travers l'épaisseur relativement faible des renforts fibreux usuels (Drapier et al., 2005; Ouagne & Bréard, 2010). Certains auteurs recourent à l'utilisation de capteurs électriques, thermiques ou optiques pour tenter de localiser le front d'écoulement, mais à l'heure actuelle, il n'existe aucune solution simple, précise et robuste, qui permette de mesurer la perméabilité transverse insaturée des renforts fibreux (Drapier et al., 2005).

3.3 Particularités du procédé d'infusion de résine

3.3.1 Décompaction du renfort

Le procédé de moulage par transfert de résine (RTM) consiste à placer une préforme sur un moule rigide et à la compacter avec une seconde surface rigide pour former un joint étanche. Une résine est ensuite injectée à pression positive, tandis qu'une pression de serrage élevée est utilisée pour maintenir le moule fermé (voir section 2.2.2). Dans le procédé d'infusion de résine (VARI) présenté à la section 2.2.3, la seconde moitié du moule rigide est remplacée par une bâche à vide flexible scellée autour du périmètre de la préforme. Une pompe à vide est alors utilisée pour créer une pression négative dans la cavité et la résine est infusée dans la préforme à la pression atmosphérique.

L'utilisation de la bache à vide introduit des phénomènes particuliers à l'infusion de résine, car elle confère à la préforme la capacité de se compacter ou de se détendre lorsque la pression à l'intérieur de la cavité change. En effet, la préforme est sous pleine pression avant le début de l'infusion, et sa compaction est maximale. Lorsque la ligne d'infusion est ouverte, la résine entrant dans le moule est à la pression atmosphérique. Ceci entraîne un relâchement de la préforme et une augmentation de l'épaisseur au fur et à mesure que le front d'écoulement progresse. Cette décompaction est régie par la loi de Terzaghi (3.4), et sa courbe diffère de la compaction initiale en raison du comportement viscoélastique de la préforme (Figure 3-5). Il y a donc une variation d'épaisseur de la préforme en fonction de la distance au port d'injection, qui engendre un gradient non linéaire de pression de l'entrée au front de résine. Ceci conduit également à une variation du taux volumique de fibres sur la longueur de la pièce, et donc à un changement local de la perméabilité du renfort. Par conséquent, il devient difficile de prédire analytiquement les temps de remplissage et le recours à des outils de simulation devient indispensable pour l'infusion de résine.

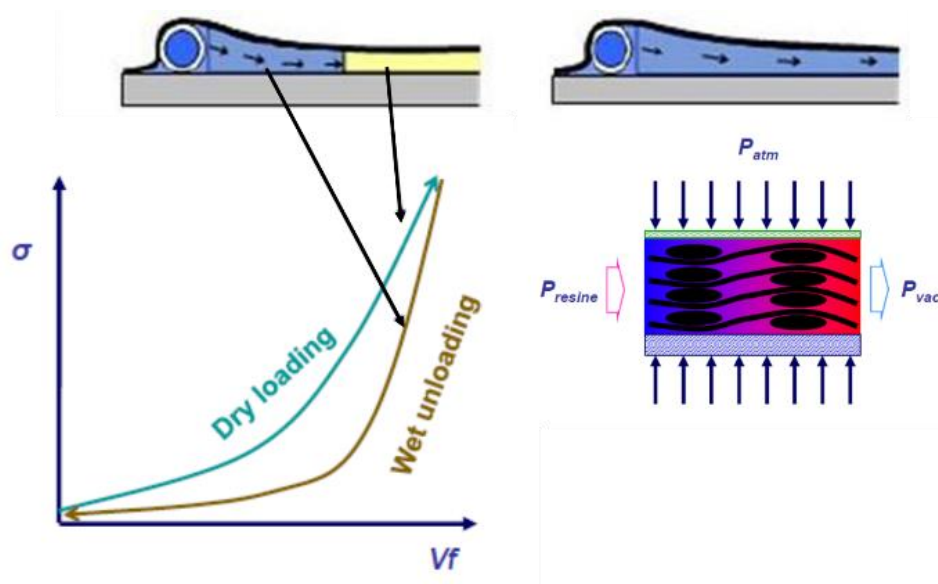


Figure 3-5. Relaxation de la préforme lors d'une infusion (Cours MEC6318, Polytechnique Montréal)

De plus, lorsque l'imprégnation est terminée et que la ligne d'infusion est fermée, l'excès de résine peut s'échapper par la sortie, la préforme se compacte graduellement et un nouvel équilibre de pression et d'épaisseur peut être atteint. L'épaisseur finale de la pièce est donc difficile à prédire.

3.3.2 Influence du milieu de distribution

La seconde caractéristique unique de l'infusion de résine réside dans l'utilisation d'un milieu de distribution de résine très perméable. En effet, pour accélérer le procédé d'infusion, un milieu de distribution de résine hautement perméable est souvent placé en peau de la préforme pour permettre à la résine de s'écouler rapidement à travers la surface du stratifié avant d'imprégner le renfort fibreux à travers son épaisseur (voir section 2.2.4). Une couche de tissu d'arrachement (*peel ply*) est alors utilisée entre le stratifié et le milieu de distribution, pour pouvoir retirer ce dernier après le durcissement de la pièce.

Cette variante de l'infusion de résine a fortement contribué à la popularité du procédé, car elle permet de réduire significativement les temps de remplissage et d'assurer une répartition plus uniforme de la pression. Cependant, les débits sont sensiblement différents dans le milieu de distribution et la préforme étant donné leurs écarts de perméabilité, et l'écoulement dans le sens de l'épaisseur devient significatif. L'écoulement n'est donc plus unidirectionnel, et les temps de remplissage ne peuvent plus être prédits analytiquement par la loi de Darcy. Par conséquent, des simulations numériques sont nécessaires pour optimiser le procédé d'infusion de résine.

Ceci implique une caractérisation complète des matériaux utilisés. En effet, en plus de caractériser la perméabilité planaire du renfort, il faut mesurer la perméabilité transverse du stratifié ainsi que la perméabilité planaire du milieu de distribution (MD). Cette dernière est particulièrement difficile à identifier, car la perméabilité du MD dans un montage de VARI (avec une préforme en dessous et un sac à vide sur le dessus) peut être significativement différente de celle mesurée séparément dans un moule rigide en raison de la dynamique de compression et d'emboîtement du MD, du renfort fibreux et du sac à vide (Gokce et al., 2005). En outre, Sun, Li et Lee (1998) montrent que le choix du MD est critique, car le temps de remplissage dépend significativement de sa perméabilité planaire (Figure 3-6, a), alors qu'il n'est pas très sensible à celle de la préforme (Figure 3-6, b).

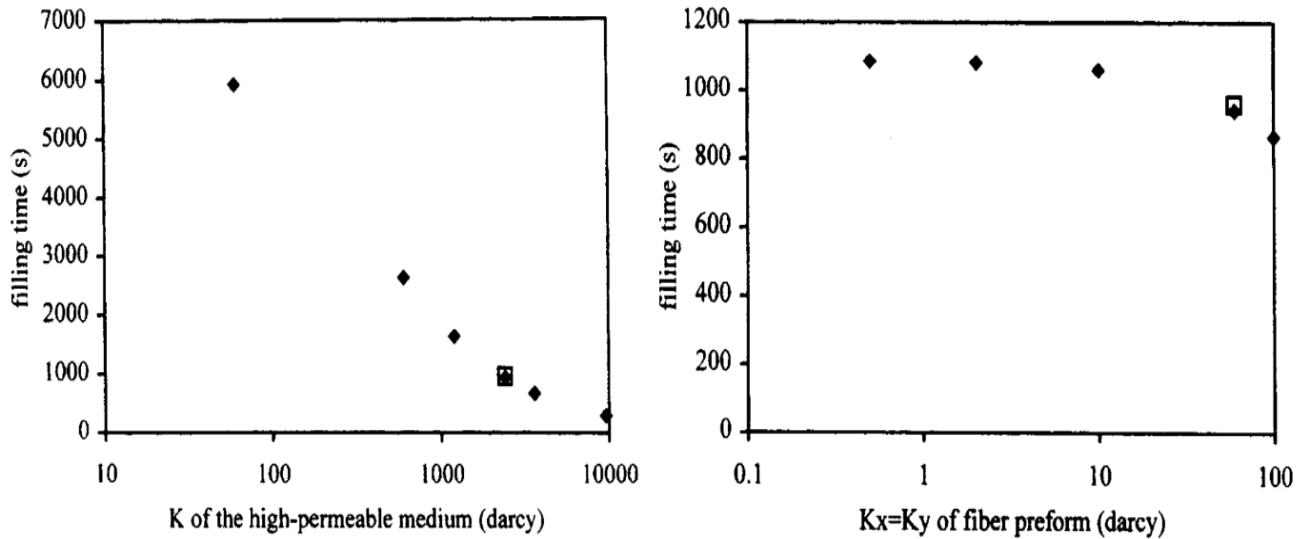


Figure 3-6. Temps de remplissage en fonction de la perméabilité planaire
(a) du milieu de distribution de résine et (b) de la préforme (Sun et al., 1998)

3.4 Méthodes de simulation actuelles

Puisque le VARI est une variante du RTM, la plupart des modèles de simulation de l'infusion sont dérivés de ceux développés pour l'injection en moule rigide. Par conséquent, l'étude des méthodes de simulation numérique du VARI commence par l'étude des modèles développés pour le RTM.

3.4.1 Simulation du RTM

Les modèles de simulation sont généralement fondés sur l'approche unifiée pour modéliser le flux de résine pendant les procédés de fabrication des composites (Davé, 2016). Cette approche s'appuie sur la loi de conservation de la masse et peut être modifiée avec les conditions limites appropriées pour décrire une variété de procédés grâce à l'équation différentielle générale suivante :

$$\frac{\partial(\varphi\psi\rho)}{\partial t} + \mathbf{q} \cdot \nabla(\varphi\psi\rho) + (\varphi\psi\rho)\nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (3.18)$$

où φ est la porosité, ψ est le degré de saturation également connu comme le facteur de remplissage et q est la vitesse superficielle donnée par la loi de Darcy.

Pour le procédé RTM, l'épaisseur du moule est fixée et la porosité reste constante. En considérant que la densité de la résine reste également constante et que la préforme derrière le front d'écoulement est complètement saturée, la loi de conservation de la masse se réduit à (Robinson, 2008) :

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (3.19)$$

Il est important de noter que même si l'hypothèse de saturation complète n'est pas toujours valide pour certaines architectures de renforts, l'équation (3.19) permet d'obtenir une approximation satisfaisante du procédé RTM pour la majorité des matériaux utilisés.

Pour résoudre l'équation différentielle gouvernante, diverses techniques numériques ont été développées dans la littérature, comme les méthodes de différences finies, d'éléments finis frontière et d'éléments finis. Bien que l'approche des éléments finis/volumes de contrôle soit la plus répandue dans la littérature, la méthode des éléments finis non-conformes est privilégiée, parce qu'elle satisfait localement la condition physique importante de la conservation de la résine à travers les frontières inter-éléments (Trochu, Gauvin, & Gao, 1993). Cette méthode a conduit au développement du module LCMFlot commercialisé par le groupe ESI sous le nom de PAM-RTM. Ce logiciel de simulation sera utilisé dans la suite des travaux.

Typiquement, dans le procédé RTM, l'épaisseur de la préforme est très petite par rapport aux dimensions dans le plan et l'écoulement à travers l'épaisseur peut être négligé. La loi de Darcy en deux dimensions peut donc être utilisée pour effectuer des simulations 2D de coque. Toutefois, les préformes sont généralement des stratifiés composés de plusieurs couches ayant des valeurs et des directions de perméabilité principales différentes. Pour l'analyse bidimensionnelle, il faut donc utiliser une perméabilité moyenne équivalente K_{tot} pour modéliser ces stratifiés :

$$K_{tot} = \frac{K_1 h_1 + \dots + K_n h_n}{h_{tot}} \quad (3.20)$$

où K_i est la perméabilité de la couche i , h_i son épaisseur et h_{tot} l'épaisseur totale du stratifié.

3.4.2 Simulation du VARI

Le VARI diffère du RTM sur plusieurs aspects qui doivent être pris en compte dans les simulations. Contrairement au RTM, l'épaisseur de la cavité du moule dans le procédé VARI n'est pas fixe et l'épaisseur de la préforme varie en fonction de la pression et de la progression du front d'écoulement. De plus, l'écoulement transverse est significatif et les simulations 2D développées pour le RTM ne permettent pas de reproduire fidèlement la forme du front d'écoulement. Les sections ci-dessous présentent les solutions suggérées dans la littérature pour adapter les outils de simulation au procédé d'infusion de résine.

3.4.2.1 Simulation de la décompaction du renfort

Pour tenir compte de la décompaction du renfort, Joubaud, Achim et Trochu (2005) suggèrent des équations générales pour décrire le couplage entre l'écoulement de résine et la déformation de la bâche à vide. Ils intègrent ensuite ces équations à l'algorithme de simulation de la Figure 3-7 et démontrent la validité du modèle en comparant les résultats de simulation avec des résultats expérimentaux.

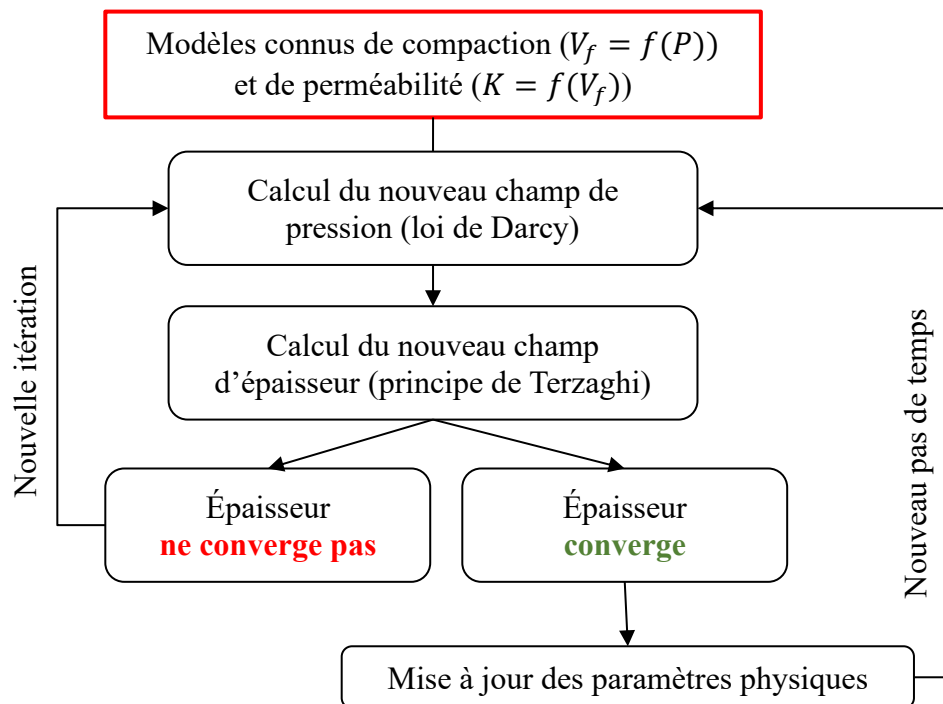


Figure 3-7. Algorithme de simulation du VARI (Joubaud, Trochu, & Corvec, 2002)

Hammami et Gebart (2000) combinent ces équations générales avec la loi de Darcy et les équations de continuité appliquées à la matrice et au renfort pour obtenir l'équation ci-dessous :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{hK}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = -\frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.21)$$

où l'épaisseur de la cavité du moule h dépend de la pression.

L'utilisation de cette équation nécessite de fournir des modèles de compaction et de perméabilité complets et exacts, car les changements de taux volumique de fibres lors de l'infusion modifient aussi la perméabilité et le gradient de pression (Croteau-Labouly, 2008). Par conséquent, plusieurs auteurs ont développé des procédures de caractérisation et de simulation qui tiennent compte des particularités de l'infusion de résine. Hammami (2001), Yenilmez et al. (2009) et Yenilmez et Sozer (2009) ont notamment suggéré des procédures de caractérisation de la compressibilité des renforts fibreux dans des conditions plus représentatives du procédé d'infusion de résine. Ils ont effectué des essais de compression sur des renforts secs ou saturés, qu'ils ont assemblés sous la forme de stratifiés similaires à ceux utilisés pour le VARI. Ils ont également imposé des séquences de compaction représentatives de l'infusion : chargement à sec, relaxation des contraintes, imprégnation du renfort, déchargement saturé et relaxation du tissu (Hammami, 2001; Yenilmez et al., 2009; Yenilmez & Sozer, 2009). Ceci leur a permis d'obtenir des modèles de compaction plus représentatifs du VARI.

Croteau-Labouly (2008) a développé un banc expérimental pour caractériser simultanément la compaction et la perméabilité d'un mat en acrylique. Ce montage consiste en un moule d'infusion instrumenté avec des capteurs de pression et de déplacement de type LVDT, qui permettent de suivre l'évolution de ces paramètres avant, pendant et après le remplissage du moule (Figure 3-8). Ainsi, en effectuant des cycles de compaction sur le renfort avant le début du remplissage, le modèle de compaction à sec est obtenu. Pendant le remplissage, les données de variation de pression et d'épaisseur permettent d'établir un modèle d'expansion saturée du renfort. Finalement, l'infusion se poursuit jusqu'à atteindre le régime permanent dans le but d'obtenir un modèle de la perméabilité planaire saturée du renfort en fonction de sa porosité. Cette procédure de caractérisation s'est avérée très efficace pour un mat d'acrylique, car sa densité surfacique est relativement constante. Toutefois, la procédure n'a pas encore été appliquée à des renforts cousus ou tissés qui présentent beaucoup plus de variabilité.

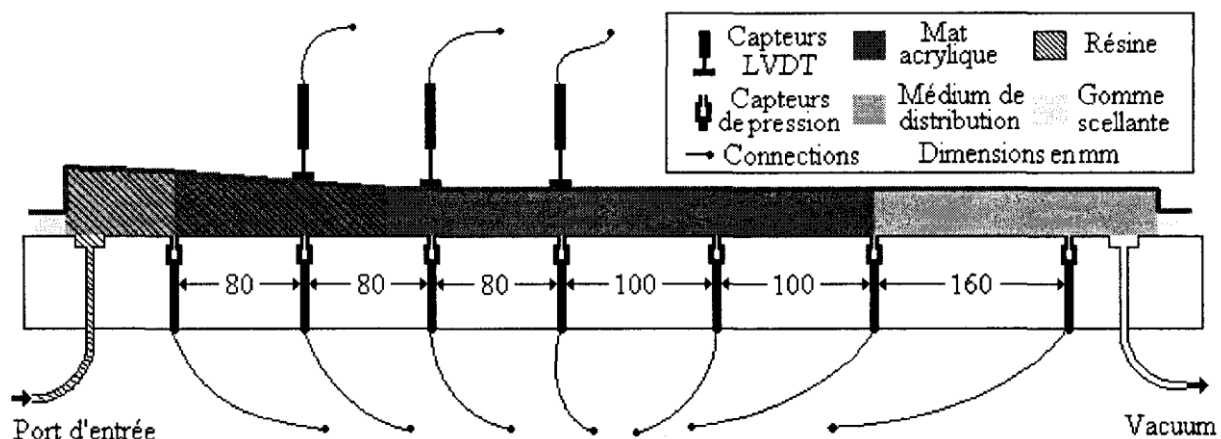


Figure 3-8. Diagramme du banc d'essai expérimental d'infusion (Croteau-Labouly, 2008)

D'autre part, même si des modèles de compaction et de perméabilité appropriés sont obtenus, les simulations numériques tenant compte des effets de décompaction sont longues et coûteuses pour des pièces de grande dimension. Ceci s'explique par le fait que les phénomènes mécaniques et rhéologiques sont couplés. Il faut donc les simuler en faisant avancer le front d'écoulement à chaque pas de temps, et en mettant à jour les valeurs d'épaisseur et de perméabilité de manière itérative, jusqu'à atteindre la convergence.

Pour surmonter ces limitations, plusieurs auteurs ont suggéré d'imprégner le renfort sous une bâche à vide dans des conditions similaires au processus de fabrication par infusion de résine afin de mesurer une perméabilité sous vide, communément appelée « perméabilité flexible », qui suppose une épaisseur constante, mais qui tient implicitement compte de la décompaction de la préforme pendant l'infiltration (Hammami & Gebart, 2000; Joubaud et al., 2002; Sun et al., 1998; Williams et al., 1998). Ceci a permis d'employer les approches numériques développées pour le RTM pour prédire des temps de remplissage en VARI sans simuler le complexe couplage hydromécanique. Joubaud et al. (2002) ont notamment démontré qu'il est possible d'utiliser cette perméabilité flexible dans un logiciel de simulation du procédé RTM pour simuler avec une précision satisfaisante l'infusion directe d'un toit d'ambulance. Cependant, ils n'ont pas validé cette approche dans le cas de préformes multicouches, ni pour des infusions indirectes où un milieu de distribution de haute perméabilité est utilisé.

3.4.2.2 Caractérisation du milieu de distribution

Sun et al. (1998) ont employé une approche similaire pour mesurer la perméabilité flexible d'un milieu de distribution en infusion directe, dans des conditions expérimentales qui se rapprochent le plus possible de la fabrication par infusion indirecte. À cette fin, une séquence d'empilement typique de l'infusion indirecte a été utilisée (Figure 3-9). Toutefois, pour empêcher les échanges de liquide entre le milieu drainant et le renfort fibreux, les deux matériaux ont été séparés par un film plastique imperméable. Les auteurs ont ensuite mesuré la perméabilité planaire du milieu drainant en moule rigide, et ont confirmé que la perméabilité caractérisée en infusion directe est environ 2 fois plus faible celle mesurée en moule rigide en raison des conditions d'emboîtement particulières entre le milieu de distribution, le *peel ply* et le renfort.

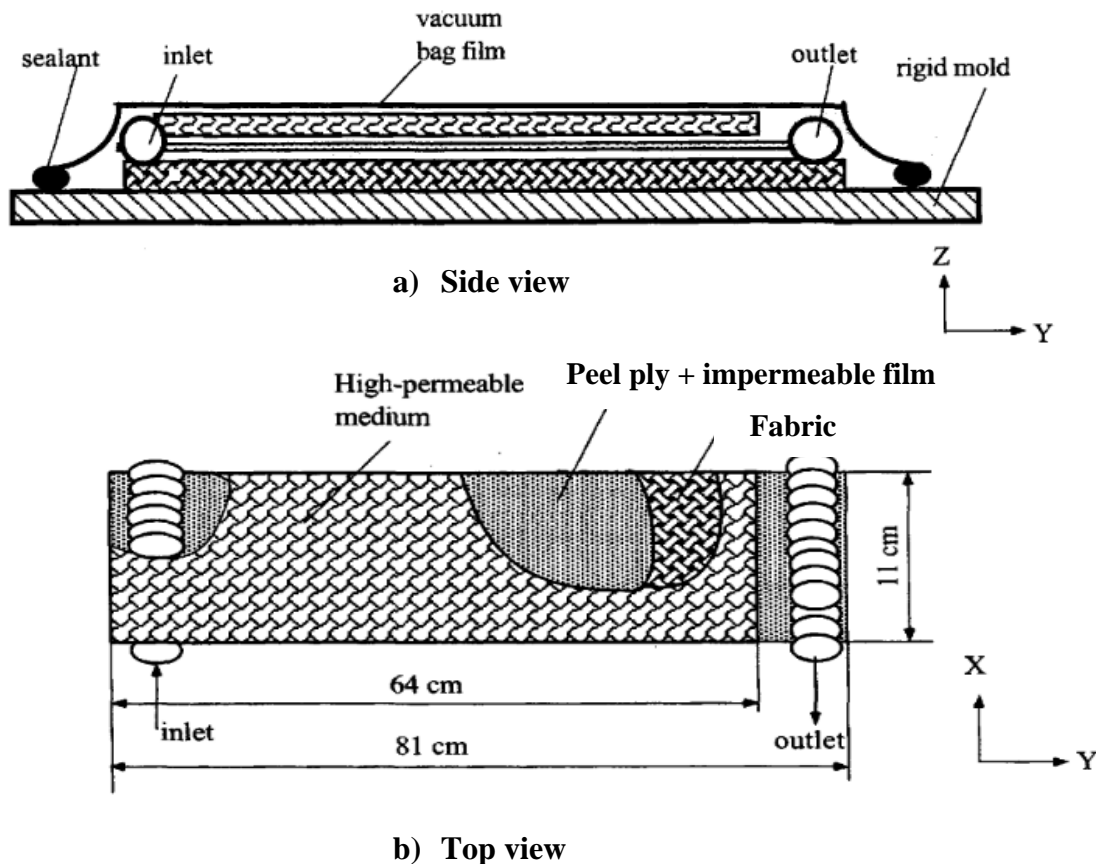


Figure 3-9. Séquence d'empilement pour les mesures de la perméabilité planaire flexible du milieu de distribution (Sun et al., 1998)

Par la suite, Sun et al. (1998) ont mesuré les perméabilités planaire et transverse du renfort fibreux en moule rigide. Une infusion indirecte (sans film plastique imperméable) a ensuite été effectuée, puis comparée à une simulation numérique prenant en entrée les perméabilités planaires précédemment obtenues pour le milieu drainant et le renfort, ainsi que la perméabilité transverse de ce dernier. Une estimation de la valeur de perméabilité transverse du *peel ply* a aussi été donnée en entrée par l'utilisateur, puis elle a été ajustée par une démarche itérative d'identification, jusqu'à ce que les temps de remplissage prédits correspondent aux fronts expérimentaux observés.

Sun et al. (1998) ont ainsi identifié la perméabilité transverse apparente de la préforme en infusion indirecte. Cette perméabilité est dite apparente parce qu'elle est différente de celle qui pourrait être mesurée en moule rigide, à cause notamment des conditions de contact particulières avec le renfort et la bâche à vide, de la présence d'écoulements planaires et de la décompaction du milieu drainant et du renfort pendant l'infusion. Les auteurs ont également conclu que la distance entre le front d'écoulement dans le milieu drainant et le renfort (communément appelée *lead lag*) reste presque constante pendant tout le remplissage, et que cet écart semble proportionnel à la valeur de la perméabilité transverse du *peel ply* (Figure 3-10, a). Cette dernière n'a néanmoins pas une influence significative sur le temps total de remplissage de la préforme à partir de 0,03 Darcy, soit environ $3\text{E-}14\text{ m}^2$, c'est-à-dire pour une valeur 100 plus faible que la perméabilité transverse habituelle des renforts fibreux (Figure 3-10, b). Dans ces conditions, il est même un peu surprenant de parler de perméabilité transverse du *peel ply*, étant donné la très faible valeur à partir de laquelle celle-ci exerce une influence sur le remplissage de la préforme.

Sun et al. (1998) ont démontré que la perméabilité planaire du milieu de distribution pouvait être fidèlement caractérisée dans des conditions représentatives de la fabrication par infusion de résine, et que la perméabilité transverse apparente des matériaux utilisés pouvait être identifiée par simulation numérique pour obtenir des prédictions robustes des temps de remplissage du milieu drainant et des renforts fibreux. Cependant, leur approche de caractérisation reste un peu complexe, car elle requiert des mesures de perméabilité planaire et transverse en moule rigide, des mesures de perméabilité planaire flexible en infusion directe, ainsi qu'une identification de la perméabilité transverse apparente par simulation de l'infusion indirecte. En outre, les mesures de perméabilité en moule rigide ne sont pas réellement représentatives des phénomènes d'infusion sous membrane flexible en raison de la décompaction du renfort pendant le remplissage du renfort et donc du changement d'épaisseur de la préforme.

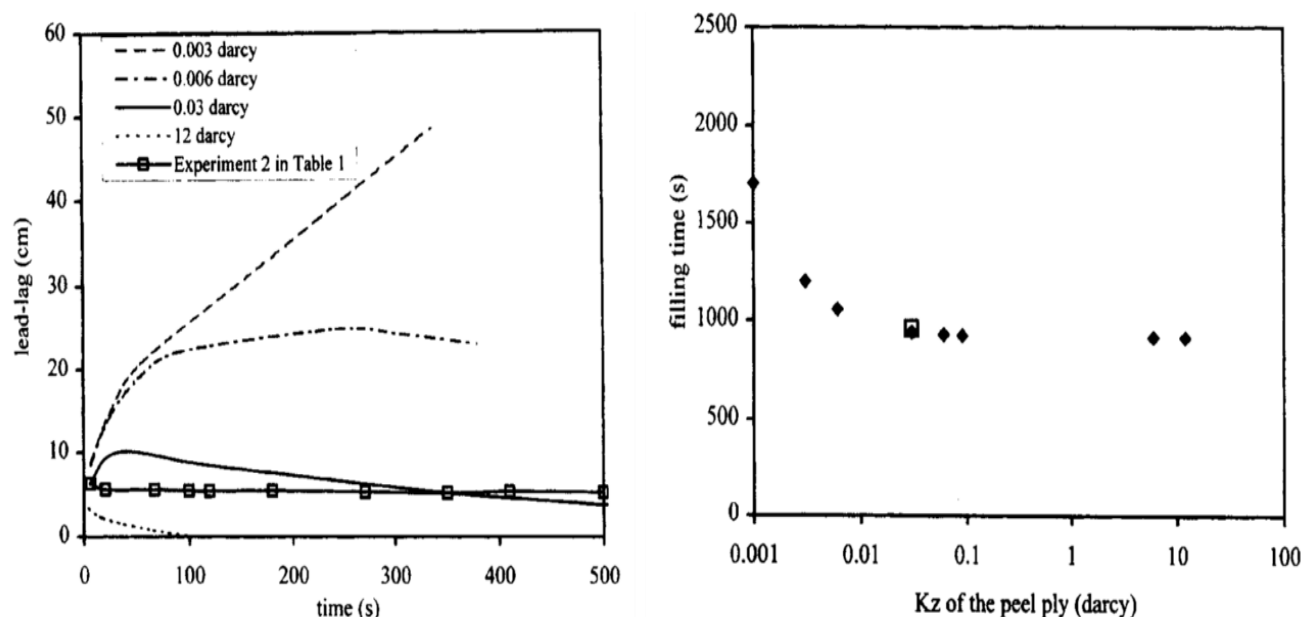


Figure 3-10. (a) *Lead-lag* et (b) temps de remplissage en fonction de la perméabilité transverse du milieu drainant (Sun et al., 1998)

Gokce et al. (2005) ont suggéré une démarche similaire, mais simplifiée, qui consiste à mesurer la perméabilité planaire flexible d'un renfort fibreux indépendamment, puis à effectuer des infusions indirectes du renfort avec un milieu de distribution. Des simulations reproduisant les infusions indirectes et prenant en entrée la perméabilité planaire du renfort sont ensuite réalisées. Les prédictions numériques sont alors intégrées dans un algorithme Matlab qui permet d'identifier simultanément les valeurs de perméabilité planaire du milieu de distribution et de perméabilité transverse de la préforme (Figure 3-11).

Les auteurs ont démontré que cet algorithme d'identification peut estimer les valeurs de perméabilité avec précision pour une large plage de paramètres, et qu'il permet de réduire significativement le nombre d'expériences de caractérisation nécessaires. Toutefois, l'utilité de cette approche a principalement été démontrée dans le domaine virtuel, car pour valider l'algorithme, la configuration expérimentale d'infusion indirecte a été modélisée dans l'environnement de simulation par éléments finis LIMS.

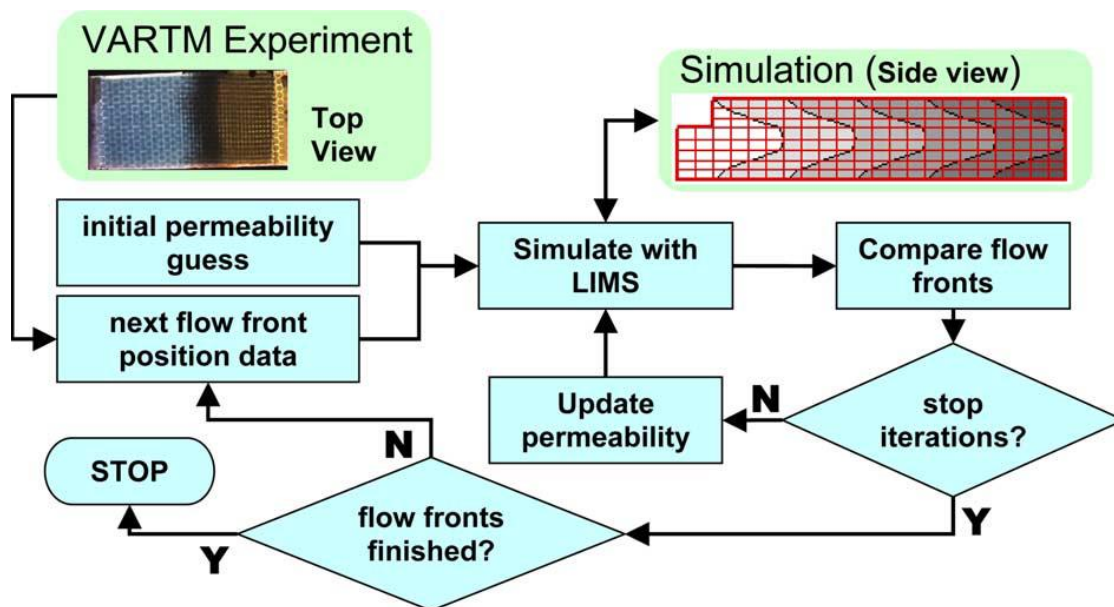


Figure 3-11. Algorithme d'identification simultanée de la perméabilité planaire du milieu drainant, et de la perméabilité transverse du renfort (Gokce et al., 2005)

De plus, dans cette étude, un seul jeu de données acquis vers la fin de la simulation de remplissage a été fourni en entrée à l'algorithme d'identification. Les perméabilités identifiées ne garantissent donc pas que les positions du front d'écoulement sont fidèlement prédites au début des infusions, lorsque les effets de décompaction exercent le plus d'influence. Par ailleurs, lorsque des expériences réelles d'infusion indirecte sont réalisées, des erreurs sur la pression au port d'injection, sur la position observée du front d'écoulement, ou encore sur les mesures de l'épaisseur de la préforme peuvent être commises. Ces erreurs pourraient fausser significativement les estimations de l'algorithme en raison du couplage entre les perméabilités planaire du milieu drainant et transverse du renfort.

3.5 Analyse critique

Pour conclure, la simulation des procédés d'infusion de résine demeure complexe en raison du couplage hydromécanique et de l'utilisation du milieu de distribution en peau de la préforme. En effet, si l'on désire prendre en considération ces particularités du VARI et prédire les variations d'épaisseur et de perméabilité pendant l'infiltration, une caractérisation complète des matériaux utilisés est requise, suivie de simulations numériques tridimensionnelles itératives.

L'approche de caractérisation de la perméabilité planaire en moule rigide présentée à la section 3.2 ne permet pas de reproduire fidèlement les particularités du VARI, telles que l'influence de l'emboîtement des couches successives de renfort et les conditions particulières de contact avec la bâche à vide, qui sont fondamentalement différentes du contact avec un moule rigide. Ces lacunes sont encore plus évidentes lorsqu'il s'agit de caractériser des milieux de distribution de haute perméabilité.

Quant à l'approche de caractérisation simultanée de la compaction et de la perméabilité suggérée par Croteau-Labouly (2008), elle serait difficile à implémenter pour des renforts cousus ou tissés qui présentent généralement une certaine variabilité en termes de structure poreuse et de densité surfacique. En outre, la caractérisation de la perméabilité dans un écoulement saturé reste significativement différente des conditions réelles d'écoulement insaturé rencontrées lors de l'infusion indirecte de résine.

Enfin, les simulations transitoires 3D nécessaires pour prédire les temps de remplissage et les variations d'épaisseur dans des pièces de grande taille seraient très coûteuses à effectuer en termes de temps de calcul et de ressources informatiques. Ces simulations ne peuvent donc pas être pratiquement employées pour optimiser les procédés d'infusion de résine dans un contexte industriel.

L'approche alternative suggérée par Sun et al. (1998) a permis de caractériser fidèlement la perméabilité planaire flexible du milieu de distribution, dans des conditions qui tiennent implicitement compte de la décompaction lors de l'écoulement et des effets d'emboîtement entre le milieu de distribution, le tissu d'arrachement et le renfort fibreux. Les auteurs ont adopté une approche différente pour caractériser les perméabilités planaire et transverse du renfort en réalisant des expériences indépendantes en moule rigide. Cette démarche reste complexe et les modèles de perméabilité obtenus pour les renforts fibreux ne tiennent pas réellement compte des phénomènes particuliers à l'infusion de résine comme les variations d'épaisseur du renfort pendant l'infusion.

Finalement, l'algorithme d'identification proposé par Gokce et al. (2005) permet d'identifier simultanément la perméabilité planaire du milieu de distribution et la perméabilité transverse de la préforme. Cet algorithme prend en entrée la perméabilité planaire flexible d'un renfort fibreux mesurée par des expériences d'infusion directe, et un jeu de données acquis vers la fin du remplissage pendant des infusions indirectes du renfort avec milieu de distribution. L'identification

des deux perméabilités planaire et transverse étant couplée, des erreurs expérimentales pourraient fausser significativement les estimations. De plus, les perméabilités identifiées ne garantissent pas que les positions du front d'écoulement soient fidèlement prédites au début de l'infusion, lorsque les effets de décompaction exercent le plus d'influence.

En conclusion, il n'existe pas à l'heure actuelle d'approche expérimentale simple et robuste pour caractériser les perméabilités planaire et transverse des milieux de distribution et des renforts fibreux dans des conditions expérimentales représentatives des particularités du VARI. L'objectif reste toujours de pouvoir prédire par des simulations 2D tous les temps de remplissage en infusion indirecte. Les méthodes suggérées par Sun et al. (1998) et Gokce et al. (2005) seront donc combinées dans ce mémoire afin de proposer une nouvelle méthodologie de caractérisation et de simulation fournissant rapidement des prédictions réalistes du temps de remplissage en fonction de l'épaisseur des pièces à fabriquer.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale proposée qui combine les approches suggérées par Sun et al. (1998) et Gokce et al. (2005) afin de caractériser la perméabilité planaire flexible des milieux de distribution et des renforts fibreux dans le but de prédire les temps de remplissage en infusion indirecte. On décrit d'abord les matériaux sélectionnés, puis les expériences de compressibilité effectuées sur une machine de traction universelle pour étudier le comportement viscoélastique des renforts et identifier un modèle de compressibilité empirique. On détaille ensuite les expériences d'infusion directe réalisées pour caractériser simultanément la perméabilité planaire flexible des renforts fibreux et du milieu drainant dans des conditions représentatives de la fabrication réelle par infusion de résine, ainsi que les expériences d'infusion indirecte menées pour identifier la perméabilité transverse apparente des renforts. Finalement, l'utilisation du logiciel de simulation par éléments finis utilisé est décrite et la procédure suivie est présentée pour réaliser des simulations numériques 2D selon un plan de coupe transversal des échantillons. Cette approche relativement simple présente l'avantage de ne pas nécessiter d'équipement de mesure particulier, de tenir compte des effets d'emboîtement et de décompaction durant l'infusion et de permettre l'utilisation des simulations 2D développées pour le procédé RTM.

4.1 Sélection des renforts

Le projet vise à développer une procédure simple et robuste pour caractériser les matériaux utilisés lors de la fabrication des pales d'éolienne. Deux renforts fibreux en verre similaires à ceux employés dans le domaine éolien sont donc étudiés. Le premier matériau est le renfort bidirectionnel non tissé TG-09-N de Texonic (Figure 4-1) dont la fiche technique se trouve à l'annexe A. Sa densité surfacique est de 320 g/m^2 , et son rapport volumique chaîne-trame de 51%-49% lui confère des propriétés équilibrées dans le plan. Ce renfort est donc similaire à ceux employés dans la fabrication des panneaux de cisaillement et des peaux des pales d'éolienne.

Le second matériau est le renfort unidirectionnel TG-27-U de Texonic (Figure 4-2), choisi en raison de sa masse surfacique élevée de 890 g/m^2 , qui permet d'atteindre des taux volumiques de fibres similaires à ceux nécessaires pour fabriquer des longerons suffisamment rigides. Son rapport en volume de fibres chaîne-trame est de 99%-1%. Cette caractéristique représente un aspect crucial pour atteindre la rigidité en flexion recherchée dans cette application.

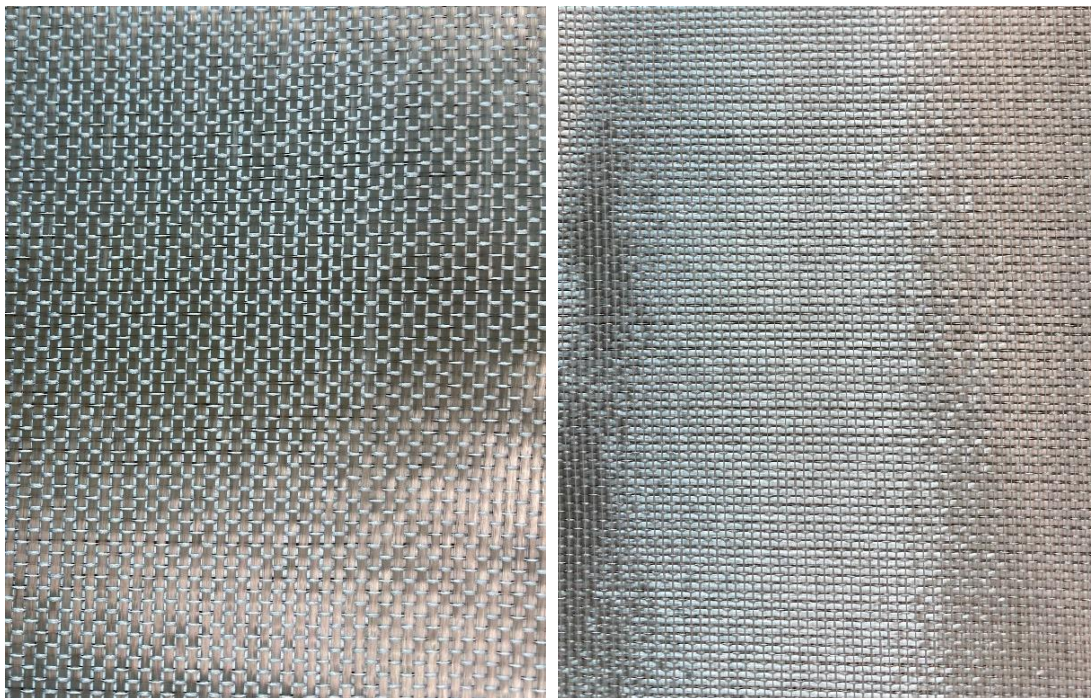


Figure 4-1. Photographies du renfort bidirectionnel non tissé TG-09-N :
avant (gauche), arrière (droite)

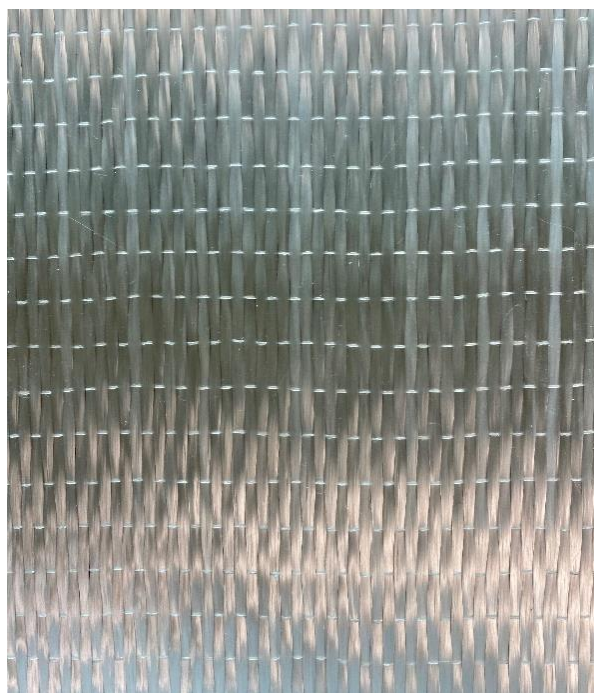


Figure 4-2. Photographie du renfort unidirectionnel TG-27-U

Finalement, le milieu de distribution en polypropylène Greenflow 75 et le tissu d'arrachement Release-Ply-B de la compagnie Airtech sont caractérisés conjointement pour étudier l'influence de leur utilisation en peau de la préforme pendant l'infusion (Figure 4-3). Leurs fiches techniques sont aussi données dans l'annexe A.

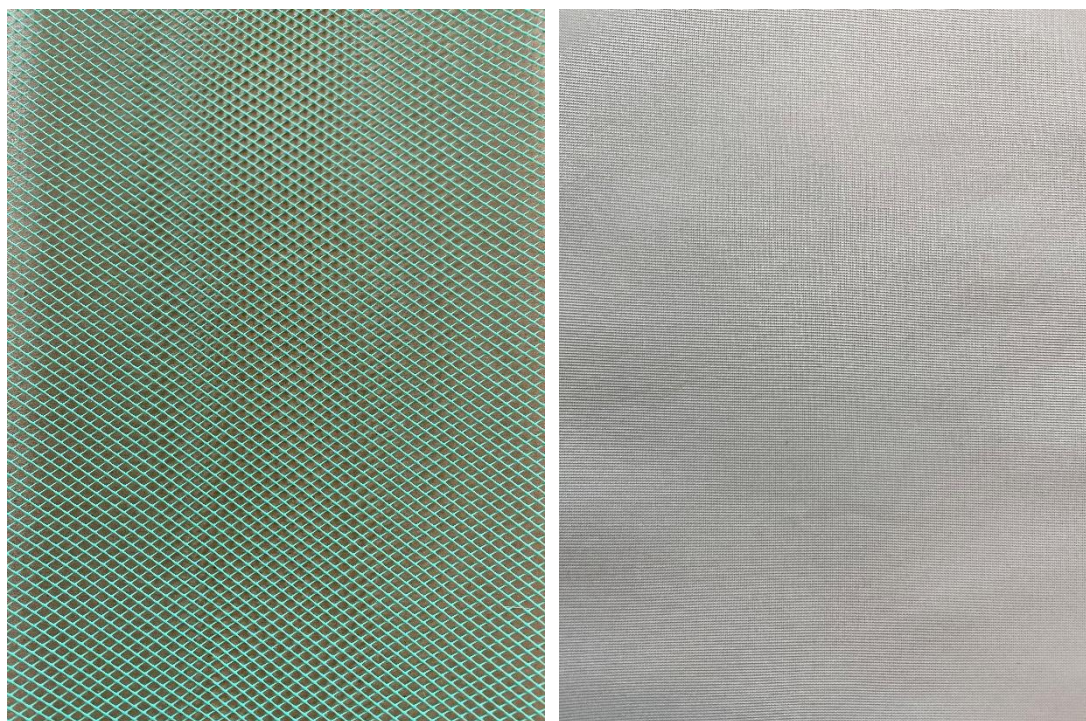


Figure 4-3. Photographies du milieu de distribution (gauche) et du tissu d'arrachement (droite)

4.2 Sélection du fluide

Les résines thermodurcissables généralement utilisées dans la fabrication de composites présentent un comportement newtonien avant gélification (Vernet et al., 2014). Cependant, leur viscosité peut varier pendant l'infusion en raison de l'évaporation du solvant ou de la réaction de durcissement. Afin de limiter le nombre de paramètres variables durant l'étude expérimentale, Vernet et al. (2014) recommandent donc de réaliser les mesures de perméabilité avec un fluide dont la viscosité est quasi-constante pendant les expériences. L'huile de silicone Xiameter™ PMX-200 100 cSt est choisie au lieu des résines thermodurcissables, de l'eau, ou de l'huile végétale, car selon la fiche technique du fabricant Dow Corning (annexe A), il s'agit d'un fluide newtonien dont la viscosité est égale à 100 mPa.s et reste constante à température ambiante.

Pour vérifier cela, la viscosité de l'huile de silicone a été mesurée au rhéomètre entre 15 °C et 40 °C avec une rampe de chauffage de 1 °C/min. La Figure 4-4 montre que la viscosité réelle est plutôt de 102,70 mPa.s à 20 °C et qu'elle chute à 92,51 mPa.s lorsque la température passe à 25 °C. De plus, une équation polynomiale de degré 4 peut être trouvée pour modéliser la viscosité en fonction de la température avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,9999$. Il est donc nécessaire de noter la température avant chaque essai afin de faire une correction appropriée.

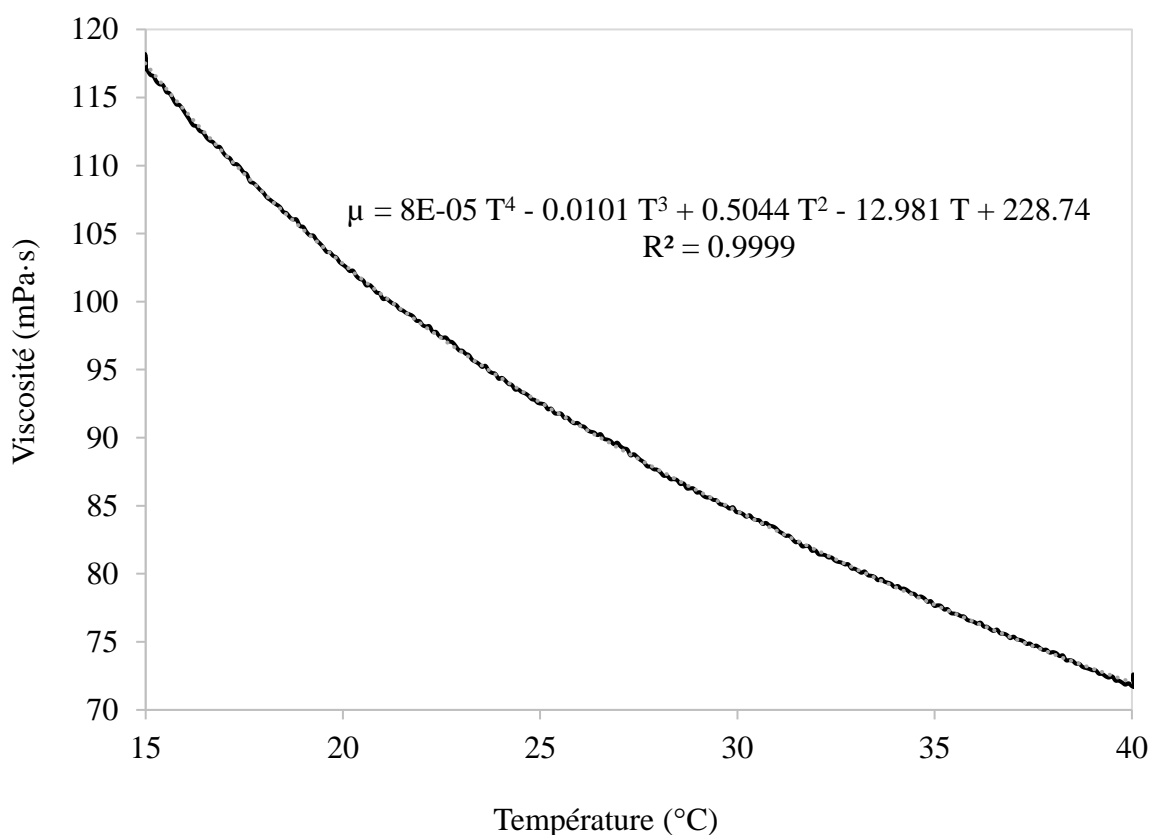


Figure 4-4. Viscosité de l'huile de silicone en fonction de la température

D'autre part, l'huile de silicone fournie par le fabricant est transparente. Quelques gouttes de colorant soluble par litre d'huile ont donc été ajoutées pour faciliter la localisation du front d'imprégnation lors des expériences d'infusion. Comme précédemment démontré par Croteau-Labouly (2008), la pigmentation n'affecte pas la viscosité en raison de la très faible concentration du colorant. La courbe précédente peut donc être utilisée pour déterminer avec une précision satisfaisante la viscosité du liquide pendant l'essai.

4.3 Compressibilité

Les essais de compressibilité ont pour objet d'étudier le comportement viscoélastique des renforts fibreux choisis et de modéliser leur taux volumique de fibres en fonction de la pression de vide appliquée. À cette fin, des échantillons carrés de $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ sont soumis à des essais de compaction cyclique dans une machine de test universelle Instron 4505 dotée d'une cellule de charge de 100 kN. Cette machine est équipée de plateaux de compaction imbriqués permettant de caractériser des renforts secs ou imprégnés d'huile de silicone (Figure 4-5). Le déplacement de la machine est contrôlé avec le logiciel Test Loop (numéro de version 4.0 0.11) de Lab Integration.

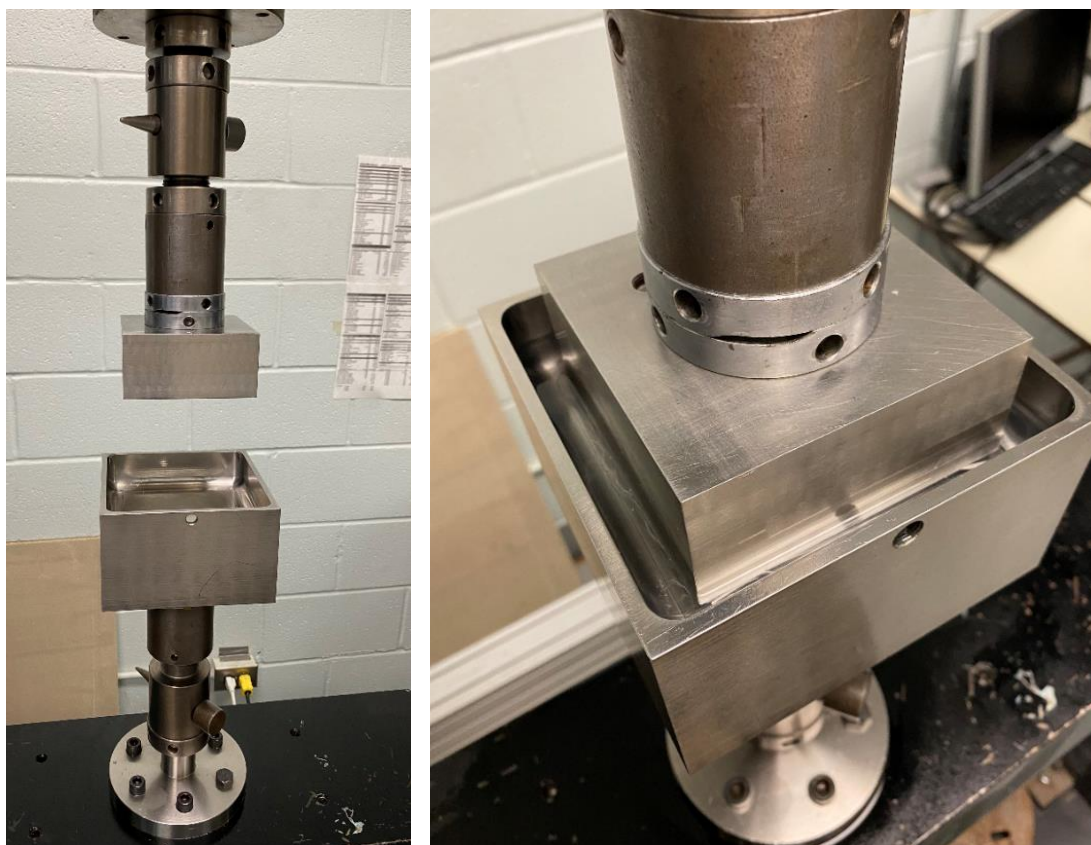


Figure 4-5. Photographie de la machine de test universelle et des plateaux de compaction

Les essais de compressibilité débutent par des essais de conformité durant lesquels le montage est soumis à une force de compaction de 5000 N sans qu'il n'y ait d'échantillon entre les plateaux de compaction. Si la courbe position-force obtenue est linéaire, le parallélisme du montage est validé et sa rigidité peut être obtenue par régression linéaire tel que montré dans la Figure 4-6.

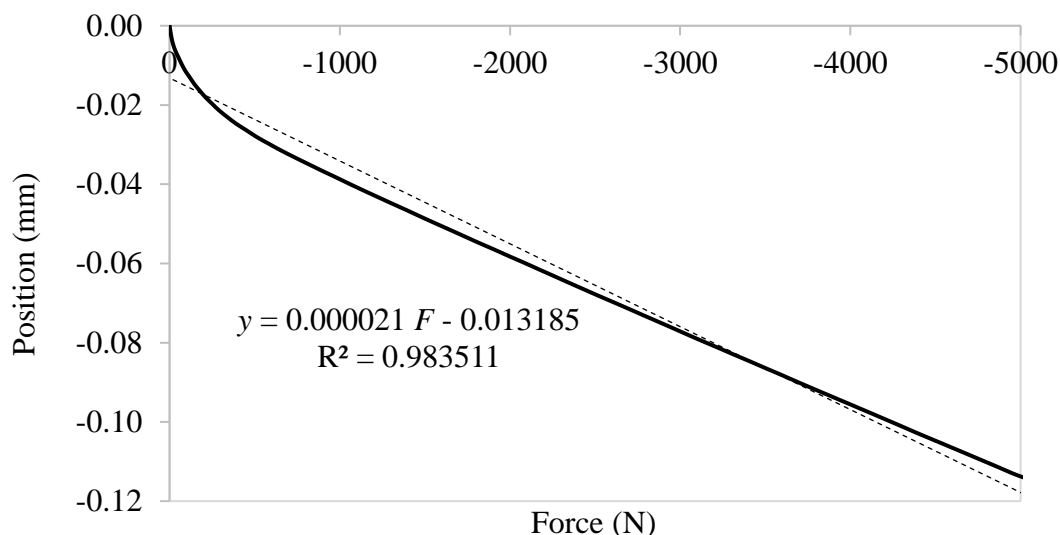


Figure 4-6. Exemple de résultat de conformité

Une fois la conformité vérifiée, un échantillon de 5 ou 10 plis superposés de renfort est placé entre les plateaux de compaction. Tel qu'illustré dans la Figure 4-7, l'échantillon est d'abord comprimé à une vitesse de 1 mm/min jusqu'à une force maximale de 1000 N, qui correspond pour un échantillon de cette taille à la contrainte exercée par la pression atmosphérique. La force est ensuite maintenue pendant 2 minutes pour étudier la relaxation du renfort, puis elle est graduellement relâchée à la même vitesse pour évaluer les effets d'hystérésis. Ce programme correspond à un cycle de compaction-décompaction, qui sera répété à trois reprises pour évaluer les effets de réorganisation des fibres. Après les trois cycles de compaction à sec, le comportement en compaction du renfort tend à se stabiliser. Il est alors entièrement saturé d'huile de silicone et soumis à trois cycles supplémentaires de compaction-décompaction pour évaluer l'effet de la lubrification. La compressibilité d'un pli du milieu drainant est aussi étudiée selon une approche similaire. Toutefois, seuls les trois premiers cycles de compaction à sec sont effectués, car l'effet de la saturation est négligeable pour ce matériau.

Les mesures de la force et de la position en fonction du temps permettent ensuite de tracer les 6 courbes de la contrainte appliquée en fonction du taux volumique de fibres. Ces courbes doivent toutefois être corrigées pour tenir compte de la déformation du montage expérimental mesurée lors de l'essai de conformité. La Figure 4-8 montre en guise d'exemple les troisièmes courbes de compression brute et corrigée obtenues pour un échantillon de 10 plis de renfort bidirectionnel. Le modèle de compaction calculé à partir de la courbe de compaction corrigée y est aussi illustré.

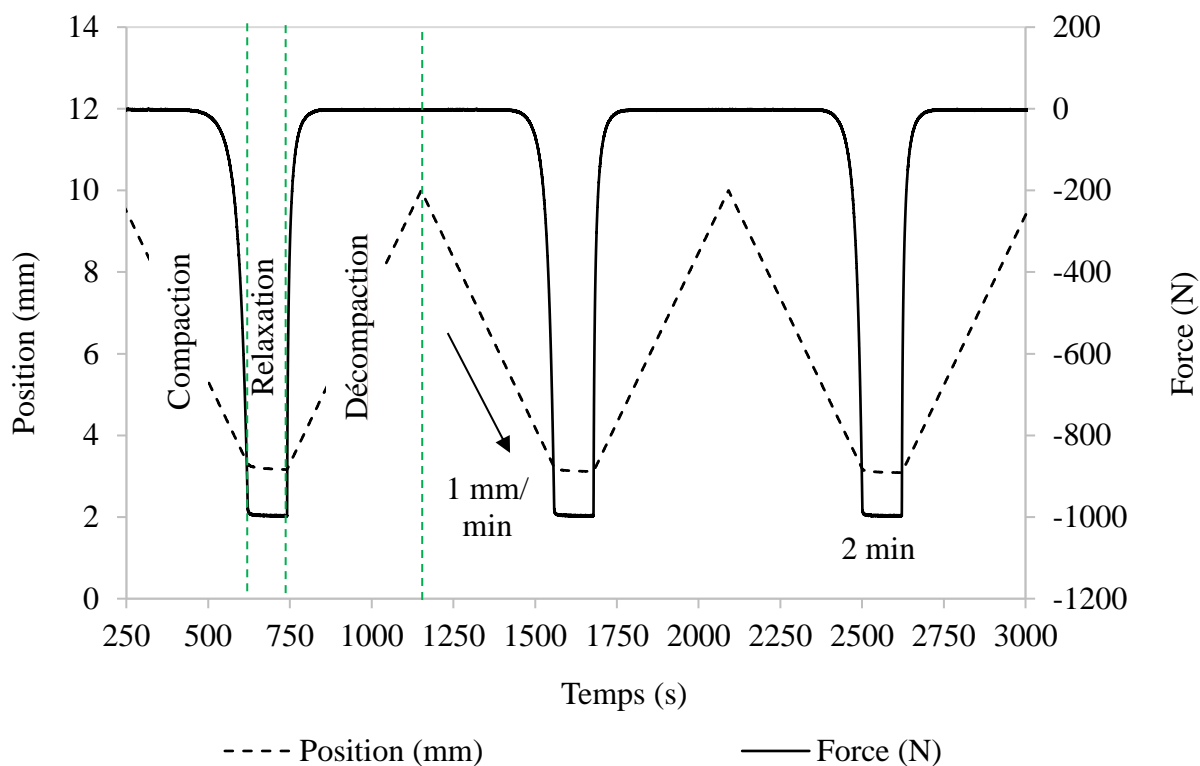


Figure 4-7. Illustration des 3 cycles de compaction à sec d'un renfort fibreux

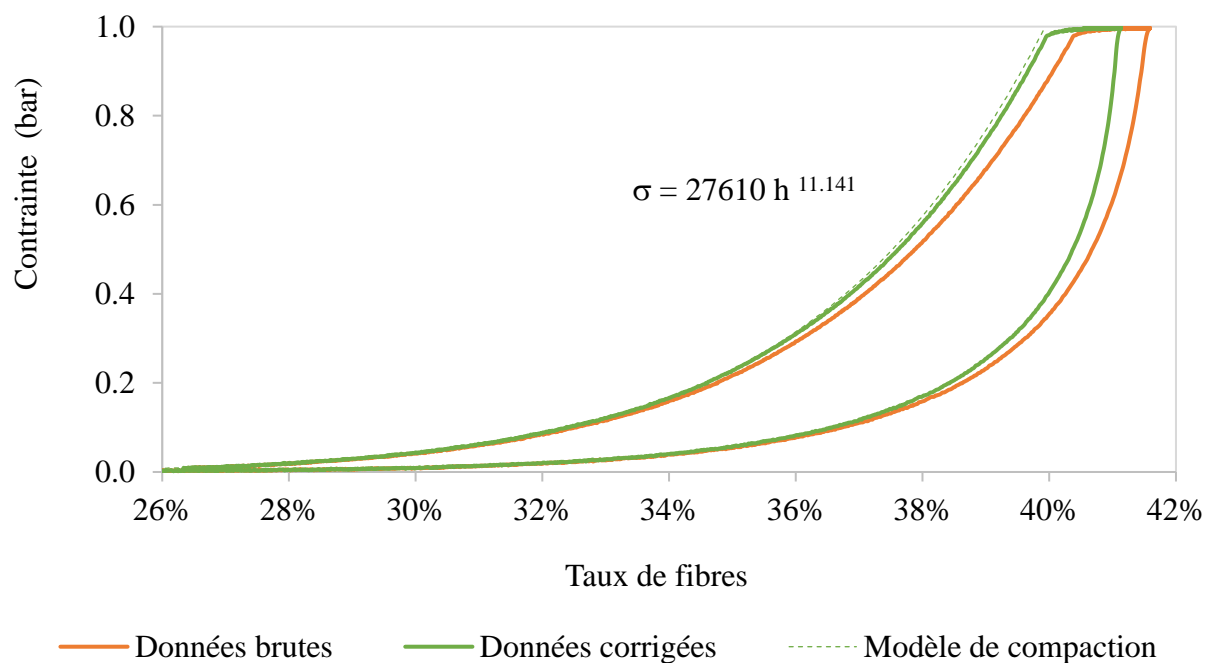


Figure 4-8. Exemple de courbes de compaction brute et corrigée obtenues pour 10 plis de renfort bidirectionnel. La loi de puissance du modèle de compaction est identifiée

4.4 Infusion directe

Une fois les modèles de compressibilité trouvés, les expériences d'infusion directe peuvent débuter pour caractériser la perméabilité planaire flexible des renforts et du milieu drainant. Les mesures de perméabilité doivent être effectuées dans des conditions se rapprochant le plus possible des procédés d'infusion réels pour obtenir des modèles représentatifs des particularités du VARI (voir section 3.3.1). La perméabilité planaire flexible est donc mesurée selon la séquence d'empilement suggérée par Sun et al. (1998) (Figure 3-9).

Les essais d'infusion directe s'effectuent sur une plaque de plexiglas fixée sur un support en métal (Figure 4-9). La plaque est transparente pour permettre l'observation du front d'imprégnation, et des lignes équidistantes de 20 mm sont tracées sur sa surface inférieure. Elle est aussi suffisamment rigide pour soutenir la pression de vide sans déformation.

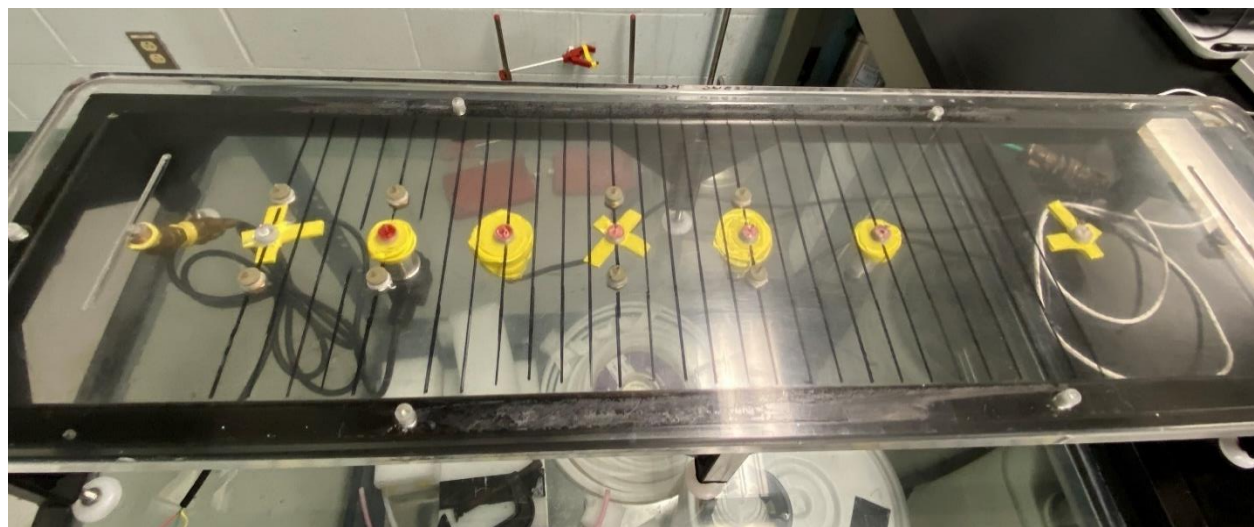


Figure 4-9. Photographie de la plaque de plexiglas utilisée comme moule d'infusion

La plaque est usinée pour placer 4 capteurs de pression sur l'axe de symétrie longitudinale afin de mesurer la pression interstitielle au début de la préforme, puis à 80 mm, 260 mm et 360 mm de cette position (Figure 4-10). Ces capteurs permettent de vérifier la qualité du vide lors des infusions et d'évaluer l'ampleur des pertes de pression dans la ligne d'infusion.



Figure 4-10. Photographie des capteurs de pression disposés sous la plaque de plexiglas

Avant de débiter les essais, les renforts fibreux, le milieu de distribution et le tissu d'arrachement sont coupés en rectangles de 445 mm × 135 mm. Cinq plis de renfort sont ensuite disposés sur la plaque transparente, suivis d'une couche de pellicule plastique imperméable, puis du tissu d'arrachement et du milieu de distribution décalés de 6 cm par rapport au début du renfort (Figure 4-11). Ceci permet d'assurer un front d'écoulement linéaire à l'entrée du renfort, et d'éviter que l'huile de silicone ne s'écoule directement dans la ligne de vide lorsque l'imprégnation du milieu de distribution hautement perméable est terminée. Cette disposition est également représentative des pratiques industrielles, qui visent à minimiser la perte de liquide à partir du milieu drainant à la fin de l'infusion.

Une spirale d'infusion en polyéthylène est positionnée en entrée du milieu drainant, et la ligne de vide est placée sous une couche de tissu respirant (*breather*) pour assurer une distribution uniforme de la pression. Une membrane polymère Wrightlon 7400 est ensuite scellée sur le périmètre du moule avec du ruban d'étanchéité AT200Y de Airtech. Les fiches techniques de tous les consommables et les adresses des fournisseurs sont données dans l'annexe B.

La valve d'entrée est ensuite fermée et la ligne de vide est connectée à une pompe qui crée une pression négative de 50 kPa, 75 kPa ou 100 kPa dans la cavité du moule. La bûche à vide se conforme alors à la préforme et la comprime (Figure 4-11). Une fois la pression désirée atteinte, la pompe à vide est déconnectée pour vérifier l'étanchéité de l'assemblage. La calibration des capteurs de pression est aussi vérifiée en s'assurant que les 4 mesures sont identiques.

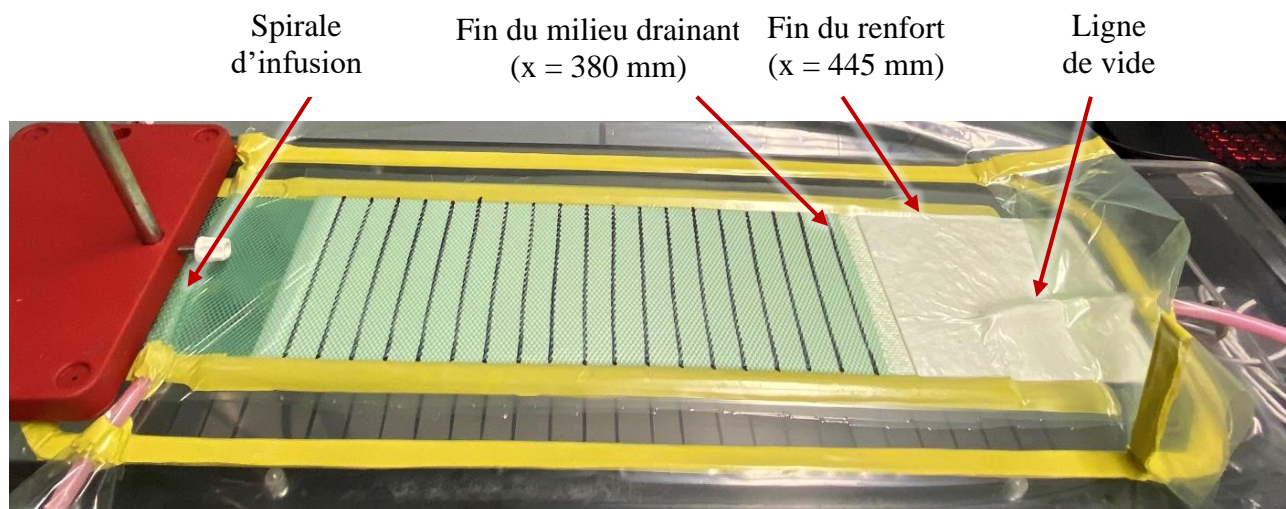


Figure 4-11. Photographie d'une expérience d'infusion directe

Les capteurs de pression mesurent la pression interstitielle lors de l'infiltration dans les fibres, alors que deux caméras filment les faces supérieure et inférieure du moule pour suivre respectivement l'évolution du front dans le milieu de distribution et le renfort. Ces deux écoulements sont indépendants, car séparés par une membrane imperméable. Le recours à cette séquence d'empilement permet par conséquent de mesurer simultanément la perméabilité des deux milieux (dans les mêmes conditions limites de pression), tout en tenant compte des effets d'emboîtement entre les plis et des conditions de contact particulières avec la surface rigide du moule ou avec la bâche à vide flexible.

Lorsque l'imprégnation est complétée dans les deux milieux, la valve d'entrée est refermée, la pompe à vide est débranchée, et l'acquisition des mesures arrêtée. Les vidéos permettent alors de retracer l'évolution des fronts d'écoulement dans le temps. Les données des capteurs de pression permettent de déterminer la pression d'infusion qui gouverne l'écoulement, c'est-à-dire la différence entre les pressions au port d'injection et au front. Par conséquent, la perméabilité flexible du milieu drainant et du renfort peut être calculée instantanément par la méthode élémentaire de l'équation (3.11), ou par interpolation et moindres carrés selon la méthode décrite par les équations (3.12) à (3.15). Cette perméabilité flexible suppose une épaisseur constante donnée par les modèles de compressibilité précédemment identifiés. L'utilisation de cette approche ne permet donc pas de prédire l'évolution de l'épaisseur lors des procédés d'infusion. En revanche, elle vise à prédire analytiquement le temps de remplissage des matériaux poreux par infusion directe.

En répétant cette expérience pour les autres pressions de vide, la perméabilité flexible des matériaux peut être trouvée pour différentes épaisseurs, et donc différents taux volumiques de fibres. Le modèle de type puissance qui donne la perméabilité flexible en fonction du taux de fibres peut par conséquent être calculé. L'annexe D donne plus de détails sur les étapes de manipulation et d'acquisition de données. L'annexe E détaille également la procédure suivie pour analyser les résultats expérimentaux dans une fiche Excel spécialement conçue à cet effet.

4.5 Infusion indirecte

Les expériences d'infusion indirecte suivent exactement la même procédure que celle décrite dans la section précédente, avec la seule exception que le milieu de distribution et le tissu d'arrachement sont placés directement au-dessus du renfort, plutôt que d'en être séparés par un film imperméable. Ceci permet par conséquent des infiltrations d'huile de silicone à travers l'épaisseur de la préforme et réduit significativement le temps de remplissage des renforts fibreux. Les écoulements n'obéissent donc plus à la loi de Darcy, et les perméabilités planaires du renfort et du milieu drainant ne peuvent plus être identifiées. Les résultats de ces expériences servent toutefois à caractériser par identification la perméabilité transverse apparente du renfort pendant l'infusion indirecte.

4.6 Simulation numérique

Les simulations numériques ont pour objectif initial de reproduire les expériences d'infusion directe pour vérifier la cohérence des modèles de perméabilité planaire flexible du milieu de distribution et des renforts utilisés dans cette étude. Par la suite, les simulations d'infusion indirecte prendront en entrée les mesures de compaction et de perméabilité planaire dans le but de caractériser par identification les perméabilités transverses apparentes des renforts. Finalement, les simulations permettront de réaliser une analyse de sensibilité pour évaluer l'influence de chacun des paramètres d'entrée (épaisseur, taux volumique de fibres et perméabilité) sur les temps de remplissage du milieu drainant et des renforts, afin d'identifier les paramètres critiques qui doivent être impérativement caractérisés avec précision. Ceci a pour objectif de mieux cibler les efforts requis pendant les campagnes de caractérisation des matériaux, et ultimement non seulement de réduire le coût des simulations numériques, mais aussi de les rendre possibles.

4.6.1 Logiciel de simulation

Toutes les simulations sont effectuées avec l'application Visual-RTM du logiciel de simulation par éléments finis non conformes PAM-RTM, version 2018.5, du groupe ESI (ESI Group, 2018). Cette application permet de simuler les étapes de préchauffage du moule et de remplissage de la préforme en prenant optionnellement en considération le couplage hydromécanique et le chauffage du moule. Le logiciel permet également de simuler l'étape de cuisson de la résine. Les paramètres physiques qui peuvent être pris en compte dans la simulation sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4-1. Paramètres de l'application Visual-RTM du logiciel PAM-RTM

Élément	Paramètres
Résine	Densité Viscosité Conductivité thermique Chaleur spécifique Cinétique de polymérisation
Renfort	Perméabilité Modèle d'expansion Densité volumique Densité surfacique Épaisseur naturelle Conductivité thermique Chaleur spécifique
Conditions frontières	Point d'injection (pression constante ou débit constant) Évent Température Flux thermique Pression mécanique
Autres	Capteurs Pression externe

Puisque toutes les expériences d'infusion sont réalisées à température ambiante et qu'une épaisseur constante est considérée lors des mesures de perméabilité flexible, seul le module de simulation du remplissage est utilisé. Les paramètres d'entrée sont donc la pression au port d'injection, la densité de l'huile de silicone, sa viscosité telle que définie par l'équation polynomiale de la Figure 4-4, l'épaisseur comprimée des milieux poreux calculée à partir de leur modèle de compressibilité, la perméabilité planaire flexible calculée à partir de leur modèle de perméabilité et la perméabilité transverse apparente identifiée.

4.6.2 Maillage

Les expériences d'infusion directe et indirecte sont effectuées sur des préformes rectangulaires en écoulement linéaire. L'écoulement peut donc être simulé en deux dimensions à travers une coupe transversale de l'échantillon (en rouge sur la Figure 4-12). Le milieu de distribution et les renforts fibreux (respectivement en rose et en bleu sur la Figure 4-12) peuvent alors être maillés comme deux pièces distinctes, mais en contact, possédant des épaisseurs et des perméabilités distinctes. Ainsi, les interactions entre le milieu de distribution et le renfort peuvent être étudiées numériquement sans avoir recours à des simulations 3D coûteuses en temps de calcul.

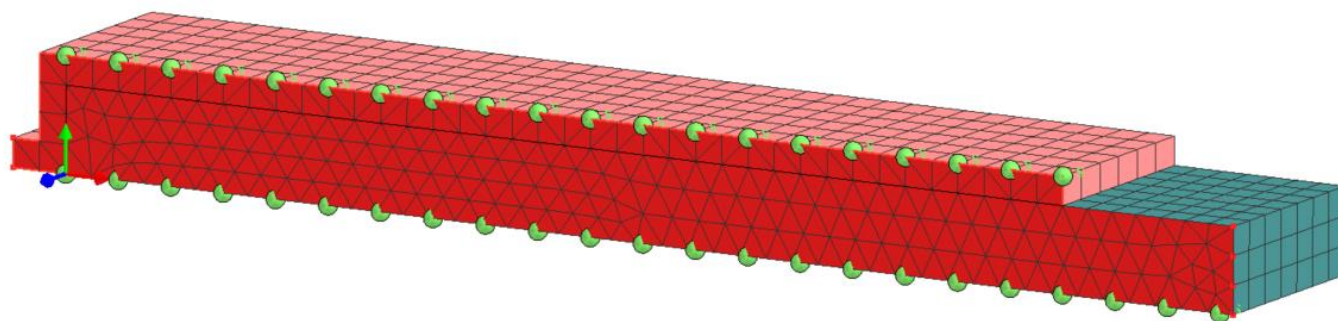


Figure 4-12. Coupe transversale des échantillons au milieu de la préforme, afin d'étudier le remplissage à travers un plan de coupe vertical intégrant le milieu drainant et le renfort

La Figure 4-13 illustre le maillage de simulations des infusions indirectes. Le port d'injection est positionné à l'extrémité gauche du milieu drainant, et l'évent du côté droit du renfort qui est plus long que le milieu de distribution, pour reproduire fidèlement la disposition expérimentale. Des capteurs de pression virtuels (points verts sur la Figure 4-13) sont ajoutés sur les faces supérieure et inférieure du maillage, aux mêmes positions que les lignes équidistantes tracées sur le moule en plexiglas avant les infusions. Lorsque le front d'écoulement progresse au-delà de la position d'un capteur, la pression détectée augmente. Ainsi, il est possible d'analyser les données de pression mesurée pour détecter le passage du front d'écoulement et obtenir les temps de remplissage prédits par la simulation numérique. Finalement, la taille des éléments est choisie de sorte à atteindre la convergence des simulations, tout en minimisant le nombre de nœuds et d'éléments. Une étude de convergence détaillée sera présentée au Chapitre 6 pour déterminer cette taille optimale.

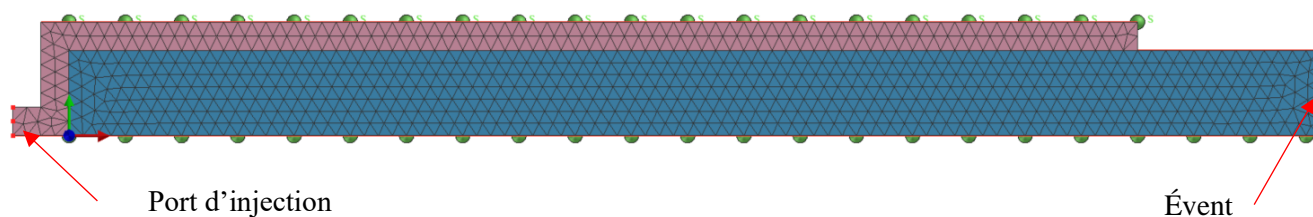


Figure 4-13. Maillage de simulation des infusions indirectes

4.7 Originalité de l'approche proposée

Pour conclure ce chapitre, la méthodologie expérimentale proposée se distingue des approches mentionnées dans la littérature, car elle permet de caractériser simultanément les perméabilités planaires flexibles du renfort fibreux et du milieu drainant. Cette méthode de caractérisation est donc plus simple et moins coûteuse que celles proposées par Sun et al. (1998) et (Gokce et al., 2005), car il n'est plus nécessaire de mesurer la perméabilité planaire du renfort fibreux en moule rigide ou d'identifier la perméabilité planaire du milieu drainant au moyen d'un algorithme complexe. Ceci permet également de caractériser les deux matériaux dans les mêmes conditions limites, en plus de tenir compte de leur décompaction lors de l'écoulement et des effets d'emboîtement entre les plis successifs.

En outre, la stratégie d'identification de la perméabilité transverse apparente de la préforme est sans doute plus robuste que l'algorithme suggéré par Gokce et al. (2005), car un seul paramètre doit être identifié (au lieu de deux simultanément). Il n'y a donc plus de couplage entre l'identification des perméabilités planaire du milieu drainant et transverse du renfort. Ainsi la précision des prédictions numériques est moins affectée par l'introduction d'éventuelles erreurs expérimentales.

Finalement, puisque la stratégie de simulation est simplifiée, il devient possible d'identifier une perméabilité transverse apparente qui donne des prédictions fidèles du front d'écoulement sur l'ensemble de l'infusion, plutôt que de fonder l'identification sur un seul jeu de données acquis vers la fin de l'écoulement. La perméabilité identifiée peut donc mieux reproduire le début des infusions, lorsque les effets de décompaction exercent le plus d'influence.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus avec la méthodologie de caractérisation proposée. Le milieu de distribution est d'abord étudié. Son modèle de compressibilité est obtenu grâce aux essais de compaction cyclique en machine de test universelle, et sa perméabilité planaire flexible est mesurée en infusion directe aux 3 pressions de vide considérées, c'est-à-dire à 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa. Par la suite, les modèles de compressibilité et de perméabilité planaire du renfort bidirectionnel sont identifiés selon une approche similaire. Des expériences d'infusion indirecte sont ensuite effectuées pour obtenir les fronts expérimentaux dans le milieu drainant et les fibres, qui serviront de référence lors de l'identification de la perméabilité transverse apparente du renfort 2D dans le chapitre suivant.

La méthodologie proposée est ensuite appliquée pour le renfort 1D. Ce dernier est toutefois caractérisé conjointement avec le renfort 2D, car les résultats expérimentaux démontrent qu'il ne peut être fabriqué avec succès par infusion indirecte. Par conséquent, les modèles de compressibilité et de perméabilité planaire d'échantillons constitués de plis alternés de renforts 1D et 2D sont identifiés. Finalement, ces échantillons sont imprégnés par infusion indirecte pour permettre l'identification subséquente de leur perméabilité transverse apparente.

5.1 Milieu de distribution

5.1.1 Compressibilité

La compressibilité du milieu de distribution est étudiée en 3 cycles de compaction à sec, réalisés sur la machine de test universelle. Aucun cycle de compressibilité n'est effectué après saturation, car les effets de la lubrification sont négligeables pour un matériau aussi poreux. La Figure 5-1 montre les 3 courbes de compaction obtenues.

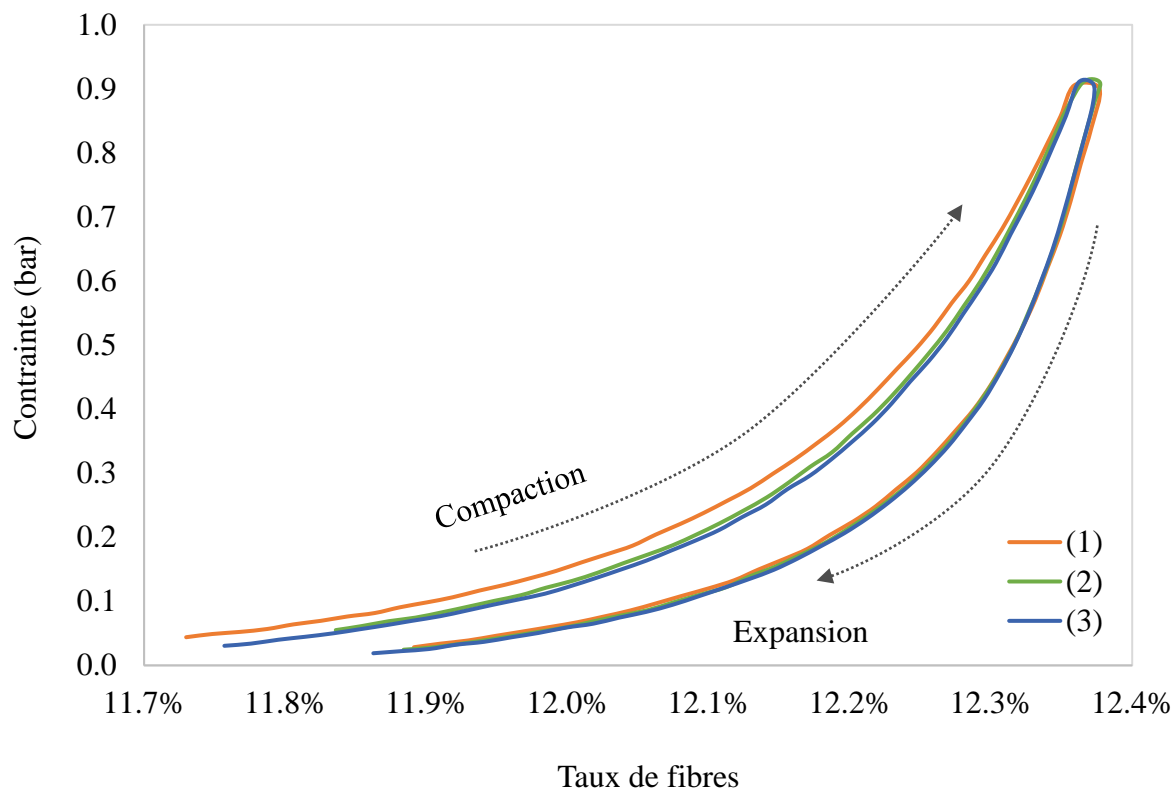


Figure 5-1. Courbes de compaction obtenues lors des trois cycles de compaction à sec du milieu de distribution

Comme les renforts fibreux, le milieu de distribution présente un comportement hystérétique avec des courbes de compaction et d'expansion différentes. De plus, le premier cycle de compaction diffère des cycles subséquents. Ainsi, des taux volumiques de fibres plus élevés peuvent être atteints si le milieu de distribution est soumis à un chargement cyclique.

Le comportement semble néanmoins se stabiliser à partir du troisième cycle. C'est donc la troisième courbe de compaction qui est considérée pour obtenir le modèle de compressibilité du milieu de distribution de la Figure 5-2. Ce modèle de type puissance en bon accord avec la courbe expérimentale ($R^2 = 0,998$) sera donc utilisé dans la suite de la recherche pour calculer le taux volumique de fibres du milieu de distribution en fonction de la pression.

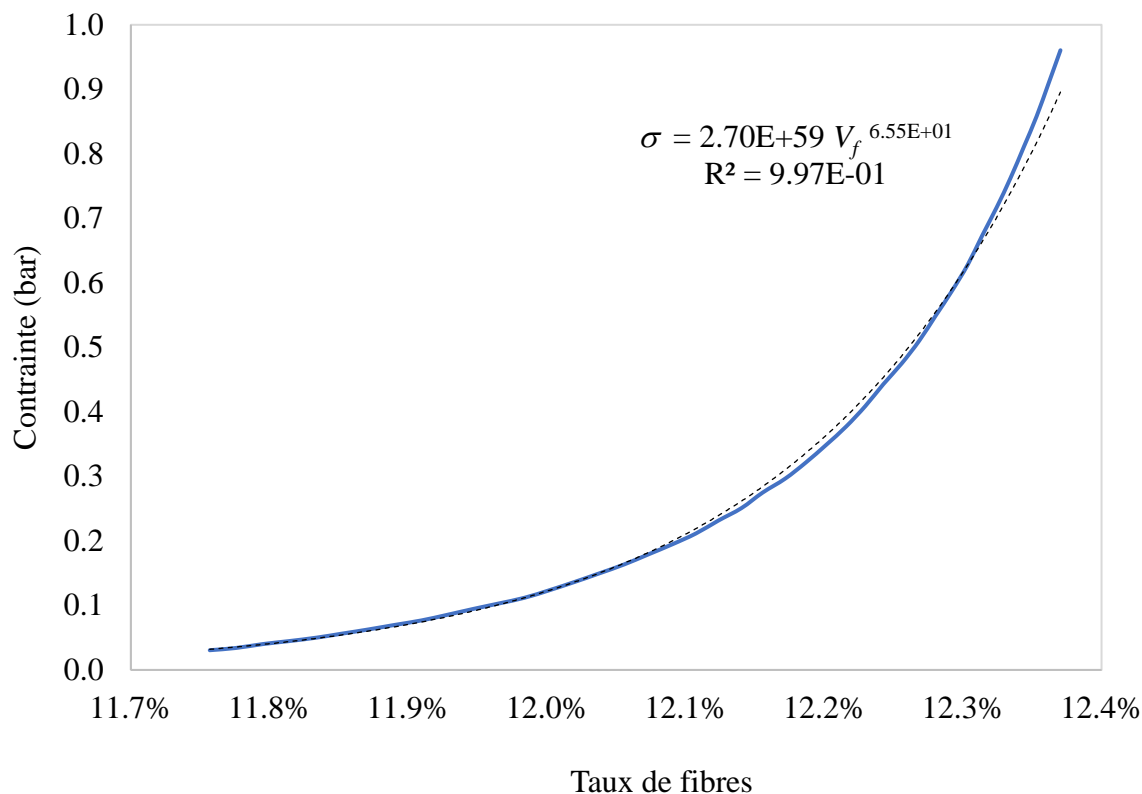


Figure 5-2. Modèle de compressibilité du milieu de distribution

5.1.2 Infusion directe

Une fois le modèle de compressibilité du milieu de distribution obtenu, des expériences d'infusion directe sont réalisées pour obtenir sa perméabilité flexible dans des conditions représentatives de la fabrication par infusion. À cette fin, la séquence d'empilement de la Figure 3-9 est employée. La Figure 5-3 illustre la position du front d'écoulement en fonction du temps lors de 3 infusions directes réalisées à une pression de vide proche de 50 kPa. Selon le modèle de compressibilité, le milieu de distribution a une épaisseur de 1,009 mm et un taux volumique de fibres de 12,26 % à cette pression de vide.

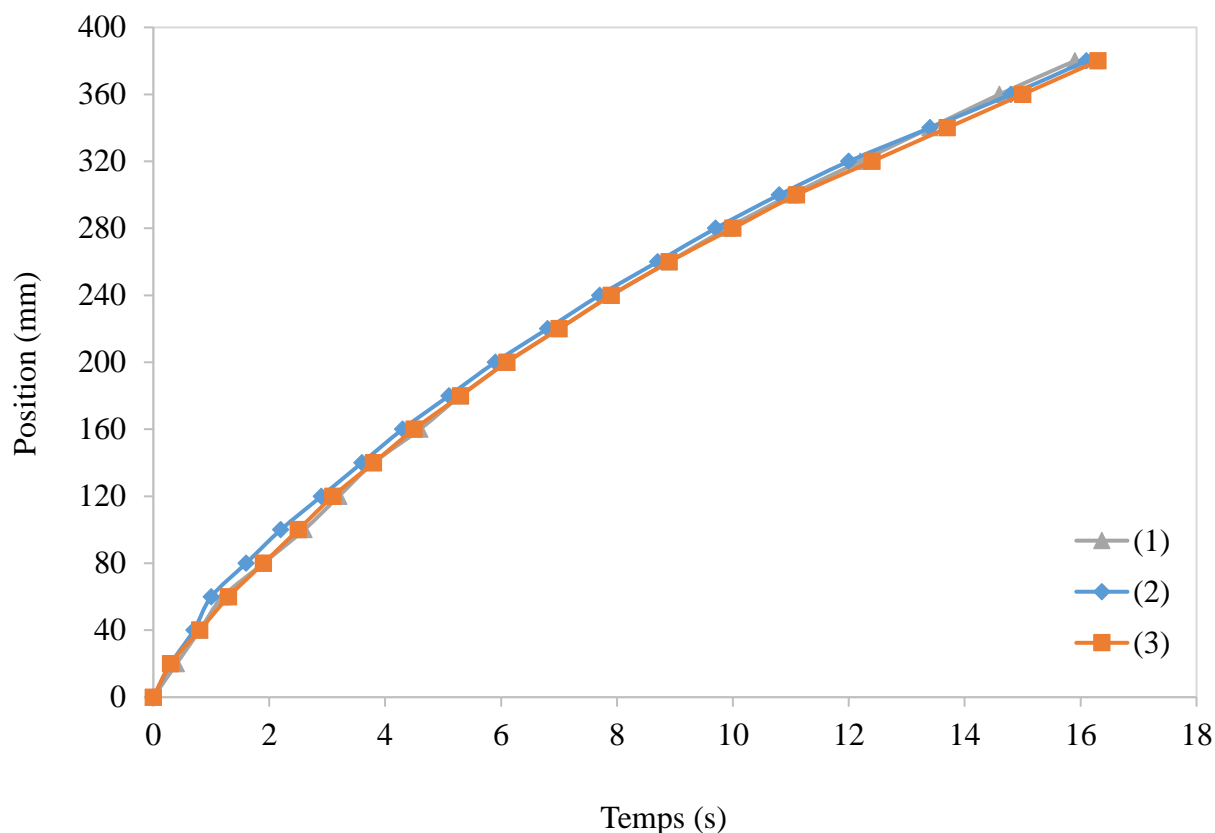


Figure 5-3. Position du front d'écoulement en fonction du temps lors de 3 infusions directes du milieu de distribution à une pression de vide de 50 kPa

Durant ces expériences, le milieu de distribution est infusé en même temps que des échantillons de renfort 1D ou 2D, et cela ne semble entraîner aucune conséquence particulière. Les 3 courbes présentées ci-dessus se superposent en effet, ce qui valide la répétabilité des expériences réalisées. Toutefois, des infusions supplémentaires réalisées dans les mêmes conditions expérimentales et illustrées dans la Figure 5-4 démontrent que les expériences sont difficiles à reproduire dans le cas du milieu de distribution. En effet, 3 des 11 expériences effectuées semblent aberrantes car le temps de remplissage est plus élevé, même si l'allure générale de la courbe est maintenue. Ceci peut s'expliquer par la sensibilité du milieu de distribution aux paramètres expérimentaux. En effet, si la spirale d'infusion n'est pas en parfait contact avec le milieu de distribution, ou que le tissu respirant n'est pas placé assez proche de sa fin, les conditions de bord peuvent être légèrement modifiées, et les temps de remplissage très courts du milieu de distribution peuvent augmenter significativement.

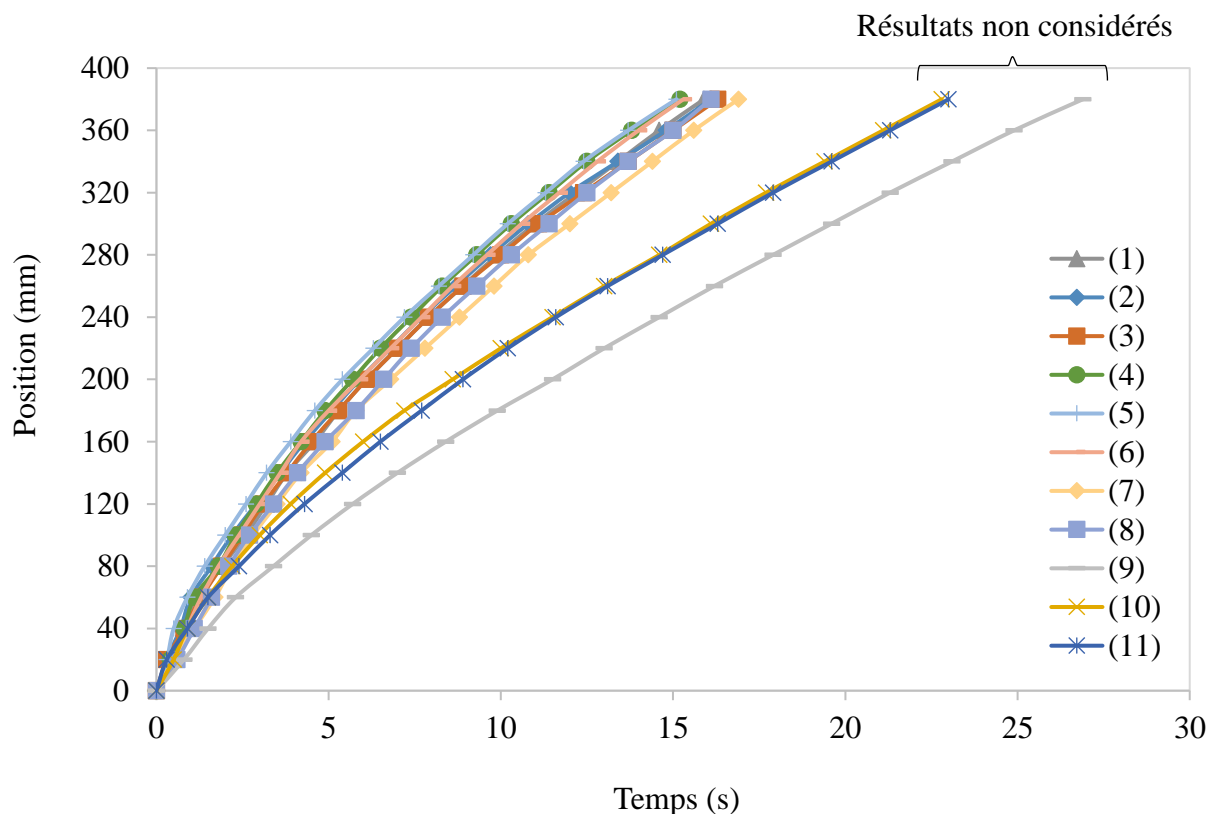


Figure 5-4. Position du front d'écoulement en fonction du temps lors de 11 infusions directes du milieu de distribution à une pression de vide de 50 kPa

Néanmoins, si l'on fait abstraction des 3 expériences éloignées du résultat moyen, le temps de remplissage moyen du milieu de distribution infusé à une pression de vide de 50 kPa peut être calculé à partir de 8 expériences (Figure 5-5). Les écarts-types, représentés comme des barres d'erreur sur la figure, peuvent également être calculés pour illustrer la variabilité des résultats.

Puisque le milieu drainant est poreux, l'évolution du front d'écoulement devrait être régie par la loi de Darcy et la position du front d'écoulement au carré devrait suivre une tendance linéaire en fonction du temps (Vernet et al., 2014). En guise de vérification, la Figure 5-6 illustre le remplissage moyen du milieu drainant lorsqu'il est infusé à une pression de vide de 50 kPa. Noter que les résultats expérimentaux dévient légèrement de la courbe de tendance linéaire ($R^2 = 0,9883$). L'écoulement n'est donc pas parfaitement modélisé par la loi de Darcy, en particulier au début de l'imprégnation.

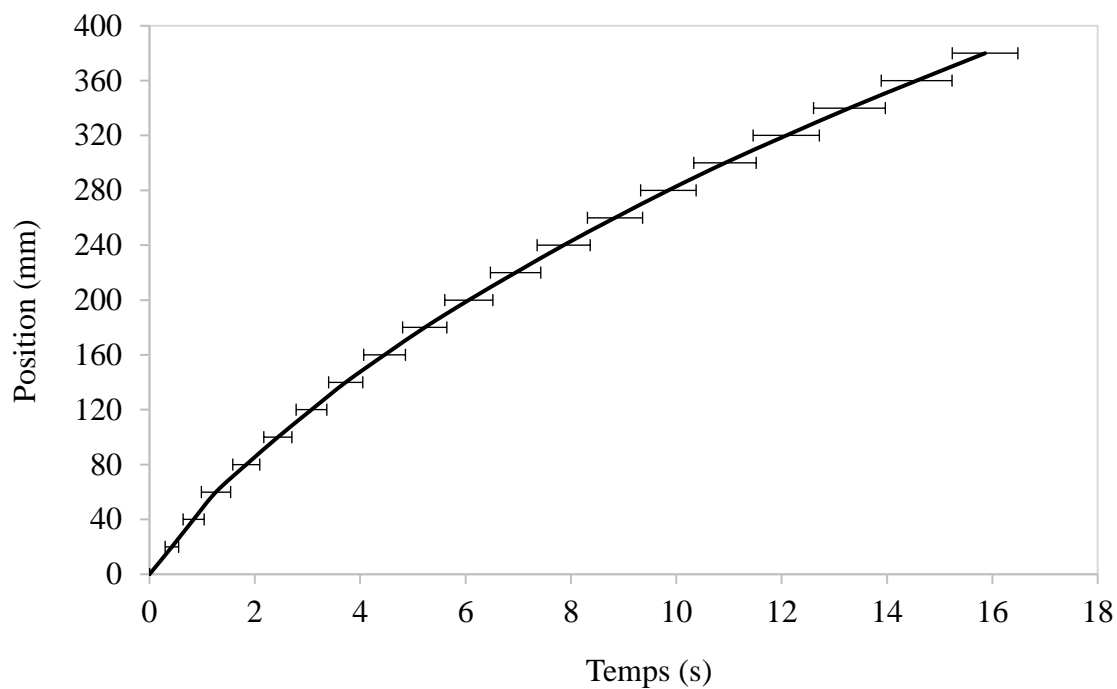


Figure 5-5. Position moyenne du front d'écoulement en fonction du temps lors des infusions directes du milieu de distribution à une pression de vide de 50 kPa

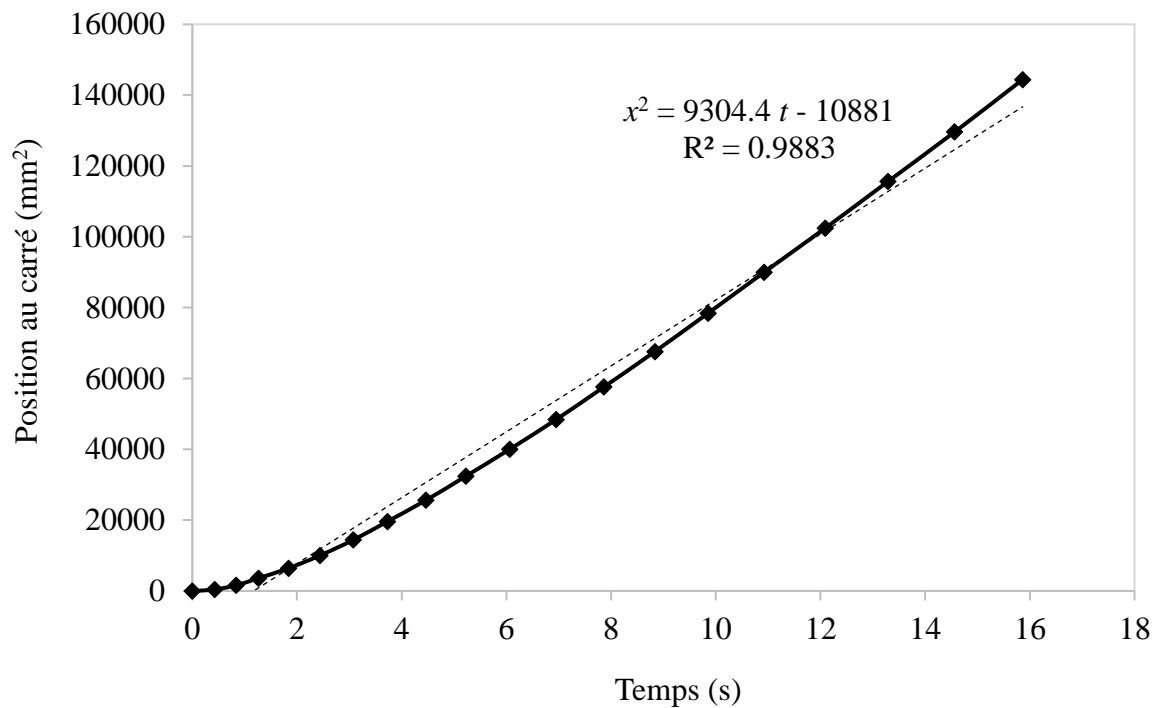


Figure 5-6. Position moyenne au carré du front d'écoulement en fonction du temps lors des infusions directes du milieu drainant à une pression de vide de 50 kPa

Ceci s'explique par le fait que la pression au port d'injection qui gouverne l'écoulement varie significativement tel qu'illustré dans la Figure 5-7. En effet, avant le début de l'infusion, le capteur de pression positionné au port d'injection mesure la pression de vide imposée (-50 kPa). Lorsque la valve d'entrée est ouverte, l'écoulement débute et la pression augmente. Puisque les chutes de pression dans la ligne d'infusion sont proportionnelles au débit et que la vitesse de l'écoulement est très élevée dans le milieu drainant, une pression maximale $P = -14,8$ kPa est atteinte à la fin de son imprégnation au temps $t = 16$ s. Par la suite, seul le renfort continue à être imprégné. Le débit diminue par conséquent et la pression au port d'injection augmente subitement, pour ensuite tendre vers une pression maximale $P = -3,4$ kPa. En outre, le milieu de distribution se décompacte au fur et à mesure que le front d'écoulement progresse, donc sa perméabilité augmente.

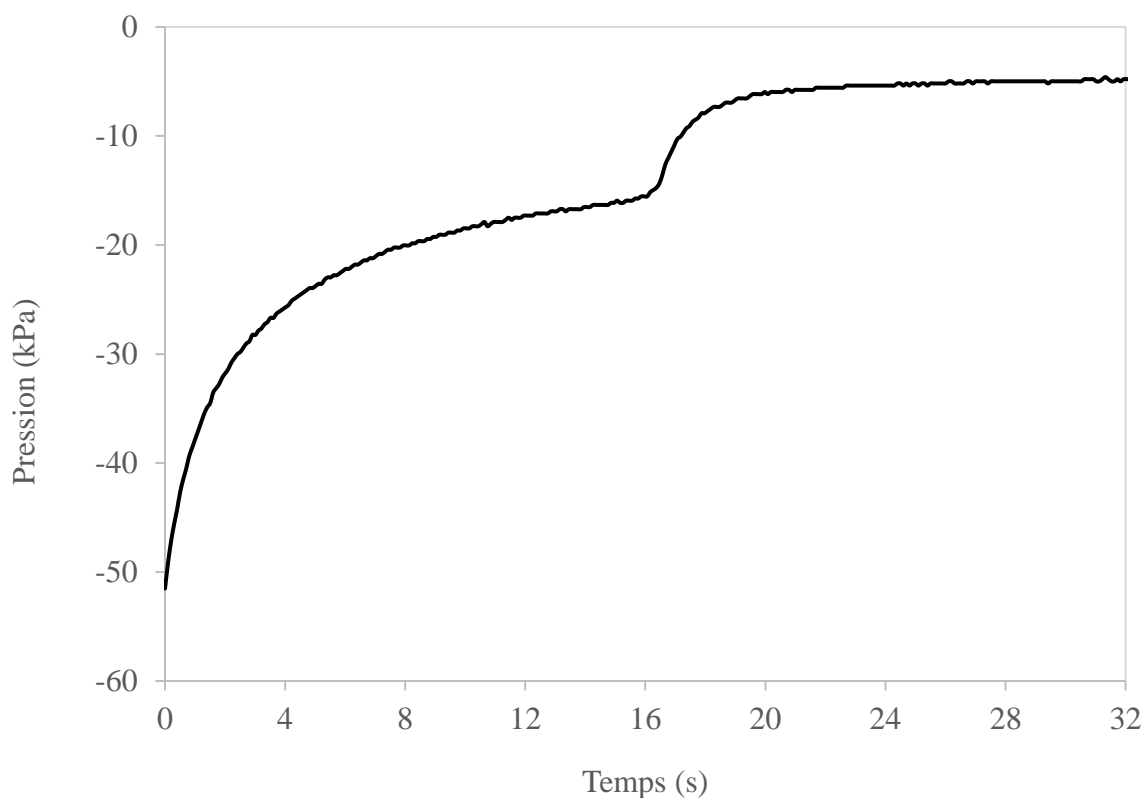


Figure 5-7. Évolution de la pression expérimentale mesurée au port d'injection lors d'une infusion directe du milieu de distribution à une pression de vide de 50 kPa

Par conséquent, deux valeurs distinctes de perméabilité flexible peuvent être calculées selon la méthode de Ferland et al. (1996) : une perméabilité en considérant une pression d'infusion constante qui correspond à la différence entre la pression de vide et la pression maximale à la fin de l'imprégnation ($K_{const} = 6,50E-09 \text{ m}^2$), ou une seconde valeur de perméabilité plus grande en considérant la pression variable mesurée par le capteur situé au port d'injection ($K_{var} = 1,10E-08 \text{ m}^2$). L'influence de la méthode d'interpolation sur les prédictions du remplissage reste à déterminer et elle sera étudiée par simulation numérique dans le chapitre suivant.

Finalement, la Figure 5-8 montre les fronts d'écoulement moyens obtenus lorsque les expériences d'infusion directe du milieu drainant sont répétées à des pressions de vide de 75 kPa et 100 kPa. Des conclusions similaires peuvent être tirées de ces expériences : la répétabilité des résultats est difficile à obtenir en raison de la sensibilité de l'écoulement aux conditions limites expérimentales. De plus, l'avancement de la position du front en fonction du temps ne correspond pas parfaitement à un écoulement de Darcy en raison des variations de pression et d'épaisseur durant l'infusion.

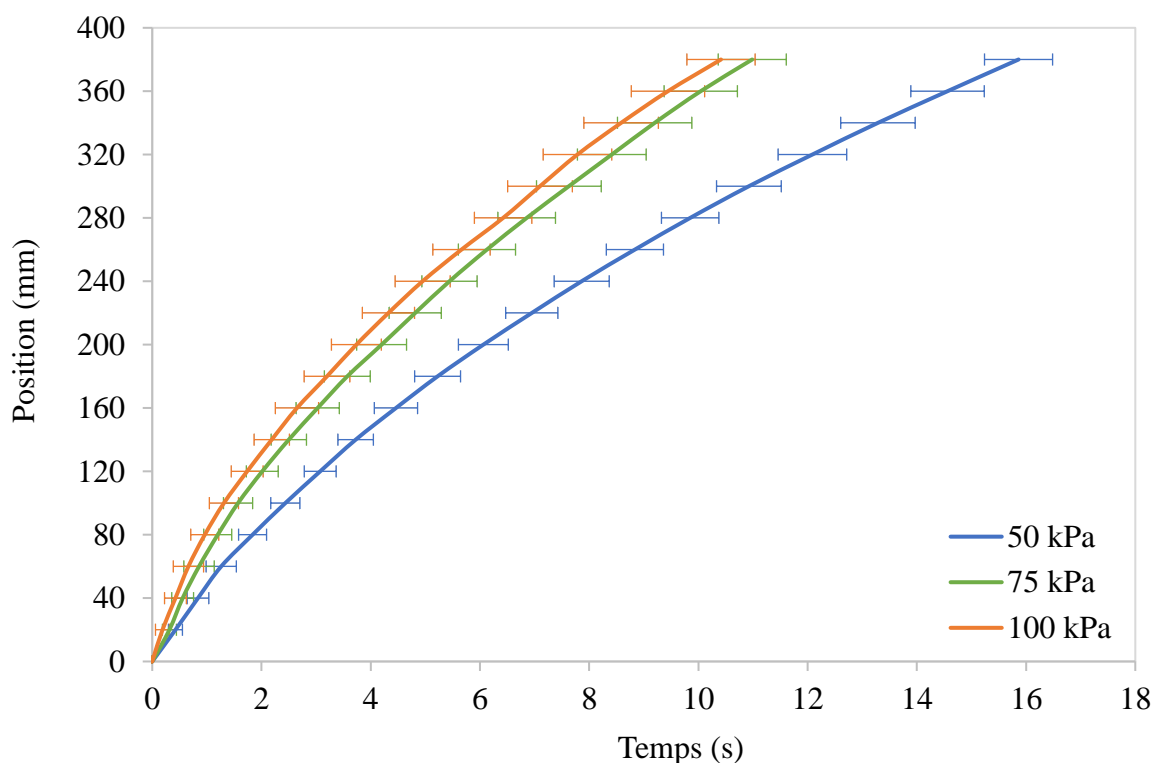


Figure 5-8. Position moyenne du front d'écoulement en fonction du temps lors des infusions directes du milieu de distribution à des pressions de vide de 100 kPa, 75 kPa et 50 kPa

Deux perméabilités distinctes peuvent donc être calculées comme précédemment : une perméabilité déterminée à partir d'une pression constante, et une perméabilité obtenue à partir de la pression réelle mesurée. Le Tableau 5-1 résume les valeurs moyennes de pression d'infusion, d'épaisseur et du taux volumique de fibres, ainsi que les deux perméabilités calculées à partir des expériences d'infusion directe aux pressions de vide proches de 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa. La procédure pour calculer les deux valeurs de perméabilité est détaillée dans l'annexe E.

Tableau 5-1. Valeurs moyennes de la pression d'infusion, de l'épaisseur, du taux volumique de fibres, et de la perméabilité du milieu de distribution calculée à pressions constante ou variable

Pression d'infusion	Épaisseur	Taux de fibres	Temps de remplissage	Perméabilité – <i>P</i> constante	Perméabilité – <i>P</i> variable
(kPa)	(mm)	(%)	(s)	(m ²)	(m ²)
50,12	1,009	12,26	15,9	6,50E-09	1,10E-08
73,37	1,003	12,32	11,0	6,39E-09	1,04E-08
93,51	0,999	12,36	10,4	5,54E-09	8,56E-09

5.2 Renfort 2D

Après avoir évalué la perméabilité flexible du milieu de distribution, le renfort 2D est caractérisé selon la même approche.

5.2.1 Compressibilité

Des essais cycliques de compressibilité sont réalisés avec le renfort 2D. La Figure 5-9 montre les 3 courbes de compaction du renfort sec (notées avec la lettre D pour *Dry*) et du renfort saturé avec de l'huile de silicone (notées avec S pour *Saturated*). Un comportement hystérétique du renfort est observé puisque les courbes de compaction et d'expansion diffèrent. L'effet de la réorganisation des fibres peut aussi être constaté, car le premier cycle de compaction est différent des cycles subséquents. Le comportement semble toutefois se stabiliser à partir du troisième cycle de compaction à sec. L'effet de la lubrification est alors moindre. En effet, la compaction additionnelle des fibres après saturation reste négligeable et tous les cycles suivants sont quasi-identiques. Le modèle de compressibilité du renfort peut donc être tiré du troisième cycle de compaction à sec.

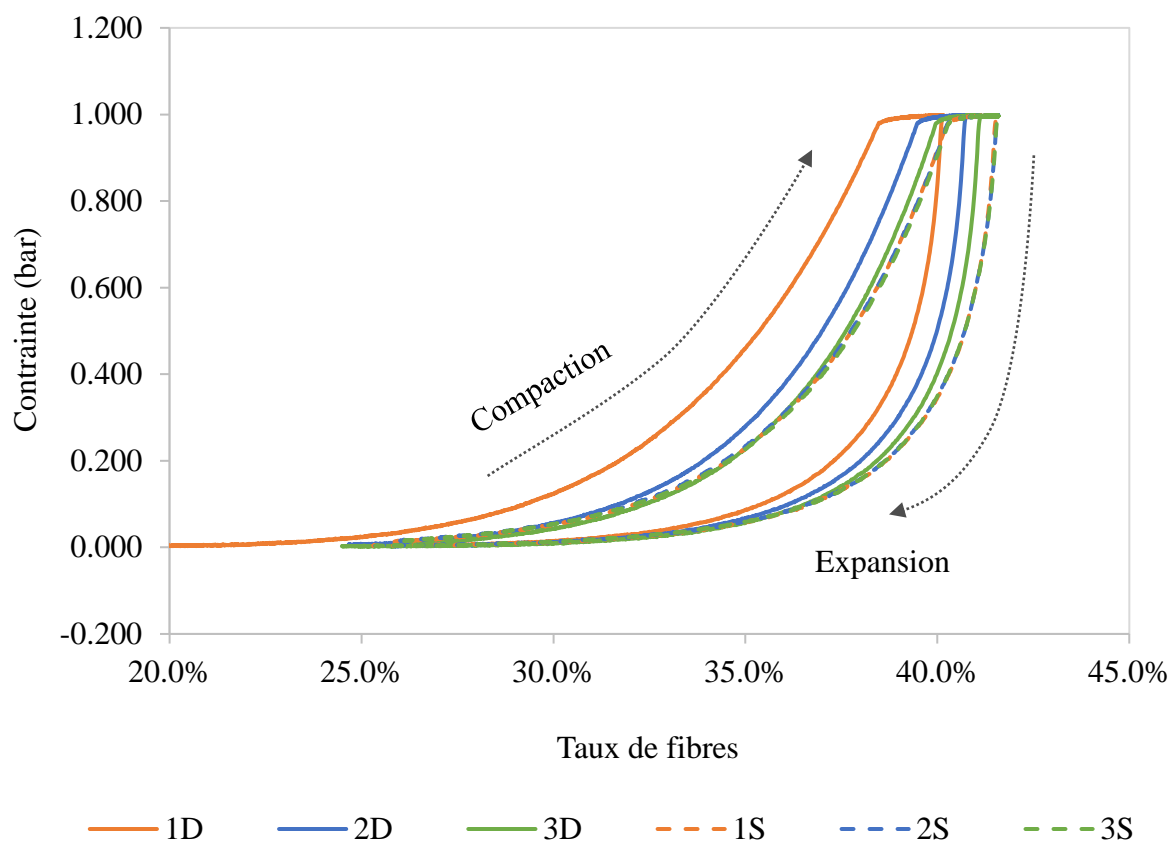


Figure 5-9. Courbes de compaction du renfort 2D à sec et après lubrification

La Figure 5-10 illustre les troisièmes cycles de compaction à sec obtenus avec 8 échantillons de 10 ou 5 plis de renfort 2D provenant de deux lots d'âge différent. Les échantillons provenant de l'ancien lot sont notés A10 et A5 pour les échantillons de 10 plis et 5 plis, respectivement. De manière similaire, les échantillons provenant du nouveau lot sont notés N10 et N5. Une conclusion importante est que le comportement en compressibilité des échantillons semble indépendant du nombre de plis. Ceci implique que les effets d'emboîtement sont similaires pour les échantillons constitués de 5 ou 10 plis. Par conséquent, il serait possible d'effectuer des mesures de perméabilité avec des échantillons de 5 plis, pour ensuite prédire l'écoulement pour des échantillons de 10 plis ou d'une autre épaisseur supérieure. Cette conclusion revêt une importance particulière dans le cas de la simulation de la fabrication des longerons de pale d'éolienne, car ces composantes possèdent généralement une épaisseur variable dans leur direction longitudinale. La validité de cette approche devra toutefois être vérifiée lors des expériences ultérieures.

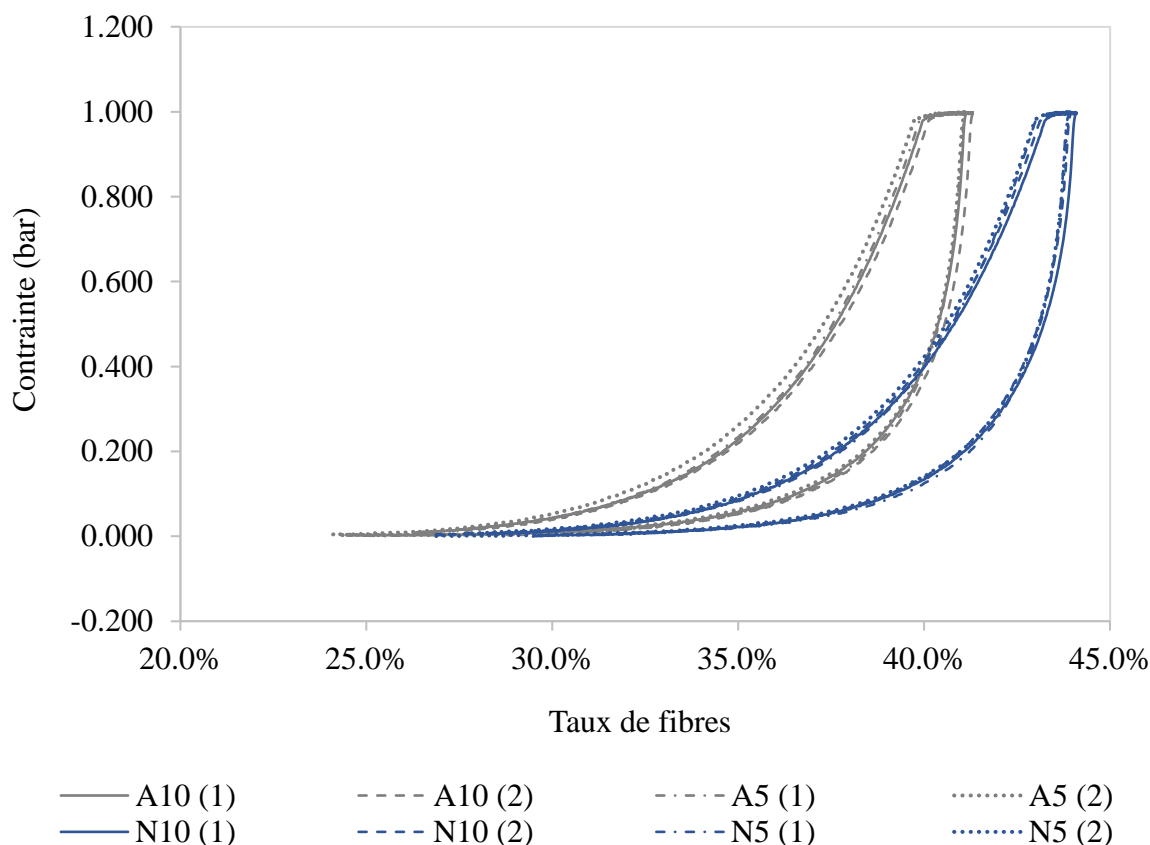


Figure 5-10. Troisième cycle de compaction à sec d'échantillons de 10 ou 5 plis de renforts 2D provenant de deux lots différents

Noter cependant que les deux lots de renfort se comportent presque comme deux matériaux distincts. En effet, bien que les échantillons aient la même masse, les échantillons A atteignent un taux volumique de fibres maximal de 40,1%, tandis que les échantillons N se compactent davantage jusqu'à un taux de fibres de 43,1%. Ceci peut s'expliquer par le vieillissement de l'ensimage des fibres qui a pu rendre le rouleau A plus rigide et moins compressible, car il a été exposé à l'air ambiant pendant une période plus longue (Peters, 2018).

Quelle que soit l'explication, les deux renforts bidirectionnels présentent des courbes de compaction d'allure similaire, qui peuvent être modélisées par les lois de puissance de la Figure 5-11. Les deux modèles obtenus représentent fidèlement le comportement en compaction des deux renforts avec un coefficient de détermination de $R^2 = 1$. Une attention particulière devra simplement être portée au choix du modèle de compressibilité lorsque des infusions directes seront réalisées pour mesurer la perméabilité flexible des renforts provenant des deux lots.

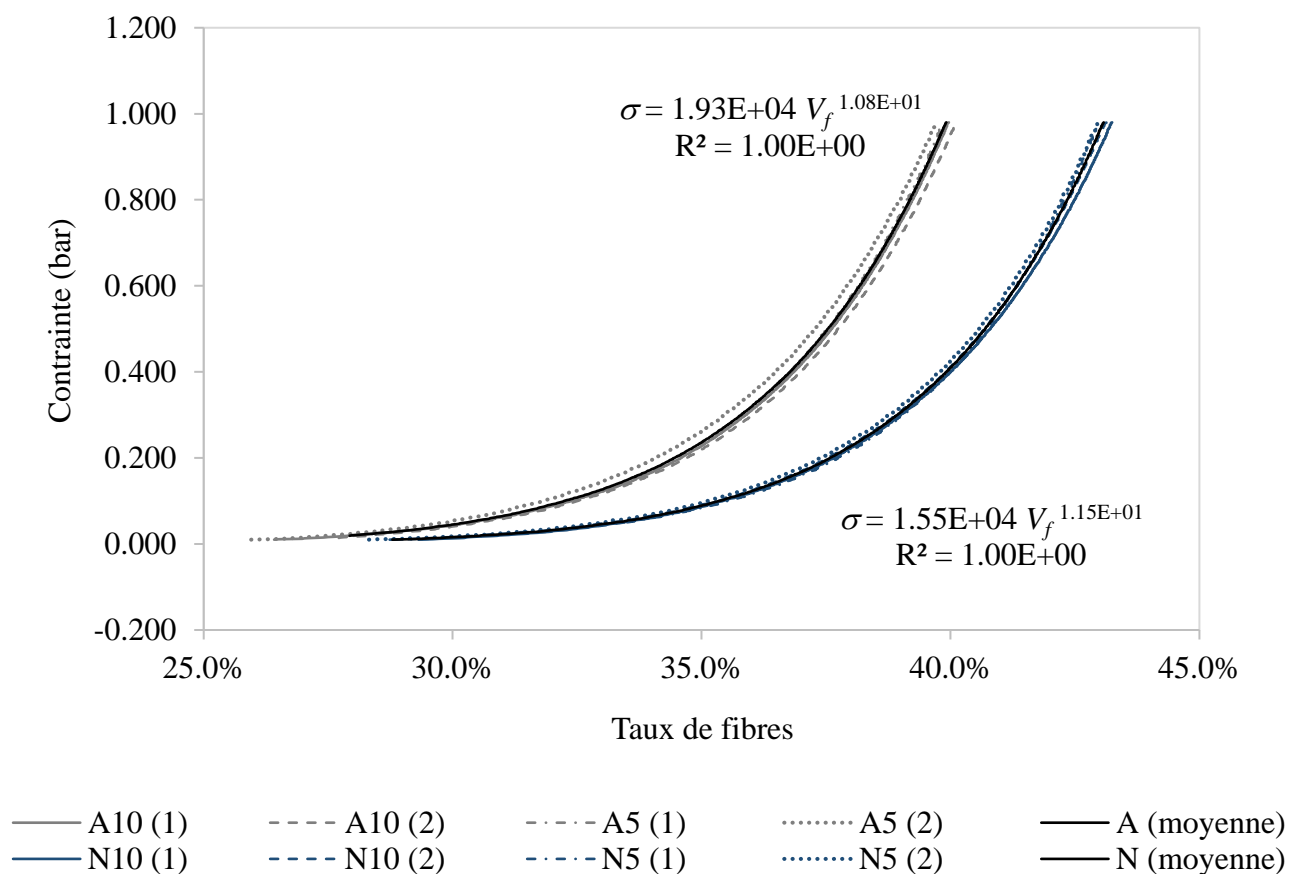


Figure 5-11. Modèles de compressibilité d'échantillons provenant des deux lots de renfort 2D

5.2.2 Infusion directe

Les modèles de compressibilité permettent d'estimer l'épaisseur des renforts 2D en fonction de la pression de vide. Des expériences d'infusion directe sont maintenant réalisées à des pressions de vide de 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa. La Figure 5-12 montre la position du front d'écoulement en fonction du temps lors d'une infusion directe à une pression de vide de 75 kPa pour 3 échantillons du renfort A et 3 échantillons du renfort N. Puisque les renforts possèdent deux modèles de compressibilité distincts, leur taux volumique de fibres à 75 kPa est également différent. En effet, le renfort A a une épaisseur de 1,646 mm et un taux de fibres de 38,8 %, tandis que le renfort N a une épaisseur de 1,493 mm et un taux de fibres de 42,1 %. Malgré l'architecture similaire des deux renforts, ceci implique que le temps de remplissage moyen du renfort A n'est que de 474,7 s, tandis que celui du renfort N est de 773,5 s.

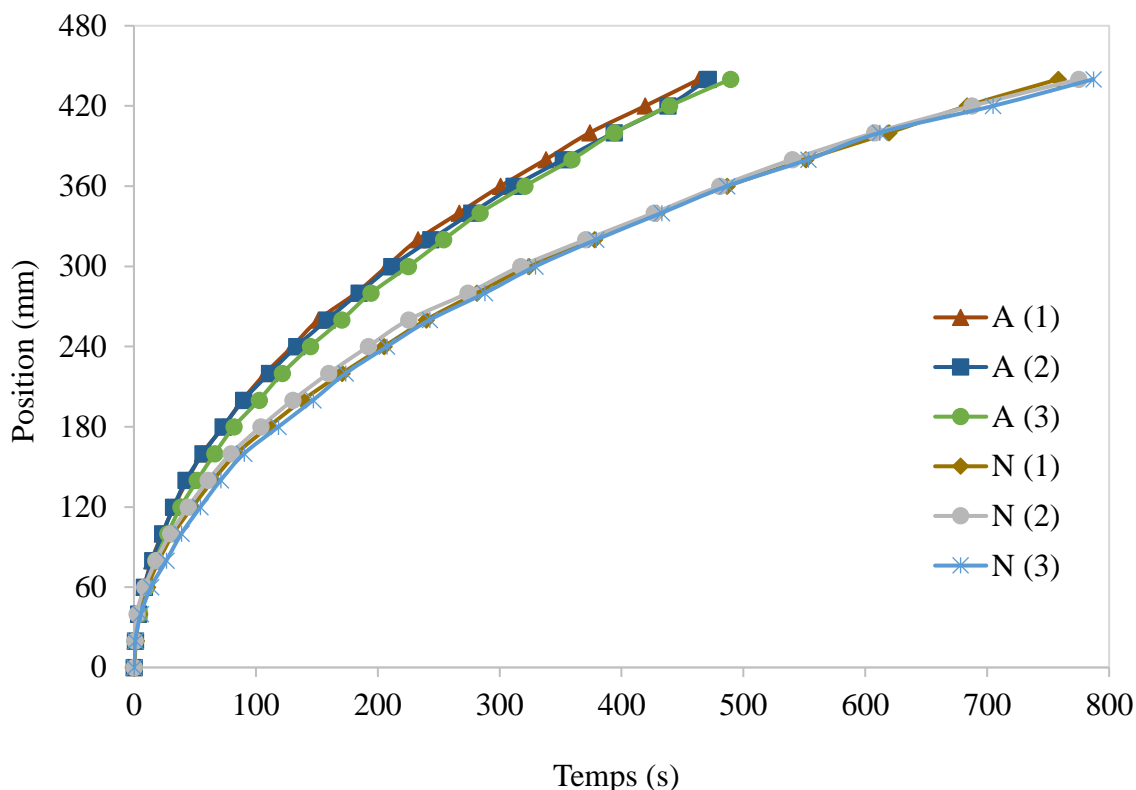


Figure 5-12. Position du front d'écoulement en fonction du temps lors de 6 infusions directes du renfort 2D provenant de deux lots différents, à une pression de vide de 75 kPa

Cependant, les deux écoulements obéissent à la loi de Darcy, et les courbes de la position moyenne au carré du front d'écoulement en fonction du temps suivent une loi linéaire (Figure 5-13). La perméabilité interpolée à partir de la pression d'infusion maximale prédit par conséquent la position du front d'écoulement pour l'ensemble des expériences d'infusion directe avec une erreur sur le temps de remplissage de 1,0% et 3,6% pour les renforts A et N, respectivement (Figure 5-14). Il n'est pas ici nécessaire de calculer une deuxième valeur de perméabilité en considérant les variations possibles de pression au port d'injection au début de l'infusion, car ceci n'affecte pas significativement l'écoulement dans le renfort bidirectionnel en raison de son temps de remplissage relativement plus élevé.

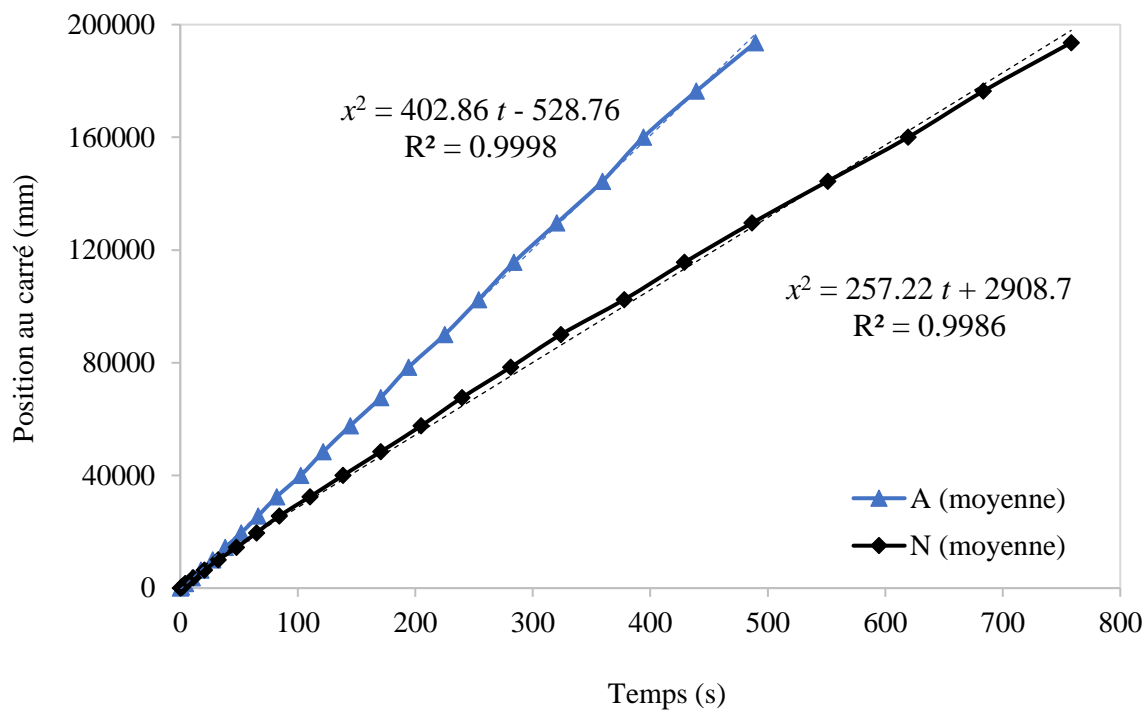


Figure 5-13. Position moyenne au carré du front en fonction du temps, lors de l'infusion directe de renforts 2D provenant de deux lots différents à une pression de vide de 75 kPa

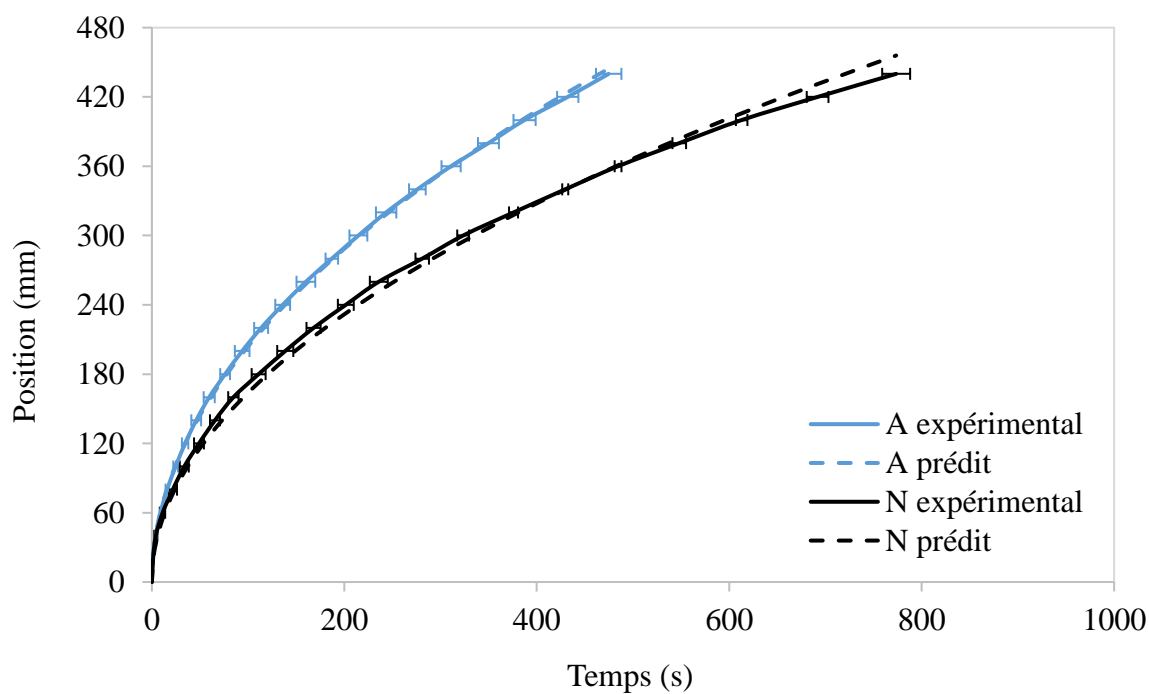


Figure 5-14. Fronts d'écoulement expérimentaux et lors de l'infusion directe des renforts 2D provenant de deux lots différents à une pression de vide de 75 kPa

Les expériences d'infusion directe des deux lots de renfort 2D sont maintenant répétées à des pressions de vide de 50 kPa et 100 kPa. La Figure 5-15 montre les fronts d'écoulement moyens obtenus et le Tableau 5-2 résume les valeurs moyennes de pression d'infusion, d'épaisseur et de taux volumique de fibres, ainsi que les temps de remplissage obtenus et les perméabilités interpolées.

Finalement, la Figure 5-16 illustre le modèle de perméabilité planaire obtenu à partir des données du Tableau 5-2. Noter que les valeurs de perméabilité mesurées avec les deux lots de renfort peuvent être représentées de manière satisfaisante avec le même modèle de type puissance ($R^2 = 0,9689$), même si les modèles de compressibilité des renforts sont distincts. Ceci s'explique par le fait que l'architecture des deux renforts est identique, et qu'au même taux volumique de fibres, ils devraient donc avoir la même perméabilité. En outre, l'utilisation de ces deux renforts permet d'élargir l'étendue du modèle de perméabilité.

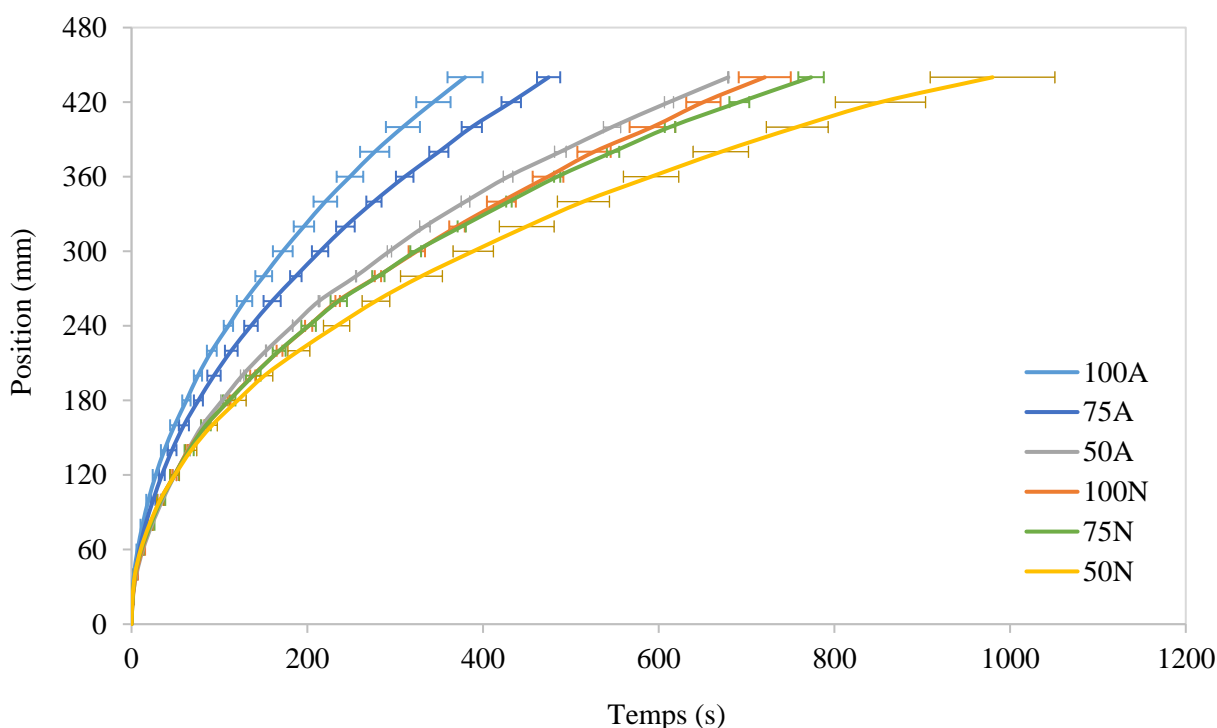


Figure 5-15. Position moyenne du front d'écoulement en fonction du temps lors de l'infusion directe des renforts 2D à des pressions de vide de 100 kPa, 75 kPa et 50 kPa

Tableau 5-2. Valeurs moyennes de la pression d'infusion, de l'épaisseur, du taux volumique de fibres et de la perméabilité des renforts 2D

Lot	Pression d'infusion	Épaisseur	Taux de fibres	Temps de remplissage	Perméabilité interpolée
	(kPa)	(mm)	(%)	(s)	(m ²)
A	48,68	1,709	37,4	679,3	1,87E-10
	74,49	1,646	38,8	474,7	1,66E-10
	94,49	1,597	40,0	424,3	1,40E-10
N	51,61	1,545	40,6	980,1	1,25E-10
	74,62	1,493	42,1	773,5	1,03E-10
	93,28	1,453	43,2	720,8	7,96E-11

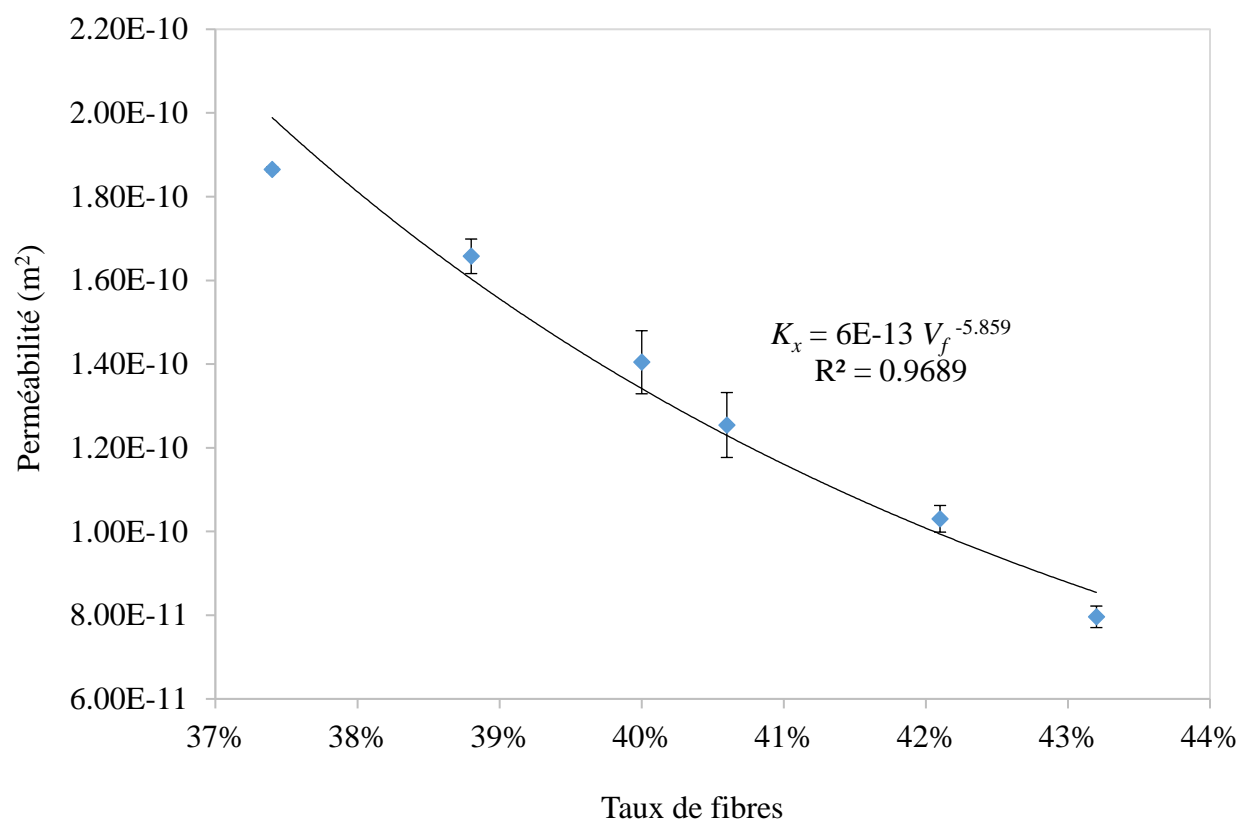


Figure 5-16. Modèle de perméabilité planaire flexible du renfort 2D

5.2.3 Infusion indirecte

Les modèles de compressibilité et de perméabilité du milieu de distribution et du renfort bidirectionnel étant connus, des infusions indirectes avec le milieu de distribution sont maintenant effectuées. Ces expériences serviront ultérieurement à caractériser la perméabilité transverse du renfort 2D par identification numérique. Pour vérifier la répétabilité des mesures, trois expériences sont réalisées à chaque pression de vide de 50 kPa, 75 kPa ou 100 kPa. Cette fois, le choix des renforts A ou N ne semble pas affecter significativement les temps de remplissage. Les résultats des expériences sont donc présentés sans discernement entre les lots.

La répétabilité des expériences est vérifiée dans les Figures 5-17 et 5-18, où les positions du front d'écoulement dans le milieu drainant et les fibres sont montrées respectivement, pour trois infusions indirectes réalisées à une pression de 75 kPa. Les courbes moyennes sont également illustrées, et les écarts-types sur le temps sont représentés par les barres d'erreur horizontales.

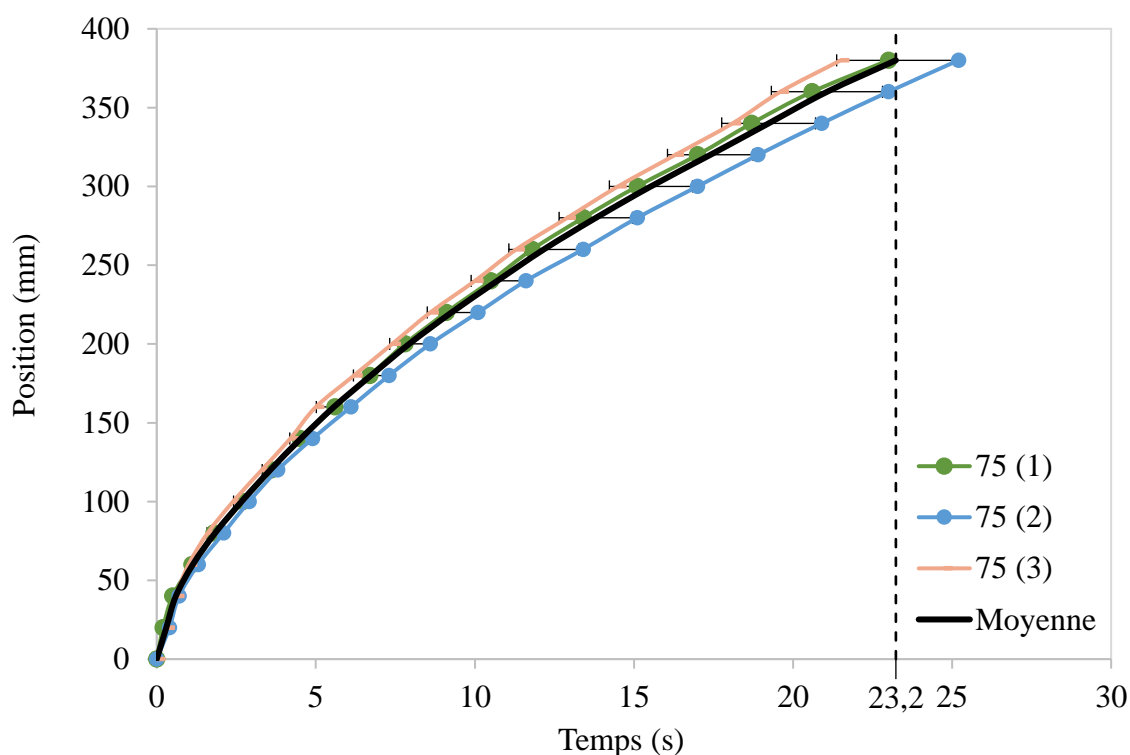


Figure 5-17. Position du front d'écoulement dans le milieu drainant en fonction du temps lors de l'infusion indirecte des renforts 2D à une pression de vide de 75 kPa

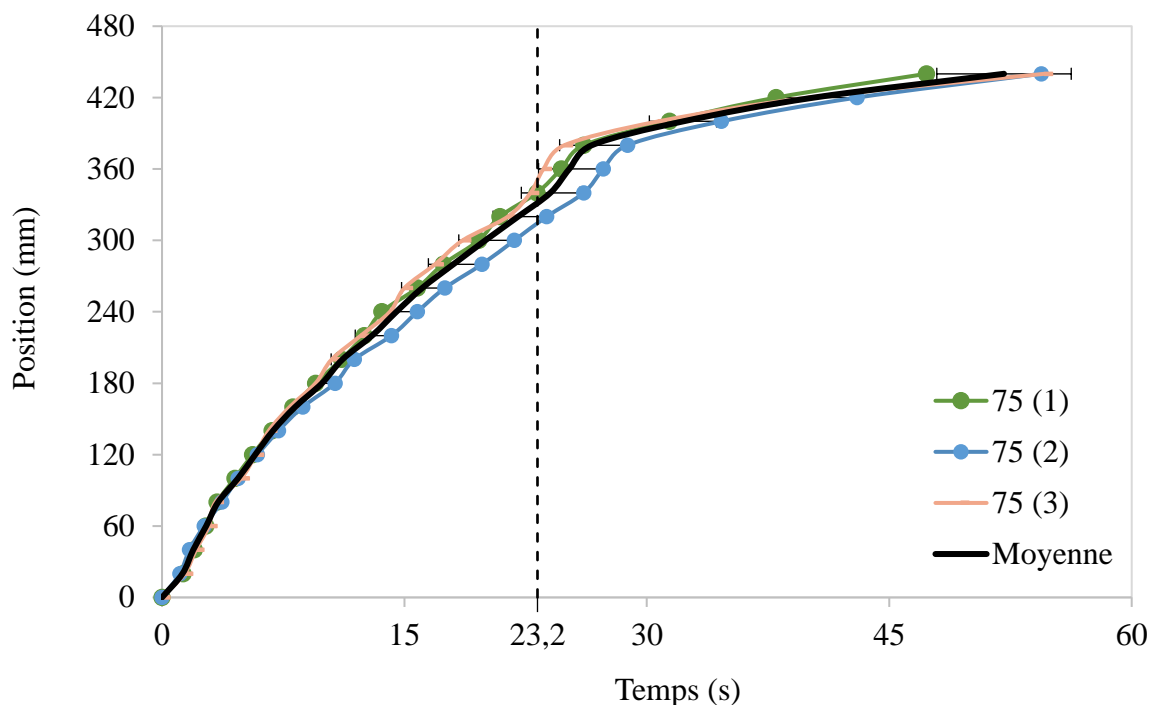


Figure 5-18. Position du front d'écoulement dans les fibres en fonction du temps lors de l'infusion indirecte des renforts 2D à une pression de vide de 75 kPa

En raison des écoulements d'huile à travers l'épaisseur de la préforme, l'évolution du front d'écoulement n'est plus quadratique dans le renfort fibreux. En effet, après la saturation complète du milieu drainant à $t = 23,2$ s, le front d'écoulement progresse très rapidement dans le renfort, et un point d'inflexion est noté dans la courbe moyenne de la Figure 5-18. Par la suite, la vitesse de l'écoulement diminue significativement. Aucune perméabilité planaire apparente ne peut par conséquent être calculée à partir de l'ensemble des résultats en infusion indirecte, et la position du front ne peut être prédite analytiquement par la loi de Darcy.

Pour illustrer davantage les interactions entre les deux matériaux, les positions moyennes des fronts simultanés d'écoulement dans le milieu drainant et le renfort 2D sont montrées pour les infusions indirectes réalisées à 50 kPa dans la Figure 5-19, à 75 kPa dans la Figure 5-20, et à 100 kPa dans la Figure 5-21.

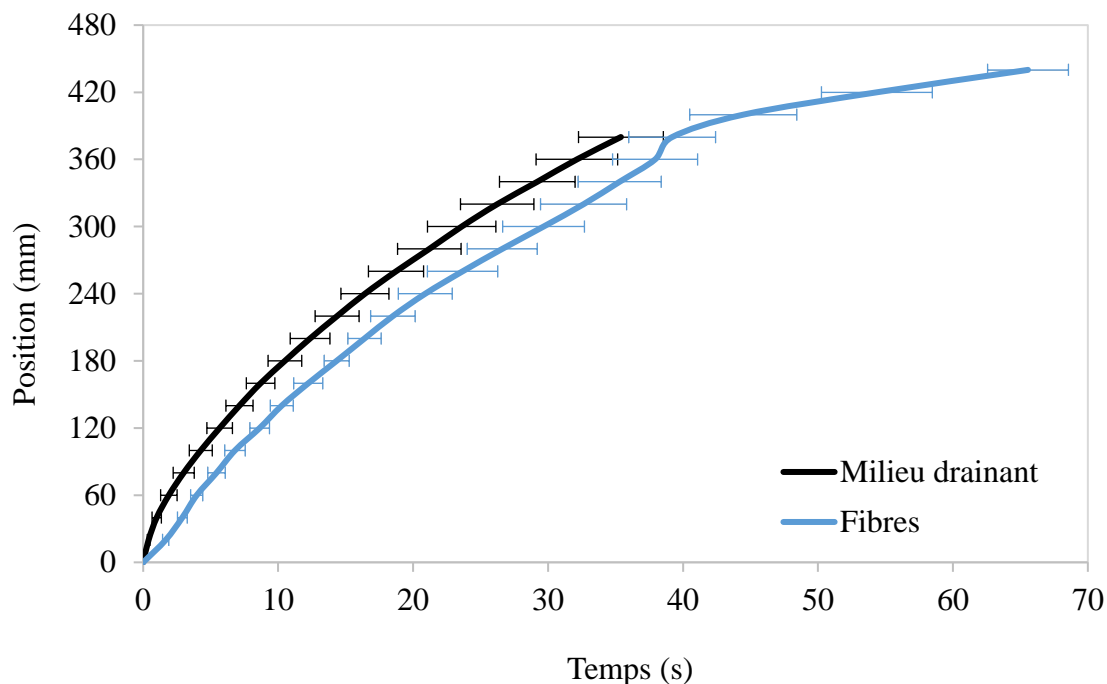


Figure 5-19. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et le renfort 2D lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa

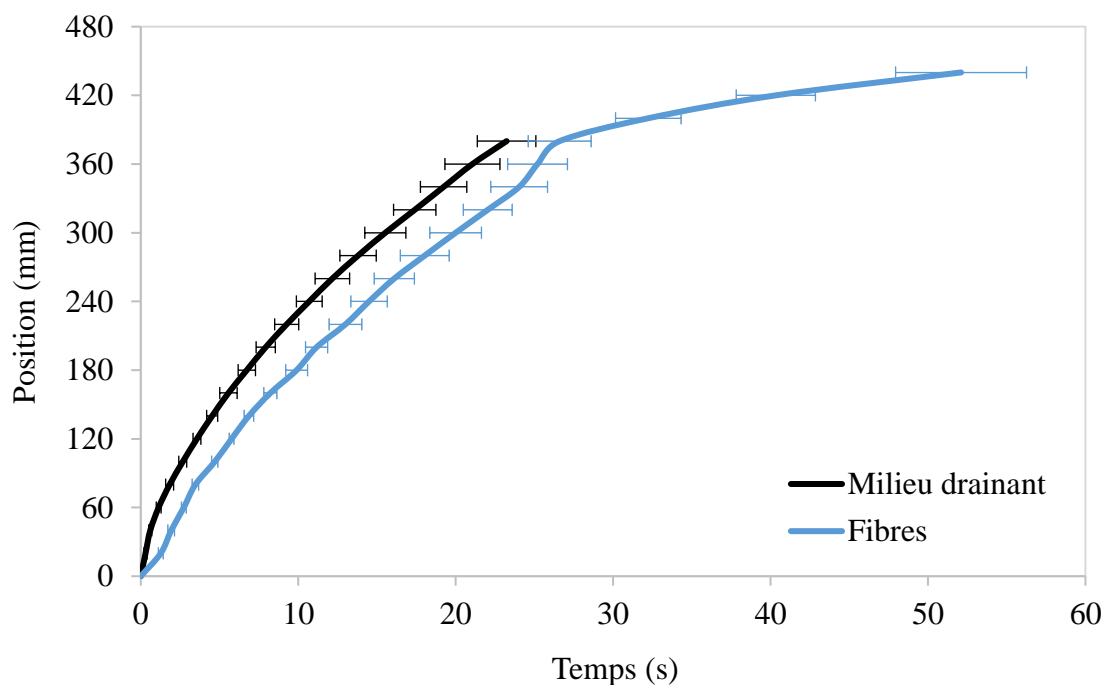


Figure 5-20. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et le renfort 2D lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa

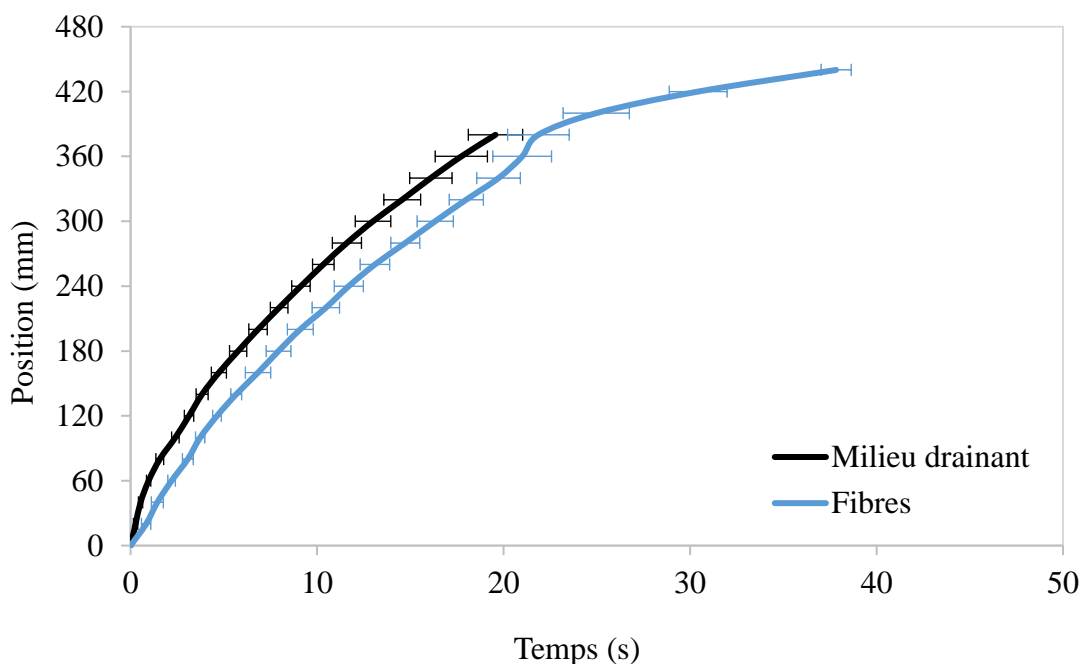


Figure 5-21. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et 5 plis de renfort 2D lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa

Plusieurs conclusions peuvent être tirées des diverses expériences d'infusion indirecte :

- Le milieu drainant, qui a une longueur de 380 mm et dont la perméabilité est élevée, se remplit avant le renfort qui a une longueur de 445 mm et une perméabilité plus faible.
- Les temps de remplissage du milieu drainant en infusion indirecte sont supérieurs à ceux notés en infusion directe. Par exemple, à une pression de vide proche de 75 kPa, ils sont respectivement de $t = 23,2$ s et $t = 11,0$ s à 75 kPa.
- La distance entre le front d'écoulement dans le milieu drainant et dans le renfort semble se stabiliser après un certain temps, car les écoulements deviennent parallèles. Cet écart est d'environ 40 mm à la fin du remplissage du milieu drainant aux pressions de vide de 50 kPa et 100 kPa et de 50 mm à 75 kPa.
- Une fois le milieu de distribution entièrement imprégné, l'écoulement dans le renfort progresse très rapidement jusqu'à la position $x = 380$ mm (fin du milieu drainant), puis il ralentit significativement pendant le reste de l'infusion.
- Les temps de remplissage du renfort demeurent significativement inférieurs à ceux notés en infusion directe. Par exemple, ils sont respectivement de $t = 52,1$ s et $t = 773,5$ s à une pression de vide proche de 75 kPa.

Finalement, 3 infusions indirectes supplémentaires sont réalisées avec des échantillons de 10 plis de renfort à une pression de vide de 100 kPa. Ces expériences ont pour objectif de valider que les mesures de perméabilité planaire effectuées avec des échantillons de 5 plis de renfort peuvent être utilisées pour prédire les temps de remplissage dans des échantillons d'épaisseurs différentes, en raison des effets d'emboîtement similaires. La Figure 5-22 illustre les positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et l'échantillon lors de ces expériences. Cette fois, la distance entre le front d'écoulement dans le renfort et le milieu drainant n'a pas le temps de se stabiliser avant la fin de l'imprégnation de ce dernier. L'évolution du front d'écoulement dans le renfort est tout de même similaire à celle observée avec les échantillons de 5 plis.

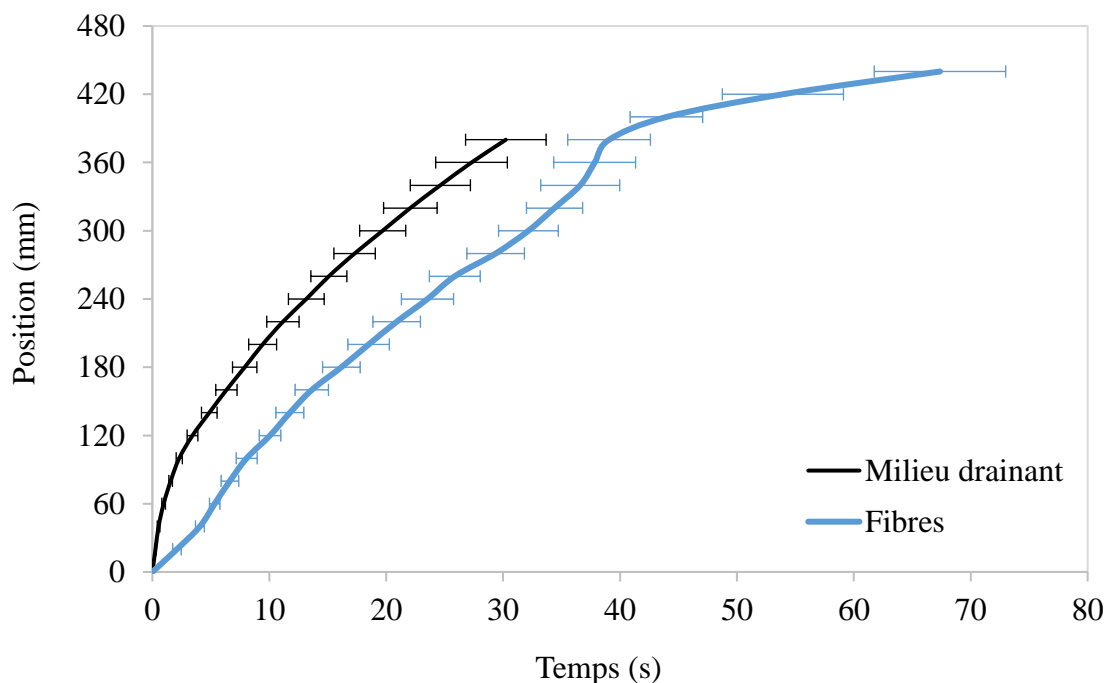


Figure 5-22. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et à travers 10 plis de renforts 2D lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa

Par conséquent, trois temps de remplissage caractéristiques des infusions indirectes sont notés : le temps de remplissage total du milieu drainant, le temps de remplissage des fibres recouvertes par le milieu drainant, et le temps de remplissage total du renfort (Tableau 5-3). Le but des simulations numériques sera donc de varier la perméabilité transverse du renfort 2D, pour réduire l'erreur sur ces temps de remplissage critiques et ainsi reproduire les fronts expérimentaux.

Tableau 5-3. Temps de remplissage caractéristiques du milieu drainant, des fibres recouvertes par le milieu drainant, et du renfort entier, lors de l'infusion indirecte des renforts 2D

Pression d'infusion	Milieu drainant	Fibres recouvertes	Renfort (total)
(kPa)	(s)	(s)	(s)
50	35,4	37,9	65,6
75	23,2	25,2	52,1
100	19,6	21,0	37,8
100 (10 plis)	30,2	37,8	67,4

5.3 Renfort 1D

La caractérisation des matériaux employés pour fabriquer des longerons de pale d'éolienne se poursuit maintenant avec le renfort unidirectionnel. Cependant, les premières expériences effectuées avec le renfort 1D choisi démontrent rapidement qu'il ne peut pas être caractérisé selon la méthodologie suggérée, car il ne peut être convenablement imprégné par infusion indirecte.

Le renfort possède en effet un comportement hystérétique similaire à celui noté avec le milieu drainant et le renfort 2D et possède une bonne répétabilité (Figure 5-23). Néanmoins, le modèle de compressibilité de la Figure 5-24, démontre que ce renfort atteint un taux volumique de fibres de 63,4% à pleine compaction. Ceci se situe en dehors des limites conventionnelles de l'infusion de résine, qui permet habituellement d'atteindre des taux volumiques de fibres maximums de 55% (Robinson, 2008).

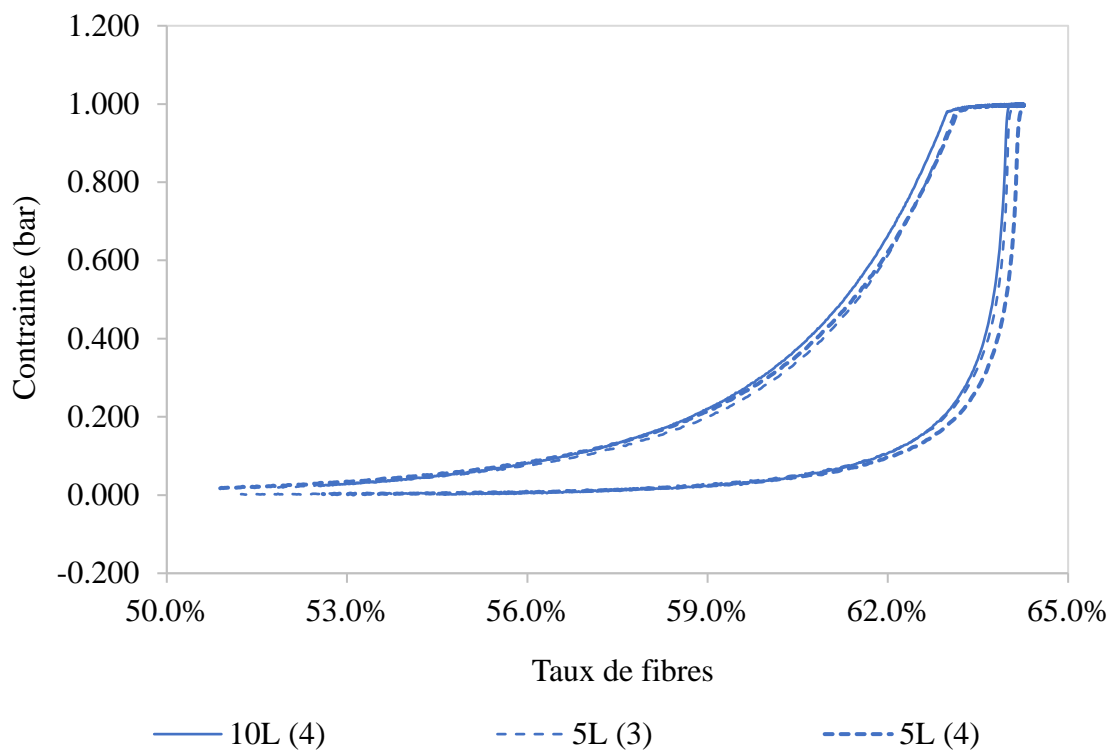


Figure 5-23. Troisième cycle de compaction à sec d'échantillons de 10 ou 5 plis de renfort 1D

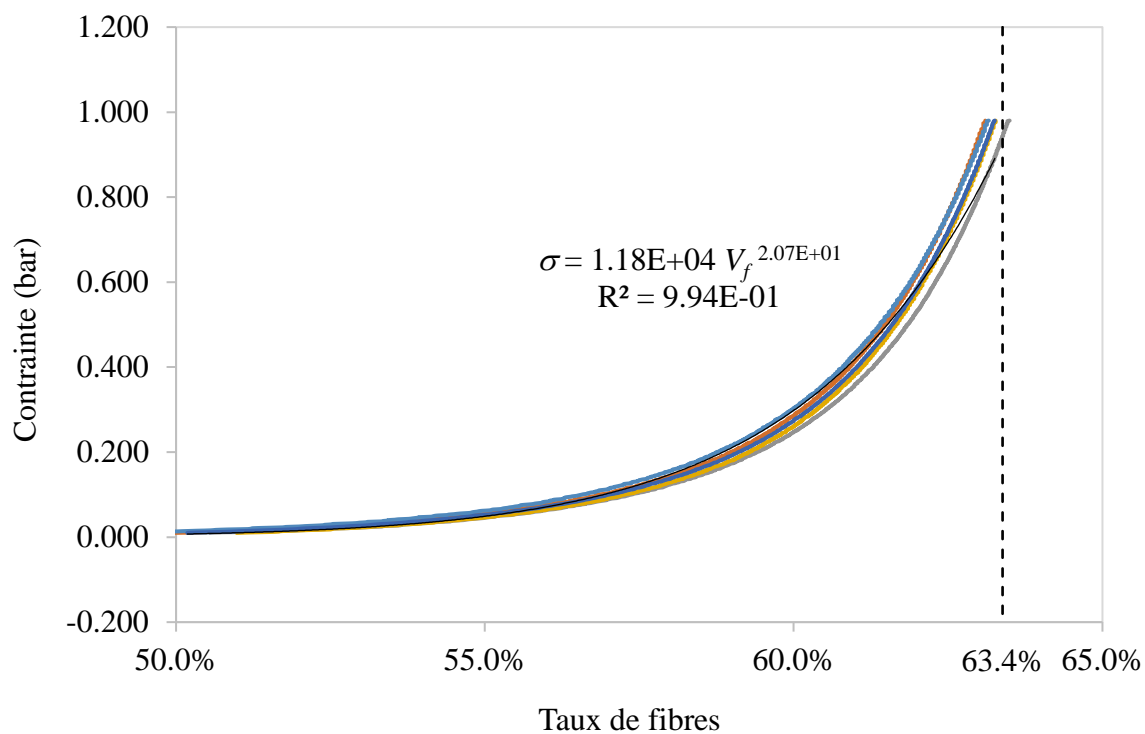


Figure 5-24. Modèle de compressibilité du renfort 1D

Cette conclusion est confirmée par les expériences d'infusion indirecte. La Figure 5-25 montre l'évolution simultanée du front d'écoulement de l'huile de silicone (colorée en rouge) dans le milieu de distribution et le renfort 1D lors d'une infusion indirecte réalisée à une pression de vide de 100 kPa. Elle démontre que l'écoulement est très rapide dans le milieu de distribution et très lent dans les fibres. Le milieu de distribution est donc complètement saturé avant que l'écoulement ne progresse dans les fibres ($t = 13$ s), qui sont imprégnées à travers l'épaisseur selon un motif erratique. On note alors une saturation partielle du renfort à $t = 40$ s et $t = 69$ s et l'avancement du front d'écoulement ne peut être suivi en pratique.

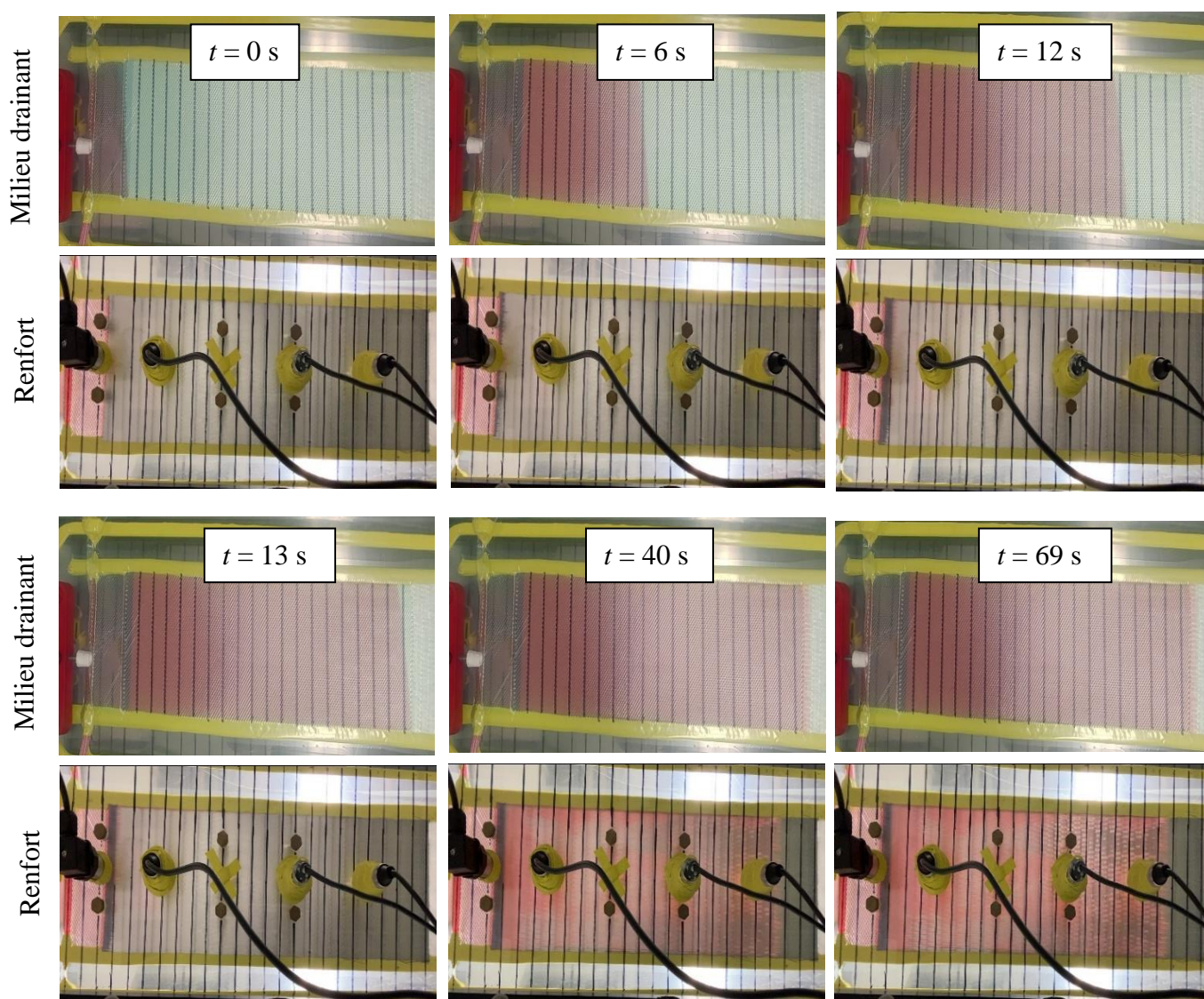


Figure 5-25. Position des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et le renfort 1D lors d'une infusion indirecte réalisée à une pression de vide de 100 kPa

Ce type d'écoulements insaturés à travers l'épaisseur doit impérativement être évité dans un contexte industriel, car il peut mener à l'apparition de défauts de fabrication majeurs comme les zones sèches et même à la mise au rebut des pièces fabriquées. Par conséquent, le renfort unidirectionnel ne peut être fabriqué avec succès par infusion de résine. Il ne pourra donc pas être caractérisé seul dans la suite de la recherche.

5.4 Mélange de renforts

Pour valider la démarche et évaluer l'influence de la perméabilité du renfort sur les résultats expérimentaux et numériques, le renfort unidirectionnel sera plutôt caractérisé conjointement avec le renfort bidirectionnel. À cette fin, 3 plis de renforts 1D seront alternés avec 2 plis de renfort 2D pour obtenir des échantillons relativement uniformes à travers leur épaisseur, mais possédant des valeurs intermédiaires de densité surfacique, de taux volumique de fibres et de perméabilité.

5.4.1 Compressibilité

Comme pour le renfort 2D, les échantillons constitués de plis alternatifs de renforts 1D et 2D sont soumis à des essais cycliques de compaction (Figure 5-26). Le comportement du mélange de renforts semble encore une fois se stabiliser à partir du troisième cycle de compaction à sec. Les cycles subséquents de saturation se superposent. Un modèle de compressibilité du renfort peut donc être déduit du troisième cycle de compaction à sec.

La Figure 5-27 illustre les troisièmes cycles obtenus pour 5 échantillons différents. Les renforts 2D utilisés dans l'élaboration des échantillons A (1) et A (2) proviennent de l'ancien lot A, tandis qu'ils proviennent du nouveau lot N pour les échantillons N (1), N (2) et N (3). Puisque les deux lots possèdent des modèles de compressibilité distincts, ces échantillons présentent aussi deux comportements différents en compaction. Les échantillons A atteignent un taux de fibres maximal de 55,5%, et les échantillons N un taux de fibres plus élevé de 57,3%. La répétabilité des essais est tout de même validée puisque les courbes obtenues avec chaque matériau se superposent.

Par conséquent, deux modèles de compressibilité de type puissance peuvent être calculés. Les modèles de la Figure 5-28 représentent fidèlement le comportement en compaction des deux renforts avec un coefficient de détermination de $R^2 = 0,999$ pour les échantillons provenant du lot A et de $R^2 = 0,998$ pour ceux provenant du lot N.

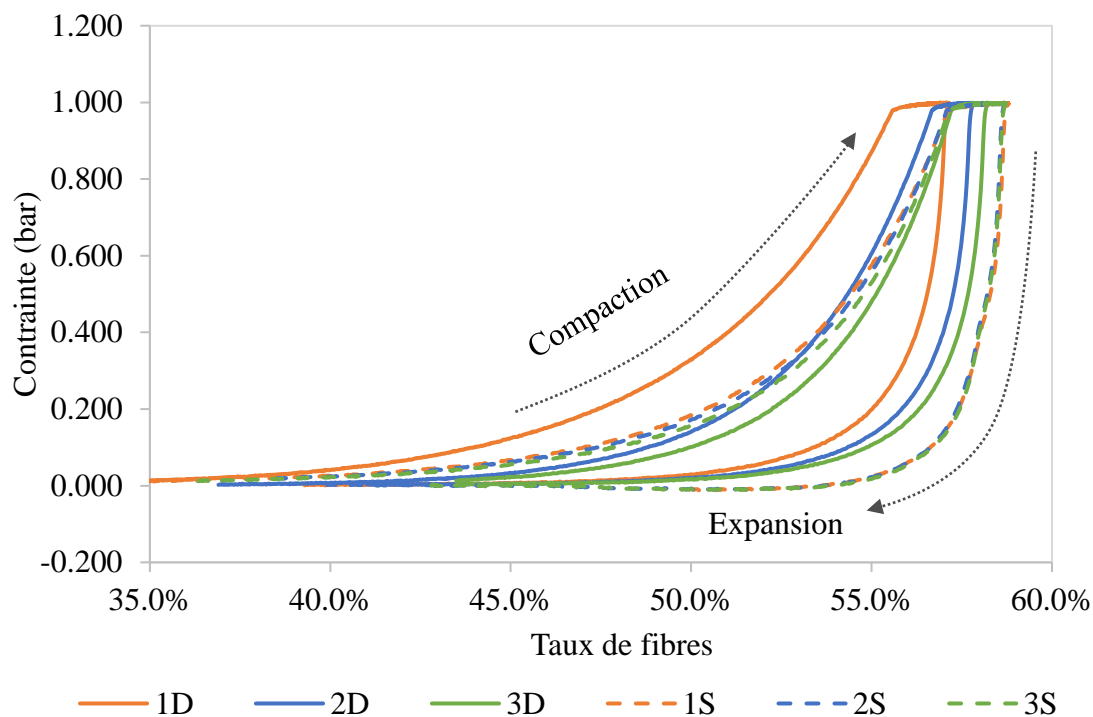


Figure 5-26. Courbes de compaction du mélange de renforts à sec et après lubrification

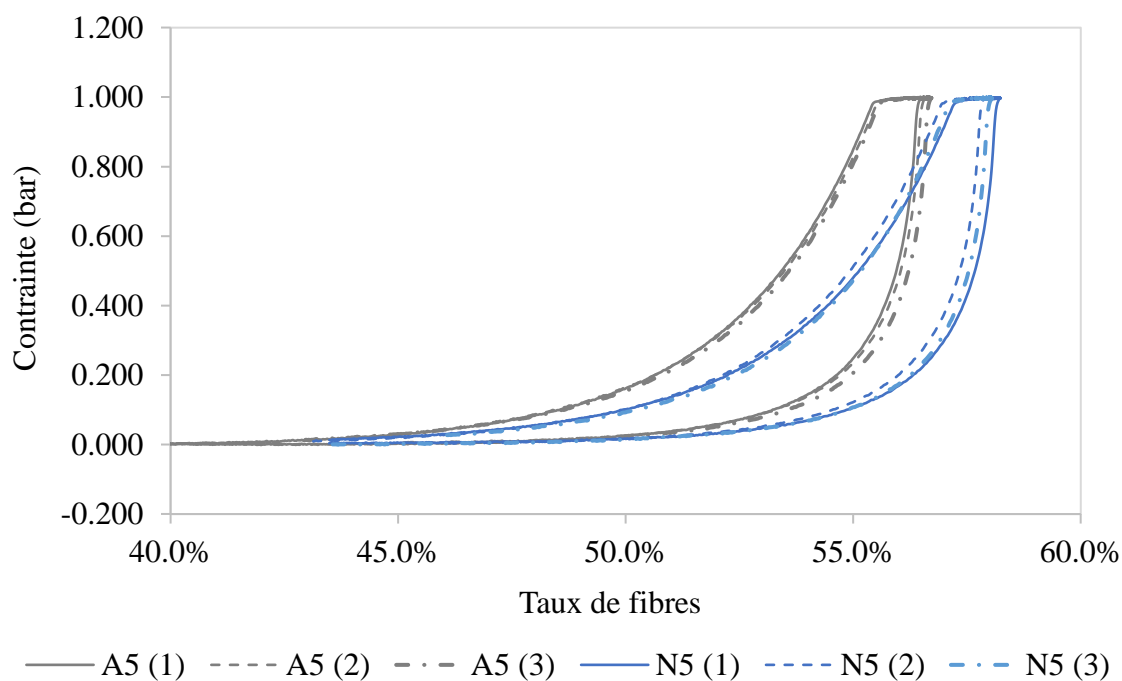


Figure 5-27. Troisième cycle de compaction à sec d'échantillons constitués de 3 plis de renfort 1D en alternance avec 2 plis de renforts 2D provenant de lots différents

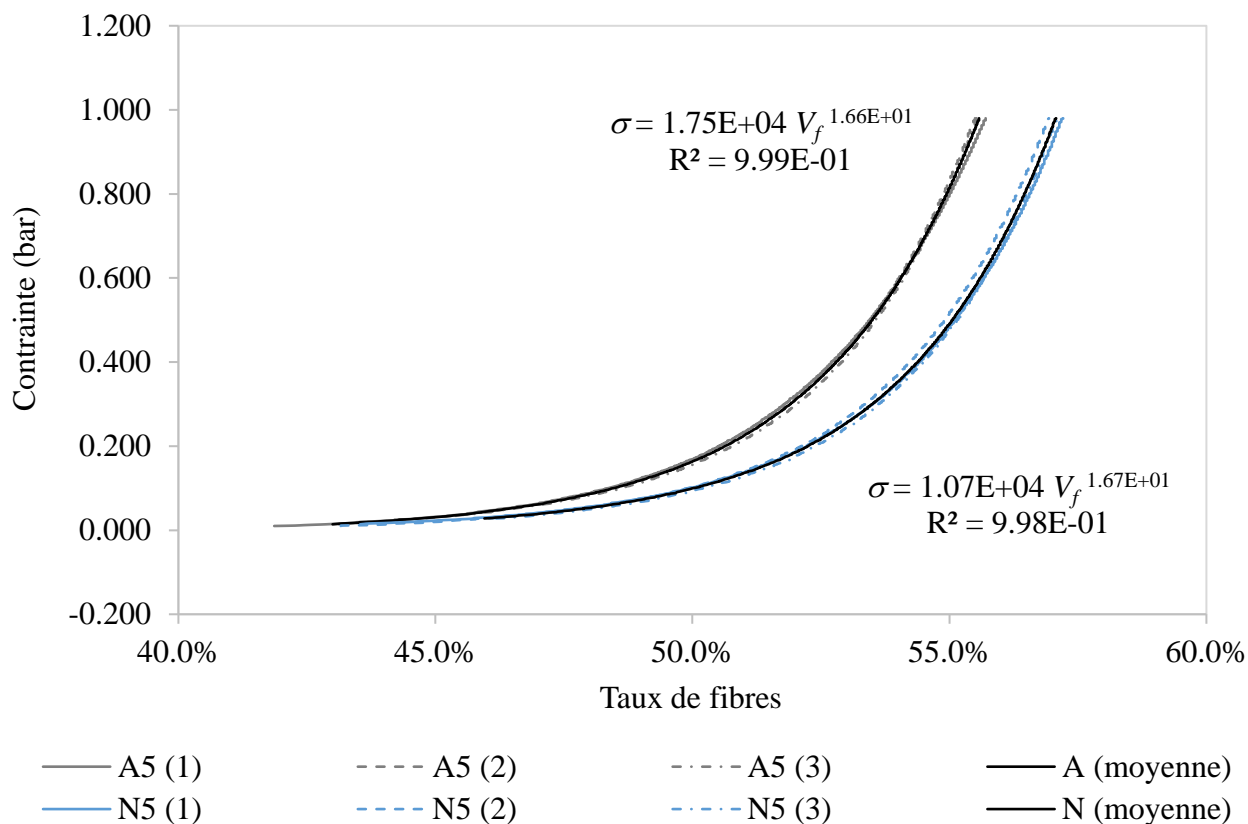


Figure 5-28. Modèles de compressibilité des échantillons constitués de 3 plis de renfort 1D en alternance avec 2 plis de renforts 2D provenant de lots différents

5.4.2 Infusion directe

Des infusions directes sont maintenant effectuées à des pressions de vide de 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa pour obtenir la perméabilité planaire flexible des échantillons à différents taux volumiques de fibres. La Figure 5-29 montre la position du front d'écoulement en fonction du temps lors de 4 infusions directes réalisées avec une alternance de 3 plis de renfort 1D et de 2 plis de renfort 2D provenant des lots différents, à une pression de vide de 75 kPa. À cette pression, l'épaisseur prédite par le modèle de compressibilité est de 2,375 mm pour les échantillons provenant du lot A et de 2,278 mm pour ceux élaborés à partir du lot N. Ceci correspond à des taux volumiques de fibres respectifs de 54,6% et 56,3 % et mène à des temps de remplissage différents.

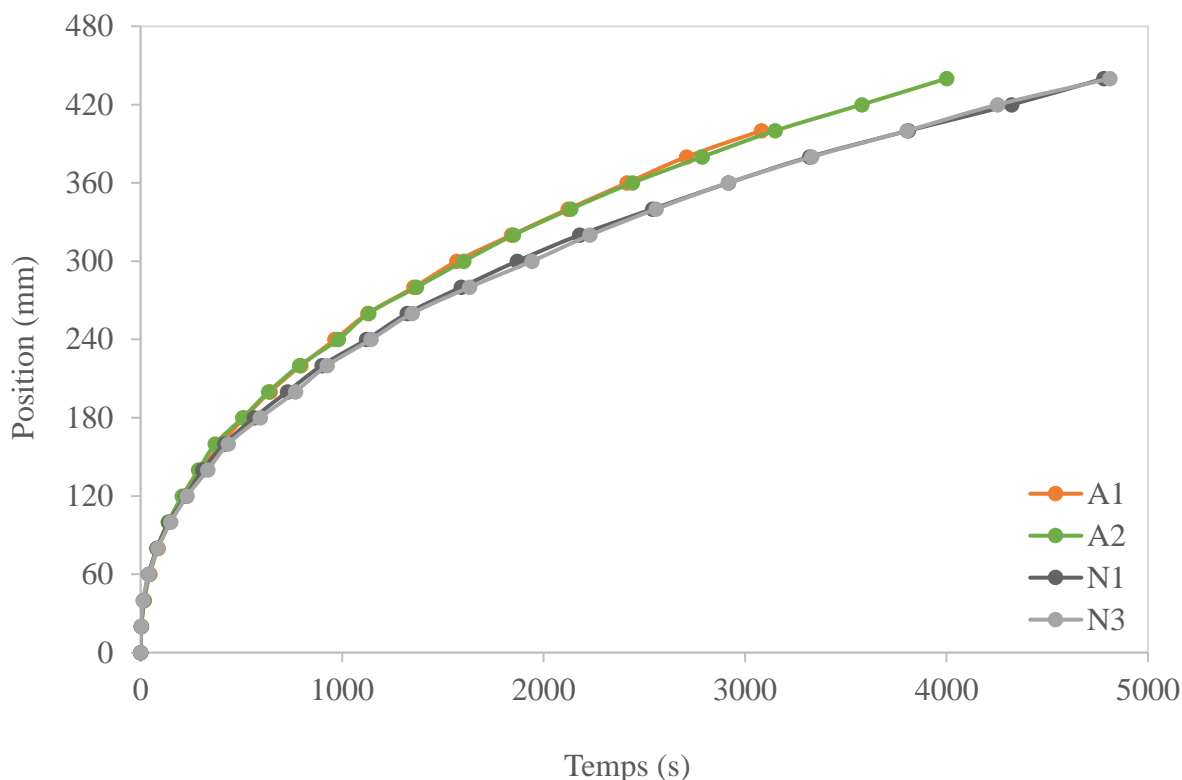


Figure 5-29. Position du front d'écoulement en fonction du temps lors de 4 infusions directes réalisées avec une alternance de 3 plis de renfort 1D, et de 2 plis de renfort 2D provenant de lots différents, à une pression de vide de 75 kPa

Les deux écoulements ci-dessus obéissent à la loi de Darcy, et la perméabilité interpolée prédit la position du front d'écoulement avec une précision suffisante (Figure 5-30). L'erreur finale sur le temps de remplissage est effectivement de 5,2% et 6,2% pour les renforts A et N, respectivement.

Des expériences similaires sont réalisées à des pressions de vide de 50 kPa et 100 kPa et la Figure 5-31 montre les fronts d'écoulement moyens obtenus. Le Tableau 5-4 résume les valeurs moyennes de pression d'infusion, d'épaisseur et de taux volumique de fibres, ainsi que les valeurs de perméabilité interpolée à partir de ces expériences. Enfin, la Figure 5-32 illustre le modèle de perméabilité planaire obtenu à partir des données du Tableau 5-4. Encore une fois, les valeurs de perméabilité mesurées avec les deux lots de renfort peuvent être représentées de manière satisfaisante avec le même modèle de type puissance, malgré les modèles de compressibilité distincts ($R^2 = 0,9176$).

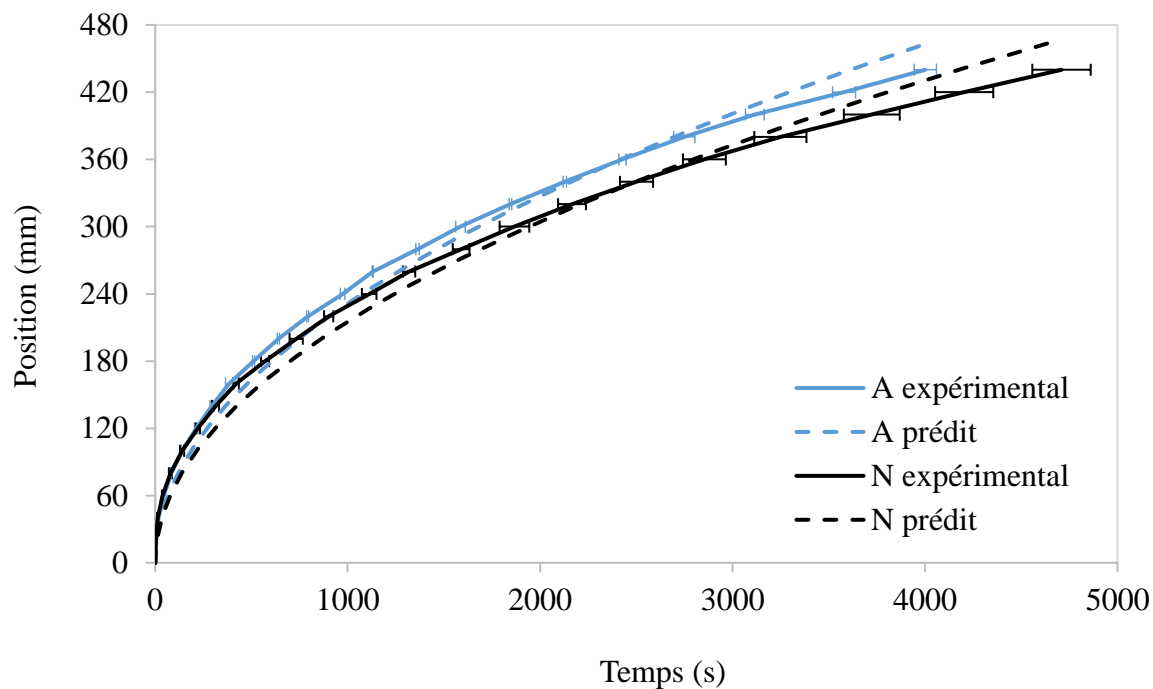


Figure 5-30. Fronts d'écoulement expérimentaux et lors des infusions directes réalisées avec une alternance de 3 plis de renfort 1D, et de 2 plis de renfort 2D provenant de lots différents, à une pression de vide de 75 kPa

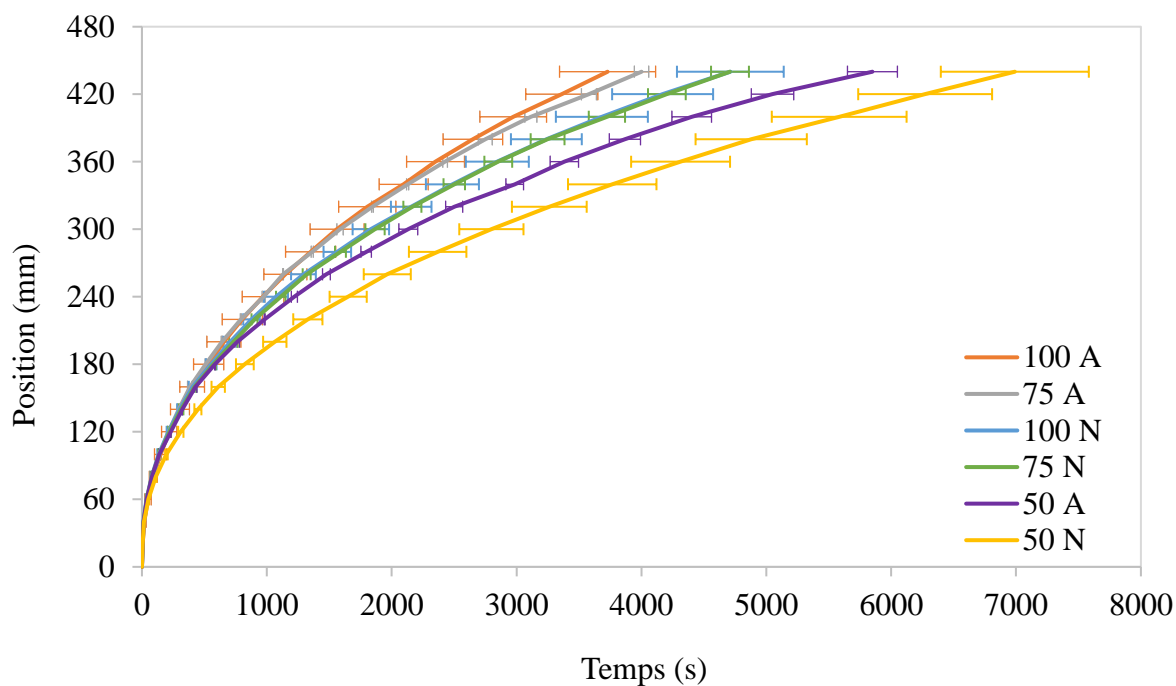


Figure 5-31. Position moyenne du front d'écoulement en fonction du temps lors des infusions directes du mélange de renforts à des pressions de vide de 100 kPa, 75 kPa et 50 kPa

Tableau 5-4. Valeurs moyennes de la pression d'infusion, de l'épaisseur, du taux volumique de fibres et de la perméabilité du mélange de renforts

Lot	Pression d'infusion	Épaisseur	Taux de fibres	Temps de remplissage	Perméabilité interpolée
	(kPa)	(mm)	(%)	(s)	(m ²)
A	49,61	2,429	53,4	4403	1,85E-11
	72,48	2,375	54,6	4001	1,63E-11
	92,91	2,333	55,5	3729	1,28E-11
N	49,40	2,328	55,0	5584	1,44E-11
	72,27	2,278	56,3	4709	1,36E-11
	94,07	2,239	57,3	4712	1,02E-11

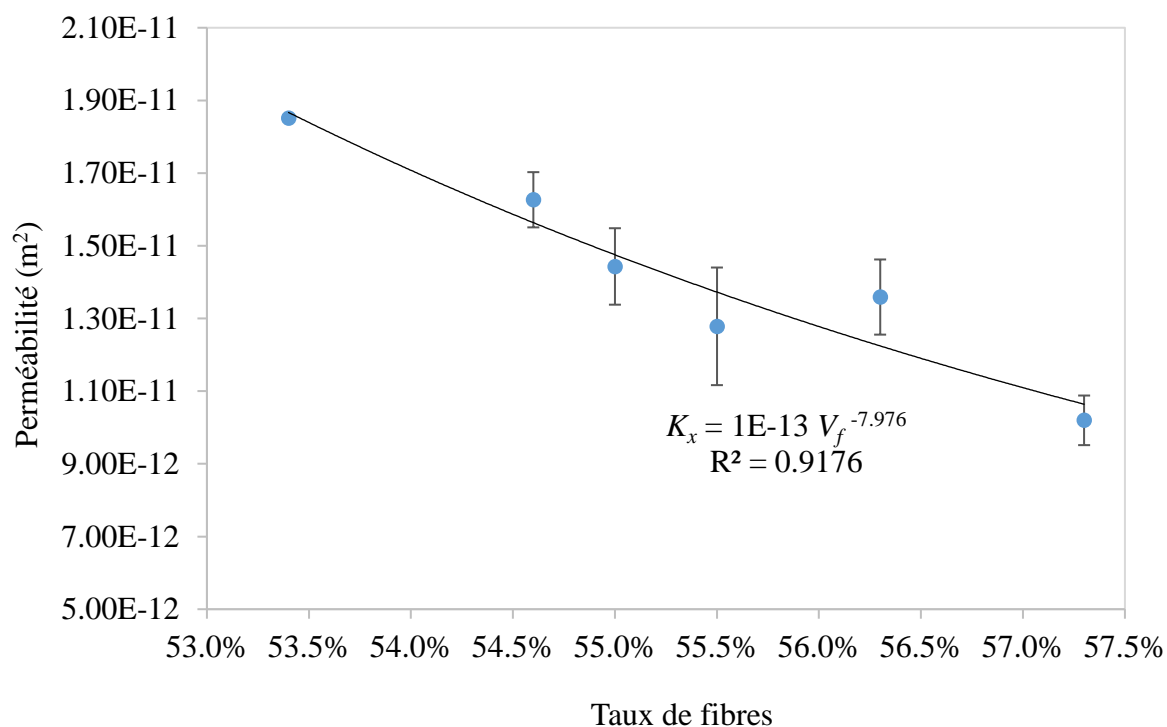


Figure 5-32. Modèle de perméabilité planaire flexible du mélange de renforts

Finalement, les modèles de perméabilité obtenus pour le renfort 2D et le mélange de renforts sont comparés à l'échelle logarithmique en ordonnée pour la perméabilité dans la Figure 5-33. Il en ressort que le renfort 2D possède un taux volumique de fibres plus faible que le mélange de renforts, et donc une perméabilité significativement plus élevée. À 75 kPa par exemple, les échantillons de renfort 2D provenant du lot N ont un taux volumique de fibres de $V_f = 42,1\%$, qui donne un temps de remplissage de $t = 773,5$ s et une perméabilité planaire interpolée $K_x = 1,03\text{E-}10$ m². Les échantillons contenant un mélange de renforts provenant du même lot possèdent un taux volumique de fibres plus élevé ($V_f = 56,3\%$) et donc une vitesse de remplissage 6 fois plus faible ($t = 4709$ s) et une perméabilité $K_x = 1,36\text{E-}10$ m², soit plus d'un ordre de grandeur plus faible. Ceci implique que la perméabilité du renfort 1D est d'autant plus faible, et explique davantage son comportement erratique en infusion indirecte.

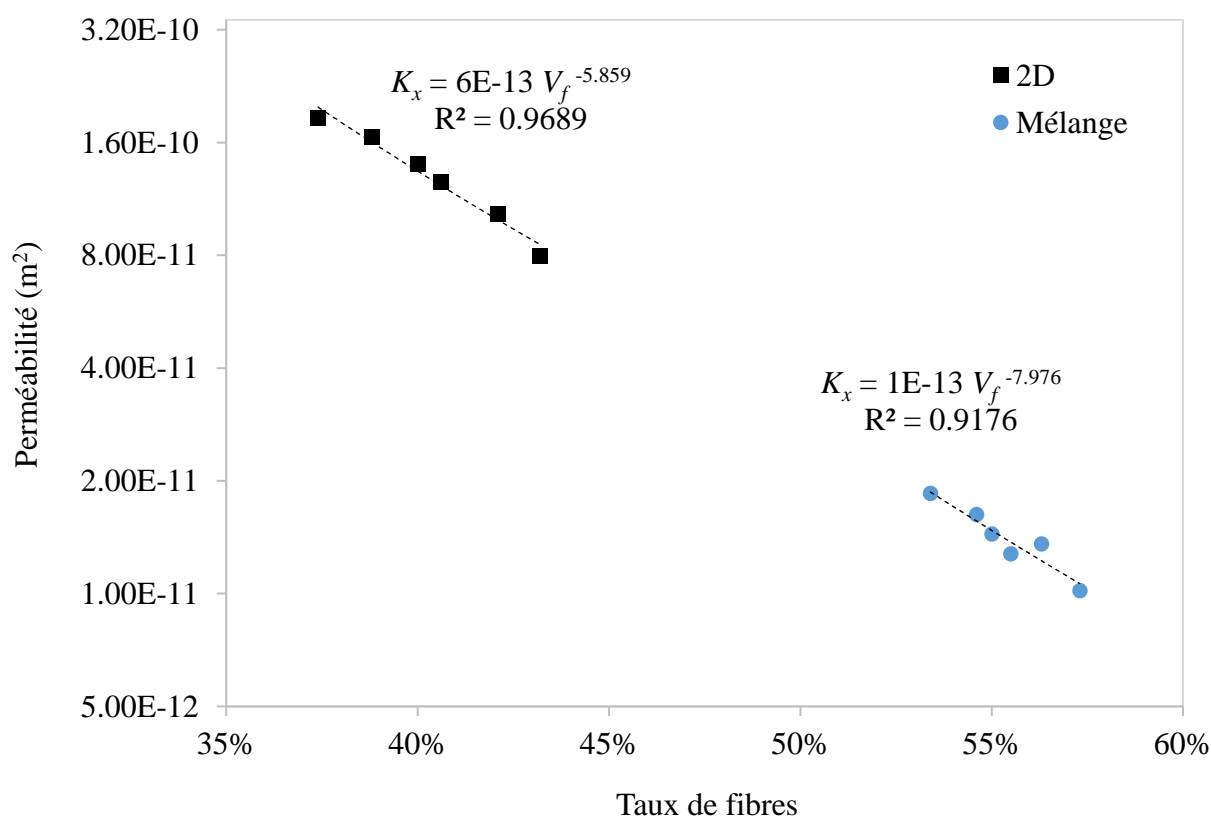


Figure 5-33. Comparaison des modèles de perméabilité planaire flexible du renfort 2D et du mélange de renforts

5.4.3 Infusion indirecte

Pour finaliser la caractérisation expérimentale des renforts fibreux, des expériences d'infusion indirecte sont réalisées sur le mélange de renforts aux trois pressions de vide considérées. Ces infusions serviront à identifier la perméabilité transverse apparente du mélange de renforts par simulation numérique. Les Figures 5-34 à 5-36 présentent les positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et le mélange de renforts lors des infusions indirectes réalisées à des pressions de vide respectives de 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa. Trois expériences sont réalisées à chaque pression de vide et les écarts types sur les temps de remplissage sont représentés comme des barres d'erreur horizontales. Les échantillons ont été élaborés sans discernement à partir des lots A ou N du renfort 2D. Une bonne répétabilité est tout de même observée et le lot de provenance du renfort 2D ne semble avoir aucun impact sur les résultats puisque les écarts-types restent faibles.

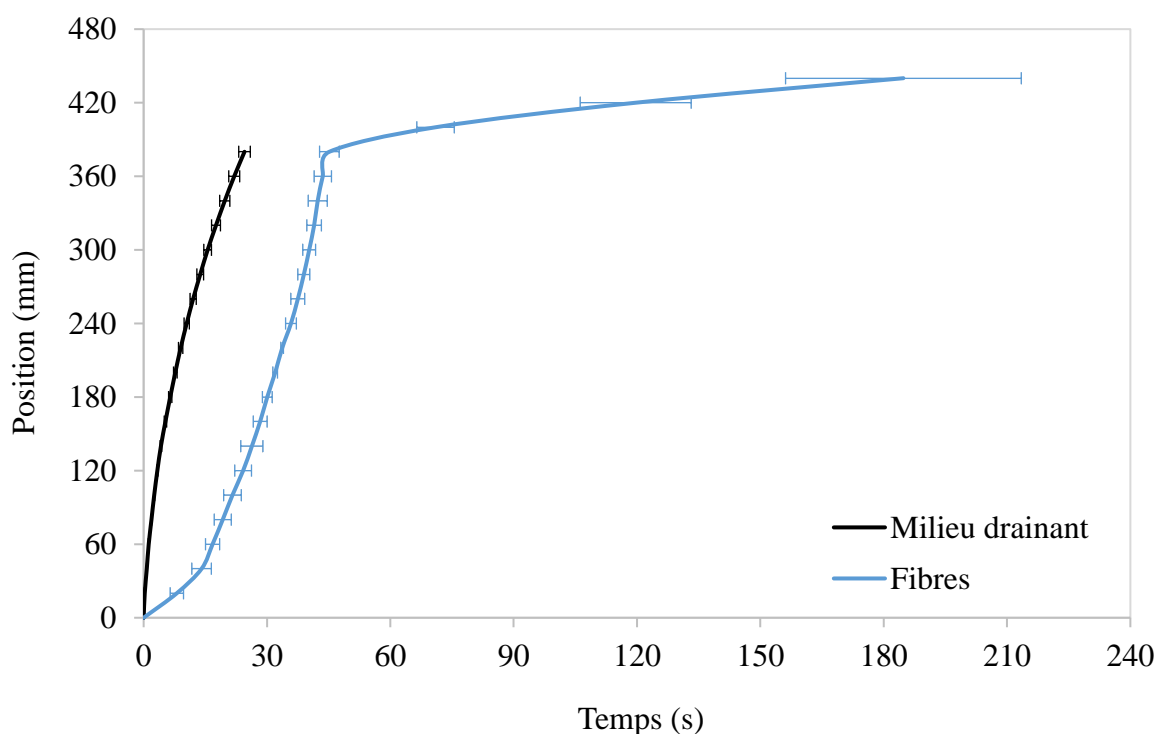


Figure 5-34. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et le mélange de renforts lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa

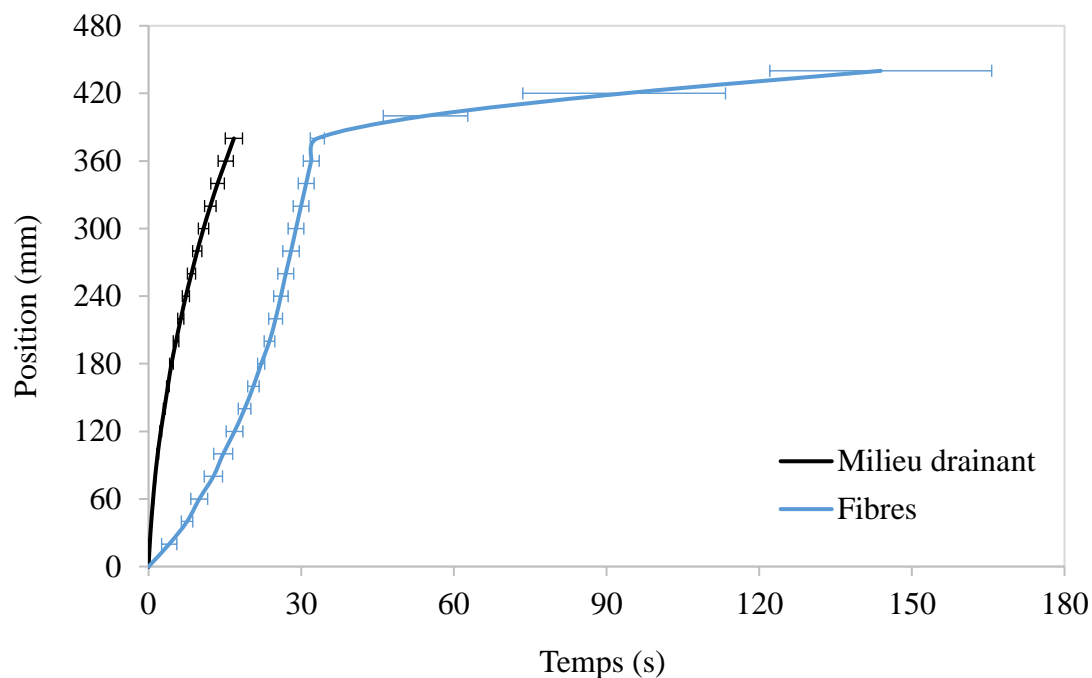


Figure 5-35. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et le mélange de renforts lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa

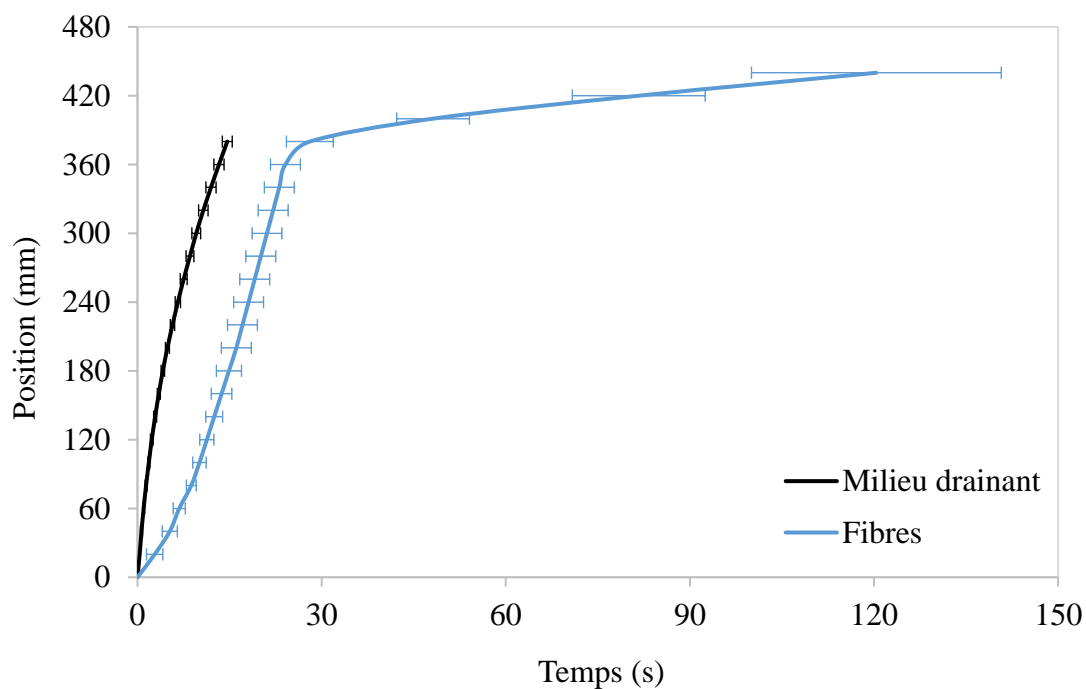


Figure 5-36. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et les échantillons constitués de 3 plis de renfort 1D alternés avec 2 plis de renfort 2D lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa

Les conclusions tirées des infusions indirectes du mélange de renforts sont similaires à celles notées avec le renfort 2D. En effet, le milieu drainant est imprégné plus rapidement que les fibres en raison de sa perméabilité relativement élevée. La distance entre le front d'écoulement dans le milieu drainant et dans le renfort semble aussi se stabiliser après un certain temps, mais cet écart est plus élevé que lors de l'infusion indirecte du renfort 2D. Les temps de remplissage du mélange de renforts sont également plus élevés que ceux du renfort 2D infusé aux mêmes pressions de vide, en raison de la perméabilité plus faible du renfort 1D.

Comme pour le renfort 2D, des infusions supplémentaires sont effectuées avec des échantillons d'épaisseur différente pour vérifier que les effets d'emboîtement sont moyennés, et que les perméabilités mesurées avec un certain nombre de plis permettent de prédire les temps de remplissage avec un nombre de plis supérieur. À cette fin, des échantillons constitués de 6 plis de renfort 1D alternés avec 5 plis de renfort 2D sont imprégnés par infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa. Les résultats moyens de ces expériences sont présentés dans la Figure 5-37.

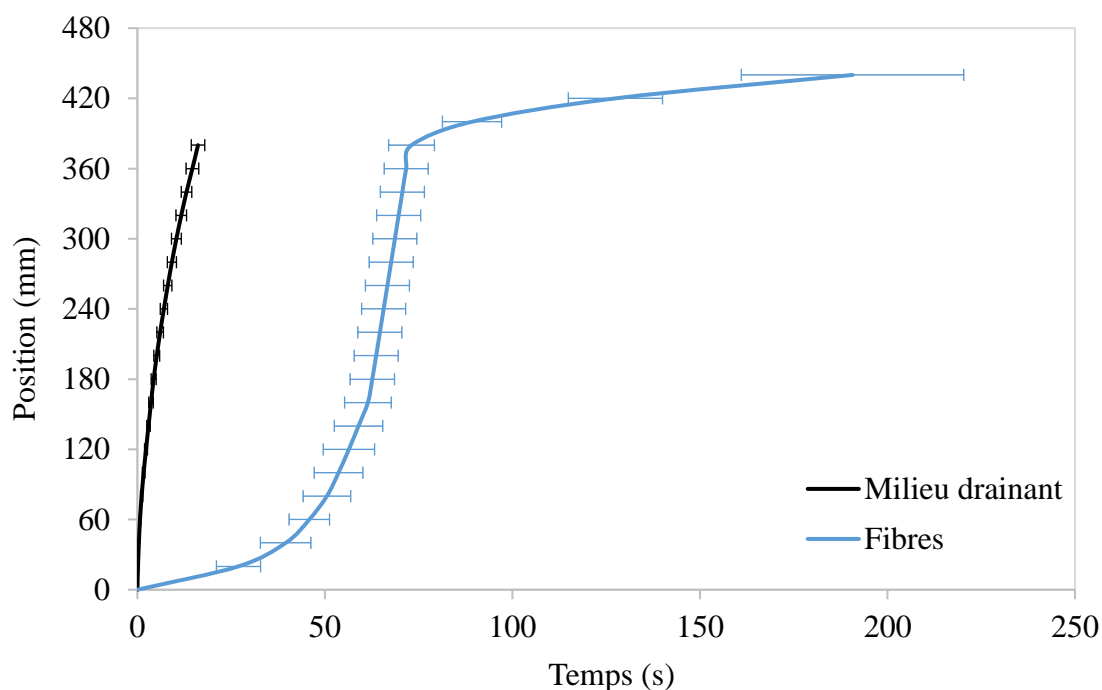


Figure 5-37. Positions moyennes des fronts d'écoulement dans le milieu drainant et les échantillons constitués de 6 plis de renfort 1D alternés avec 5 plis de renfort 2D, lors de l'infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa

Noter que la distance entre le front d'écoulement dans le milieu drainant et dans le renfort ne se stabilise jamais dans le cas de l'infusion indirecte de 11 plis du mélange de renforts. En effet, le milieu drainant est entièrement imprégné après seulement 16,2 s, avant que l'écoulement ne commence à progresser dans les fibres. Les fibres recouvertes par le milieu drainant sont alors très rapidement imprégnées à travers leur épaisseur (Figure 5-38, $t = 43,4$ s et 56,9 s). L'écoulement est donc partiellement saturé et la position du front expérimental difficile à déterminer visuellement.

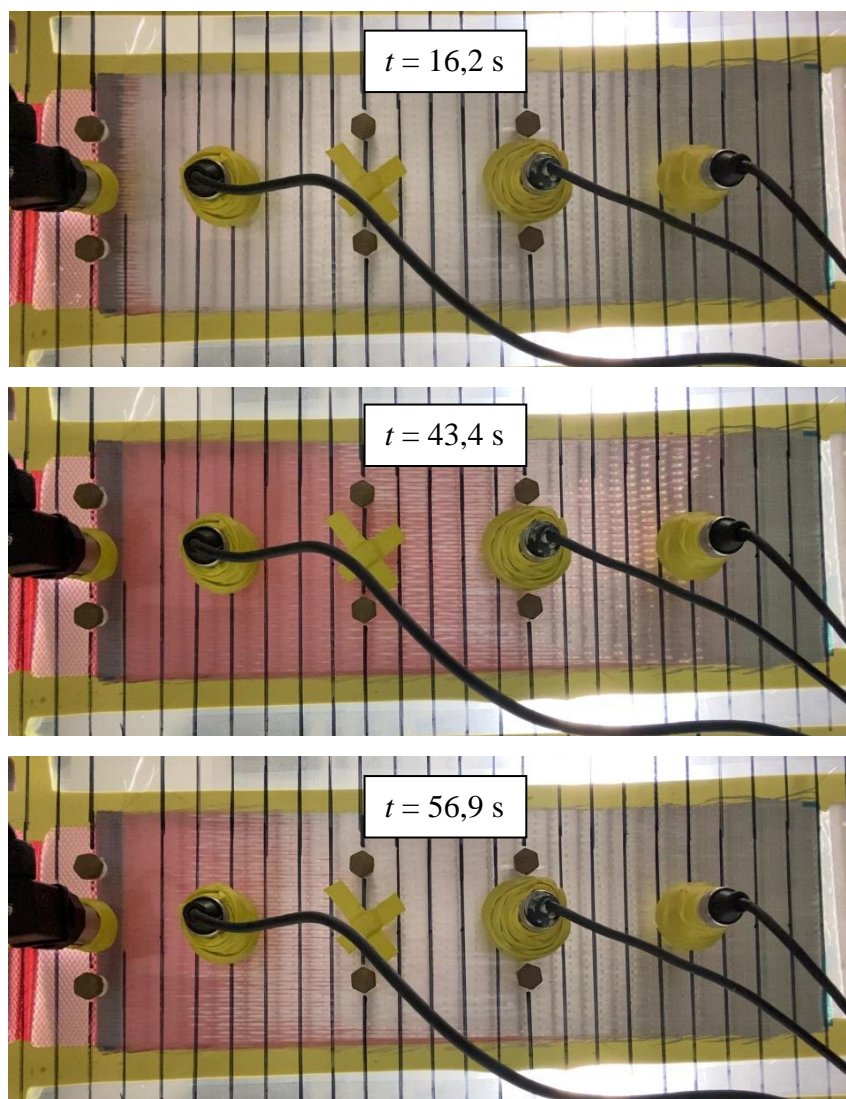


Figure 5-38. Positions du front expérimental dans un échantillon de 11 plis du mélange de renforts, lors d'une infusion indirecte à une pression de vide avoisinant 100 kPa

Ce comportement rappelle celui noté dans la section 5.3 lors des expériences d'infusion indirecte du renfort 1D. Il indique que l'on atteint les limites du procédé d'infusion indirecte de résine avec des échantillons possédant une perméabilité planaire aussi faible et une épaisseur aussi élevée. En effet, ce type d'écoulements insaturés à travers l'épaisseur doit être évité, car il peut mener à l'apparition de défauts de fabrication.

L'allure des fronts d'écoulement dans le renfort 2D et le mélange de renforts demeure tout de même similaire, même pour les échantillons d'épaisseur supérieure. Les mêmes temps caractéristiques de l'infusion indirecte peuvent donc être relevés, à savoir les temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes par ce dernier et du renfort entier. Par conséquent, les temps du Tableau 5-5 serviront comme référence lorsque des simulations numériques seront effectuées pour identifier la perméabilité transverse du mélange de perméabilité. Cette perméabilité sera alors choisie de sorte à minimiser l'erreur entre les temps de remplissage numériques et expérimentaux.

Tableau 5-5. Temps de remplissage caractéristiques du milieu drainant, des fibres recouvertes par le milieu drainant, et du renfort entier, lors des infusions indirectes du mélange de renfort

Pression d'infusion	Milieu drainant	Fibres recouvertes	Renfort (total)
(kPa)	(s)	(s)	(s)
50	24,5	43,6	184,4
75	16,8	32,0	143,9
100	14,6	24,1	120,4
100 (11 plis)	16,2	71,7	190,7

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, l'approche expérimentale proposée a été employée pour caractériser les matériaux étudiés. Les modèles de compressibilité et de perméabilité planaire flexible des matériaux ont été déterminés à partir des résultats expérimentaux. La progression dans le temps des fronts d'écoulement expérimentaux en infusion indirecte a également été obtenue. Ceci permettra dans la suite de l'analyse d'identifier la perméabilité transverse apparente par simulation numérique.

5.5.1 Milieu de distribution

Le milieu de distribution a fait l'objet d'essais de compaction cyclique en machine universelle qui ont mis en évidence son comportement viscoélastique. Une loi de puissance a ensuite été identifiée pour calculer le taux volumique de fibres du milieu drainant en fonction de la pression. Des expériences d'infusion directe ont ensuite été réalisées avec la séquence d'empilement de la Figure 3-9 afin d'obtenir la perméabilité flexible du milieu drainant dans des conditions représentatives de la fabrication par infusion de résine à des pressions de vide de 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa. Cette perméabilité diffère de celle mesurée en moule rigide, car elle prend implicitement compte des phénomènes de couplage hydromécanique et des effets d'emboîtement avec le renfort fibreux et la bâche à vide. Certaines difficultés expérimentales ont toutefois été notées :

- Le temps de remplissage du milieu drainant est très sensible aux conditions expérimentales de l'infusion directe. Plusieurs expériences sont donc nécessaires pour vérifier la répétabilité des résultats.
- Le remplissage du milieu drainant n'est pas parfaitement modélisé par la loi de Darcy en raison des variations de la pression au port d'injection. Deux valeurs distinctes de perméabilité flexible peuvent donc être calculées : une perméabilité à pression variable qui permet de prédire l'écoulement si l'on connaît les variations réelles lors de l'infusion, et une perméabilité déterminée à partir d'une pression d'infusion constante qui correspond à la différence entre la pression de vide et la pression maximale à la fin de l'imprégnation.

Les expériences d'infusion directe du milieu drainant doivent par conséquent être reproduites par simulation pour les deux valeurs de perméabilité calculées pour étudier l'influence de la méthode d'interpolation sur les prédictions numériques des temps de remplissage.

5.5.2 Renfort 2D

L'approche expérimentale proposée a ensuite permis de caractériser le renfort bidirectionnel. Les essais de compressibilité réalisés avec des échantillons provenant de deux lots d'âge différent ont montré que le vieillissement du renfort pouvait affecter significativement son comportement en compaction. En effet, deux modèles de compressibilité différents ont été obtenus pour les deux lots de renfort 2D et une attention particulière doit être portée au choix du modèle de compressibilité lors des simulations numériques. En revanche, les essais réalisés avec des échantillons constitués de 5 ou 10 plis de renfort 2D ont révélé que le comportement en compaction semble indépendant du nombre de plis. Les effets d'emboîtement sont donc moyennés et les lois de puissance obtenues modélisent fidèlement le taux volumique de fibres en fonction de la pression pour des échantillons d'épaisseur initiale différente. Par conséquent, il est possible de caractériser des échantillons constitués d'un faible nombre de plis, pour ensuite prédire l'écoulement dans des préformes d'une plus grande épaisseur. Ceci permettra de réduire les coûts de caractérisation pour des pièces d'épaisseur variable, comme les longerons de pales de d'éolienne.

Les infusions directes ont ensuite permis de calculer la perméabilité flexible du renfort 2D à des pressions d'infusion constantes proches de 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa. Contrairement au milieu de distribution, il n'est pas nécessaire de tenir compte des variations éventuelles de pression au port d'injection lors de l'infusion directe du renfort 2D, car ces variations n'exercent pas une influence significative en raison du temps de remplissage relativement plus élevé. En outre, le modèle de type puissance permet de représenter de manière satisfaisante les deux lots de renfort, car leur architecture reste identique malgré des modèles de compressibilité distincts.

Les infusions indirectes ont finalement montré que l'écoulement dans le renfort 2D ne peut être prédit analytiquement par la loi de Darcy en raison des échanges d'huile à travers l'épaisseur de la préforme. En effet, l'allure du front d'écoulement n'est pas quadratique dans le renfort fibreux et aucune valeur de perméabilité ne peut en être déduite. Cependant, trois temps de remplissage caractéristiques peuvent être notés pour identifier la perméabilité transverse apparente par simulation numérique : le temps de remplissage total du milieu drainant, le temps de remplissage des fibres recouvertes par le milieu drainant et enfin, le temps de remplissage total du renfort. La perméabilité transverse apparente, qui peut différer de celle mesurée en moule rigide, sera donc choisie de sorte à minimiser les erreurs de prédiction de ces temps caractéristiques.

5.5.3 Mélange de renforts

Le renfort 1D n'a pu être caractérisé par la même approche expérimentale, car il ne peut être convenablement imprégné par infusion indirecte en raison de son taux volumique de fibres élevé qui se situe à la limite des méthodes conventionnelles de fabrication par infusion indirecte de résine. Il a donc été caractérisé conjointement avec le renfort 2D pour obtenir des échantillons possédant des valeurs intermédiaires de densité surface, de taux volumique de fibres et de perméabilité.

Des échantillons constitués de 3 plis de renfort unidirectionnel disposés en alternance avec 2 plis de renfort bidirectionnel provenant des deux lots différents ont été soumis à des essais cycliques de compaction. Deux modèles distincts de compressibilité de type puissance ont encore une fois été obtenus en raison du vieillissement du renfort 2D. Des infusions directes ont ensuite été réalisées afin d'identifier un modèle de perméabilité planaire flexible du mélange de renforts. Comme précédemment, en raison de leur architecture identique, un seul modèle de type puissance représente de manière satisfaisante les valeurs de perméabilité planaire flexible des deux lots de renfort.

Finalement, les expériences d'infusion indirecte réalisées avec des échantillons similaires constitués de 3 plis de renfort 1D alternés avec 2 plis de renfort 2D ont permis d'identifier les trois temps de remplissage caractéristiques aux différentes pressions de vide considérées. Cependant, lorsque des échantillons de 11 plis ont été infusés, la position du front d'écoulement dans le renfort était difficile à déterminer, car l'écoulement était partiellement saturé dans les fibres recouvertes par le milieu drainant. Ceci indique que, lorsque l'épaisseur de la préforme dépasse un certain seuil, les limites du procédé d'infusion indirecte sont atteintes pour des renforts possédant une perméabilité planaire aussi faible. L'évolution du front d'écoulement demeure tout de même similaire et les temps de remplissage caractéristiques serviront dans le chapitre suivant à valider par l'identification de la perméabilité transverse apparente du mélange de renforts.

CHAPITRE 6 SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Les simulations numériques présentées dans ce chapitre ont pour objectif de vérifier la cohérence des mesures de perméabilité planaire flexible du milieu de distribution, du renfort 2D et du mélange de renforts afin d'identifier ensuite la perméabilité transverse apparente des renforts. Des analyses de sensibilité sont également effectuées pour identifier les paramètres critiques, et une stratégie est proposée pour simuler la fabrication des longerons de pale d'éolienne.

6.1 Milieu de distribution

Les expériences d'infusion directe du milieu drainant sont reproduites par simulation aux pressions de vide de 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa pour vérifier la cohérence des mesures de perméabilité. Afin d'étudier l'influence de la méthode d'interpolation employée, deux simulations sont effectuées pour chaque pression de vide, l'une en considérant la perméabilité à pression constante du Tableau 5-1, et l'autre en considérant la perméabilité à pression variable. En d'autres termes, ces simulations ont pour objectif de vérifier si les deux types de perméabilités interpolées permettent de reproduire complètement les fronts mesurés. Les viscosités moyennes calculées lors des expériences d'infusion directe à chaque pression de vide sont fournies en entrée au logiciel. L'épaisseur et le taux volumique de fibres du milieu de distribution sont calculés à partir du modèle de compressibilité de la Figure 5-2. Le Tableau 6-1 résume les paramètres de simulation, ainsi que les erreurs sur le temps de remplissage prédit.

Tableau 6-1. Paramètres des simulations d'infusion directe du milieu de distribution, et erreurs sur les temps de remplissage obtenus

Viscosité de l'huile	Épaisseur	Taux de fibres	Pression d'infusion	Perméabilité planaire	Erreur
(Pa.s)	(mm)	(%)	(kPa)	(m ²)	(%)
0,09732	1,009	12,26	50,12	6,50E-09	16,9
			f (t)	1,10E-08	3,5
0,09706	1,003	12,32	73,37	6,39E-09	16,4
			f (t)	1,04E-08	-0,9
0,09669	0,999	12,36	93,51	5,54E-09	11,4
			f (t)	8,56E-09	-4,6

Le Tableau 6-1 montre que les simulations à pression variable prédisent correctement les temps de remplissage du milieu drainant, alors que les simulations à pression constante semblent le surestimer systématiquement. La Figure 6-1 compare en guise d'exemple le front expérimental obtenu à une pression de vide de 50 kPa aux prédictions des 2 types de simulation, montrant que l'erreur totale demeure assez faible sur l'ensemble de l'écoulement même dans le cas des simulations à pression constante. Ceci s'explique par le fait que la perméabilité à pression constante est obtenue par la méthode des moindres carrés. Ainsi, au début de l'infusion, lorsque le débit est très élevé et que la pression au port d'injection est encore faible, la perméabilité est surestimée pour compenser les chutes de pression. Par la suite, lorsque la pression augmente, la perméabilité est réduite pour minimiser l'erreur moyenne de l'écoulement prédit par la loi de Darcy. La position du front d'écoulement est donc surestimée au début de l'infusion, puis sous-estimée par la suite, mais l'erreur totale reste faible sur l'ensemble de l'écoulement.

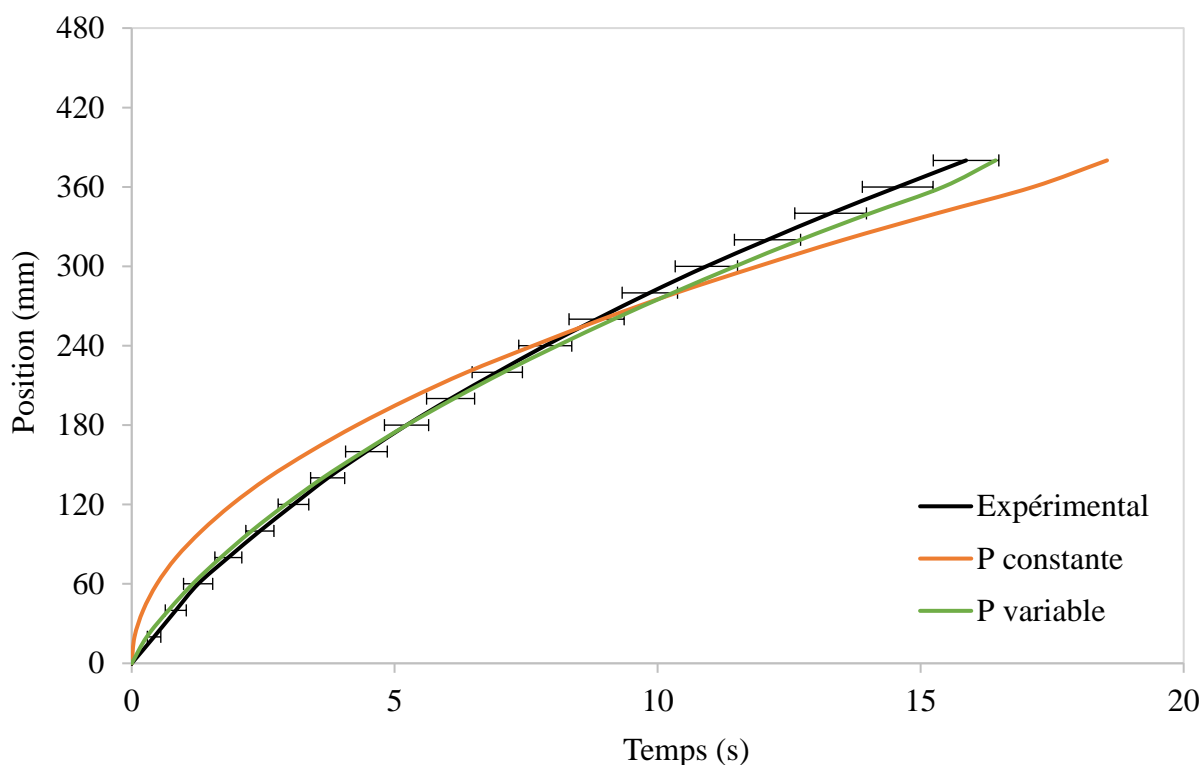


Figure 6-1. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion directe du renfort 2D à une pression de vide de 50 kPa et fronts prédits numériquement à pression constante et variable

Par conséquent, si les variations de pression lors de l'écoulement sont connues, il est préférable de prédire la position du front avec la perméabilité calculée à partir de la pression réelle au port d'injection. Lorsque l'on désire simuler une infusion indirecte dans un contexte industriel, ces variations de pression ne sont généralement pas connues avant la simulation. La perméabilité interpolée à pression constante peut alors fournir une approximation suffisante de l'évolution du front d'écoulement dans le temps.

6.2 Renfort 2D

6.2.1 Infusions directes

De manière similaire, les infusions directes du renfort 2D sont simulées pour vérifier la cohérence de son modèle de perméabilité planaire. Une simulation est effectuée pour chaque lot du renfort et chaque pression de vide pour un total de 6 simulations (Tableau 6-2). Les viscosité moyennes calculées lors des expériences d'infusion directe sont fournies en entrée au logiciel de simulation. L'épaisseur et le taux de fibres des 2 lots de renfort sont calculés à partir de leurs modèles de compressibilité (Figure 5-11). Les simulations sont effectuées à pression d'infusion constante, car le front expérimental dans le renfort 2D n'est pas significativement affecté par les variations de la pression au début de l'infusion en raison de son temps de remplissage relativement élevé.

Tableau 6-2. Paramètres des simulations d'infusion directe du renfort 2D, et erreurs obtenues sur le temps de remplissage

Lot	Viscosité de l'huile	Pression d'infusion	Épaisseur	Taux de fibres	Perméabilité planaire	Erreur
	(Pa.s)	(kPa)	(mm)	(%)	(m ²)	(%)
A	0,09670	48,68	1,709	37,4	1,87E-10	-6,5
	0,09595	74,49	1,646	38,8	1,66E-10	-8,2
	0,09570	94,49	1,597	40,0	1,40E-10	-4,5
N	0,09600	51,61	1,545	40,6	1,25E-10	-8,1
	0,09873	74,62	1,493	42,1	1,03E-10	9,2
	0,09719	93,28	1,453	43,2	7,96E-11	-1,5

Le Tableau 6-2 montre que les erreurs de prédiction ne dépassent pas 10% et sont relativement faibles compte tenu de l'utilisation de la perméabilité interpolée à pression constante. Le modèle de perméabilité planaire du renfort 2D est donc validé.

6.2.2 Infusions indirectes

Des simulations d'infusion indirecte peuvent maintenant débiter pour identifier la perméabilité transverse apparente du renfort 2D. Une analyse de convergence doit cependant être réalisée pour choisir la taille optimale du maillage. En effet, l'écoulement en infusion indirecte est bidimensionnel et l'épaisseur des matériaux est beaucoup plus faible que leur longueur. Le maillage doit donc être suffisamment raffiné pour prédire adéquatement les écoulements à travers l'épaisseur, mais les temps de calcul peuvent rapidement devenir prohibitifs lorsque le nombre d'éléments augmente.

6.2.2.1 Analyse de convergence

Le Tableau 6-3 résume les paramètres des simulations d'analyse de convergence pour les infusions indirectes du renfort 2D. La viscosité de l'huile, la pression d'infusion, les épaisseurs, les taux volumiques de fibres et les perméabilités planaires proviennent des résultats expérimentaux moyens lors de l'infusion du renfort 2D à des pressions de vide avoisinant 75 kPa. Les perméabilités transverses sont estimées ici pour les besoins de l'analyse.

Tableau 6-3. Paramètres de l'analyse de convergence réalisée pour les infusions indirectes du renfort 2D, à une pression de vide avoisinant 75 kPa

Viscosité de l'huile	Pression d'infusion	Matériau	Épaisseur	Taux de fibres	Perméabilité planaire	Perméabilité transverse
(Pa.s)	(kPa)		(mm)	(%)	(m ²)	(m ²)
0,09732	71,00	MD	1,003	12,32	6,39E-09	6,39E-09
		Renfort	1,493	42,1	1,03E-10	1,03E-12

Pour débiter l'analyse de convergence, la taille du maillage est choisie de sorte qu'il n'y ait qu'un seul élément à travers l'épaisseur du milieu de distribution. Elle est ensuite réduite pour qu'il y ait deux éléments, puis 3, 5, 9, et finalement 18 éléments à travers son épaisseur. Le Tableau 6-4 présente l'influence de la taille du maillage sur le nombre d'éléments, le temps CPU, et les 3 temps caractéristiques de l'infusion indirecte tels qu'identifiés dans la section 5.2.3, c'est-à-dire le temps de remplissage total du milieu drainant, le temps de remplissage des fibres recouvertes par le milieu drainant et le temps de remplissage total du renfort.

Tableau 6-4. Influence de la taille du maillage sur le nombre d'éléments et les temps CPU s et caractéristiques de l'infusion indirecte du renfort 2D, à une pression de vide avoisinant 75 kPa

# éléments à travers l'épaisseur du MD	# d'éléments	Temps CPU	Temps de remplissage		
			Milieu drainant	Fibres recouvertes	Renfort (total)
		(s)	(s)	(s)	(s)
1	2 828	45	24,92	48,71	27,34
2	6 665	147	25,44	48,35	27,15
3	26 349	400	25,34	48,10	27,39
5	31 860	1221	25,41	48,04	27,30
9	239 390	10200	25,26	47,93	27,23
18 (référence)	944 988	80000	24,78	47,93	27,36

Pour faciliter l'analyse, les temps du Tableau 6-4 sont normalisés relativement aux données obtenues avec le maillage le plus raffiné. La Figure 6-2 présente ces temps normalisés en fonction du nombre d'éléments à travers l'épaisseur. On peut en conclure que les erreurs sur les temps de remplissage sont relativement faibles, même dans le cas du maillage le plus grossier où l'erreur relative maximale est de 3,4 %. Des oscillations des temps de remplissage prédits sont toutefois observées avec les maillages les plus grossiers, avant que les prédictions ne convergent à partir de la troisième simulation. En outre, le temps CPU augmente exponentiellement, et atteint un temps équivalent à plus de 22 heures pour le maillage le plus raffiné. Par conséquent, le maillage de 3 éléments à travers l'épaisseur du milieu drainant semble combiner de manière optimale un temps CPU raisonnable, et des prédictions stables des temps de remplissage.

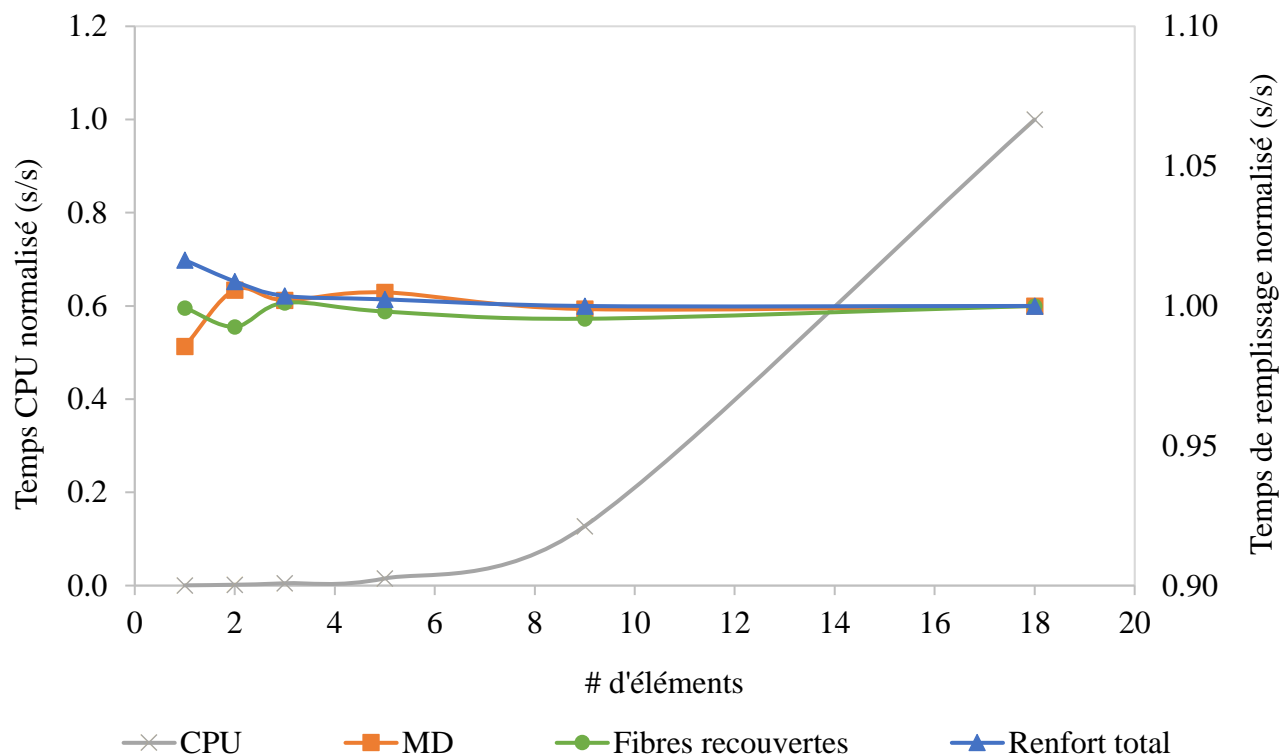


Figure 6-2. Temps de CPU et de remplissages caractéristiques normalisés en fonction du nombre d'éléments pour l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 75 kPa

6.2.2.2 Identification de la perméabilité transverse

Maintenant que la taille du maillage optimal est identifiée, les expériences d'infusion indirecte effectuées aux pressions de vide de 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa sont reproduites dans le logiciel PAM-RTM pour identifier la perméabilité transverse apparente du renfort bidirectionnel. Six simulations sont alors effectuées pour chaque pression de vide en faisant varier la perméabilité transverse du renfort de sorte que le rapport entre les perméabilités transverse K_z et planaire K_x augmente à chaque fois d'un ordre de grandeur [$K_z/K_x = 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 10$]. Le tableau ci-dessous résume les paramètres des simulations effectuées. Les perméabilités planaires du milieu de distribution et du renfort sont calculées pour une pression d'injection constante, car on suppose ici que les variations de pression au port d'injection sont inconnues. En première approximation, la perméabilité transverse du milieu de distribution est prise égale à sa perméabilité planaire. La validité de cette approximation sera étudiée ultérieurement. Comme précédemment, la viscosité de l'huile, la pression d'infusion, les épaisseurs et les taux volumiques de fibres proviennent des résultats expérimentaux moyens obtenus lors des infusions.

Tableau 6-5. Paramètres des simulations pour identifier la perméabilité transverse apparente du renfort 2D, à des pressions d'infusion avoisinant 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa

Viscosité de l'huile	Pression d'infusion	Matériau	Épaisseur	Taux de fibres	Perméabilité planaire	Perméabilité transverse
(Pa.s)	(kPa)		(mm)	(%)	(m ²)	(m ²)
0,09671	45,68	MD	1,009	12,26	6,50E-09	6,50E-09
		Renfort	1,545	40,6	1,25E-10	$K_z/K_x = [10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10]$
0,09732	71,03	MD	1,003	12,32	6,39E-09	6,39E-09
		Renfort	1,493	42,1	1,03E-10	$K_z/K_x = [10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10]$
0,09657	90,71	MD	0,999	12,36	5,54E-09	5,54E-09
		Renfort	1,453	43,2	7,96E-11	$K_z/K_x = [10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10]$

Pour analyser les résultats des simulations réalisées à chaque pression de vide, les temps de remplissage prédits sont comparés aux temps caractéristiques de l'infusion indirecte, à savoir aux temps de remplissage total du milieu drainant, des fibres recouvertes par le milieu drainant, et de remplissage total du renfort. Les erreurs relatives de prédiction sont ensuite calculées pour chaque temps de remplissage. En guise d'exemple, le Tableau 6-6 et la Figure 6-3 présentent ces erreurs en fonction du rapport de perméabilité utilisé lors des simulations d'infusion indirecte aux pressions de vide proches de 50 kPa.

La Figure 6-3 montre que les erreurs sur les deux temps de remplissage caractéristiques du renfort possèdent des allures très similaires, et que la valeur de la perméabilité transverse du renfort semble affecter ces temps plus significativement qu'elle n'affecte le temps de remplissage du milieu drainant. En effet, lorsque le rapport de perméabilité est très faible et égal à $K_z/K_x = 10^{-5}$, les temps de remplissage du renfort sont surestimés d'environ 1500 %. Au fur et à mesure que le rapport de perméabilité augmente, l'erreur diminue exponentiellement. Elle devient alors égale à 0,6% pour les fibres recouvertes par le milieu drainant et 1,9% pour le renfort entier lorsque le rapport de perméabilité devient égal à $K_z/K_x = 1$.

Tableau 6-6. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes, et du renfort entier, pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 50 kPa

Rapport de perméabilité K_z/K_x	Erreur relative sur les temps de remplissage		
	Milieu drainant (MD)	Fibres recouvertes par le MD	Renfort (total)
10^{-5}	-27%	1526%	1482%
10^{-4}	-23%	335%	368%
10^{-3}	-6.2%	37%	49%
10^{-2}	8.4%	10%	14%
10^{-1}	14%	3.8%	6.2%
1	16%	1.9%	0.6%
10	17%	1.6%	-1.1%

Pour le milieu drainant, l'amplitude de l'erreur est plus faible et l'erreur absolue maximale est de 27 %. La tendance est cependant inversée. Le temps de remplissage du milieu drainant est sous-estimé lorsque le rapport de perméabilité est faible. La courbe d'erreur passe ensuite par un minimum, car elle croise l'axe des x entre les rapports $K_z/K_x = 10^{-3}$ et $K_z/K_x = 10^{-2}$. Ceci correspond à des perméabilités transverses apparentes respectivement égales à $K_z = 1,25\text{E-}13 \text{ m}^2$ et $K_z = 1,25\text{E-}12 \text{ m}^2$. À ces valeurs de perméabilité, les erreurs maximales sur la position du front d'écoulement dans les fibres sont respectivement de 49 % et 14 %. Le rapport $K_z/K_x = 10^{-3}$ peut donc être éliminé, car même s'il prédit de manière satisfaisante le temps de remplissage du milieu drainant, il surestime significativement celui des fibres.

Enfin, si le rapport de perméabilité continue à augmenter, l'erreur sur le temps de remplissage du milieu drainant semble atteindre une asymptote à environ 20 %. Cette erreur asymptotique pourrait être causée par l'utilisation de la perméabilité calculée à pression d'injection constante, plutôt que par une estimation erronée de la perméabilité transverse du renfort. En effet, elle est de l'ordre de grandeur des erreurs de prédiction notées dans le Tableau 6-1, lors de l'analyse des simulations d'infusion directe du milieu de distribution à pression constante.

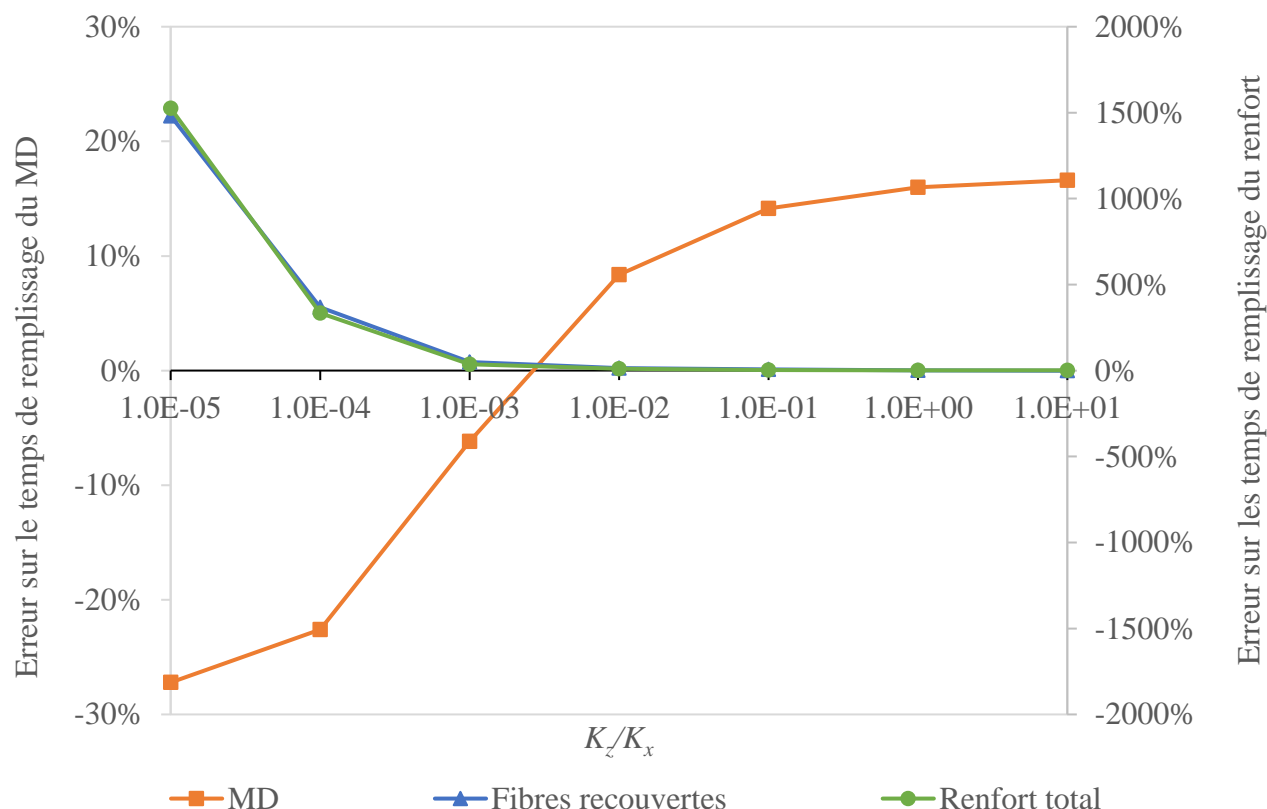


Figure 6-3. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes, et du renfort entier, pour les simulations de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 50 kPa

En outre, si l'on observe à la Figure 6-4 l'évolution du front d'écoulement dans le milieu drainant pour le rapport de perméabilité le plus élevé (lorsque l'erreur dans le milieu drainant est maximale), le temps de remplissage est surestimé au début de l'infusion, puis sous-estimé par la suite, mais l'erreur totale sur l'ensemble de l'écoulement demeure relativement faible. L'allure de cette courbe rappelle le comportement observé dans la Figure 6-1 qui compare le front expérimental dans le milieu drainant avec le front prédit numériquement à pression constante. Par conséquent, la prédiction du temps de remplissage du milieu drainant ne semble pas seulement conditionnée par l'estimation de la perméabilité transverse, mais aussi par l'utilisation de la perméabilité interpolée à pression constante. En outre, dans les applications industrielles, c'est le remplissage du renfort fibreux qu'on désire simuler en priorité, car le milieu drainant n'est qu'un consommable jeté après durcissement de la pièce. C'est donc principalement l'écoulement dans le renfort qui sera étudié dans la suite de l'analyse pour identifier la perméabilité transverse optimale.

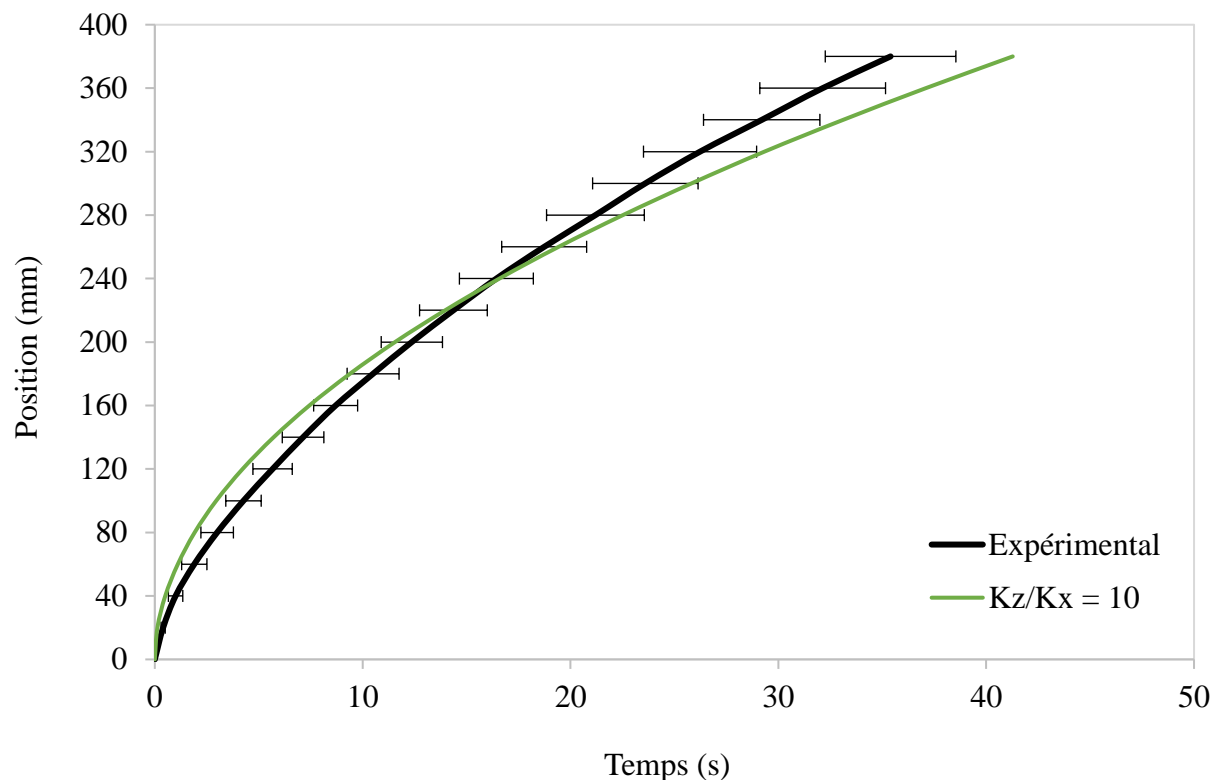


Figure 6-4. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement pour le rapport de perméabilité $K_z/K_x = 10$

Les rapports de perméabilité K_z/K_x supérieurs ou égaux à 10^{-2} sont retenus, car ils minimisent l'erreur sur les temps de remplissage du renfort. La Figure 6-5 compare le front expérimental dans le renfort fibreux lors de l'infusion indirecte à une pression de vide avoisinant 50 kPa avec les fronts prédits numériquement pour les rapports de perméabilité $K_z/K_x = [10^{-2}, 10^{-1}, 1]$. Les trois prédictions numériques de la position du front d'écoulement correspondent de manière satisfaisante avec les positions expérimentales, et l'erreur maximale est de 14% pour les simulations réalisées avec un rapport de perméabilité $K_z/K_x = 10^{-2}$. À ce rapport, les prédictions passent initialement à travers les barres d'erreur horizontales jusqu'à une position de 220 mm. La position du front d'écoulement est ensuite sous-estimée pour le reste de l'infusion. Ceci indique que l'on sous-estime la vitesse d'infiltration à travers l'épaisseur, et donc la perméabilité transverse apparente du renfort.

Lorsque le rapport de perméabilité augmente à $K_z/K_x = 10^{-1}$, la position du front d'écoulement est surestimée au début de l'infusion, mais les prédictions sont dans la plage d'écarts-types à partir de 240 mm. L'erreur maximale dans le renfort est alors de 6,2 % seulement. Finalement, au rapport de perméabilité le plus élevé $K_z/K_x = 1$, les prédictions numériques surestiment davantage la position du front au début de l'écoulement, mais correspondent aux prédictions obtenues avec le rapport de perméabilité précédent à partir de 380 mm. Noter également que l'allure de la courbe est lissée, car le point d'inflexion caractéristique observé expérimentalement autour de 380 mm n'est pas reproduit. Par conséquent, même si ce rapport de perméabilité est celui qui minimise l'erreur sur les temps caractéristiques, il ne permet pas de reproduire fidèlement l'allure de la courbe expérimentale. Ceci indique donc que la perméabilité transverse est surestimée.

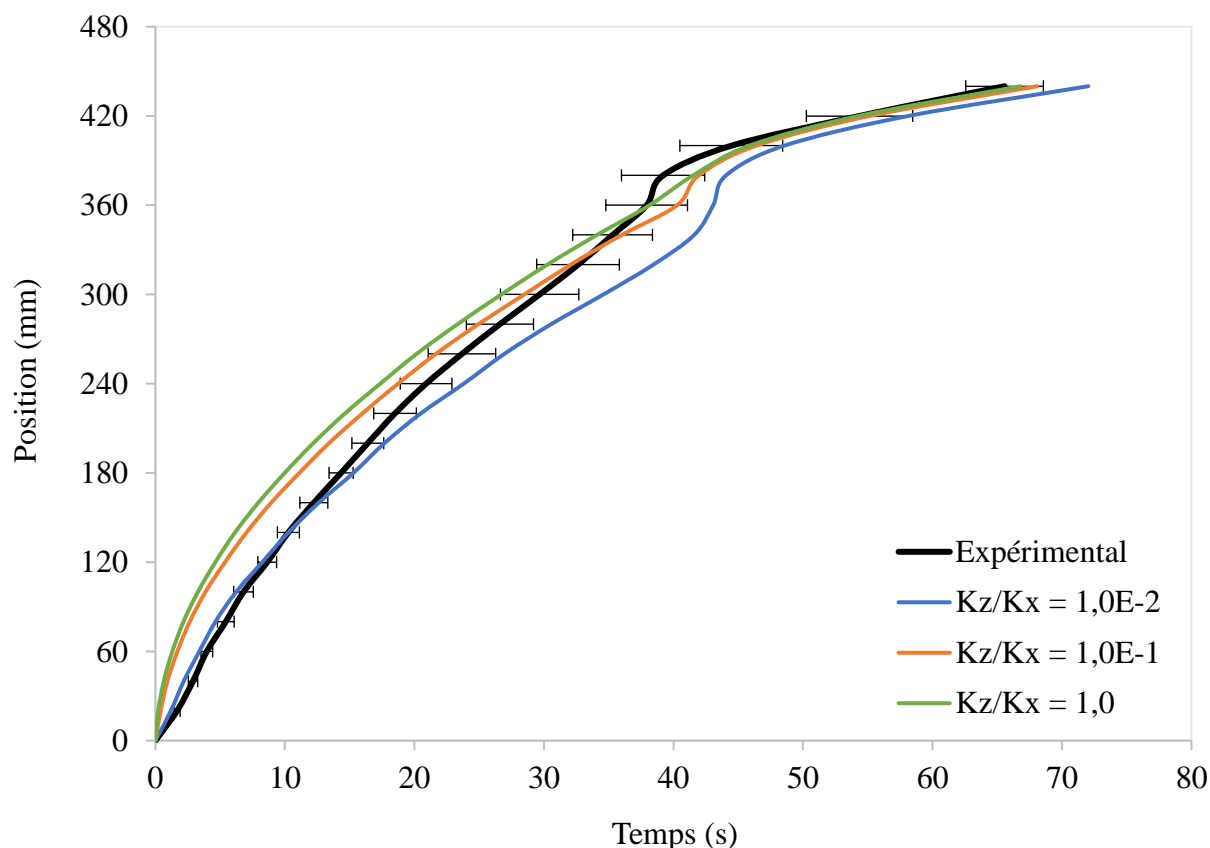


Figure 6-5. Front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa et fronts prédits numériquement pour les rapports de perméabilité $K_z/K_x = [10^{-2}, 10^{-1}, 1]$

En conclusion, la perméabilité transverse apparente du renfort fibreux, qui permet de reproduire le plus fidèlement l'évolution du front d'écoulement expérimental, se situe entre les rapports de perméabilité $K_z/K_x = 10^{-2}$ et $K_z/K_x = 10^{-1}$. En effet, le premier rapport prédit adéquatement la position au début de l'infusion mais le sous-estime ensuite, et vice versa pour le second. Par conséquent, si l'on effectue un balayage paramétrique linéaire entre ces deux rapports, on peut identifier une perméabilité intermédiaire $K_z = 2,46\text{E-}12 \text{ m}^2$ (rapport $K_z/K_x = 2,00\text{E-}02$) qui reproduit fidèlement l'écoulement à la fois au début et à la fin de l'infusion, dans le milieu drainant (Figure 6-6) et le renfort fibreux (Figure 6-7). Avec cette perméabilité transverse, les erreurs de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes par le milieu drainant et du renfort sont respectivement de 10,8%, 11,0% et 7,1%. Elles sont donc jugées acceptables.

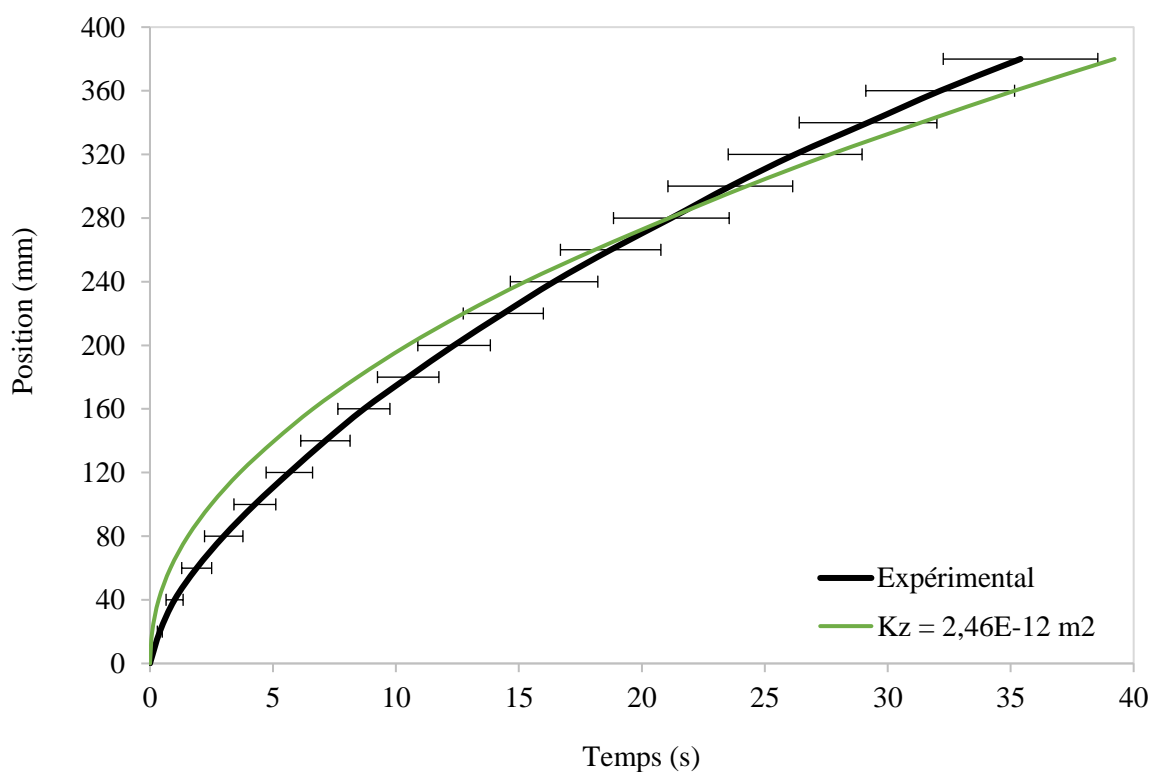


Figure 6-6. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,46\text{E-}12 \text{ m}^2$

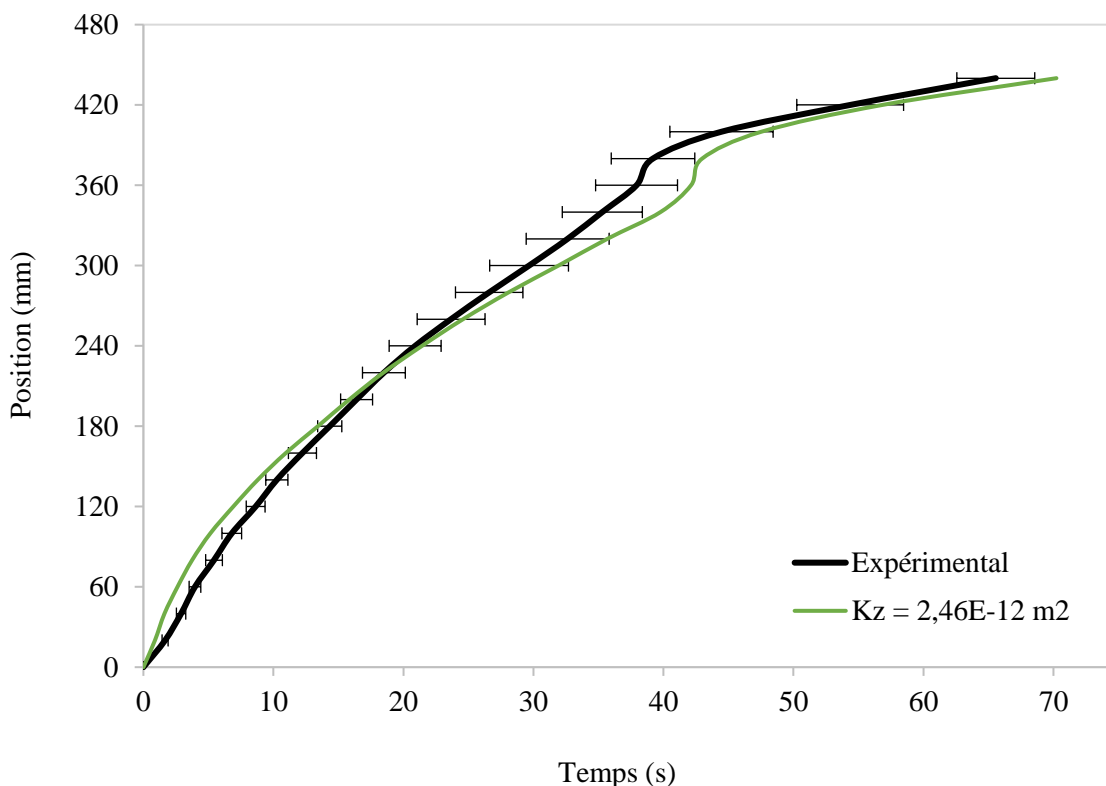


Figure 6-7. Comparaison du front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa et du front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,46E-12 \text{ m}^2$

Les perméabilités transverses apparentes du renfort 2D lors des infusions indirectes réalisées aux deux autres pressions de vide sont identifiées selon une approche similaire. Les Figures 6-8 et 6-9 illustrent les erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage caractéristiques pour les infusions indirectes du renfort 2D réalisées à des pressions de vide avoisinant respectivement 75 kPa et 100 kPa. Des conclusions similaires peuvent être tirées de ces figures :

- Le temps de remplissage du milieu drainant est moins sensible à la perméabilité transverse que les temps de remplissage du renfort fibreux.
- L'erreur sur le temps de remplissage du milieu drainant atteint une valeur asymptotique d'environ 13% pour les infusions réalisées à 75 kPa, et de 22% à 100 kPa.

- Comme précédemment, cette erreur peut être raisonnablement attribuée à l'interpolation à pression constante de la perméabilité planaire du milieu drainant.
- Les temps de remplissage caractéristiques du renfort fibreux suivent la même tendance, et leurs erreurs de prédiction diminuent exponentiellement lorsque la perméabilité transverse augmente.
- La perméabilité transverse apparente, qui permet de reproduire le plus fidèlement l'évolution du front d'écoulement expérimental, se situe entre les rapports de perméabilité $K_z/K_x = 10^{-2}$ et $K_z/K_x = 10^{-1}$.

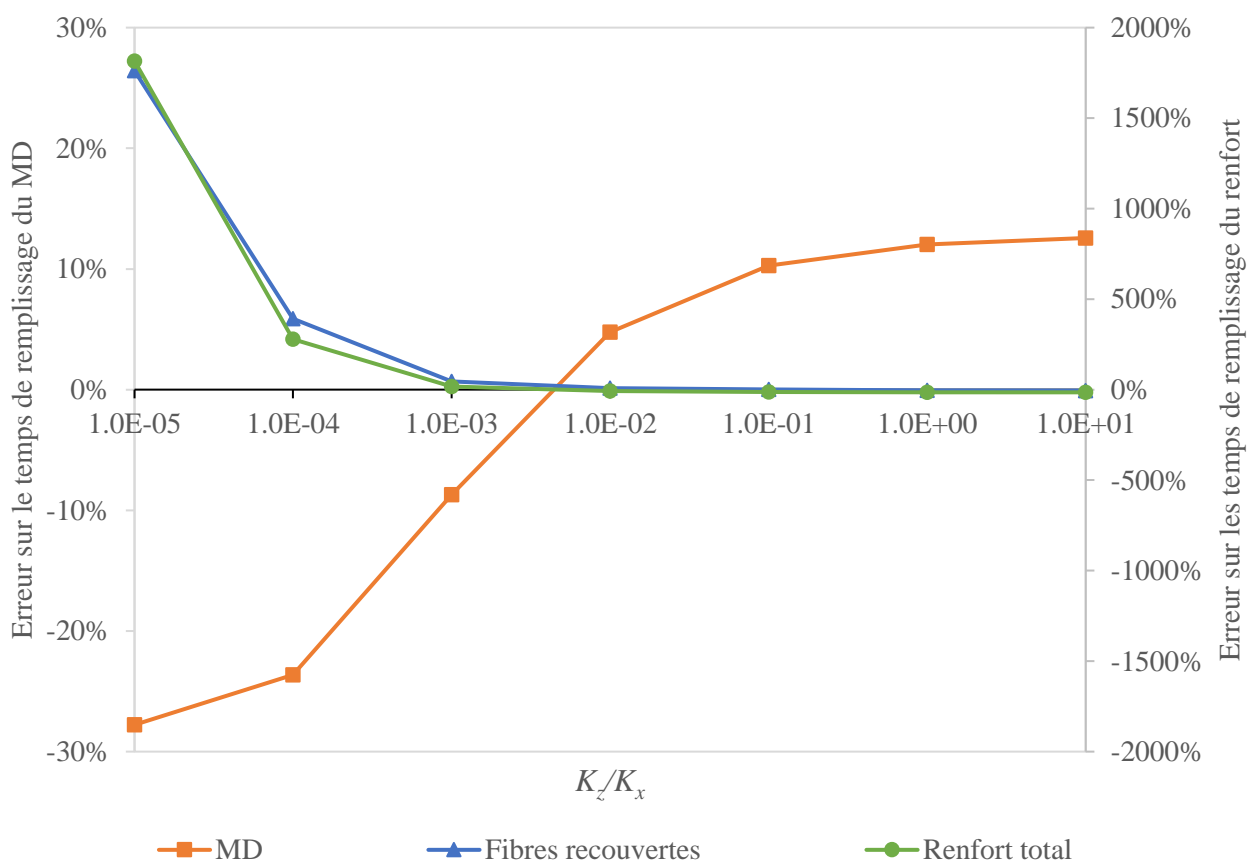


Figure 6-8. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 75 kPa

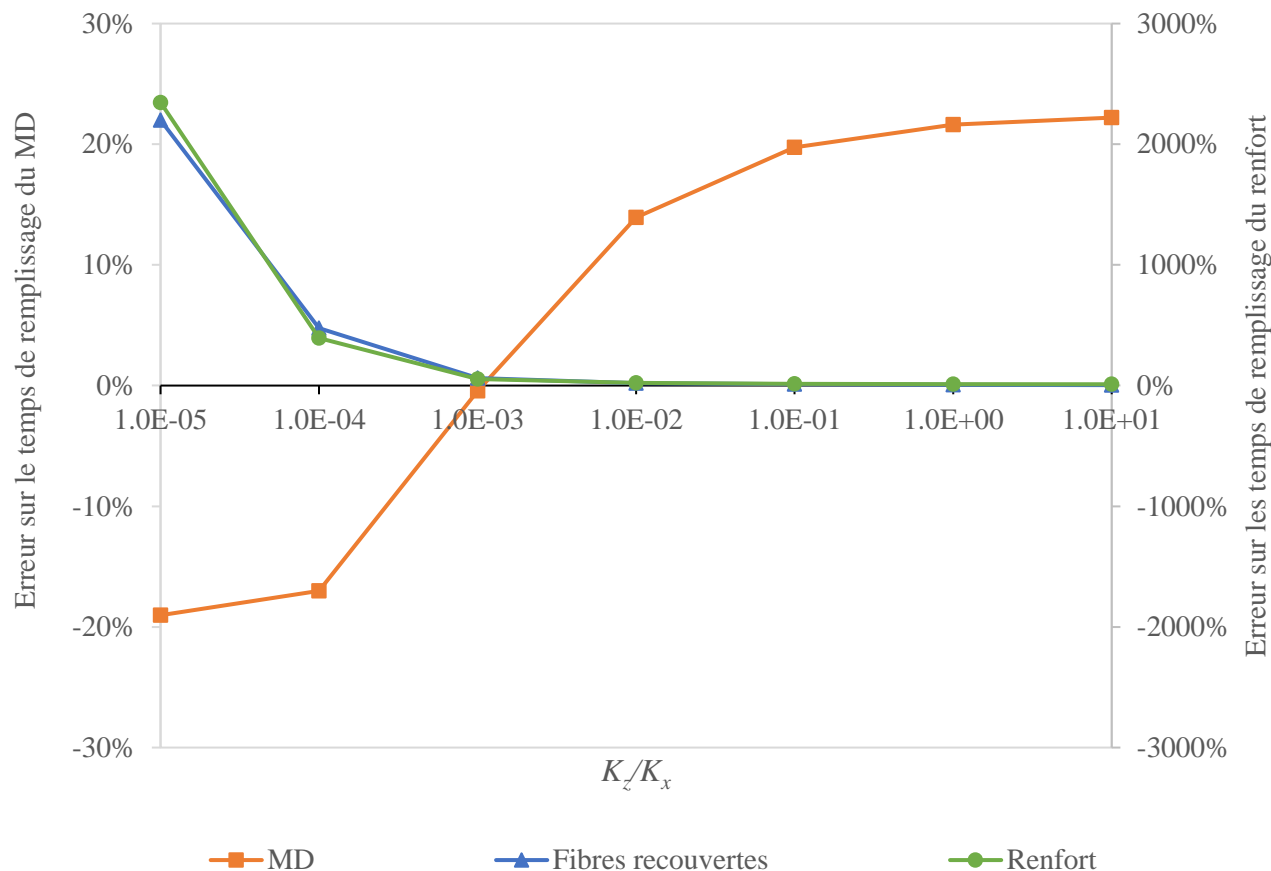


Figure 6-9. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 100 kPa

Par conséquent, pour chaque pression de vide, un balayage paramétrique linéaire est effectué entre les rapports de perméabilité $K_z/K_x = 10^{-2}$ et $K_z/K_x = 10^{-1}$ pour identifier la perméabilité transverse apparente qui permet de reproduire le plus fidèlement le front d'écoulement expérimental. À la pression d'infusion avoisinant 75 kPa, la perméabilité ainsi identifiée est $K_z = 2,06\text{E-}12 \text{ m}^2$ et les Figures 6-10 et 6-11 montrent respectivement les écoulements prédits pour cette perméabilité dans le milieu drainant et le renfort fibreux. De même, la perméabilité identifiée à la pression de vide avoisinant 100 kPa est $K_z = 1,59\text{E-}12 \text{ m}^2$ et les écoulements prédits pour le milieu drainant et le renfort sont illustrés dans les Figures 6-12 et 6-13, respectivement.

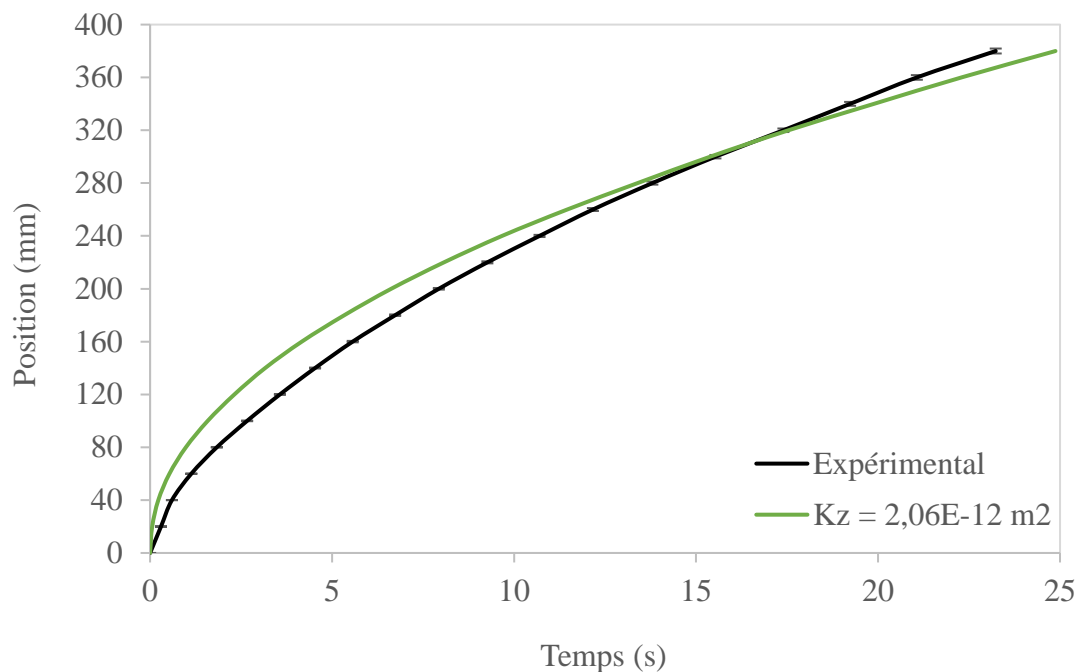


Figure 6-10. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,06E-12 \text{ m}^2$

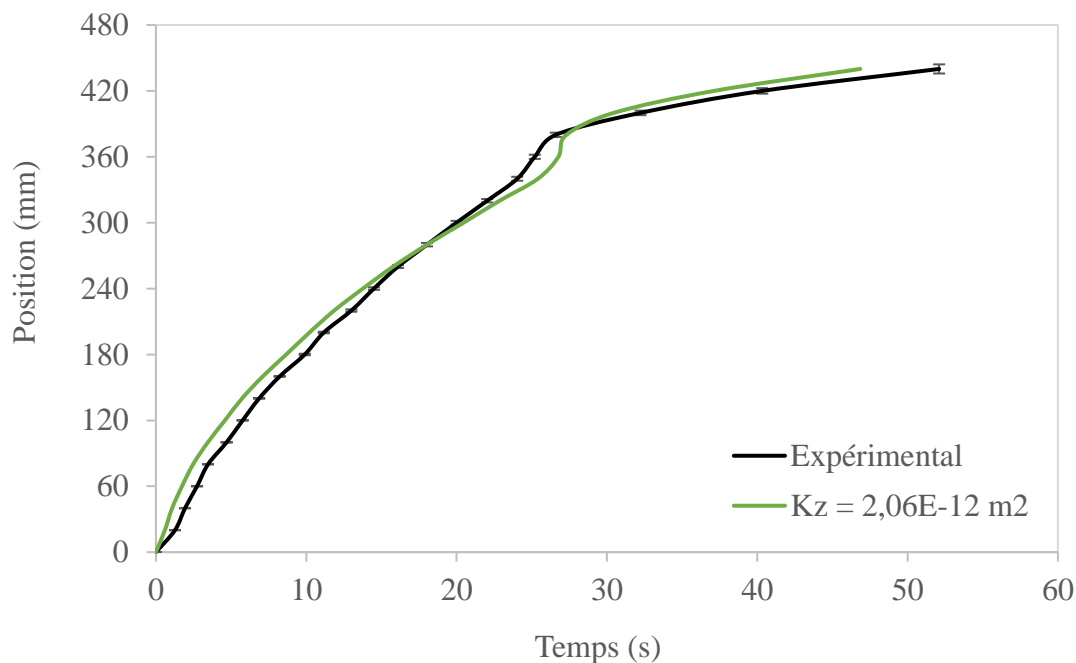


Figure 6-11. Front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,06E-12 \text{ m}^2$

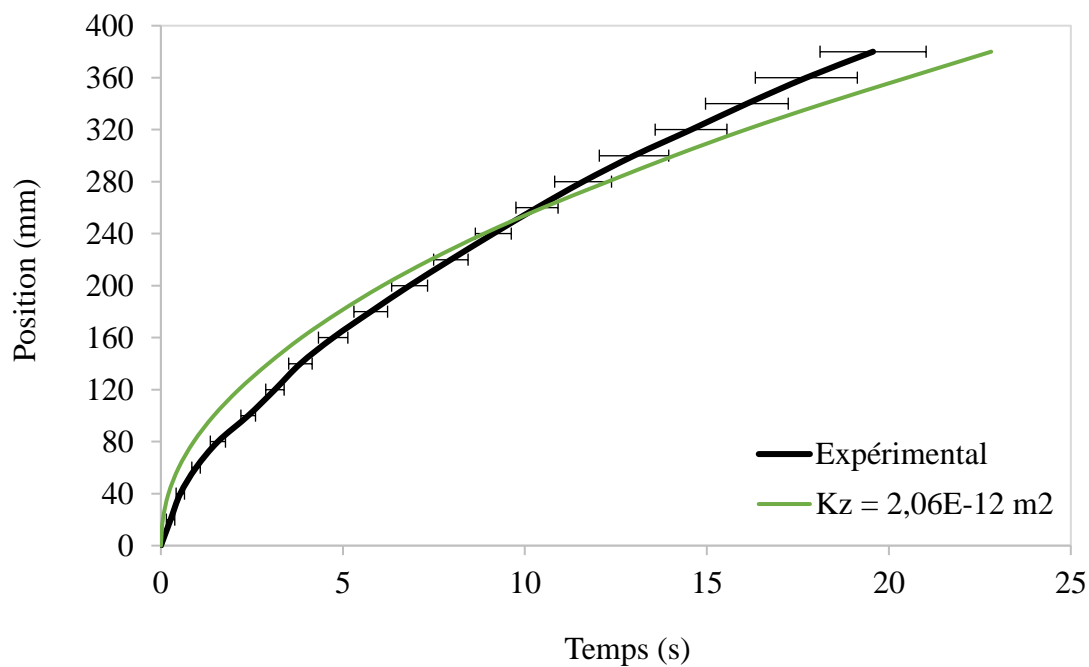


Figure 6-12. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 1,59E-12 \text{ m}^2$

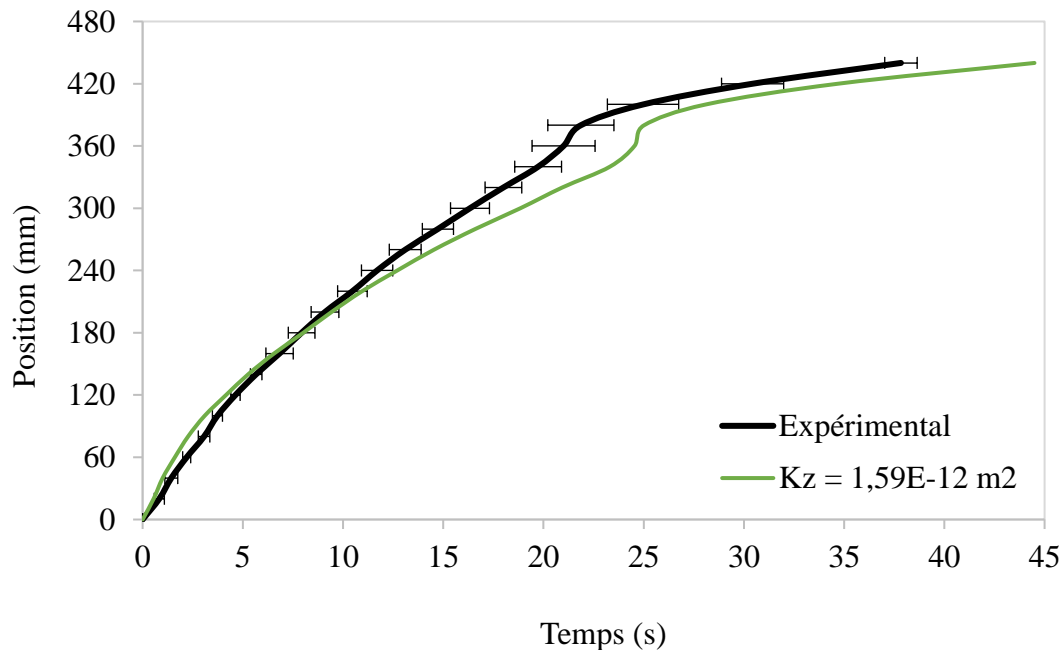


Figure 6-13. Front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 1,59E-12 \text{ m}^2$

Le Tableau 6-7 donne également, pour toutes les pressions de vide considérées, les perméabilités transverses identifiées, les rapports de perméabilité K_z/K_x correspondants et les erreurs de prédiction des temps caractéristiques de l'infusion indirecte.

Tableau 6-7. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D, à des pressions de vide avoisinant 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa

Pression d'infusion (kPa)	Perméabilité transverse (m^2)	Rapport de perméabilité K_z/K_x	Erreur relative sur le temps de remplissage		
			Milieu drainant	Fibres recouvertes par le MD	Renfort (total)
45,68	2,46E-12	2,00E-02	10,8%	11,0%	7,1%
71,03	2,06E-12	2,00E-02	7,1%	6,2%	-10,1%
90,71	1,59E-12	2,00E-02	16,6%	16,9%	17,6%

Dans l'ensemble, les valeurs de perméabilité transverse apparente identifiées permettent de prédire avec une précision satisfaisante les temps de remplissage du milieu drainant et du renfort fibreux. Dans le cas du milieu drainant, l'erreur maximale de prédiction de 16,6% est de l'ordre de grandeur des erreurs présentées dans le Tableau 6-1 pour les simulations de l'infusion directe du renfort 2D. Comme expliqué précédemment, cette erreur est principalement liée à l'interpolation à pression d'infusion constante de la perméabilité du milieu drainant. Puisque la pression réelle varie à cause des chutes de pression dans la spirale d'infusion, la position du front d'écoulement est surestimée au début de l'écoulement, puis sous-estimée lorsque le débit de l'écoulement diminue et que la pression augmente. Pour ce qui est du renfort fibreux, des erreurs similaires de surestimation sont notées au début de l'infusion, et de sous-estimation à la fin. Toutefois, l'allure des fronts expérimentaux d'infusion est bien reproduite, et une erreur maximale de 17,6% est obtenue lors des simulations à une pression de vide avoisinant 100 kPa.

Noter également que le rapport optimal entre les perméabilités planaire et transverse est le même pour les 3 pressions d'infusion. Par conséquent, comme la perméabilité planaire flexible du renfort (Figure 5-16), la perméabilité transverse apparente peut être modélisée par l'équation de type puissance de la Figure 6-14.

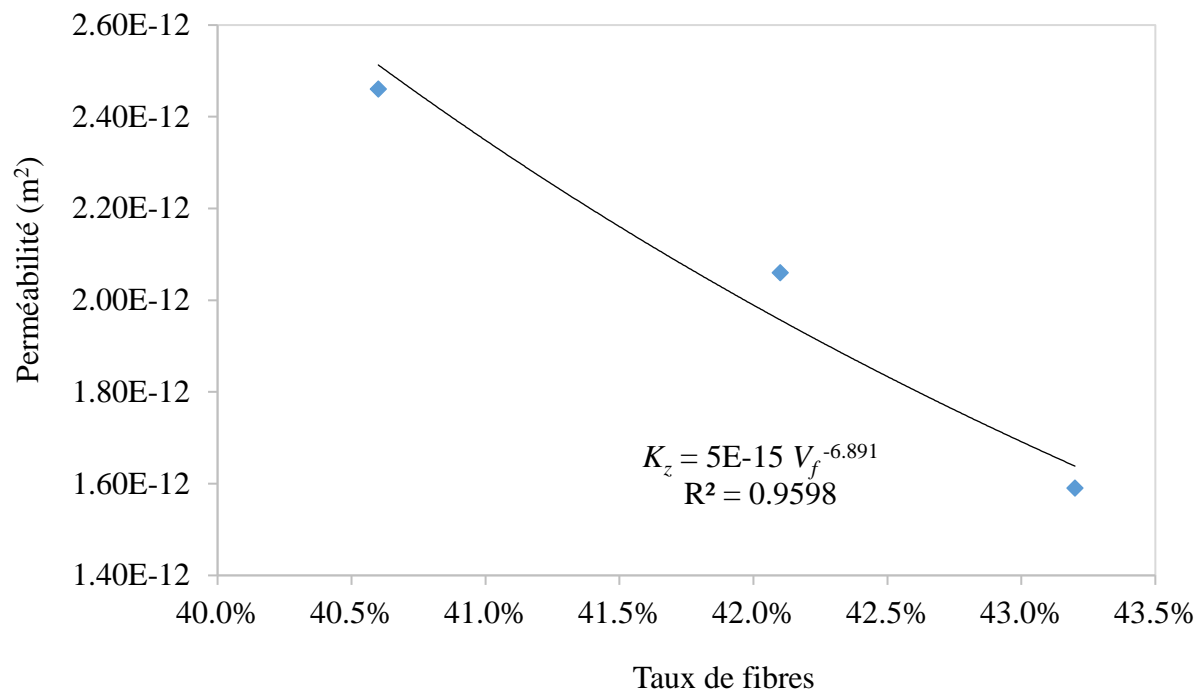


Figure 6-14. Modèle de perméabilité transverse apparente du renfort 2D

Finalement, en guise de dernière validation, les infusions indirectes des échantillons de 10 plis réalisées à une pression de vide avoisinant 100 kPa sont reproduites numériquement avec la valeur de perméabilité transverse apparente identifiée à cette pression. Les Figures 6-15 et 6-16 montrent que les écoulements prédits pour cette perméabilité sont bien en accord avec les positions expérimentales dans le milieu drainant et le renfort fibreux. De plus, les erreurs sur les temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes par le milieu drainant, et du renfort entier sont respectivement égales à -1%, -8% et -2%. Noter que les erreurs sont même inférieures pour les infusions indirectes de 10 plis de renfort 2D, comparativement à celles des infusions de 5 plis. Par conséquent, les perméabilités mesurées pour un certain nombre de plis permettent de prédire fidèlement les temps de remplissage pour un nombre de plis supérieur. Ceci faisait partie des objectifs du projet, soit être en mesure de prédire l'écoulement pour différentes épaisseurs à partir d'une seule caractérisation.

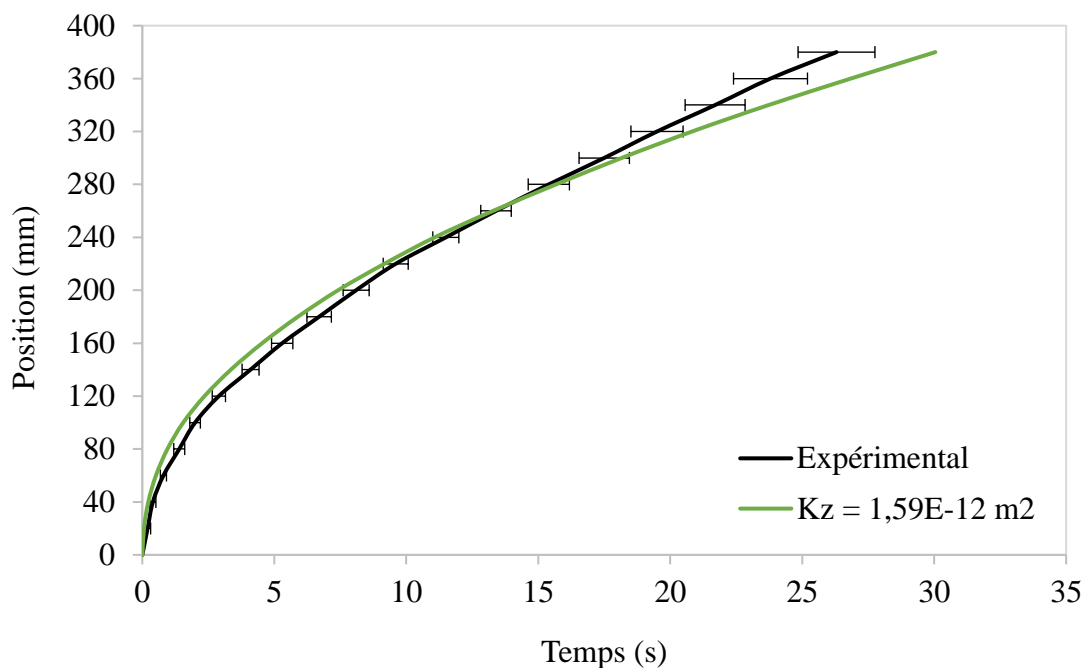


Figure 6-15. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte de 10 plis de renfort 2D à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 1,59E-12 \text{ m}^2$

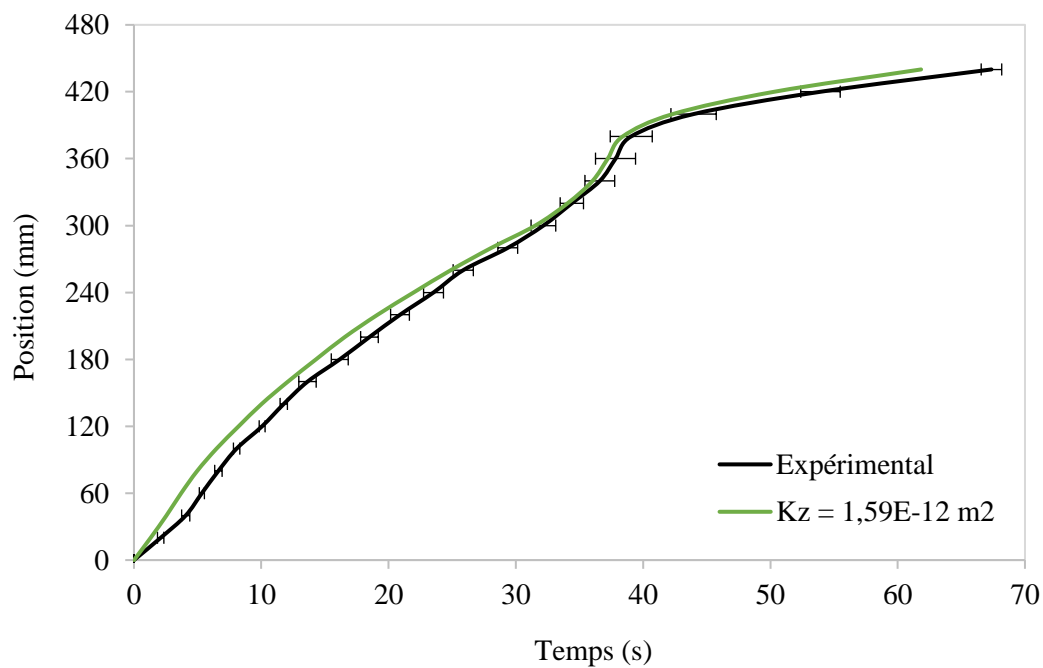


Figure 6-16. Front expérimental dans les 10 plis de renfort 2D lors de leur infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 1,59E-12 \text{ m}^2$

6.2.2.3 Variation de la pression d'infusion

Dans le but de vérifier que les différences entre les résultats expérimentaux et numériques sont reliées à l'utilisation de la perméabilité interpolée à pression constante plutôt qu'à des erreurs de caractérisation, des simulations numériques supplémentaires sont réalisées avec les variations réelles de pression mesurées lors des infusions indirectes et illustrées dans la Figure 6-17. Les perméabilités planaires du milieu drainant à pression variable sont donc utilisées ici. Le Tableau 6-10 résume les paramètres des simulations.

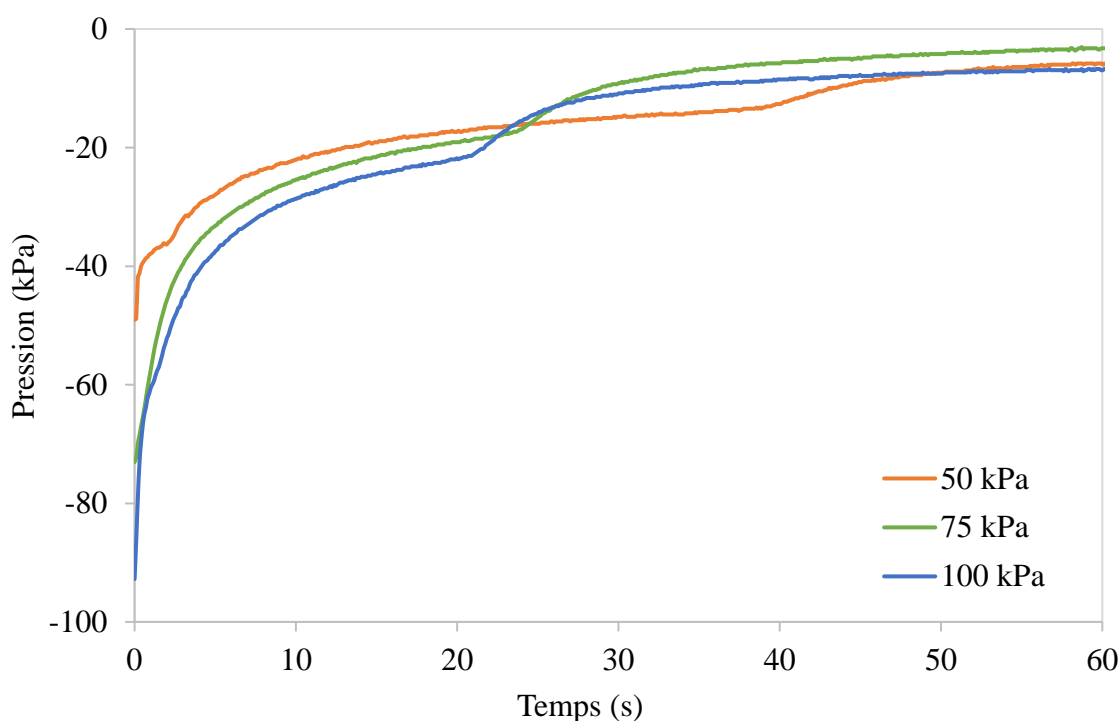


Figure 6-17. Évolution de la pression expérimentale mesurée au port d'injection lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à des pressions de vide de 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa

Tableau 6-8. Paramètres des simulations de l'infusion indirecte du renfort 2D à des pressions d'infusion variables avoisinant 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa

Viscosité de l'huile	Pression d'infusion	Matériau	Épaisseur	Taux de fibres	Perméabilité planaire	Perméabilité transverse
(Pa.s)	(kPa)		(mm)	(%)	(m ²)	(m ²)
0,09671	$f(t) \leq 50$	MD	1,009	12,26	1,10E-08	1,10E-08
		Renfort	1,545	40,6	1,25E-10	2,46E-12
0,09732	$f(t) \leq 75$	MD	1,003	12,32	1,04E-08	1,04E-08
		Renfort	1,493	42,1	1,03E-10	2,06E-12
0,09657	$f(t) \leq 100$	MD	0,999	12,36	8,56E-09	8,56E-09
		Renfort	1,453	43,2	7,96E-11	1,59E-12

Les Figures 6-18 et 6-19 comparent les fronts expérimentaux et numériques obtenus pour une pression d'infusion variable avoisinant 50 kPa, dans le milieu drainant et le renfort 2D respectivement. Les Figures 6-20 et 6-21 les comparent pour une pression d'infusion avoisinant 75 kPa et les Figures 6-22 et 6-23 à 100 kPa. Le Tableau 6-9 donne également, pour toutes les pressions d'infusion considérées, les erreurs de prédiction des temps caractéristiques de l'infusion indirecte.

Les simulations à pression d'infusion variable montrent que les fronts d'écoulement expérimentaux peuvent être reproduits plus fidèlement si la perméabilité du milieu drainant est interpolée à la pression d'infusion réelle et que celle-ci est spécifiée dans les simulations numériques. En effet, l'évolution du front d'écoulement dans le milieu drainant est mieux reproduite sur l'ensemble de l'infusion, et l'erreur maximale sur son temps de remplissage est de 2,8% comparé à une erreur maximale de 16,6% à pression constante (voir Tableau 6-7). L'allure du front d'écoulement est également mieux reproduite dans le renfort fibreux et l'erreur maximale sur le temps de remplissage des fibres recouvertes par le milieu drainant est de 5,1%, comparé à une erreur maximale de 16,9% à pression constante. Enfin, l'erreur maximale sur le remplissage du renfort entier est de 14,7%, ce qui correspond une réduction d'environ 3%. Cette analyse complète la validation des modèles de compressibilité et de perméabilité du milieu drainant et du renfort 2D.

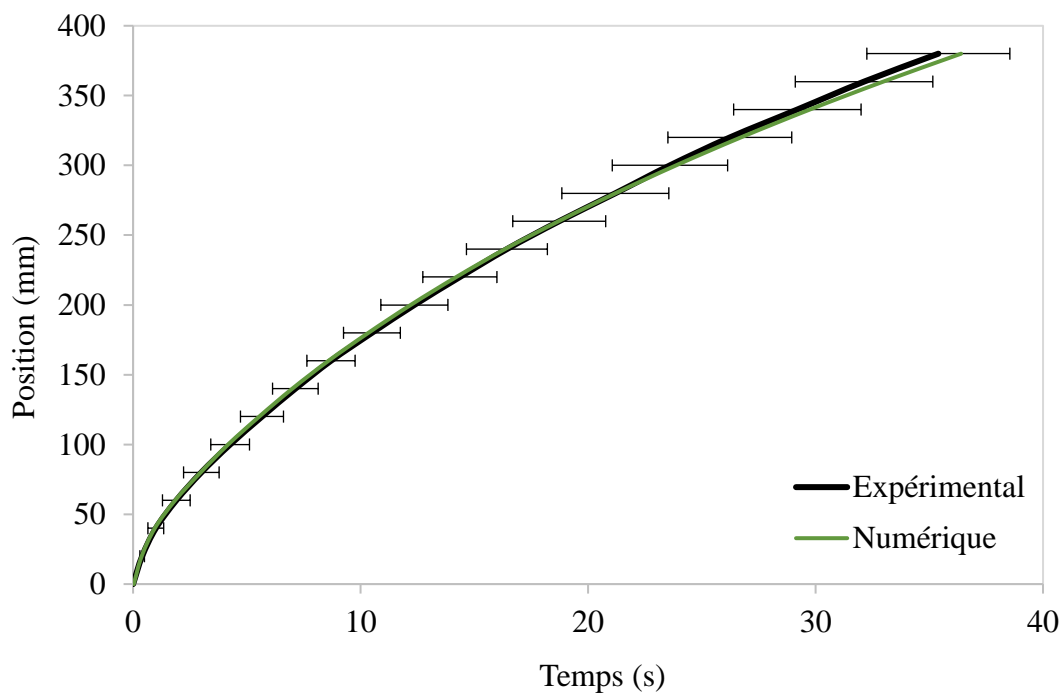


Figure 6-18. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable

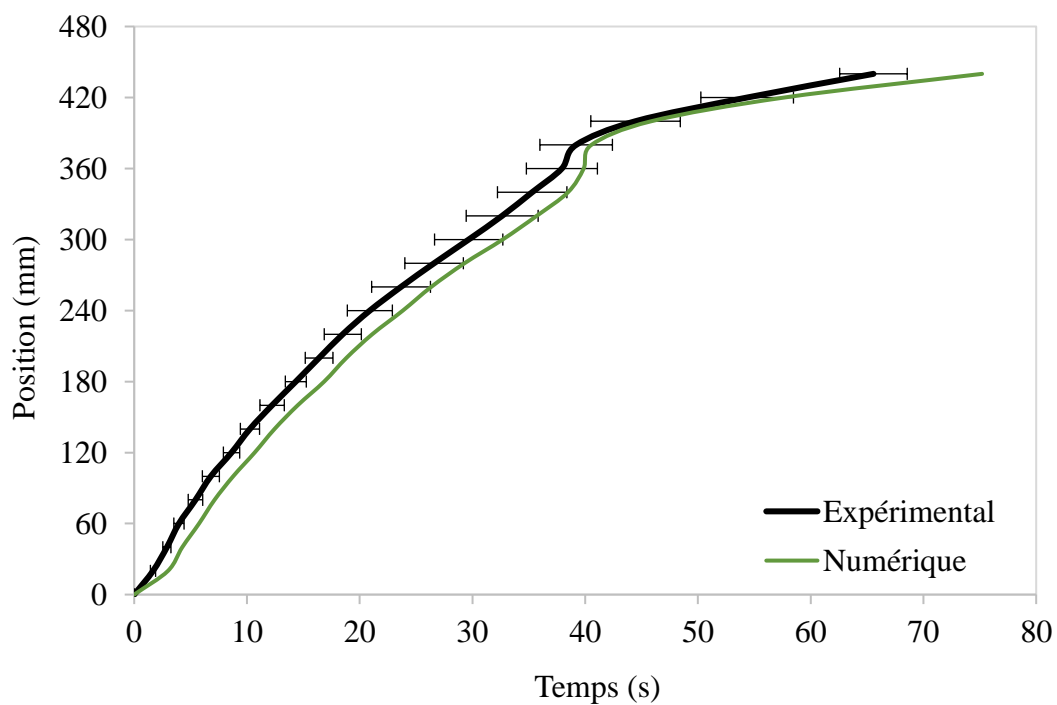


Figure 6-19. Front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable

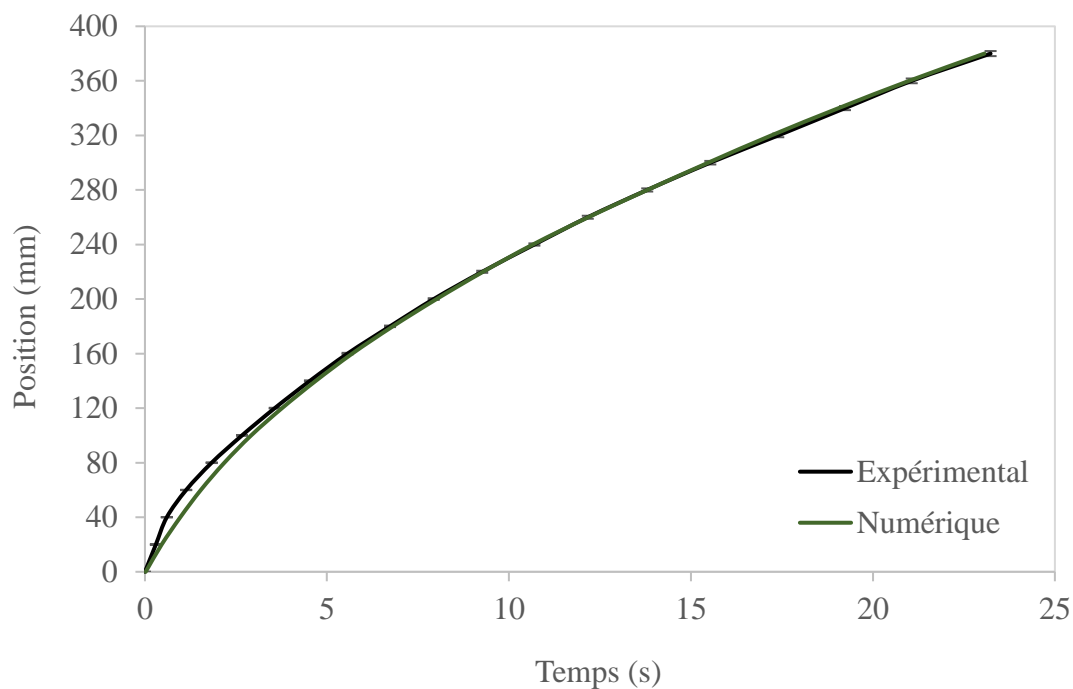


Figure 6-20. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable

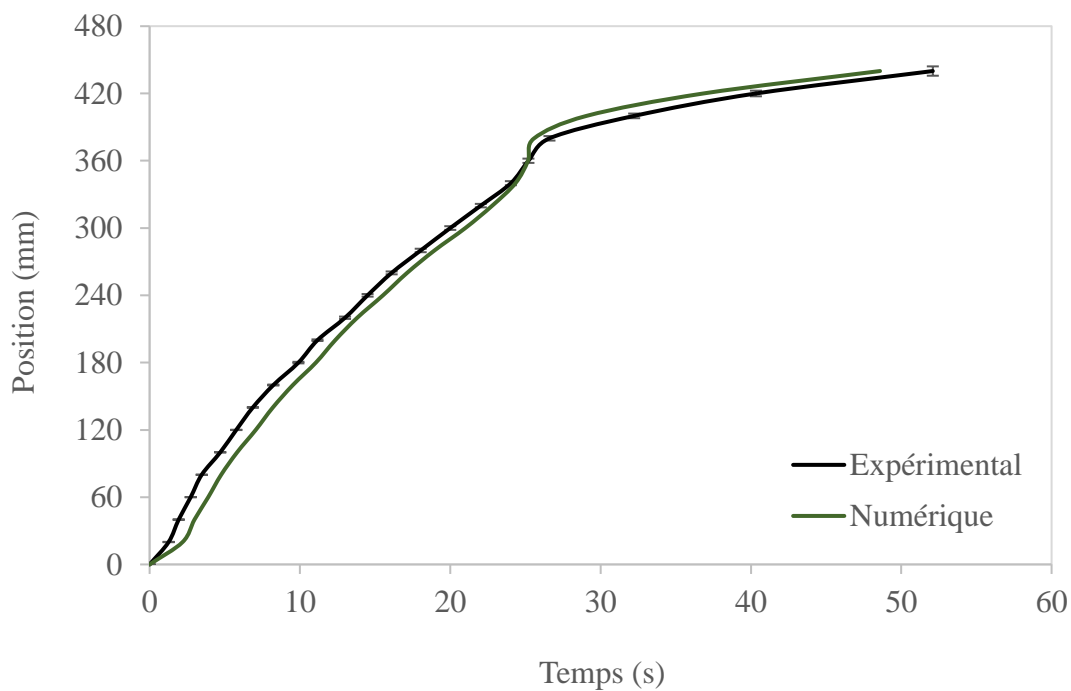


Figure 6-21. Front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable

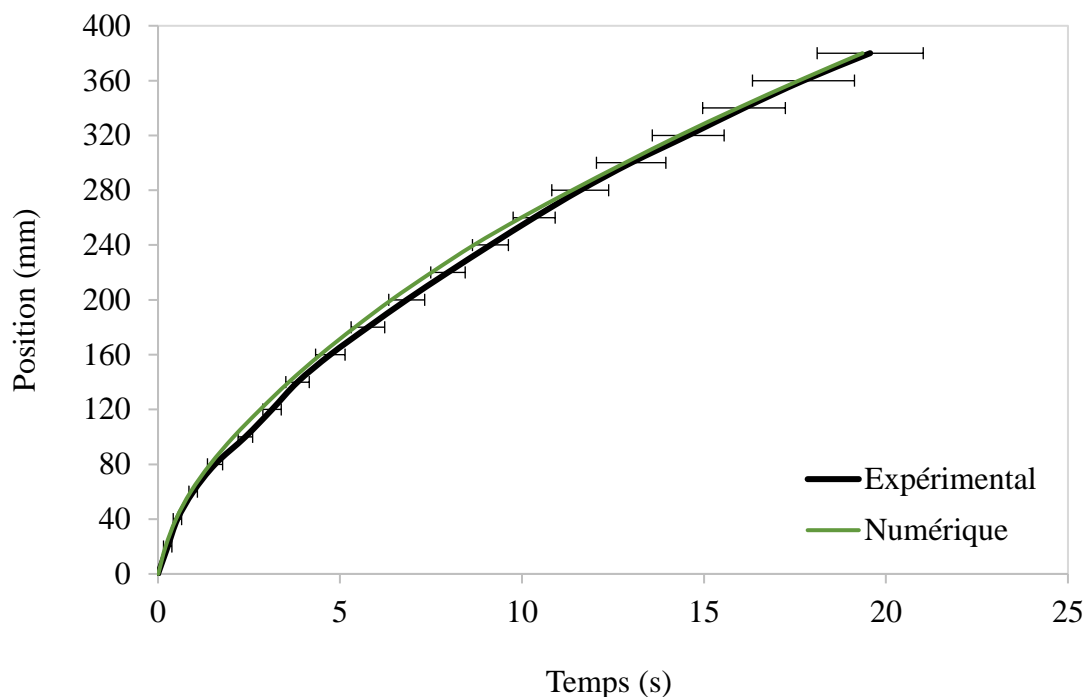


Figure 6-22. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable

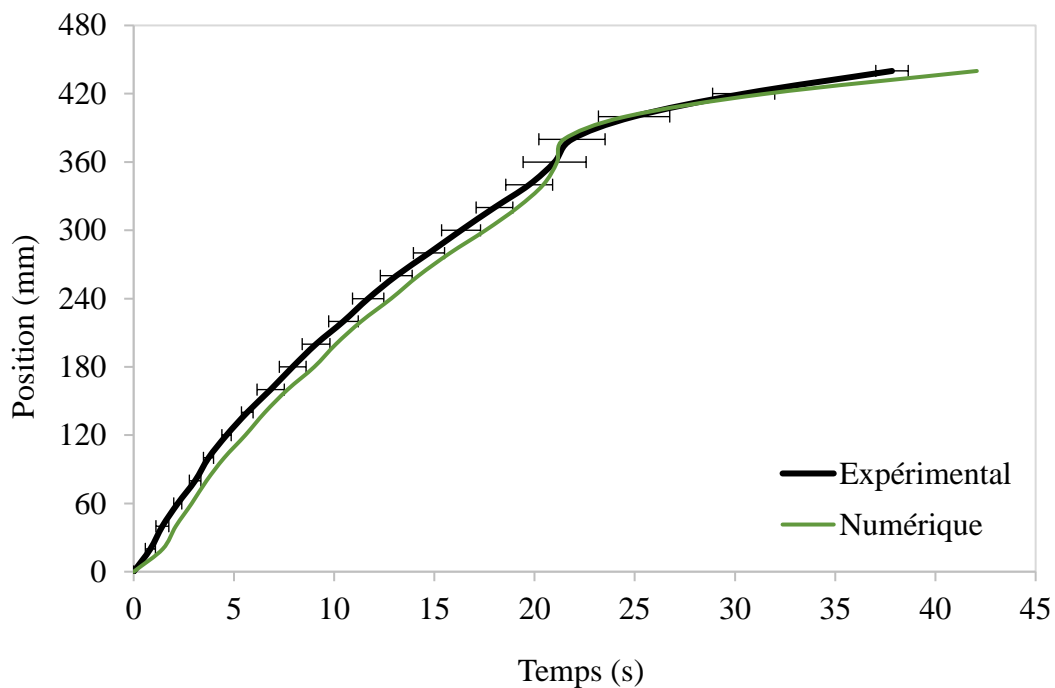


Figure 6-23. Front expérimental dans le renfort 2D lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable

Tableau 6-9. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D, à des pressions d'infusion variables avoisinant 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa

Pression d'infusion (kPa)	Erreur relative sur le temps de remplissage		
	Milieu drainant	Fibres recouvertes par le MD	Renfort (total)
$f(t) \leq 50$	2,8%	5,1%	14,7%
$f(t) \leq 75$	-0,7%	-0,1%	-6,7%
$f(t) \leq 100$	-1,1%	0,6%	11,2%

Lorsque l'on désire simuler l'infusion indirecte dans un contexte industriel, les variations de pression au port d'injection ne sont pas connues avant la simulation. Un travail analytique supplémentaire doit donc être effectué pour les prédire en fonction du débit infusé. Toutefois, c'est le remplissage du renfort fibreux qu'on désire prédire en priorité, car le milieu de distribution est un consommable jeté après durcissement de la pièce. Or les simulations à pression constante fournissant une approximation suffisante de l'évolution du front d'écoulement dans le renfort. Ce travail supplémentaire n'est donc nécessaire que si l'on souhaite prédire les temps de remplissage avec une meilleure précision.

6.2.2.4 Analyse de sensibilité

Lorsque les simulations indirectes de la section précédente ont été réalisées pour identifier le modèle de perméabilité transverse du renfort 2D, la perméabilité transverse du milieu drainant a été approximée pour les besoins de l'analyse. De plus, l'épaisseur, le taux de fibres et les perméabilités planaires du milieu drainant et du renfort ont été supposés constants. Ces paramètres, calculés à partir des modèles expérimentaux de compaction et de perméabilité, peuvent introduire des erreurs dans les simulations. En outre, l'épaisseur des matériaux n'est pas réellement constante durant les infusions, donc la perméabilité effective varie à chaque position et à chaque instant.

Il importe donc d'analyser la sensibilité des simulations aux divers paramètres d'entrée pour évaluer leur influence sur les temps de remplissage prédits. Ultimement, ceci permettra de valider l'approche de caractérisation suggérée, de proposer des améliorations et de mieux cibler les efforts requis pendant les campagnes de caractérisation des matériaux.

L'analyse de sensibilité a été conduite pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D réalisées à une pression d'infusion avoisinant 75 kPa. Une simulation de « référence » a été réalisée avec les paramètres du Tableau 6-10. Ensuite, les paramètres d'entrée ont été modifiés tour à tour de [-80%, -60%, -40%, -20%, +20%, +40%, +60%, +80%], et les variations relatives à la référence ont été calculées pour les temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier. La variabilité du temps nécessaire pour saturer seulement la portion de fibres située entre la fin du milieu drainant et celle du renfort a également été évaluée pour approfondir l'analyse. La viscosité et la pression d'infusion n'ont toutefois pas été modifiées, car la dépendance des temps de remplissage par rapport à ces paramètres est linéaire d'après la loi de Darcy.

Tableau 6-10. Paramètres de la simulation de « référence » de l'analyse de sensibilité, pour les simulations d'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 75 kPa

Viscosité de l'huile	Pression d'infusion	Matériau	Épaisseur	Taux de fibres	Perméabilité planaire	Perméabilité transverse
(Pa.s)	(kPa)		(mm)	(%)	(m ²)	(m ²)
0,09732	71,03	MD	1,003	12,32	6,39E-09	6,39E-09
		Renfort	1,493	42,1	1,03E-10	1,03E-12

Les figures ci-dessous présentent les résultats de l'analyse de sensibilité. La Figure 6-24 trace les variations relatives des temps de remplissage caractéristiques de l'infusion indirecte en fonction de la variation des épaisseurs du milieu drainant et du renfort. La Figure 6-25 donne la sensibilité de ces temps par rapport aux perméabilités planaires des matériaux, et la Figure 6-26 leur sensibilité par rapport aux perméabilités transverses.

Noter que lorsque les épaisseurs du milieu drainant ou du renfort 2D varient, leur taux volumique de fibres est également modifié pour satisfaire l'équation (3.1), qui donne le taux de fibres en fonction de l'épaisseur. Le produit [épaisseur $h \times$ taux de fibres V_f] est ainsi toujours maintenu constant. Par conséquent, la perméabilité planaire doit également être modifiée de sorte que le rapport [perméabilité K / porosité ϕ] demeure constant. De plus, certaines variations d'épaisseur ne sont pas simulées, car elles seraient physiquement impossibles. Par exemple, l'épaisseur du renfort fibreux, ne peut pas diminuer de 60% ou plus, car son taux de fibres dépasserait 100%.

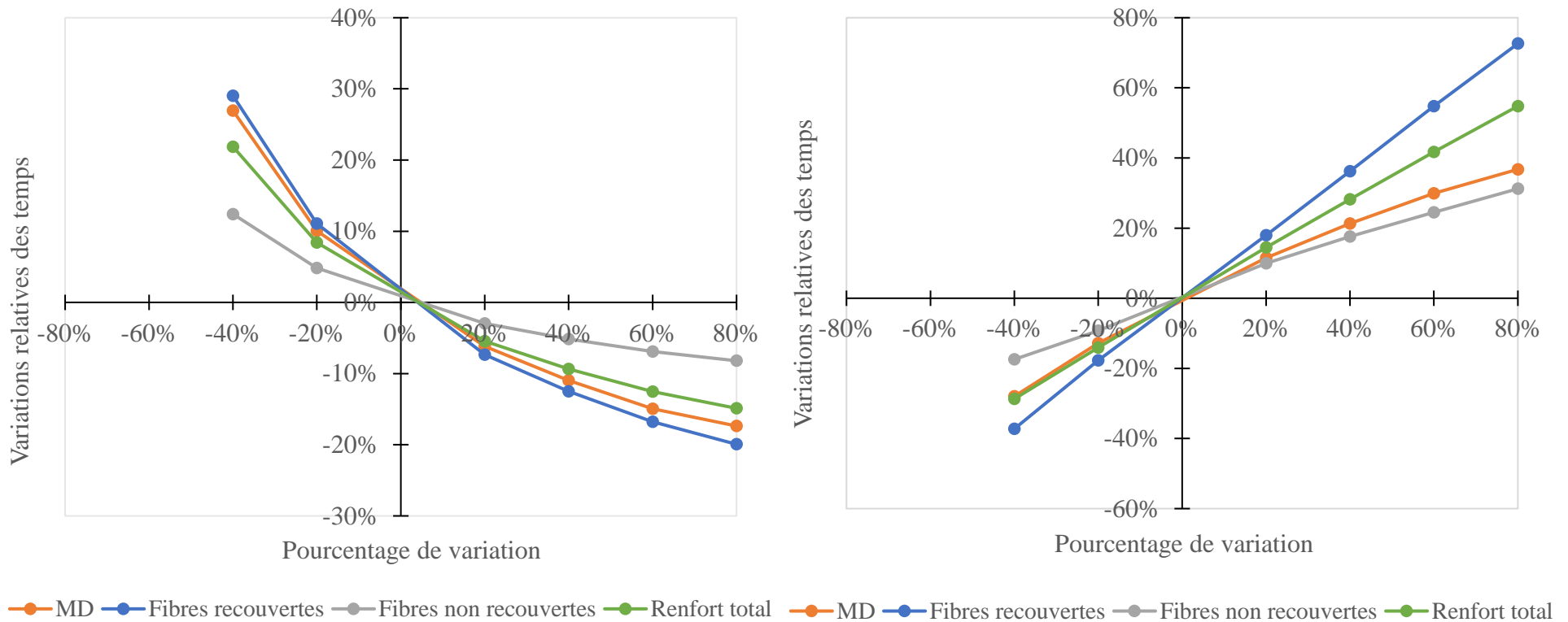


Figure 6-24. Sensibilité des simulations de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 75 kPa par rapport à l'épaisseur du milieu drainant (gauche) et du renfort (droite)

- Si l'épaisseur du milieu drainant augmente, tous les temps de remplissage diminuent légèrement et la diminution maximale est de 20% pour les fibres recouvertes par le milieu drainant. Si l'épaisseur du milieu drainant diminue plutôt, tous les temps de remplissage augmentent significativement. Pour cause, le débit dans le plan du milieu drainant devient plus faible, et le débit à travers l'épaisseur devient proportionnellement plus élevé.
- La dépendance entre l'épaisseur du renfort 2D et tous les temps de remplissage semble linéaire sur la plage considérée.

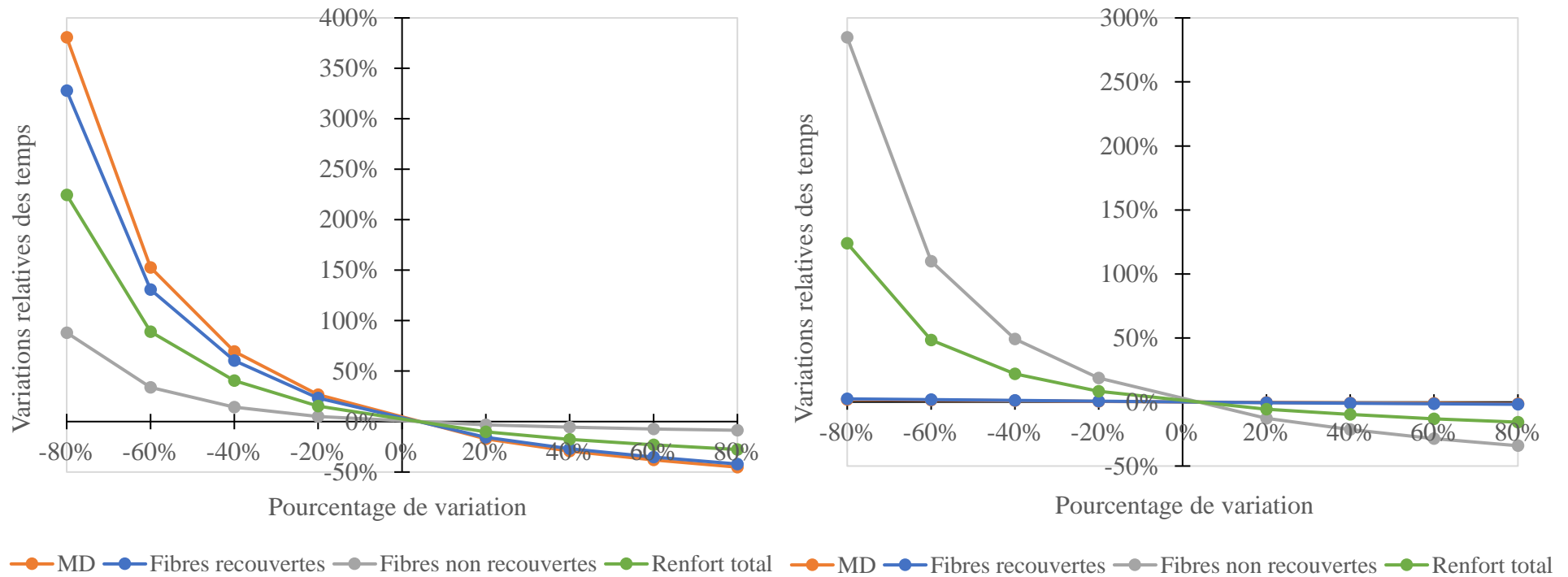


Figure 6-25. Sensibilité des simulations de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 75 kPa par rapport à la perméabilité planaire du milieu drainant (gauche) et du renfort (droite)

- Lorsque la perméabilité planaire du milieu drainant est sous-estimée, les temps de remplissage augmentent exponentiellement et l'erreur maximale est égale à 380%. Cette variation significative s'explique par le fait que la perméabilité planaire du milieu drainant se rapproche de celle du renfort fibreux. La diminution des temps de remplissage est beaucoup moins drastique lorsque la perméabilité du milieu drainant augmente. Il est donc préférable de surestimer légèrement cette perméabilité plutôt que de la sous-estimer.
- Les variations de la perméabilité planaire du renfort 2D n'affectent aucunement les temps de remplissage du milieu drainant et du renfort fibreux, car ces temps sont plutôt dominés par la perméabilité planaire du milieu drainant. Cependant, le temps de remplissage de la portion non couverte des fibres augmente exponentiellement si la perméabilité planaire du renfort diminue.

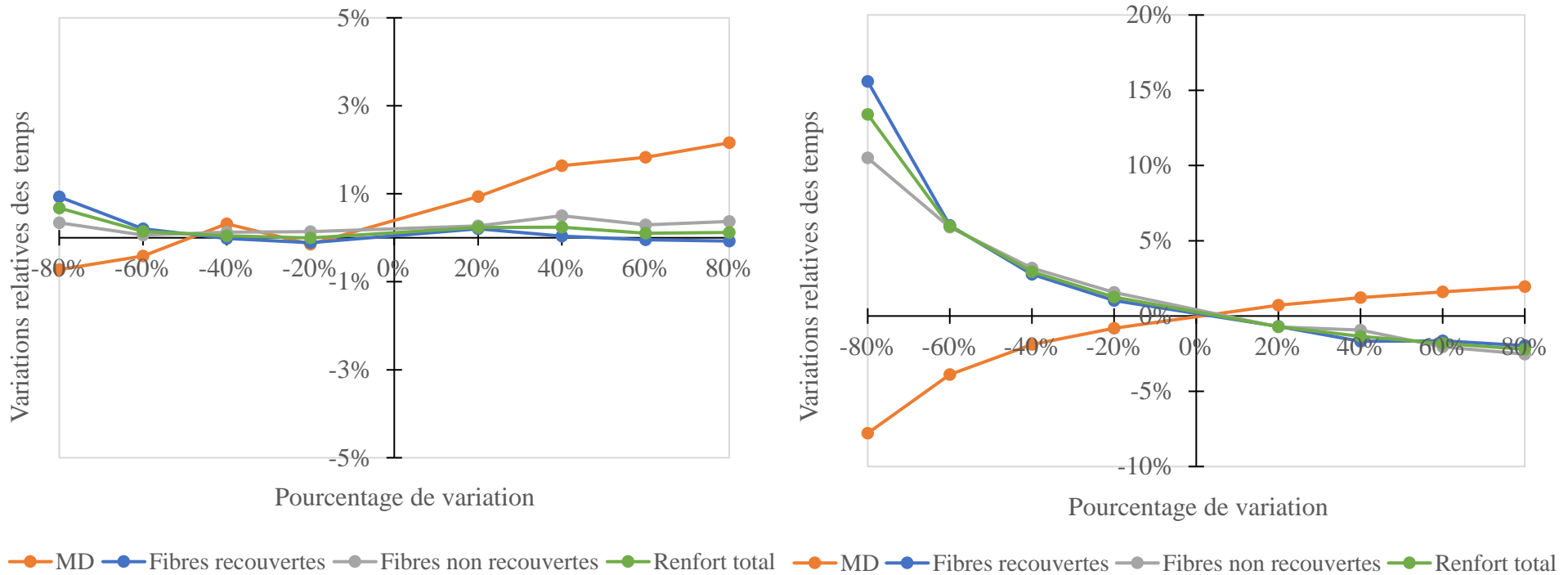


Figure 6-26. Sensibilité des simulations de l'infusion indirecte du renfort 2D à une pression de vide de 75 kPa par rapport à la perméabilité transverse du milieu drainant (gauche) et du renfort (droite)

- La perméabilité transverse du milieu drainant n'affecte que très peu les temps de remplissage. La variation relative maximale est de l'ordre de 2%. Pour cause, l'écoulement dans le milieu drainant est presque uniforme à travers son épaisseur. Cette perméabilité n'a donc pas besoin d'être caractérisée, et il est tout à fait convenable de l'approximer pour les simulations.
- Lorsque la perméabilité transverse du renfort 2D augmente, le temps de remplissage du milieu drainant augmente légèrement, et les temps de remplissage du renfort diminuent. Toutefois, la variation relative maximale reste de l'ordre de 3%. En revanche, lorsque cette perméabilité transverse diminue de 80%, le temps de remplissage du milieu drainant diminue de 8%, et celui de la portion de fibres recouvertes par ce milieu augmente de 16%. Il est donc préférable de surestimer la perméabilité transverse du renfort plutôt que de la sous-estimer.

En conclusion, les simulations de l'infusion indirecte du renfort 2D sont très sensibles à la diminution de l'épaisseur du milieu drainant, car cette variation fait augmenter exponentiellement tous les temps de remplissage caractéristiques. La sensibilité des résultats par rapport à l'augmentation de l'épaisseur du milieu drainant est moins forte. Par conséquent, si la caractérisation de la compressibilité du milieu drainant est imprécise, il est préférable de surestimer légèrement son épaisseur plutôt que de la sous-estimer. Dans le cas du renfort fibreux, la dépendance des temps de remplissage par rapport à son épaisseur reste linéaire sur la plage de variation considérée. Par conséquent, si l'épaisseur de la préforme est caractérisée de manière imprécise, les temps de remplissage augmenteront proportionnellement.

Les simulations d'infusion indirecte sont également très sensibles à la diminution de la perméabilité planaire du milieu drainant, puisque ceci entraîne une augmentation exponentielle de tous les temps de remplissage. La surestimation de cette perméabilité n'a pas un impact aussi prononcé, mais l'analyse de sensibilité démontre l'importance de caractériser précisément la perméabilité planaire du milieu drainant. Pour ce qui est du renfort 2D, sa perméabilité planaire n'affecte pas les temps de remplissage du milieu drainant et des fibres recouvertes par ce dernier, car le début de l'infusion indirecte est principalement régi par la perméabilité du milieu drainant. La variation de la perméabilité planaire du renfort a cependant un impact significatif sur le temps de remplissage des fibres non recouvertes par le milieu drainant, et donc sur le temps total de remplissage du renfort. Il importe donc de caractériser finement cette perméabilité pour prédire fidèlement la durée totale des infusions indirectes, et garantir l'imprégnation totale des fibres avant le gel de la résine.

Finalement, la perméabilité transverse du milieu drainant peut être approximée grossièrement, car elle ne semble avoir aucun impact significatif sur les prédictions numériques. Quant à la perméabilité transverse du renfort 2D, l'analyse de sensibilité montre qu'il est préférable de la surestimer légèrement plutôt que de la sous-estimer. En effet, les variations des temps de remplissage sont plus significatives lorsque la perméabilité transverse diminue qu'elles ne le sont lorsqu'elle augmente. Ceci est en accord avec les tendances observées lors de l'analyse d'identification de la perméabilité transverse du renfort.

6.3 Mélange de renforts

La perméabilité transverse apparente du renfort 2D a été caractérisée dans la section précédente. Toutefois, la démarche d'identification reste à vérifier pour des renforts fibreux possédant des perméabilités planaires plus faibles. En effet, lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts, les échanges de liquide dans la direction transverse revêtent une importance particulière, en raison de la différence significative entre la perméabilité planaire du milieu de distribution et celle du mélange de renforts. La perméabilité transverse devient peut donc ici un paramètre critique, qu'il faut identifier avec précision pour prédire fidèlement les temps de remplissage du milieu drainant et du renfort.

Les sections suivantes présentent les étapes d'identification de la perméabilité transverse apparente du mélange de renforts. Comme précédemment, des simulations d'infusion directe sont d'abord réalisées à toutes les pressions de vide considérées pour vérifier la cohérence du modèle de perméabilité planaire K_x du mélange de renforts. Une analyse de convergence est ensuite réalisée pour obtenir la taille optimale du maillage des simulations d'infusion indirecte. Ces dernières sont finalement effectuées en faisant varier la perméabilité transverse K_z , pour identifier le rapport de perméabilités K_z/K_x optimal.

6.3.1 Infusions directes

Un total de 6 simulations d'infusion directe sont effectuées pour valider le modèle de perméabilité planaire du mélange de renforts. Une simulation est réalisée pour chaque lot de renfort et chaque pression de vide. Le Tableau 6-11 présente les paramètres des 6 simulations. Les entrées du logiciel de simulation sont les viscosité moyennes déterminées en fonction de la température de chaque essai lors des expériences d'infusion directe, les pressions d'infusion moyennes mesurées, l'épaisseur et le taux volumique de fibres des 2 lots de renfort calculés à partir de leurs modèles de compressibilité, et les perméabilités planaires obtenues à partir de leurs modèles de perméabilité planaire flexible respectifs.

Tableau 6-11. Paramètres des simulations d'infusion directe du mélange de renforts et erreurs obtenues sur le temps de remplissage par rapport aux mesures

Lot	Viscosité de l'huile	Pression d'infusion	Épaisseur	Taux de fibres	Perméabilité planaire	Erreur
	(μ)	(kPa)	(mm)	(%)	(m^2)	(%)
A	0,09725	49,61	2,429	53,4	1,85E-11	-12,3%
	0,09720	72,48	2,375	54,6	1,63E-11	-10,7%
	0,09763	92,91	2,333	55,5	1,28E-11	-7,4%
N	0,09842	49,40	2,328	55,0	1,44E-11	-11,8%
	0,09732	72,27	2,278	56,3	1,36E-11	-12,6%
	0,09724	94,07	2,239	57,3	1,02E-11	-13,5%

Le Tableau 6-11 montre que le modèle de perméabilité planaire apparente du mélange de renforts permet de prédire les temps de remplissage avec une erreur maximale de sous-estimation de 13,5%. Comme précédemment, cette erreur est causée par la méthode d'interpolation par moindres carrés, qui fait en sorte que les temps de remplissage sont surestimés au début de l'infusion, puis sous-estimés par la suite. Les mesures de perméabilité sont par conséquent jugées acceptables.

6.3.2 Infusions indirectes

Les simulations d'infusion indirecte débutent maintenant pour identifier la perméabilité transverse apparente du mélange de renforts. Une analyse de convergence est d'abord réalisée pour choisir la taille optimale du maillage, qui permet de reproduire fidèlement les écoulements à travers l'épaisseur, tout en minimisant les temps de calcul.

6.3.2.1 Analyse de convergence

Le Tableau 6-12 résume les paramètres des simulations d'analyse de convergence pour les infusions indirectes du mélange de renforts. La viscosité de l'huile, la pression d'infusion, les épaisseurs, les taux volumiques de fibres et les perméabilités planaires proviennent des résultats expérimentaux moyens obtenus lors des infusions indirectes du mélange de renforts à des pressions de vide avoisinant 75 kPa. Les perméabilités transverses sont estimées en première approximation.

Tableau 6-12. Paramètres de l'analyse de convergence réalisée pour les infusions indirectes du renfort 2D à une pression de vide avoisinant 75 kPa

Viscosité de l'huile	Pression d'infusion	Matériau	Épaisseur	Taux de fibres	Perméabilité planaire	Perméabilité transverse
(Pa.s)	(kPa)		(mm)	(%)	(m ²)	(m ²)
0,09699	73,44	MD	1,003	12,32	6,39E-09	6,39E-09
		Renfort	2,278	56,3	1,36E-11	1,36E-12

Comme pour le renfort 2D, la taille du maillage est choisie de sorte qu'il y ait 1, 2, 3, 5, 9 ou 18 éléments à travers l'épaisseur du milieu de distribution. Le Tableau 6-13 présente l'influence de la taille du maillage sur le nombre d'éléments, le temps CPU, et les 3 temps caractéristiques de l'infusion indirecte identifiés dans la section 5.2.3, c'est-à-dire le temps de remplissage total du milieu drainant, le temps de remplissage des fibres recouvertes par le milieu drainant et le temps de remplissage total du renfort. La Figure 6-27 présente également ces temps normalisés par rapport au maillage le plus fin en fonction du nombre d'éléments à travers l'épaisseur.

Tableau 6-13. Influence de la taille du maillage sur le nombre d'éléments et le temps CPU et les temps de remplissage caractéristiques de l'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide avoisinant 75 kPa

# éléments à travers l'épaisseur du MD	# d'éléments	Temps CPU	Temps de remplissage		
			Milieu drainant	Fibres recouvertes	Renfort (total)
		(s)	(s)	(s)	(s)
1	3 826	48	19,7	148,2	40,1
2	15 287	170	21,9	145,2	39,8
3	35 273	483	21,5	143,2	39,6
5	77 053	1 444	21,6	140,7	39,4
9	319 672	12 370	21,4	141,5	40,0
18 (référence)	1 283 812	105 128	22,3	141,9	40,4

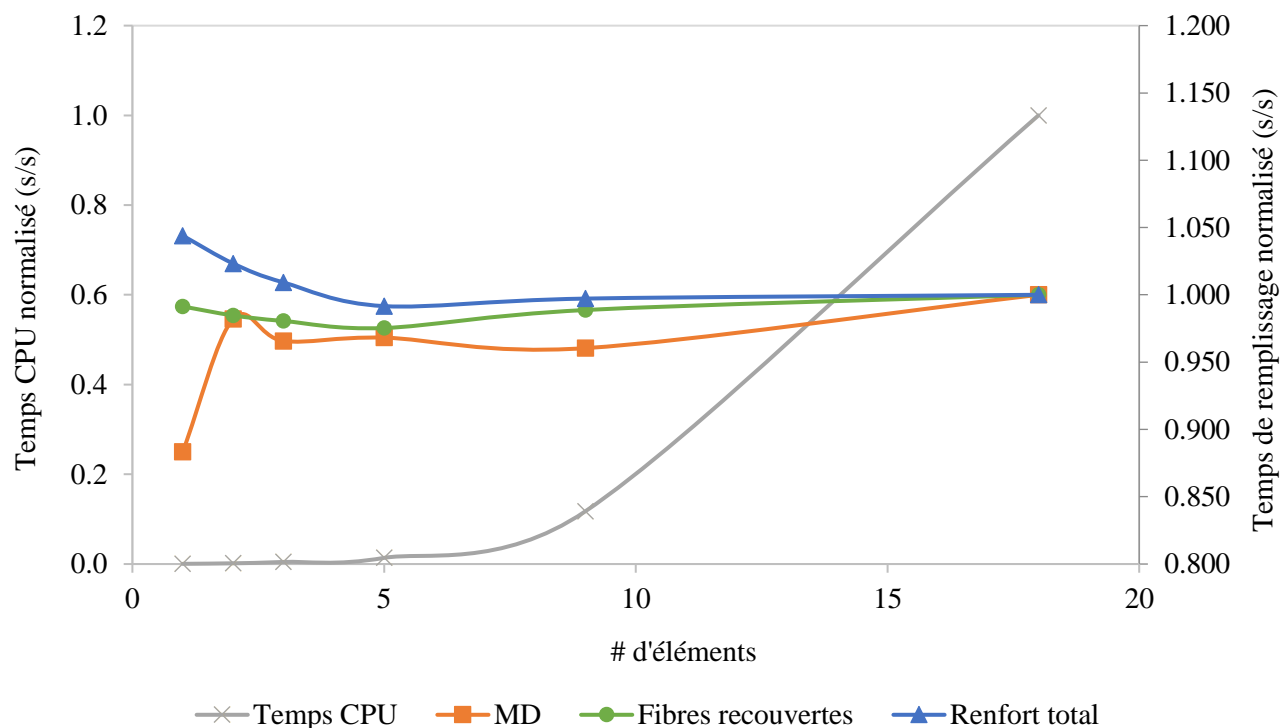


Figure 6-27. Temps CPU et temps de remplissages caractéristiques en fonction du nombre d'éléments pour simuler l'infusion indirecte du mélange de renforts, à une pression de vide avoisinant 75 kPa

Une erreur relative maximale de 11,7% est calculée sur le temps de remplissage du milieu drainant au maillage le plus grossier. Ensuite, lorsque le maillage est raffiné, des oscillations sont observées jusqu'à ce que les prédictions convergent à partir de la quatrième simulation, lorsque 5 éléments sont maillés à travers l'épaisseur du maillage. Le temps CPU augmente exponentiellement à partir de 5 éléments pour atteindre un temps équivalent à plus de 29 heures pour le maillage le plus raffiné. Par conséquent, le maillage de 5 éléments à travers l'épaisseur du milieu drainant semble combiner de manière optimale un temps CPU raisonnable et des prédictions stables des temps de remplissage. C'est donc cette taille de maillage qui sera choisie pour la suite des simulations. Noter que le maillage optimal est plus dense pour le mélange de renforts que pour le renfort 2D. Ceci s'explique par la perméabilité relativement plus faible du mélange de renforts, qui fait en sorte que la saturation des fibres s'effectue majoritairement à travers l'épaisseur de la préforme. Il faut donc un nombre supérieur d'éléments à travers l'épaisseur, pour représenter adéquatement l'écoulement à travers le renfort.

6.3.2.2 Identification de la perméabilité transverse

Les expériences d'infusion indirecte effectuées aux pressions de vide de 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa peuvent maintenant être reproduites avec la taille de maillage choisie pour identifier la perméabilité transverse apparente du mélange de renforts. Comme pour le renfort bidirectionnel, 6 simulations sont effectuées par pression de vide, de sorte que le rapport entre les perméabilités transverse et planaire varie logarithmiquement : $[K_z/K_x = 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 10]$. Le tableau ci-dessous résume les paramètres de toutes les simulations effectuées.

Tableau 6-14. Paramètres des simulations d'identification de la perméabilité transverse du mélange de renforts à des pressions d'infusion avoisinant 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa

Viscosité de l'huile	Pression d'infusion	Matériau	Épaisseur	Taux de fibres	Perméabilité planaire	Perméabilité transverse
(Pa.s)	(kPa)		(mm)	(%)	(m ²)	(m ²)
0,09632	50,96	MD	1,009	12,26	6,50E-09	6,50E-09
		Renfort	2,328	55,0	1,44E-11	$K_z/K_x = [10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10]$
0,09699	73,44	MD	1,003	12,32	6,39E-09	6,39E-09
		Renfort	2,278	56,3	1,36E-11	$K_z/K_x = [10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10]$
0,09654	91,38	MD	0,999	12,36	5,54E-09	5,54E-09
		Renfort	2,239	57,3	1,02E-11	$K_z/K_x = [10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10]$

Les Figures 6-28 à 6-30 illustrent également les erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage caractéristiques pour les infusions indirectes du mélange de renforts, réalisées à des pressions de vide avoisinant respectivement 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa.

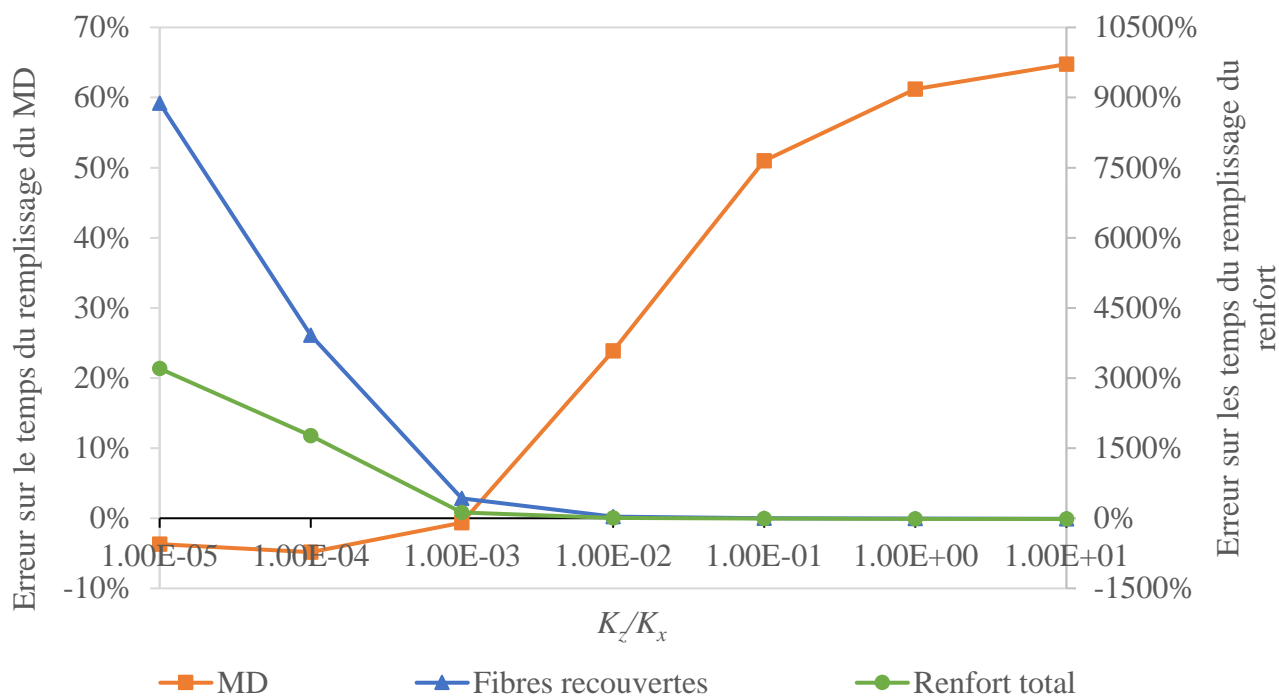


Figure 6-28. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide avoisinant 50 kPa

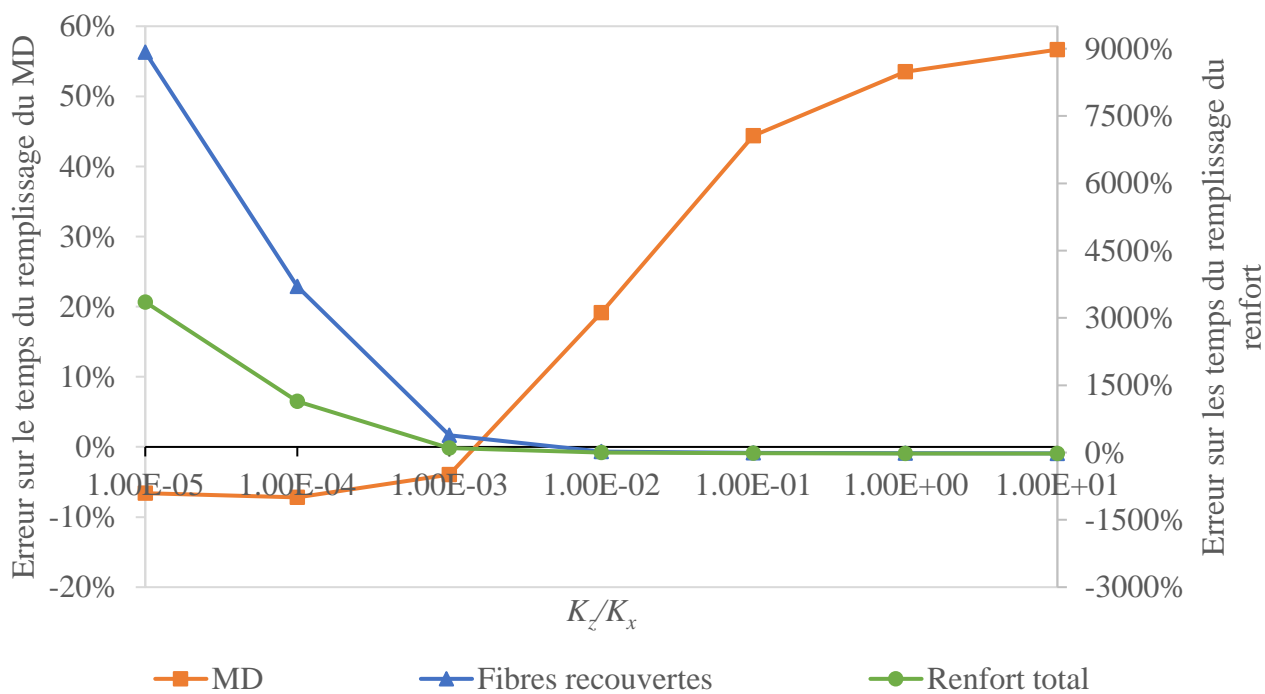


Figure 6-29. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide avoisinant 75 kPa

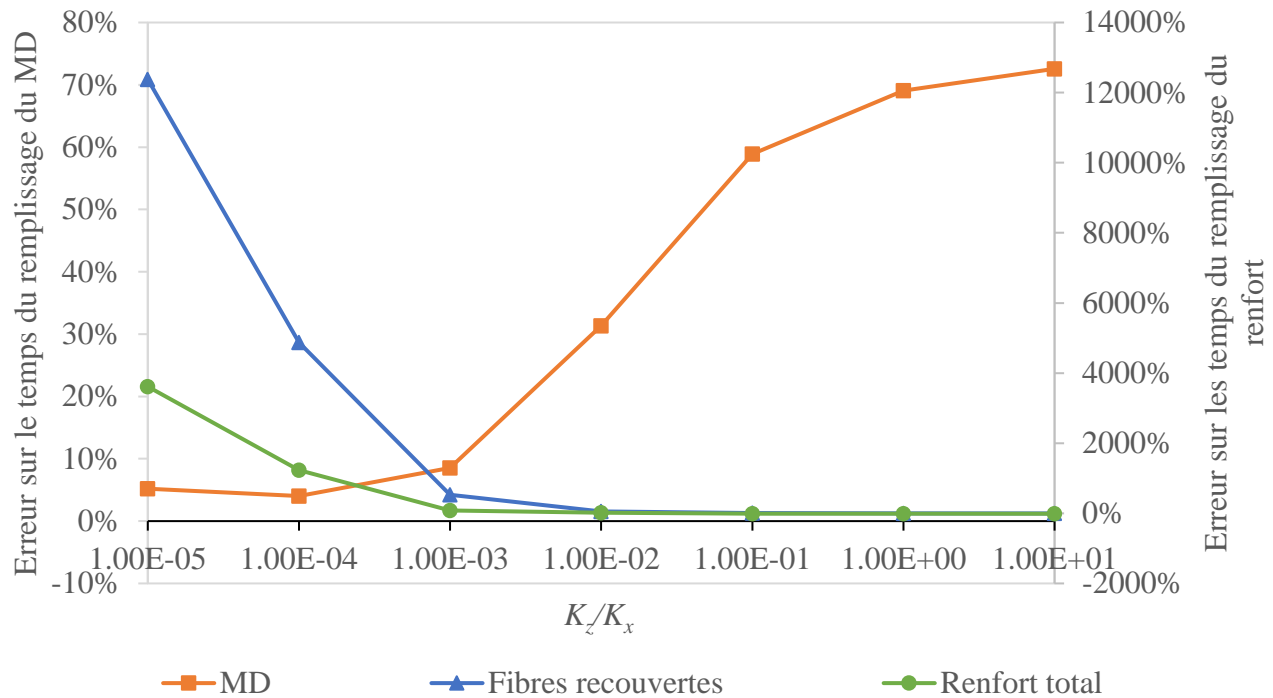


Figure 6-30. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide avoisinant 100 kPa

Les tendances générales observées lors de l'identification de la perméabilité transverse apparente sont similaires à celles notées précédemment pour le renfort bidirectionnel. En effet, les temps de remplissage du milieu drainant, dont les erreurs varient entre un minimum de -7,2% et un maximum de 72,6%, sont moins affectés par la perméabilité transverse que les temps de remplissage du renfort, dont les erreurs varient entre -23% et 12 000%.

De plus, les erreurs sur le temps de remplissage du milieu drainant semblent encore atteindre des valeurs asymptotiques lorsque le rapport de perméabilité K_z/K_x augmente. Les asymptotes sont toutefois beaucoup plus élevées qu'avec le renfort 2D, puisqu'elles sont de l'ordre de 70% aux pressions de vide de 50 kPa et 100 kPa, et de 60% à 75 kPa. Cette erreur ne peut donc que partiellement être attribuée à l'interpolation à pression constante de la perméabilité planaire du milieu drainant, et cette explication ne suffit pas à justifier des erreurs aussi importantes.

Les erreurs sur les temps de remplissage du renfort suivent une tendance exponentielle à la baisse lorsque la perméabilité transverse augmente. Les rapports de perméabilité qui minimisent les erreurs de prédiction dans les fibres sont donc supérieurs à $K_z/K_x = 10^{-2}$ aux 3 pressions de vide considérées. Toutefois, à ces rapports de perméabilité, les temps de remplissage du milieu drainant sont significativement surestimés. Par conséquent, il n'est pas possible de reproduire simultanément les fronts d'écoulement expérimentaux dans le milieu drainant et le mélange de renforts avec les paramètres fournis en entrée au logiciel de simulation.

Le milieu de distribution étant un consommable jeté après durcissement de la pièce final, il est plus important de prédire les temps de remplissage du renfort fibreux pour optimiser les stratégies d'infusion. Ce sont donc les erreurs de prédiction des temps de remplissage du renfort que l'on cherche à minimiser en priorité dans la suite de l'analyse. Les rapports de perméabilité sont par conséquent ajustés par balayage paramétrique entre les rapports de perméabilité $K_z/K_x = 10^{-3}$ et $K_z/K_x = 10^{-1}$, jusqu'à ce que les prédictions numériques des temps de remplissage du renfort correspondent fidèlement aux fronts d'écoulement expérimentaux.

À la pression de vide avoisinant 50 kPa, la perméabilité transverse ainsi identifiée est $K_z = 2,88E-13 \text{ m}^2$, et les Figures 6-31 et 6-32 illustrent les fronts d'écoulement prédits respectivement dans le milieu drainant et le renfort à cette perméabilité. La position du front dans le milieu drainant est sous-estimée sur l'ensemble de la simulation. Dans le renfort fibreux, le temps de remplissage est légèrement surestimé entre 0 s et 28 s, puis sous-estimé entre 28 s et 50 s. Il y a néanmoins un accord satisfaisant entre l'allure globale des fronts expérimental et numérique et les temps de remplissage prédits passent par les barres d'erreur horizontales à la fin de la simulation. Ceci indique qu'il est difficile de reproduire le début de l'écoulement expérimental, lorsqu'il se produit majoritairement à travers l'épaisseur de la préforme, mais que les simulations peuvent tout de même donner des prédictions satisfaisantes des temps de remplissage. Ces conclusions expliquent également les erreurs de prédiction dans le milieu drainant, car la composante transverse de l'écoulement est très significative durant l'imprégnation de ce matériau.

Des constatations similaires peuvent être tirées des Figures 6-33 et 6-34 qui comparent les fronts à la pression de vide avoisinant 75 kPa, dans le milieu drainant et le renfort respectivement. Les Figures 6-35 et 6-36 les comparent pour la pression de vide de 100 kPa. Enfin, le Tableau 6-15 résume les résultats de l'identification pour toutes les pressions de vide considérées.

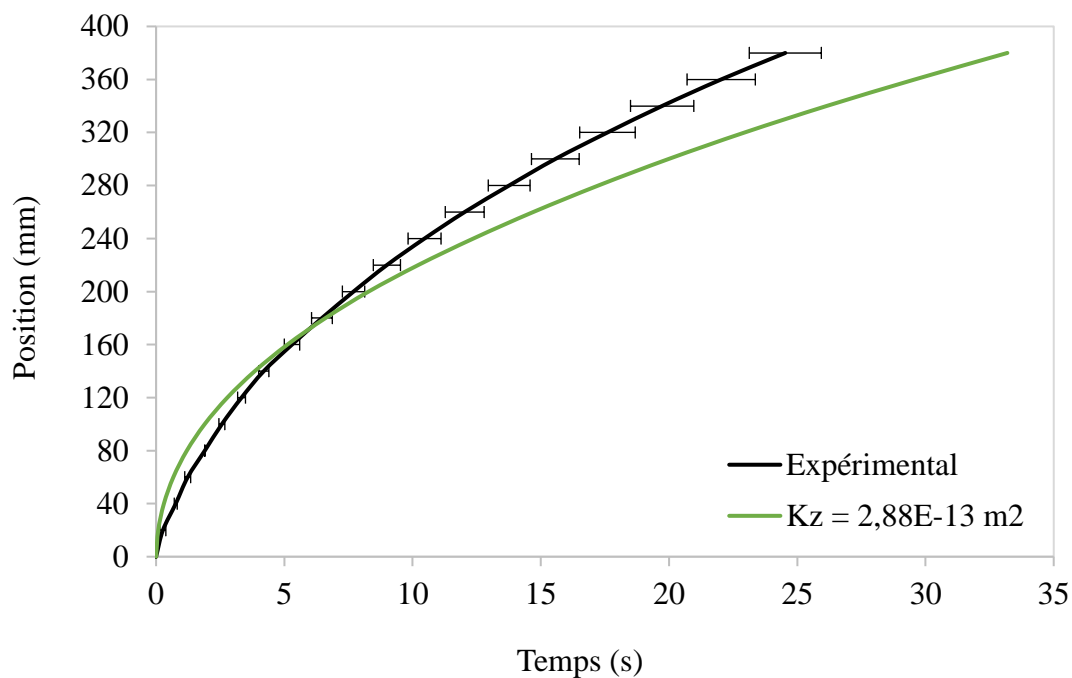


Figure 6-31. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,88E-13 \text{ m}^2$

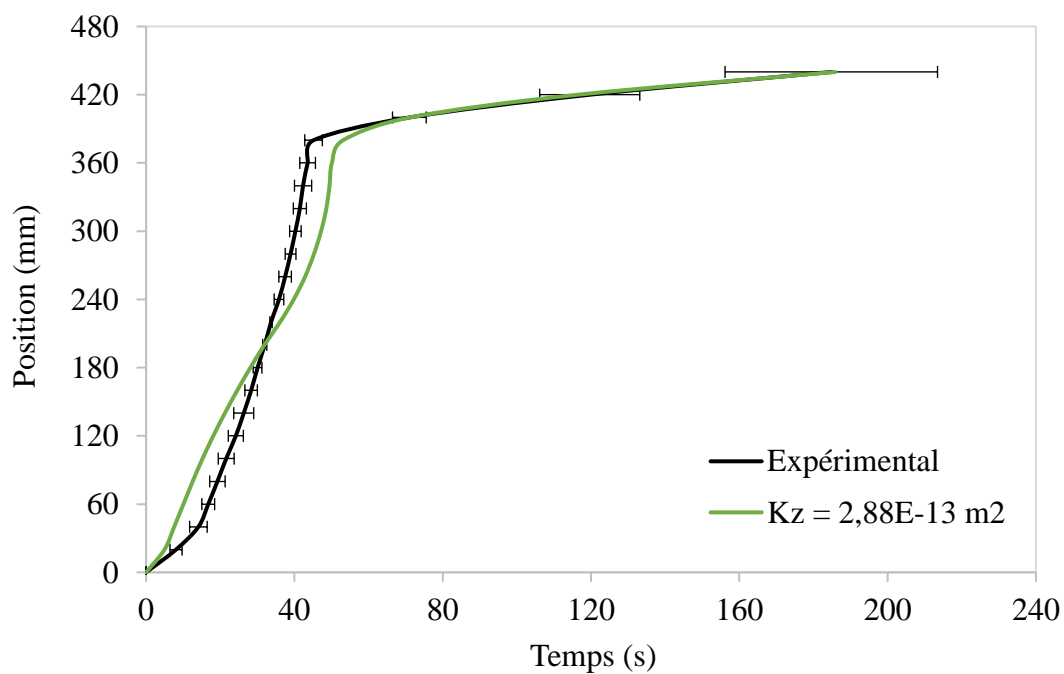


Figure 6-32. Front expérimental dans le mélange de renforts lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,88E-13 \text{ m}^2$

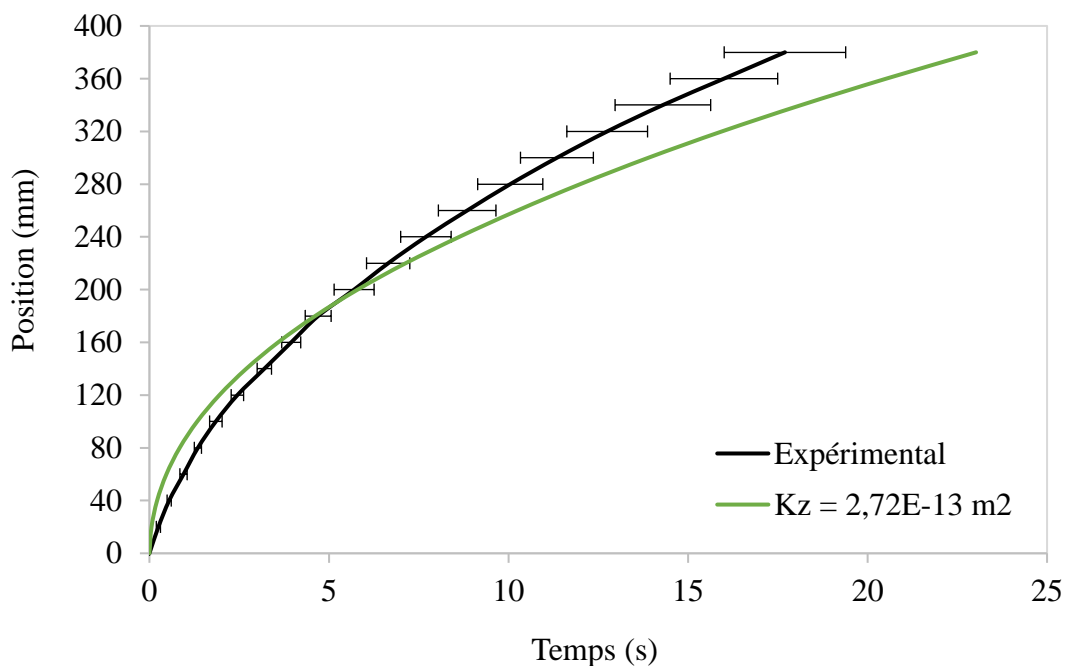


Figure 6-33. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,72E-13 \text{ m}^2$

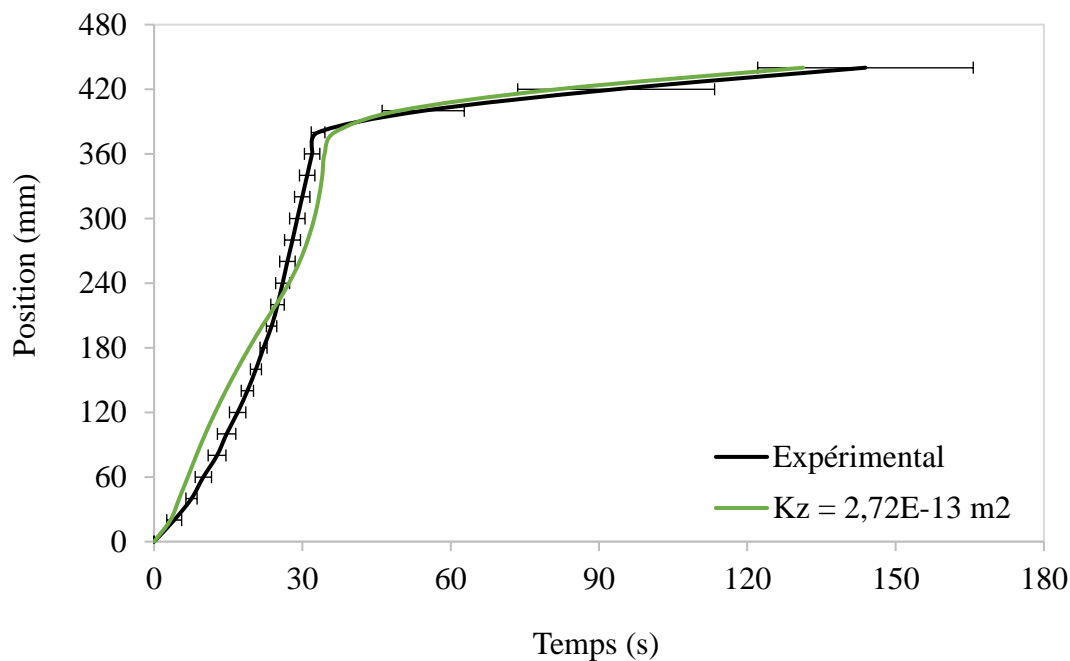


Figure 6-34. Front expérimental dans le mélange de renforts lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 2,72E-13 \text{ m}^2$

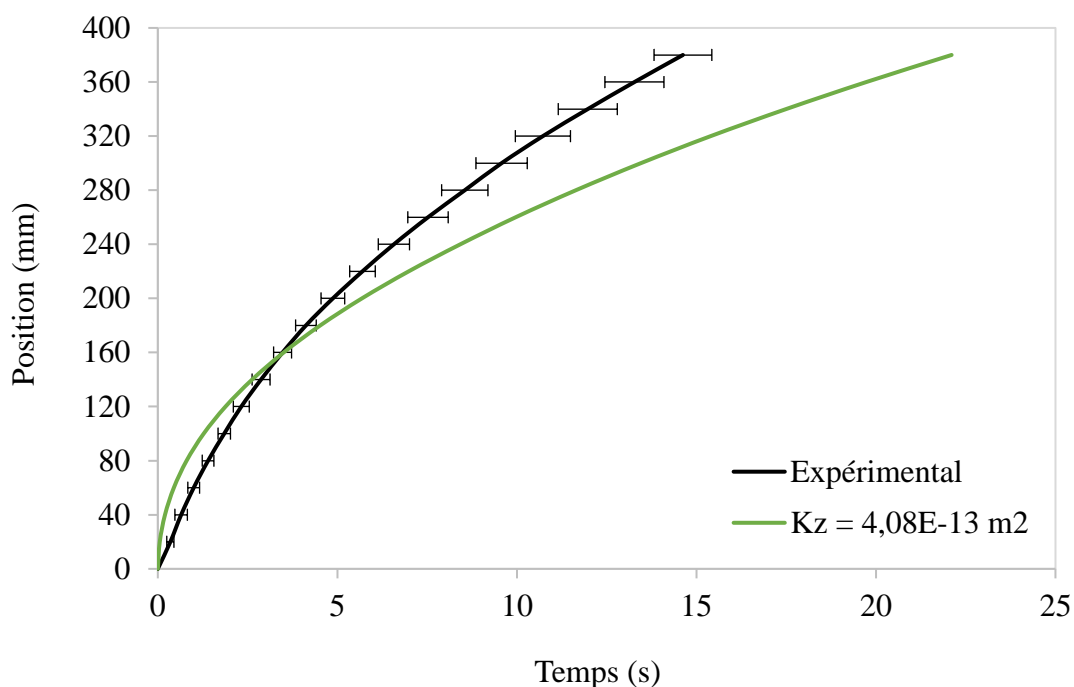


Figure 6-35. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 4,08E-13 \text{ m}^2$

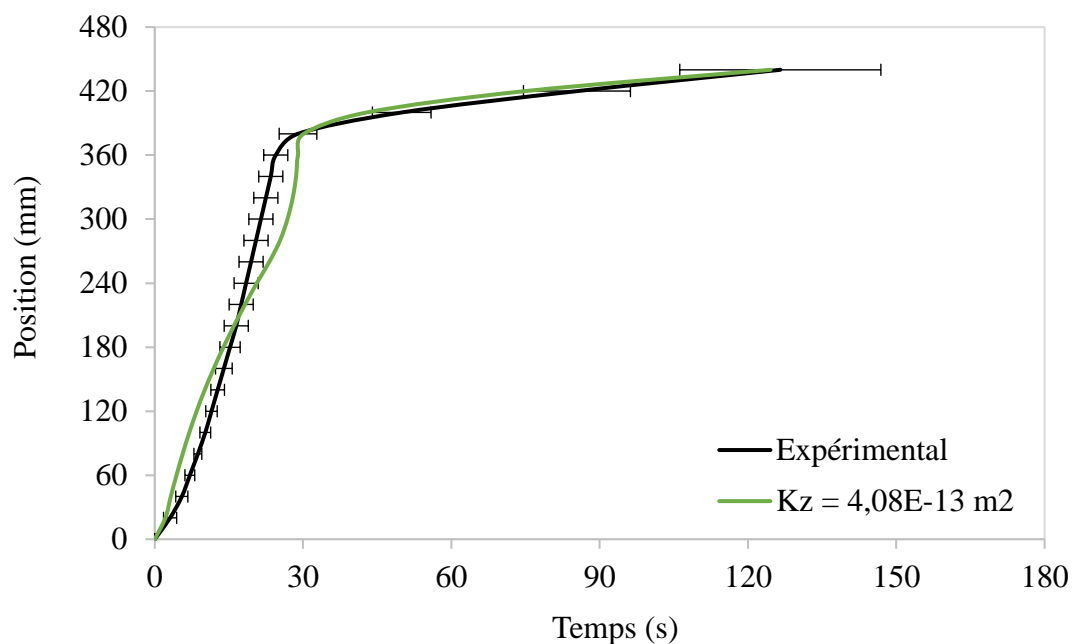


Figure 6-36. Front expérimental dans le mélange de renforts lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 4,08E-13 \text{ m}^2$

Tableau 6-15. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts, à des pressions de vide avoisinant 50 kPa, 75 kPa et 100 kPa

Pression d'infusion (kPa)	Perméabilité transverse (m^2)	Rapport de perméabilité K_z/K_x	Erreur relative sur le temps de remplissage		
			Milieu drainant	Fibres recouvertes par le MD	Renfort (total)
50,96	2,88E-13	2,00E-02	35,3%	0,6%	15,0%
73,44	2,72E-13	2,00E-02	30,1%	-8,8%	7,9%
91,38	4,08E-13	4,00E-02	51,2%	-1,6%	18,3%

Enfin, les infusions supplémentaires réalisées avec un nombre supérieur de plis sont reproduites numériquement. En revanche, contrairement au renfort 2D, la perméabilité transverse apparente identifiée pour 3 plis du renfort 1D alternés avec 2 plis du renfort 2D, ne permet pas de prédire les temps de remplissage des échantillons constitués de 6 et 5 plis des renforts 1D et 2D, respectivement. En effet, la Figure 6-37 montre que les simulations effectuées avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 1,28E-13 \text{ m}^2$ surestiment significativement la position du front d'écoulement, et les erreurs sur les temps de remplissage du renfort et des fibres recouvertes par le milieu drainant sont respectivement de 19% et 27%. Il faut par conséquent diminuer la perméabilité transverse K_z à $1,28E-13 \text{ m}^2$ pour obtenir des prédictions satisfaisantes du front d'écoulement et des erreurs de l'ordre de 1% et 12% sur les temps de remplissage. Avec cette nouvelle perméabilité transverse, la position du front d'écoulement est encore surestimée dans le milieu drainant, et l'erreur sur son temps de remplissage est de 27% (Figure 6-38).

Les difficultés de prédiction des fronts d'écoulement dans les échantillons de 11 plis du mélange de renforts peuvent s'expliquer par le fait que l'on atteint les limites du procédé d'infusion indirecte de résine avec des échantillons ayant une épaisseur aussi élevée et une perméabilité planaire aussi faible. En effet, comme expliqué dans la section 5.4.3, l'écoulement progresse très rapidement dans le milieu drainant comparativement au renfort fibreux. Le milieu drainant est donc entièrement saturé avant que le front ne progresse significativement dans le renfort. Ce dernier est alors principalement imprégné à travers son épaisseur et la progression du front n'est plus linéaire.

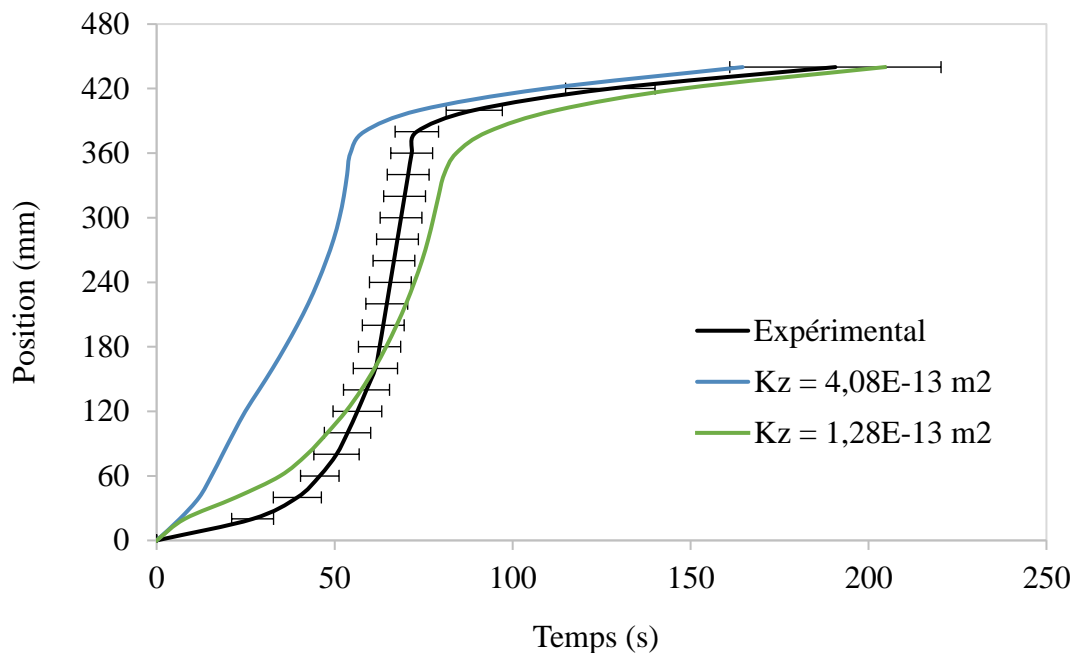


Figure 6-37. Front expérimental dans les 11 plis du mélange de renforts lors de leur infusion indirecte à une pression de vide de 100 kPa et fronts prédits numériquement avec les perméabilités transverses $K_z = 4,08E-13 \text{ m}^2$ et $K_z = 1,28E-13 \text{ m}^2$

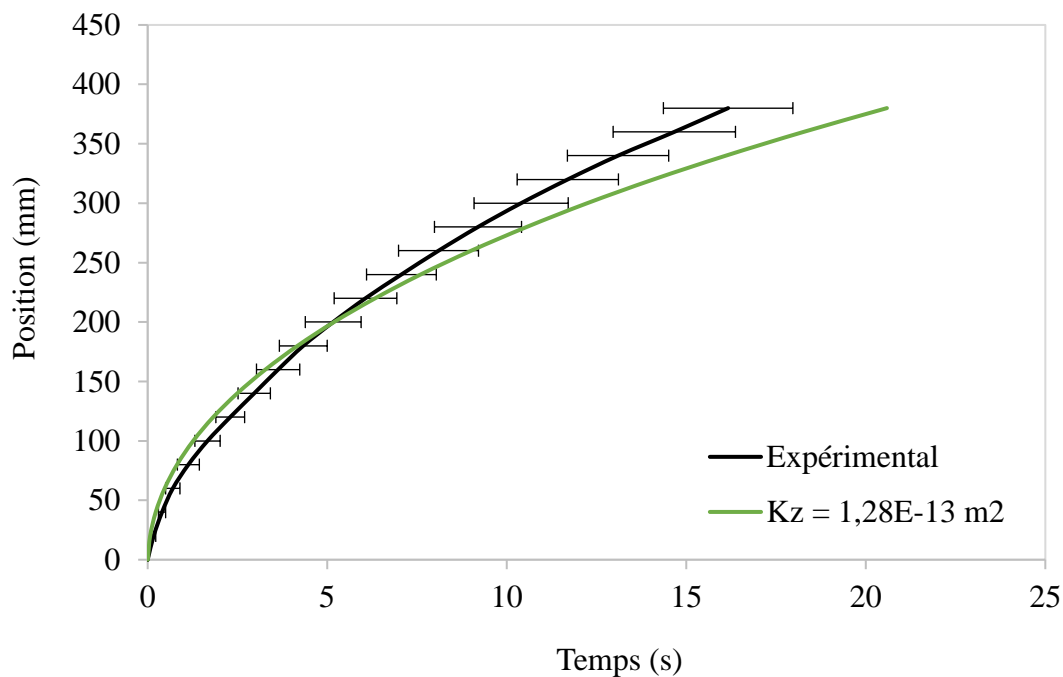


Figure 6-38. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte de 11 plis du mélange de renforts à une pression de vide de 100 kPa et front prédit numériquement avec la perméabilité transverse identifiée $K_z = 1,28E-13 \text{ m}^2$

En plus de causer des défauts de fabrication majeurs, les écoulements insaturés à travers l'épaisseur sont erratiques et peu répétables. Ils sont donc difficiles à reproduire numériquement et doivent être évités dans un contexte de fabrication industriel. Les simulations de l'infusion indirecte de 11 plis du mélange de renforts n'invalident par conséquent pas l'approche proposée d'identification de la perméabilité transverse, qui demeure robuste dans les limites du procédé d'infusion de résine. Au contraire, l'analyse numérique confirme les difficultés possibles rencontrées dans les applications industrielles.

6.3.2.3 Variation de la pression d'infusion

Comme dans le cas du renfort 2D, des simulations additionnelles à pression variable sont réalisées afin d'étudier l'impact des chutes de pression au port d'injection. Les pressions réelles mesurées lors des infusions indirectes du mélange de renfort aux pressions de vide avoisinant 50 kPa et 75 kPa et la perméabilité du milieu drainant interpolée à pression variable sont donc fournies en entrée au logiciel de simulation (Figure 6-39). Le Tableau 6-16 résume les paramètres des simulations. Aucune simulation n'est effectuée à 100 kPa, car la pression au port d'injection n'a pas été mesurée lors de ces expériences d'infusion indirecte.

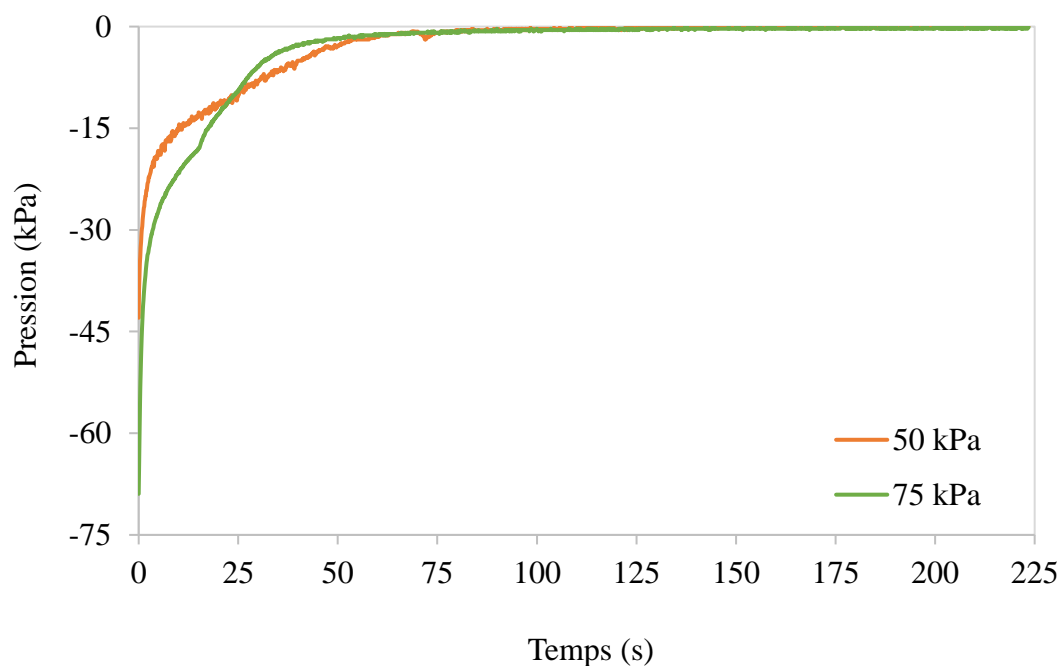


Figure 6-39. Évolution de la pression expérimentale mesurée au port d'injection lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts à des pressions de vide de 50 kPa et 75 kPa

Tableau 6-16. Paramètres des simulations de l'infusion indirecte du mélange de renforts à des pressions d'infusion variables avoisinant 50 kPa et 75 kPa

Viscosité de l'huile	Pression d'infusion	Matériau	Épaisseur	Taux de fibres	Perméabilité planaire	Perméabilité transverse
(Pa.s)	(kPa)		(mm)	(%)	(m ²)	(m ²)
0,09632	$f(t) \leq 50$	MD	1,009	12,26	1,10E-08	1,10E-08
		Renfort	2,328	55,0	1,44E-11	2,88E-13
0,09699	$f(t) \leq 75$	MD	1,003	12,32	1,04E-08	1,04E-08
		Renfort	2,278	56,3	1,36E-11	2,72E-13

Les Figures 6-40 et 6-41 comparent les fronts expérimentaux et numériques obtenus à la pression d'infusion variable avoisinant 50 kPa, dans le milieu drainant et le renfort 2D respectivement, et les Figures 6-42 et 6-43 les comparent à la pression d'infusion avoisinant 75 kPa. Enfin, le Tableau 6-17 donne les erreurs de prédiction des temps caractéristiques de l'infusion indirecte.

Comme pour le renfort 2D, les fronts d'écoulement expérimentaux lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts sont reproduits plus fidèlement si les simulations sont réalisées à pression d'infusion réelle. En effet, un meilleur accord est observé entre les fronts expérimentaux et numériques sur l'ensemble de l'infusion. L'erreur maximale sur le temps de remplissage du milieu drainant est ainsi de 22,0% comparativement à une erreur maximale de 35,3% lorsque les simulations sont réalisées à pression constante (voir Tableau 6-15). L'erreur maximale sur le temps de remplissage des fibres recouvertes par le milieu drainant est de 5,3%, en comparaison avec une erreur maximale de 8,8% à pression constante. Enfin, l'erreur maximale sur le remplissage du renfort entier est de 18,8% à pression variable, comparativement à 15,0% à pression constante, mais la prédiction numérique se situe toujours dans les limites de l'écart-type expérimental.

On peut ainsi valider les modèles de compressibilité et de perméabilité du milieu drainant et du mélange de renforts, et conclure qu'il est préférable de tenir compte des variations de pression lorsqu'elles sont connues. Cependant, dans un contexte de fabrication industrielle où l'on ne connaît pas les chutes de pression au port d'injection, les perméabilités interpolées à pression constante suffisent à obtenir une prédiction satisfaisante des temps de remplissage du renfort.

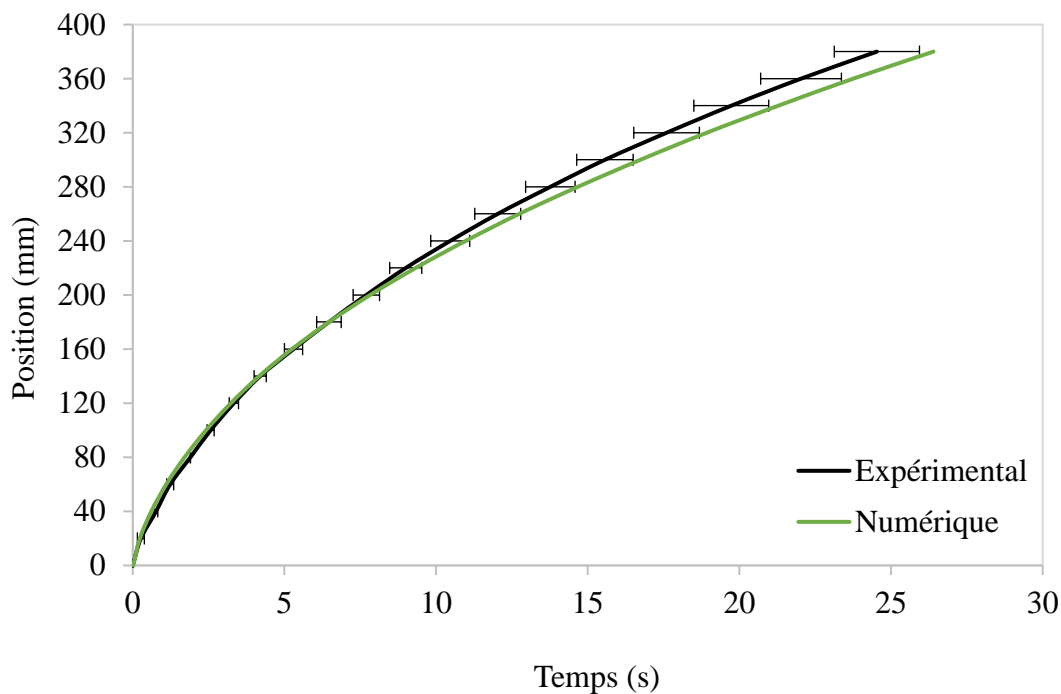


Figure 6-40. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable

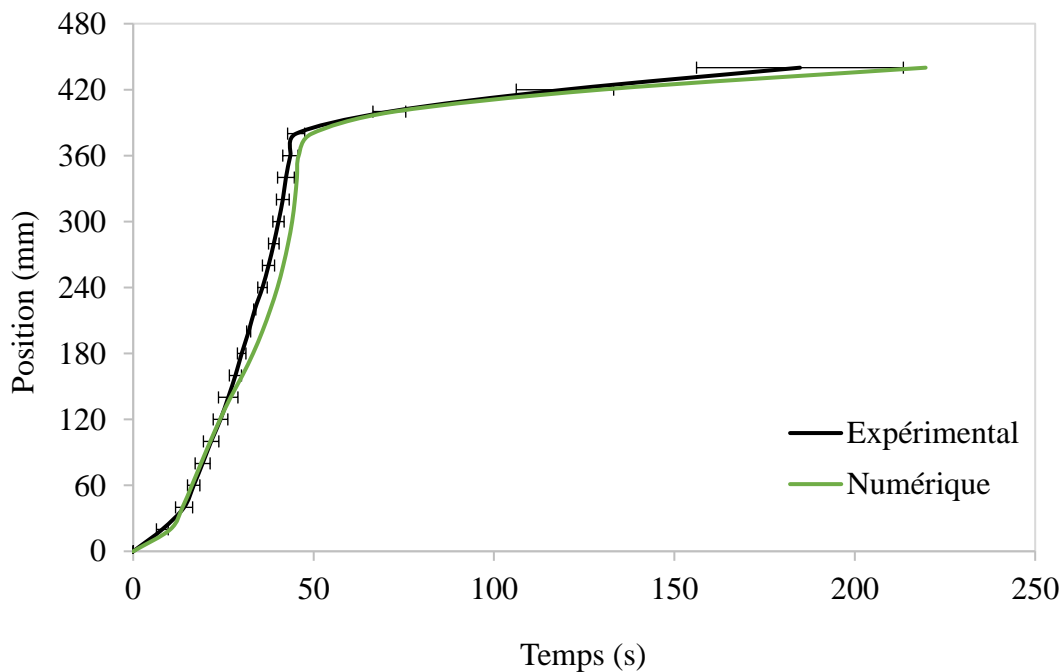


Figure 6-41. Front expérimental dans le mélange de renforts lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 50 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable

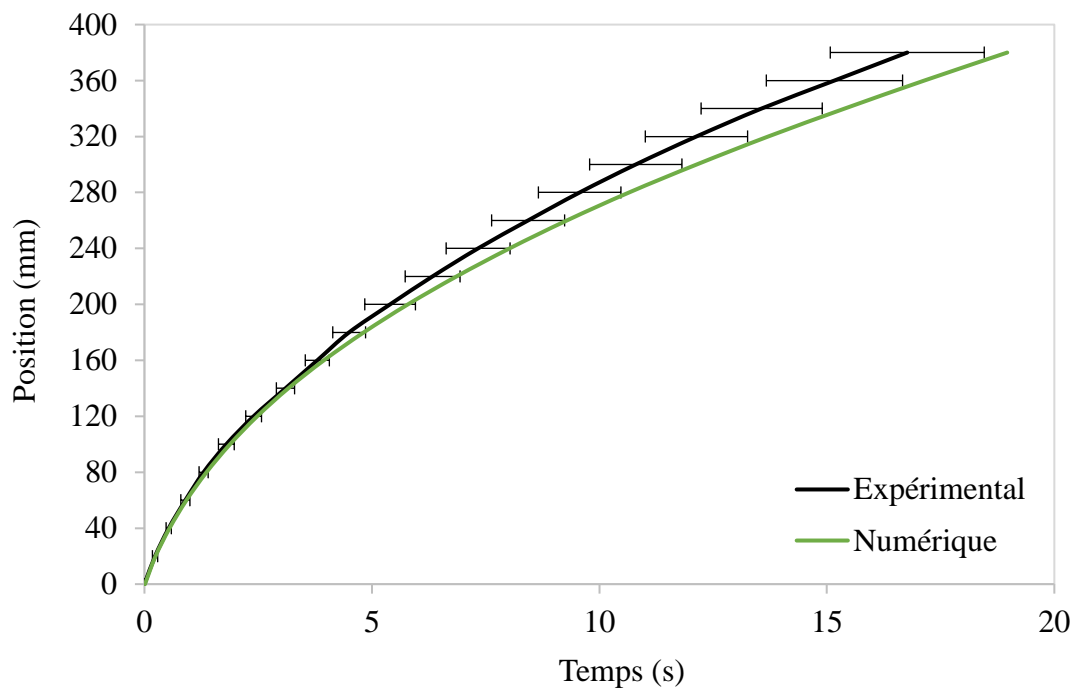


Figure 6-42. Front expérimental dans le milieu drainant lors de l'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable

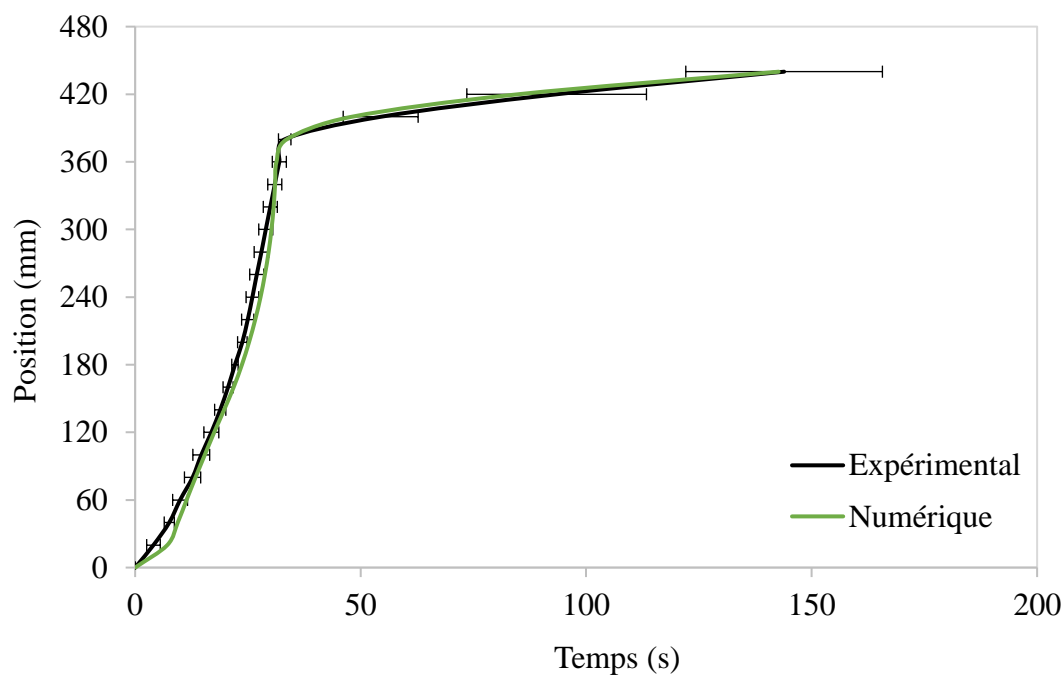


Figure 6-43. Front expérimental dans le mélange de renforts lors de son infusion indirecte à une pression de vide de 75 kPa et front prédit numériquement à pression d'infusion variable

Tableau 6-17. Erreurs relatives de prédiction des temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes et du renfort entier pour les simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts, à des pressions d'infusion variables avoisinant 50 kPa et 75 kPa

Pression d'infusion (kPa)	Erreur relative sur le temps de remplissage		
	Milieu drainant	Fibres recouvertes par le MD	Renfort (total)
$f(t) \leq 50$	22,0%	5,3%	18,8%
$f(t) \leq 75$	13,1%	-2,0%	-0,8%

6.3.2.4 Analyse de sensibilité

Maintenant que l'approche d'identification de la perméabilité transverse est validée pour les deux types de renforts étudiés, l'analyse de sensibilité est répétée pour vérifier si les conclusions tirées avec le renfort 2D s'appliquent pour une gamme plus large de renforts fibreux. Cette vérification est nécessaire, car en raison de la perméabilité planaire relativement faible du mélange de renforts, l'écoulement à travers l'épaisseur revêt une importance particulière. Les paramètres d'entrée des simulations pourraient donc exercer une influence différente sur les prédictions numériques.

Le Tableau 6-18 présente les paramètres de la simulation de « référence » réalisée pour l'analyse de sensibilité, dans le cas des simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide avoisinant 75 kPa. À partir de cette référence, les épaisseurs et les perméabilités sont modifiés tour à tour de [-80%, -60%, -40%, -20%, +20%, +40%, +60%, +80%]. Les Figures 6-44 à 6-46 ci-dessous illustrent les résultats de l'analyse de sensibilité pour ces différents paramètres.

Tableau 6-18. Paramètres de la simulation de « référence » de l'analyse de sensibilité pour les simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide avoisinant 75 kPa

Viscosité de l'huile	Pression d'infusion	Matériau	Épaisseur	Taux de fibres	Perméabilité planaire	Perméabilité transverse
(Pa.s)	(kPa)		(mm)	(%)	(m ²)	(m ²)
0,09699	73,44	MD	1,003	12,32	6,39E-09	6,39E-09
		Renfort	2,278	56,3	1,36E-11	1,36E-13

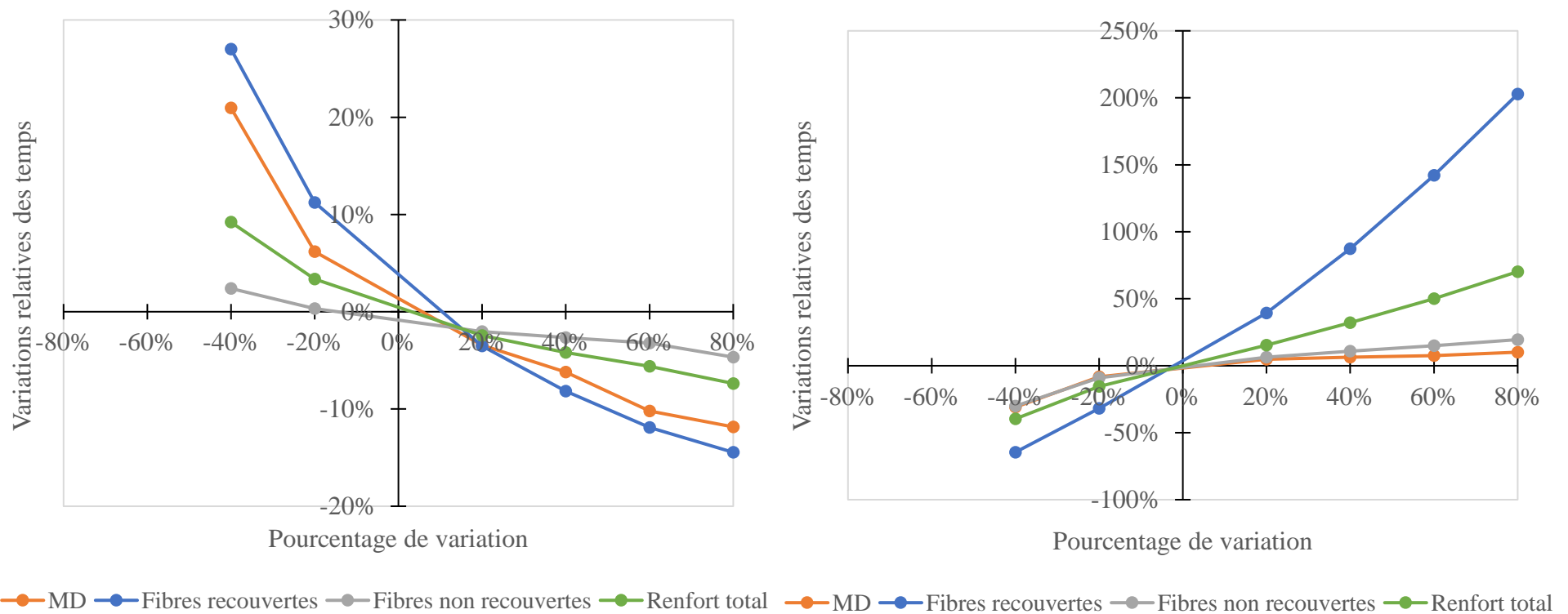


Figure 6-44. Sensibilité des simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 75 kPa par rapport à l'épaisseur du milieu drainant (gauche) et du renfort (droite)

- Comme précédemment, si l'épaisseur du milieu drainant diminue, tous les temps de remplissage augmentent significativement, mais si l'épaisseur augmente, les temps ne changent pas aussi drastiquement.
- La dépendance entre l'épaisseur du mélange de renforts et les temps de remplissage des fibres recouvertes et du renfort entier est encore quasi-linéaire sur la plage considérée. Cependant les variations sont plus élevées que dans le cas du renfort 2D, en raison de la perméabilité relativement plus faible du mélange de renforts. De plus, les temps de remplissage du milieu drainant et des fibres recouvertes ne varient pas aussi drastiquement que pour le renfort 2D. En effet, les variations relatives maximales sont respectivement de 10% et 20% pour le mélange de renforts, alors qu'elles sont de 31% et 37% pour le renfort 2D.

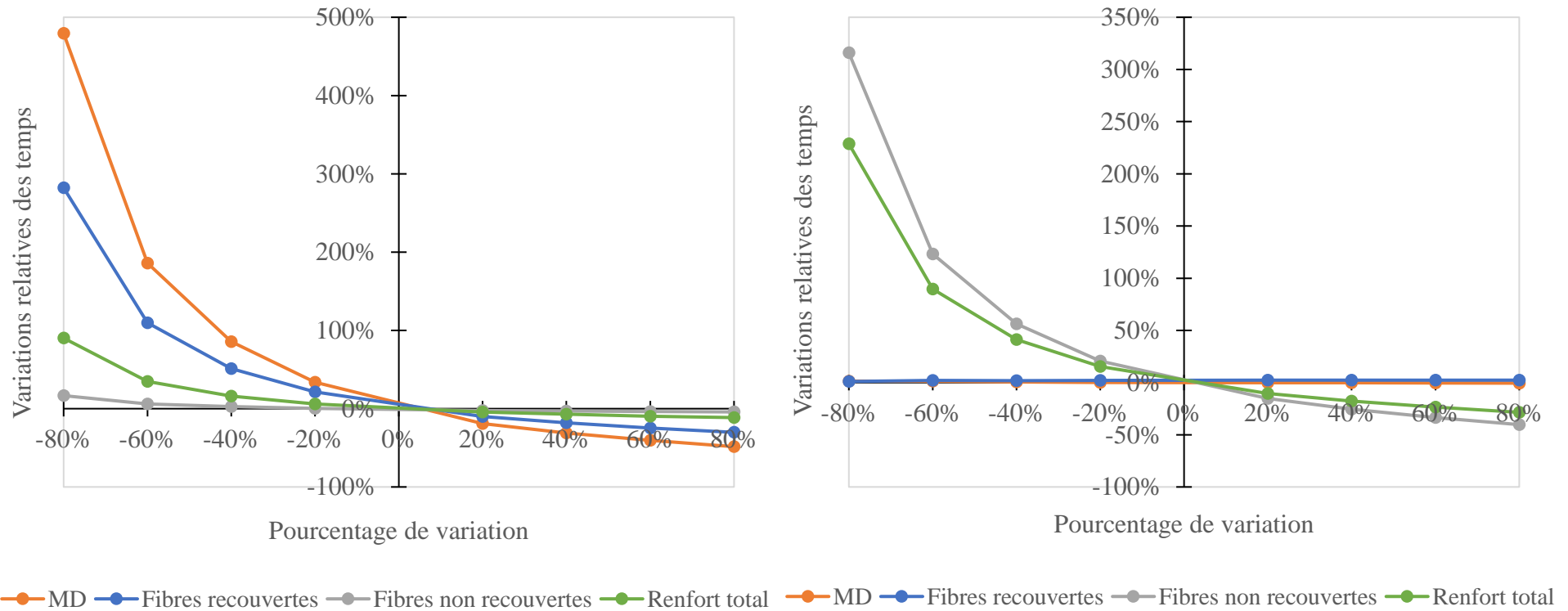


Figure 6-45. Sensibilité des simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 75 kPa par rapport à la perméabilité planaire du milieu drainant (gauche) et du renfort (droite)

Les tendances observées sont très similaires à celles notées avec le renfort 2D :

- Lorsque la perméabilité planaire du milieu drainant est sous-estimée, les temps de remplissage augmentent exponentiellement, mais la diminution des temps de remplissage est beaucoup moins drastique lorsqu'elle est surestimée.
- La perméabilité planaire du mélange de renforts n'affecte aucunement les temps de remplissage du milieu drainant et du renfort fibreux qui en est recouvert, car ces temps sont dominés par la perméabilité planaire du milieu de distribution. Cependant, le temps de remplissage de la portion non recouverte des fibres augmente significativement si ce paramètre est sous-estimé.

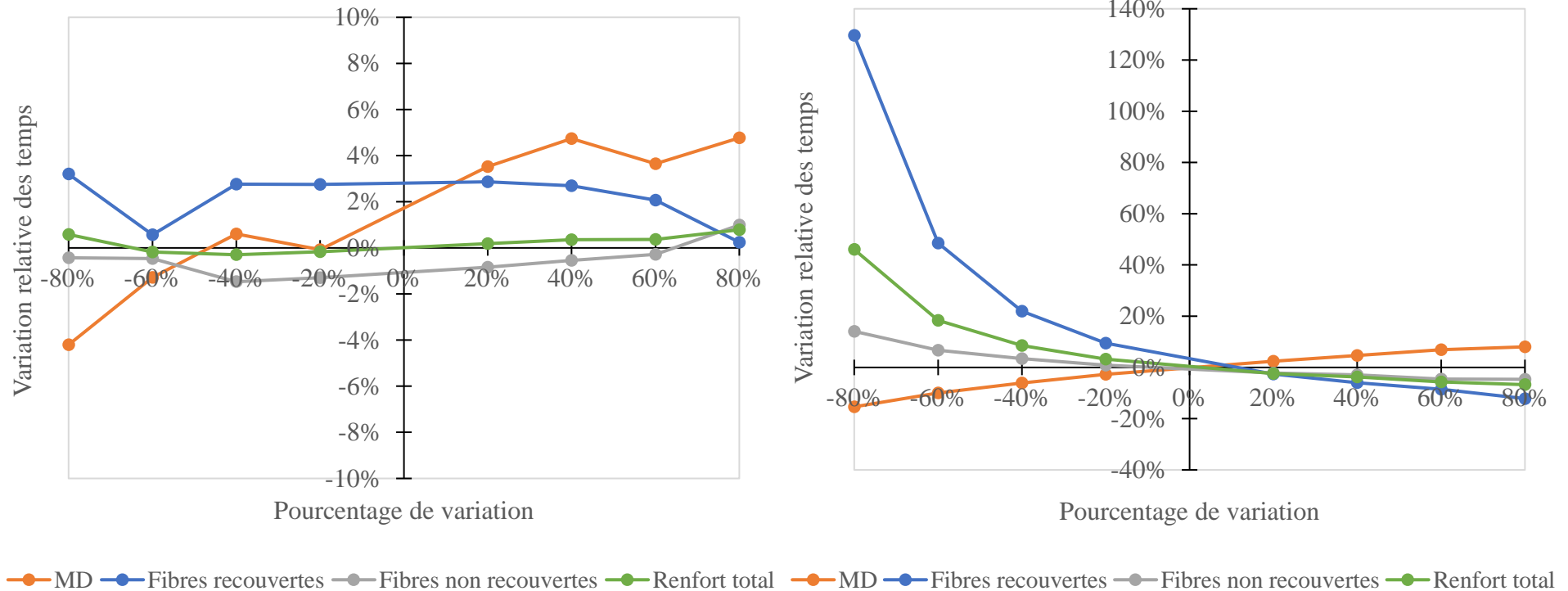


Figure 6-46. Sensibilité des simulations d'infusion indirecte du mélange de renforts à une pression de vide de 75 kPa par rapport à la perméabilité transverse du milieu drainant (gauche) et du renfort (droite)

- Encore une fois, la perméabilité transverse du milieu drainant n'est pas critique et peut être grossièrement approximée pour les besoins de la simulation.
- La perméabilité transverse du mélange de renforts fait varier linéairement le temps de remplissage du milieu drainant sur la plage considérée, mais la variation maximale de 8% demeure faible. En revanche, cette perméabilité transverse influence exponentiellement le temps de remplissage des fibres recouvertes par le milieu drainant, qui augmente de 130% pour une variation de 80%. Il est donc encore préférable de surestimer la perméabilité transverse du renfort plutôt que de la sous-estimer.

En résumé, les conclusions sur les analyses de sensibilité réalisées avec les deux types de renforts sont très similaires. Les paramètres critiques identifiés sont les épaisseurs du milieu drainant et du renfort fibreux, leurs perméabilités planaires, et la perméabilité transverse du renfort. Ces paramètres doivent par conséquent être caractérisés finement pour reproduire le plus fidèlement possible les fronts d'écoulement expérimentaux lors des infusions indirectes.

Notamment, les temps de remplissage caractéristiques augmentent exponentiellement lorsque l'épaisseur du milieu drainant est sous-estimée, mais ne diminuent que légèrement dans le cas inverse. Il est donc préférable de surestimer un peu l'épaisseur du milieu drainant plutôt que de la sous-estimer.

Si c'est plutôt l'épaisseur du renfort fibreux qui est erronée, les temps de remplissage varient selon une tendance quasi-linéaire pour les deux types de renforts. Cependant, la sensibilité des prédictions à cette épaisseur est plus importante dans le cas du mélange de renforts que pour le renfort 2D. En effet, une augmentation de l'épaisseur de 80% mène à une surestimation de 203% du temps de remplissage du mélange de renforts non recouvert par le milieu de distribution, alors que la surestimation n'est que de 73% pour le renfort 2D. Par conséquent, l'épaisseur du renfort fibreux est d'autant plus critique que sa perméabilité planaire est faible, car l'écoulement se produit majoritairement à travers l'épaisseur.

En outre, pour les deux types de renforts, les simulations de l'infusion indirecte sont très sensibles à la diminution de la perméabilité planaire du milieu drainant (variation relative maximale de +479%), mais beaucoup moins sensibles à son augmentation (variation maximale de -49%). Par conséquent, si une campagne de caractérisation complète du milieu drainant n'est pas possible, il est préférable de surestimer légèrement sa perméabilité planaire plutôt que de la sous-estimer.

Pour ce qui est des perméabilités planaires des deux renforts, elles n'ont d'influence que sur les temps de remplissage des fibres non recouvertes par le milieu drainant, car l'écoulement sous ce dernier est régi par sa perméabilité planaire. L'estimation précise de ces temps est toutefois indispensable si l'on veut garantir l'imprégnation totale de la préforme avant le gel de la résine. De plus, la variation est exponentielle si la perméabilité planaire du renfort est sous-estimée. Il est donc important de la caractériser précisément.

Finalement, la perméabilité transverse du milieu drainant n'a pas d'influence significative lors des deux analyses de sensibilité. Elle peut donc être approximée grossièrement pour les besoins de la simulation. Quant à la perméabilité transverse des renforts, elle influence exponentiellement les temps de remplissage du renfort lorsqu'elle est sous-estimée (variation maximale de +130%), mais affecte moindrement les prédictions lorsqu'elle est surestimée (variation maximale de -12%). Il est donc préférable de la surestimer légèrement lors de son identification. Ces observations sont en accord avec les résultats d'identification de la perméabilité transverse apparente du renfort.

Pour conclure, l'analyse de sensibilité démontre que les temps de remplissage du milieu drainant et des fibres recouvertes par ce dernier dépendent fortement de l'épaisseur des deux matériaux, de la perméabilité planaire du milieu drainant et de la perméabilité transverse du renfort. Par conséquent, si tous les temps de remplissage prédits par les simulations sont supérieurs aux temps observés expérimentalement, ceci peut indiquer que :

- l'épaisseur du milieu drainant est sous-estimée,
- l'épaisseur du renfort fibreux est surestimée,
- ou la perméabilité planaire du milieu drainant est sous-estimée.

Si le temps prédit de remplissage du milieu drainant est inférieur au temps expérimental, mais que celui des fibres est supérieur, ceci indique que c'est plutôt la perméabilité transverse du renfort qui est sous-estimée. Pour ce qui est du temps de remplissage des fibres non recouvertes par le milieu drainant, il est principalement gouverné par les épaisseurs des matériaux et par les perméabilités planaires et transverses du renfort. Ainsi, si la prédiction de ce temps de remplissage est supérieure aux résultats expérimentaux, ceci indique que :

- l'épaisseur du milieu drainant est sous-estimée,
- l'épaisseur du renfort fibreux est surestimée,
- ou les perméabilités planaire ou transverse du renfort sont sous-estimées.

Dans l'ensemble, les résultats de l'analyse de sensibilité démontrent que les paramètres expérimentaux de l'infusion indirecte de résine ont été mesurés avec précision grâce à l'approche de caractérisation proposée. En effet, les variations imposées lors de l'analyse ne permettraient pas d'améliorer simultanément la prédiction des fronts d'écoulement obtenue pour les renforts et le milieu drainant.

CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

7.1 Discussion

Dans le premier chapitre de ce mémoire, un état de l'art sur la fabrication industrielle des pales d'éolienne a donné un bref aperçu des principaux procédés de fabrication de composites renforcés par des fibres continues, en particulier pour des composantes de pales d'éolienne. Ce chapitre a également mis en évidence les défis associés à la fabrication des pales par infusion indirecte, soit l'épaisseur élevée des préformes, l'emploi d'un milieu de distribution pour accélérer l'infusion et les variations d'épaisseur des renforts durant l'imprégnation.

Au Chapitre 2, la revue de la littérature scientifique a décrit les procédures généralement suivies pour identifier la compressibilité et la perméabilité des renforts fibreux et pour simuler le procédé d'infusion de résine. Elle a également mis en relief les particularités du VARI, ainsi que les défis liés à la décompaction du renfort et à l'utilisation des milieux de distribution. Les conclusions de ce chapitre sont les suivantes :

- L'approche de caractérisation de la perméabilité planaire en moule rigide ne permet pas de reproduire fidèlement les particularités de l'infusion de résine. De plus, en raison de leur grande porosité, il est difficile de mesurer adéquatement la perméabilité des milieux de distribution.
- Une approche de caractérisation simultanée de la compaction et de la perméabilité est difficile à implémenter pour des renforts cousus ou tissés qui présentent une certaine variabilité. D'autre part, la caractérisation de la perméabilité dans un écoulement saturé n'est pas représentative des écoulements insaturés rencontrés pendant l'infusion indirecte.
- Les simulations transitoires 3D nécessaires pour reproduire l'infusion indirecte dans des pièces de grande taille sont longues et coûteuses. De plus, pour diverses raisons, elles ne sont pas toujours possibles, ni représentatives des fabrications réelles.

Sur la base de ces conclusions, une approche a été proposée au chapitre suivant pour caractériser la compressibilité et la perméabilité. Cette approche consiste à réaliser des expériences de compressibilité à sec et après saturation sur une machine de traction universelle pour identifier des modèles empiriques qui décrivent la compressibilité des renforts. Ensuite, des expériences d'infusion directe sont effectuées pour caractériser la perméabilité planaire flexible des renforts fibreux et du milieu drainant. Enfin, des essais d'infusion indirecte complètent la démarche expérimentale afin de déterminer l'évolution des fronts d'écoulement expérimentaux reproduisant la fabrication réelle des pièces étudiées. Finalement, les expériences d'infusion indirecte sont reproduites avec le logiciel de simulation par éléments-finis PAM-RTM pour identifier la perméabilité transverse apparente des renforts. Comme la progression du front prédit correspond à celle des fronts d'écoulement expérimentaux, il est possible d'utiliser la simulation numérique pour réduire le volume de travail expérimental requis pour optimiser le procédé de fabrication par infusion indirecte.

Les résultats expérimentaux ont permis de vérifier que des modèles de compressibilité et de perméabilité flexible des renforts peuvent être trouvés grâce à cette approche. Ils ont également montré que les infusions indirectes sont caractérisées par trois temps critiques, à savoir les temps de remplissage du milieu drainant, des fibres recouvertes par ce dernier et finalement, du renfort dans sa totalité. À partir des résultats expérimentaux, il est possible d'identifier une perméabilité transverse apparente des renforts qui minimise l'erreur de prédiction de ces temps.

Les travaux expérimentaux ont également révélé certaines limitations de l'approche proposée, et plus généralement du procédé d'infusion indirecte de résine :

- La perméabilité planaire du milieu drainant demeure difficile à caractériser, car le temps de remplissage est très sensible aux conditions expérimentales de l'infusion directe.
- Les renforts qui possèdent un taux volumique de fibres élevé et une faible perméabilité ne peuvent pas facilement être fabriqués avec succès par infusion indirecte de résine, car l'écoulement à travers leur épaisseur ne progresse pas linéairement. Ces renforts ne peuvent donc pas être caractérisés selon l'approche proposée dans ce mémoire. En outre, la faisabilité industrielle de leur emploi peut être remise en question.

Les perméabilités transverses apparentes des renforts identifiées par simulation numérique ont permis de reproduire avec une fidélité satisfaisante les fronts d'écoulement expérimentaux dans des échantillons d'épaisseur variable. Cependant, les fronts expérimentaux dans le milieu drainant ne correspondaient pas parfaitement aux fronts prédits lorsque les simulations étaient réalisées à pression d'infusion constante, et des prédictions plus fidèles étaient obtenues en tenant compte des chutes de pression associées aux débits élevés en début d'infusion. Dans un contexte industriel, ces chutes de pression ne sont pas connues avant la simulation et un travail analytique supplémentaire doit être réalisé pour les prédire en fonction du débit infusé. Néanmoins, c'est le remplissage du renfort fibreux qu'on désire simuler en priorité dans les applications industrielles et les simulations à pression d'infusion constante fournissent une première approximation satisfaisante de l'évolution du front d'écoulement dans le renfort. Les simulations à pression variable ne sont donc nécessaires que si l'on souhaite prédire les temps de remplissage avec une meilleure précision.

De plus, les simulations numériques ont démontré que pour les renforts les moins perméables, le succès des infusions indirectes dépend de l'épaisseur de la préforme. En effet, au-delà d'une certaine épaisseur, on a pu constater expérimentalement que l'imprégnation transverse du renfort devient erratique et difficilement reproductible par simulation numérique. Des études expérimentales et numériques plus détaillées seraient requises afin d'explorer d'une manière quantitative les limitations des procédés d'infusion indirecte.

Les analyses de sensibilité des simulations numériques aux divers paramètres expérimentaux ont mis en évidence les paramètres critiques. Elles ont notamment montré que les temps de remplissage du milieu drainant et des fibres recouvertes par ce dernier dépendent fortement de l'épaisseur des deux matériaux, de la perméabilité planaire du milieu drainant et de la perméabilité transverse du renfort. Pour le temps de remplissage des fibres non recouvertes par le milieu drainant, il est principalement gouverné par les épaisseurs des matériaux et par les perméabilités planaires et transverses du renfort. Ces paramètres doivent par conséquent être caractérisés avec soin pour reproduire le plus fidèlement possible les fronts d'écoulement expérimentaux lors de l'infusion indirecte. La perméabilité transverse du milieu drainant n'exerce pas réellement d'influence sur les prédictions et peut être définie d'une manière approchée pour les simulations numériques.

7.2 Stratégie de simulation suggérée

Les résultats de simulation numérique ont démontré que l'approche de caractérisation proposée permet d'obtenir des modèles fiables de compressibilité et de perméabilité planaire flexible pour certaines gammes de renforts. Leur perméabilité transverse apparente a ensuite été identifiée pour prédire les temps de remplissage lors d'expériences d'infusion indirecte réalisées avec des préformes d'épaisseurs différentes. Cette approche peut donc être employée pour simuler rapidement la fabrication des longerons de pale d'éolienne.

À cette fin, les modèles de compressibilité des milieux drainants et des renforts fibreux utilisés doivent être obtenus par des tests de compaction cyclique en moule rigide. Leurs perméabilités planaires flexibles doivent ensuite être caractérisées en infusion directe. Les perméabilités transverses des renforts peuvent ensuite être identifiées en reproduisant numériquement des expériences d'infusion indirecte. Des échantillons de faible épaisseur peuvent être élaborés pour toutes ces expériences afin de minimiser les coûts de la campagne de caractérisation.

Par la suite, sachant que l'épaisseur du longeron varie dans sa direction longitudinale, des simulations bidirectionnelles peuvent être réalisées à travers une coupe transversale dans chaque section d'épaisseur constante. Ceci permettrait de prédire numériquement la position des écoulements bidirectionnels dans les sections d'épaisseur constante tout en minimisant les temps de calcul nécessaires.

Finalement, si les temps de remplissage doivent être prédits avec une précision accrue, les simulations 2D globales peuvent être complétées dans les zones de changement d'épaisseur par des simulations 3D locales (Figure 7-1). Ceci permettrait de reproduire l'influence des canaux d'écoulement préférentiel créés par les chutes de plis, car l'écoulement dans le longeron devient localement tridimensionnel dans les zones de changement d'épaisseur. Cette étape nécessite cependant de caractériser les tenseurs de perméabilité complets des matériaux, en plus de modéliser précisément les canaux d'écoulement préférentiel en utilisant les équations proposées par Hammami, Gauvin, Trochu, Touret et Ferland (1998), par exemple.

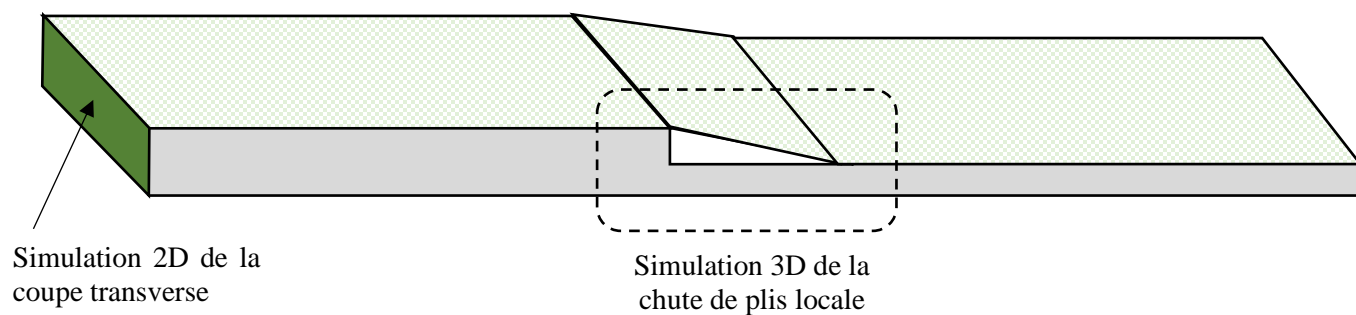


Figure 7-1. Illustration de la stratégie de simulation proposée

En outre, la caractérisation du tenseur de perméabilité des matériaux permettrait d'étudier par simulation numérique des stratégies d'infusion alternatives, comme des infusions radiales ou périphériques, pour possiblement optimiser davantage le procédé de fabrication des longerons de pales d'éolienne. Cette étape de caractérisation supplémentaire permettrait même d'élargir l'approche proposée aux procédés d'infusion plus complexes employés, par exemple, pour fabriquer des coques de bateau.

CHAPITRE 8 CONCLUSION

Une approche expérimentale simple et robuste pour caractériser la compressibilité et la perméabilité des renforts fibreux utilisés pour fabriquer des pales d'éolienne a été développée dans ce mémoire. Grâce à cette approche, des modèles empiriques de compaction ont été obtenus pour deux matériaux similaires à ceux utilisés lors de la fabrication des pales d'éolienne, soit un renfort bidirectionnel, et un second matériau élaboré à partir de plis de renforts 1D et 2D en alternance. Des modèles de perméabilité planaire flexible, qui prennent implicitement compte de la décompaction des renforts pendant les infusions directes, ont également été identifiés. Les travaux expérimentaux ont révélé certaines limitations de l'approche proposée, et plus généralement du procédé d'infusion indirecte de résine, à savoir que la perméabilité planaire du milieu drainant demeure difficile à caractériser, et que les renforts qui possèdent un taux volumique de fibres élevé et une faible perméabilité ne peuvent pas facilement être fabriqués par infusion indirecte de résine.

Des simulations numériques bidimensionnelles ont ensuite été réalisées pour caractériser la perméabilité transverse apparente des renforts lors des infusions indirectes. Ces perméabilités ont permis de reproduire avec fidélité les fronts d'écoulement expérimentaux dans des échantillons d'épaisseur variable lorsque les simulations étaient réalisées en tenant compte des chutes de pression associées aux débits élevés en début d'infusion. Or, dans un contexte industriel, ces chutes de pression ne sont pas connues avant la simulation et les prédictions à pression d'infusion constante fournissent alors une première approximation satisfaisante de l'évolution du front d'écoulement dans le renfort. Le travail analytique supplémentaire qui doit être réalisé pour prédire les chutes de pression en fonction du débit infusé n'est donc nécessaire que si l'on souhaite améliorer la précision des prédictions.

De plus, les simulations numériques ont démontré que pour les renforts les moins perméables, le succès des infusions indirectes dépend de l'épaisseur de la préforme. Des études expérimentales et numériques plus détaillées sont toutefois requises afin d'explorer d'une manière quantitative cette limitation des procédés d'infusion indirecte. Les analyses de sensibilité des simulations numériques aux divers paramètres expérimentaux ont également mis en évidence les paramètres critiques de l'infusion indirecte, à savoir l'épaisseur du milieu de distribution et du renfort fibreux, leur perméabilité planaire et la perméabilité transverse du renfort.

Finalement, une stratégie de simulation a été suggérée pour prédire les temps de remplissage des longerons de pales d'éolienne dans les sections d'épaisseur constante et dans les zones de chute de plis. Cette stratégie est principalement fondée sur des simulations bidimensionnelles globales complétées par des simulations tridimensionnelles locales. Par conséquent, son implémentation demande de réaliser des expériences additionnelles pour obtenir les trois perméabilités flexibles principales du milieu de distribution et des renforts, en plus de modéliser les canaux d'écoulement préférentiels créés par les chutes de pli.

Cette stratégie de simulation présente aussi le potentiel d'être employée pour simuler le remplissage de structures sandwich comme les panneaux de cisaillement et les peaux des pales d'éolienne. Un travail supplémentaire est cependant requis pour intégrer les interactions des écoulements principaux à travers les deux faces du sandwich avec les trous et rainures usinées dans l'âme. Certes, la simulation numérique peut rendre plus rapide et uniforme la fabrication de telles structures sandwich, mais ceci reste un défi à relever en raison de la complexité des pièces, de leur taille et des procédés d'infusion indirecte, qui utilisent un, ou même quelquefois deux milieux drainants, en peau des pièces.

RÉFÉRENCES

- Alms, J. B., Garnier, L., Glancey, J. L., & Advani, S. G. (2010). In-plane permeability characterization of the vacuum infusion processes with fiber relaxation. *International Journal of Material Forming*, 3(S2), 1267-1275. doi:10.1007/s12289-010-0690-7
- Bonnard, B. (2016). *Étude expérimentale de la porosité des renforts utilisés dans les matériaux composites*. (M.A.Sc., Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), Ann Arbor). Accessible par Dissertations & Theses @ Ecole Polytechnique de Montreal; ProQuest Dissertations & Theses Global. (10806487)
- Broad, A. I. (2012). *Development of vacuum assisted composites manufacturing technology for wind turbine blade manufacture*. (M.Sc., University of Central Lancashire (United Kingdom), Ann Arbor). Accessible par ProQuest Dissertations & Theses Global. (U605649)
- Carman, P. C. (1997). Fluid flow through granular beds. *Chemical Engineering Research and Design*, 75, S32-S48. doi:[https://doi.org/10.1016/S0263-8762\(97\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8762(97)80003-2)
- Carnaby, G. A., & Pan, N. (1989). Theory of the Compression Hysteresis of Fibrous Assemblies. *Textile Research Journal*, 59(5), 275-284. doi:10.1177/004051758905900505
- Chen, B., Cheng, A. H. D., & Chou, T. W. (2001). A nonlinear compaction model for fibrous preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(5), 701-707. doi:10.1016/s1359-835x(00)00148-2
- Chen, B., Lang, E. J., & Chou, T.-W. (2001). Experimental and theoretical studies of fabric compaction behavior in resin transfer molding. *Materials Science and Engineering: A*, 317(1-2), 188-196. doi:10.1016/s0921-5093(01)01175-3
- Croteau-Labouly, B. (2008). *Caractérisation combinée de la perméabilité et de la compaction des renforts fibreux dans les procédés de fabrication des composites par infusion*. (M.Sc.A., Ecole Polytechnique, Montreal (Canada)). Accessible par Dissertations & Theses @ Ecole Polytechnique de Montreal; ProQuest Dissertations & Theses Global. (MR36905)
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau: ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes au filtrage des eaux et à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tole et de bitume*: Dalmont.
- Davé, R. (2016). A Unified Approach to Modeling Resin Flow During Composite Processing. *Journal of Composite Materials*, 24(1), 22-41. doi:10.1177/002199839002400102
- Demaría, C., Ruiz, E., & Trochu, F. (2007). In-plane anisotropic permeability characterization of deformed woven fabrics by unidirectional injection. Part I: Experimental results. *Polymer Composites*, 28(6), 797-811. doi:10.1002/pc.20107
- Desilets, J.-F. (2011). *Développement et optimisation d'un procédé de mise en forme par injection d'une pièce complexe à épaisseur variable en matériaux composites*. (M.Sc.A., Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), Ann Arbor). Accessible par Dissertations & Theses @ Ecole Polytechnique de Montreal; ProQuest Dissertations & Theses Global. (MR92726)


- Drapier, S., Monatte, J., Elbouazzaoui, O., & Henrat, P. (2005). Characterization of transient through-thickness permeabilities of Non Crimp New Concept (NC2) multiaxial fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(7), 877-892. doi:10.1016/j.compositesa.2005.01.002
- ESI Group. (2018). PAM-RTM (Version 2018.5). Tiré de <https://www.esi-group.com/fr/produits/composites>
- Fan, H.-T., Wang, H., & Chen, X.-H. (2016). An optimization method for composite structures with ply-drops. *Composite Structures*, 136, 650-661. doi:10.1016/j.compstruct.2015.11.003
- Ferland, P., Guittard, D., & Trochu, F. (1996). Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer molding. *Polymer Composites*, 17(1), 149-158. doi:10.1002/pc.10600
- Gauvin, R., Trochu, F., Lemenn, Y., & Diallo, L. (1996). Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement. *Polymer Composites*, 17(1), 34-42. doi:10.1002/pc.10588
- Gokce, A., Chohra, M., Advani, S. G., & Walsh, S. M. (2005). Permeability estimation algorithm to simultaneously characterize the distribution media and the fabric preform in vacuum assisted resin transfer molding process. *Composites Science and Technology*, 65(14), 2129-2139. doi:10.1016/j.compscitech.2005.05.012
- Griffin, D. A. (2002). *Blade System Design Studies Volume 1: Composite Technologies for Large Wind Turbine Blades*. Kirkland, Washington: Global Energy Concepts, LLC.
- Gutowski, T. G. P. (1997). *Advanced composites manufacturing* (vol. 1): Wiley New York.
- Hamdami, A. (2001). Effect of reinforcement structure on compaction behavior in the vacuum infusion process. *Polymer Composites*, 22(3), 337-348. doi:10.1002/pc.10542
- Hamdami, A., Gauvin, R., Trochu, F., Touret, O., & Ferland, P. (1998). Analysis of the Edge Effect on Flow Patterns in Liquid Composites Molding. *Applied Composite Materials*, 5(3), 161-173. doi:10.1023/a:1008887400832
- Hamdami, A., & Gebart, B. R. (2000). Analysis of the vacuum infusion molding process. *Polymer Composites*, 21(1), 28-40. doi:10.1002/pc.10162
- Hélimax Énergie, & AWS Truewind. (2005). *Inventaire du potentiel éolien exploitable du Québec*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. Tiré de <https://mern.gouv.qc.ca/energie/energie-eolienne/potentiel-eolien-quebec/#inventaire>
- Joubaud, L. (2003). *Simulation numérique de l'infusion et de l'injection de résine sous paroi flexible*. (M.Sc.A., Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), Ann Arbor). Accessible par Dissertations & Theses @ Ecole Polytechnique de Montreal; ProQuest Dissertations & Theses Global. (MQ86405)
- Joubaud, L., Achim, V., & Trochu, F. (2005). Numerical simulation of resin infusion and reinforcement consolidation under flexible cover. *Polymer Composites*, 26(4), 417-427. doi:10.1002/pc.20069
- Joubaud, L., Trochu, F., & Corvec, L. (2002). Analysis of resin flow under flexible cover in vacuum assisted resin infusion. *Journal of Advanced Materials*, 1-7.

- Kozeny, J. (1927). *Über kapillare Leitung des Wassers im Boden: (Aufstieg, Versickerung u. Anwendung auf die Bewässerung) ; Gedr. mit Unterstützung aus d. Jerome u. Margaret Stonborsugh-Fonds*: Hölder-Pichler-Tempsky, A.-G. [Abt.:] Akad. d. Wiss.
- Lawrence, J. M., Simacek, P., Frey, P., Bhat, P., Gebauer, T., & Advani, S. G. (2007). The Compaction Behavior of Fibrous Preform Materials during the VARTM Infusion. *AIP Conference Proceedings*, 907(1), 1039-1045. doi:10.1063/1.2729651
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*: CRC press.
- Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. (2017). Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials*, 10(11), 1285. doi:10.3390/ma10111285
- Ouagne, P., & Bréard, J. (2010). Continuous transverse permeability of fibrous media. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(1), 22-28. doi:10.1016/j.compositesa.2009.07.008
- Ounis, H., & Balehouane, A. (2016). Buckling behavior of wind turbine blade. *Revue des Energies Renouvelables*, 19, 509-516.
- Peters, L. (2018). Influence of Glass Fibre Sizing and Storage Conditions on Composite Properties. Dans *Durability of Composites in a Marine Environment 2* (p. 19-31).
- Robinson, M. J. (2008). *Simulation of the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) process and the development of light-weight composite bridging*. (Ph.D., University of California, San Diego, Ann Arbor). Accessible par ProQuest Dissertations & Theses Global. (3336692)
- Seemann, W. H. (1990). *Brevet États Unis n° 4,902,215*. U. S. Patent.
- Sørensen, B., Jørgensen, E., Debel, C., Jensen, F., Jensen, H., Jacobsenand, T., & Halling, K. (2021). Improved design of large wind turbine blade of fibre composites based on studies of scale effects (Phase 1) - Summary Report.
- Stiesdal, H., Enevoldsen, P. B., Johansen, K., Kristensen, J. J. Ö., Nørtem, M., & Winther-Jensen, M. (2006). *Brevet*: Office européen des brevets.
- Sun, X., Li, S., & Lee, L. J. (1998). Mold filling analysis in vacuum-assisted resin transfer molding. Part I: SCRIMP based on a high-permeable medium. *Polymer Composites*, 19(6), 807-817. doi:10.1002/pc.10155
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*.
- Thomsen, O. T. (2009). Sandwich Materials for Wind Turbine Blades — Present and Future. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 11(1), 7-26. doi:10.1177/1099636208099710
- Trochu, F., Gauvin, R., & Gao, D. M. (1993). Numerical analysis of the resin transfer molding process by the finite element method. *Advances in Polymer Technology*, 12(4), 329-342. doi:10.1002/adv.1993.060120401
- Veers, P. S., Ashwill, T. D., Sutherland, H. J., Laird, D. L., Lobitz, D. W., Griffin, D. A., . . . Richmond, J. L. (2003). Trends in the Design, Manufacture and Evaluation of Wind Turbine Blades. *Wind Energy*, 6(3), 245-259. doi:10.1002/we.90

- Vernet, N., Ruiz, E., Advani, S., Alms, J. B., Aubert, M., Barburski, M., . . . Ziegmann, G. (2014). Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 61, 172-184. doi:10.1016/j.compositesa.2014.02.010
- Williams, C. D., Grove, S. M., & Summerscales, J. (1998). The compression response of fibre-reinforced plastic plates during manufacture by the resin infusion under flexible tooling method. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(1-2), 111-114. doi:10.1016/s1359-835x(97)00038-9
- Wiser, R., Jenni, K., Seel, J., Baker, E., Hand, M., Lantz, E., & Smith, A. (2016). Expert elicitation survey on future wind energy costs. *Nature Energy*, 1(10), 16135. doi:10.1038/nenergy.2016.135
- Yenilmez, B., Senan, M., & Murat Sozer, E. (2009). Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process. *Composites Science and Technology*, 69(11-12), 1710-1719. doi:10.1016/j.compscitech.2008.05.009
- Yenilmez, B., & Sozer, E. M. (2009). Compaction of e-glass fabric preforms in the Vacuum Infusion Process, A: Characterization experiments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(4), 499-510. doi:10.1016/j.compositesa.2009.01.016
- Yong, A. X. H., Aktas, A., May, D., Endruweit, A., Lomov, S. V., Advani, S., . . . Wang, J. H. (2021). Experimental characterisation of textile compaction response: A benchmark exercise. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 142. doi:10.1016/j.compositesa.2020.106243

ANNEXE A – FICHES TECHNIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS

Renfort unidirectionnel TG-27-U



STYLE TG-27-U

E-Glass / Verre E


WEAVE	Uni Warp	Uni directionnel	ARMURE
WARP/WEFT RATIO (weight)	99% - 1%		RATIO CHAÎNE/TRAME (poids)
WARP/WEFT RATIO (volume)	99% - 1%		RATIO CHAÎNE/TRAME (volume)
RESIN COMPATABILITY	Polyester, Vinylester, Epoxy		COMPATIBILITÉ RÉSINE
 INFUSED THICKNESS	0.023 in	0.59 mm	ÉPAISSEUR INFUSÉE
AREAL WEIGHT	26.3 oz/yd²	890 g/m²	MASSE SURFACIQUE
STANDARD ROLL LENGTH	55 yds	50 m	LONGUEUR STANDARD
 MATERIALS			MATÉRIAUX
WARP			CHAÎNE
PRIMARY	E-Glass	450 yield	1100 tex Verre E
SECONDARY	n/a	yield	tex n/a
ENDS COUNT		19.8 /in	7.8 /cm
WEFT			TRAME
PRIMARY	Uniflex™	540 deniers	60 tex UniFlex™
SECONDARY	n/a		n/a
ENDS COUNT		2.8 /in	1.1 /cm

TEXONIC Inc.
 445, St-Jacques
 St-Jean sur Richelieu, QC, Canada, J3B 2M1
 Tel. (450) 346-6853 Fax (450) 347-4910
 email: d.ladouceur@texonic.net
 website www.texonic.net

COMPANY PROPRIETARY / CONFIDENTIEL ET PROPRIÉTAIRE

2018-03-01 v04
TDS 2018

Renfort bidirectionnel non tissé TG-09-N

					
STYLE			TG-09-N		
E-Glass			/	Verre E	
WEAVE	NC-PLY™		NC-PLY™	ARMURE	
WARP/WEFT RATIO (weight)	52% - 48%			RATIO CHAÎNE/TRAME (poids)	
WARP/WEFT RATIO (volume)	51% - 49%			RATIO CHAÎNE/TRAME (volume)	
RESIN COMPATABILITY	Polyester, Vinylester, Epoxy			COMPATIBILITÉ RÉSINE	
INFUSED THICKNESS	0.012 in		0.31 mm	ÉPAISSEUR INFUSÉE	
AREAL WEIGHT	9.4 oz/yd²		320 g/m²	MASSE SURFACIQUE	
STANDARD ROLL LENGTH	164 yds		150 m	LONGUEUR STANDARD	
MATERIALS					MATÉRIAUX
WARP					CHAÎNE
PRIMARY	E-Glass	1800 yield	275 tex	Verre E	PRIMAIRE
SECONDARY	Polyester	150 denier	16.66 tex	Polyester	SECONDAIRE
ENDS COUNT		14.0 /in	5.5 /cm		COMPTE CHAÎNE
WEFT					TRAME
PRIMARY	E-Glass	1800 yield	275 tex	Verre E	PRIMAIRE
SECONDARY	Polyester	150 denier	16.66 tex	Polyester	SECONDAIRE
ENDS COUNT		13.2 /in	5.2 /cm		COMPTE TRAME
<p>TEXONIC Inc. 445, St-Jacques St-Jean sur Richelieu, QC, Canada, J3B 2M1 Tel. (450) 346-8853 Fax (450) 347-4910 email: d.ladouceur@texonic.net website: www.texonic.net</p> <p>COMPANY PROPRIETARY / CONFIDENTIEL ET PROPRIÉTAIRE</p>					
2019-10-03 v07			TDS 2019		

Milieu de distribution Greenflow 75



5700 Skylab Road
Huntington Beach
CA 92647 USA

Phone : +1 714-899-8100
Fax : +1 714-899-8179

E-mail : airtech@airtechintl.com
Website : www.airtechonline.com

Data Sheet

GREENFLOW 75

High performance, low profile resin distribution medium

■ DESCRIPTION

Greenflow 75 is designed to efficiently distribute resin with little waste due to the low profile, tight construction. Greenflow 75 can be used with polyester, vinylester and epoxy resins.

■ TECHNICAL DATA

Material type	Polypropylene
Color	Green
Configuration of net	Extruded (Rhombic)
Maximum use temperature	302°F (150°C)
Melt point	320 °F (161 °C)
Mesh weight	98 g/m ²
Shelf life	Unlimited when stored in original packaging at 72°F (22°C)

■ SIZES

Thickness	Width	Length
0.03 in (0.9 mm)	41 in (1.04 m)	350 ft (106.7 m)
0.03 in (0.9 mm)	60 in (1.5 m)	350 ft (106.7 m)



■ NOTES

- This product is an extruded mesh and does not fray when cut.
- The maximum use temperature is dependent upon the duration at maximum temperature and is process specific, Airtech recommends testing prior to use.

Last updated : 2019-04-23

Catalog position : Resin infusion products

As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech-Resin does not assume any responsibility for the performance of this material for any particular use. The material is sold "as is". Airtech-Resin disclaims, and buyer waives, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and of fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes. This translation is provided for your convenience only. The official language is English and the official law is Luxembourg.

Tissu d'arrachement Release Ply B



5700 Skylab Road
Huntington Beach
CA 92647 USA

Phone : +1 714-899-8100
Fax : +1 714-899-8179

E-mail : airtech@airtechintl.com
Website : www.airtechonline.com

Data Sheet

RELEASE PLY B

Non-coated nylon peel ply with tight weave

DESCRIPTION

Release Ply B is our tightest weave nylon peel ply that produces a "fine" texture.

Release ply fabrics are peel plies, used to texture the surface of a composite laminate. The peel ply surface is helpful for secondary bonding or painting of the composite laminate. Release ply fabrics may reduce or eliminate the need for sanding or abrading. The fabric is scoured and heat set to remove contaminants and reduce shrinkage.

BENEFITS

- Peel plies strip off of cured laminates leaving a fine textured surface, reducing time spent hand finishing.
- Less time abrading in preparation for secondary bonding or painting.
- Fabric has been scoured to reduce the need for removing contaminants off cured laminates.

TECHNICAL DATA

Maximum use temperature	450°F (232°C)
Fiber type	Nylon
Fabric construction: warp x fill	104 x 87 ends/in x picks/in (409 x 343 ends/ dm x picks/ dm)
Weight	1.83 oz/yd ² (62 g/m ²)
Thickness	0.0045 inch (0.114 mm)
Color	White
Extractables	<0.5 % by weight
Shelf life	Unlimited when stored in original packaging at 72°F (22°C)

SIZES

Width	Length	Packaging
60 inches (152 cm)	250 yards (229 m)	1 roll

NOTES

- The maximum use temperature is dependent upon the duration at maximum temperature and is process specific, Airtech recommends testing prior to use.
- Hot knife (sealed edge) slitting upon request with 1 roll as minimum order quantity.
- Not recommended for use against phenolic resins.

Last updated : 2020-12-07

Catalog position : Release fabrics / Peel plies

As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech International, Inc. does not assume any responsibility for the performance of its material for any particular use. The material is sold "as is". Airtech International, Inc. disclaims, and hereby waives, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and of fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes. Any translation is provided for your convenience only. The official language is English and the official law is California, USA.

Huile de silicone Xiameter™ PMX-200 100 cSt



Technical Data Sheet

XIAMETER™ PMX-200 Silicone Fluid, 50–1,000 cSt

INCI Name: Dimethicone
Colorless, clear polydimethylsiloxane fluid

Features & Benefits

- Ease of application and rubout
- Ease of buffing
- Enhances color
- High water repellency
- High compressibility
- High shearability without breakdown
- High spreadability and compatibility
- Low environmental hazard
- Low fire hazard
- Low reactivity and vapor pressure
- Low surface energy
- Good heat stability
- Essentially odorless, tasteless and nontoxic
- Soluble in a wide range of solvents

For personal care applications

- Imparts soft, velvety skin feel
- Spreads easily on both skin and hair
- De-soaping (prevents foaming during rubout)

For industrial applications

- High dielectric strength
- High damping action
- Oxidation-, chemical- and weather-resistant

Composition

- Polydimethylsiloxane polymers
- Chemical composition $(\text{CH}_3)_3\text{SiO}[\text{SiO}(\text{CH}_3)_2]_n\text{Si}(\text{CH}_3)_3$

Applications

- Active ingredient in a variety of automotive, furniture, metal and specialty polishes in paste, emulsion and solvent-based polishes and aerosols
- Various applications including cosmetic ingredient, elastomer and plastics lubricant, electrical insulating fluid, foam preventive or breaker, mechanical fluid, mold release agent, surface active agent, and solvent-based finishing and fat liquoring of leather

Typical Properties

Specification Writers: These values are not intended for use in preparing specifications.

Property	Unit	Result		
		50 cSt	100 cSt	200 cSt
Appearance		Crystal clear	Crystal clear	Crystal clear
Specific Gravity at 25°C (77°F)		0.960	0.964	0.967
Refractive Index at 25°C (77°F)		1.4022	1.4030	1.4032
Color, APHA		5	5	5
Flash Point, Open Cup	°C (°F)	318 (605)	> 326 (> 620)	> 326 (> 620)
Acid Number, BCP		trace	trace	trace
Melt Point	°C (°F) ^{1,2}	-41 (-42)	-28 (-18)	-27 (-17)
Pour Point	°C (°F)	-70 (-94)	-65 (-85)	-65 (-85)
Surface Tension at 25°C (77°F)	dynes/cm	20.8	20.9	21.0
Volatile Content, at 150°C (302°F)	percent	0.3	0.02	0.07
Viscosity Temperature Coefficient		0.59	0.60	0.60
Coefficient of Expansion	cc/cc-°C	0.00104	0.00096	0.00096
Thermal Conductivity at 50°C (122°F)	g cal/cm-sec-°C		0.00037	
Solubility Parameter ³		7.3	7.4	7.4
Solubility in Typical Solvents				
Chlorinated Solvents		High	High	High
Aromatic Solvents		High	High	High
Aliphatic Solvents		High	High	High
Dry Alcohols		Poor	Poor	Poor
Water		Poor	Poor	Poor
Fluorinated Propellants		High	High	High
Dielectric Strength at 25°C (77°F)	volts/mil	400	400	400
Volume Resistivity at 25°C (77°F)	ohm-cm	1.0x10 ¹⁵	1.0x10 ¹⁵	1.0x10 ¹⁵
		350 cSt	500 cSt	1,000 cSt
Appearance		Crystal clear	Crystal clear	Crystal clear
Specific Gravity at 25°C (77°F)		0.969	0.970	0.970
Refractive Index at 25°C (77°F)		1.4034	1.4035	1.4035
Color, APHA		5	5	5
Flash Point, Open Cup	°C (°F)	> 326 (> 620)	> 326 (> 620)	> 326 (> 620)
Acid Number, BCP		trace	trace	trace
Melt Point	°C (°F)	-26 (-15)	-25 (-13)	-25 (-13)

1. The melt point temperature is a typical value and may vary somewhat due to molecular distribution (especially 50 cSt). If the melting point is critical to your application, then several lots should be thoroughly evaluated.
2. Due to different rates of cooling, this test method may yield pour points lower than the temperature at which these fluids would melt.
3. Fedors Method: R.F. Fedors, Polymer Engineering and Science, Feb. 1974.

UNRESTRICTED – May be shared with anyone

*TM Trademark of The Dow Chemical Company ("Dow") or an affiliated company of Dow

XIAMETER™ PMX-200 Silicone Fluid, 50–1,000 cSt

© 2017 The Dow Chemical Company. All rights reserved.

Typical Properties (Cont.)

Property	Unit	Result		
		350 cSt	500 cSt	1,000 cSt
Pour Point	°C (°F)	-50 (-58)	-50 (-58)	-50 (-58)
Surface Tension at 25°C (77°F)	dynes/cm	21.1	21.2	21.2
Volatile Content, at 150°C (302°F)	percent	0.15	0.11	0.11
Viscosity Temperature Coefficient		0.60	0.61	0.61
Coefficient of Expansion	cc/cc/°C	0.00096	0.00096	0.00096
Thermal Conductivity at 50°C (122°F)	g cal/cm-sec-°C		0.00038	0.00038
Solubility Parameter		7.4	7.4	7.4
Solubility in Typical Solvents				
Chlorinated Solvents		High	High	High
Aromatic Solvents		High	High	High
Aliphatic Solvents		High	High	High
Dry Alcohols		Poor	Poor	Poor
Water		Poor	Poor	Poor
Fluorinated Propellants		High	High	High
Dielectric Strength at 25°C (77°F)	volts/mil	400	400	400
Volume Resistivity at 25°C (77°F)	ohm-cm	1.0x10 ¹⁵	1.0x10 ¹⁵	1.0x10 ¹⁵

Description

XIAMETER™ PMX-200 Silicone Fluid, 50–1,000 cSt is a polydimethylsiloxane polymer manufactured to yield essentially linear polymers in a wide range of average kinematic viscosities.

The viscosities generally used in formulating polishes are between 100 and 30,000 cSt. To obtain optimum results, in terms of ease of application and depth of gloss, it is preferable to use a blend of a low-viscosity fluid and a high-viscosity fluid (e.g. 3 parts XIAMETER™ PMX-200 Silicone Fluid 100 cSt and 1 part XIAMETER™ PMX-200 Silicone Fluid 12,500 cSt). The low-viscosity silicone fluid acts as a lubricant to make polish application and rubout easier, whereas the high-viscosity silicone fluid produces a greater depth of gloss. Since these polymers are inherently water-repellent, they will cause water to bead up on a treated surface rather than penetrate the polish film.

How To Use

XIAMETER PMX-200 Silicone Fluid, 50–1,000 cSt is highly soluble in organic solvents such as aliphatic and aromatic hydrocarbons, and the halocarbon propellants used in aerosols. The fluid is easily emulsified in water with standard emulsifiers and normal emulsification techniques. XIAMETER PMX-200 Silicone Fluid, 50–1,000 cSt is insoluble in water and many organic products. Additive quantities as small as 0.1% may suffice where XIAMETER PMX-200 Silicone Fluid, 50–1,000 cSt is to be used as a surface agent or for de-soaping creams and lotions. However, 1–10% is needed for applications such as hand creams and lotions to form a more uniform film and effective barrier.

UNRESTRICTED – May be shared with anyone

*Trademark of The Dow Chemical Company ("Dow") or an affiliated company of Dow
XIAMETER™ PMX-200 Silicone Fluid, 50–1,000 cSt

© 2017 The Dow Chemical Company. All rights reserved.

**Handling
Precautions**

XIAMETER PMX-200 Silicone Fluid, 50–1,000 cSt may cause temporary eye discomfort.

PRODUCT SAFETY INFORMATION REQUIRED FOR SAFE USE IS NOT INCLUDED IN THIS DOCUMENT. BEFORE HANDLING, READ PRODUCT AND SAFETY DATA SHEETS AND CONTAINER LABELS FOR SAFE USE, PHYSICAL AND HEALTH HAZARD INFORMATION. THE SAFETY DATA SHEET IS AVAILABLE ON THE DOW WEBSITE AT WWW.CONSUMER.DOW.COM, OR FROM YOUR DOW SALES APPLICATION ENGINEER, OR DISTRIBUTOR, OR BY CALLING DOW CUSTOMER SERVICE.

**Usable Life And
Storage**

Product should be stored at or below 60°C (140°F) in the original unopened containers.

Limitations

This product is neither tested nor represented as suitable for medical or pharmaceutical uses.

Not intended for human injection. Not intended for food use.

**Health And
Environmental
Information**

To support customers in their product safety needs, Dow has an extensive Product Stewardship organization and a team of product safety and regulatory compliance specialists available in each area.

For further information, please see our website, www.consumer.dow.com or consult your local Dow representative.

<http://www.xiameter.com>

LIMITED WARRANTY INFORMATION – PLEASE READ CAREFULLY

The information contained herein is offered in good faith and is believed to be accurate. However, because conditions and methods of use of our products are beyond our control, this information should not be used in substitution for customer's tests to ensure that our products are safe, effective, and fully satisfactory for the intended end use. Suggestions of use shall not be taken as inducements to infringe any patent.

Dow's sole warranty is that our products will meet the sales specifications in effect at the time of shipment.

Your exclusive remedy for breach of such warranty is limited to refund of purchase price or replacement of any product shown to be other than as warranted.

TO THE FULLEST EXTENT PERMITTED BY APPLICABLE LAW, DOW SPECIFICALLY DISCLAIMS ANY OTHER EXPRESS OR IMPLIED WARRANTY OF FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR MERCHANTABILITY.

DOW DISCLAIMS LIABILITY FOR ANY INCIDENTAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES.



ANNEXE B – LISTE DES CONSOMMABLES ET DES FOURNISSEURS

Tous les consommables d'infusion ont été achetés chez la compagnie Freeman Composites supply :

<https://www.freemansupply.ca/>

Adresse : 3475 boulevard Pitfield, Montréal,,QC, H4S 1H3, Canada

Numéro de téléphone : +1 (800) 263-7699

Personne contact : Shelley Wood

swood@freemansupply.com

+1 (514) 335-3530

Le colorant soluble dans l'huile a été acheté sur le site web de la compagnie Canwax :

<https://www.canwax.com/>

Il s'agit du colorant liquide de couleur Cinnamon Rust/Red (numéro d'inventaire DYL:Cinnamon).

Spirale d'infusion en polyéthylène



5700 Skylab Road
Huntington Beach
CA 92647 USA

Phone : +1 714-899-8100
Fax : +1 714-899-8179

E-mail : airtech@airtechintl.com
Website : www.airtechonline.com

Data Sheet

PE TUBE & SPIRAL TUBE

Low temperature tubing for resin infusion

DESCRIPTION

PE tube is a low temperature tube designed to transport resin during infusion. PE spiral tube can be used to create a vacuum manifold around the perimeter of a part during infusion.

TECHNICAL DATA

Material type	Polyethylene
Color	Transparent
Maximum use temperature	250°F (121°C)

SIZES

PE Tubing

Part Name	Outer Diameter (O.D.)	Internal Diameter (I.D.)	Length
PT1/2	1/2"	3/8"	100 feet
PT5/8	5/8"	1/2"	100 feet
PT3/4	3/4"	5/8"	100 feet

PE Spiral

Part Name	Outer Diameter (O.D.)	Internal Diameter (I.D.)	Length
PSW3/8	3/8"	1/4"	100 feet
PSW1/2	1/2"	3/8"	100 feet
PSW5/8	5/8"	1/2"	100 feet
PSW3/4	3/4"	5/8"	100 feet



NOTES

- The maximum use temperature is dependent upon the duration at maximum temperature and is process specific, Airtech recommends testing prior to use.
- See Resin Infusion Connectors technical data sheet for compatible fittings.
- Example: 3/8" I.D. PE Tube works with NEF 38.

Last updated : 2021-03-30

Catalog position : [Resin infusion products](#)

As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech International, Inc. does not assume any responsibility for the performance of its material for any particular use. The material is sold "as is". Airtech International, Inc. disclaims, and buyer waives, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and of fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes. Any translation is provided for your convenience only. The official language is English and the official law is California, USA.

Membrane polymère Wrightlon 7400



5700 Skylab Road
Huntington Beach
CA 92647 USA

Phone : +1 714-899-8100
Fax : +1 714-899-8179

E-mail : airtech@airtechintl.com
Website : www.airtechonline.com

Data Sheet

WRIGHTLON® 7400

Vacuum bagging film

DESCRIPTION

Wrightlon® 7400 is a high temperature nylon film with high elongation which is suitable for cure temperatures up to 400°F (204°C). It is also offered with our embossed, cracked ice pattern making it a breather, release film and vacuum bag all-in-one.

BENEFITS

- Proven performance with approvals on specifications worldwide for a range of applications.
- Good strength and elongation provides good pressure applications for better quality parts.
- Large range of available sizes and formats reduces waste materials and trimming time costs.

TECHNICAL DATA

		Test method
Material type	Nylon	
Elongation at break	400 %	ASTM D 882
Tensile strength	8000 psi (55 MPa)	ASTM D 882
Maximum use temperature	400°F (204°C)	
Flammability (self extinguishing)	Yes	ATP-5034
Materials to avoid	Phenolic resins/Strong oxidizers	
Color	Green	
Shelf life	Unlimited when stored in original packaging at 72°F (22°C)	

SIZES

Thickness	Width	Forms Available*
0.002 inch (50 µm)	up to 354 inches (9.00 m)	SHT, CF, LFT
0.003 inch (75 µm)	up to 354 inches (9.00 m)	SHT, CF, LFT

- For more sizes, see the *Commonly Used Sizes* chart in this section.
- Custom shapes and sizes are available, please contact Airtech for more information.



*SHT=Sheeting



CF=Centerfold



LFT=Lay-Flat
Tubing



GT=Gusseted
Tubing



G=Gusseted

NOTES

- The maximum use temperature is dependent upon the duration at maximum temperature and is process specific, Airtech recommends testing prior to use.
- Watch a video of Wide Films in the "Media Center" on our website.

Last updated : 2020-05-26

Catalog position : **Bagging films**

As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech International, Inc. does not assume any responsibility for the performance of its material for any particular use. The material is sold "as is". Airtech International, Inc. disclaims, and hereby waives, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and of fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes. Any translation is provided for your convenience only. The official language is English and the official law is California, USA.

Ruban d'étanchéité AT200Y



5700 Skylab Road
Huntington Beach
CA 92647 USA

Phone : +1 714-899-8100
Fax : +1 714-899-8179

E-mail : airtech@airtechintl.com
Website : www.airtechonline.com

Data Sheet

AT-200Y

Economical multi-purpose sealant tape

■ DESCRIPTION

AT-200Y is an economical multi-purpose sealant tape with high tack. It removes easily from metal or composite tools. Suitable for cure applications up to 400°F (204°C).

■ BENEFITS

- Economical vacuum tape reduces the cost of vacuum bagging.
- Multi-purpose tape can be used on metal and composite tooling.
- Easy clean up reduces cost of tool cleaning.

■ TECHNICAL DATA

Color	Yellow
Base material	Synthetic rubber
Maximum use temperature	400°F (204°C)
Shelf life	12 months from date of manufacture
Storage conditions	Tape must be stored flat in original packaging at 72°F (22°C) Do not refrigerate

■ SIZES

Dimensions	Packaging
1/8 inch x 1/2 inch x 25 feet (3 mm x 12 mm x 7.62 m)	40 rolls per case



■ NOTES

- For clean removal, it is recommended to strip the tape from the mold surface once it has cooled down to room temperature.
- The maximum use temperature is dependent upon the duration at maximum temperature and is process specific. Airtech recommends testing prior to use.

Last updated : 2020-03-05

Catalog position : Vacuum bag sealant tapes

As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech Europe does not assume any responsibility for the performance of this material for any particular use. The material is sold "as is".
Airtech Europe disclaims, and hereby waives, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and of fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes. This translation is provided for your convenience only. The official language is English and the official law is Luxembourg.

Ruban adhésif Flashbreaker



5700 Skylab Road
Huntington Beach
CA 92647 USA

Phone : +1 714-899-8100
Fax : +1 714-899-8179

E-mail : airtech@airtechintl.com
Website : www.airtechonline.com

Data Sheet

FLASHBREAKER® 1

All purpose pressure sensitive tape

DESCRIPTION

Flashbreaker® tapes are high temperature/ high tensile strength polyester films coated with a pressure sensitive silicone adhesive for oven or autoclave cures up to 400°F (204°C). The orange Flashbreaker® tapes have high visibility when placed on parts and molds. Flashbreaker® pressure sensitive tapes are used for multi-purpose functions in metal bond and composites, such as holding down vacuum bagging materials, thermocouple wires, masking-off, chem-milling protection or in riveting shops. Flashbreaker® tapes remove easily after cure.

BENEFITS

- Flashbreaker tapes can control bond lines and make removal of resin flash easier, reducing clean up effort.
- Fix position of consumable materials to avoid process errors and improve part quality.
- High visibility orange color makes removal easier to inspect and reduces risk of leaving tape in place.

TECHNICAL DATA

Maximum use temperature	400°F (204°C)
Carrier type	Polyester
Adhesive type	Silicone
Color	Blue / Orange
Total thickness	0.0022 inch (55 µm)
Film thickness	0.001 inch (25 µm)
Adhesive thickness	0.0012 inch (30 µm)
Elongation at break	100 %
Shelf life	18 months from date of shipment when stored in original packaging at 72°F (22°C)

COMMONLY USED SIZES

Width	Length	Packaging
1 inch (2.54 cm)	72 yards (66 m)	60 rolls per case
2 inches (5.08 cm)	72 yards (66 m)	30 rolls per case
up to 20 inches (50.8 cm)	72 yards (66 m)	-

- Broken cases and other widths available on special order.



NOTES

- Available in 2 inch (5 cm) cut strips using "Pull Tab" technology.
- Product comes on plastic core, helping to reduce FOD in a clean room environment.
- The maximum use temperature is dependent upon the duration at maximum temperature and is process specific, Airtech recommends testing prior to use.

Last updated : 2019-03-26

Catalog position : Pressure sensitive tapes

As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech International, Inc. does not assume any responsibility for the performance of this material for any particular use. The material is sold "as is". Airtech International, Inc. disclaims, and buyer waives, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and of fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes. Any translation is provided for your convenience only. The official language is English and the official law is California, USA.

ANNEXE C – TESTS DE COMPRESSIBILITÉ

Les tests de compressibilité ont pour objectif d'investiguer le comportement viscoélastique de renforts secs ou imprégnés et d'obtenir leur modèle de compaction. Notamment, les effets de la relaxation, de la compaction cyclique et de lubrification, ainsi que l'influence du nombre de plis, sont investigués.

Préparation des échantillons

Pour débiter la préparation des échantillons, le renfort choisi est coupé en longs rubans à l'aide d'une paire de ciseaux, d'un couteau rotatif ou d'une lame exacto. Du ruban adhésif Flashbreaker est ensuite utilisé pour maintenir l'intégrité des échantillons, éviter leur cisaillement et empêcher les fibres se situant au niveau de la coupe de se détacher (Figure C-1). Des plis carrés de 10 cm × 10 cm sont ensuite découpés à l'aide d'une presse hydraulique (Figure C-2) et d'un emporte-pièce spécialement conçu à cet effet (Figure C-3).

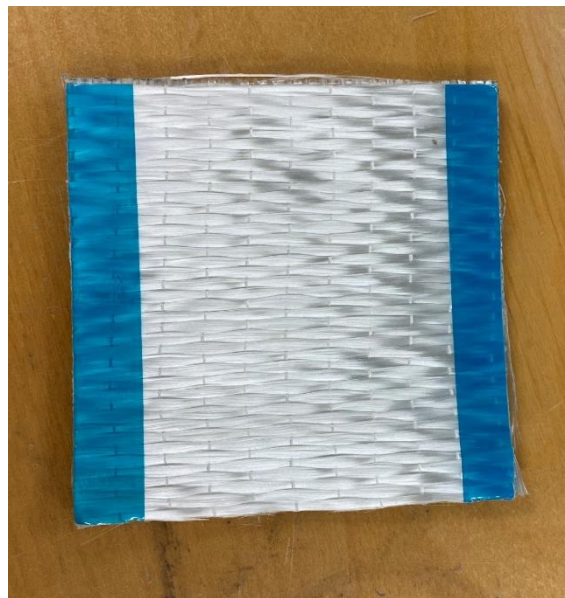
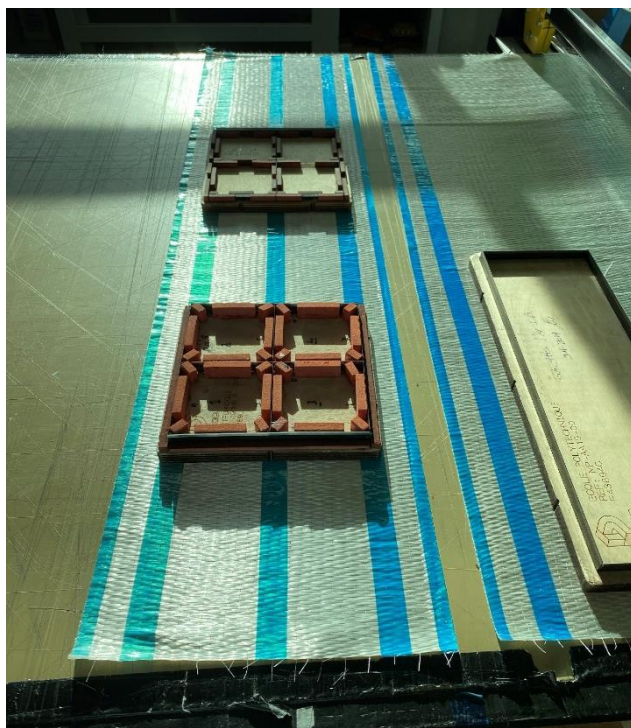


Figure C-1. Photographies de l'utilisation du ruban adhésif Flashbreaker (gauche) et des plis découpés (droite)



Figure C-2. Photographie de la presse hydraulique

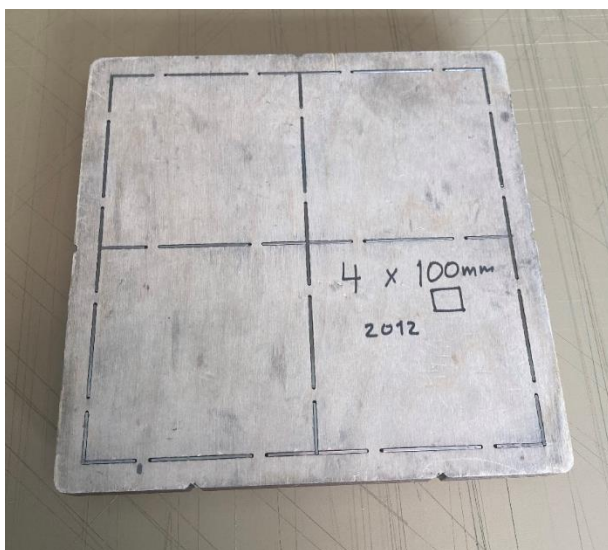


Figure C-3. Photographies de l'emporte-pièce

Machine de test

Les essais sont ensuite réalisés sur une machine de test universelle Instron 4505 dotée d'une cellule de charge de 100 kN et équipée de plateaux de compaction imbriqués permettant de compacter des renforts secs ou immergés dans l'huile de silicone. La machine se situe au local A384 du pavillon principal de l'école Polytechnique.

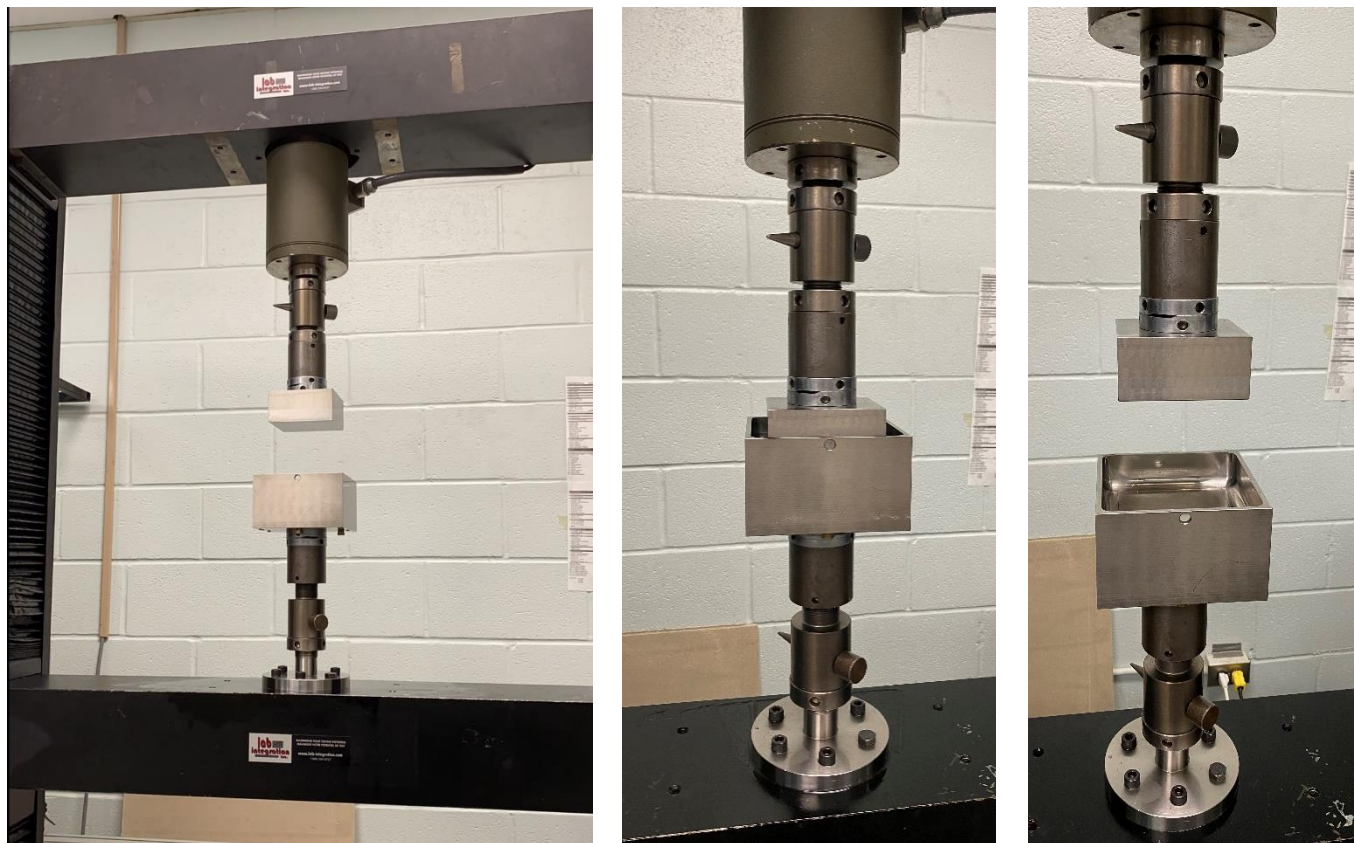


Figure C-4. Photographies de la machine de test universelle Instron 4505

La machine est contrôlée avec le logiciel Test Loop de Lab Integration (numéro de version 4.0 0.11), dans lequel le cycle de chargement ci-dessous est programmé. Ce programme est installé sur l'ordinateur A384-02, dont le mot de passe d'accès est « **qw34er** » sous le domaine « **prof** ». Ce programme permet d'effectuer un test de conformité jusqu'à une force maximale de 5000 N, avant d'effectuer 6 cycles de compaction-relaxation-décompaction jusqu'à une force maximale de 1000 N, qui correspond à la contrainte appliquée par la pression atmosphérique pour des échantillons de cette taille.

Procedure	Standard	Setup	Test Type	Positive	Descript
Cyclic compaction		100kN	General Purpose	Tension	Zaynab

Do not use Toe in Compensation				
Minimum	Maximum	Range	Step	Ext
				<input type="checkbox"/>
Rigidity				
Do not use Correction				

Axe Y			Axe X		
N			mm		
Channel	Min	Max	Channel	Min	Max
Force	0	-1000	Position	-1	50




Test Sequences							
#	Sequence Type	Speed	Destination	Action			
5	MoveToForce	P 1 mm/min	F -5000 N	Next Sequence			
6	MoveToPosition	P 75 mm/min	P 12 cm	Maintain Destination	1 min		
7	MoveToPosition	P 75 mm/min	P 1 cm	Next Sequence			
8	MoveToForce	P 1 mm/min	F -1000 N	Maintain Destination	2 min		
9	MoveToPosition	P 1 mm/min	P 1 cm	Next Sequence	0 min		
10	MoveToForce	P 1 mm/min	F -1000 N	Maintain Destination	2 min		
11	Move to Position	P 1 mm/min	P 1 cm	Next Sequence	0 min		
12	Move to Force	P 1 mm/min	F -1000 N	Maintain Destination	2 min		
13	Move to Position	P 1 mm/min	P 1 cm	Hold Position	1 min		
14	Move to Force	P 1 mm/min	F -1000 N	Maintain Destination	2 min		
15	Move to Position	P 1 mm/min	P 1 cm	Next Sequence	0 min		
16	Move to Force	P 1 mm/min	F -1000 N	Maintain Destination	2 min		
17	Move to Position	P 1 mm/min	P 1 cm	Next Sequence	0 min		
18	Move to Force	P 1 mm/min	F -1000 N	Maintain Destination	2 min		
19	Move to Position	P 1 mm/min	P 1 cm	Next Sequence	0 min		
20	Move to Position	P 75 mm/min	P 12 cm	Next Sequence	0 min		

Figure C-5. Cycle de chargement programmé dans le logiciel Test Loop

Procédure expérimentale

Avant de débuter un essai de compressibilité, 5 ou 10 plis de renforts sont pesés dans la balance de précision du local A384 (Figure C-6). L'échantillon est ensuite préparé en superposant les plis, tout en s'assurant qu'il n'y ait pas de fibres libres qui pourraient perturber les résultats du test.



Figure C-6. Balance de précision utilisée pour peser les échantillons de compressibilité

Une fois l'échantillon préparé, les plateaux de compaction montés sur la machine de test sont rapprochés manuellement jusqu'à ce qu'il se frôlent à peine. Les mesures de force et de position sont alors remises à zéro, et l'essai de conformité est lancé (étape 5). Une fois l'essai terminé, les plateaux sont distanciés de 12 cm à la fin de l'étape 6 et l'échantillon dispose d'une minute pour disposer soigneusement l'échantillon au centre du plateau de compaction inférieur (Figure C-7).

Le plateau inférieur se déplace ensuite à une vitesse de 75 mm/min jusqu'à ce qu'une distance de 1 cm sépare les deux plateaux (étape 7), puis la vitesse est réduite à 1 mm/min et le plateau inférieur est contrôlé en déplacement jusqu'à ce que la force appliquée sur l'échantillon atteigne 1000 N (étape 8). Cette force est alors maintenue pendant 2 minutes pour mesurer la relaxation de l'échantillon. Noter qu'il importe de programmer adéquatement la distance de l'étape 7 en fonction du renfort testé et de l'épaisseur initiale de l'échantillon, afin que ce dernier ne soit pas comprimé avant le début de l'étape 8.

Une fois les 2 minutes écoulées, l'échantillon est décompacté à la même vitesse de 1 mm/min jusqu'à ce que la distance initiale de 1 cm soit atteinte (étape 9). Le premier cycle de chargement-relaxation-déchargement est alors terminé. Les étapes 10 à 13 effectuent alors deux cycles supplémentaires pour étudier l'influence du chargement cyclique, puis l'opérateur dispose d'une minute pour saturer manuellement l'échantillon avec de l'huile de silicone. Finalement, l'échantillon saturé est soumis à trois cycles additionnels (étapes 14 à 19), puis le plateau supérieur revient à une position de 12 cm qui permet de retirer l'échantillon et de nettoyer le montage.

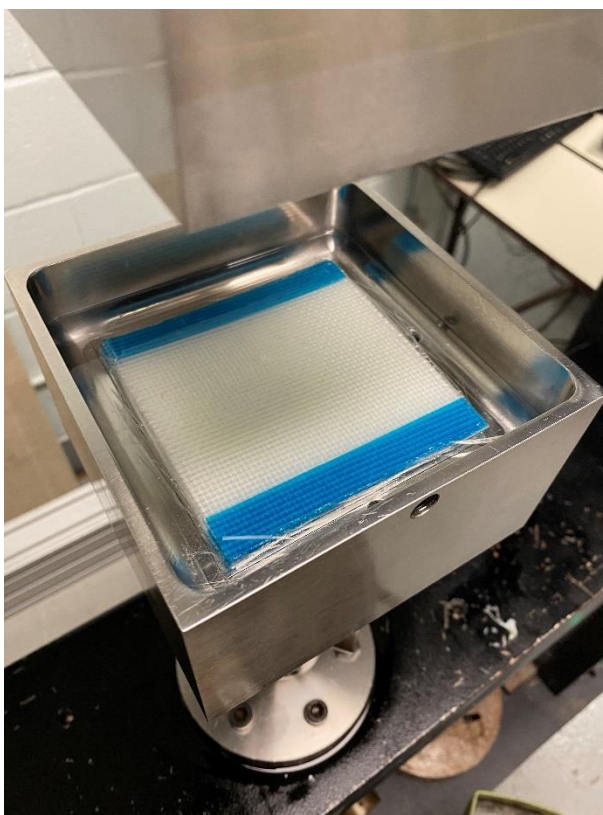


Figure C-7. Échantillon déposé au centre du plateau de compaction inférieur

Analyse des résultats

La Figure C-8 montre un exemple des résultats de compressibilité obtenus. On y voit les courbes de la force mesurée en fonction de la position lors des 6 cycles de compaction-relaxation-décompaction. Ces résultats peuvent être exportés dans un fichier texte en utilisant le bouton « Export » du logiciel.

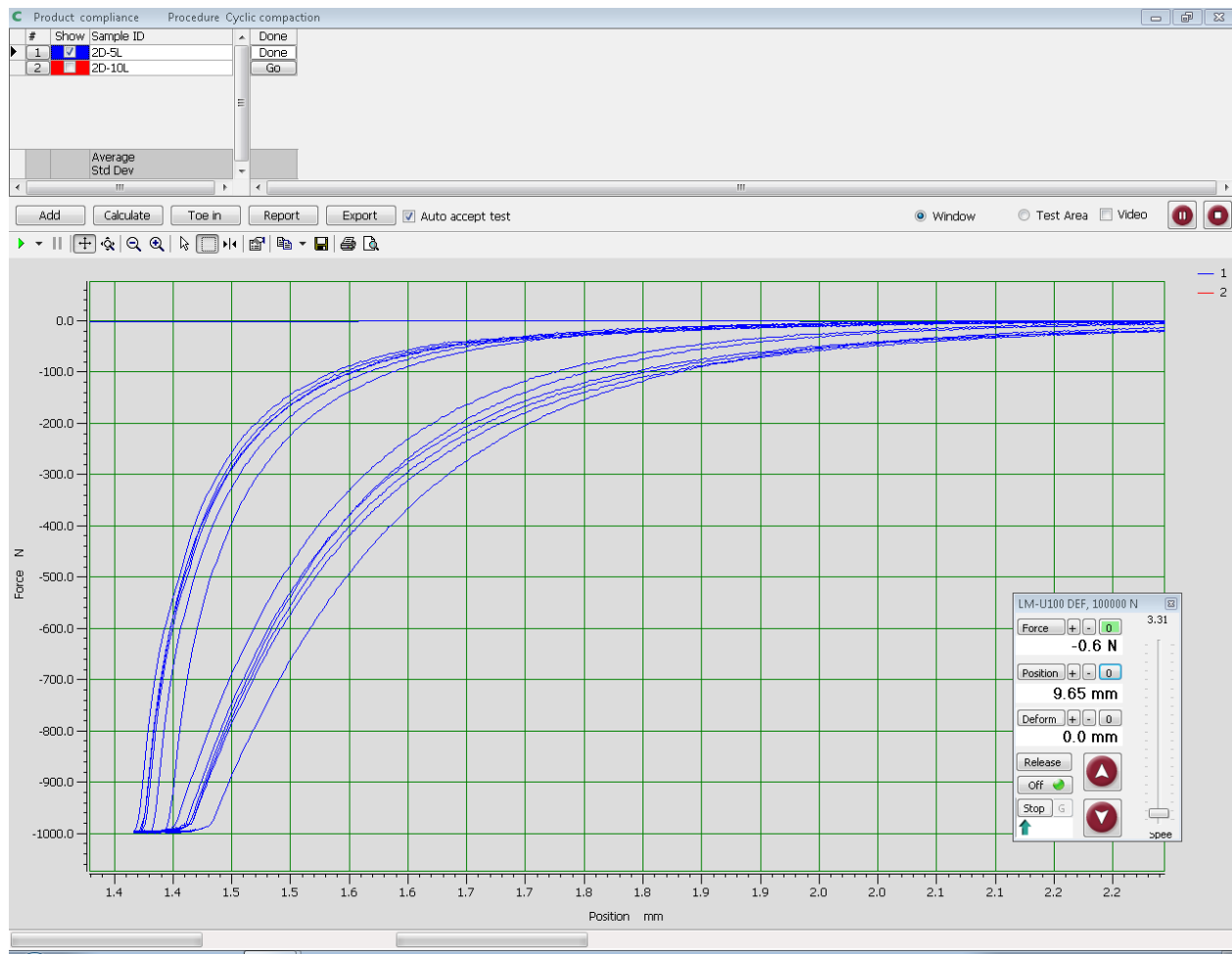


Figure C-8. Exemple des résultats de compressibilité obtenus dans le logiciel Test Loop

Ce fichier texte contient alors toutes les données recueillies durant l'essai de compressibilité, c'est-à-dire la position (en mm), la force (en N), la déformation (en mm), le temps (en s), ainsi que le numéro de la séquence et de l'événement atteints tel que programmé dans la Figure C-5. Si ces résultats sont importés dans un tableur Excel, la Figure C-9 qui illustre la position et la force en fonction du temps peut être tracée.

Noter que cette courbe contient non seulement les résultats de l'essai de conformité (Figure C-10) et des 6 cycles de chargement (Figure C-11), mais également des mesures lorsque l'échantillon n'est pas compacté. Un travail de traitement de données doit donc être effectué pour ne retenir que les données pertinentes. Il est ici recommandé d'identifier les temps de début et de fin de chaque cycle de compression à partir de la Figure C-9 puis de faire un usage judicieux des fonctions « INDEX » et « EQUIV » d'Excel pour extraire automatiquement les données pertinentes.

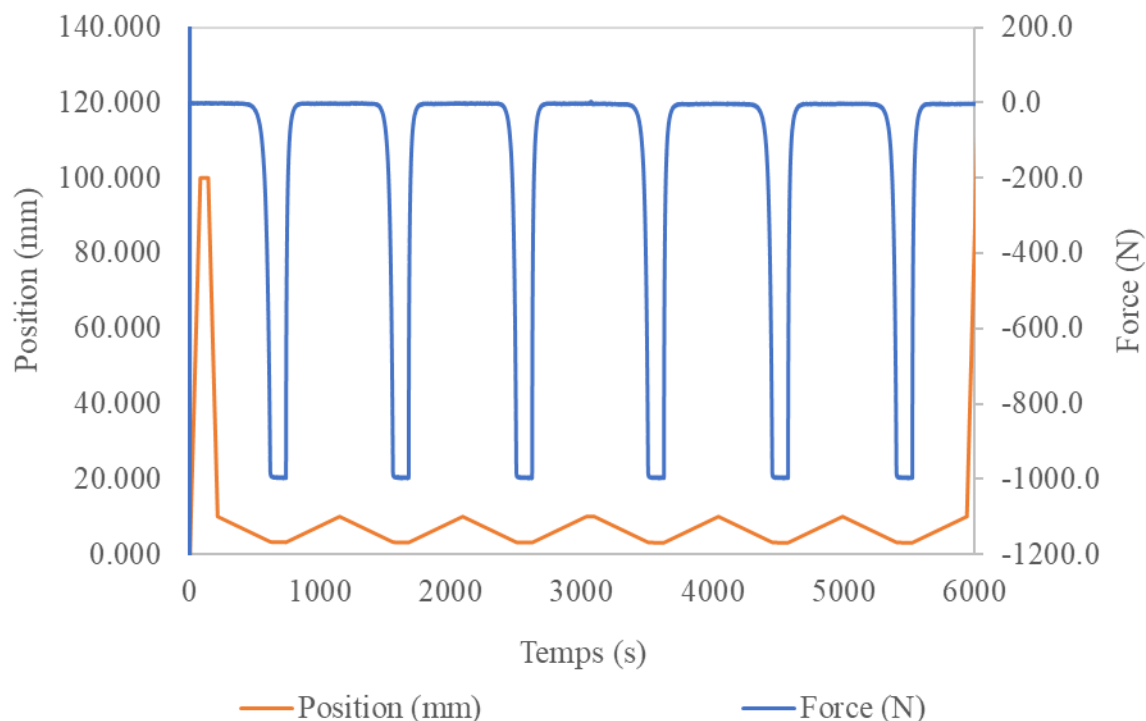


Figure C-9. Exemple des résultats de compressibilité présentés dans le tableur Excel

Enfin, les courbes de compressibilité peuvent être corrigés à partir des résultats du test de conformité. Il s'agit ici de calculer pour chaque force mesurée, la déformation associée du montage expérimental, pour ensuite soustraire cette déformation aux valeurs d'épaisseur mesurée :

$$\text{Épaisseur}_{\text{corrigée}} = \text{Épaisseur}_{\text{mesurée}} - (a \times \text{Force}_{\text{mesurée}} + b)$$

où a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite de régression linéaire de la Figure C-10.

Le modèle de compaction de type puissance ($F = kx^n$) peut finalement être trouvé en sélectionnant les données corrigées de compaction lors du troisième cycle de compression à sec, et en traçant la courbe du logarithme de la force en fonction du logarithme de l'épaisseur (Figure C-12). L'exposant n correspond alors à la pente de la droite de régression linéaire obtenue, tandis que le facteur k est égal à son ordonnée à l'origine.

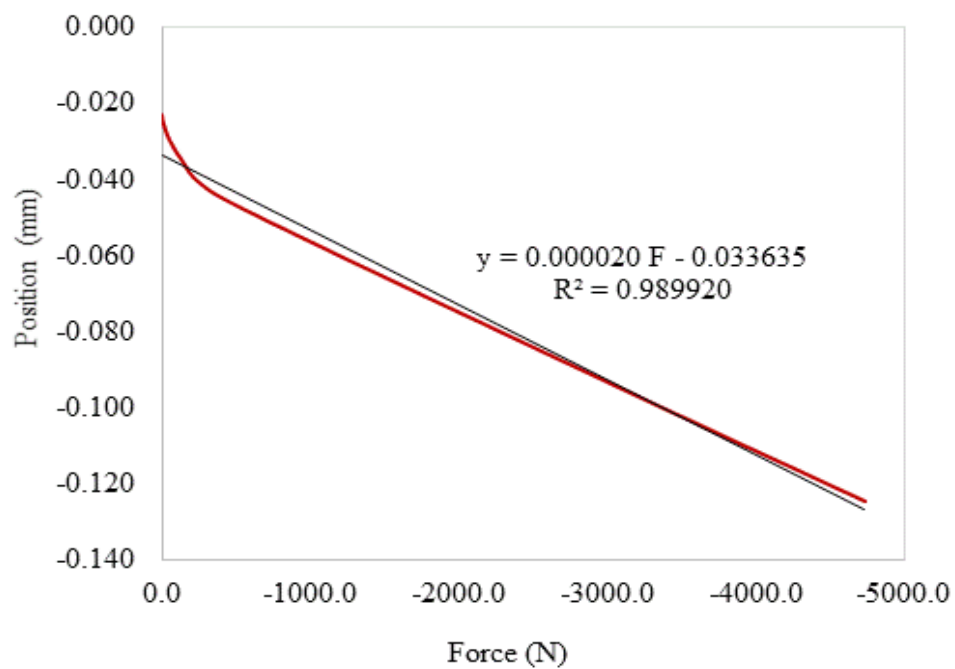


Figure C-10. Exemple de résultat de test de conformité

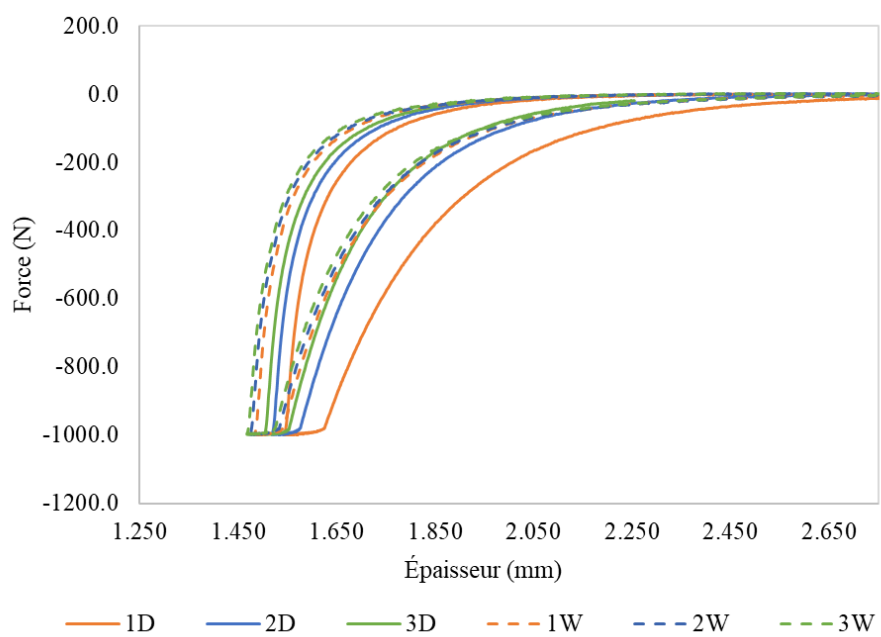


Figure C-11. Exemple de résultats obtenus suite aux 6 cycles de compaction-relaxation-décompaction

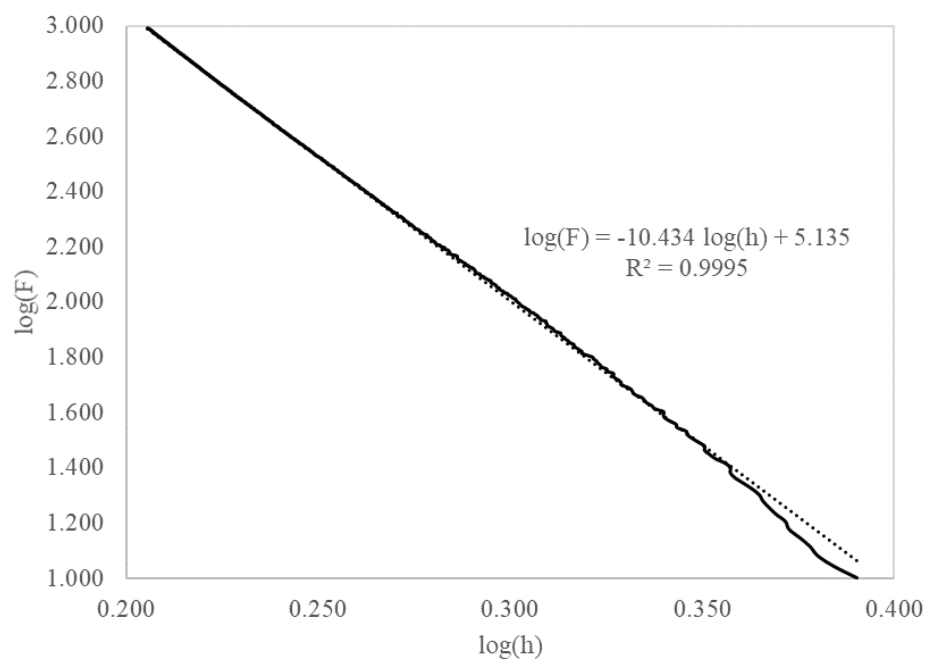


Figure C-12. Logarithme de la force en fonction du logarithme de la position lors du troisième de compaction à sec

ANNEXE D – EXPÉRIENCES D’INFUSION DIRECTE ET INDIRECTE

Les expériences d’infusion directe ont pour objectif de mesurer la planaire flexible du milieu drainant et des renforts caractérisés. Elles sont effectuées dans des conditions reproduisant le plus fidèlement possible les procédés de fabrication par infusion de résine, pour obtenir des mesures représentatives des conditions réelles. Les expériences d’infusion indirecte servent, quant à elle, de référence lorsque des simulations numériques sont effectuées pour identifier la perméabilité transverse de la préforme.

Préparation des échantillons

Les échantillons de renfort infusés sont fabriqués selon une approche similaire à celle présentée dans l’annexe C pour la préparation des échantillons de compressibilité. Des rubans de renfort sont d’abord découpés manuellement et le ruban adhésif Flashbreaker est utilisé pour maintenir l’intégrité des échantillons. Des plis sont ensuite découpés à l’aide de la presse hydraulique précédemment présentée et d’un emporte-pièce (Figure D-1). Le milieu drainant et le tissu d’arrachement sont aussi découpés avec le même emporte-pièce et des rectangles de 445 mm × 145 mm sont alors obtenus (Figure D-2). Enfin, la bâche à vide est coupée manuellement aux dimensions de 500 mm × 1000 mm.

Moule de perméabilité

Le moule de perméabilité est une plaque de plexiglas fixée sur un support en métal (Figure D-3). La plaque est transparente et usinée pour placer 15 capteurs de pression sur l’axe de symétrie longitudinal. Seuls 4 capteurs de pression sont utilisés lors des expériences, et les trous filetés inutilisés sont donc bouchés avec de l’argile et scellés avec du ruban scellant (*dumdum*) pour assurer l’étanchéité du moule. Les 4 capteurs de pression sont connectés à un système d’acquisition connecté à son tour au logiciel WinDaq de DATAQ Instruments, ou ils sont alimentés par une source de courant continu de 32 V, et connecté à un microcontrôleur Arduino Uno pour l’acquisition des données.



Figure D-1. Découpe des échantillons à infuser

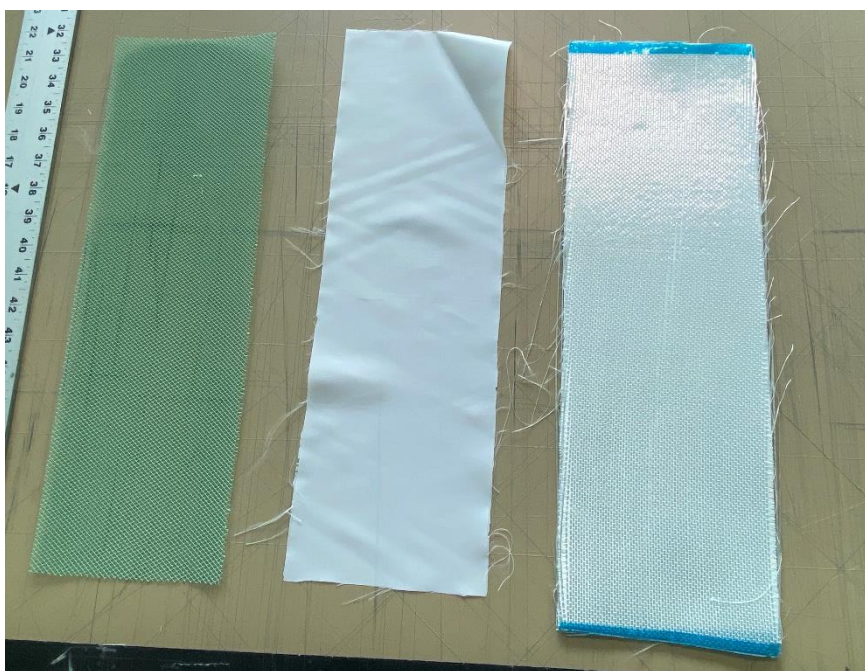


Figure D-2. Rectangles découpés de milieu drainant (gauche), de tissu d'arrachement (centre) et de renfort fibreux (droite)

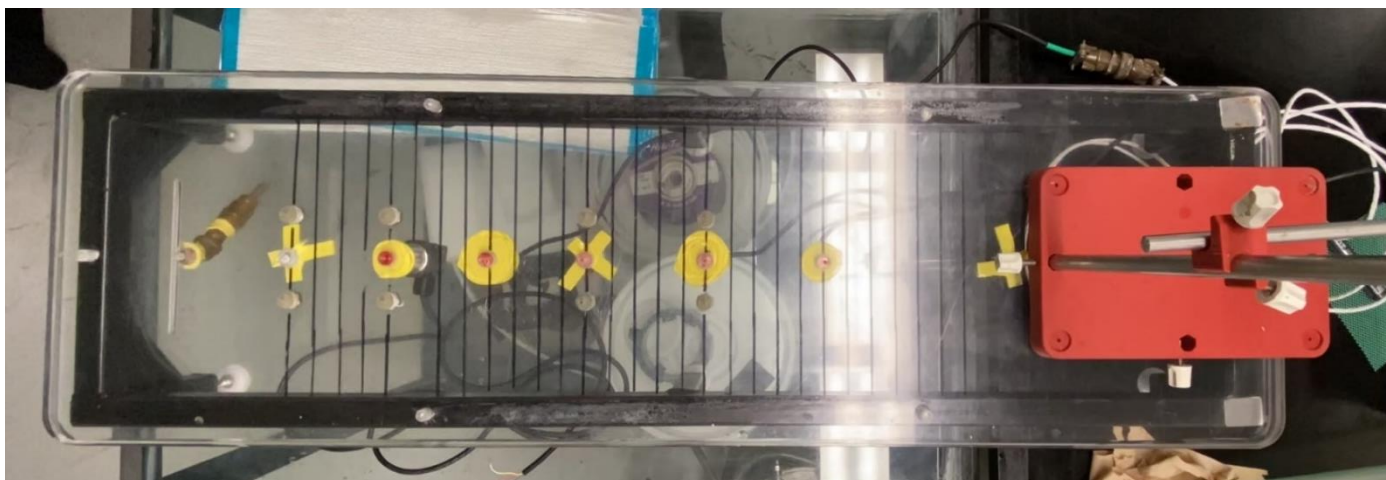


Figure D-3. Plaque de plexiglas utilisée comme moule d'infusion

Procédure expérimentale

Avant de débuter le drapage, le moule est nettoyé avec un dégraissant et l'échantillon, constitué de 5 ou 10 plis de renfort, est pesé. Les manipulations suivantes sont ensuite suivies pour obtenir le montage montré dans la Figure D-4 et schématisé dans la Figure D-5.

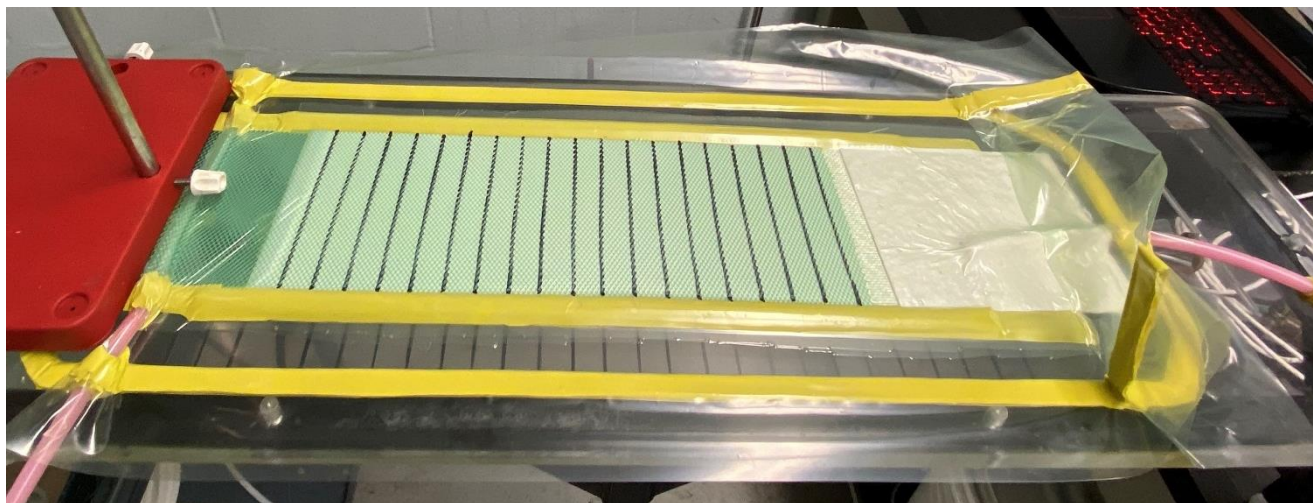


Figure D-4. Montage expérimental lors d'une expérience d'infusion directe

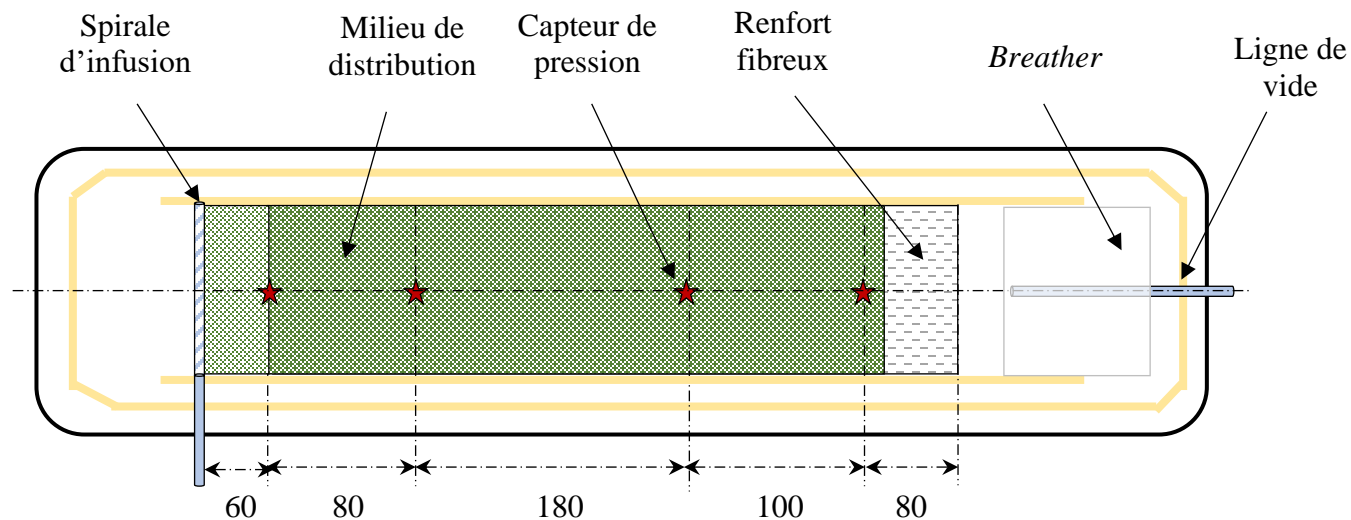


Figure D-5. Schéma du montage d'infusion expérimental

Manipulations :

1. Disposer les plis de renfort sur le moule en s'assurant qu'aucune fibre libre ne vient s'immiscer entre les couches. L'extrémité de l'échantillon doit être placée sur la ligne indiquant le premier capteur de pression.
2. Dans le cas des infusions directes, ajouter une ligne de *dumdum* de part et d'autre du renfort, et sceller une couche de film imperméable sur cette ligne. Ignorer cette étape pour les infusions indirectes.



Figure D-6. Drapage du renfort à la fin de l'étape 2

3. Disposer une couche de tissu d'arrachement et une couche de milieu drainant sur le renfort. Décaler leur position de 6 cm par rapport à la ligne indiquant le premier capteur de pression.
4. Placer une ligne de *dumdum* de part et d'autre du milieu drainant, et sceller une couche de bâche à vide dessus pour isoler la surface de l'échantillon des plis qui peuvent éventuellement se former dans la bâche à vide lors des étapes suivantes.



Figure D-7. Drapage du renfort et du milieu drainant à la fin de l'étape 4

5. Appliquer le *dumdum* sur le périmètre du moule, en le tournant à un angle de 45 degrés dans les coins.

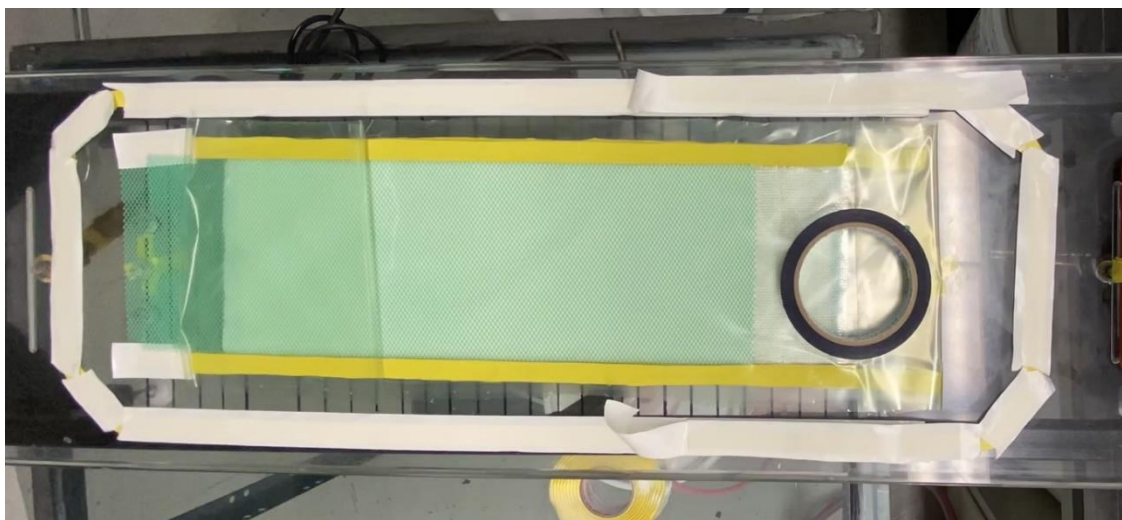


Figure D-8. Montage expérimental à la fin de l'étape 6

6. Créer des oreilles de lapin mesurant environ 10 cm de part et d'autre du moule.
7. Positionner la ligne d'infusion à l'extrémité du milieu de distribution. Ceci permettra à l'écoulement de se linéariser avant d'atteindre le renfort (et le premier capteur de pression).
8. Ajouter une spirale de *dumdum* vis-à-vis la ligne d'infusion pour conserver la symétrie du montage.

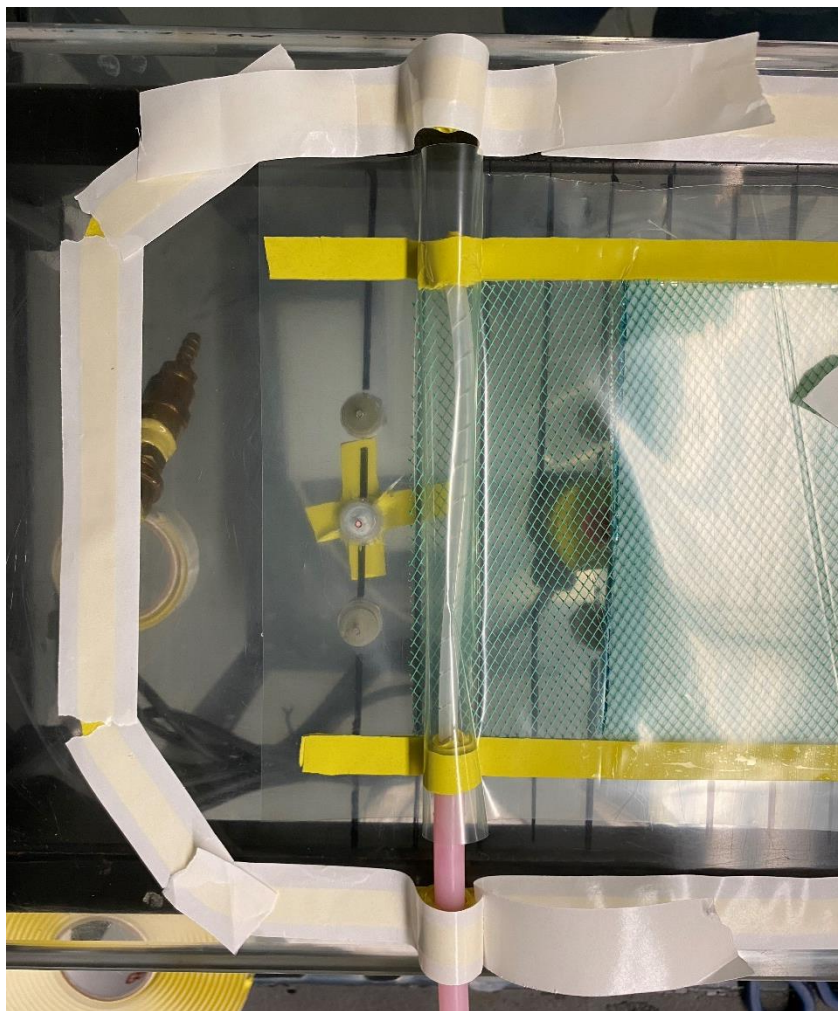


Figure D-9. Configuration de la ligne d'infusion à la fin de l'étape 8

9. Positionner la ligne de vide et le *breather*.

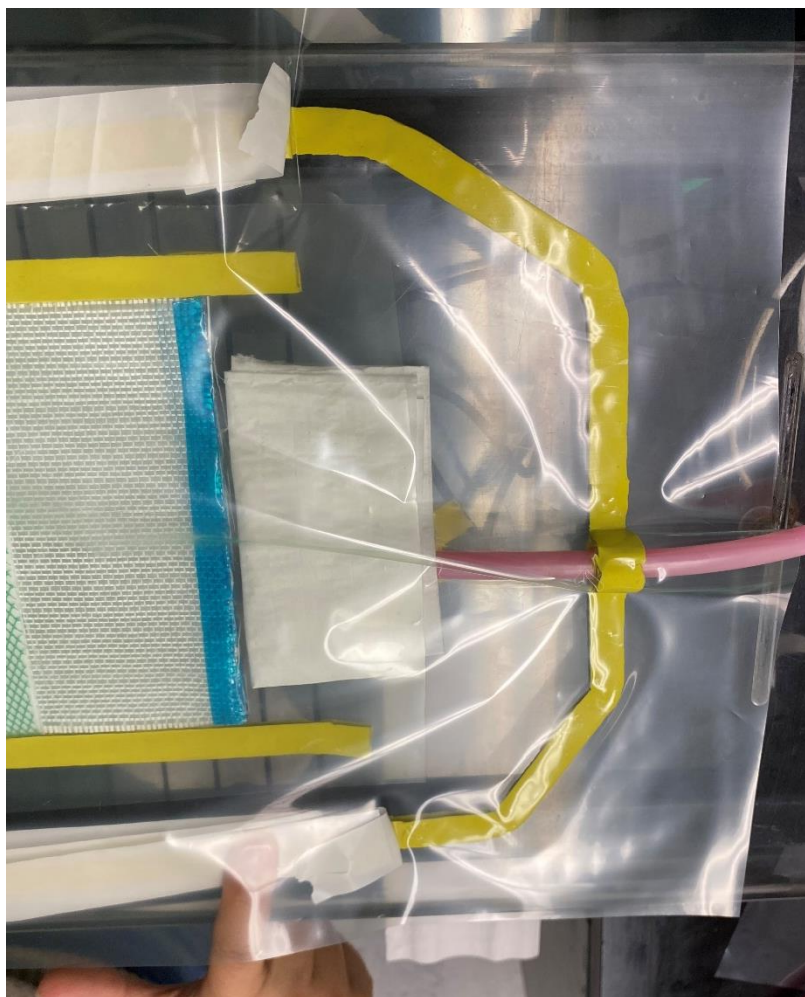


Figure D-10. Configuration de la ligne de vide à la fin de l'étape 9

10. Sceller la bâche à vide sur le périmètre du moule en commençant par la ligne de vide, et en progressant vers la ligne d'infusion. Il est impératif de s'assurer que la bâche à vide se conforme adéquatement au dumtum, et qu'il n'y a pas d'écart au niveau des lignes d'infusion et de vide, et de l'oreille de lapin.
11. Sceller la seconde oreille de lapin pour fermer totalement la cavité du moule.

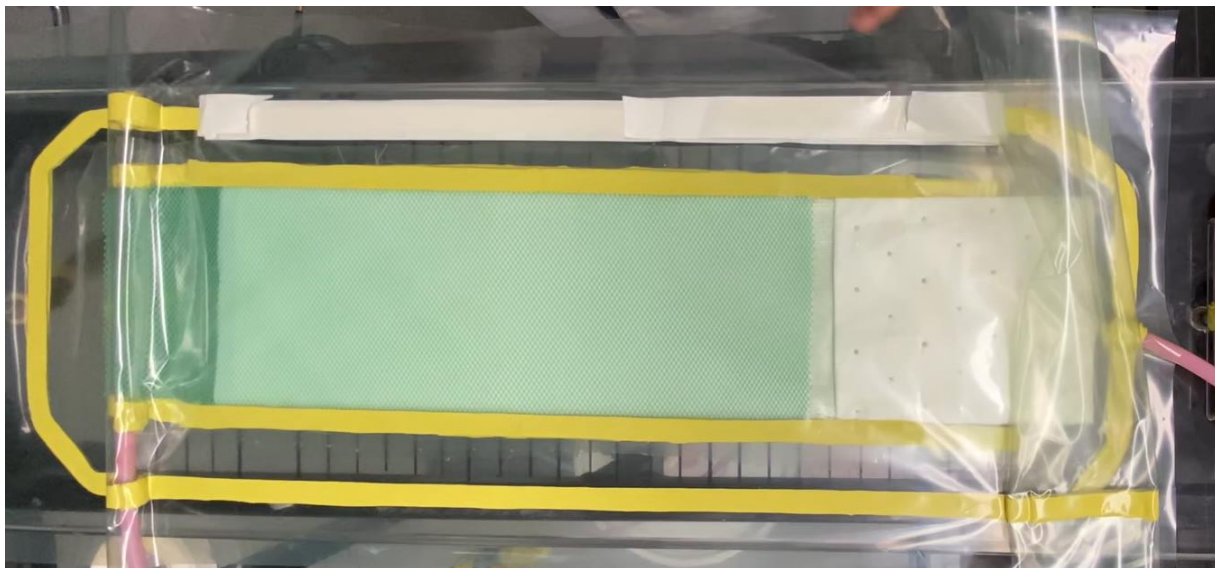


Figure D-11. Fermeture partielle du moule à la fin de l'étape 10

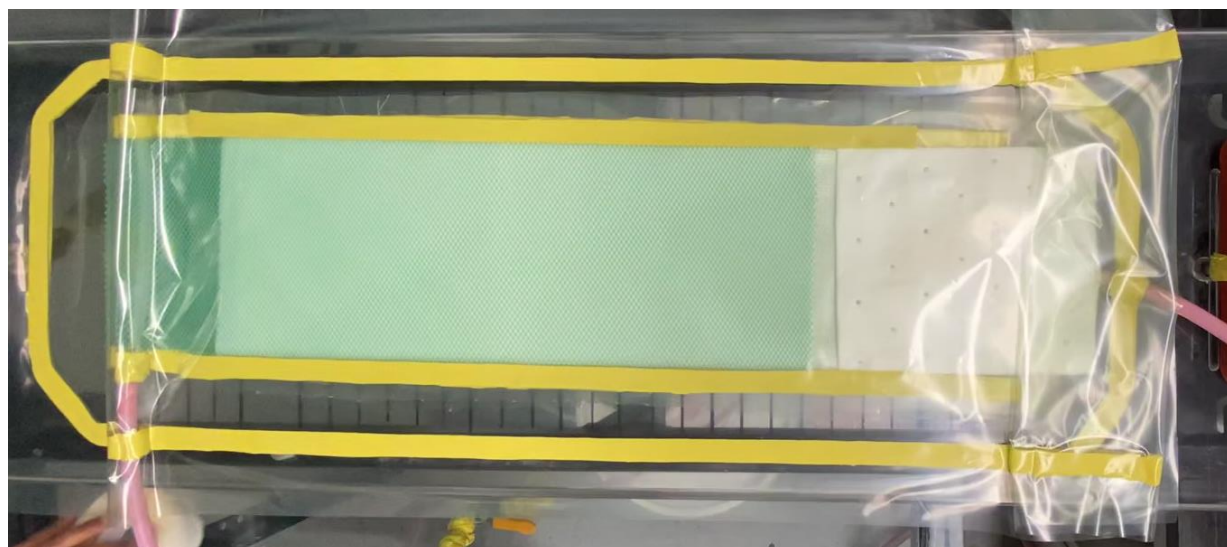


Figure D-12. Fermeture totale du moule à la fin de l'étape 11

12. Vérifier le niveau de liquide dans le pot de pression pour s'assurer qu'il n'est pas entièrement rempli, puis le connecter à la ligne de vide.
13. Connecter la valve d'entrée à la ligne d'infusion. Sceller les jonctions avec du *dumdum* pour éviter les infiltrations d'air.



Figure D-13. Connexion de la valve d'entrée de la ligne d'infusion

14. Brancher le pot de pression à la pompe à vide, puis lisser la surface de la bâche à vide pour éliminer les rides.



Figure D-14. Montage expérimental après que le vide est tiré dans la cavité

15. Fermer la ligne d'infusion avec du *dumdum* pour éliminer l'air présent dans le tube, puis fermer la valve d'entrée.
16. Connecter les capteurs de pression au système d'acquisition et vérifier le niveau de pression.
17. Ajuster la pression de vide à la valeur souhaitée, puis déconnecter le pot de pression de la pompe à vide pour vérifier l'étanchéité du moule.
18. Reconnecter le pot de pression et tracer des lignes équidistantes de 20 mm sur la surface de la bâche à vide.
19. Lancer l'acquisition des données de pression.
20. Colorer l'huile de silicone :
 - a. Ajouter 2 à 3 gouttes de silicone à 5 mL d'huile végétale ou de canola.
 - b. Mélanger vigoureusement jusqu'à ce que le colorant soit complètement dissous dans l'huile.
 - c. Ajouter progressivement un total d'1L d'huile de silicone en continuant à mélanger entre les ajouts.
21. Verser une quantité suffisante d'huile de silicone dans un contenant (environ 300 mL ont été nécessaires pour l'infusion de 5 plis de renforts).
22. Positionner le contenant d'huile à une hauteur légèrement inférieure à celle du moule.
23. Placer l'extrémité toujours fermée de la ligne d'infusion dans le contenant d'huile.
24. Noter la température ambiante.
25. Positionner deux caméras de sorte à filmer le dessus et le dessous du moule. Démarrer l'enregistrement.
26. Retirer le *dumdum* qui ferme l'extrémité de la ligne d'infusion, tout en la gardant submergée dans l'huile. Permettre à l'huile de remplir la ligne d'infusion pendant quelques secondes.
27. Ouvrir la valve d'entrée de la ligne d'infusion pour permettre à l'huile de s'écouler dans la cavité du moule.
28. Attendre que le milieu drainant et le renfort soient entièrement imprégnés.

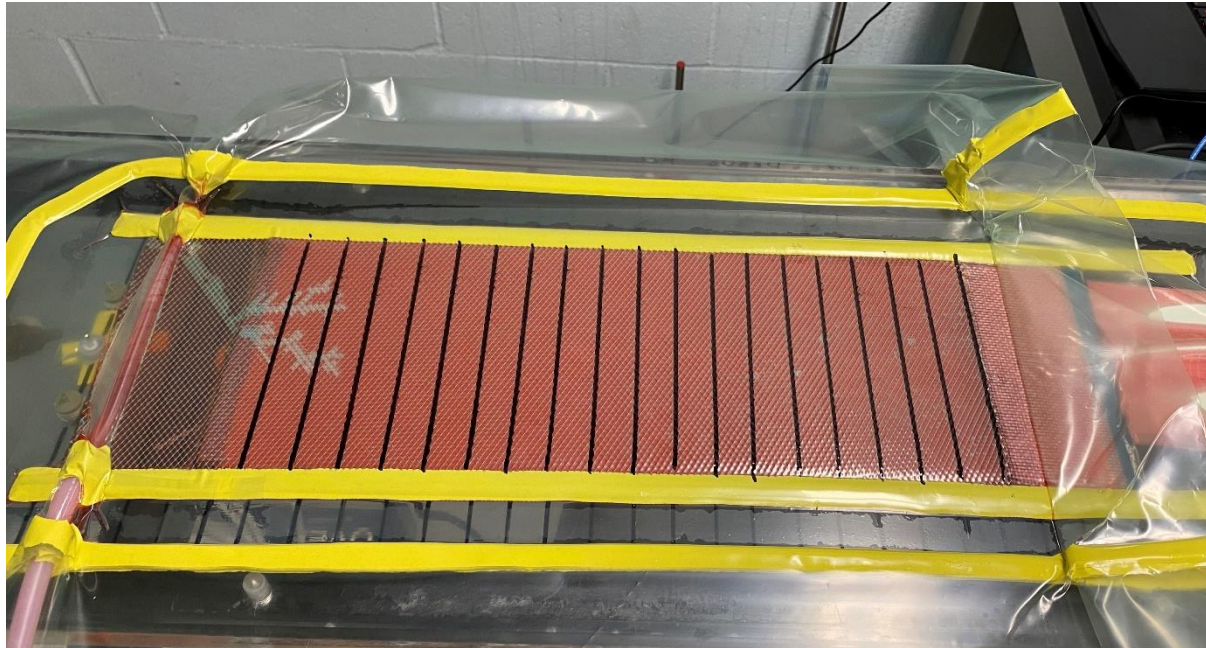


Figure D-15. Fin de l'expérience d'infusion

29. Arrêter l'enregistrement et l'acquisition de données.
30. Fermer la valve d'entrée.
31. Débrancher les capteurs de pression, exporter les résultats et éteindre le système d'acquisition.
32. Déconnecter le pot de pression et la pompe à vide.
33. Jeter l'échantillon et nettoyer le moule avec du dégraissant.

ANNEXE E – GUIDE D’UTILISATION DE LA FICHE EXCEL DE CALCUL DE PERMÉABILITÉ

La fiche Excel présentée dans cette annexe a spécialement été conçue pour calculer la perméabilité des matériaux à partir des enregistrements vidéo des fronts d’écoulement lors des infusions directes, et des mesures de pression données par les 4 capteurs de pression.

Pour chaque expérience d’infusion directe, 2 feuilles de calcul sont créées : une feuille contenant les données de pression, et une autre permettant le calcul des perméabilités.

Données de pression :

Cette feuille est structurée comme suit :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1				Voltage	Pressure						Voltage			Pressure	
2	Clock	Time	Infusion time	V0 (0 mm)	P0 (0 mm)		Clock	Time	Infusion time	V1 (80 mm)	V2 (260 mm)	V3 (360 mm)	P1 (80 mm)	P2 (260 mm)	P3 (360 mm)
3	(h:m:s)	(s)	(s)	(V)	(kPa)		(h:m:s)	(s)	(s)	(V)	(V)	(V)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
4	13:32:54	0.0		1.144	-54.252		13:32:54	0.0		2.862	2.936	2.898	-54.214	-53.022	-53.633
5	13:32:54	0.1		1.144	-54.252		13:32:54	0.1		2.861	2.936	2.898	-54.224	-53.018	-53.633
6	13:32:54	0.2		1.144	-54.252		13:32:54	0.2		2.861	2.936	2.898	-54.219	-53.022	-53.638
7	13:32:54	0.3		1.144	-54.252		13:32:54	0.3		2.861	2.935	2.897	-54.224	-53.042	-53.648
8	13:32:54	0.4		1.144	-54.252		13:32:54	0.4		2.862	2.936	2.898	-54.204	-53.018	-53.633
9	13:32:54	0.5		1.144	-54.252		13:32:54	0.5		2.861	2.937	2.898	-54.219	-53.008	-53.633
10	13:32:54	0.6		1.139	-54.448		13:32:54	0.6		2.860	2.936	2.898	-54.233	-53.018	-53.633
11	13:32:54	0.7		1.139	-54.448		13:32:54	0.7		2.862	2.936	2.898	-54.214	-53.022	-53.633
12	13:32:54	0.8		1.139	-54.448		13:32:54	0.8		2.863	2.936	2.898	-54.194	-53.018	-53.633
13	13:32:54	0.9		1.144	-54.252		13:32:54	0.9		2.862	2.937	2.898	-54.214	-53.013	-53.633
14	13:32:55	1.0		1.144	-54.252		13:32:55	1.0		2.861	2.937	2.898	-54.224	-53.008	-53.633
15	13:32:55	1.1		1.144	-54.252		13:32:55	1.1		2.861	2.936	2.898	-54.224	-53.018	-53.633
16	13:32:55	1.2		1.144	-54.252		13:32:55	1.2		2.862	2.936	2.898	-54.204	-53.022	-53.633
17	13:32:55	1.3		1.139	-54.448		13:32:55	1.3		2.859	2.936	2.898	-54.253	-53.027	-53.638
18	13:32:55	1.4		1.139	-54.448		13:32:55	1.4		2.862	2.936	2.898	-54.204	-53.022	-53.633
19	13:32:55	1.5		1.144	-54.252		13:32:55	1.5		2.862	2.937	2.898	-54.209	-53.013	-53.633
20	13:32:55	1.6		1.139	-54.448		13:32:55	1.6		2.861	2.937	2.897	-54.224	-53.013	-53.643
21	13:32:55	1.7		1.139	-54.448		13:32:55	1.7		2.861	2.936	2.897	-54.219	-53.027	-53.643
22	13:32:55	1.8		1.139	-54.448		13:32:55	1.8		2.863	2.937	2.898	-54.194	-53.008	-53.633
23	13:32:55	1.9		1.139	-54.448		13:32:55	1.9		2.861	2.936	2.898	-54.219	-53.022	-53.633
24	13:32:56	2.0		1.144	-54.252		13:32:56	2.0		2.862	2.936	2.898	-54.214	-53.018	-53.633
25	13:32:56	2.1		1.144	-54.252		13:32:56	2.1		2.861	2.936	2.898	-54.219	-53.022	-53.633
26	13:32:56	2.2		1.144	-54.252		13:32:56	2.2		2.860	2.937	2.898	-54.233	-53.013	-53.633
27	13:32:56	2.3		1.144	-54.252		13:32:56	2.3		2.863	2.937	2.898	-54.185	-53.013	-53.633
28	13:32:56	2.4		1.144	-54.252		13:32:56	2.4		2.862	2.936	2.898	-54.209	-53.018	-53.633
29	13:32:56	2.5		1.144	-54.252		13:32:56	2.5		2.861	2.936	2.898	-54.219	-53.018	-53.633
30	13:32:56	2.6		1.144	-54.252		13:32:56	2.6		2.861	2.937	2.898	-54.224	-53.013	-53.628
31	13:32:56	2.7		1.144	-54.252		13:32:56	2.7		2.861	2.936	2.898	-54.219	-53.018	-53.633
32	13:32:56	2.8		1.149	-54.057		13:32:56	2.8		2.861	2.937	2.898	-54.219	-53.013	-53.633
33	13:32:56	2.9		1.144	-54.252		13:32:56	2.9		2.863	2.936	2.898	-54.199	-53.018	-53.633
34	13:32:57	3.0		1.144	-54.252		13:32:57	3.0		2.862	2.937	2.898	-54.209	-53.008	-53.633
35	13:32:57	3.1		1.144	-54.252		13:32:57	3.1		2.862	2.937	2.898	-54.214	-53.008	-53.633
36	13:32:57	3.2		1.144	-54.252		13:32:57	3.2		2.862	2.936	2.898	-54.209	-53.027	-53.628
37	13:32:57	3.3		1.144	-54.252		13:32:57	3.3		2.862	2.937	2.898	-54.209	-53.013	-53.633
38	13:32:57	3.4		1.144	-54.252		13:32:57	3.4		2.860	2.937	2.899	-54.248	-53.013	-53.623
39	13:32:57	3.5		1.144	-54.252		13:32:57	3.5		2.862	2.937	2.898	-54.204	-53.008	-53.633
40	13:32:57	3.6		1.144	-54.252		13:32:57	3.6		2.862	2.936	2.898	-54.209	-53.027	-53.633
2533	13:37:08	253.9		1.158	-53.666		13:37:08	252.9		2.913	2.986	2.947	-53.389	-52.227	-52.842
2534	13:37:08	254.0		1.158	-53.666		13:37:07	253.0		2.913	2.986	2.948	-53.398	-52.227	-52.832
2535	13:37:08	254.1		1.153	-53.861		13:37:07	253.1		2.913	2.986	2.947	-53.389	-52.227	-52.847
2536	13:37:08	254.2		1.158	-53.666		13:37:07	253.2		2.913	2.986	2.948	-53.394	-52.227	-52.832
2537	13:37:08	254.3		1.153	-53.861		13:37:07	253.3		2.913	2.986	2.948	-53.389	-52.227	-52.832
2538	13:37:08	254.4		1.158	-53.666		13:37:07	253.4		2.913	2.986	2.948	-53.394	-52.227	-52.832
2539	13:37:08	254.5		1.158	-53.666		13:37:07	253.5		2.913	2.986	2.947	-53.389	-52.227	-52.842
2540	13:37:08	254.6		1.158	-53.666		13:37:07	253.6		2.914	2.986	2.948	-53.369	-52.227	-52.837

Figure E-1. Données de pression contenues dans la feuille Excel de calcul de perméabilité

- Les cellules en jaune contiennent les mesures de voltage (en V) en fonction du temps (en format h : m : s) telles que données par les systèmes d'acquisition Arduino au point d'injection, à 0 mm; et DATAQ pour les positions de 80 mm, 260 mm et 360 mm.
- Le temps est ensuite calculé (en s) et la pression (en kPa) dans les colonnes adjacentes.
- L'acquisition de données commence avant le début de l'infusion (Figure E-2, gauche). Il faut donc trouver l'heure à laquelle débute l'écoulement à partir des enregistrements vidéo (13 : 37 : 08 ou 254,9 s), pour ne garder que les données pertinentes (Figure E-2, droite).
- La pression de vide peut être obtenue en utilisant la fonction MIN d'Excel sur la plage de données au point d'injection, et la pression maximale avec la fonction MAX.

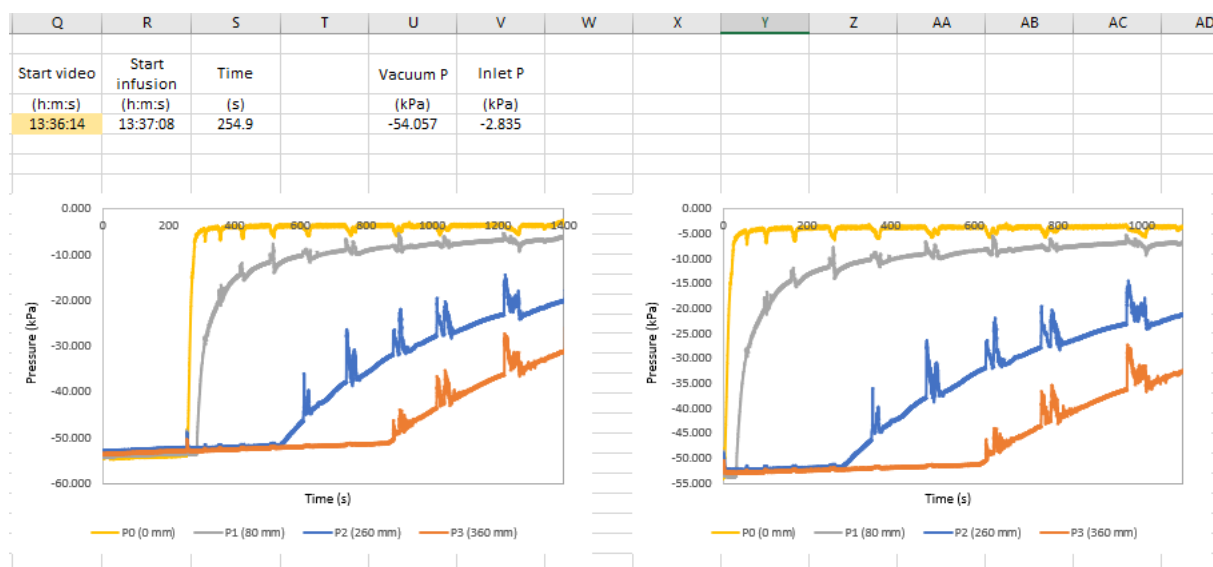


Figure E-2. Évolution des pressions mesurées lors de l'acquisition de données (gauche) et de l'infusion (droite)

Calculs de perméabilité

Pression d'infusion constante

Si l'on désire calculer la perméabilité en supposant une pression d'infusion constante, la procédure ci-dessous doit être suivie :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1										h	(mm)	1.537				
2										Vf	(-)	0.408				
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																
27																
28																
29																
30																
31																
32																
33																
34																
35																
36																

Figure E-3. Tableau de calcul des perméabilités flexibles du renfort fibreux

- Les cellules en jaune doivent être entrées manuellement :
 - i. La température est obtenue grâce à un thermomètre et permet de calculer la viscosité de l'huile de silicone.
 - ii. L'épaisseur et le taux volumique de fibres du renfort sont donnés par le modèle de compressibilité à la pression de vide calculée.
 - iii. Les temps de remplissage sont obtenus en analysant les enregistrements vidéo.
- Les autres cellules sont calculées automatiquement :
 - i. La viscosité est trouvée à partir de l'équation polynomiale de la viscosité en fonction de la température.
 - ii. La différence de pression est calculée en soustrayant la pression de vide à la pression d'infusion.
 - iii. Les données de la colonne D sont obtenues par sommation des colonnes $B \times 60 + C$.
 - iv. Les temps de remplissage sont trouvés en soustrayant le temps de remplissage D14 des données de la colonne D.

– Pour le calcul de la perméabilité élémentaire :

i. La vitesse V (colonne F) est calculée par la méthode des différences finies centrées :

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

ii. La perméabilité élémentaire divisée par la porosité K_{ele}/ϕ (colonne G) est donnée par :

$$\frac{K_{ele}}{\phi} = \frac{V \mu}{P_{inj} - P_f}$$

– Pour le calcul de la perméabilité interpolée, la procédure suggérée par Ferland et al. (1996) et détaillée ci-dessous est suivie :

La loi de Darcy stipule que :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{K}{\phi \mu} \frac{(P_{inj} - P_f)}{x}$$

Pour résoudre cette équation différentielle du premier ordre, les termes sont réorganisés pour l'intégration :

$$x dx = \frac{K (P_{inj} - P_f)}{\phi \mu} dt$$

$$\int_0^L x dx = \int_0^t \frac{K (P_{inj} - P_f)}{\phi \mu} dt$$

$$x(t)^2 = \frac{2K}{\phi \mu} \int_0^t (P_{inj} - P_f) dt = a^2 I(t)$$

où $a = \sqrt{2K/\phi \mu}$ est déterminée par une formule d'ajustement non linéaire.

L'intégrale approchée $I(t_i)$, notée I_i , est obtenue par la règle trapézoïdale de l'intégration (colonne H) :

$$I_i = I_{i-1} + (P_{inj} - P_f)(t_i - t_{i-1}) = (P_{inj} - P_f) t_i$$

L'ajustement au moindre carré est alors obtenu comme suit :

$$x(t) = \sqrt{a^2 I(t)}$$

$$\epsilon^2 = \sum_{i=2}^n (x_i - a\sqrt{I_i})^2$$

$$\frac{\partial \epsilon^2}{\partial a} = \sum_{i=2}^n (x_i - a\sqrt{I_i})\sqrt{I_i} = 0$$

$$a = \frac{\sum x_i \sqrt{I_i}}{\sum I_i}$$

La valeur de a (colonne L) conduit finalement à la perméabilité interpolée divisée par la porosité K_{int}/ϕ (colonne M):

$$\frac{K_{int}}{\phi} = \frac{a^2 \phi \mu}{2}$$

Enfin, la prédiction analytique de la position du front d'écoulement au temps d'infusion peut être calculée (colonne N) :

$$x_{analytical} = \sqrt{\frac{2 K_{int} (P_{inj} - P_f) t}{\phi \mu}}$$

Et l'erreur relative peut être calculée (colonne O) :

$$Erreur = \left| \frac{x - x_{analytical}}{x} \right| \times 100\%$$

- Finalement, pour le calcul de la perméabilité avec la position du front d'écoulement au carré (*Squared Flow Front method*) :
 - i. La pente m de la courbe x_{ff}^2 en fonction du temps (colonne P) doit être calculée (cellule L4).
 - ii. La perméabilité du *Squared Flow Front* divisée par la porosité K_{SFF}/ϕ peut alors être trouvée :

$$\frac{K_{SFF}}{\phi} = \frac{m \mu}{2 (P_{inj} - P_f)}$$

- Finalement, toutes les valeurs réelles de perméabilité peuvent être trouvées par le produit :

$$K = \frac{K}{\phi} (1 - V_f)$$

- Et les graphiques ci-dessous sont générés automatiquement :

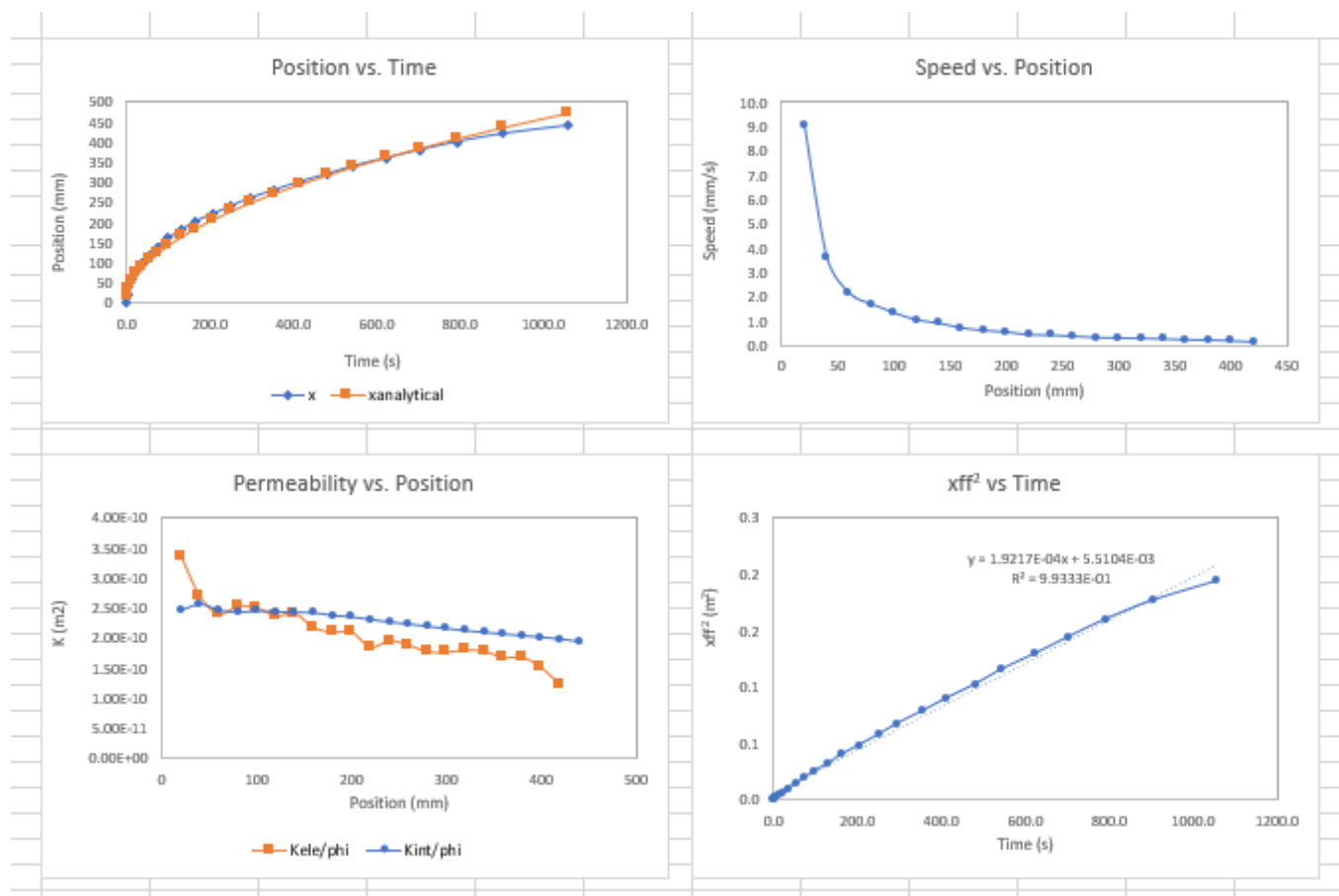


Figure E-4. Graphiques générés automatiquement lors de calcul de la perméabilité du renfort fibreux

Pression d'infusion réelle

Si l'on désire plutôt calculer la perméabilité en utilisant la pression réelle mesurée par les capteurs de pression, la procédure doit être modifiée. Les figures ci-dessous donnent un exemple pour le calcul de la perméabilité à pression variable du milieu drainant.

- Les temps de remplissage doivent d'abord être entrés manuellement à partir de l'enregistrement vidéo. Les perméabilités élémentaires et interpolées sont alors calculées automatiquement.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
39																
40		Time				Elementary method		DM								
41	x	Video time		Sum	Infusion time	V	K_{int}/ϕ	I	$\sum xi$	$\sum li$	$\sum xi(li)^{1/2}$	α	K_{int}/ϕ	$x_{analytical}$	Error - x	SFF
42	(mm)	(min)	(s)	(s)	(s)	(mm/s)	(m ²)	(Pa.s)	(m)	(Pa.s)	(m(Pa.s) ^{1/2})	(m/(Pa.s) ^{1/2})	(m ²)	(mm)		(m ²)
43	0		24.3	24.3	0.0											0.0000
44	20		24.6	24.6	0.3	53.3	1.97E-09	1.54E+04	0.02	1.54E+04	2.5	1.61E-04	1.23E-09	47.12	136%	0.0004
45	40		25.1	25.1	0.8	40.0	2.96E-09	4.10E+04	0.06	5.63E+04	10.6	1.88E-04	1.67E-09	76.34	32%	0.0016
46	60		25.6	25.6	1.3	36.7	4.07E-09	6.66E+04	0.12	1.23E+05	26.1	2.12E-04	2.13E-09	98.08	63%	0.0036
47	80		26.2	26.2	1.9	33.3	4.94E-09	9.73E+04	0.20	2.20E+05	51.0	2.32E-04	2.54E-09	118.57	48%	0.0064
48	100		26.8	26.8	2.5	33.3	6.17E-09	1.28E+05	0.30	3.48E+05	86.8	2.43E-04	2.94E-09	136.01	36%	0.0100
49	120		27.4	27.4	3.1	31.0	6.88E-09	1.59E+05	0.42	5.07E+05	134.6	2.65E-04	3.34E-09	151.46	26%	0.0144
50	140		28.1	28.1	3.8	28.6	7.41E-09	1.95E+05	0.56	7.02E+05	196.4	2.80E-04	3.71E-09	167.63	20%	0.0196
51	160		28.8	28.8	4.5	26.8	7.93E-09	2.30E+05	0.72	9.32E+05	273.2	2.93E-04	4.07E-09	182.48	14%	0.0256
52	180		29.6	29.6	5.3	25.0	8.33E-09	2.71E+05	0.90	1.20E+06	367.0	3.05E-04	4.41E-09	198.04	10%	0.0324
53	200		30.4	30.4	6.1	23.6	8.74E-09	3.12E+05	1.10	1.52E+06	478.8	3.16E-04	4.73E-09	212.46	6%	0.0400
54	220		31.3	31.3	7.0	22.2	9.05E-09	3.59E+05	1.32	1.87E+06	610.5	3.26E-04	5.03E-09	227.60	3%	0.0484
55	240		32.2	32.2	7.9	21.1	9.38E-09	4.05E+05	1.56	2.28E+06	763.2	3.35E-04	5.32E-09	241.78	1%	0.0576
56	260		33.2	33.2	8.9	19.1	9.19E-09	4.56E+05	1.82	2.74E+06	938.7	3.43E-04	5.58E-09	256.63	1%	0.0676
57	280		34.3	34.3	10.0	18.2	9.43E-09	5.12E+05	2.10	3.25E+06	1139.1	3.51E-04	5.83E-09	272.03	3%	0.0784
58	300		35.4	35.4	11.1	16.8	9.32E-09	5.69E+05	2.40	3.82E+06	1365.3	3.58E-04	6.07E-09	286.60	4%	0.0900
59	320		36.7	36.7	12.4	15.4	9.11E-09	6.35E+05	2.72	4.45E+06	1620.4	3.64E-04	6.28E-09	302.92	5%	0.1024
60	340		38.0	38.0	13.7	15.4	9.68E-09	7.02E+05	3.06	5.15E+06	1905.2	3.70E-04	6.48E-09	318.40	6%	0.1156
61	360		39.3	39.3	15.0	15.4	1.03E-08	7.68E+05	3.42	5.92E+06	2220.7	3.75E-04	6.67E-09	333.17	7%	0.1296
62	380		40.6	40.6	16.3	19.3	9.99E-09	8.35E+05	3.80	6.76E+06	2568.0	3.80E-04	6.85E-09	347.30	9%	0.1444

Figure E-5. Tableau de calcul des perméabilités flexibles du milieu drainant en considérant une pression d'infusion constante

- Les graphiques ci-dessous sont alors générés automatiquement :

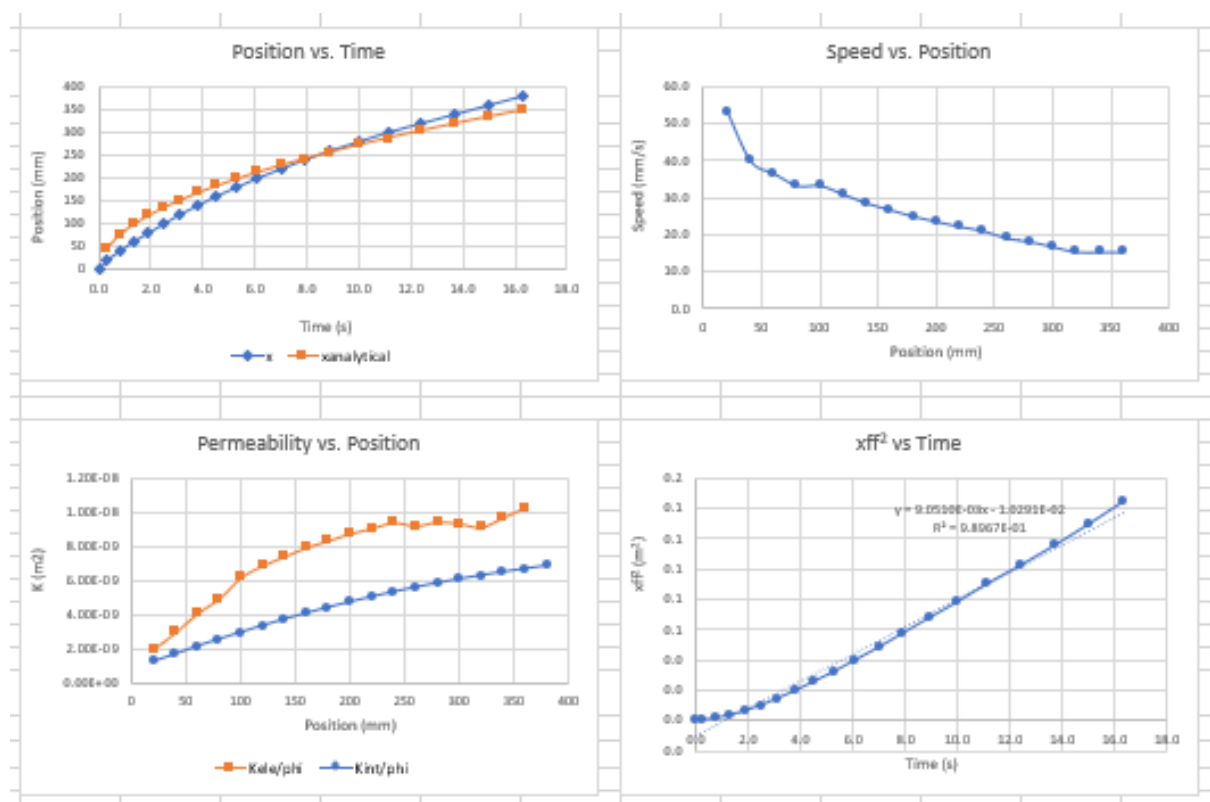


Figure E-6. Graphiques générés automatiquement lors du calcul de la perméabilité du milieu drainant en considérant une pression d'infusion constante

- Ensuite, la différence entre la pression au point d'injection au temps t et la pression de vide doit être calculée (en Pa) à partir de la feuille Excel contenant les données de pression :

$$P(t) = |P_{abs} - P_{vide}|$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
67			Position interpolation	Elementary method	Interpolation method						Predictions	
68	Time	P	$x_{interpolated}$	$V = q/t$	K_{el}/t	I	$\sum x_i$	$\sum I_i$	a	K_{interp}	$x_{calculated}$	Error - %
69	(s)	(Pa)	(mm)	(mm/s)	(m ²)	(Pa.s)	(m)	(Pa.s)	(m/(Pa.s) ^{1/2})	(m ²)	(mm)	
70	0.0	4106	0.00									
71	0.1	5670	6.67	66.67	7.43E-09	4.89E+02	0.00667	4.89E+02	3.02E-04	4.31E-09	11.73	76%
72	0.2	6843	13.33	66.67	1.23E-08	1.11E+03	0.02000	1.60E+03	3.70E-04	6.48E-09	18.22	37%
73	0.3	7820	20.00	53.33	1.29E-08	1.85E+03	0.04000	3.45E+03	4.21E-04	8.40E-09	23.86	19%
74	0.4	8016	24.00	40.00	1.14E-08	2.64E+03	0.06400	6.09E+03	4.41E-04	9.22E-09	27.90	16%
75	0.5	9775	28.00	40.00	1.09E-08	3.53E+03	0.09200	9.62E+03	4.52E-04	9.69E-09	34.44	23%
76	0.6	11144	32.00	40.00	1.09E-08	4.57E+03	0.12400	1.42E+04	4.59E-04	9.98E-09	40.28	26%
77	0.7	12708	36.00	40.00	1.07E-08	5.77E+03	0.16000	2.00E+04	4.63E-04	1.02E-08	46.46	29%
78	0.8	14272	40.00	40.00	1.06E-08	7.12E+03	0.20000	2.71E+04	4.66E-04	1.03E-08	52.64	32%
79	0.9	15249	44.00	40.00	1.09E-08	8.59E+03	0.24400	3.57E+04	4.68E-04	1.04E-08	57.71	31%
80	1.0	17400	48.00	40.00	1.05E-08	1.02E+04	0.29200	4.59E+04	4.70E-04	1.05E-08	64.98	35%
81	1.1	19159	52.00	40.00	1.03E-08	1.21E+04	0.34400	5.79E+04	4.70E-04	1.05E-08	71.52	38%
82	1.2	20528	56.00	40.00	1.03E-08	1.40E+04	0.40000	7.20E+04	4.71E-04	1.05E-08	77.32	38%
83	1.3	21701	60.00	36.67	9.61E-09	1.61E+04	0.46000	8.81E+04	4.71E-04	1.05E-08	82.75	38%
84	1.4	22483	63.33	33.33	8.90E-09	1.84E+04	0.52333	1.06E+05	4.70E-04	1.05E-08	87.40	38%
85	1.5	24047	66.67	33.33	8.76E-09	2.07E+04	0.59000	1.27E+05	4.69E-04	1.04E-08	93.56	40%
86	1.6	24438	70.00	33.33	9.05E-09	2.31E+04	0.66000	1.50E+05	4.68E-04	1.04E-08	97.41	39%
87	1.7	24829	73.33	33.33	9.34E-09	2.56E+04	0.73333	1.76E+05	4.67E-04	1.03E-08	101.21	38%
88	1.8	24829	76.67	33.33	9.76E-09	2.81E+04	0.81000	2.04E+05	4.65E-04	1.03E-08	104.15	36%
89	1.9	26393	80.00	33.33	9.58E-09	3.06E+04	0.89000	2.35E+05	4.64E-04	1.02E-08	110.32	38%
90	2.0	27175	83.33	33.33	9.69E-09	3.33E+04	0.97333	2.68E+05	4.63E-04	1.02E-08	114.85	38%
91	2.1	27761	86.67	33.33	9.87E-09	3.60E+04	1.06000	3.04E+05	4.63E-04	1.01E-08	118.95	37%
92	2.2	28543	90.00	33.33	9.97E-09	3.89E+04	1.15000	3.43E+05	4.62E-04	1.01E-08	123.45	37%
93	2.3	28543	93.33	33.33	1.03E-08	4.17E+04	1.24333	3.84E+05	4.61E-04	1.01E-08	126.23	35%
94	2.4	27566	96.67	33.33	1.11E-08	4.45E+04	1.34000	4.29E+05	4.61E-04	1.01E-08	126.71	31%
95	2.5	27957	100.00	33.33	1.13E-08	4.73E+04	1.44000	4.76E+05	4.61E-04	1.01E-08	130.24	30%
96	2.6	29521	103.33	33.33	1.11E-08	5.02E+04	1.54333	5.26E+05	4.61E-04	1.01E-08	136.48	32%
97	2.7	30303	106.67	33.33	1.11E-08	5.32E+04	1.65000	5.80E+05	4.61E-04	1.01E-08	140.92	32%
228	15.8	42229	372.31	15.38	1.29E-08	5.59E+05	35.49538	3.95E+07	4.92E-04	1.15E-08	402.41	8%
229	15.9	42229	373.85	15.38	1.29E-08	5.63E+05	35.86923	4.01E+07	4.93E-04	1.15E-08	403.68	8%
230	16.0	42033	375.38	-1869.23	-1.58E-06	5.68E+05	36.24462	4.07E+07	4.93E-04	1.15E-08	404.01	8%
231	16.1	42033										

Figure E-7. Tableau de calcul des perméabilités flexibles du milieu drainant en considérant la différence de pression réelle

- Les autres colonnes se calculent alors automatiquement :
 - La colonne C contient, pour le pas de temps considéré, l'interpolation de la position à partir des temps de remplissage fournis par l'utilisateur.
 - La vitesse, la perméabilité élémentaire, l'interpolation I , les sommations des x_i et I_i , le coefficient a et la perméabilité interpolée sont calculés avec les équations présentées

précédemment. La seule différence est que la pression réelle est ici considérée dans l'interpolation.

iii. La position prédite et l'erreur sur la prédiction sont également calculées similairement.

– Les graphiques ci-dessous sont finalement générés automatiquement :

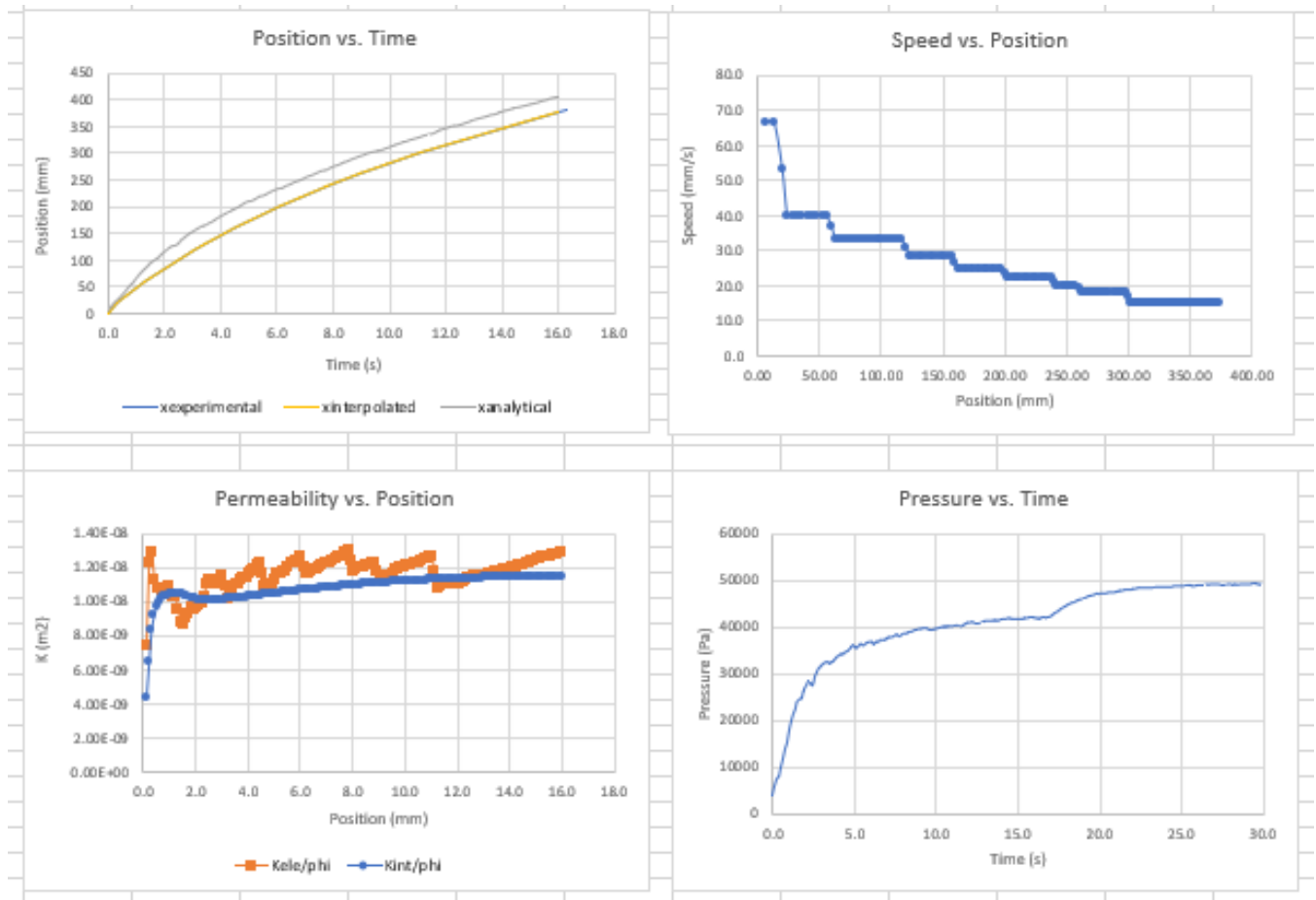


Figure E-8. Graphiques générés automatiquement lors du calcul de la perméabilité du milieu drainant en considérant la différence de pression réelle