

N° d'ordre : 2010 EMSE 0568

THÈSE

présentée par

Peng WANG

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École Nationale supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Mécanique et Ingénierie

Étude numérique et expérimentale de procédé d'élaboration des matériaux composites par infusion de résine

Soutenu à Saint Etienne, le 23 mars 2010

Membres du jury

Président :	Jean-Michel BERGHEAU	Professeur à l'ENISE
Rapporteurs :	Christian GEINDREAU	Professeur à l'Université Joseph Fourier
	Patrice HAMELIN	Professeur à l'Université Lyon 1
Directeur de thèse :	Alain VAUTRIN	Professeur à l'ENSM-SE
Co-directeurs de thèse :	Sylvain DRAPIER	Professeur à l'ENSM-SE
	Jérôme MOLIMARD	Maître-Assistant (HDR) à l'ENSM-SE
Invités éventuels :	Patrick DE LUCA	ESI Group
	Jean-Christophe MINNI	Hexcel Reinforcements – Les Avenières

for my family.

Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du département Mécanique et Procédés d'Elaboration (MPE) de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, sous la direction de Professeur Alain Vautrin, en codirection avec Professeur Sylvain Drapier et Maître assistant Jérôme Molimard.

Tout d'abord, mes premiers remerciements s'adressent à Monsieur Alain Vautrin. Il m'a accueilli au sein de son équipe et a dirigé ce travail. Ses compétences scientifiques et ses conseils m'ont permis de réaliser au mieux ces travaux de recherche.

Je remercie Monsieur Sylvain Drapier, qui a encadré mes travaux de recherche notamment pour la partie numérique. Ses compétences m'a permis d'améliorer mes connaissances en simulation numérique.

Je remercie également Monsieur Jérôme Molimard pour son assistance et son aide notamment au cours du travail expérimental. Ses compétences m'ont permis de développer et de réaliser mes protocoles expérimentaux.

Je remercie Monsieur Jean-Michel Bergheau, Professeur à ENI – Saint-Étienne, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse. Je remercie sincèrement Messieurs Christian GEINDREAU et Patrice HAMELIN, d'avoir accepté de juger ce travail et d'en être rapporteurs.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Eric Garrigou, technicien de notre laboratoire, merci pour ses aides et ses encouragements dans chaque expérimental au cours de ces trois années.

Je remercie vivement à tout le personnel de notre coopération industriel « HEXCEL corporation SAS », grand merci pour votre aide et votre soutien. Je remercie Monsieur Patrick Henrat, directeur de la R&D, pour son accueil et sa disponibilité. Je remercie Monsieur Jean-Christophe Minni, responsable du laboratoire, pour sa disponibilité, son accueil des essais expérimentaux et son aide précieuse au cours des essais. Un grand merci à Monsieur Thomas Zimmer, technicien du laboratoire, pour sa gentillesse et pour avoir consacré de son temps pour m'aider à réaliser tous mes essais du procédé par infusion de résine.

Je tiens à remercier à Messieurs Olivier Breui et Thierry Louvancourt pour avoir résolu mes problèmes informatiques. Je remercie Monsieur Joël Monatte pour sa disponibilité et son aide à l'essai mécanique. Je remercie également à Madame Bernadette Degache pour sa gentillesse, son accueil et les services rendus.

Je tiens à remercier à Marc, Guillaume, Julien, Vincent pour son aide des corrections des français sur mon rapport de la thèse.

Je n'oublie jamais d'adresser mes remerciements à tous mes collègues de laboratoire,

Woo-Suck, Pierre, Benoit, Mustafa, Pierre-Jacques, Laura, Gustavo, Christian, Romain, Nicolas, Olga, Quynh, Daniel, Yeanhee. Je leur souhaite une bonne continuation dans leurs travaux de recherche, leur vie professionnelle et personnelle.

Enfin, merci à mes familles pour leur soutien !

*Life is like riding a bicycle. To keep your balance you must keep
moving.*

*Try not to become a man of success, but rather try to become
a man of value.*

----- Albert Einstein

Résumé

En aéronautique, l'élaboration via des pré-imprégnés n'est pas toujours adaptées à la fabrication de nouvelles pièces de formes complexes ou de grandes dimensions. Des procédés directs existent, dénommés Liquid Composites Molding (LCM), tels que le Resin Transfer Moulding (RTM) ou les procédés d'infusion de résine, comme le Liquid Resin Infusion (LRI) et le Resin Film Infusion (RFI). Actuellement, environ 5 à 10% des pièces composites sont fabriqués par ces procédés directs. Avec le procédé RTM, les tolérances dimensionnelles et la porosité peuvent être maîtrisées et on peut atteindre des pièces haute qualité, mais son industrialisation est complexe et les modèles mécaniques doivent être améliorés pour réaliser des simulations représentatives. Par contre, les procédés d'infusion peuvent être utilisés dans des conditions plus flexibles, par exemple, dans des moules ouverts à sac vide en nylon ou silicone, à faible coût. Par conséquent, les procédés de LRI et RFI sont particulièrement adaptés pour les petites et moyennes entreprises car les investissements sont plus faibles par rapport à d'autres procédés de fabrication.

Les procédés par infusion de résine LRI ou RFI sont basés sur l'écoulement d'une résine liquide (pour RFI, après le cycle de température, la résine solide obtenir son état liquide) à travers l'épaisseur d'un renfort fibreux sec dénommé préforme. L'optimisation du procédé est difficile à réaliser car le volume de la préforme change fortement pendant le procédé car elle est soumise à une pression extérieure et qu'il n'y a pas de contre-moule. Pour optimiser les paramètres de fabrication des matériaux composites par infusion de résine, il est nécessaire de mettre en œuvre un modèle numérique. Récemment, une modélisation de l'écoulement d'un fluide isotherme dans un milieu poreux compressible a été développée par P. Celle [1]. Avec ce modèle numérique, nous avons simulé des cas test en 2D pour des géométries industrielles classiques. Pour valider ce modèle numérique, des essais d'infusion d'une plaque par le procédé LRI dans des conditions industrielles ont été réalisés. D'une part, la simulation numérique permet de calculer le temps de remplissage, l'épaisseur de la préforme et la masse de la résine durant l'infusion. D'autre part, nous avons suivi de procédé expérimentalement par des micro-thermocouples, la fibre optique et la projection de franges. Un des points clefs de l'approche expérimentale est que l'écoulement de la résine et le comportement de la préforme dépendent intrinsèquement de paramètres qui évoluent pendant l'infusion de la résine, tels que la variation de l'épaisseur, le temps de remplissage et le taux volumique de fibres, via la perméabilité. Enfin, une comparaison entre les résultats expérimentaux et la simulation numérique permet de valider le modèle numérique. Cette confrontation des résultats permettra de mettre en lumière les difficultés et les limites de ce modèle numérique, afin d'améliorer les futurs modèles. De plus, ces deux approches constituent un bon moyen d'étudier et d'approfondir nos connaissances sur les procédés d'infusion de résine, tout en développant un outil de simulation indispensable à la conception de pièces composites avancées.

Mots clés : LCM : Liquid Composites Molding, LRI : Liquid Resin Infusion, RFI : Resin Film Infusion, Suivi des procédés, Micro-thermocouple, Simulation numérique, Fibre optique, Projection de franges.

Abstract

Weight saving is still a key issue for aerospace industry. For instance 50% in weight of the B787 and A350 aircraft structures is made of CFRP, so it is necessary to make lighter thick and complex parts. Direct processes called Liquid Composite Molding (LCM), such as Resin Transfer Moulding (RTM) or Resin Infusion Process (LRI, RFI). At the present time, around 5 to 10% of the parts are manufactured by direct processes and the current trend is clearly to go ahead. In RTM process, the dimensional tolerances and porosity fraction can be kept under control and high quality parts produced, but its industrialisation is complex and refined models are still needed to perform simulations. On the contrary, the resin infusion process can be utilized in flexible conditions, such as in low cost open moulds with vacuum bags in nylon or silicone. This type of process only requires low resin pressure and the tooling is less expensive than RTM rigid moulds. Therefore LRI and RFI processes are particularly suitable for small and medium size companies because the investments are rather low compared to other manufacturing process.

Liquid Resin Infusion (LRI) processes are promising manufacturing routes to produce large, thick or complex structural parts. They are based on the resin flow induced across its thickness by pressure applied onto a preform / resin stacking. However, both thickness and fibre volume fraction of the final piece are not well controlled since they result from complex mechanisms which drive the transient mechanical equilibria leading to the final geometrical configuration. In order to optimize both design and manufacturing parameters, but also to monitor the LRI process, an isothermal numerical model has been developed by P. Celle [1], which describes the mechanical interaction between the deformations of the porous medium and the resin flow during infusion. With this numerical model, we have investigated the LRI process with classical industrial piece shapes. To validate the numerical model and to improve the knowledge of the LRI process, the researcher work details a comparison between numerical simulations and an experimental study of a plate infusion test carried out by LRI process under industrial conditions. From the numerical prediction, the filling time, the resin mass and the thickness of the preform can be determined. On another hand, the resin flow and the preform response can be monitored by micro-thermocouples, optical fibre sensor and fringe projection during the filling stage. One key issue of this research work is to highlight the major process parameters changes during the resin infusion stage, such as the preform and resin temperature, the variations of both thickness and fiber volume fraction of the preform. Moreover, these two approaches are both good ways to explore and improve our knowledge on the resin infusion processes, and finally, to develop simulation tools for the design of advanced composite parts.

Key-words : LCM: Liquid Composites Molding, LRI: Liquid Resin Infusion, RFI: Resin Film Infusion, Monitoring the process, Micro-thermocouple, Optical fibre sensor, Fringe projection, Numerical simulation.

摘要

随着现代航空制造业的发展,减轻飞行器的重量依旧是一个关键问题。新材料和新工艺的使用是解决这一难题最直接有效的途径。对于新材料而言,高性能的先进复合材料以其密度低,强度高等多种优良的物理特性得到了广泛的使用和长足的发展,例如在 B787 和 A350 的制造计划中将会有 50%-60%的部件使用高性能的碳纤维复合材料。对于复合材料制造工艺而言,为了适应现代制造业的发展,尤其是航空航天业的要求,复合材料部件趋于大尺寸,高厚度,几何形状复杂等特点。通常传统的预浸渍技术已经不是唯一最适合复合材料制造工艺的选择。先进复合材料的直接制造工艺技术被称作复合材料液态成型工艺(LCM: Liquid Composites Molding),现阶段常用到的此种工艺技术有树脂转移塑膜成型工艺(RTM: Resin Transfer Moulding)和树脂浸泡成型工艺(Resin Infusion Process),后者又包括液态树脂灌注成型工艺(LRI: Liquid Resin Infusion)和树脂膜渗透成型工艺(RFI: Resin Film Infusion)。目前为止,大约有 5% 到 10% 的复合材料部件是通过 LCM 工艺技术来完成,并且这一比率将会逐年不断地提高。

在树脂浸泡成型工艺(LRI/RFI)中,树脂以液态的形式沿着纤维铺层的厚度方向浸泡整个纤维床。浸泡工艺是一个极其复杂的物理过程。由于现阶段对这种新型工艺过程了解不多,特别是近期发展的液体树脂灌注成型工艺(LRI 工艺)。为了指导实际的制造工艺,优化制造方案和制造参数,并减少制造缺陷,开发和运用有效的液体树脂灌注成型工艺的数值仿真模型就显的非常必要。最近 P. Celle 等人利用有限元方法(FEM)开发出了一种有关树脂浸泡成型工艺的基础数值模型 [1, 16, 17]。利用这个数值模型,可以在 2 维空间下模拟 LRI 工艺灌注典型的工业部件这一过程。为了验证该仿真模型的可靠性,在实际工厂环境下利用 LRI 工艺灌注平板的实验已经被实现。通过仿真计算,我们可以得到在灌注工艺过程中的灌注时间,树脂灌注质量和纤维铺层的厚度。同时,可以利用微型热电偶,光纤传感器等实验技术通过监测树脂流动和纤维层特性变化来研究实际工艺的进行。最终,我们来对比仿真计算和实验分析的结果。这一比较将会在验证仿真数值模型的同时揭示出现存模拟计算中的困难和仿真模型中的不足,对今后提高和改善树脂浸泡成型工艺的数值模型起到了重要的作用。理论与实际相结合的通过实验及数值仿真计算两方面来研究复合材料树脂浸泡成型工艺的结果将会给未来新型航空航天复合材料制造工艺的研究带来良好的参考价值。

关键词: 复合材料液态成型工艺(LCM), 液体树脂灌注成型工艺(LRI), 树脂膜渗透工艺(RFI), 工艺控制, 微型热电偶, 光纤传感器, 数值仿真。

Notations

Liste des acronymes :

LCM	Liquid Composite Molding
RTM	Resin Transfer Moulding
VIP	Vacuum Infusion Processing
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
RFI	Resin Film Infusion
LRI	Liquid Resin Infusion
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Polymers
NCF	Nom Crimped Fabrics
NC2	Non Crimped New Concept
ALE	Arbitrary Lagrangian Eulerian
OFFM	Optic Full Field Method
TVF	Taux volumique de fibres
TVV	Taux volumique de vides
TC	Micro-thermocouple
FO	Fibre optique

Liste des symboles :

σ	Tenseur des contraintes de Cauchy ou des contraintes moyennes dans la préforme
\overline{D}	Tenseur des taux de déformation Eulérien
\overline{v}	Vitesse de Darcy
\overline{v}_r	Vitesse réelle ou vitesse de la résine dans la préforme
V^f	Vitesse moyenne du front dans un élément
p_r	Pression hydrostatique de la résine
p	Pression hydrostatique du fluide dans les pores
η	Viscosité dynamique du fluide
\overline{I}	Tenseur identité

$\overline{\overline{\sigma_{ef}}}$	Tenseur contraintes effectives dans les préformes
$\overline{f_v}$	Forces volumiques du système
\overline{g}	Accélération gravitationnelle
J	Jacobien de la transformation
$\overline{\overline{K}}$	Tenseur de perméabilité intrinsèque du milieu poreux ou de la préforme
$\overline{h_K}$	Constante de Kozeny
ϕ	Porosité du milieu ou de la préforme
s	Saturation
X_o	Coordonnées du matériau à l'instant initial dans le domaine initial
x	Coordonnées courantes du matériau dans le domaine spatial
χ	Coordonnées des particules matérielles dans le domaine de référence
R	Coefficient de réflexion entre deux milieux
n	Indice de réfraction
n_f	Indice de réfraction du cœur de la fibre optique
n_{ext}	Indice de réfraction du milieu extérieur
R_M	Réfractivité molaire d'un milieu liquide
I	Intensité réfléchi en bout de fibre optique
I_0	Intensité de la source
I_{li}	Une fonction périodique pour l'intensité de lumière
I_{obj}	Intensité de lumière sur un objet éclairé par une série de franges
A_t	Coefficient de transmission
B_f	Représente le bruit de fond du montage
φ	Une perturbation
$Z(x, y)$	Fonction du déplacement suivant l'épaisseur de la préforme
(i, j)	Coordonnées du pixel sur une zone correspondant à la procédure d'extraction
j	Cartes de franges
$w(k)$	Une fonction de la pondération bilinéaire
k	Un terme de la série de Fourier
p	Distance entre deux pics de lumière sur une surface plane
$n \cdot p$	Longueur analysée
ρ	Masse volumique du fluide
ρ_{rs}	Masse volumique de la résine RTM6 après la polymérisation
ρ_f	Masse volumique macroscopique des fibres

d_f	Diamètre moyen de la fibre
M	Masse molaire d'un milieu liquide
M_t	Masse totale de l'empilement de la préforme
M_f	Masse des fibres
M_r	Masse de la résine entrée dans la préforme
V_t	Volume totale de la préforme
V_a	Volume du vide
V_f	Volume des fibres
V_{rs}	Volume de la résine à l'état solide
L	Longueur de la plaque
W	Largeur de la plaque
h	Epaisseur initiale de la préforme
H	Epaisseur de la zone remplie
H_0	Epaisseur de la préforme
h^e	Hauteur d'un élément

Table des Matières

Table des figures	xxiii
Liste des tableaux	xxix
Introduction générale	1
Partie 1 : Contexte de l'étude.....	5
Chapitre 1 : Introduction	7
1.1 Les matériaux composites	8
1.1.1 Définition.....	8
1.1.2 Classement des composites	8
1.1.2.1 Matériaux de grande diffusion (GD).....	9
1.1.2.2 Matériaux hautes performances (HP).....	9
1.1.3 Avantages.....	9
1.1.4 Limites.....	10
1.2 Les constituants	11
1.2.1 La matrice	11
1.2.1.1 Les résines thermodurcissables	11
1.2.1.2 Les résines thermoplastiques.....	12
1.2.2 Les renforts	13
1.2.2.1 Les fibres de carbone.....	13
1.2.2.2 Les fibres de verre et aramides.....	13
1.2.2.3 Les différentes formes de renforcement.....	14
1.3 Les procédés de fabrication.....	15
1.3.1 Les procédé par voix sèche : les pré-imprégnés	15
1.3.2 Les procédés LCM (Liquid Composite Molding)	15
1.3.2.1 Le procédé d'injection RTM.....	16
1.3.2.2 Le procédé d'infusion de résine	16
1.3.2.3 Le procédé « Intermédiaires »	18
1.3.3 Bilan	18
1.4 Conclusion.....	19
Chapitre 2 : Essai d'infusion d'une plaque et objectif de l'étude	21
2.1 Introduction	22
2.2 Description du procédé LRI sous l'aspect industriel.....	22
2.2.1 Les montages de l'essai d'infusion de résine	22
2.2.2 Caractéristiques de la plaque infusée	23
2.2.2.1 La préforme	23

2.2.2.2	La résine	24
2.2.2.3	L'expérience	24
2.3	Problématique.....	27
2.4	Objectif de l'étude et méthodes adoptées.....	28
2.5	Démarche du travail	28
2.6	Conclusion.....	29
Partie 2	: Modélisation et simulation du procédé par infusion de résine	31
Chapitre 3	: Modèle d'écoulement de l'infusion de résine.....	33
3.1	Introduction	34
3.2	Logiciel PAM-RTMTM	34
3.2.1	Introduction.....	34
3.2.2	Exemple de la simulation du procédé RTM	35
3.3	Modélisation du procédé LRI/RFI.....	38
3.3.1	Echelle de la modélisation	38
3.3.2	Modélisation de la partie fluide	39
3.3.2.1	Hypothèses sur la résine.....	39
3.3.2.2	Écoulement de la résine dans une zone purement fluide.....	39
3.3.2.3	Écoulement de la résine dans la préforme	40
3.3.2.4	La perméabilité.....	41
3.3.2.5	Écoulement de la résine dans le drainant	42
3.3.3	Modélisation de la partie solide	43
3.3.3.1	Les équations de conservation.....	43
3.3.3.2	Le modèle de Terzaghi	43
3.4	Conclusion.....	43
Chapitre 4	: Simulation numérique du procédé d'infusion de résine.....	45
4.1	Introduction	46
4.2	Hypothèses	46
4.2.1	Hypothèses générales	46
4.2.2	Hypothèses sur l'écoulement de la résine	46
4.2.3	Hypothèse sur la condition thermo-chimique.....	48
4.3	Conditions aux limites	49
4.3.1	Condition simple.....	49
4.3.2	Condition industrielle.....	50
4.4	Propriétés du modèle	52
4.4.1	Description du modèle	52
4.4.2	Paramètres d'entrée et apport du modèle	53
4.5	Études numériques	53
4.5.1	Test de convergence	54
4.5.2	Test sur l'évolution de la viscosité et de la perméabilité de la préforme.....	54
4.5.3	Loi de comportement utilisée	57
4.5.4	Test sur l'évolution géométrique	59
4.5.5	Comparaisons entre les différentes conditions aux limites	61
4.6	Conclusion.....	63

Partie 3 : Approche expérimentale	65
Chapitre 5 : Mesure de la température dans différentes conditions expérimentales.....	67
5.1 Introduction.....	68
5.2 Principe	68
5.2.1 Les micro-thermocouples	68
5.2.2 Positionnement des micro-thermocouples.....	69
5.2.2.1 Etude du positionnement des capteurs in-situ dans la préforme	69
5.2.2.2 Positionnement des micro-thermocouples dans la préforme.....	70
5.2.2.3 Observations microscopiques.....	71
5.2.3 L'étalonnage des micro-thermocouples.....	72
5.3 Infusion de résine avec couvercle ouvert	73
5.3.1 Montage de l'essai	73
5.3.2 Evolution de la température pendant l'infusion de résine.....	74
5.3.2.1 Température de la résine d'entrée	74
5.3.2.2 Température suivant l'épaisseur de la préforme.....	75
5.3.2.3 Température dans le plan.....	76
5.4 Infusion de résine dans une étuve	77
5.4.1 Montage de l'essai	77
5.4.2 Evolution de la température pendant l'infusion de résine.....	78
5.4.2.1 Température d'entrée et de la sortie de la résine	78
5.4.2.2 Température suivant l'épaisseur de la préforme.....	79
5.4.2.3 Température dans le plan.....	80
5.5 Comparaison entre les deux conditions d'infusion de résine	81
5.6 Cuisson et refroidissement.....	82
5.7 Conclusion.....	85
Chapitre 6 : Suivi l'écoulement de résine pendant le procédé LRI	87
6.1 Introduction.....	88
6.2 Méthode utilisant des fibres optiques.....	88
6.2.1 Les fibres optiques	88
6.2.2 Capteur à fibre optique par réflexion de Fresnel	89
6.2.3 L'étalonnage.....	90
6.3 Montage de l'essai de détection du front de résine.....	91
6.4 Suivi du procédé LRI par micro-thermocouple et fibre optique	93
6.5 Détection du front de résine	94
6.5.1 Temps zéro de la phase de remplissage.....	94
6.5.2 Capteur de Fresnel	94
6.5.3 Micro-thermocouples	95
6.5.3.1 Suivant l'épaisseur de la préforme	95
6.5.3.2 Dans le plan.....	96
6.5.4 Bilan	98
6.6 Caractérisation du front de résine avec des micro-thermocouples distribués.....	98
6.6.1 Ecoulement de résine sur un plan dans le test couvercle fermé	99
6.6.2 Ecoulement de résine dans le test couvercle ouvert.....	100
6.6.3 Ecoulement de résine pour un essai dans une étuve	105
6.6.4 Discussion.....	108
6.7 Conclusion.....	109

Chapitre 7 : Suivi du procédé LRI par micro-thermocouples et projection de franges.....	111
7.1 Introduction	112
7.2 Méthode de projection de franges.....	112
7.3 Conditions expérimentales	114
7.3.1 Montage optique	114
7.3.2 La préforme et le positionnement des micro-thermocouples	115
7.4 Evolution de la température de la préforme pendant l'infusion de résine ...	116
7.5 Variation de l'épaisseur de la préforme au cours de remplissage.....	117
7.6 Corrélation des résultats expérimentaux.....	119
7.7 Conclusion.....	122
Partie 4 Comparaison expérience / simulation numérique pour un essai d'infusion de résine sous la condition réelle	123
Chapitre 8 : Analyse de la mise en œuvre du procédé LRI standard	125
8.1 Introduction	126
8.2 Caractéristique de la préforme sèche avant l'infusion de résine	126
8.2.1 Essai de compression transversale de la préforme.....	126
8.2.2 Compaction de la préforme sous un sac à vide.....	127
8.3 Infusion de la plaque sous conditions standards	127
8.3.1 Conditions d'infusion de résine	127
8.3.2 Montage expérimental.....	128
8.3.3 Calcul de la porosité initiale de la préforme.....	129
8.3.4 Caractéristique de l'écoulement de la résine pendant la phase de remplissage.....	129
8.3.4.1 Mesure de la température	129
8.3.4.2 Suivi de l'avancement du front de résine	132
8.3.4.3 Mesure de la masse de résine	132
8.4 Cuisson et refroidissement.....	134
8.5 Conclusion.....	134
Chapitre 9 : Comparaison expérience / simulation numérique pour le procédé d'infusion de résine	137
9.1 Introduction	138
9.2 Simulation numérique d'un essai de compression transversale	138
9.2.1 Loi de comportement de la préforme	138
9.2.2 Conditions aux limites.....	139
9.2.3 Simulation numérique	139
9.3 Simulation numérique de l'infusion d'une plaque par le procédé LRI	139
9.3.1 Hypothèses.....	139
9.3.2 Paramètres d'entrée.....	140
9.3.2.1 Préforme.....	140
9.3.2.2 Résine.....	140
9.3.3 Conditions aux limites.....	141
9.3.4 Résultats et comparaisons.....	142
9.3.4.1 Résultats numériques et comparaisons avec les résultats expérimentaux	142

9.3.4.2	Écoulement de la résine pendant la phase de remplissage	144
9.3.4.3	Masse de résine absorbée au cours de l'infusion.....	145
9.3.4.4	Épaisseur de la préforme	146
9.4	Discussions	147
9.4.1	Évolution d'épaisseur de la préforme	147
9.4.2	Évolution de la température.....	148
9.4.3	Évolution de la perméabilité de la préforme	150
9.5	Conclusion.....	155
 Conclusion générale		157
 Bibliographie		161
 Annexes.....		171
 Annexe 1 : Calcul analytique d'injection RTM pour le cas test 1.....		173
 Annexe 2 : Formulation ALE.....		175
 Annexe 3 : Combinaison loi de Hagen-Poiseuille et loi de Darcy		179
 Annexe 4: Calculer le taux du vide dans la pièce finale		181
 Annexe 5: Une comparaison de la détermination de perméabilité.....		183

Table des figures

Figure 1-1	Exemple d'utilisation des matériaux composites (GD)	9
Figure 1-2	Exemple d'utilisation des matériaux composites (HP)	9
Figure 1-3	Différentes formes de renforcement	15
Figure 1-4	Procédé d'injection RTM (Resin Transfer Moulding)	16
Figure 1-5	Principe du procédé RFI	17
Figure 1-6	Principe du procédé LRI	18
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>		
Figure 2-1	Montage d'infusion d'une plaque par procédé LRI classique	23
Figure 2-2	Schéma de préparation de l'empilement de la préforme	23
Figure 2-3	Tissu UD G1157 sèche	24
Figure 2-4	L'empilement de la préforme	24
Figure 2-5	Infusion d'une plaque par procédé LRI	25
Figure 2-6	Montage de la mesure d'épaisseur de la plaque finale	27
Figure 2-7	La plaque infusée par procédé LRI et mesures d'épaisseur en mm après démoulage	27
Figure 2-8	Démarche du travail	29
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>		
Figure 3-1	Géométrie utilisée pour le cas test 1	36
Figure 3-2	Front de résine et taux de remplissage à 10 secondes	37
Figure 3-3	Position du front de résine en fonction du temps de remplissage	38
Figure 3-4	Différentes zones modélisées pour le procédé	39
Figure 3-5	Expérience de Darcy	40
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>		
Figure 4-1	Hypothèse d'écoulement de la résine dans la modélisation du procédé LRI	47
Figure 4-2	Conditions aux limites pour les cas tests simulés dans PAM-RTM TM	47
Figure 4-3	Écoulement de la résine dans le premier cas test	48
Figure 4-4	Écoulement de la résine dans le deuxième cas test	48
Figure 4-5	Condition simple 1	49
Figure 4-6	Condition simple 2	50
Figure 4-7	Configuration standard du procédé LRI	50

Figure 4-8	Conditions aux limites pour l'infusion d'une plaque avec le procédé LRI standard	51
Figure 4-9	Configuration inversée du procédé LRI	51
Figure 4-10	Conditions aux limites pour l'infusion d'une plaque avec le procédé LRI inversé	52
Figure 4-11	Etapas de la simulation numérique	53
Figure 4-12	Test de convergence du calcul numérique	54
Figure 4-13	Evolution du temps de remplissage en fonction de la viscosité de la résine	56
Figure 4-14	Loi de comportement hypo-élastique et en compressibilité transverse de la préforme NC2	58
Figure 4-15	Evolution du temps de remplissage en fonction de l'épaisseur de la préforme initiale	60
Figure 4-16	Evolution d'épaisseur de la préforme après l'infusion de résine en fonction de la variation d'épaisseur de la préforme initiale	61
Figure 4-17	Evolution de la porosité et du temps de remplissage en fonction du degré de remplissage pour la configuration standard	63
Figure 4-18	Champs de vitesse et de pression de résine dans la préforme saturée à 70% pour la condition standard	63

Figure 5-1	Surface du défaut de la fibre optique posée dans le sens parallèle aux fibres carbonées dans un pli	69
Figure 5-2	Surface du défaut de la fibre optique posée dans le sens perpendiculaire aux fibres carbonées dans un pli	70
Figure 5-3	Positionnement des thermocouples dans la préforme	71
Figure 5-4	Observation microscopique du micro-thermocouple choisi dans nos essais	72
Figure 5-5	Courbe d'étalonnage d'un micro-thermocouple	73
Figure 5-6	Infusion d'une plaque par le procédé LRI avec couvercle ouvert	74
Figure 5-7	Empilement de la préforme et positions des micro-thermocouples	74
Figure 5-8	Température du micro-thermocouple placé dans le tuyau d'entrée du système d'infusion	75
Figure 5-9	Températures mesurées par les micro-thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme pendant l'infusion de résine avec couvercle ouvert	76
Figure 5-10	Températures mesurées par les micro-thermocouples placés dans le 46 ^{ème} pli de la préforme pendant l'infusion de résine avec couvercle ouvert	77
Figure 5-11	Infusion d'une plaque par le procédé LRI dans une étuve avec deux portes en verre	78
Figure 5-12	Température du micro-thermocouple placé dans le tuyau d'entrée et de la sortie de résine	79
Figure 5-13	Températures mesurées par les micro-thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme pendant l'infusion de résine dans une étuve	80

Figure 5-14	Températures mesurées par les micro-thermocouples placés dans le 46 ^{ème} pli de la préforme pendant l'infusion de résine dans une étuve	81
Figure 5-15	Les positionnements des micro-thermocouples dans le système d'infusion de résine par le procédé LRI dans une étuve	83
Figure 5-16	Suivi de la phase de la cuisson pendant le procédé LRI par des micro-thermocouples	84
Figure 5-17	Suivi de la phase de refroidissement pendant le procédé LRI par des micro-thermocouples	84

Figure 6-1	Fibre optique	89
Figure 6-2	Réflexion de la lumière en bout de fibre optique	89
Figure 6-3	Courbe d'étalonnage du capteur de Fresnel à fibre optique	90
Figure 6-4	Positionnement des capteurs dans le système d'infusion	92
Figure 6-5	Schéma du montage utilisant des micro-thermocouples et un capteur à fibre optique par réflexion de Fresnel	92
Figure 6-6	Signaux des capteurs situés au centre du plan médian de la préforme	93
Figure 6-7	Signal du micro-thermocouple placé dans le tuyau d'entrée du système d'infusion	94
Figure 6-8	Signal de la fibre optique et températures pendant l'infusion de résine	95
Figure 6-9	Températures mesurées par les micro-thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme	96
Figure 6-10	Températures mesurées par les micro-thermocouples placés sur le 46 ^{ème} pli de la préforme	98
Figure 6-11	Positionnement des thermocouples dans la préforme dans le test avec couvercle fermé	99
Figure 6-12	Evolution de la température des micro-thermocouples placés dans le plan médian en fonction du temps	100
Figure 6-13	Profil du front de résine dans un plan médian	100
Figure 6-14	Positions des thermocouples pour suivre le front de résine dans le test d'infusion avec le couvercle ouvert	101
Figure 6-15	Evolution de la température mesurée par les thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme dans le test couvercle ouvert	102
Figure 6-16	Position du front au cours du remplissage estimé par les micro-thermocouples placés dans l'épaisseur de la préforme pour le test avec un couvercle ouvert	103
Figure 6-17	Temps de remplissage en fonction de numéro du pli dans l'épaisseur de la préforme pour le test avec un couvercle ouvert	103
Figure 6-18	Evolution de la température mesurée par les thermocouples placés sur le pli 46 dans le test couvercle ouvert	104
Figure 6-19	Evolution de la température mesurée par les thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme pendant l'infusion de résine dans une étuve	105

Figure 6-20	Evolution de la température mesurée par les thermocouples placés dans le pli 46 pendant l'infusion de résine dans une étuve	106
Figure 6-21	Position du front au cours du remplissage estimé par les micro-thermocouples placés dans l'épaisseur de la préforme pour le test dans une étuve	107
Figure 6-22	Temps de remplissage en fonction de numéro du pli dans l'épaisseur de la préforme pour le test dans une étuve	107
Figure 6-23	Evolution de la masse de résine en fonction du temps de remplissage dans différentes conditions du procédé LRI	109

Figure 7-1	Principe de la méthode de projection de franges	112
Figure 7-2	Photo du dispositif de projection de franges installé devant le plateau chauffant	115
Figure 7-3	Positionnement des micro-thermocouples dans l'empilement de la préforme pour l'essai avec couvercle ouvert	116
Figure 7-4	Variation de la température des trois micro-thermocouples dans le test d'infusion de résine avec couvercle ouvert	117
Figure 7-5	Variation de l'épaisseur de l'empilement de la préforme en fonction du temps de remplissage mesurée pour 5 points choisis	118
Figure 7-6	Evolution de la température et de l'épaisseur de la préforme sur le pli 22 au voisinage de l'entrée de résine	120
Figure 7-7	Evolution de la température et de l'épaisseur de la préforme au centre du pli 22	121
Figure 7-8	Evolution de la température et de l'épaisseur de la préforme sur le pli 22 au voisinage de la sortie de résine	121
Figure 7-9	Estimation de la forme du front de résine dans la préforme et effet de « race-tracking »	122

Figure 8-1	Courbes d'un essai de compression transverse de la préforme	126
Figure 8-2	Mesure de l'épaisseur de la préforme sèche sous sac à vide avant infusion : machine à mesurer tridimensionnelle avec le dispositif de mise sous vide	127
Figure 8-3	Montage expérimental d'infusion de la plaque dans des conditions industrielles standards	128
Figure 8-4	Positionnements des micro-thermocouples dans les tuyaux d'entrée et de sortie de la résine et dans la préforme	129
Figure 8-5	Evolution de la température de résine d'entrée pendant la phase de remplissage obtenue par la centrale d'acquisition de la température	130
Figure 8-6	Evolution de la température de la résine entrée et sortie pendant la phase de remplissage mesurée en même temps que l'acquisition de masse de la résine	131
Figure 8-7	Evolution de la température de la préforme pendant l'infusion de la résine mesurée par les 4 micro-thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme	132
Figure 8-8	Masse de résine absorbée par le système d'infusion au cours de la phase du remplissage	133

Figure 8-9	Débit de résine au cours de l'infusion	134

Figure 9-1	Courbe de compression transverse sur les UD G1157 secs	138
Figure 9-2	Conditions aux limites pour l'essai de compression transversale	139
Figure 9-3	Viscosité isotherme de la résine HexFlow© RTM6	141
Figure 9-4	Conditions aux limites pour l'infusion d'une plaque dans des conditions standards	142
Figure 9-5	Position du front de résine en fonction du temps pour un essai d'infusion d'une plaque par le procédé LRI standard	145
Figure 9-6	Masse de résine absorbée au cours de remplissage calculée par la simulation numérique	146
Figure 9-7	Evolution d'épaisseur de la préforme et du taux volumique de fibres pendant le remplissage	147
Figure 9-8	Comparaison du front de résine au cours de remplissage mesuré par des micro-thermocouples dans 3 cas tests différents	150
Figure 9-9	Evolution de la perméabilité de la préforme au cours du remplissage calculée par la relation de Carman-Kozeny	151
Figure 9-10	Evolution de la position du front de résine calculée par deux modèles différents : Perméabilité constante et Perméabilité déterminée par la relation de Carman-Kozeny	153
Figure 9-11	Comparaison de la position du front de résine pour un essai d'infusion d'une plaque calculée par la relation de Carman-kozeny et la perméabilité de tissus UD G1157 mesurée	155

Liste des tableaux

Tableau 1-1	Comparaison de caractéristiques de matériaux composites et de métaux (Extrait des « Techniques de l'ingénieur » A7790)	10
Tableau 1-2	Principales caractéristiques des résines thermodurcissables les plus utilisées	12
Tableau 1-3	Comparaison de différentes fibres de renfort	14

Tableau 2-1	Informations de l'infusion d'une plaque par procédé LRI	26

Tableau 3-1	Différents paramètres dans le fichier d'entrée du logiciel <i>PAM-RTM</i> TM	35
Tableau 3-2	Paramètres utilisés pour la simulation numérique du cas test 1	36
Tableau 3-3	Résultats des calculs par E.F avec <i>PAM-RTM</i> TM pour le cas test 1	37

Tableau 4-1	Paramètres les plus importants en entrée dans la simulation numérique	53
Tableau 4-2	Evolution des paramètres de sortie en fonction de la viscosité	55
Tableau 4-3	Etudes de la variation de la perméabilité de la préforme	57
Tableau 4-4	Résultats des simulations numériques pour deux lois de comportement de la préforme	58
Tableau 4-5	Etude numérique sur l'évolution d'épaisseur du drainant	59
Tableau 4-6	Etude numérique sur l'évolution d'épaisseur de la préforme	60
Tableau 4-7	Comparaisons pour les deux types de conditions aux limites industrielles	62

Tableau 5-1	Mesure de la température par micro-thermocouple et PT100	73
Tableau 5-2	Comparaisons entre deux essais d'infusion de résine : sur plaque chauffante avec couvercle ouvert, et dans une étuve	82

Tableau 6-1	Etalonnage du capteur de Fresnel à fibre optique	90
Tableau 6-2	Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme	96
Tableau 6-3	Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples placés sur le 3 ^{ème} pli de la préforme	98
Tableau 6-4	Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples dans le test couvercle fermé	100
Tableau 6-5	Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples suivant l'épaisseur de la préforme dans le test couvercle ouvert	102

Tableau 6-6	Temps d'arrivé de résine mesuré entre chaque deux thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme dans le test couvercle ouvert	102
Tableau 6-7	Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples placés sur le pli 46 dans le test couvercle ouvert	104
Tableau 6-8	Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme pendant l'infusion de résine dans une étuve	105
Tableau 6-9	Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples placés dans le pli 46 pendant l'infusion de résine dans une étuve	106
Tableau 6-10	Temps d'arrivé de résine mesuré entre chaque deux thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme pendant l'infusion de résine dans une étuve	106
Tableau 6-11	Comparaison entre un essai d'infusion de résine sur la plaque chauffante avec couvercle fermé et un autre essai dans une étuve	108

Tableau 7-1	Temps d'apparition de la température minimum pour chaque thermocouple	117
Tableau 7-2	Temps correspondant au début du gonflement de la préforme observé dans 5 zones	119
Tableau 7-3	Comparaison du temps d'arrivée de la résine entre les micro-thermocouples et la méthode de projection de franges	122

Tableau 8-1	Temps d'apparition de la température minimale mesurée par les 4 thermocouples placés dans la préforme	132

Tableau 9-1	Résultats des essais de la compression et de la simulation numérique	139
Tableau 9-2	Paramètres d'entrée dans le modèle numérique pour la préforme	140
Tableau 9-3	Comparaison générale numérique/expérimentale pour un essai d'infusion d'une plaque avec 48 plis des tissus UD G1157	143
Tableau 9-4	Comparaison générale numérique/expérimentale pour un essai d'infusion d'une plaque avec 24 plis des tissus UD G1157	143
Tableau 9-5	Evolution de la position du front de résine calculée par la simulation numérique	144
Tableau 9-6	Evolution de la position du front de résine mesurée par les micro-thermocouples	144
Tableau 9-7	Comparaison des résultats expérimentaux pour deux essais d'infusion d'une plaque	148
Tableau 9-8	Comparaison des résultats numériques pour deux essais d'infusion d'une plaque	148
Tableau 9-9	Résultats des mesures du front de résine suivant l'épaisseur de la préforme dans 3 cas tests différents	149
Tableau 9-10	Résultats de la simulation numérique pour le test d'infusion d'une plaque avec 48 plis utilisant une perméabilité constante	152
Tableau 9-11	Evolution de la position du front de résine calculée par la simulation numérique en utilisant une perméabilité constante	152

Tableau 9-12	Résultats de la simulation numérique pour le test d'infusion d'une plaque avec 48 plis utilisant une perméabilité de tissus UD G1157 mesurée expérimentalement	154
Tableau 9-13	Comparaison de la simulation numérique pour un essai d'infusion d'une plaque utilisant la relation de Carman-kozeny et la perméabilité de tissus UD G1157	154

Introduction générale

Un matériau composite est formé d'au moins deux constituants se présentant sous des formes différentes ; les constituants sont distincts dans leurs caractéristiques physiques et chimiques. L'un d'entre eux, ayant pour fonction principale de résister aux sollicitations mécaniques, s'appelle « le renfort », l'autre ayant pour fonction principale de garantir les caractéristiques géométriques du produit, qui s'appelle « la matrice ». Les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau composite sont une combinaison des caractéristiques des constituants pris séparément. Un choix approprié des constituants permet d'optimiser certaines propriétés du composite. Un matériau composite est souvent anisotrope, c'est-à-dire que ses propriétés locales sont de nature tensorielle et dépendent de l'orientation du repère de projection. L'anisotropie peut être choisie en fonction de l'application visée.

Les matériaux composites à matrice organique et à fibres de carbone ou de verre trouvent de plus en plus d'applications dans la réalisation de pièces structurales de dimensions diverses dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, le spatial, les transports, la construction naval, le bâtiment, les installations d'éolienne... Car les propriétés mécaniques spécifiques des composites sont généralement supérieures à celles des pièces métalliques et leurs masses volumiques sont plus faibles. Les matériaux composites renforcés par les fibres de carbone sont surtout largement utilisés dans l'industrie aéronautique. Dans les programmes de B787 et A350, environ 50% des pièces sont fabriqués en CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymers) et cette tendance risque d'augmenter dans les années futures.

Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux composites sont fortement liées aux procédés d'élaboration utilisés. En aéronautique, les moulages pré-imprégnés ne sont pas toujours adaptés à la fabrication de nouvelles pièces plus complexes. Des procédés directs existent, dénommés Liquid Composites Molding (LCM), tels que le Resin Transfer Moulding (RTM) ou les procédés d'infusion de résine, comme le Liquid Resin Infusion (LRI) et le Resin Film Infusion (RFI). Actuellement, environ 5 à 10% des pièces composites sont fabriquées par ces procédés directs. Avec le procédé RTM, les tolérances dimensionnelles et la porosité peuvent être maîtrisées et nous pouvons atteindre une haute qualité de pièces, mais son industrialisation est complexe et les modèles mécaniques doivent être améliorés pour réaliser des simulations représentatives. Par contre, le procédé d'infusion peut être utilisé dans des conditions plus flexibles, par exemple, dans des moules ouverts à sac vide en nylon ou silicone à faible coût. Par conséquent, les procédés de LRI et RFI sont particulièrement adaptés pour les petites et moyennes entreprises car les investissements sont plus faibles par rapport à d'autres procédés de fabrication.

Les procédés par infusion de résine LRI ou RFI sont des procédés de fabrication particulièrement intéressants pour les pièces en composites de formes complexes ou de grandes dimensions. Ils sont basés sur l'écoulement d'une résine liquide à travers

l'épaisseur d'un renfort fibreux dénommé préforme. L'optimisation du procédé est difficile à réaliser car le volume de la préforme change fortement pendant le procédé du fait qu'elle est soumise à une pression extérieure et qu'il n'y a pas toujours de contre moule. Pour optimiser les paramètres de fabrication des matériaux composites par infusion de résine, il est nécessaire de mettre en œuvre un modèle numérique. Récemment, une modélisation de l'écoulement d'un fluide isotherme dans un milieu poreux compressible a été développée au laboratoire MPE dans le cadre d'une thèse de doctorat de l'École nationale supérieure des mines de Saint-Etienne [1], en liaison avec la société ESI Group. Dans les travaux précédents, P. CELLE a simulé des cas test en 2D pour des géométries industrielles classiques. Ainsi l'objet de ces travaux de recherche est de valider ce modèle numérique sur un cas simple. Nous avons choisi l'essai d'infusion d'une plaque par le procédé LRI dans des conditions industrielles. D'une part, la simulation numérique permet de calculer le temps de remplissage, l'épaisseur de la préforme et la masse de la résine durant l'infusion. D'autre part, nous avons suivi la phase de remplissage par des moyens expérimentaux, en utilisant des capteurs in-situ. Un des points clefs de l'approche expérimentale est que l'écoulement de la résine et le comportement de la préforme dépendent intrinsèquement de paramètres qui évoluent pendant l'infusion de la résine, tels que la variation de l'épaisseur, le temps de remplissage et le taux volumique de fibres, via la perméabilité. Enfin, une comparaison entre les résultats expérimentaux et la simulation numérique permet de valider le modèle numérique. Cette confrontation des résultats permettra de mettre en lumière les difficultés et les limites de ce modèle numérique, afin d'améliorer les futurs modèles. De plus, ces deux approches constituent un bon moyen d'étudier et d'approfondir nos connaissances sur les procédés d'infusion de résine, tout en développant un outil de simulation indispensable à la conception de pièces composites avancées.

La présentation de ces travaux de recherche est divisée en quatre parties :

- La première partie est consacrée à la présentation du cadre de l'étude. Après une introduction sur les matériaux composites et plusieurs types de renforts et de matrices, les différentes catégories de procédés de fabrication des matériaux composites sont décrites. Les procédés par infusion de résine LRI / RFI sont détaillés. La position de l'étude est enfin définie, les objectifs et la démarche sont exposés.
- Dans la deuxième partie, une modélisation et des simulations numériques des procédés par infusion de résine sont menées. Un premier chapitre est consacré aux présentations du modèle développé par P. CELLE. Au cours de ce chapitre, la modélisation d'écoulement de la résine et du comportement de la préforme est expliquée. Les outils permettant de réaliser la simulation numérique, comme *PAM-RTM*TM et la librairie *Pro-Flot*TM, sont aussi brièvement présentés. Dans le deuxième chapitre de cette partie, les hypothèses de calculs sont intégrées dans le modèle numérique. Ensuite, les conditions aux limites simples et celles représentant les conditions industrielles sont montrées. Finalement, une introduction des propriétés du modèle numérique et des études numériques est proposée. Les études numériques pour l'infusion d'une plaque par le procédé LRI nous permettent d'avoir un premier aspect du modèle, elles permettent aussi d'optimiser les paramètres importants (temps de remplissage, masse de résine absorbée, épaisseur de la préforme et taux volumique de fibres) du procédé d'infusion. Ces paramètres sont ensuite mesurés et contrôlés dans l'approche expérimentale, et sont utilisés enfin dans la comparaison et la validation des simulations numériques.

- La troisième partie concerne les études expérimentales et est décomposée en trois chapitres. Un premier chapitre est consacré à la présentation des mesures de la température dans la préforme avec des micro-thermocouples dans différentes conditions industrielles. Diverses conditions de fabrication nous permettent d'étudier différentes conditions thermiques. En revanche, le temps de remplissage est intimement lié aux conditions thermiques et certaines propriétés de la pièce finale peuvent être modifiées. Le deuxième chapitre concerne la détection du front de résine et le suivi de la phase de réticulation avec une fibre optique dans des conditions de fabrication standard chez l'industriel. Plus particulièrement, le capteur à fibre optique peut détecter un écoulement de résine dans la préforme pendant le remplissage et permet de valider la mise en œuvre de micro-thermocouples, comme une méthode indirecte permettant de caractériser le front de résine en conditions industrielles. Enfin, dans le troisième chapitre, nous présentons comment suivre le procédé LRI par micro-thermocouples et par projection de franges. L'évolution de l'épaisseur de la préforme est un paramètre intéressant; la méthode de projection de franges permet d'en effectuer la mesure. Cette information nous permet d'améliorer la connaissance sur l'écoulement de résine et valider des hypothèses fortes de calcul. Elle nous permet aussi de caractériser les mesures par micro-thermocouples.
- La dernière partie est consacrée à la comparaison entre l'expérience et la simulation numérique dans le cas d'un essai modèle. Un essai modèle d'écoulement est proposé dans un premier chapitre, il peut nous donner les paramètres utilisables dans les simulations numériques, comme la température de la résine et de la préforme qui peuvent être mesurées par les micro-thermocouples placés dans le système de l'infusion, la viscosité de la résine, la loi de comportement de la préforme et les conditions aux limites. De plus, ce modèle peut aussi nous donner les premières estimations de grandeurs expérimentales, comme le temps de remplissage, la masse de la résine, l'épaisseur de la préforme ou le taux volumique de fibre. Un deuxième chapitre présente les simulations numériques de l'écoulement et la comparaison avec le suivi du front de résine. Globalement, il y a une bonne corrélation entre les deux approches.

A la fin de ce manuscrit, une conclusion générale présente brièvement les points importants de ces travaux de recherche, notant les difficultés rencontrés et le bien fondé des hypothèses qui sous tendent le modèle numérique. De plus, quelques perspectives sont proposées pour la suite de ce travail.

Partie 1 : Contexte de l'étude

Chapitre 1 : Introduction

1.1 Les matériaux composites	8
1.1.1 Définition.....	8
1.1.2 Classement des composites	8
1.1.2.1 Matériaux de grande diffusion (GD).....	9
1.1.2.2 Matériaux hautes performances (HP).....	9
1.1.3 Avantages.....	9
1.1.4 Limites.....	10
1.2 Les constituants	11
1.2.1 La matrice	11
1.2.1.1 Les résines thermodurcissables	11
1.2.1.2 Les résines thermoplastiques.....	12
1.2.2 Les renforts	13
1.2.2.1 Les fibres de carbone.....	13
1.2.2.2 Les fibres de verre et aramides.....	13
1.2.2.3 Les différentes formes de renforcement.....	14
1.3 Les procédés de fabrication.....	15
1.3.1 Les procédés par voie sèche: les pré-imprégnés.....	15
1.3.2 Les procédés LCM (Liquid Composite Molding)	15
1.3.2.1 Le procédé d'injection RTM.....	16
1.3.2.2 Le procédé d'infusion de résine	16
1.3.2.3 Le procédé « Intermédiaires »	18
1.3.3 Bilan	18
1.4 Conclusion.....	19

1.1 Les matériaux composites

Les matériaux composites ne sont pas une nouveauté, depuis la fin du 19^{ème} siècle, ils sont employés dans la fabrication industrielle. De nos jours, ils sont très largement utilisés dans beaucoup de domaines car leur développement est rapide. Donc le 21^{ème} siècle va être le siècle des matériaux composites.

1.1.1 Définition

Un matériau composite est formé d'au moins deux constituants, se présentant sous des formes différentes. Les constituants ont des caractéristiques physiques et chimiques distincts. L'un d'entre eux ayant pour fonction principale de résister aux sollicitations mécaniques, s'appelle les renforts, l'autre ayant pour fonction principale de garantir les caractéristiques géométriques du produit, s'appelle la matrice. Généralement, les caractéristiques du matériau composite sont supérieures à la somme des caractéristiques des constituants pris séparément [1].

Pour le renfort, nous pourrions imaginer choisir de la fibre de carbone, de la fibre de verre, de la fibre d'aramide ou de combiner ces trois types de fibres entre eux [2]. Son orientation et sa répartition au sein du matériau composite dépendent de la sollicitation mécanique imposée à la pièce.

Au niveau de la matrice, elle est généralement de la résine thermodurcissable ou thermoplastique, dont les fonctions sont de réaliser et d'assurer la liaison avec les renforts et le transfert des sollicitations vers les renforts. Elle permet également de protéger ces renforts vis-à-vis des agents agressifs et de donner la forme à la pièce.

A ces deux composants principaux peuvent s'ajouter des adjuvants et des additifs d'origine organique (agent de démoulage, stabilisants...) ou minérale (charges, pigments...) afin de modifier certaines de ses caractéristiques. Par exemple, nous pouvons améliorer le comportement mécanique de la résine en ajoutant des charges. Celles-ci peuvent se présenter sous la forme de microbilles, de poudres métalliques ou de matériaux minéraux (quartz, silice, craie...). Nous pouvons également modifier le comportement de la résine en ajoutant des pigments afin de colorer la résine ou en ajoutant des agents anti-UV afin de retarder son vieillissement et donc la baisse de ses performances dans le temps. On peut souhaiter faciliter la mise en œuvre des matériaux composites. Dans ce cas, on peut ajouter à la résine un catalyseur pour démarrer l'opération de durcissement de la résine et un accélérateur pour moduler la vitesse de durcissement [2].

Au sein des matériaux composites, il existe souvent un troisième élément indésirable, la présence de trous ou de porosités. L'art du fabricant est de réduire la taille et le nombre de ces vides pour améliorer la qualité des pièces composites. D'une manière générale, les matériaux composites sont fortement anisotropes. C'est à dire que leurs propriétés mécaniques sont très différentes suivant la direction de sollicitation. En effet, ce point doit toujours être pris en compte par l'ingénieur pour concevoir un matériau qui colle au plus près avec les sollicitations physico-mécaniques qu'il devra supporter [4].

1.1.2 Classement des composites

Aujourd'hui, il existe un grand nombre de type de matériau composite, il est possible de définir les classements des composites par rapport à leurs applications. Globalement, on classe les matériaux composites en deux catégories selon leurs performances : matériaux de grande diffusion (GD) et matériaux hauts performances (HP).

1.1.2.1 Matériaux de grande diffusion (GD)

Les matériaux de grande diffusion représentent environ 95% des matériaux composites. Leurs caractéristiques mécaniques ou thermiques sont relativement faibles. Le taux volumique de renfort de ces composites avoisine 30%. Principalement, ils sont utilisés pour des raisons économiques et pour leur masse faible. Ce type de matériaux généralement à base de fibre de verre convient parfaitement aux grandes séries. Leurs principales applications se trouvent dans l'industrie des transports ainsi que les sports et les loisirs (figure 1-1).



Figure 1-1 Exemple d'utilisation des matériaux composites (GD) : Aston Martin V12

1.1.2.2 Matériaux hautes performances (HP)

Les matériaux hautes performances (HP) ont des caractéristiques mécaniques massives et / ou des caractéristiques thermiques supérieures à celles des alliages métalliques. Leurs propriétés dépendent des types de renfort et de matrice utilisés, de l'orientation des fibres ainsi que du taux volumique fibre. Les renforts sont plutôt des fibres longues et le taux volumique de fibre est supérieur à 50%. Ce type de matériau est principalement utilisé dans les industries aéronautiques (figure 1-2). Le coût de la fabrication des matériaux hautes performances est plus élevé que celui des matériaux de grande diffusion.



Figure 1-2 Exemple d'utilisation des matériaux composites (HP) : Airbus A380 et Vélo sport.

1.1.3 Avantages

Les matériaux composites renforcés par fibres ayant un comportement anisotrope, ils ont une bonne aptitude à moduler leurs caractéristiques. Comme nous l'avons indiqué, les propriétés des matériaux composites sont très différentes suivant la direction considérée. Cette faculté doit toujours être mise à profit par l'ingénieur pour concevoir un matériau adapté aux sollicitations physico-mécaniques qu'il devra supporter. Nous pouvons choisir l'orientation des renforts dans la direction que nous souhaitons. Un matériau composite n'existe pas sans sa fonction et vice versa.

Par ailleurs, les matériaux composites sont légers avec des masses volumiques

comprises entre 1 et 3,5 g/cm³. Cette propriété nous permet d'économiser beaucoup d'énergie, les matériaux composites jouent donc un rôle important dans les industries aéronautiques, spatiales et les transports en général. Aujourd'hui cet avantage est aussi exploité pour la conception de pales d'éoliennes.

Le tableau 1-1 présente les propriétés mécaniques de certain composites unidirectionnels avec un taux volumique fibre à environ 60% et alliages métalliques classiques. Ce tableau montre les différences des caractéristiques mécaniques spécifiques ou massiques, c'est-à-dire les performances mécaniques des matériaux rapportées à la masse ou à la masse volumique.

- Pour la résistance à la rupture massique en traction, les alliages métalliques classiques ont environ 20 km. Par contre la rupture spécifique des composites unidirectionnels dans le sens des fibres est nettement supérieure, elle est de trois à cinq fois supérieure à celles des métaux.

- Pour le module massique en traction des matériaux composites unidirectionnels dans le sens des fibres, qui varie de 2650 à 11800 km, mais celles des alliages métalliques classiques sont près de 2500 km.

Nous constatons cependant que, plus nous essayons de nous rapprocher de l'isotropie, moins la comparaison des propriétés mécaniques massiques des composites est avantageuse [5].

Tableau 1-1 Comparaison de caractéristiques de matériaux composites et de métaux (Extrait des « Techniques de l'ingénieur » A7790) [4]

Caractéristiques	Métaux		Composites à matrices organiques*		
	Acier 35 NCD 16	Alliage aluminium AU 4 SG	Carbone HR résine époxyde	Carbone HM résine époxyde	Verre R résine époxyde
Caractéristiques en traction :					
Résistance à la rupture R (MPa)	1850	500	1000-1300	1000	1800-2000
Module d'Young E (GPa)	200	72	130	200	53
Masse volumique ρ (g/cm ³)	7,9	2,8	1,5	1,7	2
Résistance à la rupture massique R / ρg (km)	24	18	65 à 85	60	90 à 100
Module d'Young massique E / ρg (km)	2500	2600	8700	11800	2650
Coefficient de dilatation linéique :					
Longitudinal (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	12	23	-0,2	-0,8	6
Transversal (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	12	23	35	35	31

* Composites unidirectionnels à 60% en volume de fibre

1.1.4 Limites

Pour les matériaux composites, le gain de masse se réduit à quelques dizaines de pourcent par rapport aux alliages métalliques. Cet avantage est très intéressant pour

1.1 Les matériaux composites

leurs applications surtout dans l'aéronautique, aérospatiale, énergie, transport, etc. Par contre, ils présentent généralement aussi certaines limitations, comme la mise en œuvre des matériaux composites, les problèmes de la stabilisation et de la liaison entre la pièce composite et une autre pièce composite ou métallique et les questions sur le recyclage et l'environnement.

La conception de pièces en matériaux composites implique l'ajustement de la direction des renforts selon plusieurs directions à cause de la complexité des pièces et des sollicitations mécaniques qu'elles subissent, mais les caractéristiques spécifiques des matériaux sont alors fortement diminuées. Par exemple, elles sont divisées par deux si nous avons deux directions perpendiculaires également renforcées. De plus, nous pouvons remarquer qu'il y a une faible résistance mécanique soit entre couches de renfort, soit entre interface de la fibre et de la matrice.

Par ailleurs, les matériaux composites sont hétérogènes, leurs deux principaux constituants, renfort et matrice, présentant des propriétés fonctionnelles (mécaniques, thermiques, hygroscopiques) très différentes. A cause de la qualité du procédé de fabrication, des problèmes d'homogénéité de la structure composite sont souvent rencontrés. La présence de zones sèches et de zones riches en résine est responsable d'une forte dégradation des propriétés mécaniques de la pièce finale. Les zones sèches peuvent augmenter l'absorption d'humidité [14] et diminuer de la résistance aux produits chimiques. Les zones riches en résine vont créer une grande différence de coefficient de dilatation thermique entre la zone riche en résine et la zone normale [15], par exemple, pour une résine époxyde, le coefficient de dilatation thermique est environ 550 fois plus élevé celui de la fibre carbone HR.

Enfin, la limitation de la température d'utilisation des matériaux composites HP ne doit pas être oubliée. Elle est imposée par la nature organique de la matrice.

1.2 Les constituants

1.2.1 La matrice

Comme nous l'avons expliqué précédemment, pour lier les fibres ensemble, on utilise des matrices qui se classent généralement en trois grandes catégories : les résines thermodurcissables, les résines thermoplastiques et les matrices métalliques [3]. Ici nous nous intéressons plus aux résines de synthèse comme matrice dans les matériaux composites : les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques. Leur structure moléculaire est différente, les liaisons entre les chaînes macromoléculaires étant linéaires dans les thermoplastiques et tridimensionnelles dans les thermodurcissables [2].

1.2.1.1 Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont actuellement les résines les plus utilisées dans l'industrie, elles sont employées pour les procédés LCM (Liquid Composite Molding). Généralement, leurs propriétés mécaniques et surtout thermomécaniques sont beaucoup plus élevées que celles des résines thermoplastiques. Au niveau des résines thermodurcissables, quand la résine est polymérisée, les chaînes macromoléculaires sont liées entre elles par des liaisons fortes de nature chimique qui ne peuvent être rompues par une action physique, par exemple : la chaleur et la pression. La propriété de ce type de résine est de passer de façon irréversible d'un état liquide à un état solide [3].

Les types de résine thermodurcissable sont principalement les résines polyesters, les

résines époxydes, les résines phénoliques et les résines polyimides. Les résines polyester sont généralement utilisées avec les fibres de verre, alors que les résines époxydes sont souvent utilisées avec les fibres de carbone dans l'industrie aéronautique. La résine phénolique n'est utilisée que lorsqu'il y a des exigences vis à vis de la tenue au feu. Il y a peu d'utilisation des résines polyimides car ce type de résine est très cher. Le tableau 1-2 montre les comparaisons des caractéristiques des résines thermodurcissables utilisées dans l'industrie.

Tableau 1-2 Principales caractéristiques des résines thermodurcissables les plus utilisées [2].

	Polyesters	Phénoliques	Epoxydes	Polyimides
Caractéristiques mécaniques	Moyennes	Faibles	Très bonnes	Excellentes
Tenue aux chocs	Très bonne	Très faible	Bonne	Très bonne
Tenue en fatigue	Faible	Faible	Moyenne	Bonne
Pouvoir adhésif	Moyen	Moyen	Très bon	Très bon
Température maxi d'utilisation	140°C	130°C	190°C	260°C
Tenue au feu	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
Retrait	Important	Faible	Très faible	Très faible
Durée de polymérisation	Courte	Courte	Longue	moyenne
Mise en œuvre	Très facile	Difficile	Facile	Difficile
Prix relatif	2	1	5	16

1.2.1.2 Les résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques sont encore peu utilisées comme matrices des matériaux composites structuraux. Dans le cas des résines thermoplastiques, les chaînes macromoléculaires sont liées entre elles par des liaisons faibles, de nature physique. Après la mise en forme, ces liaisons peuvent être rompues par une action physique (la chaleur). La propriété des résines thermoplastiques est de passer de façon réversible de l'état solide à l'état pâteux [3]. Actuellement, les résines thermoplastiques les plus utilisées dans l'industrie sont les résines polystyrènes, les résines polyamides, les téflons, les PVC,...

Les résines thermoplastiques présentent de nombreux avantages :

- Facile à mettre en œuvre car il n'y a pas besoin de réticulation,
- Temps de stockage illimité,
- Recyclage simple du matériau composite,
- Bonne résistance aux chocs pour les composites à matrice thermoplastique.

Mais ce type de résine présente certains inconvénients :

1.2 Les constituants

- Résiste mal aux agressions chimiques,
- Température maximale d'utilisation limitée ($\approx 100^\circ\text{C}$),
- Vieillissement mal connu et souvent plus rapide et plus dégradant que celui des thermdurcissables,
- Technologies de transformation actuellement peu nombreuses.

1.2.2 Les renforts

Comme nous l'avons déjà évoqué, les renforts se présentent le plus souvent sous la forme de fibres. Globalement, la caractéristique de ces fibres est d'être un produit unidirectionnel, c'est-à-dire un produit qui aura d'excellentes propriétés mécaniques dans sa direction longitudinale. Dans la pratique il y a un grand nombre de matériaux renforcés par les fibres de carbone, de verre, et d'aramide.

1.2.2.1 Les fibres de carbone

Les fibres de carbone sont les plus anciennes des fibres industrielles, elles sont obtenues par pyrolyse de fils de polyacronitrile (PAN). Suivant les conditions de fabrication, il existe toute une variété de fibres de carbone que nous pouvons classer selon trois types principaux :

- les fibres haute résistance (HR),
- les fibres à module intermédiaire (IM),
- les fibres à haut module (HM).

Les fibres HR et HM comprennent des qualités standards, plus anciennes et des qualités de très hautes performances, plus récemment apparues sur le marché. Les fibres de carbone sont très anisotropes du fait de leur méthode de fabrication. Leurs propriétés mécaniques transversales sont beaucoup plus faibles que les propriétés longitudinales. Ce sont des fibres conductrices, de masse volumique faible. Grâce aux très bonnes propriétés mécaniques et à un coefficient de dilatation très faible (négatif pour quelques types de fibre carbone, e.f : carbone T1000), nous les trouvons dans de nombreuses applications dans l'aéronautique, le spatial et les transports. Par contre, les fibres de carbone ont un mauvais comportement au choc et le prix de ce type de fibres reste relativement élevé.

1.2.2.2 Les fibres de verre et aramides

Les fibres de verre sont très utilisées dans les matériaux composites grande diffusion (GD). Leurs propriétés mécaniques restent plus faibles par rapport aux fibres de carbone, mais elles ont un excellent rapport entre les performances mécaniques et le prix. Dans chaque procédé, suivant les compositions chimiques, les différents types de verre dont les propriétés caractéristiques sont les suivantes :

- Verre E : usage général, bonnes propriétés électriques,
- Verre D : hautes propriétés diélectriques,
- Verre C : bonne résistance chimique ;
- Verre R ou S : haute résistance mécanique.

Les matériaux composites renforcés par fibre de verre ont de nombreuses applications. Ils sont notamment utilisés dans le bâtiment et le nautisme.

Les fibres d'aramide, dont la plus connue est le Kevlar (produite par la société Dupont de Nemours), sont des polyamides aromatiques. Elles ont une masse volumique très faible, de très bonnes caractéristiques spécifiques en traction et une bonne résistance au choc. Par contre, elles présentent une mauvaise tenue en compression, une forte reprise d'humidité et une forte sensibilité aux rayons ultraviolets. Une

comparaison combinant les caractéristiques mécaniques et thermiques de différentes fibres est présentée dans le tableau ci-dessous (tableau 1-3).

Tableau 1-3 Comparaison de différentes fibres de renfort [2].

Caractéristiques	Verre E	Verre R	Carbone HR	Carbone HM	Aramide
Traction longitudinale : Résistance à la rupture R (MPa) Module d'Young E (GPa)	3500 73	4500 85	3800 240	1600 400	3100 135
Tenue en compression	Moyenne	Moyenne	Bonne	Bonne	Mauvaise
Tenue aux chocs	Moyenne	Moyenne	Faible	Mauvaise	Excellente
Coefficient de dilatation (10^{-6} mm/mm/°C)	5	4	1	1	0
Température limite (°C)	200	250	2000	2000	120
Sensibilité à l'humidité	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Prix relatif	1	4	30	60	10

1.2.2.3 Les différentes formes de renforcement

La forme et la disposition des renforts sont importantes. Pour simplifier la manipulation des fibres, des semi-produits dans lesquels plusieurs milliers de fibres sont placées côte à côte avec des directions connues ont été mis au point. Les différentes formes de renforcement peuvent être réalisées à l'aide de différente configuration d'orientation de fibre (voir figure 1-3) :

- Les unidirectionnels (tissu UD)
- Les bidirectionnels (tissé, tressé, . . .)
- Les multi-axiaux (NCF : Non Crimped Fabrics, NC2 : Non Crimped New Concept, . . .)

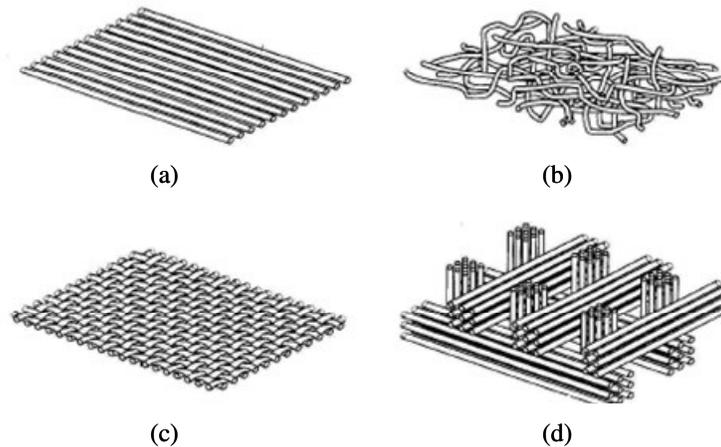


Figure 1-3 Différentes formes de renforcement : (a) nappe unidirectionnelle, (b) mat, (c) tissu, (d) tissu tridimensionnel orthogonal.

1.3 Les procédés de fabrication

Les matériaux composites présentant beaucoup d'avantage dans plusieurs domaines, les procédés de fabrication des matériaux composites sont devenus de plus en plus importants. Les procédés par voies humides ou pré-imprégnées sont des technologies indirectes qui existent depuis longtemps. Les propriétés mécaniques les plus élevées sont obtenues en utilisant ce type de la technologie, mais elle est coûteuse. Par contre, les technologies directes, les procédés par voies sèches ou LCM (Liquid Composite Molding) se sont développés depuis la fin des années 80, ils ont permis de réduire les coûts des installations du système et de la fabrication.

1.3.1 Les procédé par voix sèche : les pré-imprégnés

Les procédés reposant sur l'utilisation des pré-imprégnés (souvent appelés prépreg) sont des procédés de fabrication indirecte ou des semi-produits. Pour obtenir un matériau composite il va donc falloir assembler un renfort avec une matrice et donner la géométrie désirée à l'ensemble. Afin de faciliter la mise en forme il existe aussi dans les composites, comme dans les matériaux métalliques, des semi-produits.

Dans les procédés pré-imprégnés, les fils ou les tissus de carbone, de verre ou d'aramide ont été pré-imprégnés avec une résine thermodurcissable dont on aura freiné la réticulation par l'adjonction d'un solvant ainsi que par la conservation du semi-produit à basse température. Il suffira lors de la mise en forme de faire redémarrer la réticulation par chauffage afin d'obtenir le durcissement irréversible du composite.

Les procédés dits pré-imprégnés sont largement utilisés dans le domaine civil et militaire par exemple : le secteur aéronautique et les activités du sport et des loisirs. On peut obtenir des performances mécaniques de haut niveau par la technologie du pré-imprégné. Elle présente l'avantage de maîtriser facilement les propriétés de la pièce finale en particulier la fraction volumique de fibre, mais les coûts de stockage et de matière première sont très élevés.

1.3.2 Les procédés LCM (Liquid Composite Molding)

Pour les procédés de fabrication des matériaux composites, les procédés pré-imprégnés ne sont pas l'unique technique adaptée à la fabrication des pièces de grandes dimensions, épaisses, et de structure complexe. Aujourd'hui les procédés LCM

sont de plus en plus utilisés dans la fabrication des composites avancés dans plusieurs domaines. L'acronyme LCM représente plus d'une douzaine de différents types de procédé de fabrication [1].

Le principe de tous les procédés LCM est le même. D'abord, la résine est injectée et remplit l'empilement de la préforme, ensuite la résine est amenée de son état liquide à l'état solide par la réaction réticulation activée thermiquement. Différents types d'application du procédé LCM nous permettent d'avoir un plus grand nombre de taille et de forme des structures. Dans les procédés LCM, il y a deux grandes familles de procédé : les procédés d'injection et les procédés d'infusion. Nous allons présenter leurs principes particuliers, et en même temps introduire les avantages et les inconvénients pour les deux familles de procédé.

1.3.2.1 Le procédé d'injection RTM

Le procédé RTM (Resin Transfer Moulding) est apparu au début des années 90 [6,7]. Ce procédé consiste en l'injection de résine par un ou plusieurs points dans des préformes fibreuses maintenues entre deux moules rigides et fermés. Les points d'injection de la résine sont définis selon la taille et la complexité de la pièce. L'empilement de la préforme est préalablement disposé à l'intérieur du moule avant sa fermeture et son verrouillage. Les tolérances dimensionnelles et le taux volumique fibre peuvent être contrôlés. Le procédé RTM permet de produire des pièces composites de haute qualité.

La figure 1-4 décrit un chemin possible pour le procédé de fabrication par RTM. Les préformes sont placées dans un moule rigide, puis la résine est injectée sous pression ou débit contrôlé. Dès que les préformes sont remplies et la résine est sortie par l'évent, le cycle de température est imposé. Finalement, après la cuisson, la pièce finale peut être éjectée.

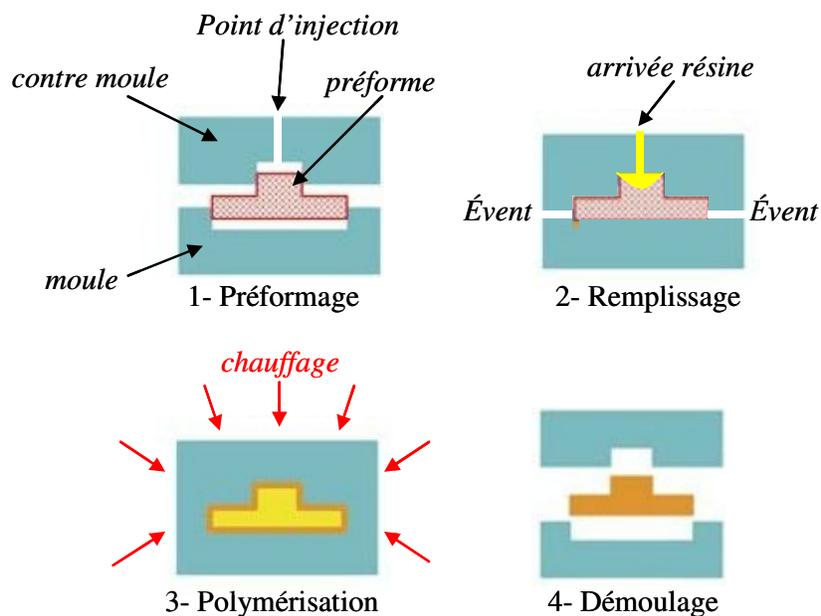


Figure 1-4 Procédé d'injection RTM (Resin Transfer Moulding).

1.3.2.2 Le procédé d'infusion de résine

Les procédés d'infusion de résine (VIP : Vacuum Infusion Processing) peuvent être

1.3 Les procédés de fabrication

utilisés dans des conditions flexibles, par exemple, dans des moules ouverts à sac vide en nylon ou silicone à faible coût. Ce type de procédé ne requiert que peu de pression de résine et l'outillage est donc moins cher que les moules rigides pour le procédé d'injection RTM. Les procédés par infusion de résine RFI (Resin Film Infusion) et LRI (Liquid Resin Infusion) sont des nouveaux procédés de fabrication particulièrement intéressants pour les pièces en composites complexes ou de grandes dimensions. Ils sont adaptés particulièrement pour les petites et moyennes entreprises car les investissements sont plus faibles par rapport à d'autres procédés de fabrications.

Les procédés RFI/LRI :

Le principe du procédé RFI est présenté sur la figure 1-5 [8-12]. Une couche de résine solide est placée en dessous de l'empilement de la préforme. Pour assurer une bonne finition de la surface supérieure de la pièce plane, une plaque d'aluminium est placée sur l'empilement fibre/résine. Un tissu de pompage est utilisé pour absorber les éventuels excès de résine. Enfin différents films en plastique anti-adhésifs permettent d'isoler le composite de l'appareillage et notamment le placer l'ensemble sur vide. Ensuite, avec l'application du cycle de température (autoclave ou table chauffante), la viscosité de la résine décroît. Cette baisse de la viscosité et l'action du cycle de pression (pompe à vide) permettent l'infusion de la résine à travers l'épaisseur de la préforme. Une phase de thermo-durcissement va être réalisée par le cycle de la température et de pression après le remplissage de la résine.

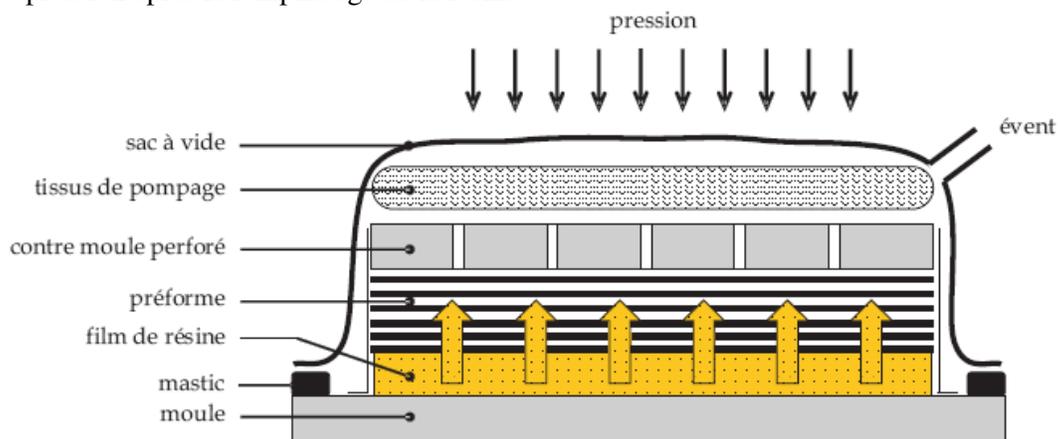


Figure 1-5 Principe du procédé RFI.

Le procédé LRI a été développé plus récemment [13]. Il consiste à utiliser un tissu drainant fortement perméable (voir figure 1-6). Ce drainant permet de réaliser une couche de résine au-dessus de la préforme. L'ensemble du système d'infusion est enfermé dans un sac à vide. Un contre moule perforé peut être utilisé pour améliorer la qualité de surface de la pièce finale. Le différentiel de pression entre l'arrivée de résine, située au niveau du drainant, et l'évènement, situé sur la base de la préforme, provoque l'infusion de la résine dans le drainant puis à travers l'épaisseur de la préforme sèche. Comme le procédé RFI, un cycle de température et de pression est appliqué pendant la phase de cuisson. Une fois la réticulation de la résine finie, après le refroidissement, la pièce composite est démoulée.

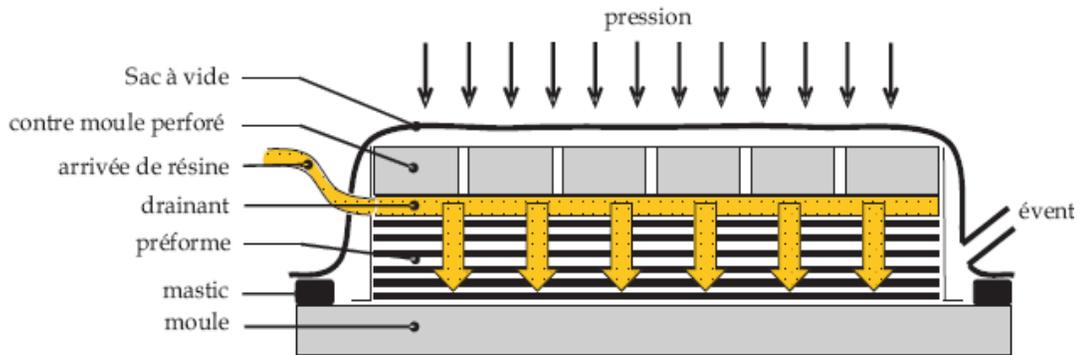


Figure 1-6 Principe du procédé LRI.

Avantages et inconvénients :

❖ *Avantages*

Le procédé d'infusion présente de nombreux avantages. D'abord, il est possible de fabriquer des pièces complexes et épaisses avec les bonnes propriétés mécaniques. Le taux volumique fibre standard des composites élaborés par des procédés d'infusion est de 55%, dans certaines conditions ce taux peut aller jusqu'à 60%. De plus, à cause de l'absence de moule sur la partie supérieure et de la réutilisation du moule inférieur, cette famille de procédé permet de produire des pièces composites avec un moindre coût.

❖ *Inconvénients*

Dans les procédés LRI et RFI, l'épaisseur et le taux volumique de fibre de la pièce finale ne sont pas complètement contrôlés car un sac à vide remplace un moule rigide, donc il y a des grandes variations du volume lorsque le vide ou la pression sont appliquées. De plus, la perméabilité transversale de la préforme joue un rôle important dans le procédé d'infusion mais celle-ci reste difficile à mesurer.

1.3.2.3 *Le procédé « Intermédiaires »*

Il y a des procédés qui reprennent certaines caractéristiques des procédés d'injection et des procédés d'infusion. Nous pouvons les appeler procédés d'*intermédiaires*, tels que le Vacuum Assisted RTM (VARTM) et RTM light. Ils consistent à utiliser une pression d'injection en entrée, et à la fois, une dépression motrice en sortie. Généralement nous utilisons ce procédé à basse pression, ce qui permet d'utiliser un moule semi-rigide. Ce type de procédé est adapté pour réduire les coûts, mais des modèles mécaniques tenant compte des déformations du moule sont nécessaires.

1.3.3 *Bilan*

Les procédés d'élaboration des matériaux composites sont divisés en deux grandes familles : les procédés par voies humides ou pré-impregnées et les procédés par voie sèche ou LCM. Les procédés LCM présentent de nombreux avantages et se sont développés très rapidement, surtout pour le procédé d'infusion RFI / LRI. C'est un procédé prometteur pour fabriquer les nouvelles pièces composites de grandes dimensions ou épaisseur et des structures complexes. Cependant, le procédé d'infusion RFI / LRI est encore difficile à maîtriser et à contrôler.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté généralement les matériaux composites et leurs procédés. Les matériaux composites, avec leurs bonnes propriétés mécaniques par rapport à leur masse sont utilisés de plus en plus dans de nombreux domaines. Les procédés de fabrication des matériaux composites lient fortement les propriétés mécaniques de la pièce composite finale, il est donc important de choisir le type du procédé de fabrication. Les nouveaux procédés d'infusion de résine RFI / LRI se sont développés rapidement et doivent être développés dans l'avenir à cause de leurs avantages industriels particulièrement intéressants. Ce type de procédé est basé sur l'écoulement de la résine liquide à travers l'épaisseur d'une préforme fibreuse dû à une dépression. Le volume de la préforme change fortement pendant le procédé du fait qu'elle est soumise à une pression de la part de l'extérieure et l'optimisation du procédé est difficile à réaliser. Donc une problématique globale est proposée : comment optimiser les paramètres de fabrication et maîtriser ces procédés ?

Pour connaître clairement et détailler nos problématiques de l'étude, dans le chapitre suivant, nous allons préciser les difficultés et la position de nos travaux de recherche basés sur une exploitation d'un essai infusion de résine réel. Une fois que nous aurons fixé notre objectif du travail, les méthodes adoptées et la démarche du travail seront exposées.

Chapitre 2 : Essai d'infusion d'une plaque et objectif de l'étude

2.1 Introduction	22
2.2 Description du procédé LRI sous l'aspect industrielle.....	22
2.2.1 Les montages du procédé LRI	22
2.2.2 Caractéristiques de la plaque infusée	23
2.2.2.1 La préforme	23
2.2.2.2 La résine	24
2.2.2.3 L'expérience	24
2.3 Problématique.....	27
2.4 Objectif de l'étude et méthodes adoptées.....	28
2.5 Démarche du travail	28
2.6 Conclusion.....	29

2.1 Introduction

La réduction de poids est toujours une question clé surtout pour l'industrie aérospatiale. Par exemple, pour l'instant, 50% des composants sont faits en Carbon Fibre Reinforced Polymers (CFRP) dans les structures d'aéronefs des B787 et A350. Pour atteindre un poids de 60% de composites hautes performances dans les prochains programmes d'avions, il est donc nécessaire de faire des pièces légères, épaisses et complexes, qui sont soumises à de sévères chargements mécaniques : le caisson central de voilure, des bielles, des nervures, des pièces de jonction.....

Comme nous l'avons déjà expliqué dans le premier chapitre, les procédés dits pré-imprégnés ne sont pas les seules techniques adaptées à la fabrication des nouvelles pièces de structure qui ont tendance à être plus épaisses et ont des formes plus complexes [101]. Des procédés directs existent qui sont appelés LCM, tels que RTM ou LRI / RFI, ils sont développés comme alternative aux procédés prepregs. Actuellement, environ 5 à 10% des pièces composites sont fabriqués par ces procédés directs, avec une tendance claire à l'augmentation. Nous savons que dans le procédé RTM, les tolérances dimensionnelles et la porosité peuvent être tenues sous contrôle et nous pouvons atteindre une haute qualité des pièces, mais son industrialisation est complexe et les modèles de fabrication sont aussi à améliorer. Par contre, le procédé d'infusion peut être utilisé dans des conditions flexibles.

La technique générale du procédé d'infusion a été présentée dans le chapitre précédent. Ici nous nous sommes tout particulièrement intéressés au déroulement de la fabrication industrielle de pièces composites avec les procédés d'infusion. Un essai complet d'infusion d'une plaque avec le procédé LRI réalisée dans un laboratoire du centre de recherche de HEXCEL corporation SAS France va être décrit.

2.2 Description du procédé LRI sous l'aspect industriel

2.2.1 Les montages de l'essai d'infusion de résine

Il est clair qu'il existe plusieurs façons de fabriquer une pièce en matériaux composites par le procédé LRI. Le schéma 2-1 montre le montage pour une manipulation standard d'infusion d'une plaque par procédé LRI. Tous les composants sont décrits sur cette figure. La préparation de l'empilement de la préforme avant infusion est présentée dans la figure 2-2.

La plaque métallique de la base sert de moule et transmet également la chaleur de la plaque chauffante. L'empilement de la préforme est posé entre deux films en nylon (peel-ply, fabriquer par Hexcel corporation, ref : BI9760) qui servent à faciliter le démoulage. L'empilement de la préforme est la superposition de plis unidirectionnels avec la séquence décidée. Au-dessus de l'empilement de la préforme, il y a un film plastique micro-perforé transparent, qui permet d'éviter les fuites de résine. Le tissu de drainant (flow media) est tout en haut. Il est en polyester et nous permet l'écoulement facile de la résine sur toute la surface supérieure de la pièce, avant son infusion dans l'épaisseur. Cette résine entre et sort par deux tuyaux souples « Ω » (appelés ainsi à cause de la forme). Il y a une petite bêche dans le tuyau « Ω » à la sortie de résine qui permet d'isoler la sortie et d'assurer de bien tirer le vide par le bas de la préforme, à l'opposé de l'injection. Des adhésifs sont mis tout autour de l'empilement de la préforme pour forcer la résine ne pouvoir pas sortir par les 4 côtés de la préforme, puis conduire la résine dans la bonne direction. De plus, à l'extérieur, il y a une bêche à vide qui permet de plaquer la préforme comme le ferait un moule.

2.2 Description du procédé LRI sous l'aspect industriel

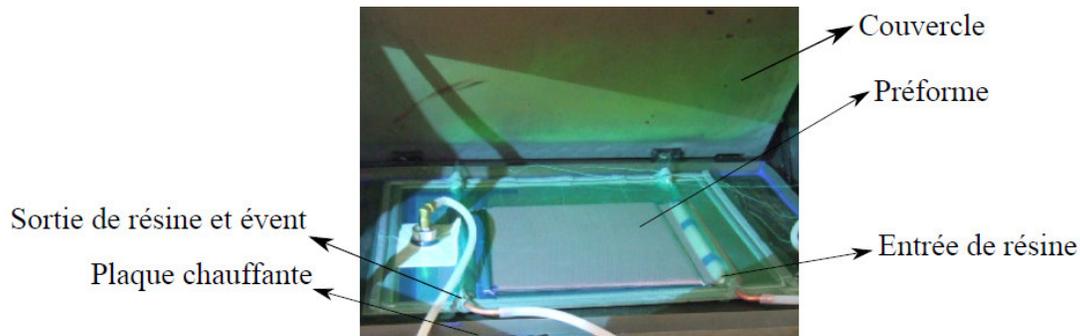


Figure 2-1 Montage d'infusion d'une plaque par procédé LRI classique.

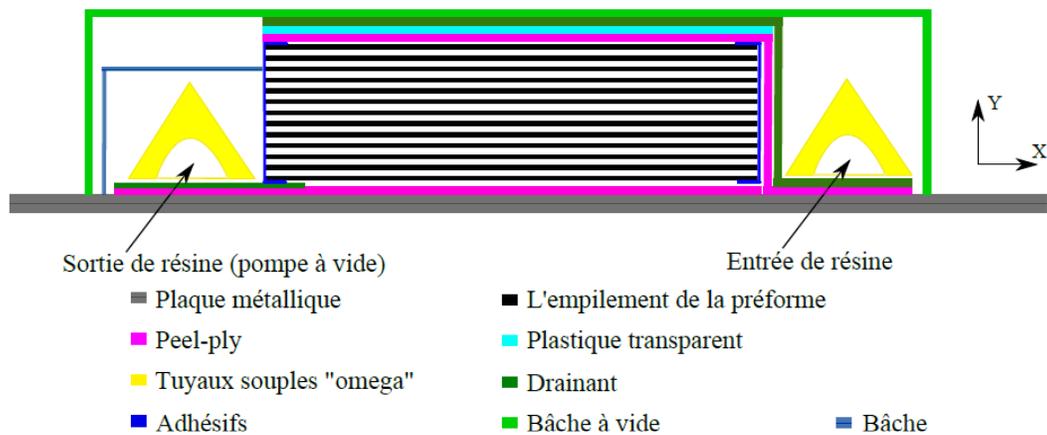


Figure 2-2 Schéma de préparation de l'empilement de la préforme.

2.2.2 Caractéristiques de la plaque infusée

2.2.2.1 La préforme

Nous avons réalisé une plaque à partir d'empilement de 24 plis de tissus carbone, d'un produit HEXCEL Corporation SAS. Le « tissu UD » (UD pour *Uni Directionnel*) de référence est G1157 E01 (voir figure 2-3). C'est un renfort tissé avec un très faible pourcentage de fibre verre dans le sens de la trame (96% de la masse dans la direction de la chaîne et de 4% de la masse dans la direction trame). La séquence d'empilement est croisée $[90_6/0_6]_s$ (voir figure 2-4), la plaque est donc équilibrée et symétrique d'une épaisseur d'environ 10 mm (condition libre, c'est à dire avant de la compression sous sac à vide). Les dimensions de la préforme choisie sont 335 mm × 335 mm × 10 mm.

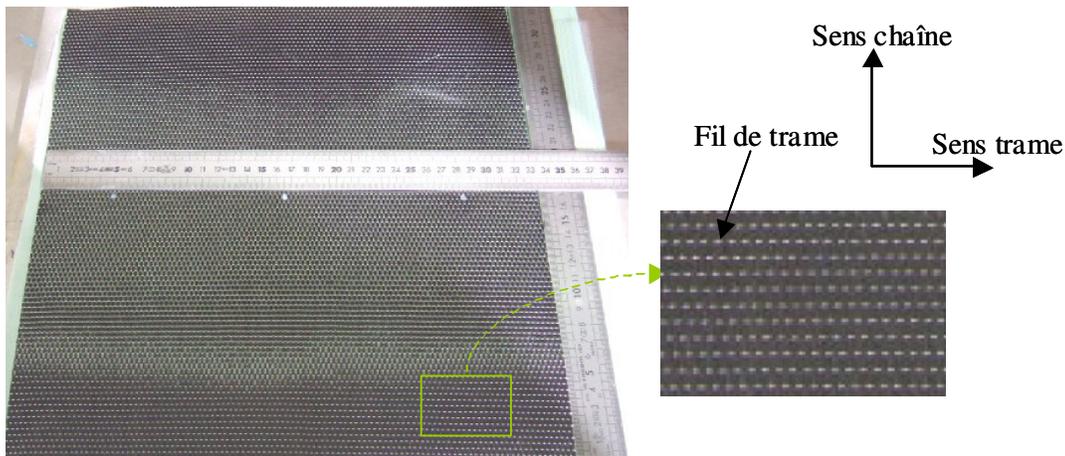


Figure 2-3 Tissu UD G1157 sèche.

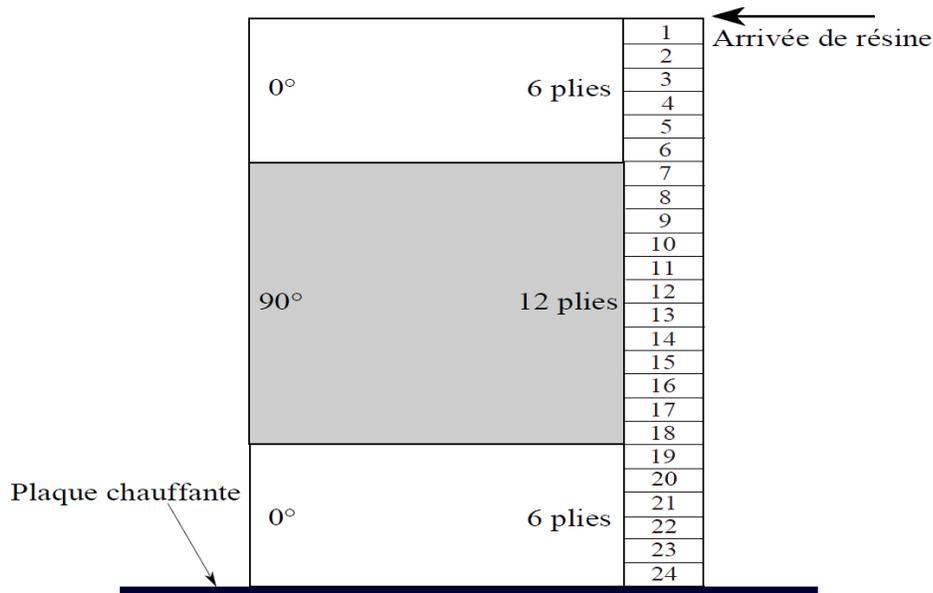


Figure 2-4 L'empilement de la préforme.

2.2.2.2 La résine

Nous avons utilisé une résine époxyde type HexFlow© RTM-6. La résine est conservée en dehors de la table chauffante dans un pot chauffant à 80°C.

2.2.2.3 L'expérience

Les photographies de la figure 2-5 montrent la progression de la résine dans le drainant pendant l'infusion d'une plaque par le procédé LRI. La pression imposée sur la surface de l'empilement de la préforme est uniforme et égale à la pression atmosphérique locale. L'arrivée et la sortie de la résine sont décrites aussi dans ces photographies. Le couvercle, bien visible dans figure 2-1, permet d'obtenir une température homogène dans la phase de remplissage et de cuisson. Dans les conditions classiques, le couvercle est fermé, la température pendant la phase de remplissage est

2.2 Description du procédé LRI sous l'aspect industriel

de 120°C et la température de cuisson est de 180°C, elle est maintenue pendant une durée d'environ une heure et demi.

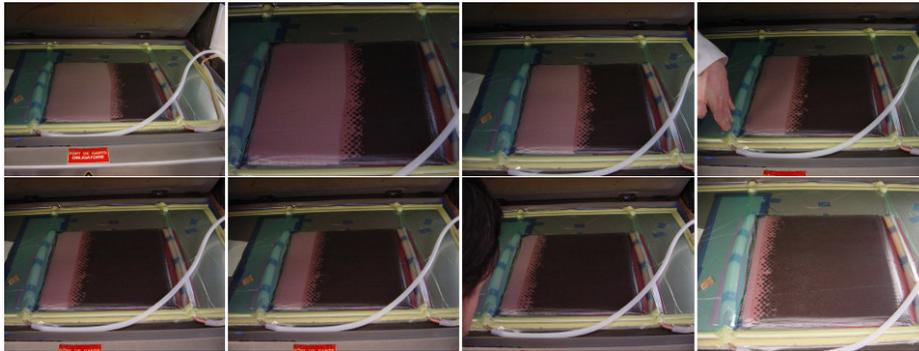


Figure 2-5 Infusion d'une plaque par procédé LRI.

L'essai réalisé montre une pression résiduelle de 1 mbar. Le front de résine dans le drainant peut être observé à l'échelle macroscopique. Ce front n'est pas homogène, cela peut avoir des origines diverses, telles qu'un champ de température hétérogène, la position de la résine d'entrée, les propriétés des préformes... Le procédé mis en place chez l'industriel nous permet d'acquérir la température de la résine, la température du tuyau d'entrée, la température de la plaque chauffante, la masse de résine, le temps de l'infusion et le niveau de vide dans le système d'infusion. Toutes les informations sur cet essai sont montrées dans le tableau 2-1.

Dans le tableau 2-1, on peut voir la valeur de la masse de résine absorbée. Nous avons pris en compte la masse de résine utilisée par tout le système d'infusion (drainant + préformes). Nous pouvons estimer également le temps de remplissage total, comme la différence des temps entre l'arrivée de la résine à l'entrée du tuyau d'infusion et à la sortie de la préforme. Enfin, pour l'épaisseur de la préforme finale, une fois les bords découpés, les dimensions de la plaque finale sont 321 mm × 318 mm, les épaisseurs de la plaque ont été mesurées en 25 points à l'aide de deux comparateurs (voir la figure 2-6). La plaque infusée et ses épaisseurs en mm ont été présentées sur la figure 2-7.

Tableau 2-1 Informations de l'infusion d'une plaque par procédé LRI.

Condition initiale		
	Masse de la préforme	780 g
	Epaisseur de la préforme	10 mm
Pendant l'infusion de résine		
	Température de la résine	80°C
	Température du tuyau d'entrée	90°C
	Température de la plaque chauffante	120°C
	Niveau du vide	1,4 mbar
Après infusion de résine		
	Masse de résine utilisée	375 g
	Temps de l'infusion	16 min
Pendant la cuisson		
	Température de la plaque chauffante	180°C
	Niveau du vide	300 mbar
	Temps de cuisson	1,5 h
Plaque finale		
	Epaisseur moyenne de la plaque	6,25 mm
	Taux volumique de fibre	60%

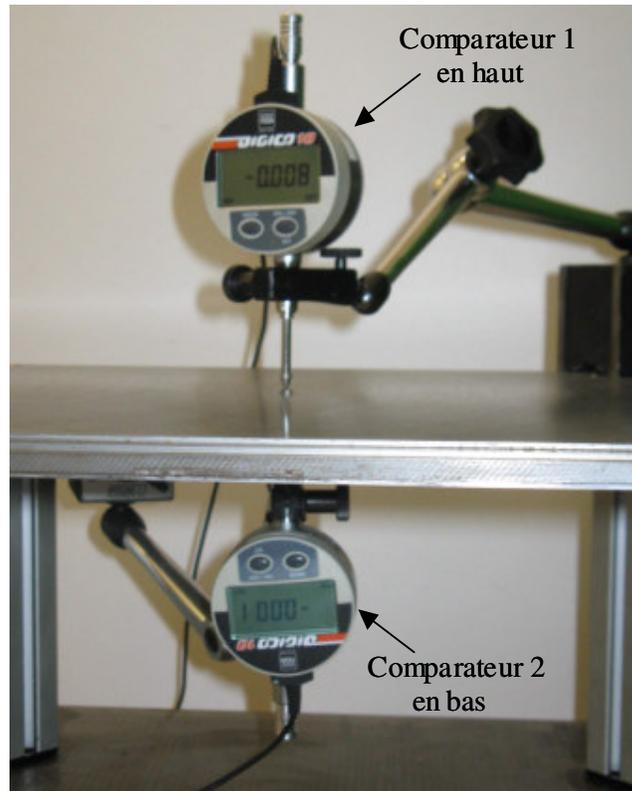


Figure 2-6 Montage de la mesure d'épaisseur de la plaque finale.

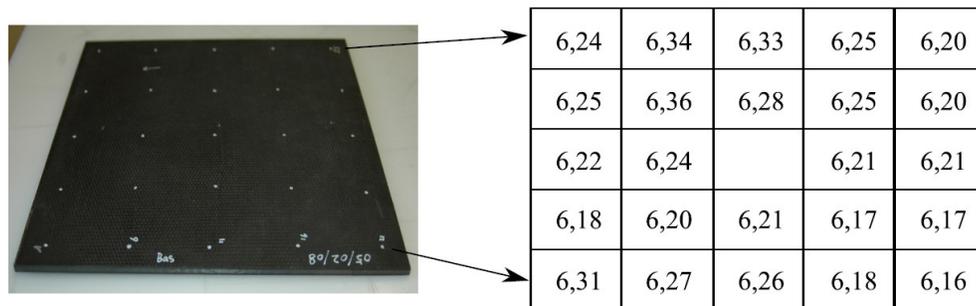


Figure 2-7 La plaque infusée par procédé LRI et mesures d'épaisseur en mm après démoulage.

On note que l'épaisseur de la plaque n'est pas uniforme. Ceci est dû au fait qu'il n'y a pas contre-moule et que la variation d'épaisseur de la préforme est très importante lorsque le vide est appliqué.

2.3 Problématique

Le procédé par infusion de résine LRI ou RFI est un nouveau procédé prometteur de fabrication de pièces complexes ou de grandes dimensions par écoulement de la résine liquide à travers l'épaisseur d'un renfort fibreux dénommé préforme.

Dans le procédé d'infusion, l'épaisseur et le taux volumique de fibres de la pièce finale ne sont pas complètement contrôlés car un sac à vide remplace un moule rigide, donc il peut y avoir de grandes variations de volume lorsque le vide ou la pression sont

appliqués. Pendant le procédé d'infusion LRI standard sous condition industrielle, une fois la résine injectée dans le système d'infusion, nous ne pouvons plus observer les informations sur ce procédé à cause du sac à vide imposé à l'extérieur de la préforme et du couvercle fermé. Donc ici nous avons plusieurs questions qui se posent : Comment améliorer notre compréhension sur ce procédé ? Comment optimiser les paramètres importants pour le procédé de fabrication d'infusion de résine ? Comment maîtriser ces paramètres importants pendant le procédé, et ensuite contrôler le procédé et la pièce composite ?

2.4 Objectif de l'étude et méthodes adoptées

En réponse à la problématique que nous avons posée dans le paragraphe précédent, tout d'abord, pour optimiser les paramètres importants de la conception et la fabrication, il est nécessaire de développer un modèle numérique apte à caractériser l'écoulement de résine et les comportements de la préforme au cours de la phase de l'infusion de résine. Récemment, un nouveau modèle numérique fondamental a été développé pour l'écoulement d'un fluide isotherme dans un milieu poreux compressible par Celle *et al.* [1, 16-18]. Ce modèle numérique peut simuler des cas test en 2D pour des géométries industrielles classiques. Pour valider le modèle et améliorer la compréhension et la maîtrise des paramètres de remplissage pendant le procédé LRI, une approche expérimentale est indispensable.

Des études bibliographiques indiquent qu'il est difficile de contrôler certains paramètres importants pendant le procédé d'infusion. Un des points clefs de l'approche expérimentale est que l'écoulement de la résine et le comportement de la préforme dépendent intrinsèquement de paramètres qui évoluent pendant l'infusion de la résine, tels que la variation de l'épaisseur, le temps de remplissage et le taux volumique de fibres, via la perméabilité. La simulation du procédé peut fournir les principaux éléments de compréhension de ces phénomènes. Par ailleurs, nous savons qu'à cause des conditions de fabrication, les méthodes de caractérisation habituelles ne peuvent pas servir pendant le procédé de l'infusion, il faudra que nous obtenions certaines informations à l'intérieur de la préforme pendant l'infusion. Ces informations seront essentiellement indirectes, et nécessiteront une interprétation. Enfin, l'instrumentation doit avoir le moins de perturbations possibles sur l'environnement de la fabrication.

Le modèle de Celle, complété par des conditions aux limites provenant des conditions industrielles et des lois de comportement de la préforme, va être adopté dans notre étude numérique. En parallèle des techniques non intrusives avec les capteurs *in-situ* vont être utilisées pour l'étude expérimentale. Finalement, une comparaison entre les résultats expérimentaux et la simulation numérique pour l'infusion d'une plaque par le procédé LRI permet de valider le modèle numérique. Cette confrontation des résultats permettra de mettre en lumière les difficultés et les limites de ce modèle numérique, afin d'améliorer les futurs modèles, mais aussi d'affiner une approche bipolaire expérimental-numérique, seule approche susceptible de fournir une description fine de ces procédés.

2.5 Démarche du travail

Dans le premier chapitre, ont été présentés les procédés d'infusion de résine (LRI/RFI) ainsi que leurs avantages. Dans le paragraphe précédent, ont été évoquées les difficultés liées à nos travaux de recherche. A partir de l'analyse des problématiques, nous avons choisi des méthodes et des objectifs de travail. Nous avons défini une

2.5 Démarche du travail

démarche et ciblé quatre paramètres d'élaboration qui paraissent pertinents pour optimiser la fabrication du procédé par infusion de résine :

- ❖ Le temps de remplissage,
- ❖ L'épaisseur de la préforme,
- ❖ Le taux volumique de fibres,
- ❖ La masse de résine absorbée.

La figure 2-8 présente la démarche suivie au cours de ce travail. Deux types d'essais vont être réalisés dans notre laboratoire et chez le partenaire industriel. Les essais de caractérisation et d'infusion de résine permettent de nous donner les paramètres expérimentaux nécessaires à la simulation numérique intégrant les conditions expérimentales. Comme nous l'avons expliqué précédemment, la sensibilité des études numériques nous permet de définir les quatre paramètres pertinents pendant les essais d'infusion, nous allons surtout étudier ces paramètres déjà définis. La comparaison entre la simulation numérique et expérimentale nous permettra de valider d'une part le choix des variables d'entrée et d'autre part de valider le modèle numérique. Le cas échéant, il nous faudra modifier le choix de nos conditions aux limites et identifier des lois de comportements appropriées.

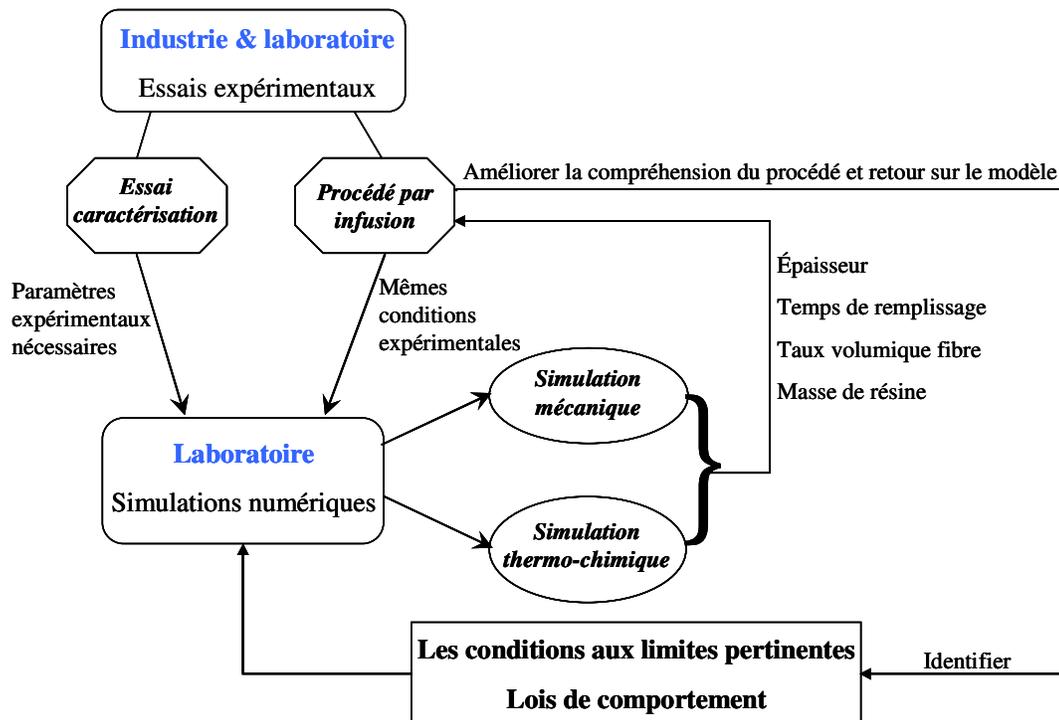


Figure 2-8 Démarche du travail.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué comment réaliser un essai d'infusion d'une plaque par le procédé d'infusion de résine chez le partenaire industriel. A partir d'un essai réalisé, nous avons constaté des difficultés pour contrôler les essais d'infusion. De plus, nous avons également décidé de l'objectif et de la démarche pour nos travaux de recherche. A partir des objectifs du travail, des études numérique et expérimentale ont été proposées. L'étude numérique permet d'optimiser les paramètres importants du

Chapitre 2 : Essai d'infusion d'une plaque et objectif de l'étude

procédé de fabrication. En parallèle, les études expérimentales pour l'infusion d'une plaque permettent d'améliorer la compréhension du procédé et de contrôler les paramètres importants déduits par des études numériques, afin de valider le modèle numérique. Donc avant de présenter la partie expérimentale, nous allons détailler la modélisation et la simulation du procédé par infusion de résine dans la partie suivante.

*Partie 2 : Modélisation et
simulation du procédé par
infusion de résine*

Chapitre 3 : Modèle d'écoulement de l'infusion de résine

3.1 Introduction	34
3.2 Logiciel PAM-RTMTM	34
3.2.1 Introduction.....	34
3.2.2 Exemple de la simulation du procédé RTM	35
3.3 Modélisation du procédé LRI/RFI	38
3.3.1 Echelle de la modélisation.....	38
3.3.2 Modélisation de la partie fluide	39
3.3.2.1 Hypothèses sur la résine.....	39
3.3.2.2 Ecoulement de la résine dans une zone purement fluide.....	39
3.3.2.3 Ecoulement de la résine dans la préforme	40
3.3.2.4 La perméabilité.....	41
3.3.2.5 Ecoulement de la résine dans le drainnt	42
3.3.3 Modélisation de la partie solide	43
3.3.3.1 Les équations de conservation.....	43
3.3.3.2 Le modèle de Terzaghi	43
3.4 Conclusion	43

3.1 Introduction

Dans l'objectif d'optimiser le procédé d'infusion, il est important de réaliser des simulations numériques. Ce chapitre présente brièvement le modèle numérique utilisé, développé par P. CELLE [1].

Dans le cadre de la modélisation du procédé par infusion de résine, les premiers modèles développés peuvent être trouvés par exemple dans les travaux de Loos et MacRae [19]. Ils ont développé un modèle analytique pour une analyse en deux dimensions du procédé RFI, qui prend en compte la porosité et la compaction du sac à vide, mais ils n'ont pas étudié l'action de la résine sur la déformation de la préforme. Jusqu'à présent, plusieurs modèles ont été développés pour l'écoulement de la résine dans les procédés LCM [20-27]. Nous savons que pour le procédé d'infusion, il est important de prendre en compte la déformation des nappes au cours de l'écoulement de la résine. De plus, il faut appliquer un couplage fort entre ces deux phénomènes physiques. Une étude sur cette interaction fluide et solide a été proposée par Ambrosi et Preziosi [28], qui ont proposé un modèle linéaire pour l'étude de l'injection unidirectionnelle d'une résine. Correia *et al* [29] ont donné une solution analytique pour le problème d'un écoulement d'un fluide incompressible traversant un milieu poreux compressible, et l'ont appliqué dans un procédé d'infusion. Récemment, de nombreux travaux de recherche ont été publiés concernant la modélisation et la simulation du procédé par infusion de la résine. Par exemple, les travaux de Ouahbi [30,31] et Govignon [32]. Globalement, les modèles que nous avons indiqués ici apportent quelques informations partielles mais ne sont de toute façon pas adaptés à l'intégration dans des solveurs sous des conditions industrielles basées sur la méthode des éléments finis.

Plus récemment, une modélisation fondamentale de l'écoulement d'un fluide isotherme dans un milieu poreux compressible a été développée par Celle, Drapier et Bergheau [1, 16-18]. Elle est basée sur l'écoulement d'une résine liquide, à travers l'épaisseur des renforts, induit par une pression appliquée sur un empilement de renforts et de résine liquide. Un couplage fort de la mécanique des fluides et de la mécanique des solides a été proposé dans ce modèle. L'implémentation de ce modèle a été effectuée dans le code de calcul par éléments finis *Pro-Flot*TM, et l'algorithme de remplissage du logiciel *PAM-RTM*TM est également utilisé. Dans les paragraphes suivants, nous allons surtout expliquer ce modèle numérique du procédé d'infusion avant de l'utiliser pour des applications.

3.2 Logiciel PAM-RTMTM

3.2.1 Introduction

Le logiciel, *PAM-RTM*TM choisi dans le cadre de cette modélisation est basé en grande partie sur librairie *Pro-Flot*TM. Cette librairie d'éléments est à la base du solveur *LCM-FLOT* développé à l'école Polytechnique de Montréal en 1998, un moteur de calcul par éléments finis développé en langage C⁺⁺ [33].

Le logiciel commercial *PAM-RTM*TM est développé et distribué par ESI group. Les informations du logiciel *PAM-RTM*TM ont été détaillées et représentées dans le tableau 3-1. Ce logiciel est spécialisé dans la simulation numérique des procédés par injection de type RTM (Resin Transfer Molding) isotherme ou non ainsi que les procédés de type VARTM (Vaccum Assisted Resin Transfer Molding). Il permet également de simuler la phase d'infusion dans le procédé VARI (Vaccum Assisted Resin Infusion). Il permet également d'effectuer des calculs de température et de degré de réticulation pour la

3.2 Logiciel PAM-RTM™

phase de cuisson [34]. Les fonctionnalités de ce logiciel sont diverses :

- ❖ Loi de Darcy (modéliser l'écoulement de la résine dans un milieu poreux),
- ❖ L'équation de chaleur (résoudre le problème de thermique),
- ❖ Modèle de Kamal Sourour (calcule le taux de réticulation).

PAM-RTM™ permet d'avoir en même temps :

- ❖ La visualisation de l'évolution de la température et du degré de réticulation,
- ❖ La visualisation du front fluide,
- ❖ L'optimisation des temps de cycle par ajustement des paramètres du procédé,
- ❖

Tableau 3-1 Différents paramètres dans le fichier d'entrée du logiciel *PAM-RTM™* [35].

General parameters	
Mesh file name and location	
Type of simulation	RTM, heated RTM, VARTM, VARI
Output file style	I-deas universal file format
Temperature	Mould, fibres
Degree of conversion polymerization	
Output file selection	Filling, pressure, velocity
Material description: resin	
Viscosity of the resin	Constant, function of time or function of degree of conversion and temperature
Kinetics of the resin	Description of degree of conversion (polymerization)
Material description: reinforcement	
Permeability of the fabric	Values in three directions
Thickness of the fabric	
Temperature of the reinforcement	
Material description: mould	
Temperature of the mould	
Zone information	
Name of the zone	
Name of the reinforcement material	Selected from the list of reinforcement materials
Thickness of the zone	
Porosity of the zone	
Group information	
Type of boundary condition	Pressure, flow rate or vent
Value for the boundary condition	Constant, function of time
State of the boundary condition	Allow to enable or disable a boundary condition as function of time
Sensor information	
Sensor location	Information as function of time for a certain node in the finite element model

3.2.2 Exemple de la simulation du procédé RTM

Dans un premier temps, nous voulons montrer une application sur le procédé

d'injection RTM. La géométrie, et donc la porosité sont fixes et le restent durant l'injection.

Ici nous proposons un cas simple, les conditions aux limites et la géométrie sont présentées dans la figure 3-1. La résine est injectée par la face inférieure (notée 1) à une pression d'injection de 10^5 Pa. La face supérieure (notée 2) est un événement pour aider l'injection. La perméabilité de la préforme est supposée isotrope et constante pendant l'injection de la résine, égale à $K=10^{-9}$ m². La composante horizontale de la vitesse de la résine est nulle au niveau de faces latérales car il faut que la résine ne puisse pas sortir à l'extérieur. Les paramètres utilisés dans la simulation numérique sous *PAM-RTM*TM sont présentés dans le tableau ci-dessous:

Tableau 3-2 Paramètres utilisés pour la simulation numérique du cas test 1.

Pression d'injection (Pa)	Pression sur l'évent (Pa)	Perméabilité (m ²)	Porosité	Viscosité du fluide (Pa.s)	Epaisseur de la préforme (m)
10^5	0	10^{-9}	0,5	0,1	0,005

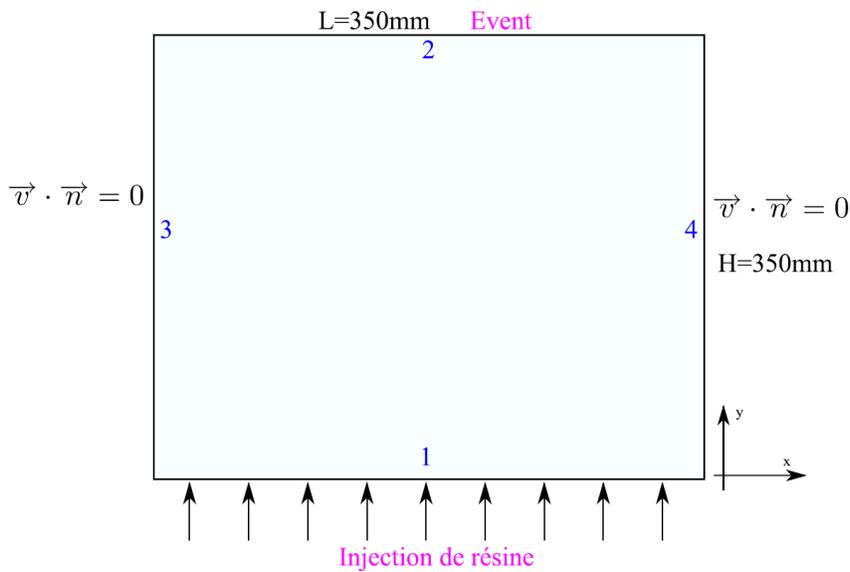


Figure 3-1 Géométrie utilisée pour le cas test 1.

Les résultats des calculs par éléments finis avec *PAM-RTM*TM sont présentés dans le tableau 3-3 en fonction du nombre d'élément. De plus, dans la figure 3-2, le front de résine homogène et unidirectionnel est attendu. La zone sèche et la zone saturée sont séparées par une zone transitoire. Dans la zone transitoire, le taux de remplissage peut également être observé.

Tableau 3-3 Résultats des calculs par E.F avec PAM-RTM™ pour le cas test 1.

Numéro de calcul	Nombre d'éléments	Temps de remplissage	Volume de résine injectée
1	112	27,6 secs	$2,89 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$
2	320	29,3 secs	$2,99 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$
3	626	29,9 secs	$3,02 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$
4	2500	30,1 secs	$3,04 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$
5	10086	30,4 secs	$3,07 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$

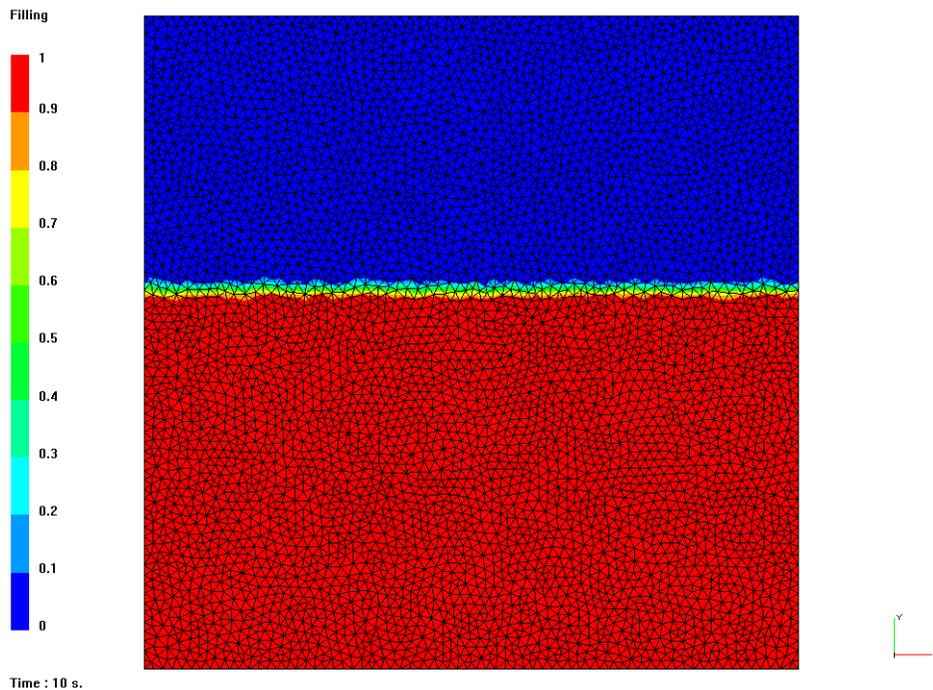


Figure 3-2 Front de résine et taux de remplissage à 10 secondes.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, PAM-RTM™ utilise la loi de Darcy pour résoudre l'écoulement du fluide dans un milieu poreux. Nous préférons donc utiliser aussi la relation de Darcy et faire des calculs analytiques à l'échelle macroscopique des matériaux composites (*pour ce cas test 1, les calculs détaillés sont dans l'annexe 1*). La résolution analytique de la relation de Darcy donne un temps de remplissage égal à 30,6 secs et un volume de résine injectée égal à $3,06 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$. La position du front de résine en fonction du temps de remplissage (figure 3-3), nous permettons de vérifier que si nous utilisons un nombre suffisant d'éléments, à partir 2500, les résultats numériques obtenus indiquent une parfaite corrélation avec les résultats analytiques. Nous observons également, comme c'est classique pour une injection à pression constante, que la pente de cette courbe diminue par rapport au temps de remplissage.

Nous avons donc présenté le logiciel PAM-RTM™ et ses fonctionnalités par un exemple simple. Une comparaison avec les calculs analytiques a permis de valider la simulation numérique sous PAM-RTM™. Maintenant, nous allons présenter le modèle

numérique du procédé d'infusion de résine, qui a été implémenté à partir de la librairie *Pro-Flot*TM.

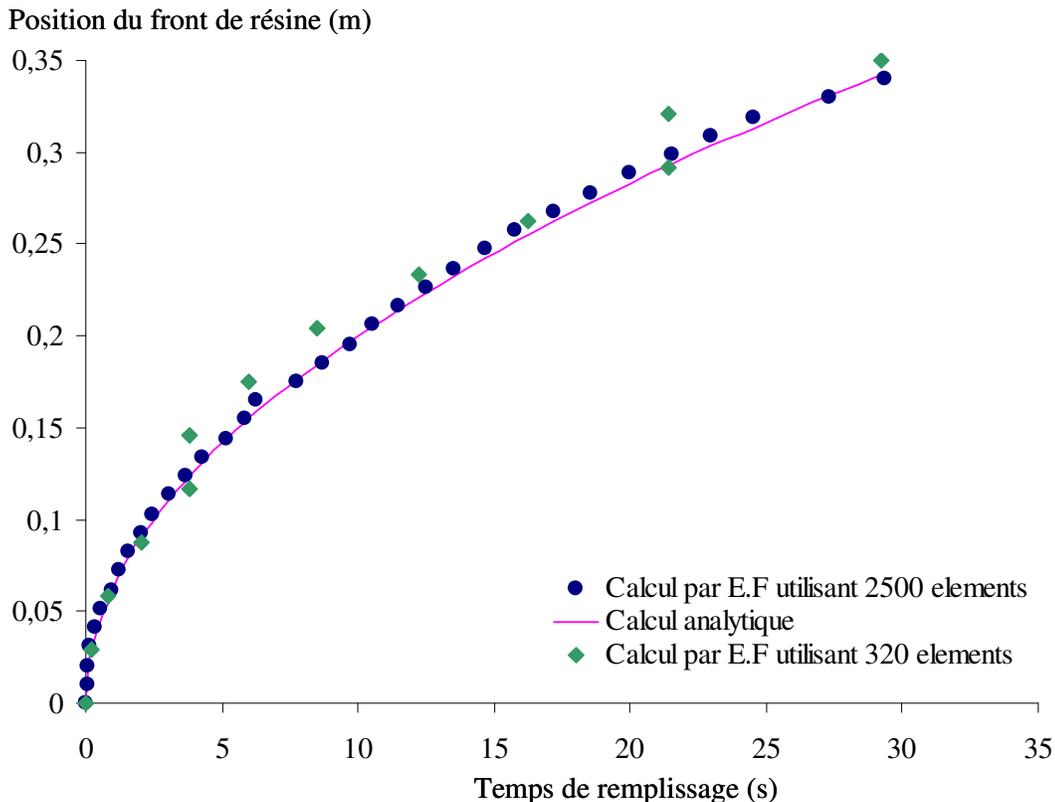


Figure 3-3 Position du front de résine en fonction du temps de remplissage.

3.3 Modélisation du procédé LRI/RFI

La modélisation du procédé d'infusion de résine est basée sur les travaux de recherche de P. CELLE [1]. Une modélisation macroscopique a été choisie. Ce modèle a été découpé en 3 zones différentes par des frontières mobiles, qui sont une zone purement fluide pour le drainant, et une zone sèche et humide pour la préforme. Nous allons maintenant présenter les différentes lois effectuées dans chacune de ces zones.

3.3.1 Echelle de la modélisation

Nous savons que les matériaux composites étant constitués d'un mélange d'au moins deux matériaux : les renforts et la matrice, sont des matériaux hétérogènes. Nous allons donc décrire le modèle macroscopique de comportement mis en place pour les deux constituants (la résine et la préforme) dans les 3 différentes zones séparées par des frontières mobiles (voir figure 3-4) avant d'engager une discussion sur les conditions aux limites et les conditions de continuité au niveau des interfaces. La modélisation macroscopique est une description globale du comportement du mélange des fibres et de la résine. Elle est plus simple à gérer en termes de temps de calcul. Dans ce cas, nous pouvons réaliser un découpage en deux parties : la partie fluide et la partie solide. La description des modèles nécessite d'associer des lois physiques. Les lois physiques associées aux procédés de transformation des composites organiques sont des équations de transport qui sont la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et la conservation de l'énergie [36].

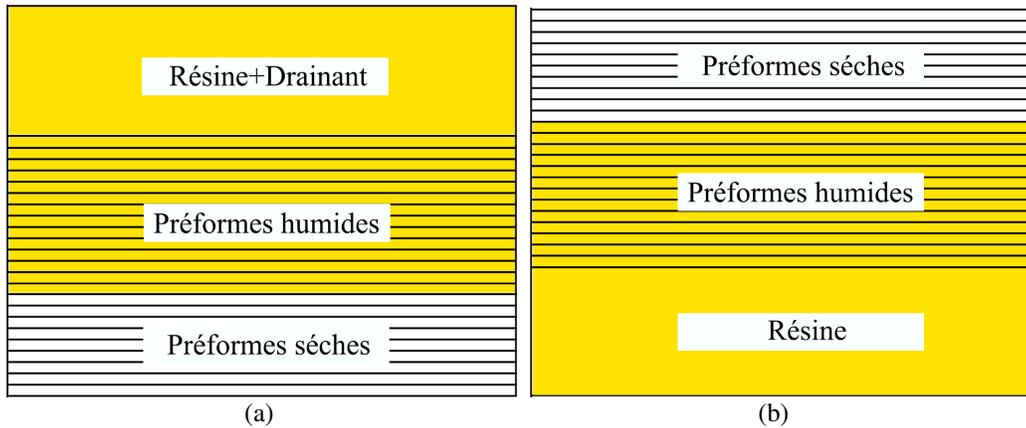


Figure 3-4 Différentes zones modélisées pour le procédé : (a) LRI, (b) RFI.

3.3.2 Modélisation de la partie fluide

3.3.2.1 Hypothèses sur la résine

Les procédés par infusion sont caractérisés par des vitesses d'infusion relativement lentes. Les nombres de Reynolds obtenus dans ces procédés indiquent des écoulements de type laminaire [37]. Les forces d'inerties mises en jeu dans ces procédés peuvent donc être négligées. Par ailleurs le comportement de la résine est celui d'un fluide Newtonien incompressible [38]. Cette hypothèse est classique pour la modélisation des procédés par infusion. La loi de comportement associée au fluide s'écrit donc d'une manière générale dans la configuration matérielle \bar{x} à t :

$$\bar{\sigma}(x,t) = 2\eta\bar{D}(x,t) - p(x,t)\bar{I} \quad 3-1$$

où $\bar{\sigma}$ est le tenseur des contraintes de Cauchy, $\bar{D} = \frac{1}{2}(\nabla\bar{v} + \nabla^T\bar{v})$ est le tenseur des taux de déformation Eulérien défini à partir des gradients des vitesses $\nabla\bar{v}$, η est la viscosité dynamique du fluide, p est la pression hydrostatique du fluide dans les pores et \bar{I} est la tenseur identité.

3.3.2.2 Ecoulement de la résine dans une zone purement fluide

Pour le procédé RFI, il y a une zone purement fluide, la modélisation de l'écoulement de la résine dans cette zone est effectuée à partir de loi de conservation de la masse et de la loi de conservation de la quantité de mouvement. Ces deux lois de conservation permettent d'obtenir les équations de Stokes.

Loi de conservation de la masse

La masse de tout système matériel suivi dans son mouvement reste constante. Elle s'exprime par l'équation suivante :

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{v}) = 0 \quad 3-2$$

où ρ est la masse volumique du fluide, comme la résine est supposée incompressible, sa masse volumique est constante en temps et en espace. La loi de conservation de la masse se simplifie et prend la forme suivante :

$$\text{div}(\bar{v}) = 0 \quad 3-3$$

Loi de conservation de la quantité de mouvement

La loi de conservation de la quantité de mouvement conduit à l'équilibre mécanique classique:

$$\rho \frac{d\bar{v}}{dt} - \text{div}(\bar{\sigma}) - \bar{f}_v = 0 \quad 3-4$$

où \bar{f}_v sont les forces volumiques du système.

Equations de Stokes

Si nous remplaçons $\bar{\sigma}$ dans l'équation d'équilibre (3-4) par l'expression du comportement du fluide (3-1) et négligeons les effets d'inertie et les forces volumiques du système, nous pouvons obtenir les équations de Stokes :

$$\begin{aligned} \eta \Delta \bar{v} - \bar{\nabla}(p) &= 0 \\ \text{div}(\bar{v}) &= 0 \end{aligned} \quad 3-5$$

Dans la résolution de ce problème, Celle *et al.* ont proposé une formulation ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) (voir *annexe 2*). Cette formulation est une méthode qui généralise les descriptions lagrangienne et Eulerienne en combinant les avantages des deux méthodes. Cette formulation est bien adaptée pour étudier l'écoulement d'un fluide dans un domaine mobile.

3.3.2.3 Ecoulement de la résine dans la préforme

L'écoulement de la résine dans la préforme obéit à des lois complexes et relativement peu connus. Pour simplifier, nous assimilons les préformes à un milieu poreux. Le problème de l'écoulement de la résine dans la préforme va donc consister en l'étude de l'écoulement d'un fluide visqueux dans un milieu poreux compressible. Dans une approche macroscopique, la loi de Darcy ou l'équation de Brinkman peut décrire ce type d'écoulement.

Loi de Darcy

En 1856, H. Darcy étudie l'écoulement en milieu saturé de l'eau dans les filtres sableux connectés aux fontaines de la ville de Dijon.

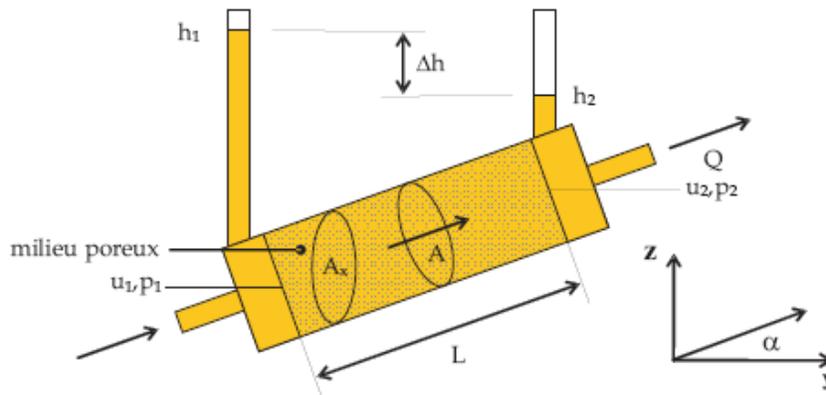


Figure 3-5 Expérience de Darcy.

Ces expériences montrent qu'il existe une relation de proportionnalité entre le débit et le gradient de pression imposé aux extrémités du milieu poreux [39]. Si nous ajoutons une vitesse superficielle, après une analyse, nous pouvons obtenir la vitesse

moyenne du fluide par la relation:

$$\bar{v} = -\frac{\bar{K}}{\eta} \cdot (\bar{\nabla} p - \rho \bar{g}) \quad 3-6$$

où \bar{v} est la vitesse de Darcy, \bar{K} est le tenseur de perméabilité intrinsèque du milieu poreux (m^2), détaillé dans le paragraphe 3.2.4 suivant et \bar{g} est l'accélération gravitationnelle.

Les valeurs de perméabilité dépendent de la structuration et de l'état de saturation du milieu poreux. La vitesse réelle \bar{v}_r est déduite de la connaissance de la vitesse de Darcy par la relation [36]:

$$\bar{v}_r = \frac{\bar{v}}{\phi} \quad 3-7$$

où ϕ est la porosité du milieu qui est le rapport du volume de pores sur le volume total. Cette loi reste valable tant que le régime d'écoulement est laminaire et tant qu'il y a une faible perméabilité dans le milieu. Les équations du problème de la loi de Darcy (l'équation 3-6) en négligeant les effets de la gravité s'écrivent sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \frac{\eta}{K} \bar{v} + \bar{\nabla} p &= 0 \\ \text{div}(\bar{v}) &= 0 \end{aligned} \quad 3-8$$

L'équation de Brinkman

En 1947, Brinkman introduit une équation permettant de modéliser l'écoulement dans un milieu poreux et permettant de répondre aux problèmes des conditions aux limites de l'équation de Darcy. L'équation de Brinkman est une généralisation de l'équation de Navier et Stokes appliquée à un milieu poreux. Brinkman a proposé d'ajouter une perte de charge ($\frac{\eta}{k} \bar{v}$) dans l'équation de Navier Stokes. En négligeant les effets d'inertie et les forces volumiques, nous pouvons obtenir l'équation de Brinkman ci-dessous:

$$0 = -\bar{\nabla} p + \eta \Delta(\bar{v}) - \frac{\eta}{k} \bar{v} \quad 3-9$$

Cette équation est très utile pour les problèmes en régime laminaire et à forte perméabilité. La loi de Darcy a été utilisée dans le modèle numérique proposé par Celle car les préformes utilisées ont une faible perméabilité.

3.3.2.4 La perméabilité

Les équations de Darcy font intervenir un paramètre essentiel, la perméabilité qui est définie comme la résistance du milieu poreux à l'écoulement du fluide suivant une certaine direction. Elle est conditionnée, avec la viscosité du fluide, la cinétique d'écoulement de la résine dans les préformes. L'étude bibliographique indique que la perméabilité du milieu est fortement dépendante de la porosité mais dépend également du niveau de saturation des préformes. De plus, la perméabilité locale peut être modifiée pour plusieurs raisons [40], par exemple, « race-tracking » [41] et « draping effect » [42]. En général, il y a deux méthodes principales qui sont utilisées pour la détermination de la perméabilité dans le cadre de l'étude numérique de l'écoulement dans un milieu poreux compressible : le calcul par la relation de Carman-Kozeny et la

mesure expérimentale.

Relation de Carman-Kozeny

La relation de Carman-Kozeny est très utilisée dans le cadre de la détermination de la perméabilité d'un empilement de préformes [43-46]. Elle est construite à partir d'une combinaison entre une approche microscopique et une approche macroscopique. Dans une modélisation microscopique, la loi de Hagen-Poiseuille (voir annexe 3) décrit l'écoulement stationnaire d'un fluide dans un pore cylindrique. A partir de la combinaison entre la loi de Hagen-Poiseuille et la loi de Darcy (voir annexe 3), nous obtenons la relation de Carman-Kozeny, qui traduit l'effet de la porosité sur la perméabilité et s'exprime par l'équation 3-10.

$$\overline{K} = \frac{d_f^2}{16\overline{h_k}} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad 3-10$$

où \overline{K} est le tenseur de la perméabilité intrinsèque du milieu poreux, d_f est le diamètre moyen de la fibre et $\overline{h_k}$ est la constante de Kozeny. La constante de Kozeny est une valeur obtenue expérimentalement, donc le problème réside principalement dans sa détermination. Celle-ci peut être déterminée en utilisant par exemple les travaux de Kaviany [47], qui a noté les limites de ce modèle et indiqué que la constante de Kozeny varie sous certaines conditions. Globalement il y a encore des difficultés pour déterminer cette constante. Les travaux expérimentaux d'Elbouazzaoui [37] ont montré que la constante de Kozeny dépend du régime d'écoulement. Par ailleurs, Drapier *et al* [48] constatent que la relation de Carman-Kozeny n'est pas toujours représentative pour tous les types de renforts dans les études du milieu poreux, par exemple pour des renforts de type NC2.

Mesure expérimentale

Comme indiqué précédemment, la relation de Carman-Kozeny est une relation semi-expérimentale. La constante de Kozeny vient de la mesure expérimentale.

De plus en plus d'études expérimentales spécifiques se penchent sur la détermination de la perméabilité pour différents matériaux [49-56]. Pour les procédés LRI et RFI, la perméabilité transverse est la plus importante. Récemment le problème de la mesure de la perméabilité transverse a été traité dans le cadre de la thèse de Nunez [57]. Dans ses études bibliographiques, il a indiqué que les mesures expérimentales, qui semblent plus précises, ne sont actuellement pas normalisées. Il en résulte une grande variété de montages donnant des résultats souvent difficilement comparables.

3.3.2.5 Ecoulement de la résine dans le drainant

L'étude de l'écoulement de la résine dans le drainant est spécifique à la modélisation du procédé LRI. Celui-ci peut être modélisé de trois façons différentes :

1. Soit on peut le modéliser comme l'écoulement dans la zone de résine purement fluide (en prenant les équations de Stokes qui ont déjà été présentées précédemment).
2. Soit on peut utiliser l'équation de Brinkman car le drainant a une forte perméabilité.
3. Soit on peut prendre une autre écriture proposée par Ngo et Tamma [58]. Cette équation est décrite dans l'expression suivante.

$$0 = -\overline{\nabla} p + \eta \overline{\Delta}(\overline{v}) - \alpha \frac{\eta}{k} \overline{v} \quad 3-11$$

3.4 Conclusion

Elle est une combinaison des équations de Stokes et de l'équation de Brinkman. Dans cette équation, si α est nul (l'écoulement entre fibres), nous allons avoir l'équation de Stokes. Par contre, si α égale 1 (l'écoulement dans les fibres), cette équation va devenir une équation de Brinkman.

Pour des raisons pratiques, nous avons modélisé l'écoulement de la résine dans le drainant comme dans une zone purement de la résine dont la dimension est invariante.

3.3.3 Modélisation de la partie solide

La modélisation de la partie solide consiste à étudier le comportement des préformes sèches et humides (figure 3-4). Nous considérons que les préformes sèches et humides se comportent comme un même milieu solide, et le mouvement des préformes est décrit par une formulation Lagrangienne.

3.3.3.1 Les équations de conservation

Nous effectuons une discrétisation en temps, et par conséquent, nous utilisons une formulation qui s'écrit entre deux instants t et $t + \Delta t$. De plus, dans une approche matérielle, la conservation de la masse est implicitement vérifiée dans le sens où les repères du maillage et le domaine matériel sont confondus [1], donc l'équation de conservation de la masse peut exprimer sous la forme 3-12:

$$J(\bar{x}, t + \Delta t) \rho_f(t + \Delta t) = J(\bar{x}, t) \rho_f(t) \quad 3-12$$

où J est le Jacobien de la transformation et ρ_f est la masse volumique macroscopique des fibres. De plus, l'équation de conservation de la quantité de mouvement après avoir négligé les forces d'inerties, les forces de gravité et les forces volumiques du système, s'écrit :

$$\overline{\text{div}(\sigma(x, t))} = 0 \quad 3-13$$

3.3.3.2 Le modèle de Terzaghi

Pendant l'infusion, la pression hydrostatique de la résine à l'intérieur des pores a une influence sur le comportement de la préforme. En effet, elle entraîne une dilatation du volume. Pour modéliser cette interaction entre l'écoulement de la résine et le comportement de la préforme, nous utilisons le modèle de Terzaghi qui donne une relation d'équilibre de tout le milieu. Ce modèle de Terzaghi permet de modéliser le comportement des préformes sèches et humides. Dans ce modèle purement mécanique, l'influence de la résine est pris en compte à partir de sa pression hydrostatique [59-61]:

$$\overline{\sigma} = \overline{\sigma_{ef}} - s \cdot p_r \cdot \overline{I} \quad 3-14$$

où $\overline{\sigma}$ sont les contraintes moyennes dans les préformes, $\overline{\sigma_{ef}}$ sont les contraintes effectives dans les préformes (les contraintes en l'absence de résine), s est le taux de saturation ($s = \text{Volume de résine} / \text{Volume de pores}$), qui est nul dans les préformes sèches et compris entre 0 et 1 lorsqu'on modélise le comportement des préformes humides et p_r est la pression hydrostatique de la résine dans les préformes humides.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le logiciel *PAM-RTM*TM et une modélisation mécanique générale du comportement de la résine et des préformes dans les différentes zones, qui a été utilisée dans le modèle numérique de Celle *et al.*

Dans la modélisation du procédé d'infusion LRI et RFI, il reste le problème de la

détermination de la perméabilité car la perméabilité dépend fortement de la porosité et du niveau de saturation du milieu considéré. Nous avons vu que l'approche reposant sur les mesures expérimentales est difficilement utilisable dans l'état actuel étant donné le manque de mesure et de reproductibilité. En première approximation, nous utiliserons l'hypothèse de Carman-Kozeny et la constante de Kozeny sera calée sur les mesures expérimentales obtenues.

Une fois que nous avons expliqué la modélisation du procédé par infusion de résine (LRI/RFI), nous allons utiliser ce modèle numérique pour nos applications sous certaines hypothèses dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 : Simulation numérique du procédé d'infusion de résine

4.1 Introduction	46
4.2 Hypothèses	46
4.2.1 Hypothèses générales	46
4.2.2 Hypothèses sur l'écoulement de la résine	46
4.2.3 Hypothèse sur la condition thermo-chimique.....	48
4.3 Conditions aux limites	49
4.3.1 Condition simple.....	49
4.3.2 Condition industrielle.....	50
4.4 Propriétés du modèle	52
4.4.1 Démarche du modèle.....	52
4.4.2 Paramètres d'entrée et apport du modèle	53
4.5 Etudes numériques	53
4.5.1 Test de convergence	54
4.5.2 Test sur l'évolution de la viscosité et de la perméabilité de la préforme	54
4.5.3 Loi de comportement utilisée	57
4.5.4 Test sur l'évolution géométrique	59
4.5.5 Comparaisons entre les différentes conditions aux limites	61
4.6 Conclusion	63

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la modélisation du procédé par infusion de résine que nous avons choisie. Maintenant, nous voulons d'abord expliquer les hypothèses proposées dans ce modèle numérique, ensuite montrer comment ce modèle fonctionne. Les applications et les études numériques seront présentées à la fin de ce chapitre.

4.2 Hypothèses

4.2.1 Hypothèses générales

Dans le modèle numérique choisi, un couplage fort itératif est adopté. Par conséquent la formulation ALE n'est pas employée pour traiter le couplage entre l'écoulement de résine et la déformation de la préforme.

Pour déterminer la perméabilité de la préforme, comme nous l'avons présenté dans la modélisation d'écoulement de la résine au chapitre 3, dans un premier temps, la façon la plus simple, mais la moins précise, consiste à utiliser la relation de Carman-Kozeny (Equation 3-11). A l'aide des résultats des mesures expérimentales, nous avons utilisé une perméabilité comprise entre 10^{-12} et 10^{-13} m². Nous avons donc choisi une constante de Kozeny égale à 10 dans notre première simulation numérique, permettant, avec un diamètre de fils de 5 µm d'obtenir la perméabilité visée.

Pour simplifier encore la résolution nous n'avons pas pris en compte les effets de frottement entre l'écoulement de la résine dans le drainant (l'écoulement de la résine dans une zone purement fluide) et dans la préforme (l'écoulement de la résine dans des milieux poreux), donc la condition de Beavers-Joseph-Saffmann [62-64] n'est pas considéré dans ce modèle. C'est à dire que la vitesse tangentielle de la résine à la frontière du drainant et la préforme est nulle. Ce « frottement » jouera un rôle important lorsque des courbures seront introduites dans le modèle [1], ce qui n'est pas le cas de la géométrie de travail considérée ici.

Comme nous nous sommes intéressés au couplage entre la déformation de la préforme et l'écoulement de la résine, l'évolution du front de résine n'est pas pris en compte de façon très fine au cours de l'infusion de la résine. En effet, nous supposons que dans les calculs par éléments finis, à chaque incrément de temps, les éléments sont soit remplis complétement, soit ne sont pas remplis. Pour résoudre le problème de suivi du front de résine dans ce procédé, des travaux de recherche basés sur la méthode Level-Set sont actuellement en cours dans notre laboratoire [65]. La solution retenue ici permet d'obtenir un terme approximation aussi qui pourrait dépendre de la finesse du maillage.

4.2.2 Hypothèses sur l'écoulement de la résine

Pour le procédé LRI, si nous regardons les écoulements de résine dans le drainant et dans la préforme, la perméabilité dans ces deux domaines varie d'un facteur de l'ordre 10^{10} environ. Au niveau de la modélisation, nous avons supposé que la résine remplit d'abord le drainant, et ensuite s'écoule progressivement suivant l'épaisseur de la préforme [17] (figure 4-1). Conformément à ce rapport de perméabilité, dans la préforme, un front de résine vertical va être obtenu. Ici nous supposons que les perméabilités en trois directions ont même valeur, c'est-à-dire que les 3 composants du vecteur de la constante de Kozeny sont fixés à une même valeur dans notre simulation numérique.

4.2 Hypothèses

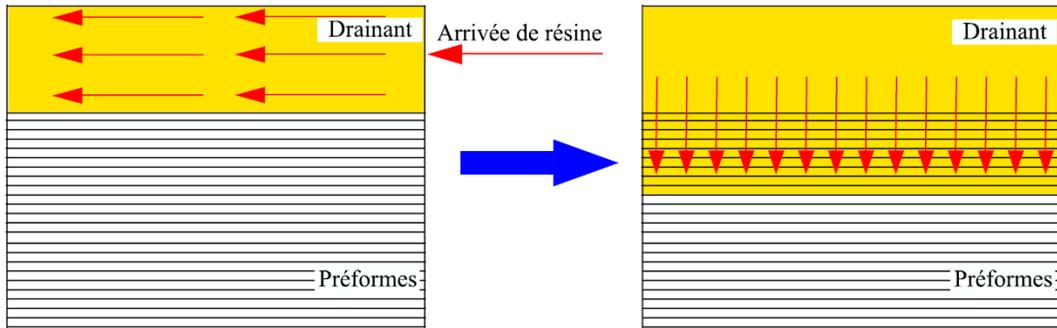


Figure 4-1 Hypothèse d'écoulement de la résine dans la modélisation du procédé LRI.

Pour valider cette hypothèse, nous allons simuler dans un premier temps deux cas tests simples à l'aide du logiciel PAM-RTMTM.

Ces deux cas tests ont les mêmes conditions aux limites, elles sont affichées dans la figure 4-2. Nous injectons la résine par la droite du drainant et nous appliquons le vide au bas de la préforme. En revanche, la résine ne peut pas sortir à l'extérieur du système. Nous fixons la valeur de la viscosité de la résine et nous donnons des perméabilités constantes pour le drainant et la préforme.

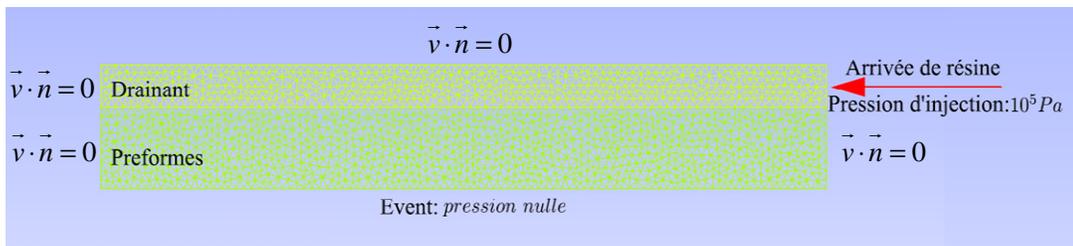


Figure 4-2 Conditions aux limites pour les cas tests simulés dans PAM-RTMTM.

Dans le premier test, nous avons choisi une perméabilité du drainant de 10^{-3} m^2 et celle de la préforme de 10^{-13} m^2 . Les écoulements de résine dans le drainant et dans la préforme sont simulés. Le pourcentage de remplissage et le profil d'écoulement de la résine au cours de l'infusion sont présentés sur les figures suivantes. A cause de la grande différence au niveau de la perméabilité entre le drainant et la préforme, la résine remplit d'abord le drainant, sans entrer dans la préforme (figure 4-3 (1) à (3)), et ensuite, elle infuse à travers la préforme (figure 4-3 (4)). Nous observons donc bien un écoulement unidirectionnel vertical dans la préforme.

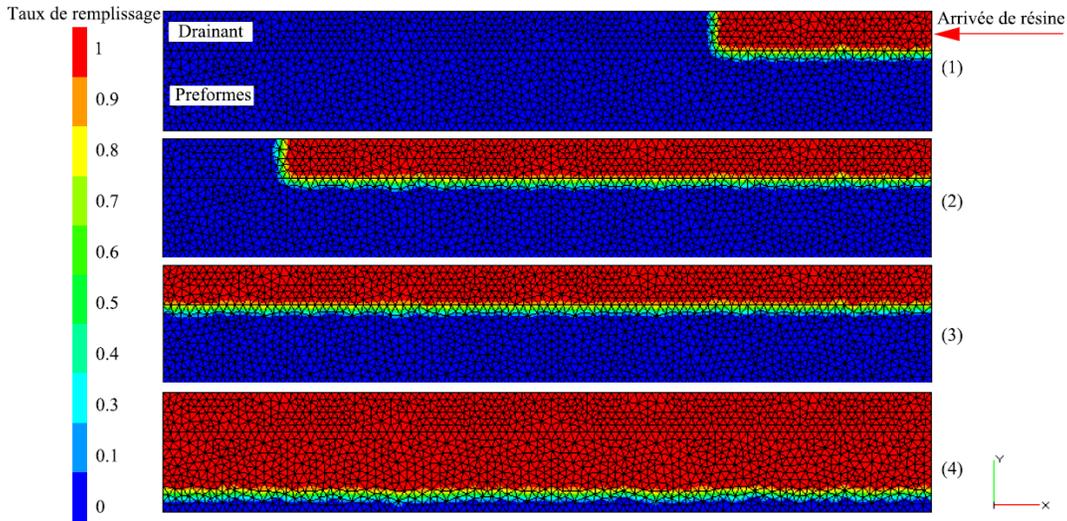


Figure 4-3 Ecoulement de la résine dans le premier cas test.

Dans le second cas test, par rapport au premier cas test, nous avons diminué le rapport entre la perméabilité du drainant et celle de la préforme. La perméabilité de la préforme est inchangée, en revanche, nous avons diminué la perméabilité du drainant jusqu'à 10^{-10} m^2 . Les résultats de la simulation du front de résine sont montrés sur les figures suivantes (figure 4-4). Nous observons que l'infusion dans la préforme se produit bien avant le remplissage complet du drainant. Finalement, un écoulement bidimensionnel a été obtenu dans la préforme (figure 4-4 (2) à (4)).

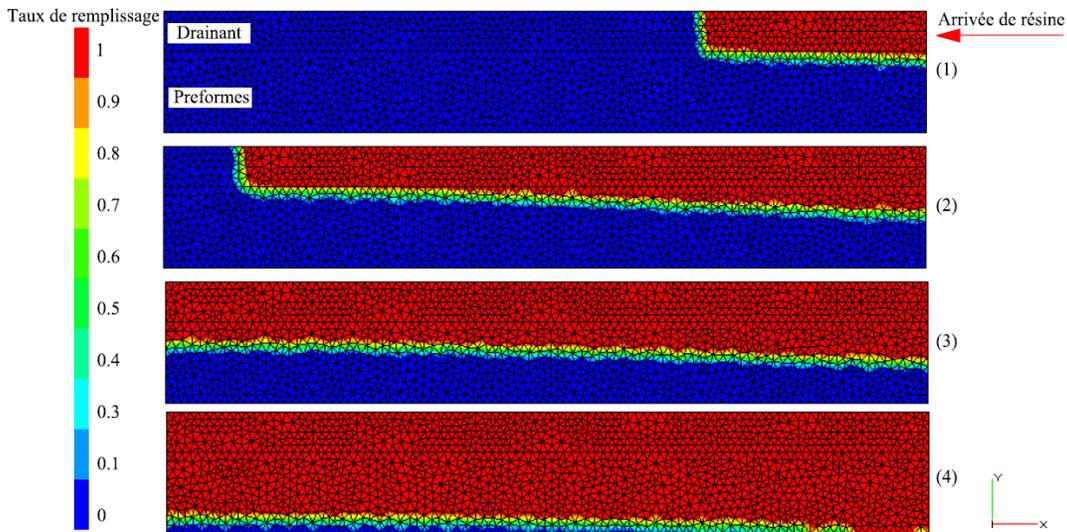


Figure 4-4 Ecoulement de la résine dans le deuxième cas test.

A partir ces résultats, on considère que le premier cas test se rapproche la réalité, donc les hypothèses d'écoulement de la résine ont été validées numériquement.

4.2.3 Hypothèse sur la condition thermo-chimique

Dans le modèle numérique de *Celle et al.*, des modélisations ont été proposées pour le problème thermique et chimique. Les procédés par d'infusion de résine font intervenir des phénomènes physiques complexes. Nous considérons en première approximation, qu'il est plus important de simuler l'interaction entre l'écoulement de la

4.3 Conditions aux limites

résine et le comportement de la préforme. Donc, pour l'instant, nous avons supposé que la température n'évolue pas pendant la phase de remplissage et nous n'avons pas pris en compte l'évolution du taux de réticulation de la résine. Donc la viscosité de la résine va rester constante dans notre simulation numérique car elle dépend de la température et du taux de réticulation [66].

4.3 Conditions aux limites

D'abord nous avons commencé par simuler des cas simples. Ici, nous présentons les différentes conditions aux limites pour infuser une plaque en utilisant le procédé LRI.

4.3.1 Condition simple

Pour la condition simple, nous présentons ici deux types de conditions aux limites, elles sont décrites sur les figures 4-5 et 4-6. Dans le premier type de condition (figure 4-5), nous avons imposé la pression mécanique et la pression d'injection de résine sur la surface supérieure, donc la résine entre par le haut du système. Le second type de condition correspond à une pression de résine constante qui est considérée dans la zone de Stokes (voir la figure 4-6). Cette condition représente ce cas spécifique où on ne prend pas en compte la couche de résine dans le drainant pour la partie fluide.

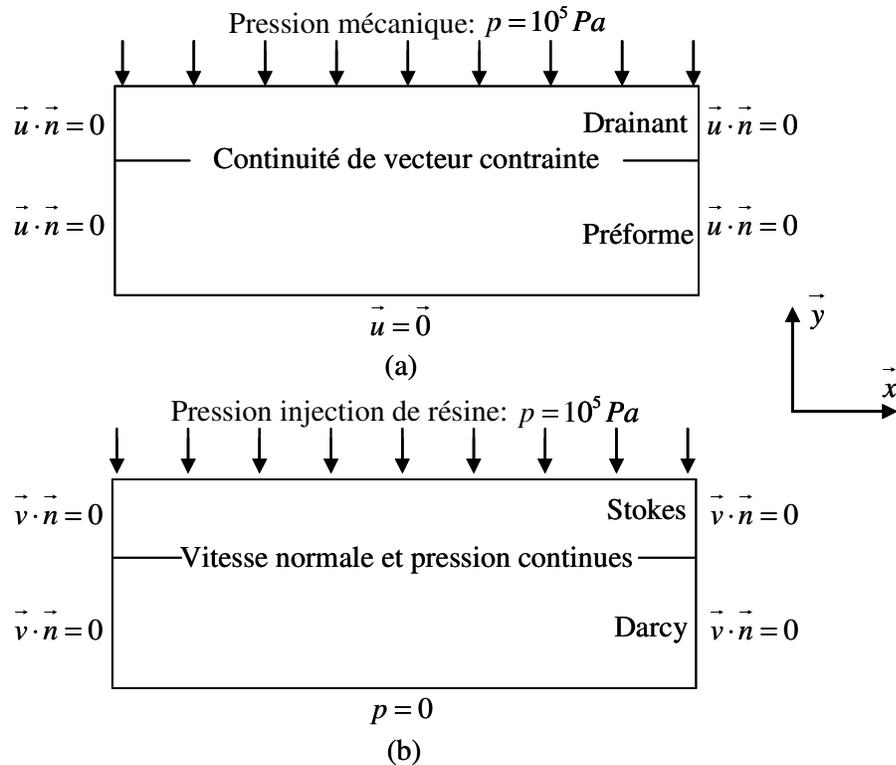


Figure 4-5 Condition simple 1 (a) pour la partie solide (\vec{u} : déplacement) et (b) pour la partie fluide (\vec{v} : vitesse de la résine).

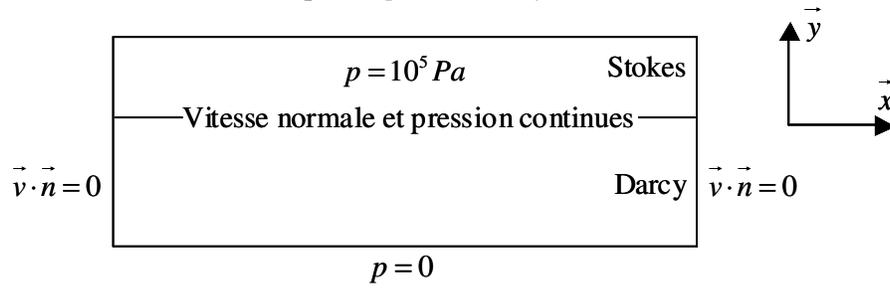


Figure 4-6 Condition simple 2 pour la partie fluide (\vec{v} : vitesse de la résine, p : pression de la résine).

4.3.2 Condition industrielle

Généralement, il y a deux types de conditions pour la fabrication d'une plaque en matériaux composites en utilisant le procédé LRI en condition industrielle (figure 4-7 et figure 4-9). Les conditions aux limites correspondant aux conditions industrielles sont présentées dans les figures 4-8 et 4-10. La configuration du procédé LRI est montrée dans la figure 4-7. Cette configuration est la plus largement utilisée au niveau industriel. Nous pouvons rencontrer une autre configuration de fabrication, où nous plaçons le drainant sous la préforme. Celle-ci est en contact directement avec la plaque chauffante qui est placée en bas du système d'infusion (voir la figure 4-9). Nous appellerons cette configuration la configuration inversée. Dans cette configuration inversée, quand la résine entre dans le drainant, elle va être chauffée plus rapidement car elle est en contact direct avec la plaque chauffante (moule en bas). Donc, si on compare les conditions aux limites dans le deuxième cas par rapport à la condition standard, la condition mécanique reste inchangée, par contre la condition thermique change.

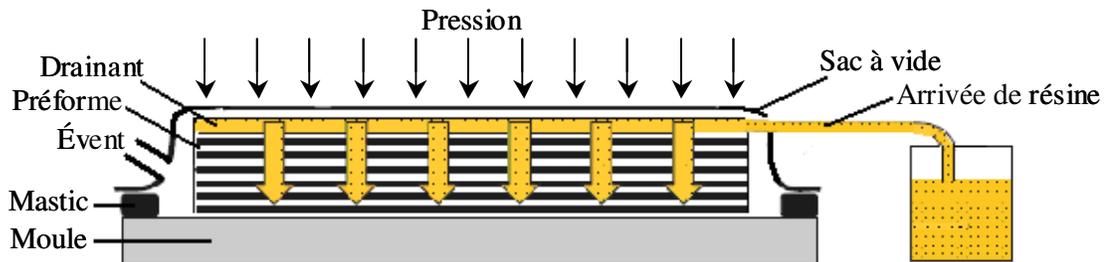


Figure 4-7 Configuration standard du procédé LRI.

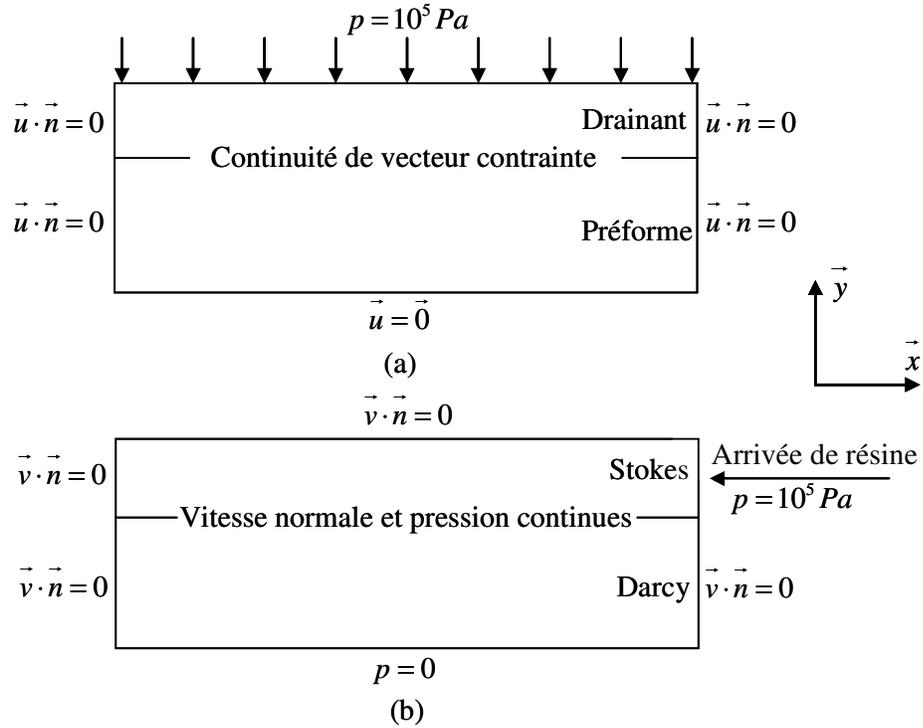


Figure 4-8 Conditions aux limites pour l'infusion d'une plaque avec le procédé LRI standard (a) pour la partie solide (\vec{u} : déplacement) et (b) pour la partie fluide (\vec{v} : vitesse de la résine, p : pression de la résine).

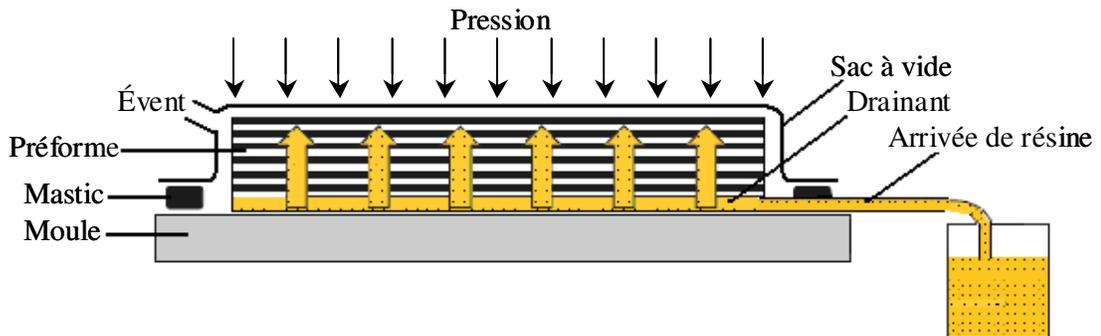


Figure 4-9 Configuration inversée du procédé LRI.

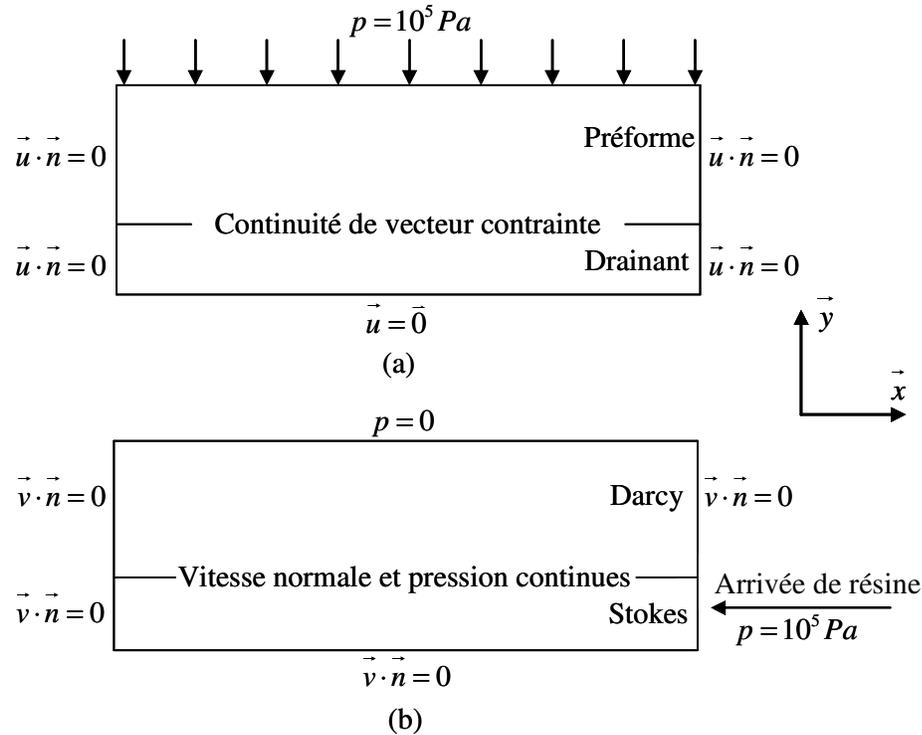


Figure 4-10 Conditions aux limites pour l'infusion d'une plaque avec le procédé LRI inversé (a) pour la partie solide (\vec{u} : déplacement) et (b) pour la partie fluide (\vec{v} : vitesse de la résine, p : pression de la résine).

4.4 Propriétés du modèle

4.4.1 Description du modèle

Globalement, il y a 4 étapes au niveau de la simulation numérique (voir figure 4-11) : l'initialisation des calculs, la compression simple de la préforme, le remplissage du drainant et puis l'infusion de la résine progressivement dans la préforme. La phase d'initialisation correspond à la construction de la géométrie et du maillage, à l'enregistrement de tous les paramètres initiaux ainsi que de la loi de comportement en compression, et enfin, au calcul de la perméabilité initiale. Concernant la compression de la préforme, c'est un calcul purement mécanique de compaction transverse de la préforme. Après ce calcul de compression, une nouvelle géométrie de la préforme est obtenue. A cause de la grande déformation de la préforme, une opération de remaillage est indispensable. Par conséquent, le nouveau maillage, le nouveau taux volumique de fibres et la nouvelle perméabilité sont recalculés. Une fois que nous avons fini la compaction de l'empilement de la préforme, l'infusion de la résine commence. Selon notre hypothèse, l'écoulement de la résine se produit d'abord dans le drainant puis remplit ensuite la préforme lentement. A chaque incrément de temps, pour la partie fluide, nous calculons les champs de vitesse et pression dans les zones de Stokes et de Darcy. Pour la partie solide, le déplacement de la préforme est calculé, donc nous pouvons également obtenir le taux volumique de fibres et donc la nouvelle perméabilité. Ces calculs d'infusion de la préforme se poursuivent jusqu'à ce que tous les éléments soient remplis.

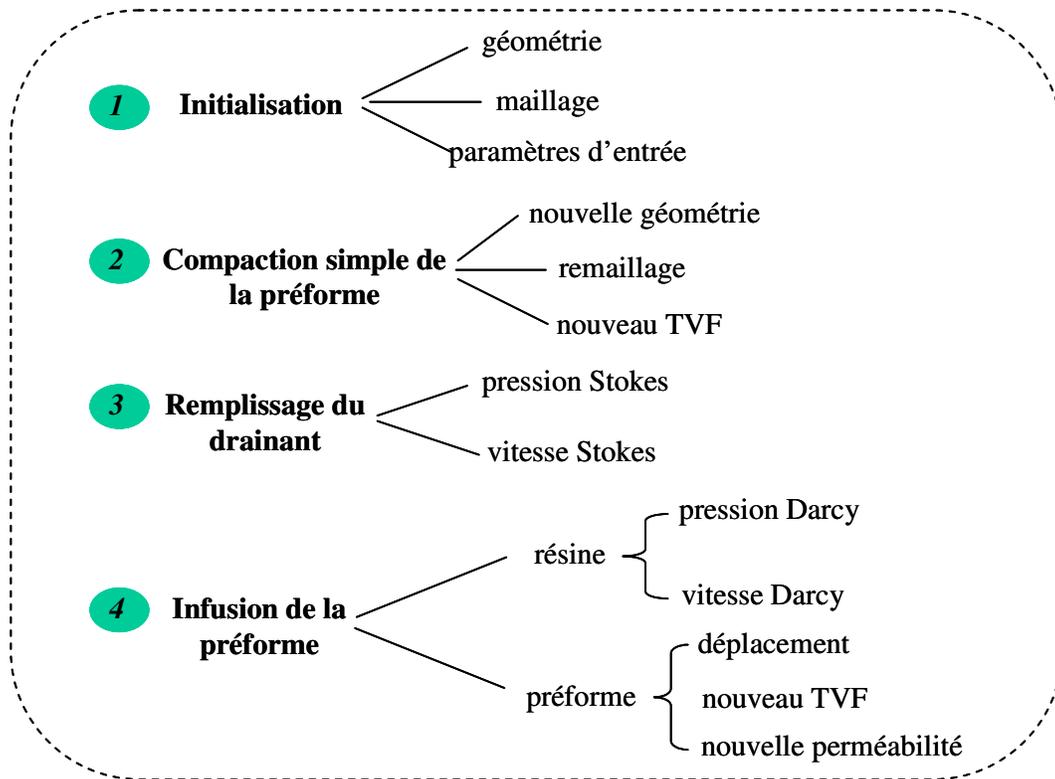


Figure 4-11 Etapes de la simulation numérique.

4.4.2 Paramètres d'entrée et apport du modèle

Comme nous l'avons montré dans le chapitre sur la modélisation de l'écoulement de l'infusion de résine, notre calcul concerne les problèmes d'écoulement de résine et du comportement solide. Les paramètres en entrée concernent donc les propriétés de la préforme et de la résine. Les paramètres importants qui sont entrés dans la simulation sont présentés dans le tableau suivant (tableau 4-1). De plus, la loi de comportement de la préforme en compression et les conditions aux limites du système sont deux paramètres très importants.

Nous avons décidé d'étudier le temps de remplissage, l'épaisseur de la préforme, le taux volumique de fibre et la masse de la résine absorbée pendant la phase de remplissage, afin de valider ces calculs et également d'en tirer des tendances pour mener à bien notre démarche expérimentale.

Tableau 4-1 Paramètres les plus importants en entrée dans la simulation numérique.

Pour la résine	Pour la préforme
Viscosité	porosité initiale
pression d'injection	pression de compression
densité	constante de Kozeny
	paramètres géométriques
	loi de comportement

4.5 Etudes numériques

Dans ces études numériques, nous avons choisi un cas test avec une géométrie simple: l'infusion d'une plaque.

4.5.1 Test de convergence

Le calcul du test de convergence nous permettra d'indiquer à partir combien d'éléments utilisés pour simuler notre procédé d'infusion de résine, les résultats numériques sont stabilisés. Dans ce cas, nous avons surtout fait une étude de l'évolution du temps de remplissage en fonction du nombre d'éléments du maillage structuré, car cette évolution est plus importante que les autres paramètres en sortie. Elle est donc présentée dans la figure ci-dessous (figure 4-12). Dans les calculs, nous avons pris les dimensions de la préforme suivante : 335 mm × 335 mm × 20 mm, la viscosité de la résine est égale à 0,03 Pa.s, et la porosité initiale de la préforme est égale à 60% (avant compaction). De plus, pour le premier cas des conditions aux limites correspondant à la condition industrielle (figure 4-8) sont utilisées pour cette étude.

Dans la figure 4-12, nous pouvons observer que quand le nombre d'éléments est supérieur à 900 (on compte toujours un nombre après remaillage), le temps de remplissage est stabilisé dans la simulation numérique. Ici, on doit indiquer que la figure 4-12 décrit une évolution générale, car pendant ces études, on remarque que le temps de remplissage fluctue par rapport à la variation du nombre d'éléments du maillage. Donc pour l'instant, les études convergence présentés sont vraiment nécessaires.

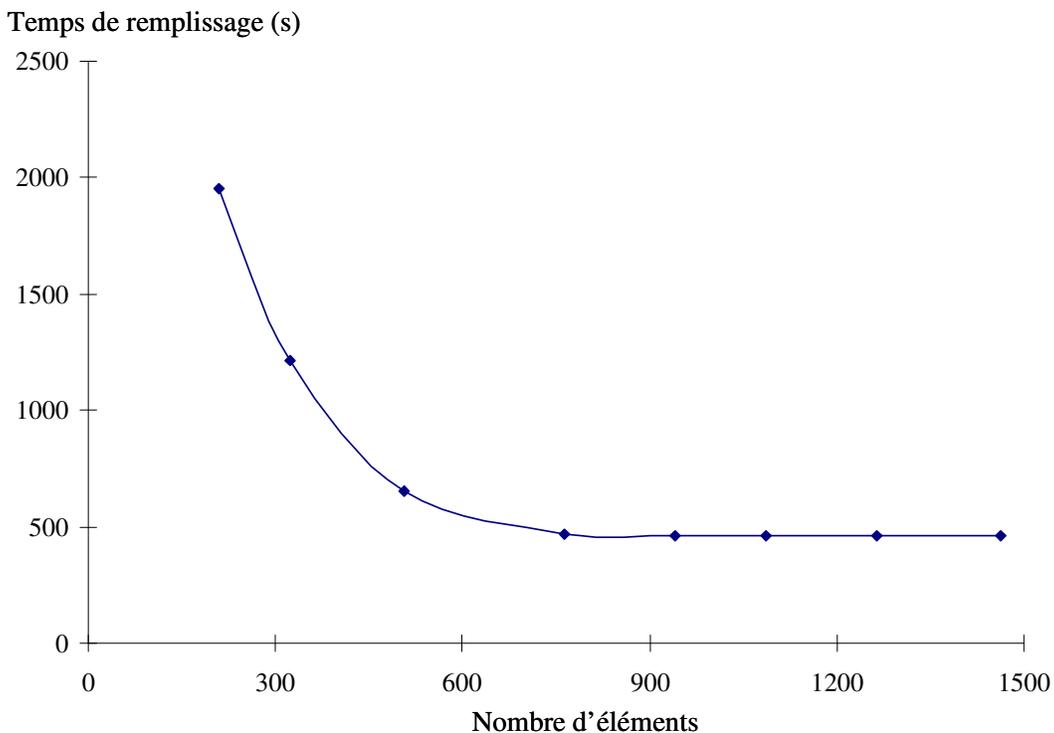


Figure 4-12 Test de convergence du calcul numérique.

4.5.2 Test sur l'évolution de la viscosité et de la perméabilité de la préforme

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la viscosité de la résine et la perméabilité de la préforme sont des paramètres clés dans nos simulations numériques. Pour la viscosité de la résine, nous avons pris une valeur constante pendant notre calcul. Pour observer l'influence de la viscosité de la résine sur les paramètres en sortie, nous

4.5 Etudes numériques

avons étudié l'évolution des calculs numériques par rapport à différentes viscosités entrées. Les études sur cette évolution sont présentées dans le tableau 4-2.

Pour les tests d'évolution de la viscosité de la résine et de la perméabilité de la préforme, nous avons pris la même préforme que pour les calculs précédents. De plus, pour assurer des résultats obtenus dans la zone de calcul stabilisée, nous avons choisi d'utiliser un maillage avec 1086 éléments.

Dans le tableau 4-2, nous pouvons noter que le temps de remplissage augmente en même temps qu'augmente la viscosité de la résine. Par contre, les autres paramètres restent constants. En principe, lorsque la viscosité de la résine augmente, la vitesse de remplissage va diminuer, par conséquent, il faudra plus de temps pour remplir la même préforme, mais la quantité de la résine absorbée ne va pas évoluer. Puisque nous n'avons pas fait varier les autres paramètres d'entrée, l'épaisseur et le taux volumique de fibre de la préforme n'évoluent pas. Si nous traçons l'évolution du temps de remplissage en fonction de la viscosité de la résine, nous obtenons une courbe linéaire qui est illustrée sur la figure 4-13. On rappelle que la loi de Darcy (équation 3-7) est utilisée dans la modélisation de l'écoulement de la résine dans la préforme. Cette loi nous montre qu'il y a une relation inversement proportionnelle entre la vitesse de Darcy et la viscosité de la résine.

Tableau 4-2 Evolution des paramètres de sortie en fonction de la viscosité.

Viscosité (Pa.s)	Temps de remplissage (s)	Volume de résine absorbée (L)	Epaisseur après infusion (mm)	TVF après infusion
0,01	160,7	0,662	13,9	57,56%
0,02	317,8	0,662	13,9	57,56%
0,03	487,3	0,662	13,9	57,55%
0,04	647,5	0,663	13,9	57,53%
0,06	810,3	0,662	13,9	57,55%

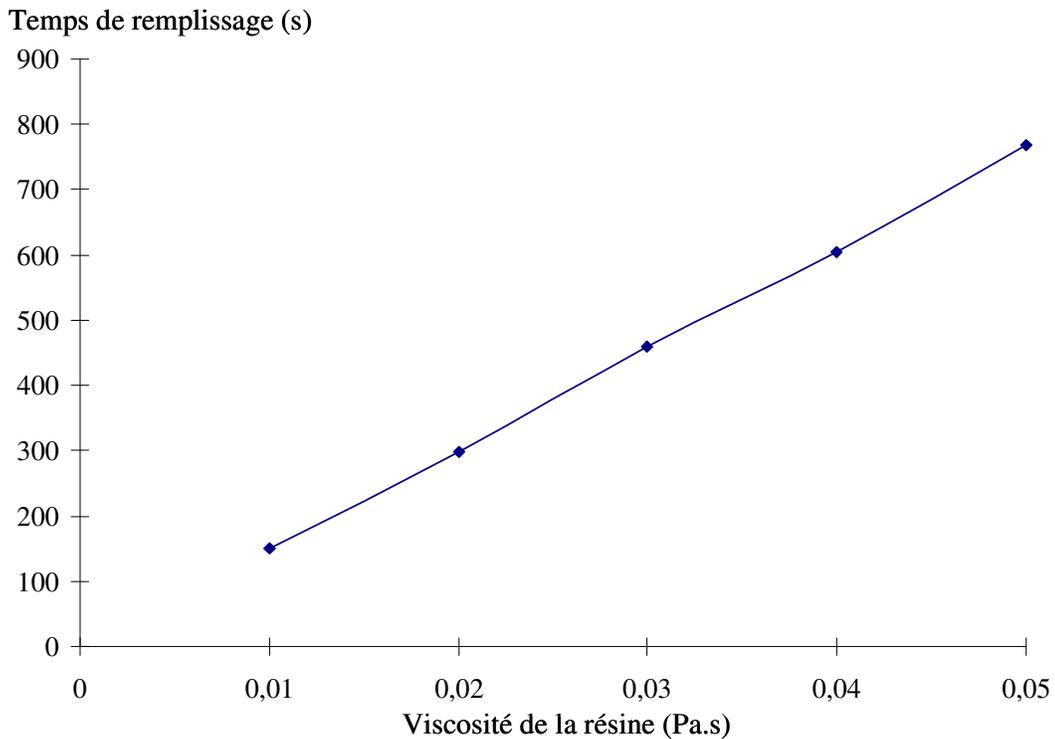


Figure 4-13 Evolution du temps de remplissage en fonction de la viscosité de la résine.

Les études de la variation de la perméabilité de la préforme sont représentées dans le tableau 4-3. Ici nous avons choisi trois cas différents. La relation de Carman-Kozeny est intégrée dans le premier et le deuxième cas. En revanche, dans le premier calcul, nous avons fixé 10 pour la constante de Kozeny, et cette constante va être modifiée à la valeur 5 pour le deuxième calcul (En général, la constante de Carman-Kozeny est égale à 5 pour des empilages de grains isométriques avec des porosités n'excédant pas 0,7 à 0,8 [1,67]). Une perméabilité constante de $1,61 \cdot 10^{-13}$ est utilisée dans le troisième cas, cette valeur est représentative des tissus unidirectionnels (pour un taux volumique de fibres à 60%) [57].

Nous avons proposé trois cas différents pour étudier l'évolution de la perméabilité de la préforme avec les mêmes dimensions géométriques. La viscosité de la résine est fixée à 0,03 Pa.s. Pour 60% de porosité initiale de la préforme, nous avons choisi la constante de Kozeny égale à 10 et 5 pour les deux premiers cas, donc ils ont le même ordre de perméabilité de 10^{-14} m^2 . Par contre, dans le troisième cas test, la perméabilité est beaucoup plus élevée. Après avoir simulé ces trois cas différents, les paramètres de sortie sont présentés dans le tableau 4-3. Comme nous n'avons pas changé les autres propriétés de la préforme, le TVF, l'épaisseur de la préforme et le volume de résine absorbé n'ont pas évolué. Mais comme on pourrait l'attendre, la vitesse de l'infusion et, par conséquent, le temps de remplissage dépendent fortement de la perméabilité de la préforme.

Nous venons de regarder la relation entre la perméabilité et le temps de remplissage dans nos cas tests. Pour le dernier cas, la perméabilité moyenne pendant le remplissage est d'environ 3 fois supérieure à celle dans le 2^{ème} cas, par contre, le temps de remplissage dans le dernier cas est 2,5 fois inférieures à celui-ci dans le 2^{ème} cas. En revanche, si nous comparons le 2^{ème} cas et le premier cas, la perméabilité moyenne dans

4.5 Etudes numériques

le 2^{ème} cas est d'environ 2 fois supérieure par rapport celle dans le premier cas, mais son temps de remplissage est 2,1 fois inférieur à celui dans le premier cas. Nous notons que le temps de remplissage pendant l'infusion de résine n'est pas exactement inversement proportionnelle avec la perméabilité moyenne de la préforme, mais le temps de remplissage est très sensible par rapport l'évolution de la perméabilité.

Tableau 4-3 Etudes de la variation de la perméabilité de la préforme.

	Relation Carman-Kozeny		Une valeur constante (cas 3)
	Constante de Kozeny = 10 (cas 1)	Constante de Kozeny = 5 (cas 2)	
Perméabilité moyenne pendant le remplissage	$2,54 \cdot 10^{-14}$	$5,07 \cdot 10^{-14}$	$1,61 \cdot 10^{-13}$
Temps de remplissage (s)	487,3	229,3	90,7
TVF après infusion	57,55%	57,56%	57,56%
Epaisseur de la préforme après d'infusion (mm)	13,9	13,9	13,9
Volume de résine absorbée (L)	0,662	0,662	0,662

4.5.3 Loi de comportement utilisée

La loi de comportement de la préforme est un paramètre d'entrée dans la simulation numérique. Pour améliorer la compréhension du rôle de la loi de comportement dans les calculs numériques, nous avons proposé deux lois différentes dans ces études : la loi hypo-élastique standard utilisée dans le logiciel commercial *SYSTUS*TM et la loi de comportement de la préforme NC2 en compression transversale présentée dans la thèse de P. Celle [5]. Ces deux lois de comportement sont représentées sur la figure 4-14, ils donnent un composant des contraintes de Cauchy (suivant la direction d'épaisseur de la préforme) en fonction de la déformation logarithmique. Dans cette étude, nous avons choisi la même préforme que nous avons utilisée dans les calculs des évolutions de viscosité et de perméabilité. En revanche, nous avons pris la viscosité de la résine égale à 0,03 Pa.s et la constante de Kozeny égale à 10. Les résultats de la simulation numérique (tableau 4-4) montrent qu'il y a des grandes différences entre les deux calculs à cause des différences de lois de comportements utilisés.

Dans ce tableau 4-4, nous pouvons observer que lorsque la loi de comportement de NC2 a été utilisée, l'épaisseur de la préforme après compaction est beaucoup plus faible qu'en utilisant la loi hypo-élastique. Par conséquent, si l'épaisseur de la préforme après compaction a changé, les autres résultats numériques vont être relativement changés. Finalement, quand la loi hypo-élastique est intégrée dans la simulation numérique, le temps de remplissage est plus élevé et le volume de résine est plus important pour infuser la préforme. De plus, nous obtenons une épaisseur plus grande de la préforme et

son TVF est plus élevé après infusion de résine. En effet, pour la même contrainte extrême appliquée nous pouvons obtenir une plus grande déformation lorsque la loi de compression de NC2 est employée. Dans ce cas, nous avons noté qu'après l'infusion de résine, l'épaisseur de la préforme augmente proportionnellement plus par rapport à l'épaisseur après compaction.

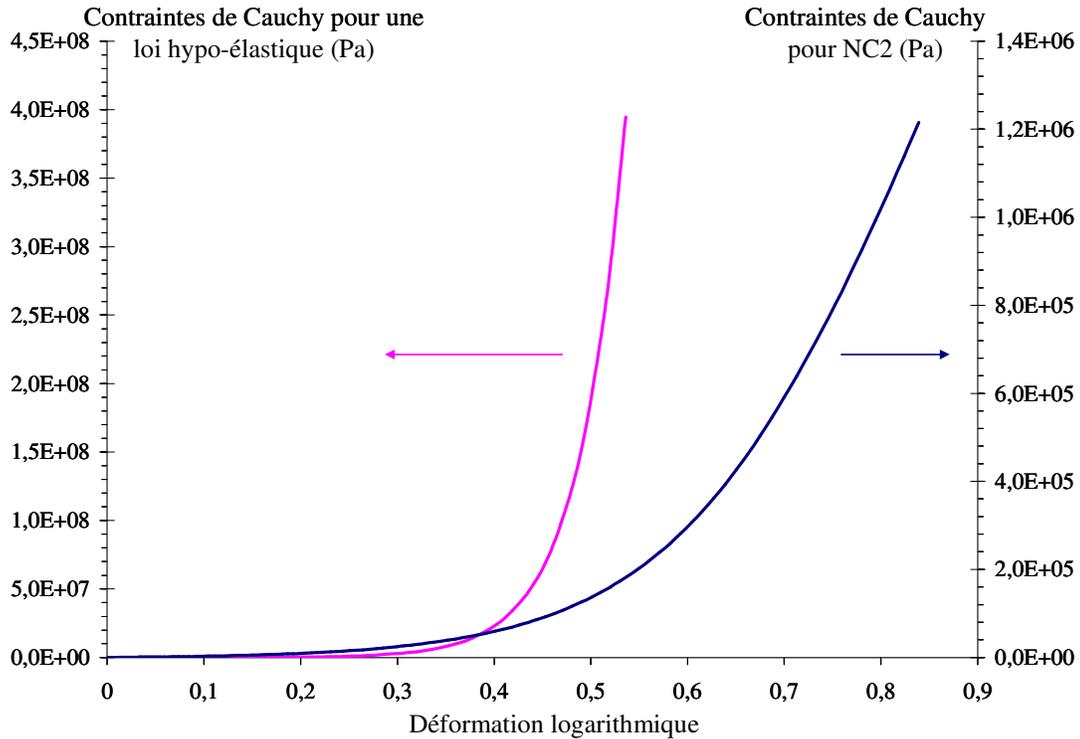


Figure 4-14 Loi de comportement hypo-élastique et en compressibilité transverse de la préforme NC2.

Tableau 4-4 Résultats des simulations numériques pour deux lois de comportement de la préforme.

	Loi hypo-élastique	Loi de compression du NC2
Epaisseur de la préforme après la compaction (mm)	17,3	12,6
TVF après la compaction	46,2%	63,5%
Temps de remplissage (s)	625,2	487,3
Epaisseur de la préforme après l'infusion de résine (mm)	18	13,9
TVF après l'infusion de résine	44,44%	57,55%
Volume de résine absorbée (L)	1,122	0,662

4.5.4 Test sur l'évolution géométrique

Ici, nous souhaitons observer les évolutions des résultats obtenus par la simulation numérique par rapport aux changements des dimensions du drainant et de la préforme.

Pour le drainant

Les résultats des simulations numériques en fonction de l'évolution d'épaisseur du drainant sont représentés dans le tableau 4-5. Les dimensions de la préforme restent toujours les mêmes : 335 mm × 335 mm × 20 mm et la loi hypo-élastique est utilisée (un choix). Nous pouvons observer que les changements de l'épaisseur du drainant ne perturbent quasiment pas nos calculs. Ici il y a une petite variation sur le niveau du temps de remplissage, elle vient surtout de la petite évolution du nombre d'éléments du maillage. Nous considérons que 2% de variation est acceptable. Nous savons que le drainant nous permet d'avoir une couche de résine au-dessus de la préforme, puis la résine peut infuser la préforme. Du point de vue d'expérimental, l'épaisseur du drainant ne peut pas évoluer, donc les résultats de la simulation numérique sont tout à fait raisonnables.

Tableau 4-5 Etude numérique sur l'évolution d'épaisseur du drainant.

Epaisseur du drainant (mm)	Temps de remplissage (s)	Masse de résine (g)	Epaisseur de la préforme après infusion (mm)	TVF après infusion
6	635,2	1245,4	18	44,44%
8	638,2	1245,4	18	44,44%
10	625,2	1245,4	18	44,45%

Pour la préforme

Dans notre modèle numérique en 2D, pour les paramètres géométriques, l'épaisseur de la préforme est un paramètre très important : Du point de vue d'expérimental, les changements des dimensions de la préforme engendrent une évolution des certains paramètres après l'infusion de la résine. Nous voulons donc d'abord estimer numériquement ces évolutions par rapport au changement d'épaisseur de la préforme.

Le tableau 4-6 montre les résultats des simulations numériques en fonction de l'épaisseur initiale de la préforme. Nous pouvons remarquer que lorsque l'épaisseur initiale de la préforme varie, les paramètres importants du procédé d'infusion changent sauf le TVF de la préforme, car il dépend de la loi de comportement et de la porosité initiale de la préforme utilisées dans la simulation numérique. Normalement, si l'épaisseur de la préforme est plus grande, il faudra plus du temps pour infuser la préforme et plus de résine dans la préforme à TVF fixé, donc la mesure de l'épaisseur initiale de la préforme est un paramètre très important dans la simulation numérique.

L'évolution du temps de remplissage en fonction de l'épaisseur de la préforme initiale est présentée sur la figure 4-15. Car les évolutions de la perméabilité de la préforme ne sont pas les mêmes pour chaque épaisseur, une évolution non-linéaire a été obtenue, lorsque l'épaisseur de la préforme augmente, le temps de remplissage augmente et on peut constater que cette augmentation est de plus en plus importante. La figure 4-16 montre l'évolution de l'épaisseur de la préforme après infusion de la résine

en fonction de l'épaisseur initiale. Nous observons qu'il y a une évolution linéaire car nous avons utilisé la même loi de comportement et la même porosité initiale dans nos calculs.

Tableau 4-6 Etude numérique sur l'évolution d'épaisseur de la préforme.

Epaisseur initiale de la préforme (mm)	Temps de remplissage (s)	Masse de résine (g)	Epaisseur de la préforme après infusion (mm)	TVF après infusion
20	625,2	1245,4	18	44,44%
25	758,1	1557,3	22,5	44,44%
30	994,2	1868,1	26,99	44,43%
35	1403	2181,2	31,51	44,43%
45	2703	2806,1	40,52	44,42%

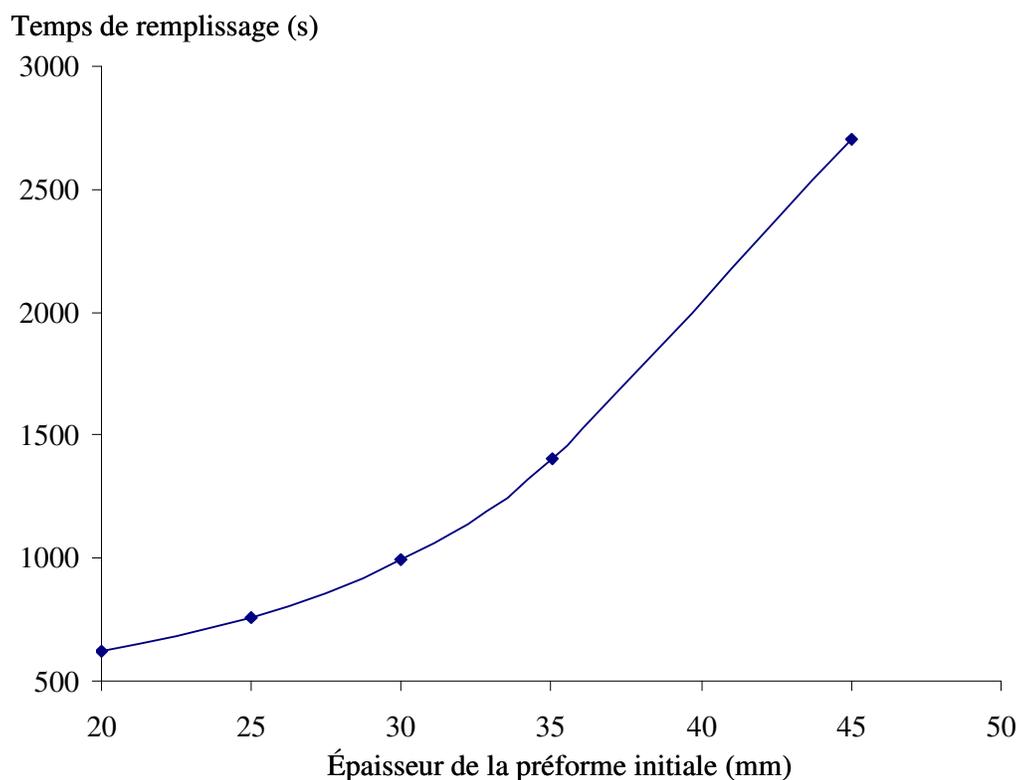


Figure 4-15 Evolution du temps de remplissage en fonction de l'épaisseur de la préforme initiale.

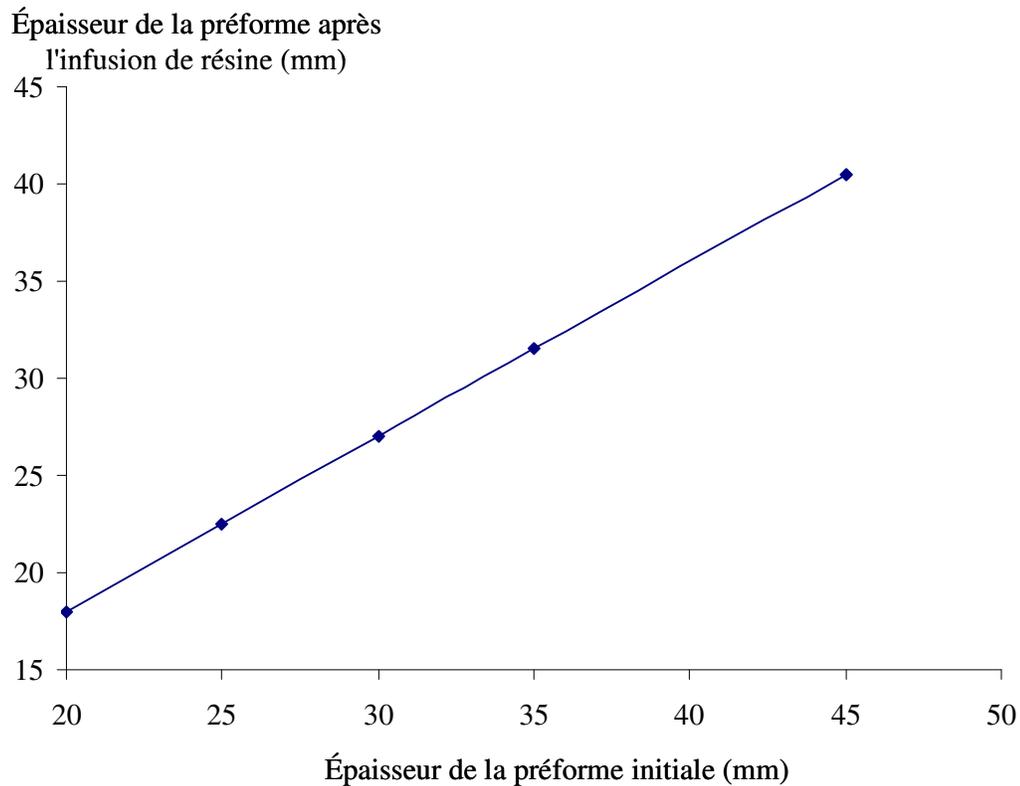


Figure 4-16 Evolution d'épaisseur de la préforme après l'infusion de résine en fonction de la variation d'épaisseur de la préforme initiale.

Les autres études sur les évolutions de la longueur et de la largeur de la préforme ont été effectuées. A cause de notre hypothèse d'écoulement de la résine : la résine remplit le drainant instantanément et ensuite infuse la préforme, Les résultats montrent que la longueur et de la largeur de la préforme influent uniquement sur la quantité de résine absorbée pendant le procédé d'infusion.

4.5.5 Comparaisons entre les différentes conditions aux limites

Différents types de conditions aux limites ont été proposés dans le paragraphe 3 dans ce chapitre. Les études numériques sur ces conditions aux limites sont présentées ci-dessous. Les calculs numériques dans ces études ont été effectués avec une viscosité de la résine de 0,03 Pa.s, une constante de Kozeny de 10 et la loi de comportement des tissus NC2. De plus, le nombre d'éléments du maillage est d'environ 1100 pour les deux calculs numériques.

Pour les conditions simples

Puisque nous avons supposé que la résine remplit le drainant instantanément, les résultats calculés par la simulation numérique pour les deux conditions simples (voir les figures 4-5 et 4-6) sont quasiment identiques, et montrent un temps de remplissage de 578,8 s, une épaisseur de la préforme de 13,94 mm et un volume de résine entrée de 0,667 L.

Pour les conditions industrielles

Les deux conditions industrielles (voir les figures 4-8 et 4-10) retenues par à rapport

aux essais expérimentaux du procédé LRI chez Hexcel sont intégrées dans le calcul de la simulation numérique, et ces résultats sont reportés dans le tableau 4-7. Les résultats obtenus pour les deux types de conditions aux limites industrielles montrent qu'il y a très peu de différence entre eux. Car pour l'instant, il manque une modélisation thermique dans notre modèle numérique, nous ne pouvons pas préciser les calculs lorsqu'il y a des changements sur les conditions thermiques. Comme dans notre modèle numérique, le drainant a été supposé indéformable, donc il n'a pas observé les évolutions sur le niveau des calculs en purement mécanique. De plus, la gravité est négligée, normalement, les calculs d'écoulement de résine sont pareilles dans ces deux conditions aux limites. En revanche, d'un point de vue industriel, les essais d'infusion de résine avec ces deux conditions sont quasiment identiques. Regarde notre modèle numérique isotherme, nous pensons que peut-être notre modèle est plus proche à la 2ème configuration industrielle (condition inversée, figure 4-9) d'infusion de résine, car la température de la résine et de la préforme approche celle de la plaque chauffante afin d'avoir le champ de température plus homogène.

La figure 4-17 présente l'évolution du temps de remplissage et du taux volumique de fibre en fonction du taux de remplissage défini comme le ratio entre le volume infusé et le volume total pour la condition standard (figure 4-8). Pendant la phase de remplissage, l'infusion de la résine devient de plus en plus difficile et le taux volumique de fibre diminue à cause du gonflement de la préforme. Pour le taux de remplissage, il évolue plus rapidement au début, puis très lentement à la fin. Comme la condition utilisée est une condition de remplissage total de l'élément, il y a un inévitable effet de retard, de temps caractéristique $V^f \cdot h^e$ où V^f est la vitesse moyenne du front dans un élément et h^e la hauteur de cet élément. Comme la vitesse diminue au fur et à mesure de l'infusion, ce retard, augmente, notamment à la fin de remplissage, ce qui explique la dérive de la courbe de taux de remplissage. La figure 4-18 montre les champs de vitesse et de pression de la résine quand la préforme est infusée à 70%. Le front de résine est observé, la vitesse du front est homogène et elle tend vers zéro sur la paroi. De plus, la pression est linéaire dans la préforme.

Tableau 4-7 Comparaisons pour les deux types de conditions aux limites industrielles.

	Condition inversée	Condition standard
Epaisseur de la préforme après la compaction (mm)	12,6	12,6
TVF après la compaction	63,5%	63,5%
Temps de remplissage (s)	432,1	487,3
Epaisseur de la préforme après l'infusion de résine (mm)	13,8	13,9
TVF après l'infusion de résine	57,71%	57,55%
Volume de résine absorbée (L)	0,658	0,662

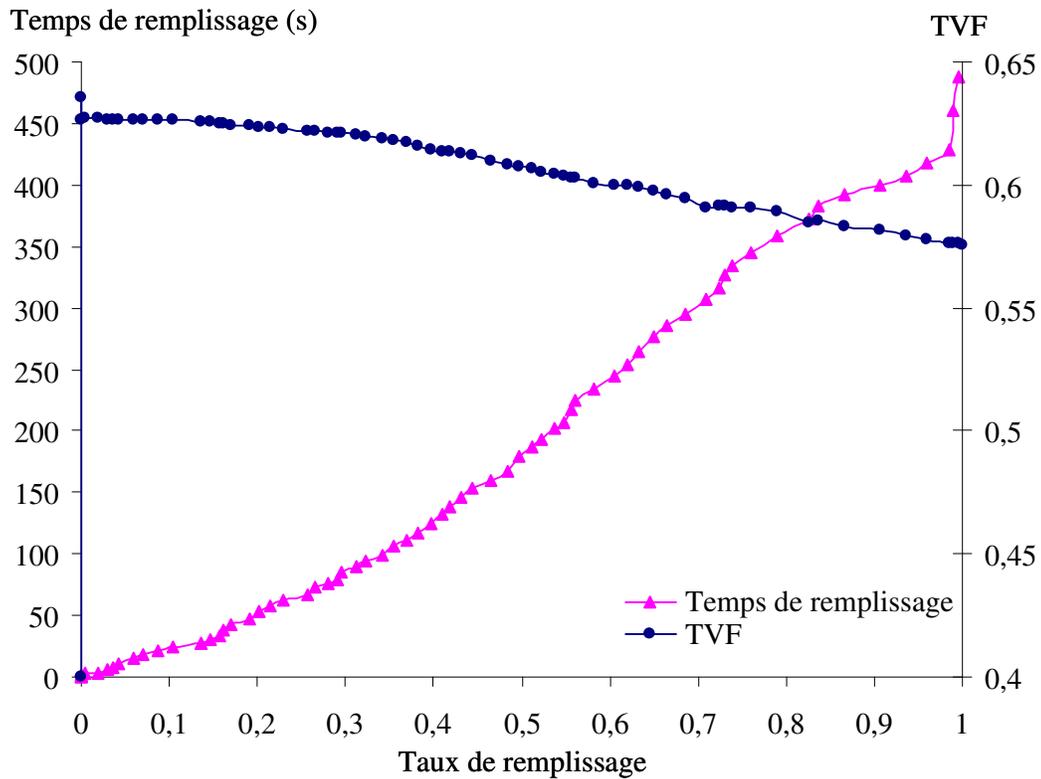


Figure 4-17 Evolution de la porosité et du temps de remplissage en fonction du taux de remplissage pour la configuration standard.

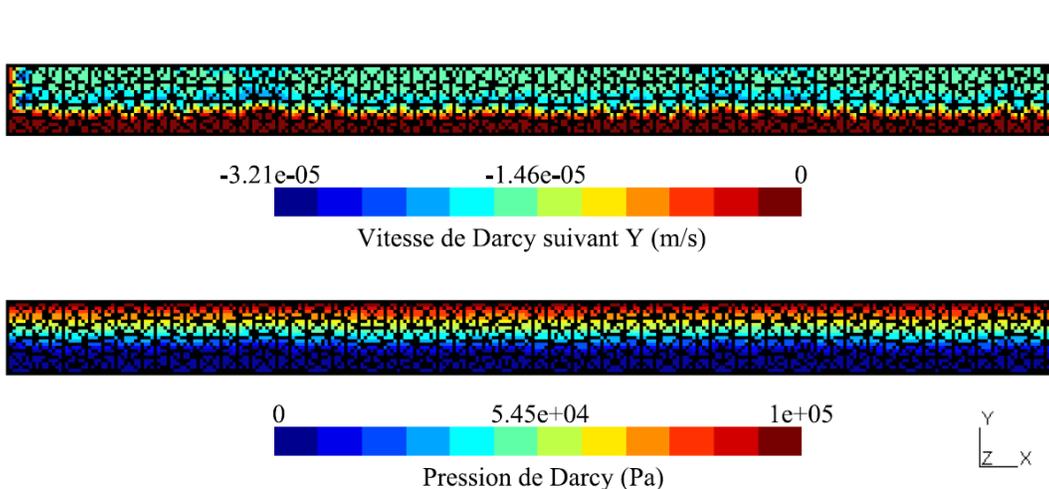


Figure 4-18 Champs de vitesse et de pression de résine dans la préforme saturée à 70% pour la condition standard.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les hypothèses et la démarche de notre modèle numérique. Nous avons optimisé les paramètres d'entrée par la caractérisation des calculs de la simulation numérique. Nous avons observé que le temps de remplissage, l'épaisseur de la préforme, le taux volumique de fibres (ou la porosité de la préforme) et la masse de résine absorbée sont quatre paramètres essentiels. Pour le temps de

remplissage, il évolue avec la viscosité de la résine et la perméabilité de la préforme. Théoriquement, le temps de remplissage est lié au volume ou à l'épaisseur de la préforme. L'épaisseur de la plaque est pilotée par l'équilibre des pressions dans le système. Le taux volumique de fibres, de même que la masse de résine absorbée, varient en fonction de cette épaisseur, de la géométrie des fibres et, pour la masse, de la surface de la plaque et de la densité de la résine. Enfin, comme la relation de Carman-Kozeny a été choisie, la perméabilité est liée au taux volumique de fibres. Par ailleurs, loi de comportement de la préforme et les conditions aux limites sont des informations très importantes pour les calculs de la simulation numérique, il y a relation directe entre la loi de comportement appliquée et la déformation de la préforme (surtout suivant l'épaisseur de la préforme). Les conditions aux limites décident les résultats de la simulation numérique. Finalement, pour avoir les paramètres mesurés, dans les chapitres suivants, les études expérimentales vont être développées et présentées suivant les points brefs ci-dessous:

- Pour l'écoulement de résine.

Il est important de caractériser le profil de la résine et le temps de remplissage pendant la phase de l'infusion. Car le temps de remplissage dépend fortement de sa viscosité, donc mesurer la température de la résine et de la préforme est indispensable.

- Pour le comportement de la préforme.

Le taux volumique de fibres est un paramètre clé pour les pièces composites finales et il correspond à l'épaisseur de la préforme. Donc, les études sur les évolutions du taux volumique de fibres et de l'épaisseur de la préforme doivent être mentionnées dans l'approche expérimentale. De plus, la masse de résine absorbée au cours du remplissage est liée aussi au taux volumique de fibres et l'épaisseur de la préforme.

Enfin, la loi de comportement et les conditions aux limites sous conditions industrielles vont être étudiées.

Grâce aux études expérimentales sur les paramètres importants présentés précédemment, nous pouvons améliorer la compréhension du procédé d'infusion. Il est possible de valider le modèle numérique en comparant les paramètres expérimentaux avec ces obtenus numériquement, et inversement.

*Partie 3 : Approche
expérimentale*

Chapitre 5: Mesure de la température dans différentes conditions expérimentales

5.1 Introduction	68
5.2 Principe	68
5.2.1 Les micro-thermocouples	68
5.2.2 Positionnement des micro-thermocouples.....	69
5.2.2.1 Etude du positionnement des capteurs in-situ dans la préforme	69
5.2.2.2 Positionnement des micro-thermocouples dans la préforme.....	70
5.2.2.3 Observations microscopiques.....	71
5.2.3 L'étalonnage des micro-thermocouples.....	72
5.3 Infusion de résine avec couvercle ouvert	73
5.3.1 Montage de l'essai	73
5.3.2 Evolution de la température pendant l'infusion de résine	74
5.3.2.1 Température de la résine d'entrée	74
5.3.2.2 Température suivant l'épaisseur de la préforme.....	75
5.3.2.3 Température dans le plan.....	76
5.4 Infusion de résine dans une étuve	77
5.4.1 Montage de l'essai	77
5.4.2 Evolution de la température pendant l'infusion de résine	78
5.4.2.1 Température d'entrée et de la sortie de la résine	78
5.4.2.2 Température suivant l'épaisseur de la préforme.....	79
5.4.2.3 Température dans le plan.....	80
5.5 Comparaison entre les deux conditions d'infusion de résine	81
5.6 Cuisson et refroidissement	82
5.7 Conclusion	85

5.1 Introduction

Dans la partie précédente, nous avons expliqué la modélisation et la simulation numérique du procédé par infusion de résine. Nous avons étudié numériquement le procédé d'infusion de résine en suivant l'influence des paramètres d'entrée, sur les paramètres de sortie. Les résultats numériques sont conformes aux évolutions théoriques des principaux paramètres liés au procédé d'infusion.

Comme nous l'avons précisé dans l'objectif du travail, nous aimerions améliorer la compréhension des procédés infusion de résine, valider le modèle numérique, et finalement, optimiser les paramètres importants de la fabrication. Pour ce faire une étude expérimentale est indispensable, elle va être présentée dans cette partie.

La température est un paramètre très important pendant les procédés d'infusion, elle a une forte interaction avec la viscosité de la résine qui lie directement à la vitesse et au temps de remplissage. Donc une technique de mesure à faible intrusivité va être proposée dans ce chapitre pour contrôler la température de la résine à travers la préforme pendant le procédé de l'infusion.

Pour suivre l'évolution de la température de la préforme pendant l'infusion, nous avons choisi des techniques basées sur des capteurs in-situ : les micro-thermocouples. Nous avons réalisé une plaque à partir d'empilements de 48 plis, des tissus UD (Uni Directionnel) de carbone, les mêmes que nous avons présentés dans le chapitre 2. La séquence de la préforme est $[0_6,90_6,90_6,0_6]_S$. Les dimensions du stratifié sont $350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$. Pour l'élaboration, nous étudions deux conditions différentes : soit la préforme est posée sur une plaque chauffante avec un couvercle ouvert, soit la préforme est mise dans une étuve vitrée. Ces deux essais d'infusion sont réalisés chez industrie (Hexcel Reinforcements), mais ils ne sont pas réalisés sous des conditions standards. Nous avons choisi ces deux essais, car ils ont des conditions thermiques différentes. De plus, pour améliorer la première compréhension de l'essai d'infusion de résine, nous pouvons suivre l'écoulement de la résine visuellement dans ces deux essais choisis. La température de la plaque chauffante et de l'étuve pendant l'infusion de résine sera énoncée dans la section 3 de ce chapitre. Une résine époxy de HexFlow® RTM-6 est utilisée, elle est pré-chauffée dans un pot à 80°C . Comme prescrit par le fabricant, la température pendant la phase de cuisson est de 180°C , elle est maintenue pendant une durée d'environ une heure et demie.

5.2 Principe

5.2.1 Les micro-thermocouples

Des micro-thermocouples type K (Chromel/Alumel) sont choisis et mis en œuvre dans notre mesure de la température pendant l'infusion de résine. Ils sont bien adaptés aux milieux oxydants et présentent une large gamme de températures. Ce type de micro-thermocouple est constitué de 2 fils de diamètre $0,079 \text{ mm}$, ce diamètre assurant une perturbation minimale pendant le procédé d'infusion. La tenue en température de ce type de micro-thermocouple est garantie entre -75°C et 250°C . Par rapport à des capteurs concurrents, comme les fibres optiques à réseau de Bragg par exemple [68], ils ont l'avantage d'être mieux connus des milieux industriels, pour une intrusivité et des performances métrologiques comparables.

Les données sont acquises par le biais d'une unité d'acquisition : l'AGILENT 34970A. Elle dispose de 20 voies d'acquisition. Il s'agit d'un multimètre permettant de mesurer des grandeurs électriques de courant, tension et de résistance. Des fonctionnalités sont proposées pour les mesures avec thermocouples, jauges de

5.2 Principe

déformations, thermistances et des résistances diverses. La fréquence d'acquisition répond à nos besoins (fréquence maximale de 20 valeurs/seconde), et sa résolution est de $0,1^{\circ}\text{C}$ en mesure de température.

5.2.2 Positionnement des micro-thermocouples

5.2.2.1 Etude du positionnement des capteurs in-situ dans la préforme

Un micro-thermocouple peut être assimilé à deux cylindres, chacun de diamètre $210\ \mu\text{m}$; le problème est de caractériser l'effet sur la microstructure du composite de la présence de ces cylindres. Nous allons baser la stratégie de positionnement des micro-thermocouples sur une étude d'intrusivité réalisée conjointement avec M. Demirel pour les capteurs à fibre optique (cylindre de diamètre $125\ \mu\text{m}$), présentée *in extenso* dans [69]. Dans cette étude, nous avons placé les fibres optiques suivant différentes configurations : parallèle aux fibres de carbone, perpendiculaire aux fibres de carbone, suivant la direction d'arrivée de résine. Nous avons aussi testé l'intrusivité de la fibre optique qui est placée entre 2, 4 et 6 plis de tissus. Les résultats sont reportés dans les figures ci-dessous :

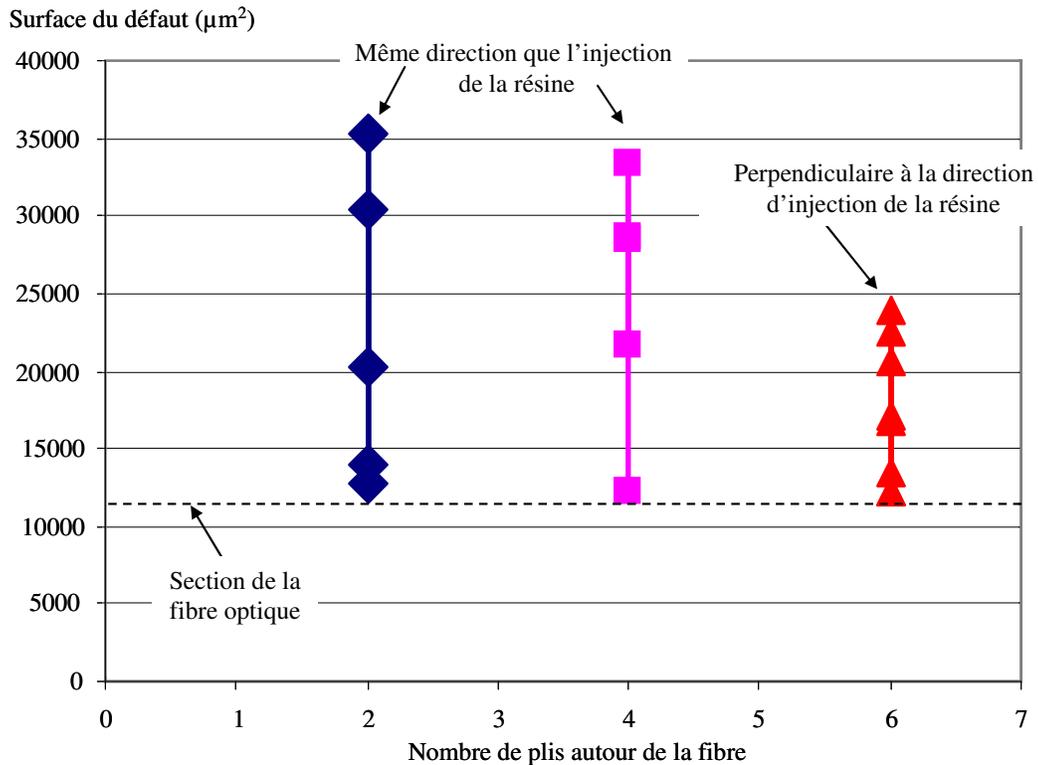


Figure 5-1 Surface du défaut^(*) de la fibre optique posée dans le sens parallèle aux fibres carbonées dans un pli (la surface de la fibre optique est incluse).

* Ici les défauts sont des trous ou/et des zones riches de résine.

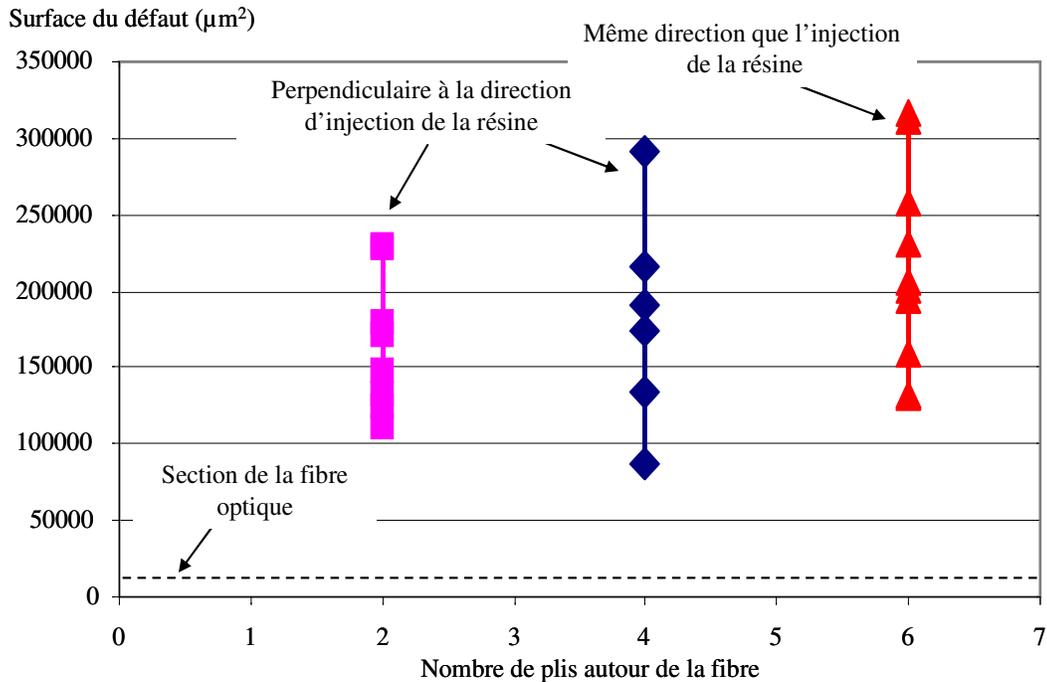


Figure 5-2 Surface du défaut de la fibre optique posée dans le sens perpendiculaire aux fibres carbonées dans un pli (la surface de la fibre optique est incluse).

Dans la figure 5-1, il est facilement observable que plus le nombre de plis autour de la fibre est grand, moins nous avons de défauts. Ce phénomène est inversé quand la fibre optique est placée dans le sens perpendiculaire aux fibres de carbone (voir figure 5-2). A partir de la comparaison des positionnements de la fibre optique dans le sens parallèle et perpendiculaire aux fibres de carbone, nous pouvons voir clairement que la taille de la surface du défaut est beaucoup plus élevée dans le sens perpendiculaire que le sens parallèle aux fibres de carbone. En revanche, dans ces études, nous n'avons pas obtenu d'avantages liés aux fibres optiques quand elles ont la même direction que l'écoulement de la résine.

5.2.2.2 Positionnement des micro-thermocouples dans la préforme

D'après la conclusion des études de positionnement, nous avons considéré que le plus important est de placer les thermocouples parallèlement aux fibres de carbone et entre le plus grand nombre de plis environnant. Pour fixer la position des micro-thermocouples, la méthode la plus simple est de coller les thermocouples sur les plis de tissu. Avant de tirer le vide sous la bâche, nous pouvons coller les micro-thermocouples à la position désirée en utilisant la même résine que celle du procédé d'infusion. La figure 5-3 montre le positionnement des micro-thermocouples. Tous sont parallèles au sens chaîne et collés sur le pli. Une fois que la préforme est compressée sous le sac à vide, tous les micro-thermocouples sont en principe parfaitement fixés à leur place pendant le procédé d'infusion de résine.

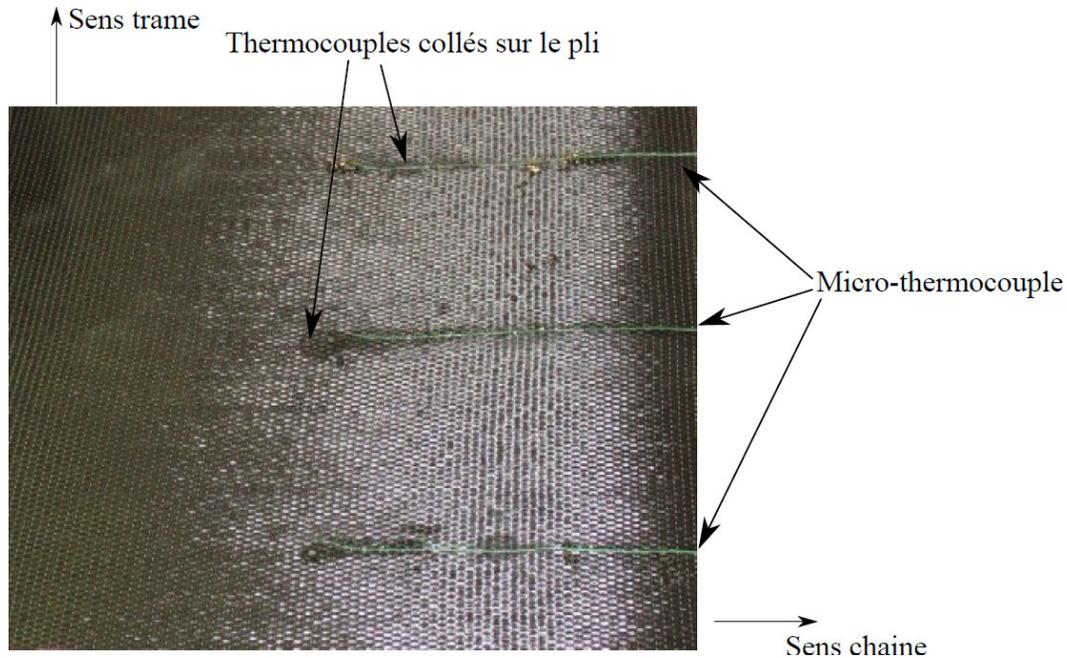


Figure 5-3 Positionnement des thermocouples dans la préforme.

5.2.2.3 Observations microscopiques

La figure 5-4 ci-dessous montre une image d'observation microscopique du micro-thermocouple choisi pour les essais de suivi de température dans la préforme et d'arrivée du front de résine dans la suite (voir le chapitre 6). Comme nous avons expliqué au début de ce chapitre, c'est en plaçant les micro-thermocouples parallèlement aux fibres de carbone que nous pourrions obtenir le moins de défauts. Les observations donnent que généralement, le défaut apparaît à côté du fil de trame. Sur l'image 5-4, on observe distinctement les deux conducteurs (fils Chromel/Alumel) avec diamètre $79\ \mu\text{m}$ au centre de leur isolant intérieur respectif. Chaque isolant intérieur présente la forme d'un cercle de diamètre $210\ \mu\text{m}$. Les deux fils sont groupés dans une gaine de forme elliptique ($430\ \mu\text{m} \times 660\ \mu\text{m}$), ce qui a pour conséquence l'apparition d'un petit vide pouvant engendrer un problème d'étanchéité. Pour éviter ce problème, nous avons choisi « Tetra Etch », produit de la société américaine GORE, que nous utilisons pour rendre la surface des gaines en téflon des câbles électriques adhérente avant d'y appliquer du silicone. Nous le faisons pour les fils des micro-thermocouples côté connecteurs. Les jauges protégées avec du silicone et les câbles étanchés de cette manière ne présentent pas de défaut d'étanchéité significatif.

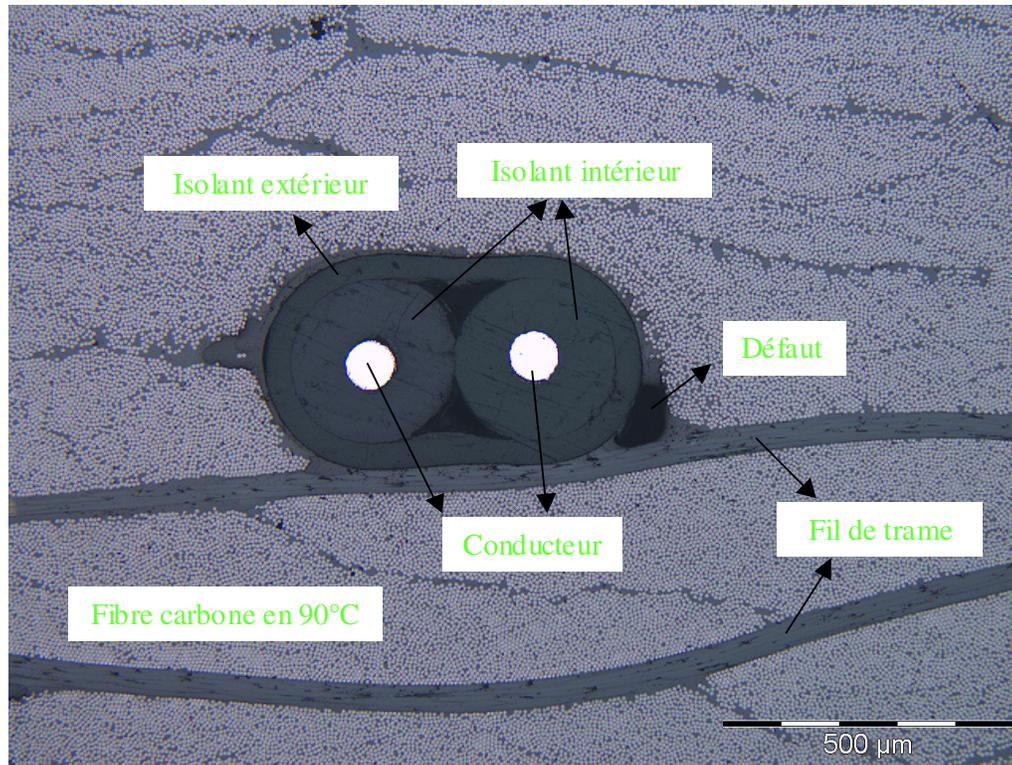


Figure 5-4 Observation microscopique du micro-thermocouple choisi dans nos essais.

5.2.3 L'étalonnage des micro-thermocouples

Les micro-thermocouples nécessitent d'être étalonnés avant chaque mesure de température. Notre étalonnage pour les micro-thermocouples est effectué dans une étuve avec température stabilisée (7 paliers). Ensuite, les réponses des thermocouples sont comparées avec les mesures par sonde platine (PT100). La précision sur cet étalonnage est de $0,1^{\circ}\text{C}$. Par exemple, le tableau 5-1 montre les 7 températures stabilisées, mesures prises par un micro-thermocouple et une PT100. Après la correction des réponses de PT100 basée sur un étalonnage du fabricant, nous avons considéré que les réponses de PT100 sont les températures correctes, notés A. Après les comparaisons entre les vraies températures A et les mesures par micro-thermocouple (valeur notée B, C'est une valeur moyenne des 12 mesures pendant 2 min), le coefficient de correction C entre deux mesures peut être obtenu par la relation $C=A-B$. A partir la variation du coefficient C en fonction de la température du thermocouple B, nous pouvons approximer une courbe de l'étalonnage polynomial qui se présente dans la figure 5-5. Finalement, chaque mesure par thermocouple peut être corrigée et fournir facilement les températures correctes A par les calculs $A=B+C$.

Tableau 5-1 Mesure de la température par micro-thermocouple et PT100.

Températures de l'étuve	19°C	32°C	60°C	90°C	120°C	155°C	190°C
Réponses de PT100 (A)	19,1°C	31,8°C	60,8°C	89,9°C	118,8°C	152,7°C	189,9°C
Réponses de TC (B)	19,22°C	31,82°C	60,62°C	89,56°C	118,32°C	152,12°C	189,26°C
Coefficient de correction de TC (C)	-0,12°C	-0,02°C	0,18°C	0,34°C	0,48°C	0,58°C	0,64°C

Coefficient de correction de thermocouple (C)

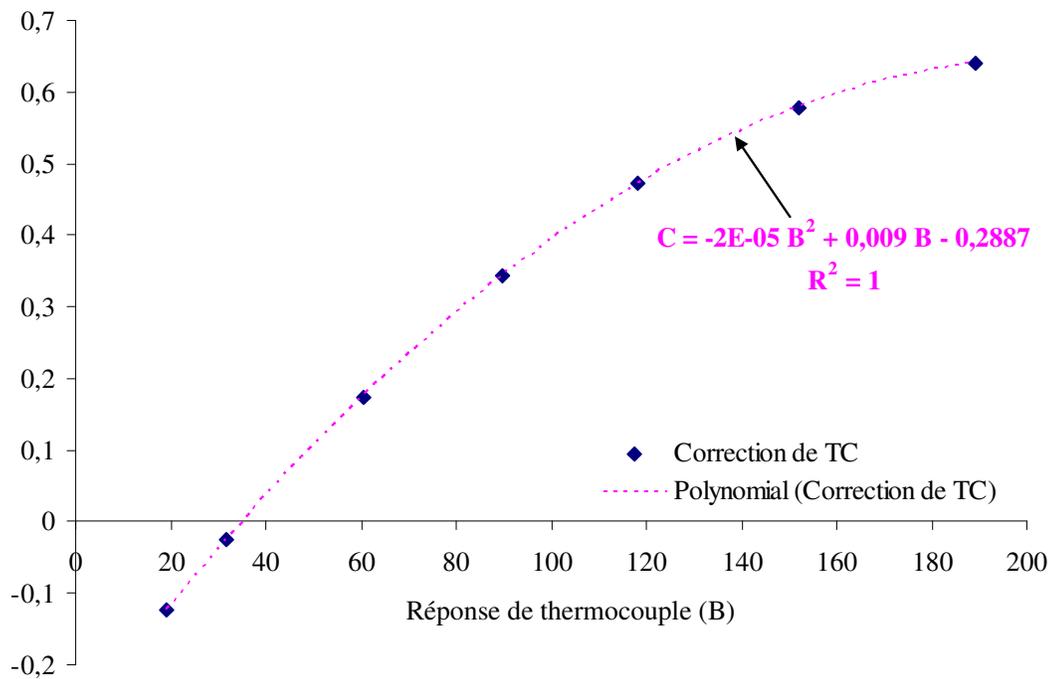


Figure 5-5 Courbe d'étalonnage d'un micro-thermocouple.

5.3 Infusion de résine avec couvercle ouvert

5.3.1 Montage de l'essai

La figure 5-6 est le montage de l'essai d'infusion de résine sur plaque chauffante. Le couvercle et la plaque chauffante sont indiqués sur cette figure, l'arrivée et la sortie de résine sont également représentées. Pendant la phase d'infusion de résine, le couvercle du système est maintenu ouvert et la température de la plaque chauffante est fixée à 120°C. La préforme et l'élaboration ont déjà été décrits dans l'introduction de ce chapitre. Afin d'avoir une information transverse suivant l'épaisseur de la plaque et une information longitudinale dans un plan, nous avons placé 9 micro-thermocouples dans la préforme. Les positions des micro-thermocouples sont montrées sur la figure 5-7 : 3 thermocouples sont placés suivants l'épaisseur de la préforme (voir thermocouples 6,7 et 8), un thermocouple (TC9) est juste au-dessous du drainant et les thermocouples

restant (TC1 jusqu'à TC5) sont posés sur le 46^{ème} pli. Par ailleurs, pour connaître l'évolution de la température de la résine en entrée, un micro-thermocouple (TC 10) est mis au fond du tuyau souple « Ω » (pour ce tuyau souple, voir chapitre 2) à l'entrée de résine.

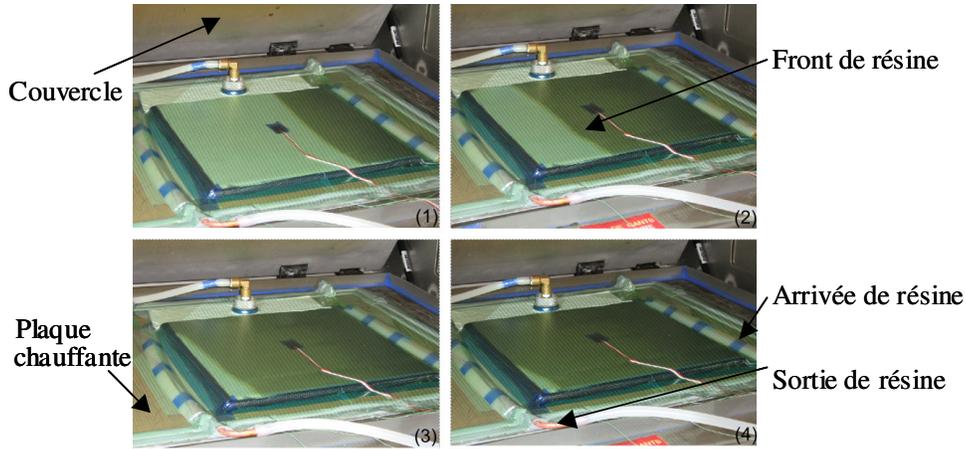


Figure 5-6 Infusion d'une plaque par le procédé LRI avec couvercle ouvert.

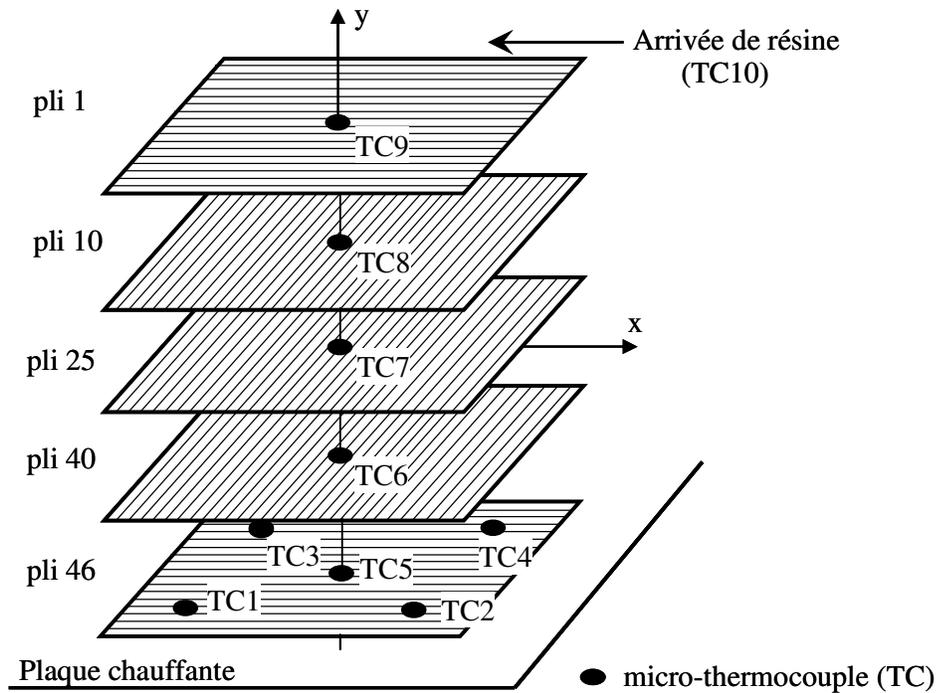


Figure 5-7 Empilement de la préforme et positions des micro-thermocouples (TC).

5.3.2 Evolution de la température pendant l'infusion de résine

5.3.2.1 Température de la résine d'entrée

La figure 5-8 représente l'évolution de température à l'entrée de résine mesurée par le thermocouple 10 qui est placé dans le tuyau souple d'entrée. Le couvercle du système d'infusion de résine est fermé initialement. Lorsque l'essai commence, le couvercle est ouvert, par conséquent la température de tout le système baisse. Donc la température diminue au début de la figure 5-8. Ensuite, une chute de température plus

5.3 Infusion de résine avec couvercle ouvert

brutale est remarquée car la résine « froide » (80°C) entre dans le tuyau souple. Finalement, deux phénomènes entrent en compétition : d'une part, à cause de la plaque chauffante la température du système augmente pendant l'infusion de résine ; d'autre part, la résine « froide » continue d'entrer dans le tuyau et équilibre l'effet de la plaque chauffante. Un équilibre est atteint avec une température restant à un niveau faible, entre 70°C et 73°C pendant la plupart du temps de remplissage.

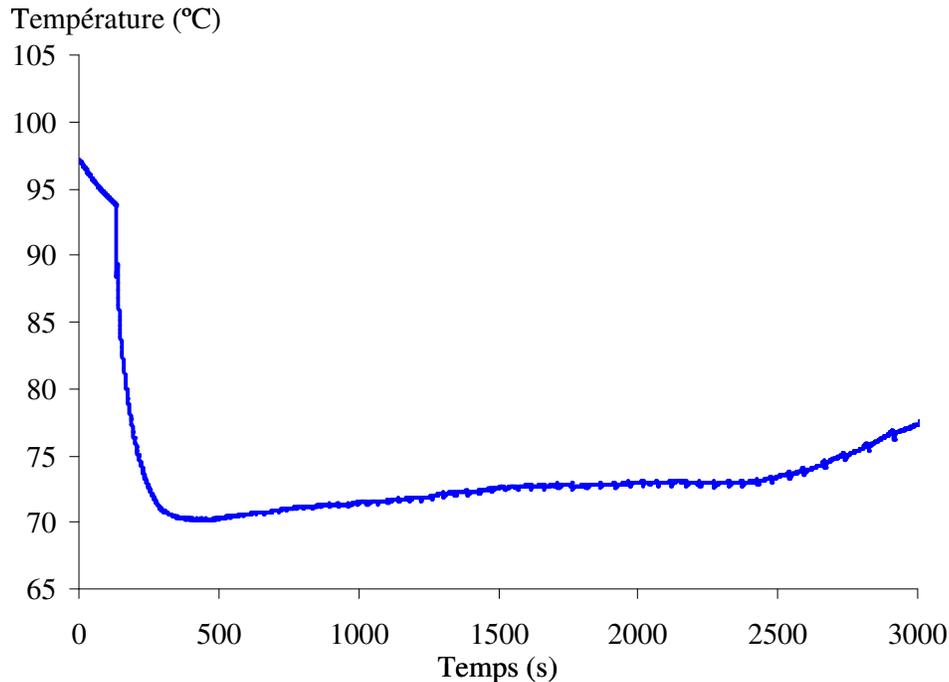


Figure 5-8 Température du micro-thermocouple placé dans le tuyau d'entrée du système d'infusion.

5.3.2.2 Température suivant l'épaisseur de la préforme

Les évolutions de la température à différentes épaisseurs de la préforme sont reportées sur la figure 5-9. Avant l'infusion de résine, il y a une grande différence de température, d'environ 30°C, au sein de la préforme. Les 5 courbes de température présentent le même type d'évolution. Comme nous avons indiqué précédemment, le couvercle du système est fermé initialement, une fois le couvercle ouvert la résine entre, la préforme est refroidie et la température des thermocouples diminue. A cause de la condition de transfert de chaleur, les thermocouples placés plus bas (TC5 et TC6) ont une petite zone d'augmentation et de stabilisation de température avant la zone de diminution de température. La résine continue d'entrer dans la préforme et la température continue de diminuer. Comme précédemment, la compétition entre l'apport de chaleur de la plaque chauffante et le refroidissement lié à l'arrivée de la résine provoque l'apparition d'un minimum, suivi d'une remontée plus ou moins brutale. La température devient de plus en plus stable car la phase d'infusion de résine tend vers la fin de cycle. Après 3000 s, nous avons observé que la quantité continue de résine entre dans le tuyau souple en sortie, la phase de l'infusion peut être considérée comme terminée. Enfin, gradient de température d'environ 20°C est observé dans cette préforme infusée.

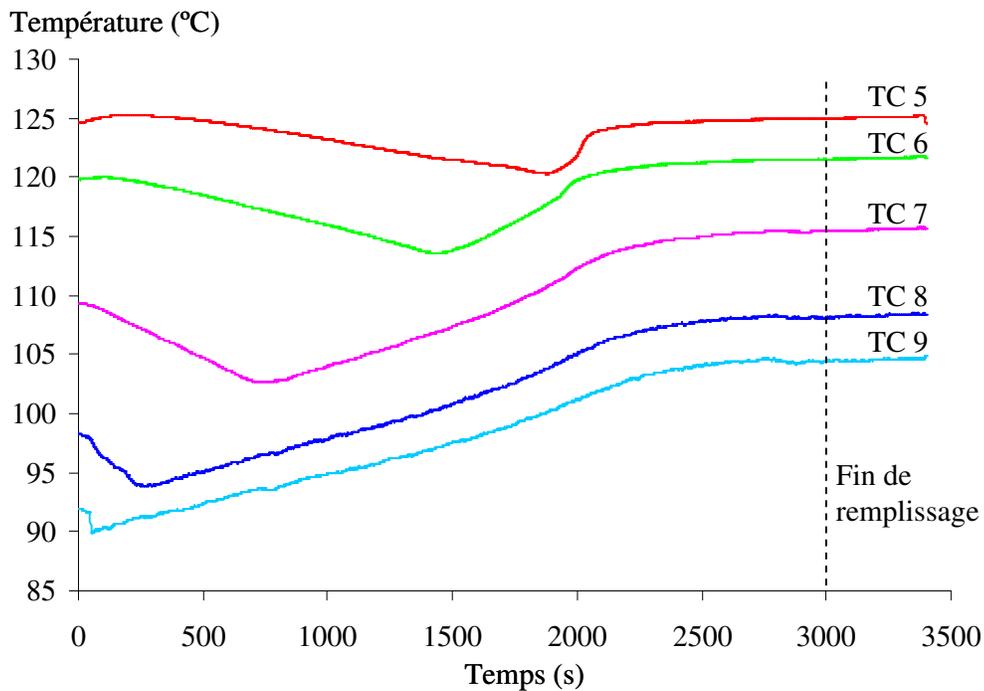


Figure 5-9 Températures mesurées par les micro-thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme pendant l'infusion de résine avec couvercle ouvert.

5.3.2.3 Température dans le plan

La figure 5-10 donne l'évolution de la température dans le plan du 46^{ème} pli mesurée par 5 micro-thermocouples. Les positions des thermocouples sont représentées sur la figure 5-7. Le thermocouple 5 est situé au centre de ce pli, les autres thermocouples sont autour dans le plan à 5 cm de distance du bord de la plaque. Un champ non-homogène de température est observé sur le 46^{ème} pli, le centre du pli est plus chaud qu'à ses extrémités et nous obtenons 12°C de gradient de température dans le plan de ce pli. Les 5 températures ont la même évolution que précédemment et nous pouvons décrire cette évolution en utilisant la même explication que pour les thermocouples dans l'épaisseur de la préforme. Les températures remontent rapidement à la température stabilisée après être arrivé à leurs minimums, car ces thermocouples sont placés très proche de la plaque chauffante. A cause du couvercle ouvert, le pourtour de la préforme est beaucoup refroidi par l'extérieur à la fin de l'infusion, donc finalement, nous observons environ 20°C de gradient température.

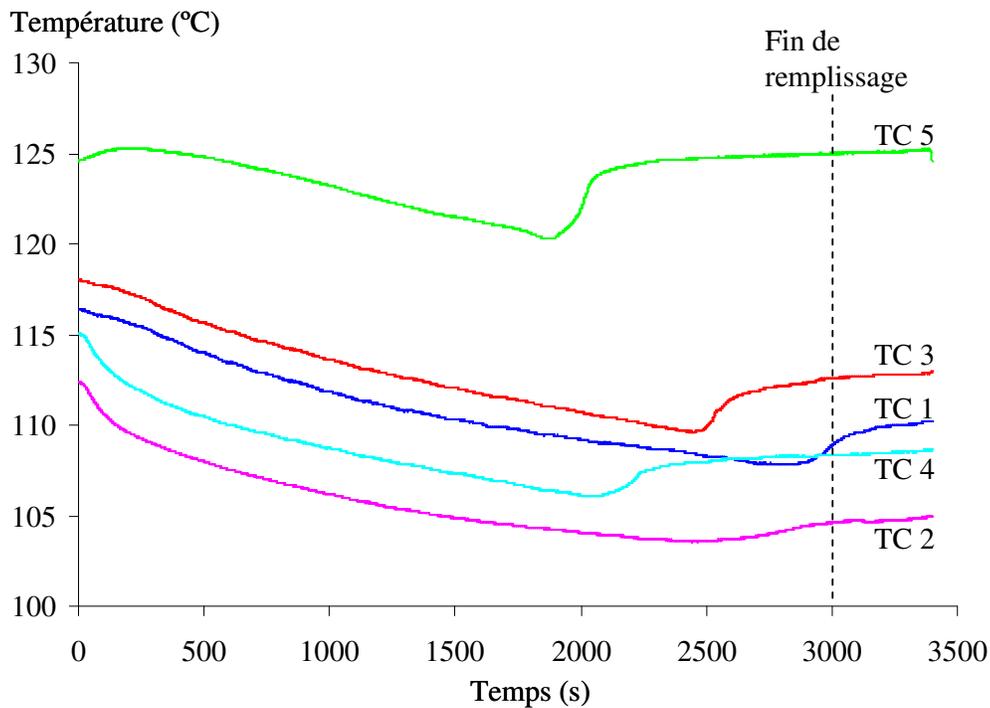


Figure 5-10 Températures mesurées par les micro-thermocouples placés dans le 4^{ème} pli de la préforme pendant l'infusion de résine avec couvercle ouvert.

5.4 Infusion de résine dans une étuve

5.4.1 Montage de l'essai

La figure 5-11 présente un essai d'infusion de résine dans une étuve vitrée. L'étuve est chauffée par l'intermédiaire des 4 parois, il se crée donc un champ de température très homogène. Pour bien montrer les composants du système d'infusion, nous avons incliné le montage et pris cette photo ci-dessous, par contre, dans l'essai réel, la préforme est posée avec un angle nul pour éviter la perturbation de l'accélération de la pesanteur. Le positionnement de l'entrée et de la sortie de résine est le même que pour l'essai précédent. La préforme est aussi la même que précédemment. Pour le procédé, il y a un petit changement sur la température initiale de la préforme, nous avons fixé la température de l'étuve à 105°C pour pouvoir comparer cet essai et l'essai précédent avec couvercle ouvert.

Comme pour le premier essai de suivi de température, nous préférons obtenir les informations transversale et longitudinale dans un même cas test. Les 9 micro-thermocouples type K sont choisis et placés aux endroits définis précédemment, ils sont décrits sur la figure 5-7. Une comparaison est présentée dans la section suivante (section 5). De plus, pour maîtriser les évolutions de la température de la résine en entrée et en sortie, un micro-thermocouple (TC 10) et un autre (TC11) sont mises au milieu des tuyaux souples « Ω » à l'entrée et la sortie de résine.

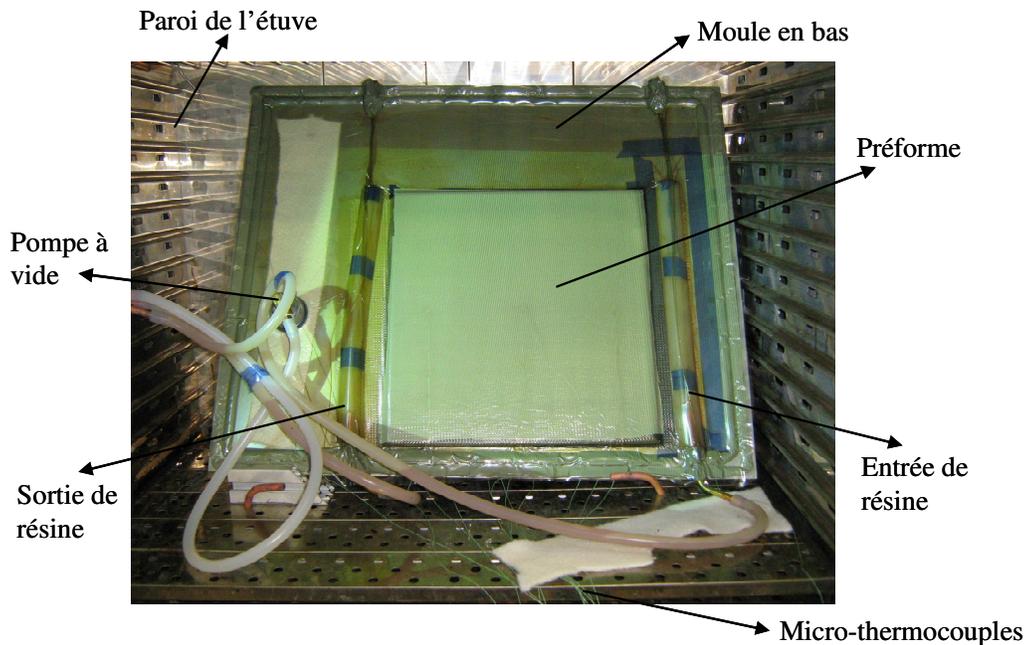


Figure 5-11 Infusion d'une plaque par le procédé LRI dans une étuve avec deux portes en verre.

5.4.2 Evolution de la température pendant l'infusion de résine

5.4.2.1 Température d'entrée et de la sortie de la résine

Les températures de l'arrivée et de la sortie de résine pendant l'infusion de résine sont représentées sur la figure 5-12. Pour l'évolution de la température de résine en entrée, on constate le même profil que celui dans le test sur la plaque chauffante avec le couvercle ouvert. En effet, l'étuve permet de conserver la chaleur, et donc la température de la résine en entrée diminue un maximum de 8°C. Il est plus faible que les 25°C du test précédent. Pour 105°C (consigne de l'étuve), la température de la résine en entrée reste à un niveau assez chaud pendant la phase de remplissage, entre 90°C et 96°C. De plus, la température de la sortie de résine est très stable au cours de l'infusion car avant la résine sort, cette température présente toujours une température du tuyau souple. Elle est plus faible que la température initiale de la préforme, car les fibres de carbone ont une très bonne conductivité thermique. A la fin de remplissage, la résine chaude (environ 104°C, elle est réchauffée pendant son écoulement dans la préforme) entre dans le tuyau souple, donc on a vu une augmentation de température de la sortie.

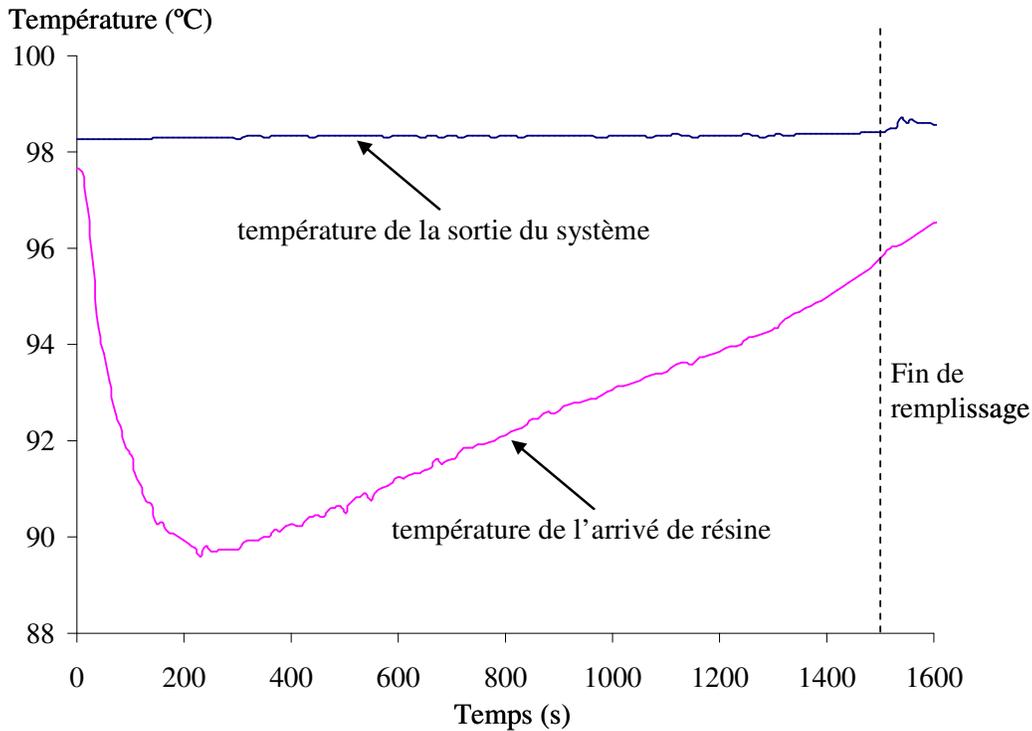


Figure 5-12 Température du micro-thermocouple placé dans le tuyau d'entrée et de la sortie de résine.

5.4.2.2 Température suivant l'épaisseur de la préforme

La figure 5-13 présente les évolutions de la température dans la préforme. Nous observons qu'il y a une très faible différence de température suivant l'épaisseur de la préforme au début (environ 3°C) et à la fin du remplissage (2,5°C). Généralement, les 5 évolutions de la température sont les mêmes. Il y a une petite zone stabilisée avant que la résine entre dans le système. Au début de l'infusion, la résine entre par une dépression et elle refroidit entièrement le système. La température de TC 9 chute d'abord avec une diminution très forte car TC 9 est placé juste en-dessous du drainant, par contre, pour le TC5 posé plus bas dans la préforme, sa température chute avec une pente faible. L'infusion de résine est considérée comme terminée après 1500 s mesurés visuellement (on observe que la résine a totalement rempli le tuyau de sortie).

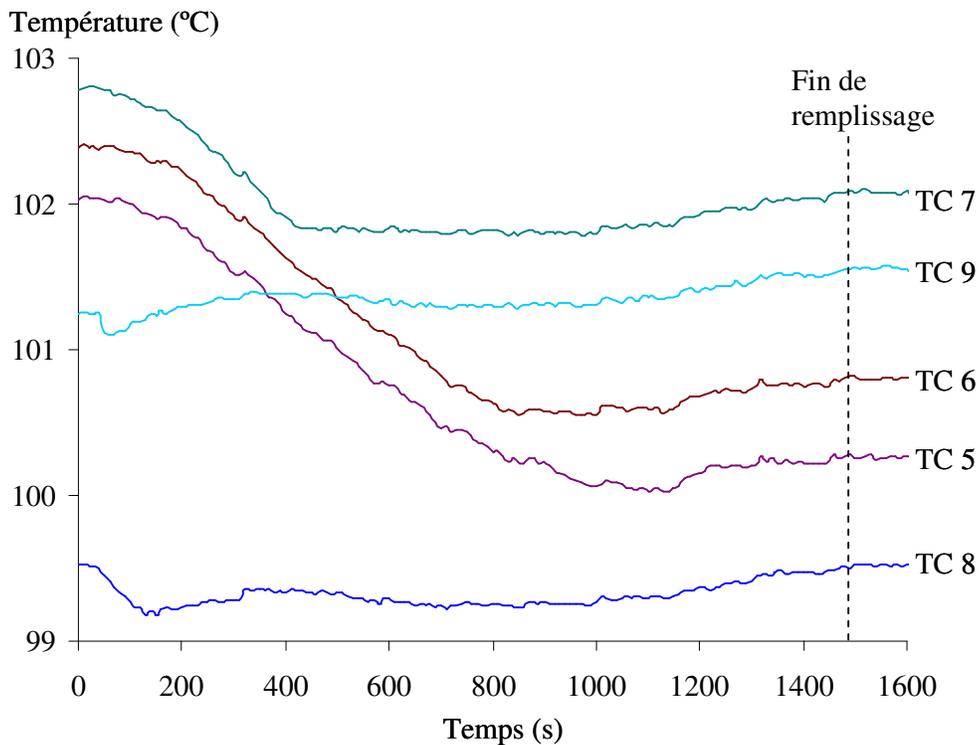


Figure 5-13 Températures mesurées par les micro-thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme pendant l'infusion de résine dans une étuve.

5.4.2.3 Température dans le plan

Sur le plan du 46^{ème} pli, les 5 températures mesurées ont la même évolution et sont présentées sur la figure ci-dessous (voir la figure 5-14). La différence de température sur ce plan avant l'infusion est inférieure à 3 °C. Nous savons que les TC2 et TC4 sont placés du côté de l'entrée de résine, lorsque la résine entre dans le système d'infusion, les températures diminuent avant les autres thermocouples et avec une pente de diminution plus forte, surtout pour le TC2, dont la température diminue de près de 4°C au début du remplissage à cause de l'arrivée de la résine. Après la diminution, les températures des 5 thermocouples augmentent très lentement par l'effet de l'étuve. A partir de 1500 s, la résine commence à sortir de la préforme et donc les températures des thermocouples sont stabilisées. Enfin, nous avons environ 5°C de différence de température sur un plan. Cette variation est plus grande que celle dans l'épaisseur de la préforme.

5.5 Comparaison entre les deux conditions d'infusion de résine

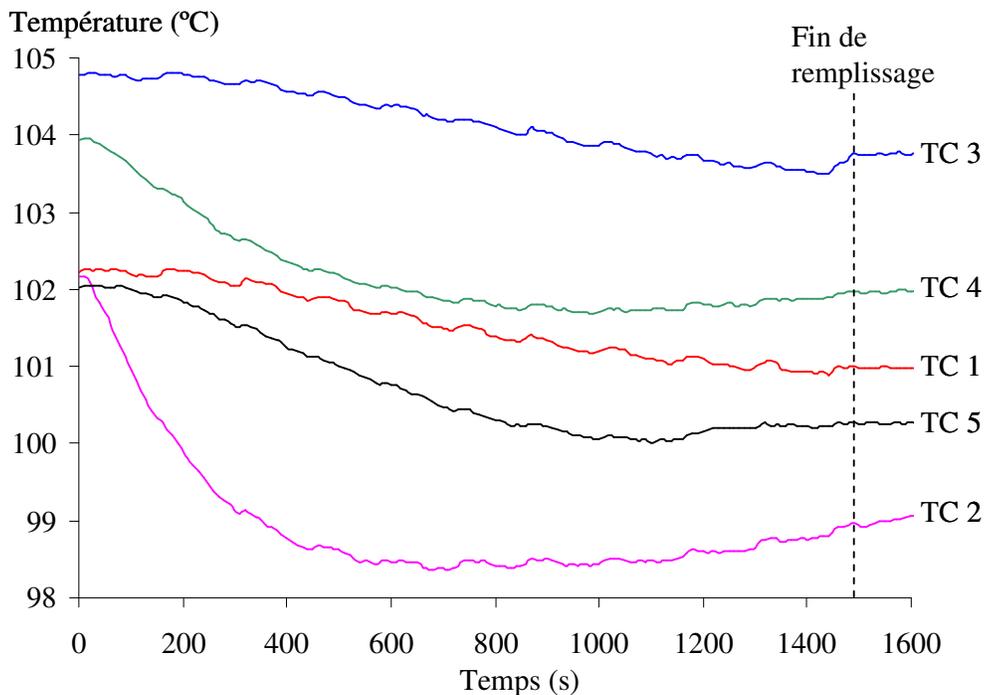


Figure 5-14 Températures mesurées par les micro-thermocouples placés dans le 46^{ème} pli de la préforme pendant l'infusion de résine dans une étuve.

5.5 Comparaison entre les deux conditions d'infusion de résine

Pour les deux conditions d'infusion de résine présentées précédemment, les résultats expérimentaux sont donc relativement différents, car nous avons changé la condition thermique lors de la fabrication. Les résultats et les comparaisons sont reportés dans le tableau 5-2.

Au niveau de la différence de température suivant l'épaisseur, la température est beaucoup plus homogène dans l'étuve ; les variations trouvées sont 10 fois plus petites que dans la condition de fabrication avec un couvercle ouvert. Sur un plan du même pli, les variations de température obtenues pour la fabrication dans une étuve restent 4 fois plus petites que celles relevées dans le cas d'une cuisson avec une plaque chauffante avec couvercle ouvert. La différence de conditions thermiques entre les deux essais a directement perturbé la température de résine à l'entrée : elle est beaucoup plus faible dans le test du couvercle ouvert. A cause de la faible température de résine à l'entrée, la résine s'écoule moins bien dans le drainant et la préforme, donc le temps de remplissage est plus élevé. Pour la qualité de la pièce composite finale, lors du test à couvercle ouvert, le mauvais écoulement a donné plus de défauts, notamment plus de porosités dans la préforme. Nous pouvons enfin observer que la pièce obtenue est plus épaisse et que son Taux Volumique Fibre (TVF) est plus petit. De plus il y a moins de quantité de résine absorbée par la préforme pendant la phase du remplissage.

Tableau 5-2 Comparaisons entre deux essais d'infusion de résine : sur plaque chauffante avec couvercle ouvert, et dans une étuve.

	Couvercle ouvert	Dans une étuve
Différences de température suivant l'épaisseur (°C)	30 (avant l'infusion)	3 (avant l'infusion)
	20 (après l'infusion)	2,5 (après l'infusion)
Différences de température sur un plan du pli (°C)	12 (avant l'infusion)	3 (avant l'infusion)
	20 (après l'infusion)	5 (après l'infusion)
Température de la résine en entrée	$70^{\circ}\text{C} < T < 78^{\circ}\text{C}$	$89,5^{\circ}\text{C} < T < 96^{\circ}\text{C}$
Temps de remplissage du drainant (s)	130	120
Temps de remplissage du système d'infusion (s)	3000	1500
Epaisseur de la pièce composite finale (mm)	12,4	12,1
TVF final	60%	62%
Masse de résine dans la pièce composite finale (g)	520	540

5.6 Cuisson et refroidissement

Pour un procédé d'infusion, une fois que nous avons fini la phase du remplissage dans la préforme, nous passons à une phase de montée en température puis à la cuisson et au refroidissement. Pour une fabrication standard, nous adoptons 180°C comme température de cuisson et la vitesse de montée en température est généralement $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Concrètement, la montée en température nécessite 20 à 30 min et le temps de cuisson est maintenu minimum 90 min. Pour le test sur une plaque chauffante avec le couvercle ouvert, le couvercle doit être maintenu fermé pendant la phase de montée en température et de cuisson. Normalement, lorsque le remplissage de la préforme est fini, les tuyaux d'entrée et de sortie de la résine sont liés ensemble pour équilibrer l'intérieur du système. En revanche, la dépression est toujours présente dans la préforme et permet de maintenir une pression de compaction pour la polymérisation de résine.

Le temps de cuisson et de refroidissement étant long, nous n'avons pas suivi totalement ces deux phases dans les deux conditions d'essai LRI qui sont présentés précédemment. Pour bien présenter l'évolution de température dans la phase de cuisson et de refroidissement, nous avons choisi un autre essai d'infusion de résine par LRI dans une étuve. Dans ce cas, la résine, les fibres, les plis et l'élaboration sont toujours les mêmes, mais le nombre de plis a été modifié 24 au lieu de 48 et la séquence de l'empilement est relativement modifiée à $[0_6,90_6]_s$. Pour les mesures, nous avons utilisé

5.6 Cuisson et refroidissement

13 micro-thermocouples pour suivre la température à l'intérieur du système d'infusion : 11 thermocouples dans la préforme, 2 thermocouples dans le tuyau « Ω » en entrée et en sortie (voir les positions sur la figure 5-15).

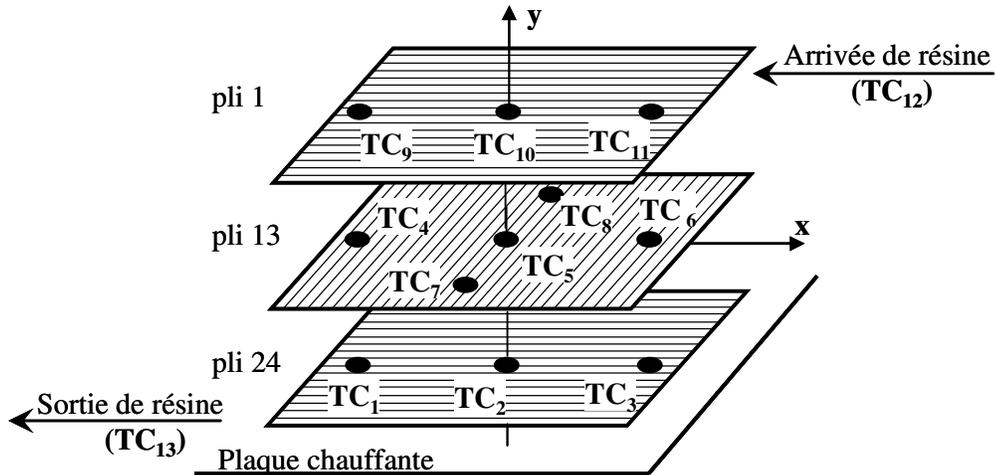


Figure 5-15 Les positionnements des micro-thermocouples dans le système d'infusion de résine par le procédé LRI dans une étuve.

Les 13 courbes sur la figure 5-16 présentent les évolutions de la température des 13 micro-thermocouples dans la phase de cuisson lors du procédé. Pour les 11 thermocouples placés dans la préforme, qui ont exactement les mêmes évolutions de température, la différence de température entre les thermocouples est inférieure 3°C. Pour les deux thermocouples dans le tuyau souple silicone, on obtient aussi le même profil d'évolution de la température et la différence entre les deux températures est très faible. Les thermocouples dans la préforme et ceux dans le tuyau ne mesurent pas la température pour le même matériau, donc ils n'ont pas vraiment le même résultat. Pour les thermocouples dans la préforme, nous observons un saut de température qui vient des effets thermiques de la préforme du fait de sa bonne conductivité thermique.

La figure 5-17 montre les évolutions de la température dans la phase de refroidissement. Comme nous l'avons présenté dans la phase de cuisson, nous pouvons diviser en deux grands groupes pour ces 13 thermocouples : les thermocouples dans la préforme et les thermocouples dans le tuyau souple silicone. Les thermocouples dans chaque groupe ont la même évolution de température, par contre, entre les deux groupes, les évolutions sont un peu différentes. On note en particulier un pic dans la pièce correspondant au temps de réticulation de la résine. Ce pic vient surtout des effets de l'exothermie de réaction de la résine et on observe que la taille de ce pic est environ 10°C, identique à ce qui a été trouvé dans les travaux de S.VACHER [68]. On peut estimer que la fin de la réticulation pour ces conditions de fabrication est obtenue au bout de 2000 s. Pendant le refroidissement, la diminution de la température de la préforme et du tuyau souple est non linéaire. Normalement, les tuyaux silicones ne sont pas bon conducteurs de chaleur, donc ces diminutions de température sont considérées moins faibles que celui de la préforme. Par contre, nous observons des diminutions de température plus rapides dans les tuyaux souples que la préforme, nous pensons que le volume du matériau devient prépondérant dans cette phase, le volume de la préforme est donc plus grand que le tuyau souple « Ω ».

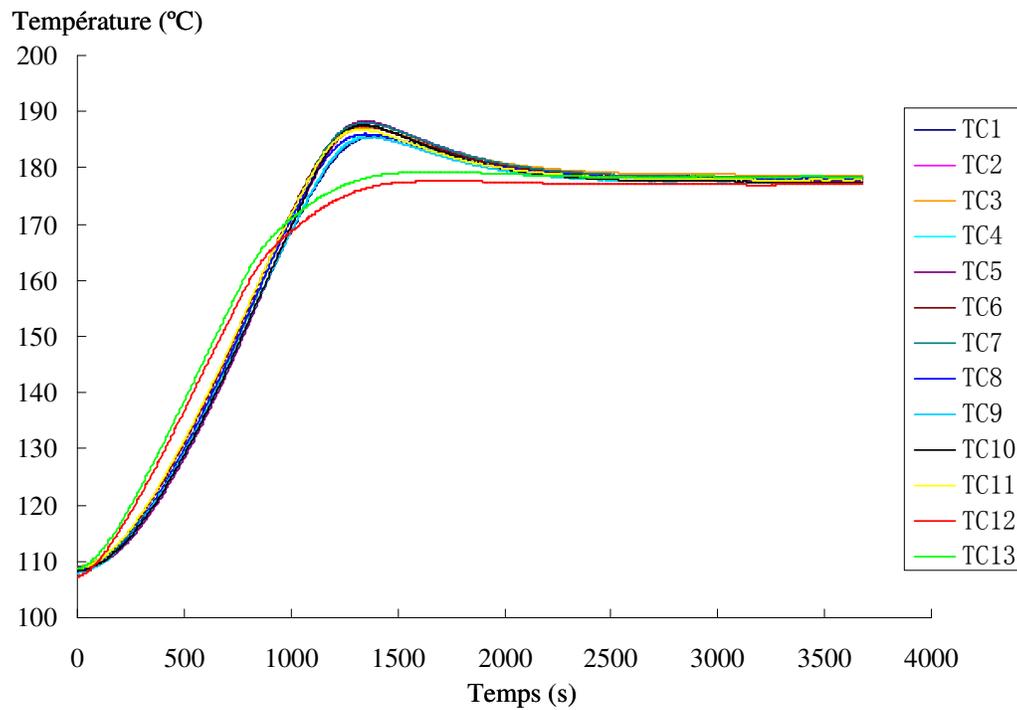


Figure 5-16 Suivi de la phase de la cuisson pendant le procédé LRI par des micro-thermocouples.

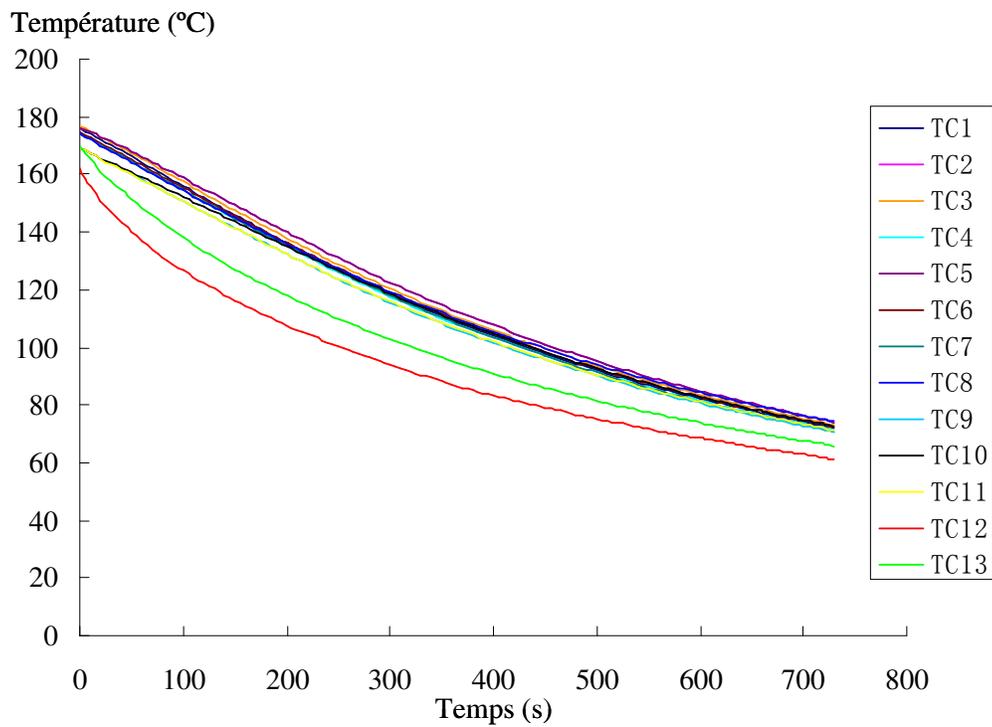


Figure 5-17 Suivi de la phase de refroidissement pendant le procédé LRI par des micro-thermocouples.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré la détection de la température dans la préforme par des micro-thermocouples pendant le procédé LRI avec différentes conditions aux limites thermiques. Pour l'évolution de la température au cours de la phase d'infusion de résine, globalement, nous observons qu'au début il y a une zone de la stabilisation, ensuite la résine refroidit tout le système et une chute de température est obtenue, enfin, une zone d'augmentation de température est remarquée, elle est due à la plaque chauffante qui chauffe toujours la préforme. Dans la phase de cuisson, la zone isotherme est bien obtenue après un pic lié à la réticulation de la résine. Enfin, une diminution de la température non-linéaire est observée dans la phase du refroidissement.

Pendant l'infusion de résine, les résultats obtenus montrent que plus la résine est proche du thermocouple, plus la température diminue. Par conséquent, on peut penser que le temps correspondant au minimum de température peut donner une information sur la position du front de résine. Ces hypothèses vont être comparées et vérifiées par une autre méthode de mesure dans les chapitres suivants.

Chapitre 6 : Suivi l'écoulement de résine pendant le procédé LRI

6.1 Introduction	88
6.2 Méthode utilisant des fibres optiques.....	88
6.2.1 Les fibres optiques	88
6.2.2 Capteur à fibre optique par réflexion de Fresnel	89
6.2.3 L'étalonnage.....	90
6.3 Montage de l'essai de détection du front de résine.....	91
6.4 Suivi du procédé LRI par micro-thermocouple et fibre optique	93
6.5 Détection du front de résine	94
6.5.1 Temps zéro de la phase de remplissage.....	94
6.5.2 Capteur de Fresnel	94
6.5.3 Micro-thermocouples	95
6.5.3.1 Suivant l'épaisseur de la préforme	95
6.5.3.2 Dans le plan.....	96
6.5.4 Bilan	98
6.6 Caractérisation du front de résine avec des micro-thermocouples distribués	98
6.6.1 Ecoulement de résine sur un plan dans le test couvercle fermé	99
6.6.2 Ecoulement de résine dans le test couvercle ouvert.....	100
6.6.3 Ecoulement de résine pour un essai dans une étuve	105
6.6.4 Discussion.....	108
6.7 Conclusion.....	109

6.1 Introduction

Dans la première partie de ce manuscrit, nous avons expliqué que notre objectif est de maîtriser et contrôler le procédé d'infusion. Nous savons aussi que l'écoulement de la résine et le comportement de la préforme sont des informations les plus importantes dans le cadre des études expérimentales. Dans ce chapitre nous voulons donc améliorer la compréhension de l'écoulement de la résine dans la préforme à partir de la détection du front de la résine au cours de remplissage.

Comme nous le savons, la détermination de la perméabilité dans le plan a fait l'objet de nombreuses études notamment en mesure unidimensionnel et dans le cas de l'écoulement radial dans le procédé d'injection de résine [71-73]. En comparaison de la mesure du front de la résine dans un plan, la détection de l'écoulement transversale est plus difficile. Les premiers résultats ont été publiés en 1971 par Stedile [74], puis par Parnas en 1995 [75] et Han en 2000 [76]. Après le développement de capteurs *in-situ* [77], cette méthode a été largement utilisée dans la détermination de l'avancement du front fluide dans le procédé RTM (Resin Transfer Moulding) [78, 79] et le procédé d'infusion de résine [11, 80]. Récemment, des ultrasons [81] et des techniques optiques [82, 83] ont été utilisées pour suivre l'écoulement transversal de résine au cours du procédé LCM (Liquid Composite Molding).

Pour surmonter les inconvénients des techniques présentées précédemment dans le cadre de travail sous conditions industrielles, des micro-thermocouples et un capteur à fibre optique sont proposés pour caractériser l'écoulement du fluide au cours de la phase de remplissage. Le capteur à fibre optique a une faible dimension transversale, qui permet de l'insérer au cœur des plis afin d'effectuer d'observer le remplissage de la préforme. Comme on pense que les micro-thermocouples peuvent détecter l'écoulement de résine, on voudrait d'abord vérifier cette détection du front de résine par des micro-thermocouples dans un cas test. Donc, on intègre ensemble ces deux techniques dans une étude sous conditions industrielles pour valider les détections du thermocouple, afin de proposer des études d'écoulement de la résine par des thermocouples dans différentes conditions d'infusion.

6.2 Méthode utilisant des fibres optiques

6.2.1 Les fibres optiques

La technique de mesure par les capteurs à fibre optique a été développée durant ces 20 dernières années. Elle est déjà largement utilisée dans le domaine de la physique, la chimie, et la biologie. Pour les capteurs à fibre optique, on parle souvent des capteurs à fibre optique à réseau de Bragg [6, 69, 84] et à réflexion de Fresnel [37, 69].

La définition d'un capteur à fibre optique est donnée par l'AFNOR : *un dispositif dans lequel l'information est créée dans le chemin optique par réaction de la lumière à la grandeur à mesurer, avant d'être acheminée vers le récepteur optique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs fibres optiques.*

Une fibre optique est un guide d'onde, régi par la loi de Snell-Descartes, constitué d'un cœur dans lequel se propage l'onde lumineuse en se réfléchissant sur la gaine optique d'indice de réfraction plus faible (figure 6-1), la différence entre les indices étant inférieure à 1%. Une fibre optique est généralement constituée de silice (SiO_2), et l'indice de réfraction plus élevé dans le cœur peut être obtenu par le dopage de la silice avec de l'oxyde de germanium (GeO_2). Un revêtement en polymère entoure la fibre optique afin de la protéger des attaques extérieures.

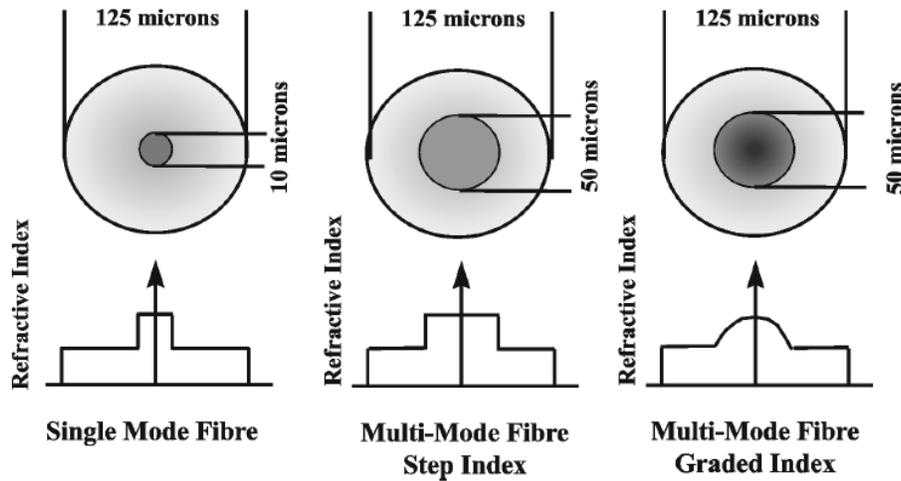


Figure 6-1 Fibre optique [85].

6.2.2 Capteur à fibre optique par réflexion de Fresnel

Afin de déterminer l'avancement du front d'écoulement de la résine et de la réticulation de la résine, l'idée est de suivre l'évolution de l'indice de réfraction de la résine au cours de la phase de remplissage et de cuisson. En fait, notre mesure par capteur à fibre optique est utilisée en réflexion (figure 6-2), le coefficient de réflexion R entre deux milieux des indices de réfraction n_f (indice de réfraction du cœur de la fibre optique) et n_{ext} (indice de milieu extérieur) peut être calculé en utilisant les lois de Fresnel [86, 87], en supposant une incidence normale, il s'exprime sous la forme :

$$R = \left(\frac{n_f - n_{ext}}{n_f + n_{ext}} \right)^2 \quad 3-1$$

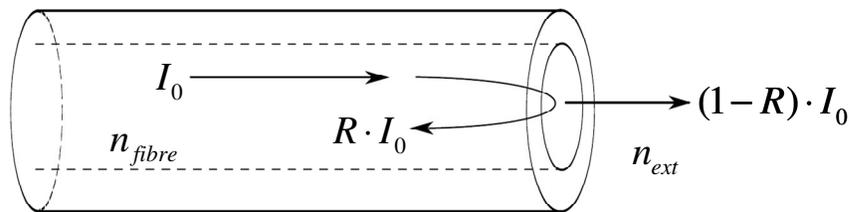


Figure 6-2 Réflexion de la lumière en bout de fibre optique.

De plus, l'indice de réfraction est sensible aux variations de densité, paramètre qui augmente dans la phase de thermo-durcissement de la résine. En effet, la loi de Lorentz-Lorenz établit une relation entre l'indice de réfraction n et la densité ρ d'un milieu liquide en faisant intervenir également la réfractivité molaire R_M et la masse molaire M (voir l'équation 3-2).

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{R_M}{M} \rho \quad 3-2$$

Comme l'intensité réfléchi en bout de fibre optique dépend du coefficient de réflexion du milieu extérieur, nous pouvons suivre l'avancement du front de la résine et l'avancement de la réticulation par l'observation des variations de cette intensité réfléchi selon la relation 3-3. Dans cette relation, A_r correspond à un coefficient de

transmission, R est le coefficient de réflexion en bout de fibre optique, I_0 est l'intensité injectée dans la fibre optique (l'intensité de la source) et B_f représente le bruit de fond du montage. Les paramètres de la relation 3-3 peuvent être obtenus par étalonnage avant essai ou même pendant l'essai [69, 87].

$$I = A_0 R + B_f \tag{3-3}$$

$$A_0 = A_i I_0$$

6.2.3 L'étalonnage

Avant chaque mesure, le capteur à fibre optique doit donc être étalonné. Le but de cet étalonnage est de trouver les deux constantes A_0 et B_f dans l'équation 3-3. Pour trouver ces constantes, il faudra au moins deux essais. Nous avons choisi deux produits différents (l'eau désionisée et l'éthanol à 99%) dont nous connaissons l'indices de réfraction. Ensuite nous mesurons le signal dans ces deux produits pour la fibre optique que nous voulons utiliser dans l'essai d'infusion. Pour vérification, nous avons pris un troisième produit (la glycérine) pour valider cet étalonnage. Notre étalonnage est présenté dans le tableau 6-1 et les constantes A_0 et B_f peuvent être calculées après cet étalonnage.

Tableau 6-1 Etalonnage du capteur de Fresnel à fibre optique.

Milieu utilisé pour le test	n (indice de réfraction)	R (coefficient de réflexion)	I (intensité réfléchie)
Eau	1,33	0,00207	7,60 (V)
Ethanol	1,36	0,001186	5,80 (V)
Glycérine	1,47	$1,973 \cdot 10^{-5}$	3,38 (V)

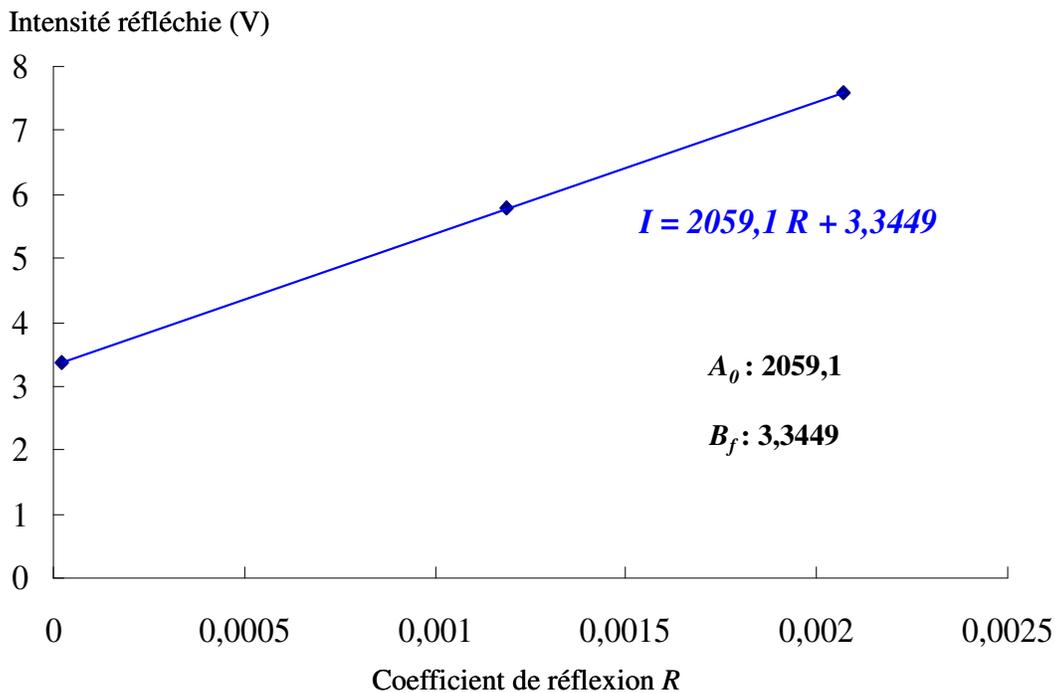


Figure 6-3 Courbe d'étalonnage du capteur de Fresnel à fibre optique.

6.3 Montage de l'essai de détection du front de résine

Ici nous avons présenté une étape indispensable dans les études expérimentales: l'étalonnage. Par contre, cet étalonnage des constantes A_o et B_f n'est pas nécessaire dans la détection du front de résine, car nous avons juste besoin de la variation de l'intensité réfléchi au bout de la fibre optique. Cet étalonnage permet de valider l'équation 3-3, mais si nous voulons calculer la variation de l'indice de réfraction et du volume spécifique de la résine, il faut connaître les constants A_o et B_f .

6.3 Montage de l'essai de détection du front de résine

Nous avons réalisé une plaque à partir d'un empilement de 48 plis de tissus carbone, qui est le même que celui utilisé dans les essais précédents. C'est un produit HEXCEL Corporation SAS : le tissu UD de référence G1157 E01. La séquence d'empilement et les dimensions de la préforme sont toujours les mêmes, respectivement $[0_6 90_6 90_6 0_6]_s$ et $335 \text{ mm} \times 335 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$. La résine époxy RTM-6 est utilisée, préchauffée dans un pot chauffant à 80°C avant injection. Pour l'élaboration, nous avons choisi un procédé LRI sur une plaque chauffante avec couvercle fermé. Comme d'habitude la plaque chauffante est maintenue à 120°C pendant l'infusion de résine et à 180°C pendant une phase de la cuisson d'environ une heure et demie.

Pour détecter le front de résine pendant l'infusion et l'avancement de la réticulation de résine lors de la phase de cuisson, l'essai consiste à infuser une plaque épaisse instrumentée avec un capteur à fibre optique multi-mode de diamètre $50/125 \mu\text{m}$ et 10 micro-thermocouples type K (comme on a déjà utilisé dans les essais précédents). Les positionnements des capteurs sont montrés sur la figure 6-4 : 5 thermocouples sont placés dans l'épaisseur de la préforme. Les thermocouples 3 et 4 encadrent un capteur à fibre optique placé au centre du plan médian, avec 1 cm entre chaque capteur. Le thermocouple 1 est inséré dans le tuyau d'entrée du système pour contrôler la température de la résine à son arrivée. Les 4 thermocouples restants : TC7 à TC10 sont posés autour du pli 46, il y a une distance de 5 cm entre les thermocouples et le bord du pli. Pour avoir le moins de défaut, tous les capteurs sont insérés dans le sens des fibres de carbone.

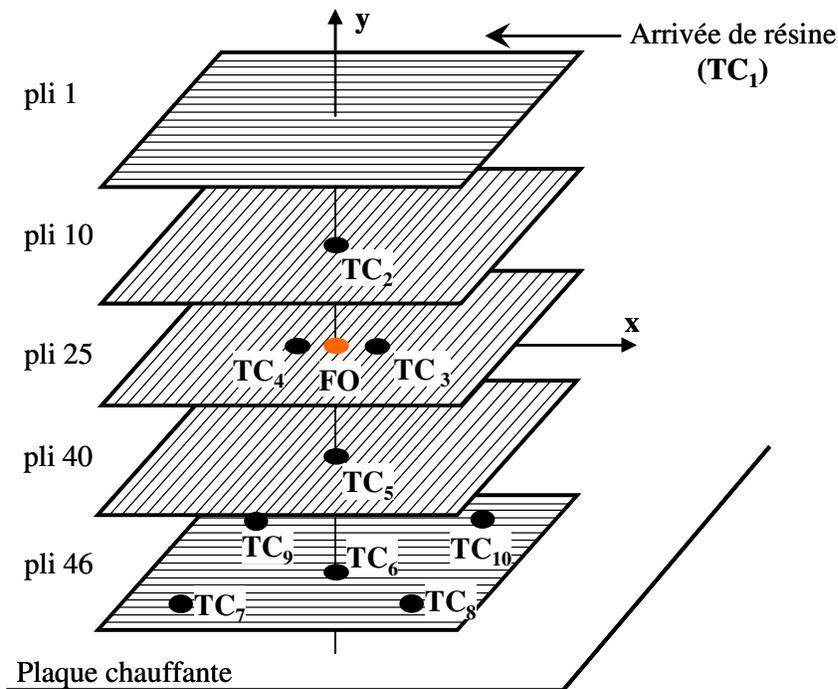


Figure 6-4 Positionnement des capteurs dans le système d'infusion.

Le schéma du montage utilisant des micro-thermocouples et le capteur de Fresnel sont montrés sur la figure 6-5. Une diode laser modulable est utilisée pour injecter la source dans un coupleur X. Elle est modulée en intensité par un signal TTL de fréquence 10,135 kHz (pour éviter les multiples de 50 Hz). Elle est nécessaire à l'emploi d'une détection synchrone afin d'améliorer le rapport signal sur bruit [69]. Le coupleur X permet d'avoir une fibre mesure (capteur de Fresnel), une photodiode de mesure (réflexion ou transmission) et une photodiode de référence. La photodiode de mesure récupère le signal de la réflexion; la photodiode de référence permet de corriger des fluctuations d'intensité lumineuse de la source. Les signaux sont acquis par la même centrale d'acquisition (Agilent) que celle des micro-thermocouples, via une détection synchrone électronique. Ce montage permet d'avoir une acquisition simultanée des informations optiques et thermiques. Ce point sera très important pour suivre le remplissage.

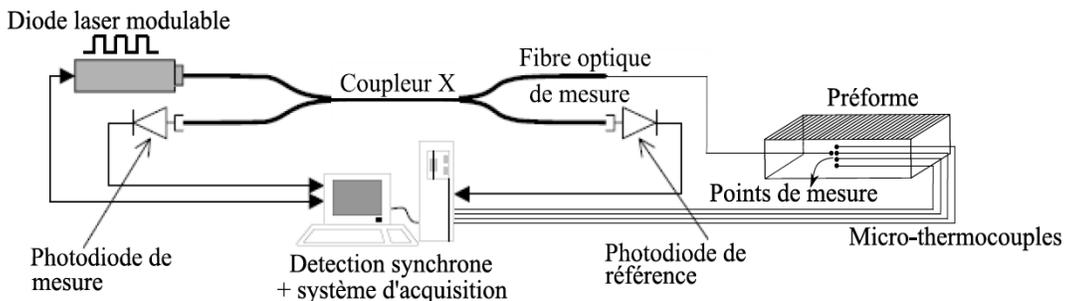


Figure 6-5 Schéma du montage utilisant des micro-thermocouples et un capteur à fibre optique par réflexion de Fresnel.

6.4 Suivi du procédé LRI par micro-thermocouple et fibre optique

La Figure 6-6 donne la température et le signal optique des capteurs au centre du plan médian pendant toute la durée du procédé. Elle peut être divisée en 5 parties. Tout d'abord, dans la phase de remplissage (début de la zone 1), on observe une chute du signal de la fibre optique et le passage par un minimum de température. On considère qu'au début de l'infusion, l'extrémité dénudée de la fibre optique est en contact avec l'air, donc son coefficient de réflexion est très élevé. Pendant la phase d'infusion, la résine passe devant l'extrémité de la fibre optique, ce qui entraîne une forte diminution du coefficient de réflexion. Par conséquent l'intensité lumineuse réfléchie mesurée chute. Après 350 s, lorsque la température augmente, l'indice de réfraction et l'intensité lumineuse réfléchie diminuent. La zone 2 présente l'augmentation de température. Pour des raisons purement expérimentales, le signal optique n'a pu être suivi dans cette zone.

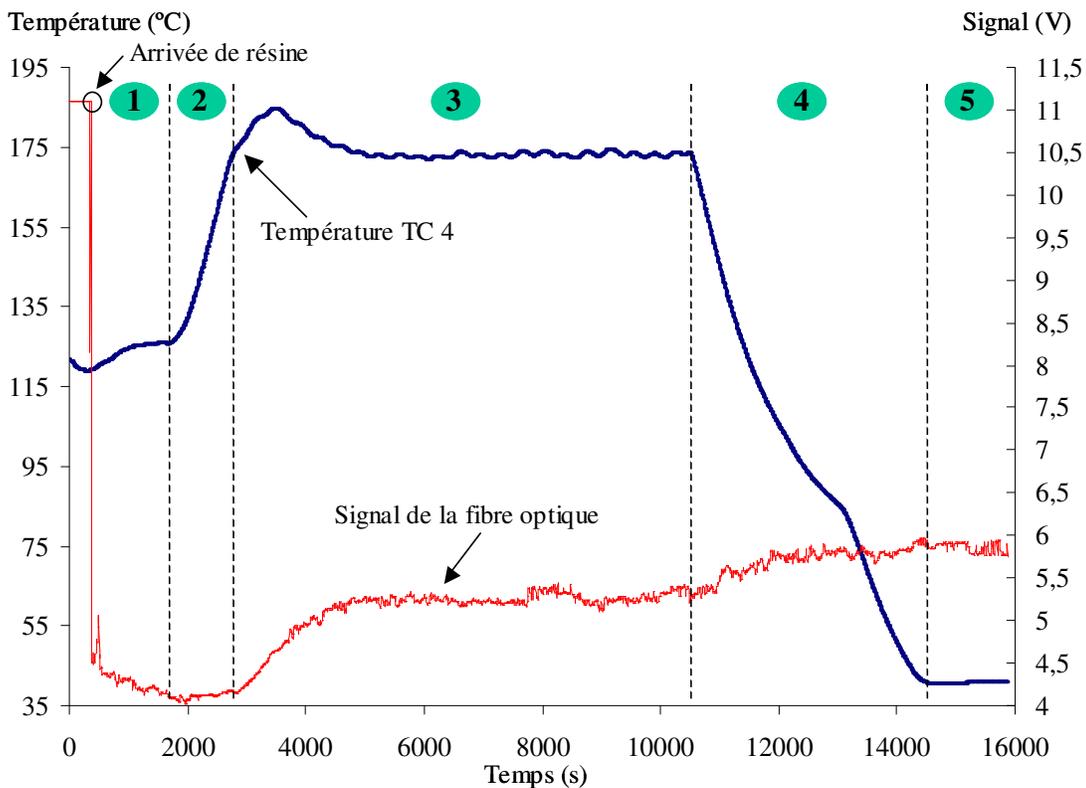


Figure 6-6 Signaux des capteurs situés au centre du plan médian de la préforme.

La zone 3 correspond à la phase de cuisson. Une température isotherme a été imposée. On observe toutefois un pic de température en début de la zone 3. Le début comme la fin du pic correspondent à une zone d'augmentation de l'intensité lumineuse, traduisant une densification de la résine, selon l'équation 3-2 [88]. Dans cette partie, la résine liquide est transformée en un solide. L'indice de réfraction de la fibre optique augmente donc selon l'équation 3-2, et la réaction de réticulation, exothermique, entraîne une augmentation de la température. Une fois que l'intensité lumineuse réfléchie est stable, on peut considérer que la phase de la cuisson est terminée et que la résine est polymérisée à 5000 s. Au cours de la phase de refroidissement dans la zone 4, le volume de résine diminue, par conséquent sa densité augmente, de même que le signal de la fibre optique. A la fin du procédé, la température et l'intensité lumineuse réfléchie se stabilisent dans la zone 5.

Le but de cette partie du travail est de suivre l'écoulement de résine pendant le procédé d'infusion de résine, donc ici nous nous intéressons qu'à la zone 1 : la phase de remplissage.

6.5 Détection du front de résine

6.5.1 Temps zéro de la phase de remplissage

L'évolution de la température mesurée par le micro-thermocouple placé dans le tuyau d'entrée du système d'infusion est montrée sur la figure 6-7. La température chute après 10 s, ce qui peut être considéré comme le moment de début du remplissage. En raison de l'effet de l'écoulement de résine, le thermocouple 1 colle sur le tuyau d'entrée, ainsi celui-ci mesure à présent la température à la paroi du tuyau d'entrée, qui est plus chaude. Donc la température remonte un peu juste après la première chute de température. Ensuite, ce signal représente la température de l'ensemble de la résine et du tuyau d'entrée, elle évolue entre 90°C et 100°C pendant la phase du remplissage.

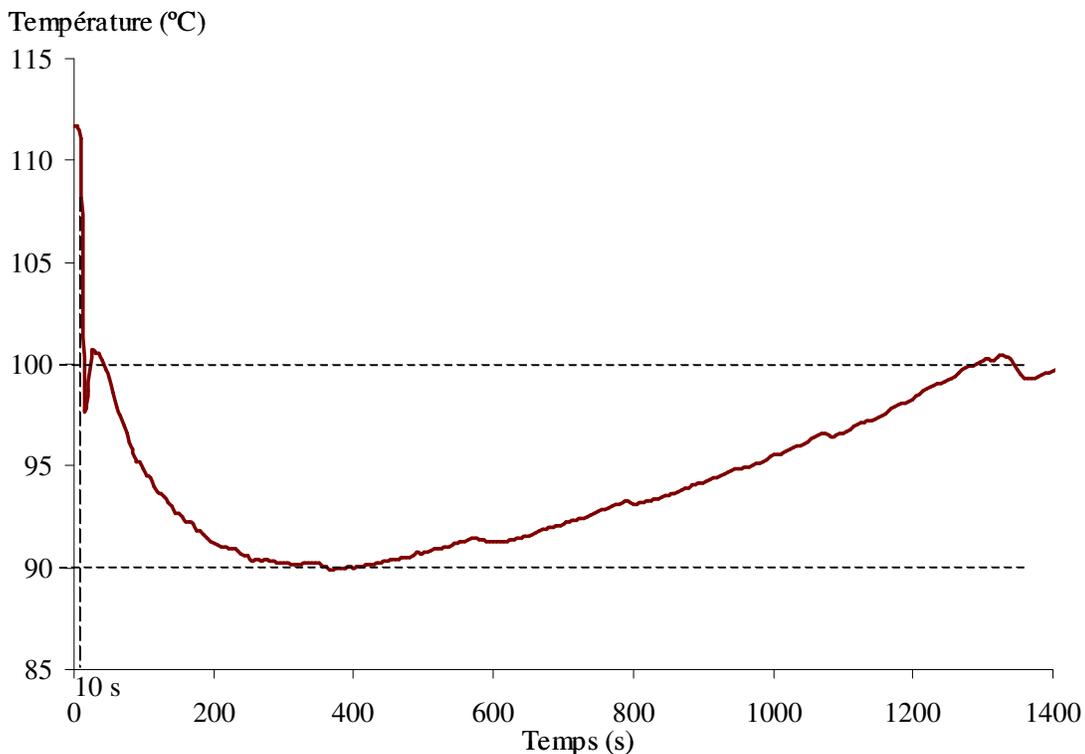


Figure 6-7 Signal du micro-thermocouple placé dans le tuyau d'entrée du système d'infusion.

6.5.2 Capteur de Fresnel

La figure 6-8 montre l'évolution de l'intensité lumineuse réfléchi en bout de fibre optique et des températures au voisinage de cette fibre en fonction du temps pendant le remplissage. Au début, le signal réfléchi est parfaitement stable car l'extrémité de la fibre optique est environnée d'air. Lorsque la résine touche le bout de la fibre optique, l'intensité lumineuse réfléchi chute immédiatement à cause de la variation de l'indice de réfraction. En 5 secondes, le signal de la fibre optique remonte au niveau initial, puis décroît à nouveau. Cet effet peut être lié à la présence d'air dans l'écoulement de résine, c'est-à-dire que le front de résine n'est pas homogène. Quand l'extrémité de la fibre optique est complètement baignée par la résine, le signal devient stable. Nous pouvons

6.5 Détection du front de résine

considérer que dans ce test la résine arrive au centre du plan médian à environ 350 s. En revanche, les réponses des thermocouples 3 et 4 présentent un minimum de température apparaissant à environ 320 s (315 s pour thermocouple 3 et 325 s pour thermocouple 4), ce qui présente une différence de l'ordre de 10%. Plusieurs explications peuvent être avancées : en premier lieu, la bonne conductivité thermique de la fibre carbone peut-être invoquée ; mais, il semble plus raisonnable d'attribuer cet écart au collage avant infusion de la tête du thermocouple pour le maintenir en position. Ces deux phénomènes concurrents à avancer la détection du front de résine avec des micro-thermocouples. De plus, il y a un écart de temps en direction longitudinale (10 s de différence entre TC3 et TC4) car la résine atteint TC3 avant TC4, ce qui correspond bien à l'ordre de l'infusion. Donc, à partir du moment où nous avons obtenu le minimum de température, nous pouvons estimer le temps nécessaire à la résine pour arriver au voisinage de chaque micro-thermocouple posé dans la préforme.

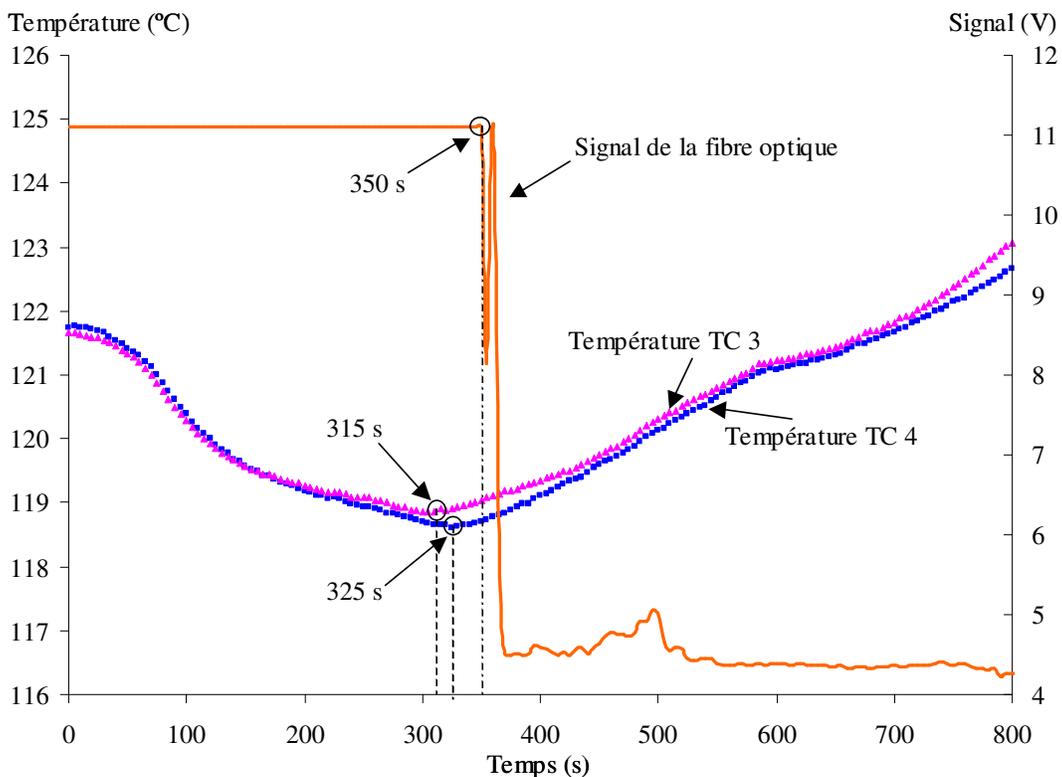


Figure 6-8 Signal de la fibre optique et températures pendant l'infusion de résine.

6.5.3 Micro-thermocouples

6.5.3.1 Suivant l'épaisseur de la préforme

Les courbes d'évolution de la température mesurée par 5 thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme sont présentées dans la figure 6-9. Ils ont généralement des caractéristiques similaires. Le temps 0 correspond au début de l'infusion de résine, obtenu à partir de TC1 dans la figure 6-7. On peut observer qu'il y a des différences de température de 10°C, soit un gradient de température 0,3°C/pli au début de l'infusion et d'environ 5°C, soit un gradient de température 0,15°C/pli à la fin du remplissage. Comme nous l'avons proposé dans les précédents chapitres et publications [89, 90], les températures diminuent lorsque le test commence et que la

résine entre dans le drainant. Ce phénomène confirme la présence de la résine qui tend à refroidir la préforme, car la mesure du micro-thermocouple 1 montre que la température de la résine d'entrée est toujours en dessous de 100°C pendant la phase de remplissage (voir figure 6-7). Les signaux du thermocouple baissent de plus en plus lorsque le front de résine se rapproche. Une fois que la résine est arrivée dans l'environnement du thermocouple, une température minimale est obtenue. Les temps d'arrivée de résine estimés pour chaque thermocouple sont notés dans le tableau 6-2. Après ce minimum de température, la température du thermocouple augmente car la température de la résine continue à augmenter. Lorsque la résine arrive en contact avec la plaque chauffante, elle est chauffée rapidement par conduction (voir les signaux de TC5 et TC6). Finalement, chaque température tend vers une valeur stabilisée après environ 1300 s, ce qui correspond expérimentalement à la fin du remplissage (la résine sort dans le tuyau extérieur par le tuyau « Ω »).

Tableau 6-2 Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme.

Thermocouple	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6
Temps (s)	130	315	325	650	730

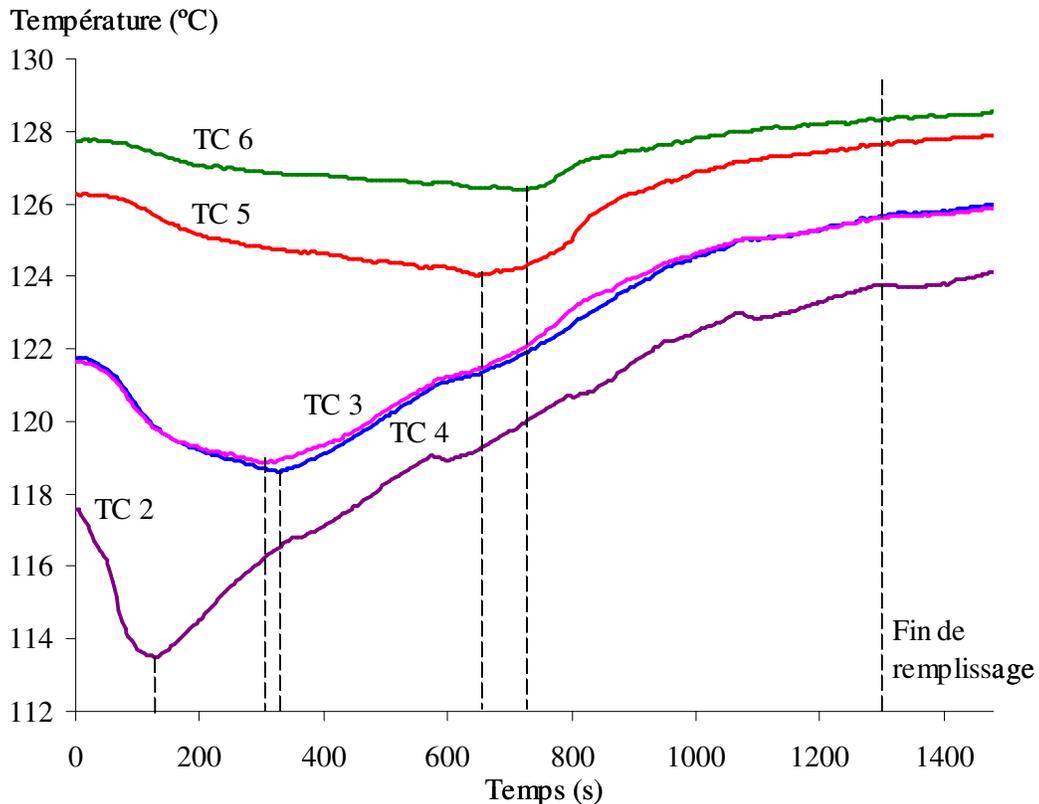


Figure 6-9 Températures mesurées par les micro-thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme.

6.5.3.2 Dans le plan

La figure 6-10 montre les évolutions de la température sur le pli 46. Nous pouvons

6.5 Détection du front de résine

observer qu'il y a une très faible différence de température (environ 1°C) dans un pli entre le début de l'infusion et la fin de l'infusion. Les courbes de température pour le TC6, le TC7 et le TC9 ont des évolutions similaires comme nous l'avons obtenu dans les autres essais. Les temps d'apparition de la température minimum mesurée par ces 3 thermocouples sont notés dans le tableau 6-3. Le front d'arrivée autour des TC7 et TC9 est très proche, ce front arrive après celui de TC6 situé au centre du pli. Les deux courbes restantes (pour TC8 et TC10) présentent globalement un profil semblable, qui est différent par rapport aux essais précédents : nous avons observé deux zones de diminution de la température et deux minimums de températures dans ces deux zones (donc on a mis 2 valeurs dans une colonne pour TC8 et TC10 dans le tableau 6-3). Dans l'essai standard, des adhésifs sont mis aux 4 côtés de l'empilement de la préforme pour assurer que la résine s'écoule transversalement (voir section 2.1 dans le chapitre 2, page 20). Pour faire une analyse du front de résine dans une autre condition expérimentale, dans cette étude, nous avons laissé le côté près l'entrée de résine (à droite) libre, par conséquent, il y a une possibilité d'avoir un écoulement longitudinal au début de l'infusion de résine, ce que pourraient montrer les thermocouples TC8 et TC10. La réponse de TC8 et TC10 présente deux minimums. On peut supposer qu'une petite quantité de résine traverse le drainant et entre dans la préforme dès le début de l'infusion. Ce film de résine se réchauffe au contact du moule donnant lieu au premier minimum. Ensuite, un deuxième front de résine passe devant les thermocouples, provoquant à son tour un nouveau refroidissement, puis un minimum ; nous pensons que c'est le front de résine transversale qui est arrivé. Aucune indication dans la mesure ne permet de dire quel phénomène se produit avant l'autre ; nous nous basons pour établir ce scénario sur le fait que les perméabilités transverses sont beaucoup faibles que les perméabilités longitudinales. Finalement, les temps obtenus pour la température minimum par chaque thermocouple placé sur le pli 46 figurant dans le tableau 6-3. Ils correspondent bien à l'ordre d'infusion, à partir du côté d'entrée de résine vers la sortie de résine. Le front n'est pas homogène suivant la direction X, mais suivant la direction Z, il est quasiment homogène (pour la direction, voir la figure 6-4).

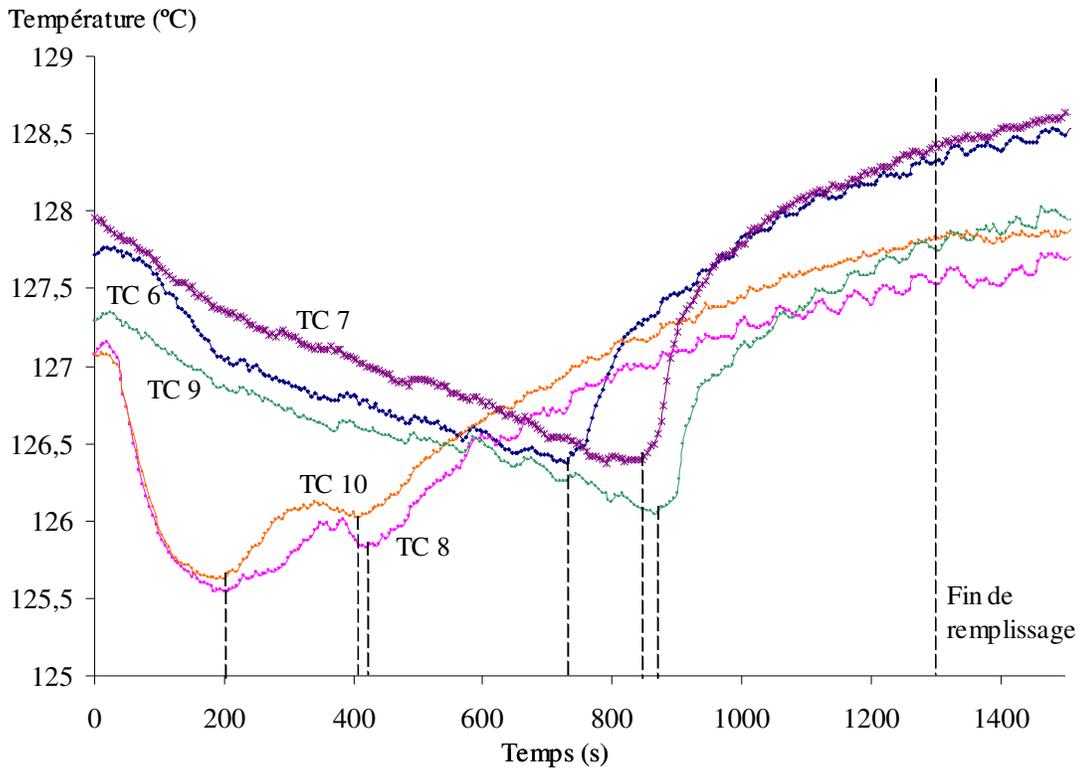


Figure 6-10 Températures mesurées par les micro-thermocouples placés sur le 46^{ème} pli de la préforme.

Tableau 6-3 Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples placés sur le 46^{ème} pli de la préforme.

Thermocouple	TC6	TC7	TC8	TC9	TC10
Temps (s)	730	845	200 415	870	200 405

6.5.4 Bilan

Dans le travail présenté précédemment, un capteur à fibre optique basé sur la réflexion de Fresnel est utilisé pour détecter le front de résine pendant l'infusion d'une plaque par le procédé LRI. Grâce à ce capteur, il est également possible de suivre le procédé LRI, en particulier de détecter l'avancement de la phase de cuisson. Par ailleurs, les micro-thermocouples permettent de suivre la température à l'intérieur de la préforme au cours du procédé. La comparaison entre une mesure directe (capteur de Fresnel à optique) et une mesure indirecte (les micro-thermocouples) présente une bonne corrélation pour la détection du front de résine. Les résultats obtenus montrent que les micro-thermocouples peuvent être utilisés pour avoir une première information sur l'écoulement de résine dans la préforme.

6.6 Caractérisation du front de résine avec des micro-thermocouples distribués

Les micro-thermocouples peuvent donner une information globale sur l'écoulement de résine dans la préforme pendant le procédé d'infusion. De plus ils représentent un coût faible et sont faciles à mettre en œuvre. Nous souhaitons ainsi utiliser ces capteurs

pour les différents environnements de fabrication des matériaux composites par procédé LRI, afin d'améliorer la compréhension de ce nouveau procédé encore mal maîtrisé. Les études de la caractérisation du front de résine pour infusion une plaque vont effectuer dans trois différentes conditions expérimentales : sur une plaque chauffante avec couvercle fermé (condition industrielle), sur une plaque chauffante avec couvercle ouvert (grand gradient température dans la préforme) et dans une étuve (condition thermique quasiment homogène).

6.6.1 Écoulement de résine sur un plan dans le test couvercle fermé

Les mêmes renforts et résine que pour les essais précédents ont été utilisés dans cet essai. Par contre, l'empilement de la préforme choisie est 24 plis avec une séquence de $[0_6, 90_6]_S$, car nous avons déjà présenté ce type de l'essai avec 48 plis. Donc on veut réduire l'épaisseur de la préforme afin de diminuer le temps de remplissage et le gradient température. Cet essai d'infusion de résine a été réalisé par le procédé LRI standard. La préparation de l'empilement de la préforme est identique à l'essai présenté dans chapitre 2 (voir la figure 2-1) avec couvercle fermé. Considérant une plaque mince (6 mm après la compaction sous vide), les cinq micro-thermocouples sont placés uniquement dans un plan médian pour détecter les informations sur l'écoulement de résine dans un plan.

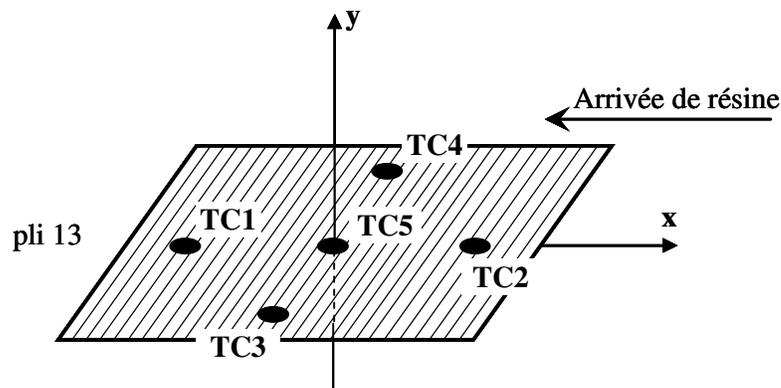


Figure 6-11 Positionnement des thermocouples dans la préforme sur le pli 13 dans le test avec couvercle fermé.

La figure 6-12 montre les évolutions de températures en fonction du temps pour ces 5 thermocouples dans le pli 13. Le temps 0 correspond au début du procédé d'infusion quand la résine entre dans le canal d'entrée du système. Les températures sont assez homogènes au départ, entre 101°C et 104°C. Ces 5 courbes de températures ont les mêmes évolutions et cette évolution est la même que décrite précédemment. Comme les points minimums de la température peuvent permettre d'estimer l'arrivée du front de résine, on remarque que la résine atteint le pli médian au bout de 120 s. On note que le thermocouple central, TC5, est atteint avec un retard de 55 s. Ce retard peut être dû à des effets de bord tels que le « race-tracking » (voir figure 6-13) [40, 41], qui peut modifier l'avancement du front fluide et de la pression d'injection [91, 92]. Les temps d'arrivée de la résine à la proximité des thermocouples sont notés dans le tableau 6-4. A la fin de l'infusion, les températures se stabilisent à nouveau à partir de 550 s et le temps du remplissage mesuré expérimentalement est de 600 s (contrôle visuel de résine dans le « Ω » de sortie).

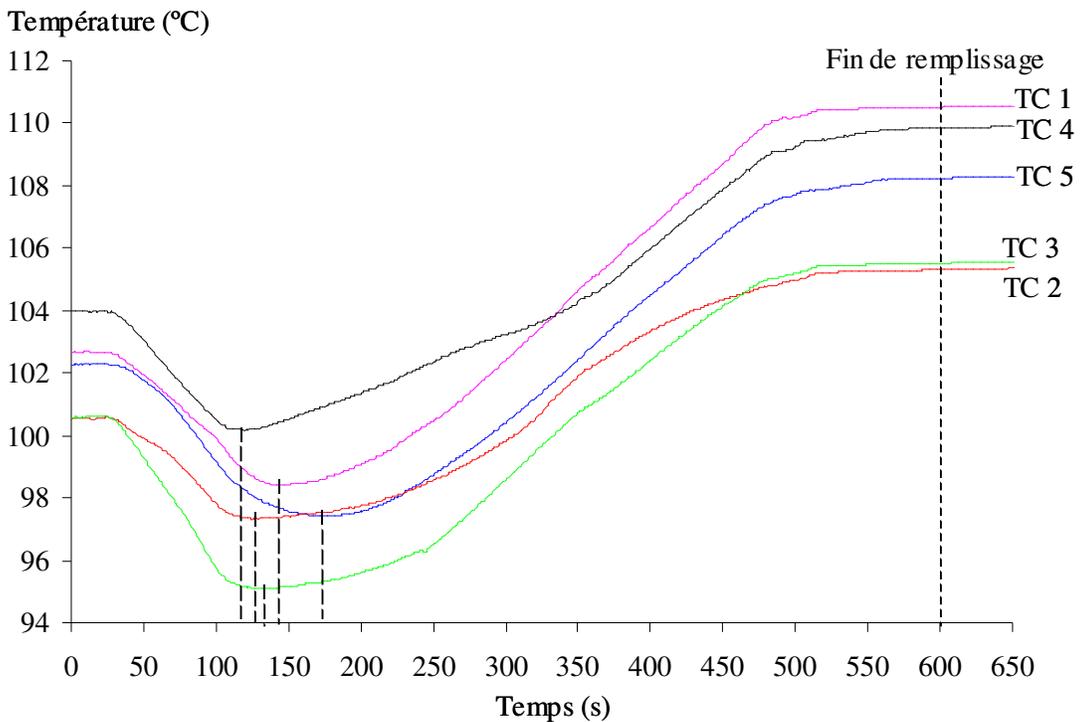


Figure 6-12 Evolution de la température des micro-thermocouples placés dans le plan médian (pli 13) en fonction du temps.

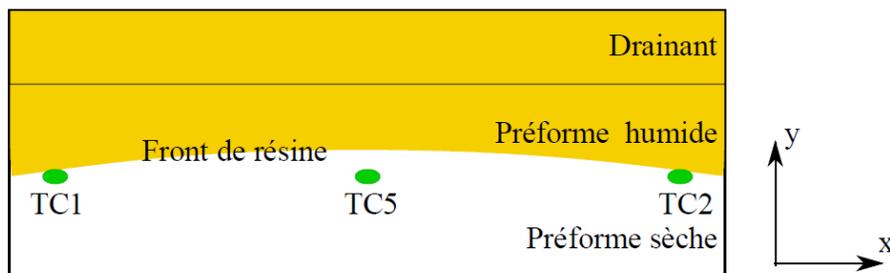


Figure 6-13 Profil du front de résine dans le plan médian.

Tableau 6-4 Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples dans le test couvercle fermé.

Thermocouple	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5
Time (s)	145	125	130	120	175

6.6.2 Ecoulement de résine dans le test couvercle ouvert

Notre principe de la détection du front de résine par des micro-thermocouples est basé sur les mesures d'évolution de la température locale. Donc pour obtenir plus d'information d'écoulement de la résine transversale et longitudinale dans un même essai d'infusion, nous avons choisi deux essais avec très différente condition thermique : l'essai avec couvercle ouvert et dans une étuve. D'abord on va analyser un essai d'infusion avec couvercle ouvert, cet essai est identique à l'essai que nous avons déjà

6.6 Caractérisation du front de résine avec des micro-thermocouples distribués

présenté dans le chapitre 5 (voir la section 3 dans le chapitre 5), et la figure 6-14 rappelle les positions des thermocouples.

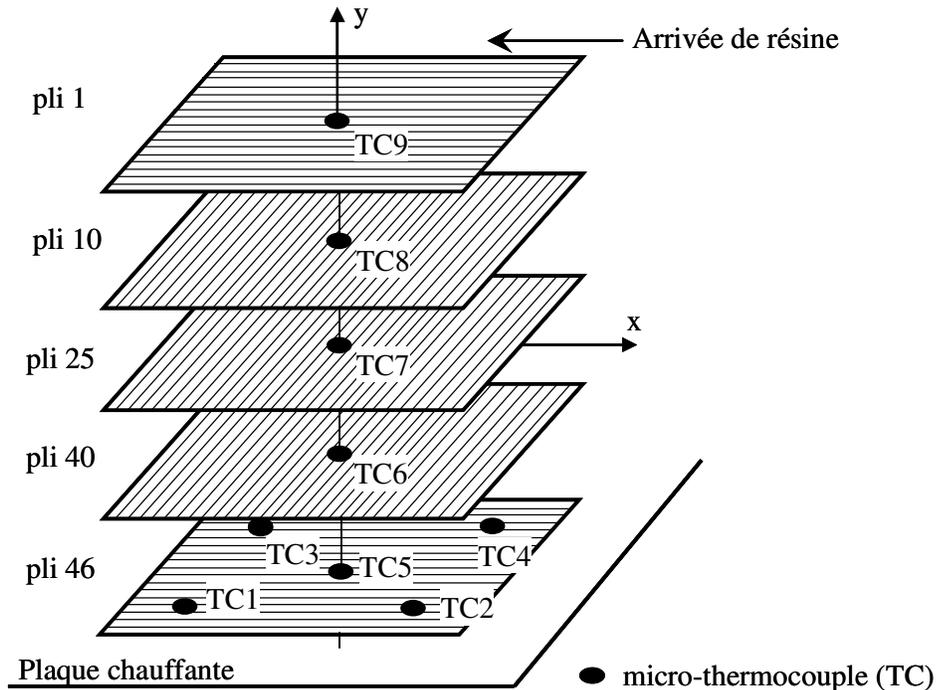


Figure 6-14 Positions des thermocouples pour suivre le front de résine dans le test d'infusion avec le couvercle ouvert.

La figure 6-15 représente les évolutions de la température mesurée par les thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme. Les minimums de température sur chaque courbe sont notés dans le tableau 6-5. L'écart du temps peut être observé nettement et l'infusion de résine est principalement transversal pli par pli. La courbe dans la figure 6-16, présente à la position du front de résine au cours du remplissage obtenu par la figure 6-15. Le temps 0 correspond bien au moment où le front de résine arrive à la position du TC9. A partir la figure 6-16, il peut être observé que la résine infuse plus lentement et plus difficilement dans l'épaisseur de la préforme. Temps d'arrivée de résine mesuré entre chaque deux thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme peut être déterminé par le tableau 6-5, puis noté dans le tableau 6-6. Grâce au tableau 6-6, le temps de remplissage utilisé par chaque pli est représenté sur la figure 6-17. Nous pouvons observer qu'il faut plus de temps pour infuser le pli plus bas, donc un maximum d'épaisseur de la préforme existe dans l'utilisation du procédé LRI dans des conditions de fabrication.

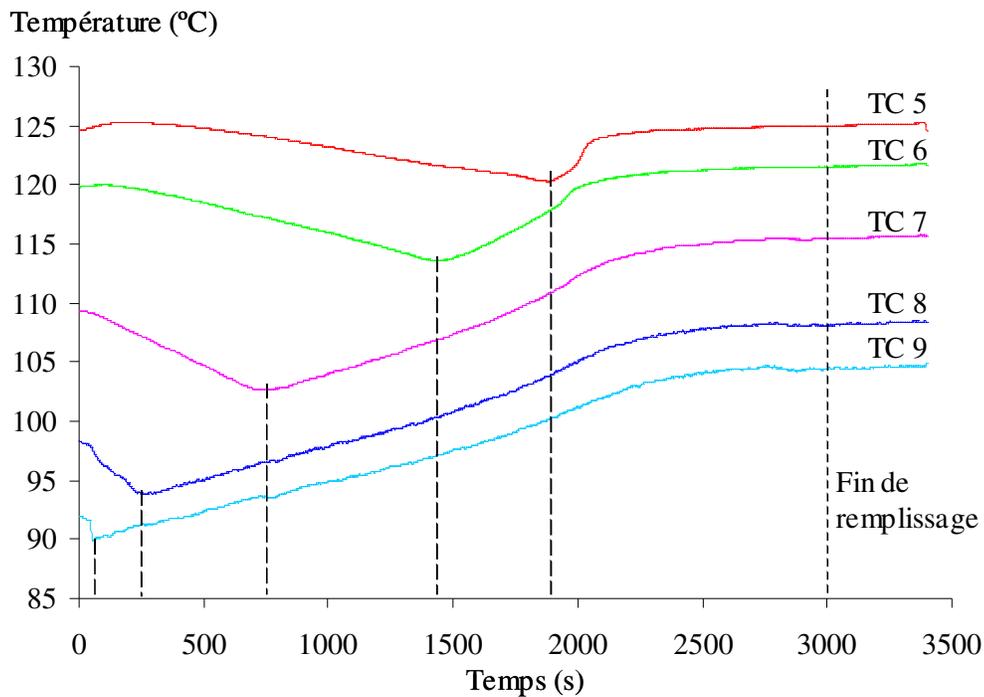


Figure 6-15 Evolution de la température mesurée par les thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme dans le test couvercle ouvert.

Tableau 6-5 Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples suivant l'épaisseur de la préforme dans le test couvercle ouvert.

Thermocouple	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
Temps (s)	1900	1450	750	275	55

Tableau 6-6 Temps d'arrivé de résine mesuré entre chaque deux thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme dans le test couvercle ouvert.

Infusion	de 1 ^{ère} à 10 ^{ème}	de 10 ^{ème} à 25 ^{ème}	de 25 ^{ème} à 40 ^{ème}	de 40 ^{ème} à 46 ^{ème}
Nombre des plis traversés	9	15	15	6
Temps de remplissage (s)	220	475	700	450

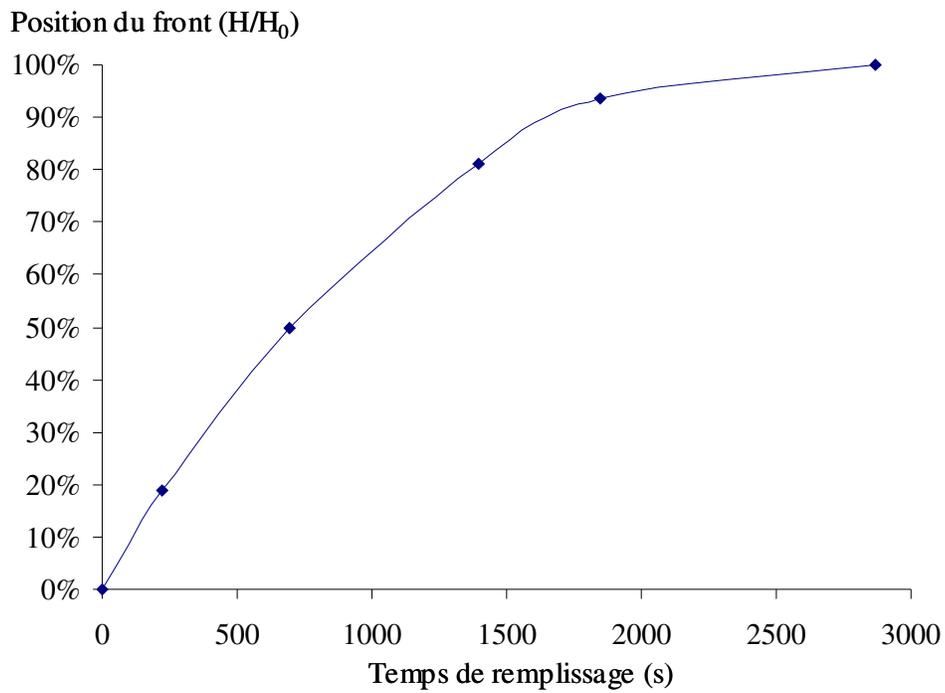


Figure 6-16 Position du front au cours du remplissage estimé par les micro-thermocouples placés dans l'épaisseur de la préforme pour le test avec un couvercle ouvert.

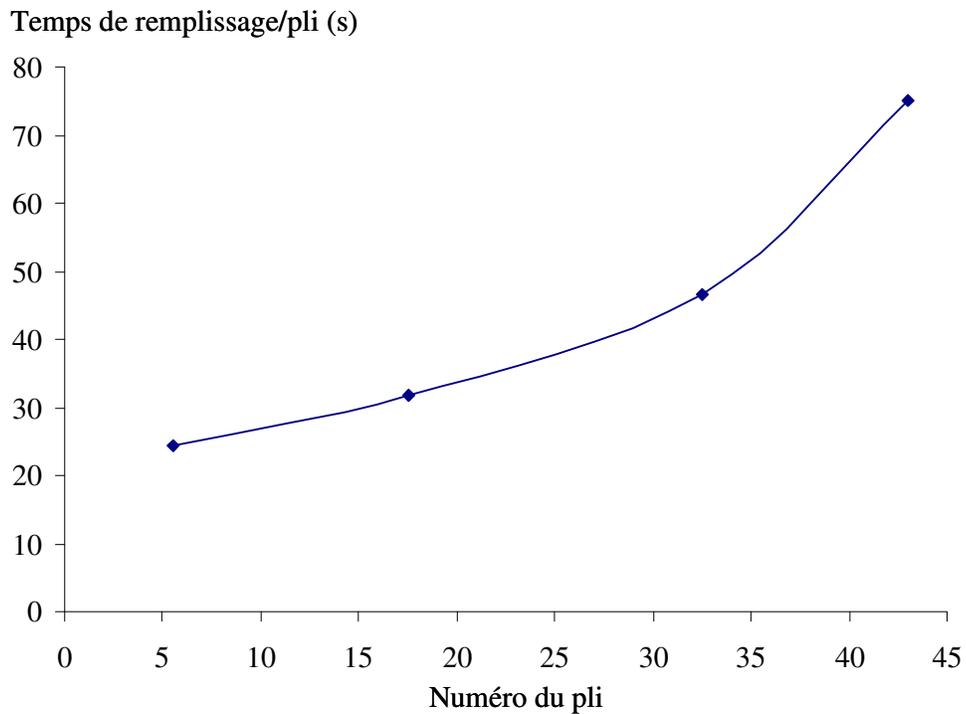


Figure 6-17 Temps de remplissage en fonction de numéro du pli dans l'épaisseur de la préforme pour le test avec un couvercle ouvert.

La figure 6-18 donne des informations sur l'écoulement de la résine dans le plan du pli 46. On remarquera qu'un grand gradient de température apparaît dans cet essai. Les temps d'arrivée de la résine estimés par chaque thermocouple dans ce plan sont notés dans le tableau 6-7. Un front non-homogène est observé dans le plan du pli 46. Comme nous avons observé à partir de l'infusion de résine dans le drainant (voir figure 5-6 dans le chapitre 5) : la résine entre dans le coin supérieur à droite et arrive au coin en bas à gauche. Il peut être constaté que la température minimale apparaît en premier dans la courbe de TC4 et la dernière dans la courbe de TC1.

Mais surtout, ici, la résine traverse plus rapidement au centre de la plaque (TC5). Par rapport au test précédent, on doit s'interroger sur la répétabilité des essais ; néanmoins, nous pouvons avancer qu'une plus haute température implique une viscosité plus faible et donc un écoulement plus rapide. Par ailleurs, il y a une distance identique entre les thermocouples placés autour du pli 46 (TC1 à TC4) et le TC5. Une fois la résine arrivée au TC5, si l'infusion longitudinale est plus importante, les autres 4 thermocouples (TC1 à TC4) doivent être atteints en même temps, mais nous avons observé des temps d'arrivée ces 4 thermocouples complètement différents, donc il peut être confirmé encore une fois que le remplissage est principalement suivant l'épaisseur de la préforme. On remarque d'ailleurs que la courbe dans figure 6-15 qui indique la position du front au cours du temps montre que l'infusion est beaucoup plus lente dans l'épaisseur que dans le plan (voir figure 6-18).

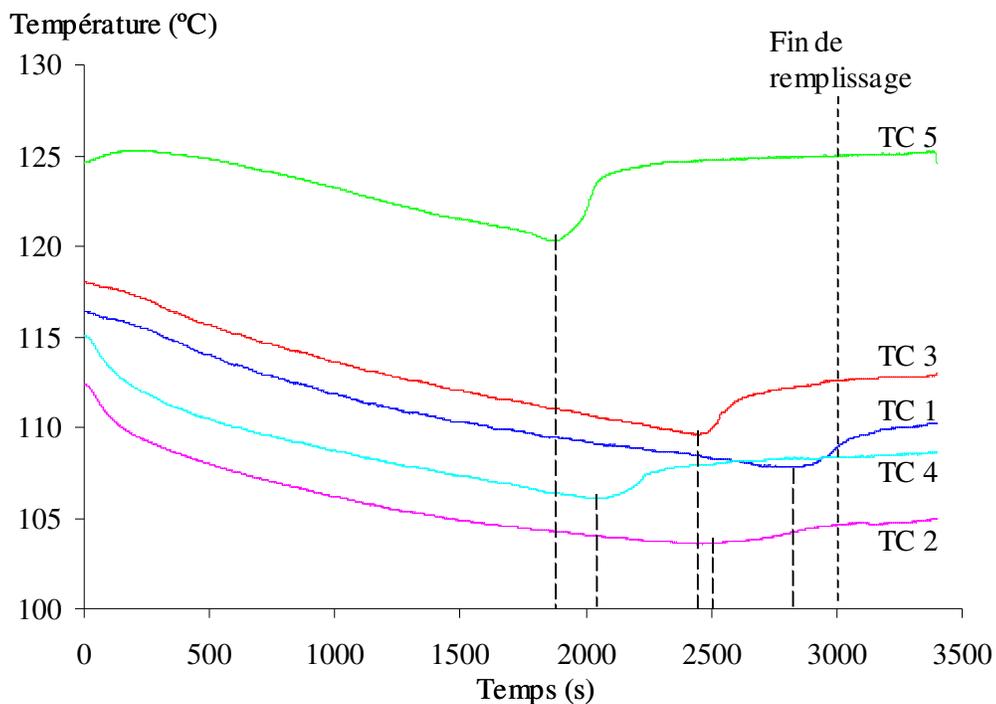


Figure 6-18 Evolution de la température mesurée par les thermocouples placés sur le plan du pli 46 dans le test couvercle ouvert.

Tableau 6-7 Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples placés sur le plan du pli 46 dans le test couvercle ouvert.

Thermocouple	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5
Temps (s)	2800	2500	2450	2050	1900

6.6.3 Ecoulement de résine pour un essai dans une étuve

Dans ce cas, nous voulons obtenir les informations de l'écoulement de résine pendant le procédé LRI dans un environnement thermique plus homogène. Le test présenté ici est le même que celui-ci montré dans la section 4 du chapitre 5. Les positions des micro-thermocouples sont indiquées sur la figure 6-14.

Les évolutions de la température des thermocouples sont présentées sur les figures 6-19 et 6-20, les minimums de température sont notés sur ces courbes. Nous observons une faible évolution de la température, il est donc difficile d'observer le temps où apparaît le minimum pour certains thermocouples. Par exemple, pour TC7 il y a une zone assez longue avec une très faible de variation. La résolution de la chaîne de mesure étant de 0,1°C, nous pouvons considérer que cette zone est quasiment stable, donc le moment d'apparition de la température minimale a été choisi comme le début du point de cette zone de stabilisation. Nous avons estimé le temps d'arrivée du front autour des thermocouples, ils sont notés dans les tableaux 6-8 et 6-9. Pour l'écoulement suivant l'épaisseur, nous avons observé le même phénomène que les essais précédents : l'infusion de résine pli par pli suivant l'épaisseur. Pour l'écoulement dans un plan, l'ordre d'infusion est bien dans le sens de l'entrée de résine vers la sortie de résine.

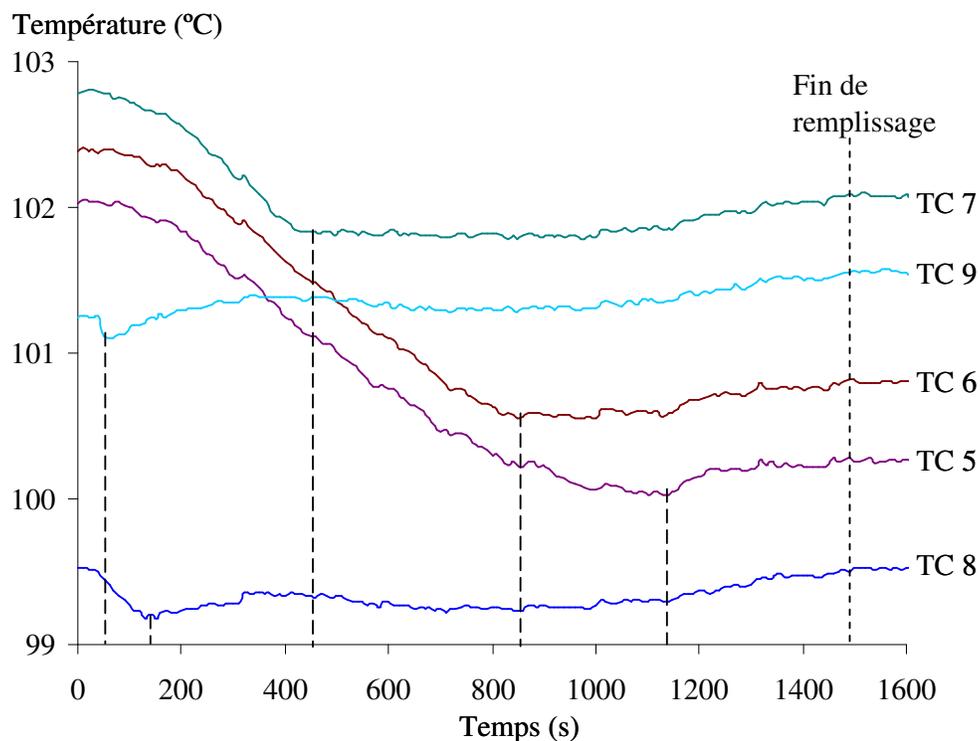


Figure 6-19 Evolution de la température mesurée par les thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme pendant l'infusion de résine dans une étuve.

Tableau 6-8 Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme pendant l'infusion de résine dans une étuve.

Thermocouple	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9
Temps (s)	1150	850	450	130	50

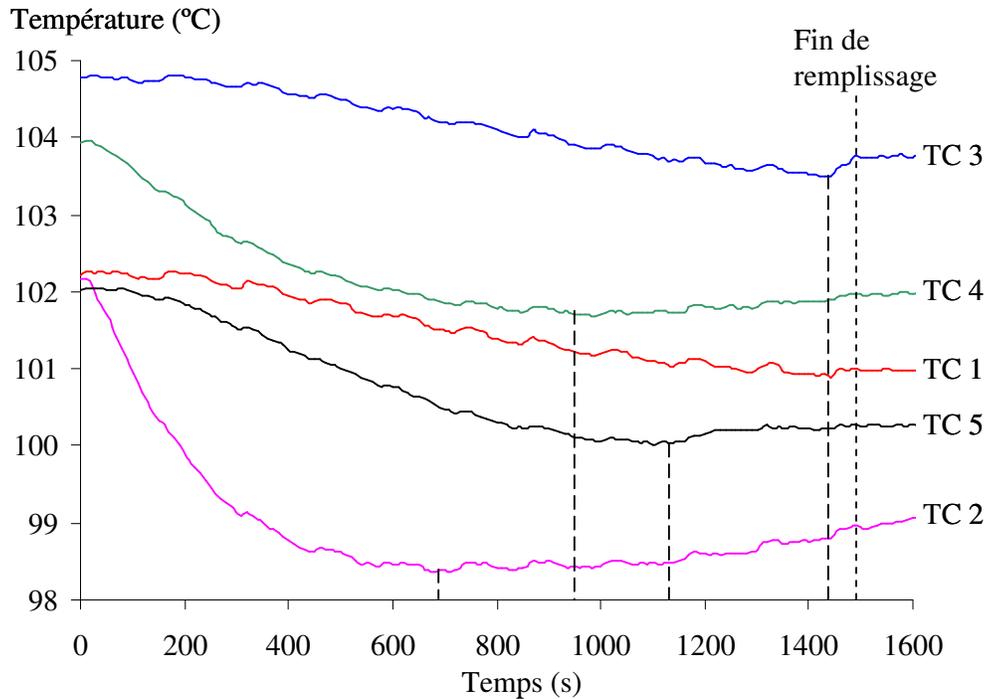


Figure 6-20 Evolution de la température mesurée par les thermocouples placés sur le plan du pli 46 pendant l'infusion de résine dans une étuve.

Tableau 6-9 Temps d'apparition de la température minimum mesurée par les thermocouples placés sur le plan du pli 46 pendant l'infusion de résine dans une étuve.

Thermocouple	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5
Temps (s)	1440	700	1440	950	1150

La figure 6-21 décrit la position du front de résine pendant le remplissage (détermination du temps initial identique que l'essai précédent). Cette courbe présente les mêmes évolutions que celles dans le test avec un couvercle ouvert (figure 6-16), la vitesse du front de résine diminue petit à petit au cours de l'infusion. Nous avons également estimé le temps de remplissage par chaque pli à partir le tableau 6-8 (voir tableau 6-10), cette évolution est tracée sur la figure 6-22. Comme sur la figure 6-17, on peut observer que le temps de remplissage augmente si le pli est placé loin de la source, l'infusion devient plus difficile. Par contre, une différence est remarquée dans ce test, le temps de remplissage pour les plis placés avec la même orientation (90°) dans le milieu de la préforme n'ont pas grande évolution, c'est à dire que la résine s'écoule de manière plus homogène dans la zone du milieu 12 plis.

Tableau 6-10 Temps d'arrivé de résine mesuré entre chaque deux thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme pendant l'infusion de résine dans une étuve.

Infusion	de 1 ^{ère} à 10 ^{ème}	de 10 ^{ème} à 25 ^{ème}	de 25 ^{ème} à 40 ^{ème}	de 40 ^{ème} à 46 ^{ème}
Nombre des plis traversés	9	15	15	6
Temps de remplissage (s)	80	320	400	300

6.6 Caractérisation du front de résine avec des micro-thermocouples distribués

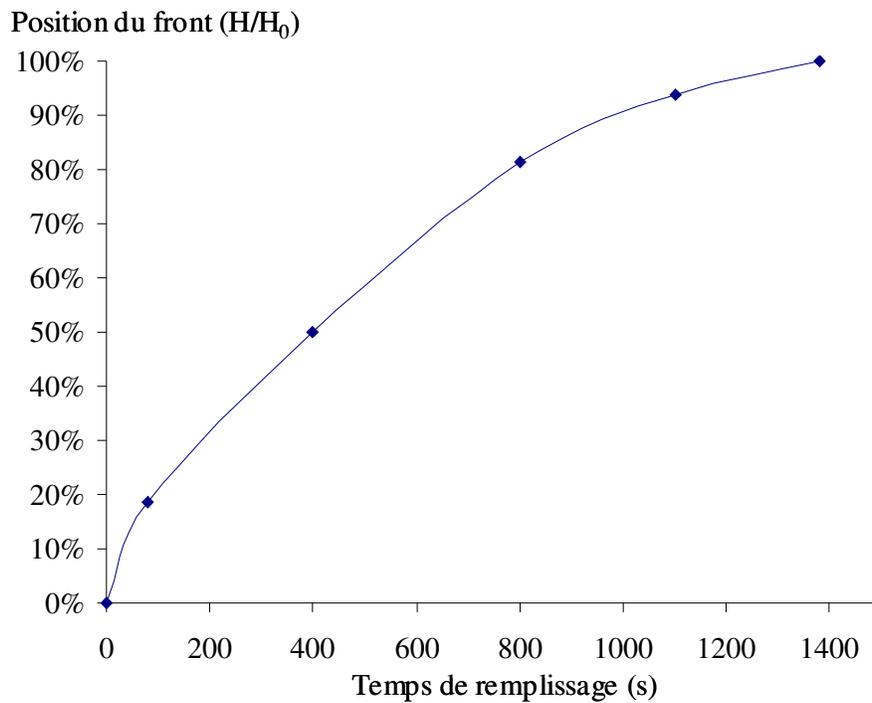


Figure 6-21 Position du front au cours du remplissage estimé par les micro-thermocouples placés dans l'épaisseur de la préforme pour le test dans une étuve.

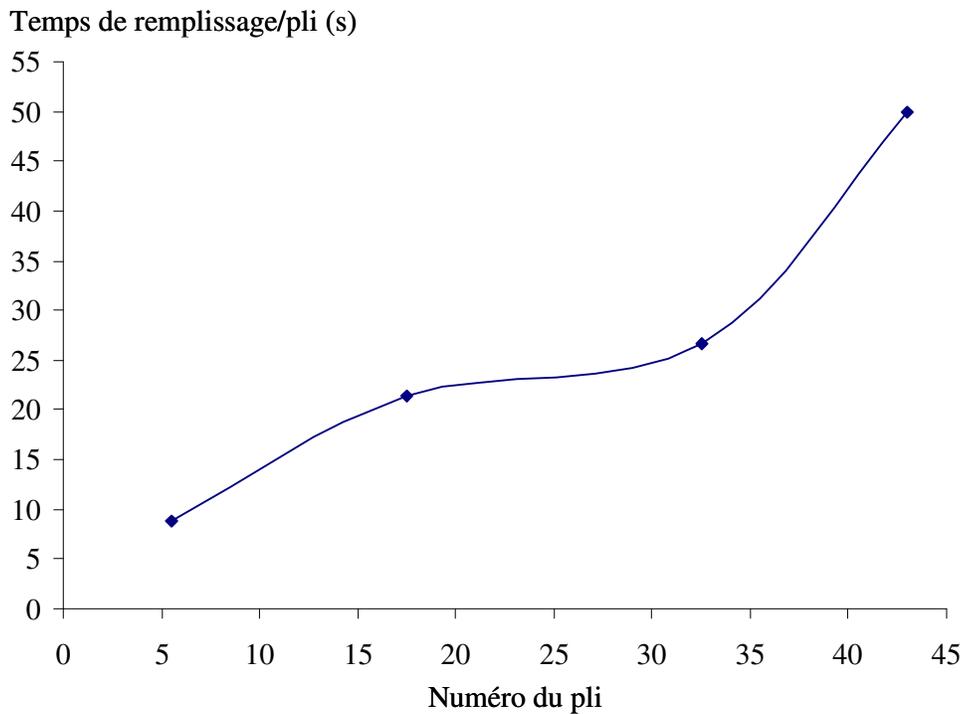


Figure 6-22 Temps de remplissage en fonction de numéro du pli dans l'épaisseur de la préforme pour le test dans une étuve.

6.6.4 Discussion

Différentes conditions de fabrication engendrent différents écoulements de résine pendant le remplissage du procédé. Dans le chapitre 5, les paramètres importants de la fabrication ont été comparés entre l'essai d'infusion sur la plaque chauffante avec couvercle ouvert et un essai dans une étuve. Dans l'essai avec couvercle ouvert, la faible température de la résine d'entrée a perturbé l'écoulement de résine, nous avons besoin de beaucoup plus de temps pour remplir la préforme. Les deux autres essais (infusion de 48 plis avec couvercle fermé ou en étuve) ont été réalisés dans des conditions de température de résine d'entrée similaire. Nous avons donc obtenu presque les mêmes paramètres clefs du procédé. Les comparaisons entre les deux essais sont représentées dans le tableau 6-11. Nous considérons que les différences proviennent de la différence de température de la préforme. La préforme est relativement chaude, ce qui permet dans l'essai avec couvercle fermé, d'accélérer l'écoulement de résine, et de minimiser le temps de remplissage. Dans ces deux conditions d'infusion, un faible gradient de température dans la préforme et une résine d'entrée assez chaude nous permettent d'obtenir des pièces finales avec un haut niveau du taux volumique de fibres.

Tableau 6-11 Comparaison entre un essai d'infusion de résine sur plaque chauffante avec couvercle fermé et un autre essai d'infusion dans une étuve.

	Couvercle fermé	Dans une étuve
Température de résine entrée	90°C < T < 100°C	89,5°C < T < 96°C
Température initiale de la préforme	≈ 125°C	≈ 102°C
Temps de remplissage du système d'infusion (s)	1300	1500
Epaisseur de la pièce composite finale (mm)	12	12,1
TVF final	62,5%	62%
Masse de résine dans la pièce composite finale (g)	550	540

Pour bien observer l'écoulement de résine, nous avons tracé l'évolution de la masse de résine en fonction du temps de remplissage dans différentes conditions du procédé LRI sur la figure 6-23. Pour améliorer la visualisation des courbes, nous effectuons un décalage des courbes à l'instant 0. Globalement, elles ont la même évolution. Au début, la résine entre dans le tuyau très rapidement. Lorsque la résine commence à infuser le drainant et la préforme, la vitesse d'entrée de résine diminue de plus en plus pendant le remplissage. Elle est toujours plus grande dans l'essai avec couvercle fermé et plus petit dans l'essai avec couvercle ouvert. La différence entre les trois cas provient de la température des préformes, sensiblement plus élevée dans le cas de l'essai à couvercle fermé.

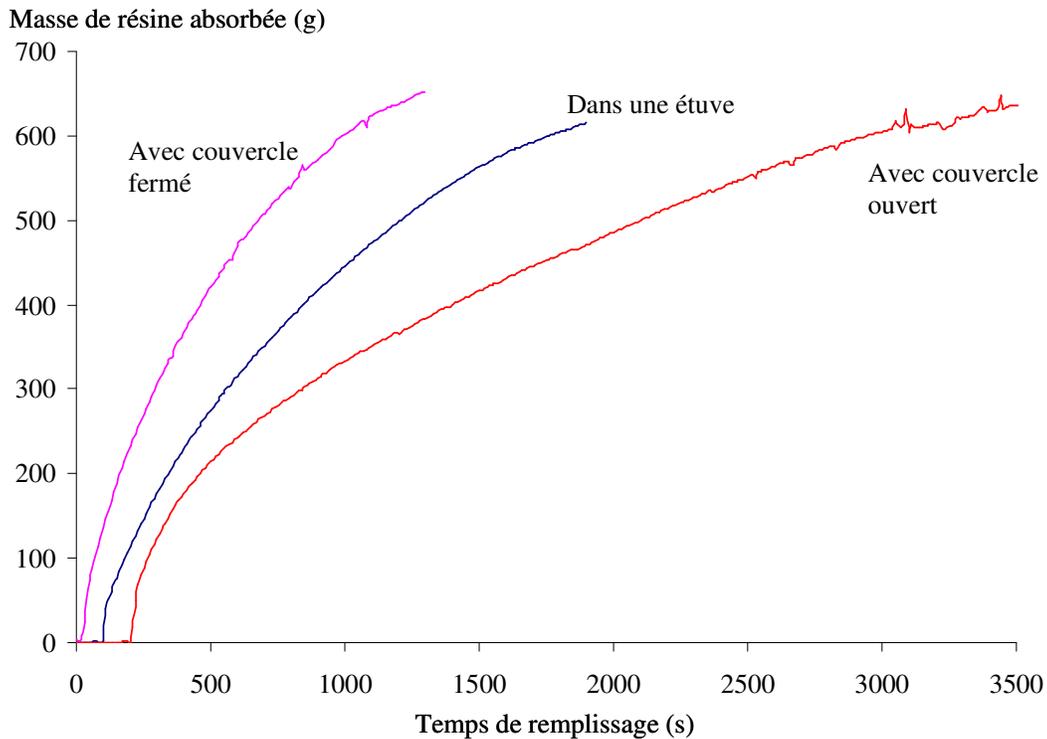


Figure 6-23 Evolution de la masse de résine en fonction du temps de remplissage dans différentes conditions du procédé LRI.

6.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux types de capteurs pour suivre le procédé LRI, et surtout caractériser l'écoulement de résine pendant la phase de remplissage. Les résultats présentés précédemment ont montré qu'il y a une bonne corrélation entre les deux types de capteurs pour la détection du front de résine. Comme le micro-thermocouple est facilement mis en place, nous avons utilisé plusieurs micro-thermocouples au sein de la préforme afin d'avoir une première information sur l'écoulement de résine.

La détection de l'écoulement de résine par les micro-thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme montre que la résine infuse principalement la préforme pli par pli. En revanche, la détection dans un plan présente un écoulement longitudinal suivant l'ordre de l'infusion : à partir de l'entrée de la résine jusqu'à la sortie. Comme la résine infuse toujours plus lentement et plus difficilement du fait de l'augmentation des plis infusés dans la préforme, il existe une limitation du nombre des plis sous environnement industriel. La condition thermique perturbe fortement le temps de remplissage, ici la température de résine entrée est plus importante car la viscosité de résine joue un rôle important dans les procédés d'infusion.

Enfin, les thermocouples ont de faibles dimensions et sont d'utilisation aisée. Ils représentent une technique prometteuse pour suivre le procédé de fabrication des matériaux composites par infusion de résine en environnement industriel.

**Chapitre 7 : Suivi du procédé LRI par
micro-thermocouples et projection de franges**

7.1 Introduction	112
7.2 Méthode de projection de franges.....	112
7.3 Conditions expérimentales	114
7.3.1 Montage optique	114
7.3.2 La préforme et le positionnement des micro-thermocouples	115
7.4 Evolution de la température de la préforme pendant l'infusion de résine ...	116
7.5 Variation de l'épaisseur de la préforme au cours de remplissage.....	117
7.6 Corrélation des résultats expérimentaux.....	119
7.7 Conclusion.....	122

7.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons obtenu les informations sur l'écoulement de résine pendant le procédé LRI par les micro-thermocouples et le capteur à fibre optique. Pour améliorer encore la compréhension du procédé d'infusion de la résine, nous voulons caractériser le comportement de la préforme en même temps que l'écoulement de résine au cours de remplissage dans le même cas test.

Certains travaux de recherche peuvent être trouvés dans les littératures pour la caractérisation de comportement de la préforme pendant le procédé LCM. Par exemple, Govgnon *et al.* [82] ont utilisé la stéréophotogrammétrie pour le suivi de l'évolution d'épaisseur de la préforme et l'écoulement de la résine. De plus, Duan *et al.* [93] ont choisi une jauge de déplacement à grande sensibilité (1 μm) pour mesurer l'épaisseur de la préforme et le taux volumique de fibre en fonction de la pression sous vide. L'utilisation d'une jauge de déplacement est simple pour notre condition d'essai, mais l'information recueillie est ponctuelle, et les variations spatiales de l'écoulement ne sont donc pas mesurables. Ici, nous adaptons la méthode de projection de franges que nous maîtrisons dans notre laboratoire pour caractériser la variation d'épaisseur de la préforme pendant la phase de remplissage. Comme dans le cas de la stéréophotogrammétrie, cette méthode permet de suivre les variations de forme en surface de la préforme. Or, comme nous avons vu dans les deux publications citées précédemment, le comportement de la préforme est fortement lié à l'écoulement de la résine. Finalement, nous plaçons un certain nombre de micro-thermocouples dans la préforme pour détecter l'écoulement de résine, afin de comparer les résultats entre ces deux méthodes et compléter les informations de l'écoulement de résine pendant le procédé de l'infusion sous environnement industriel.

7.2 Méthode de projection de franges

Le principe physique de la méthode de projection de franges est simple : un réseau périodique de franges blanches et noires est projeté sur une surface de l'objet. La lumière est diffusée par l'objet et capturée par une caméra CCD (voir figure 7-1). La déformation des franges est enregistrée comme une carte de phase, elle peut être transférée à la sortie du plan de déplacement de l'objet éclairé [83, 94].

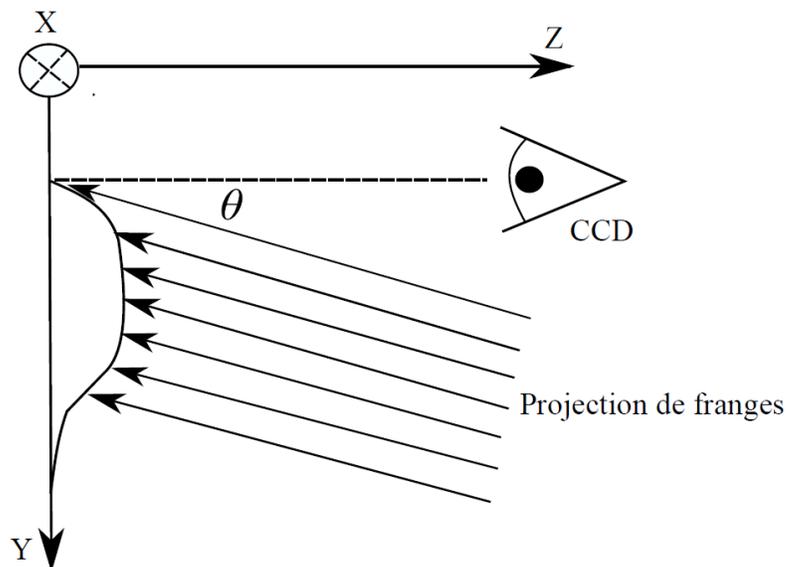


Figure 7-1 Principe de la méthode de projection de franges.

7.2 Méthode de projection de franges

La méthode de la projection de franges exploite la lumière diffusée par un objet, afin de mesurer ses variations de forme. Donc, l'objet doit diffuser la lumière suffisamment; si ce n'est pas le cas, la surface peut être préparée. De plus, pour observer le déplacement du plan, l'angle entre la projection de franges et de la lumière diffuse observée ne doit pas être nul. Lorsque l'objet est absent, l'intensité de lumière peut être décrite mathématiquement par une fonction périodique I_{ii} (voir équation 7-1). Par contre, les franges sont décalées quand l'objet est présent. L'intensité de lumière sur un objet éclairé par une série de franges I_{obj} peut être décrite par l'équation 7-2 avec une perturbation φ correspondant à la forme de l'objet :

$$I_{ii}(x, y) = I_0(x, y) \left[1 + \gamma(x, y) \cos \left(\frac{2\pi}{p(x, y)} y \right) \right] \quad 7-1$$

$$I_{obj}(x, y) = I_0(x, y) \left[1 + \gamma(x, y) \cos \left(\frac{2\pi}{p(x, y)} y + \varphi(x, y) \right) \right] \quad 7-2$$

Cette équation est relative à l'intensité moyenne I_0 et au contraste γ . Ces valeurs sont constantes sur toute la carte, mais il existe peut-être des faibles variations dues à l'éclairage non-homogène ou au changement de la diffusivité sur le dessus de la surface. Donc l'intensité moyenne et le contraste doivent être considérés comme des grandeurs locales et notés $I_0(x, y)$ et $\gamma(x, y)$, (x, y) , étant les coordonnées de la surface plane. Le pas p est la distance entre deux pics de lumière sur une surface plane, qui doit être déterminé par un étalonnage.

Enfin, un champ du décalage de phase $\varphi = \varphi(x, y)$ sur chaque point de la surface de l'objet et une fonction du déplacement $Z = Z(x, y)$ (voir figure 7-1) peuvent être calculés par les relations ci-dessous :

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi \tan(\theta(x, y))}{p(x, y)} Z(x, y) \quad 7-3$$

$$\text{Soit: } Z(x, y) = \frac{p(x, y)}{2\pi \tan(\theta(x, y))} \varphi(x, y) \quad 7-4$$

Dans l'équation 7-2, il y a trois inconnues ($I_0(x, y), \gamma(x, y), \varphi(x, y)$) ; pour déterminer ces trois inconnues, il faudra au moins trois équations. Les équations peuvent être obtenues par les méthodes d'extraction en phase spatiale ou en phase temporelle. L'extraction de phase spatiale consiste à projeter une seule carte de la frange sur l'objet déformé et à enregistrer l'image relative. L'équation 7-2 peut être reconstruite en un point par ajustement d'une fonction sinus sur un certain nombre de pixels autour du point donné. Pour le déphasage temporel, il consiste à illuminer l'objet par j cartes de franges ($j \geq 3$) à différents pas de temps décalés d'une phase prédéfinie, égale à $\frac{2\pi}{j}$. Donc, chaque pixel est éclairé par toutes les intensités de lumière à l'intérieur correspondant à un pas de franges. Pour chaque pixel, l'équation 7-2 peut être reconstruite à l'aide des intensités correspondant aux j cartes des franges.

Afin de mesurer la variation d'épaisseur en fonction de temps, la méthode la plus pratique est de projeter une carte des franges sur la surface de la préforme et d'observer la déformation de l'image au cours du remplissage, donc une extraction en phase spatiale est adaptée. La sensibilité doit être très élevée en comparaison avec des expériences classiques [95] et la densité de franges est également élevée, de près de 12 pixels par une frange. Donc, nous pouvons utiliser un algorithme d'extraction en phase spatiale [96] pour obtenir le $\varphi = \varphi(i, j)$ par transformée de Fourier (l'équation 7-5), ici, (i, j) sont les coordonnées du pixel sur une zone correspondant à la procédure d'extraction. $w(k)$ est une fonction de la pondération bilinéaire tels que $w(0) = w(n \cdot p) = 0$ et $w(\frac{n \cdot p}{2}) = 1$, k est le terme de la série de Fourier et $n \cdot p$ est la longueur analysée.

$$\varphi(i, j) = \arctan_{2\pi} \left(\frac{\sum_{k=1}^{n \cdot p} \left\{ w(k) \cdot \sin \left(k \cdot \frac{2\pi}{p} \right) \cdot I_{li} \left(i - \frac{n \cdot p}{2} + k, j \right) \right\}}{\sum_{k=1}^{n \cdot p} \left\{ w(k) \cdot \cos \left(k \cdot \frac{2\pi}{p} \right) \cdot I_{li} \left(i - \frac{n \cdot p}{2} + k, j \right) \right\}} \right) \quad 7-5$$

7.3 Conditions expérimentales

7.3.1 Montage optique

Le montage de la projection des franges est représenté sur la figure 7-2. Un vidéo projecteur Sony (1024×768 pixels) projette les franges sur la préforme, un camera vidéo CDD (Basler A113P, 1296×1030 pixels, 8 bits) liée à un ordinateur récupère et enregistre les images pendant l'infusion de résine. La carte de la phase $\varphi(i, j)$ est extraite par le logiciel « Photomecanix » développée dans notre laboratoire par J. Molimard [97], afin de déterminer le champ du déplacement $Z(x, y)$ correspondant à l'équation 7-4. Avant l'infusion de résine, une procédure d'étalonnage a été développée sur la base de la translation connue d'un objet de référence plan, ici une plaque de verre.

Une estimation de la résolution sur la base d'un test de répétabilité sur une situation stable, donne une valeur de 0,8% par frange, soit un niveau de bruit de 36 μm . La deuxième grandeur métrologique intéressante pour une méthode de champ est sa résolution spatiale. Elle peut se définir comme la distance entre deux données statistiquement indépendantes. Elle a été déterminée en utilisant la fonction d'auto-corrélation du bruit, avec une valeur de coupure fixée à 0,5. La valeur obtenue est de 25 pixels, soit 5,7 mm.

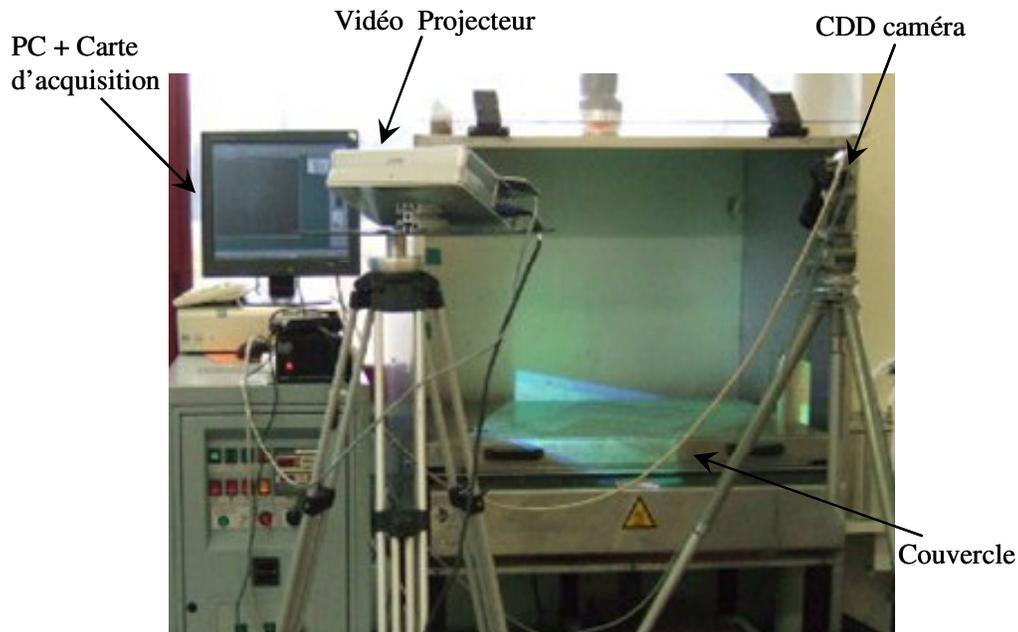


Figure 7-2 Photo du dispositif de projection de franges installé devant le plateau chauffant.

7.3.2 La préforme et le positionnement des micro-thermocouples

L'empilement de la préforme et l'élaboration sont exactement les mêmes dans le cas test que nous avons présenté dans le chapitre 2 : infusion d'une plaque par le procédé LRI à partir d'empilement de 24 plis de tissu carbone, d'un produit HEXCEL Corporation SAS. Le « tissu UD » de référence G1157 E01, la séquence d'empilement est croisée $[90_6/0_6]_S$ et les dimensions de la préforme sont 335 mm × 335 mm × 10 mm.

La complémentarité des procédures de mesure va être réalisée par des micro-thermocouples et une méthode de projection de franges. La méthode de projection de franges permet de détecter la progression du front de résine par la mesure du gonflement de la préforme pendant la phase de remplissage. Compte tenu d'un écoulement de la résine principalement en direction de l'épaisseur, le gonflement de la résine devrait suivre l'arrivée de résine en bas de l'empilement de la préforme. Afin de tenter une corrélation entre la mesure du gonflement et l'estimation des thermocouples, les thermocouples doivent être placés à proximité du fond de la préforme, par contre ils ne peuvent pas être en contact avec la plaque chauffante, car cela pourrait éliminer la différence de température entre la préforme et la résine. En conséquence, les trois micro-thermocouples sont placés entre le pli 22 et le pli 21 sur la même ligne médiane de la plaque (voir figure 7-3). Finalement, dans ce test, l'utilisation des mesures optiques implique de maintenir le couvercle ouvert pendant la phase du remplissage.

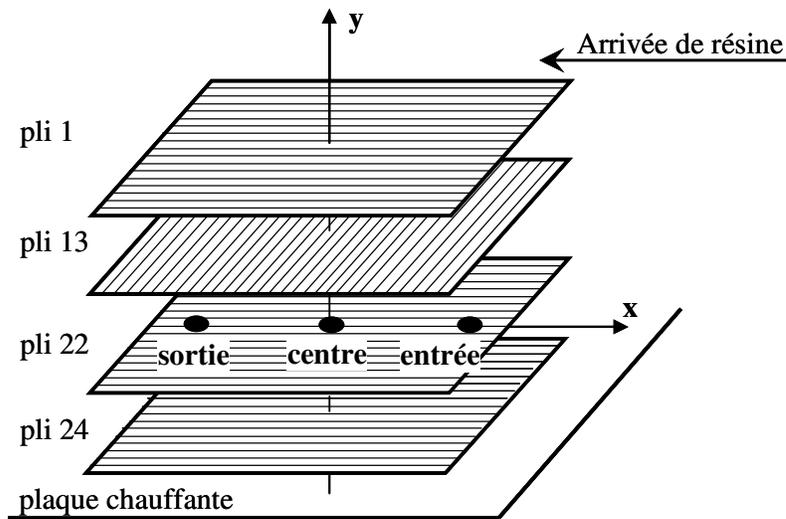


Figure 7-3 Positionnement des micro-thermocouples dans l'empilement de la préforme pour l'essai avec couvercle ouvert.

7.4 Evolution de la température de la préforme pendant l'infusion de résine

La figure 7-4 présente l'évolution de la température des trois micro-thermocouples en fonction du temps de remplissage. Les trois courbes ont une évolution similaire. Nous avons expliqué cette évolution dans le chapitre 5, par exemple pour la réponse du thermocouple placé au centre de la plaque. La première augmentation de la température (zone 1) est la phase de préchauffage de la préforme due au couvercle fermé. Lorsque d'essai d'infusion commence, le couvercle est ouvert et la résine froide entre dans le drainant. Cela tend à refroidir le système, la zone de la température stabilisée est trouvée dans la zone 2. La température continue à diminuer (zone 3) en raison de la quantité de résine de plus en plus importante dans la préforme. Dans la zone 4, la température atteint la valeur minimale, qui peut être considérée comme la température de la résine dans le voisinage des thermocouples. Les temps d'arrivée de résine estimés par les trois micro-thermocouples sont montrés dans le tableau 7-1. Une fois la valeur minimale atteinte, la température commence à augmenter à cause de la source de chaleur fournie par la plaque chauffante au bas de la préforme (zone 5). Dans la dernière partie de la zone 5, la température augmente très rapidement en raison de la conduction thermique. Ce phénomène montre qu'il n'y a plus d'air entre le front de résine et la plaque chauffante. Finalement, la zone 6 présente la dernière période dans la phase de remplissage. Traditionnellement, dans des conditions industrielles, la phase de remplissage se termine par un écoulement de résine continue observée à la sortie. Le temps de remplissage de ce test est 1400 s.

7.5 Variation de l'épaisseur de la préforme au cours de remplissage

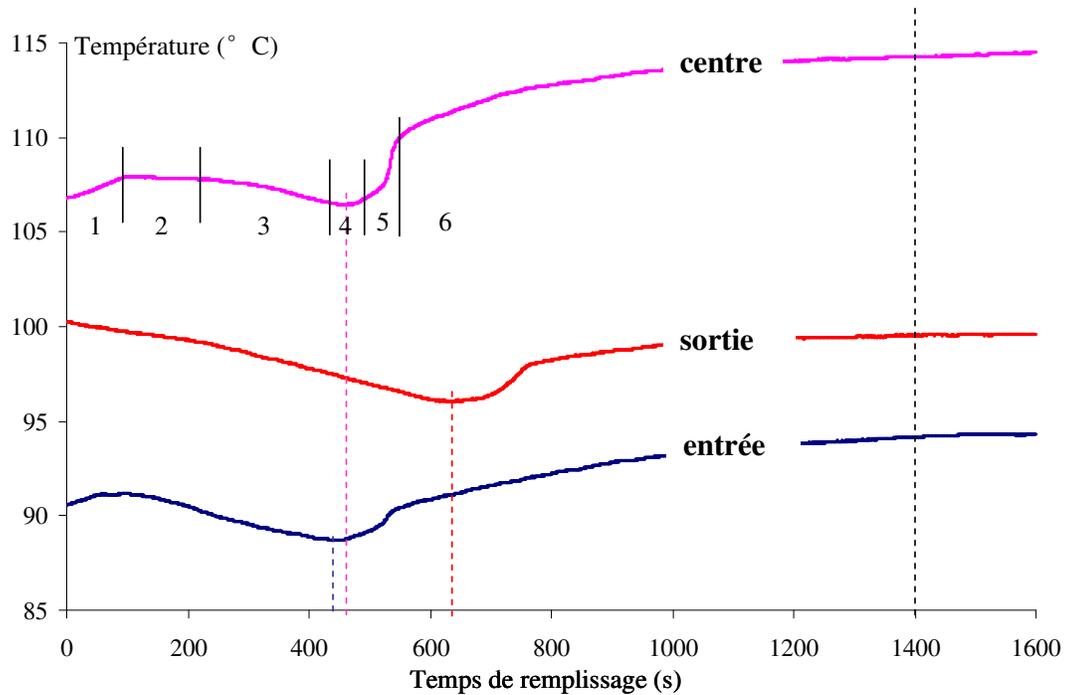


Figure 7-4 Variation de la température des trois micro-thermocouples dans le test d'infusion de résine avec couvercle ouvert.

Tableau 7-1 Temps d'apparition de la température minimum pour chaque thermocouple.

	TC entrée	TC centre	TC sortie
Temps (s)	440	470	620

7.5 Variation de l'épaisseur de la préforme au cours de remplissage

Les résultats de la mesure par projection de franges sont présentés sur la figure 7-5. Les variations d'épaisseur de la préforme sont enregistrées par rapport au temps de remplissage. Les déplacements prennent en compte tous les changements qui se produisent au cours du procédé, y compris la variation de forme en raison de variations de la température. Pour les mesures, cinq régions de 100 pixels × 100 pixels ont été sélectionnées sur la surface de la plaque, afin de suivre les changements d'épaisseur de la préforme. Ces zones sont choisies dans les quatre coins et le centre de la plaque, comme nous le représentons sur la figure 7-5.

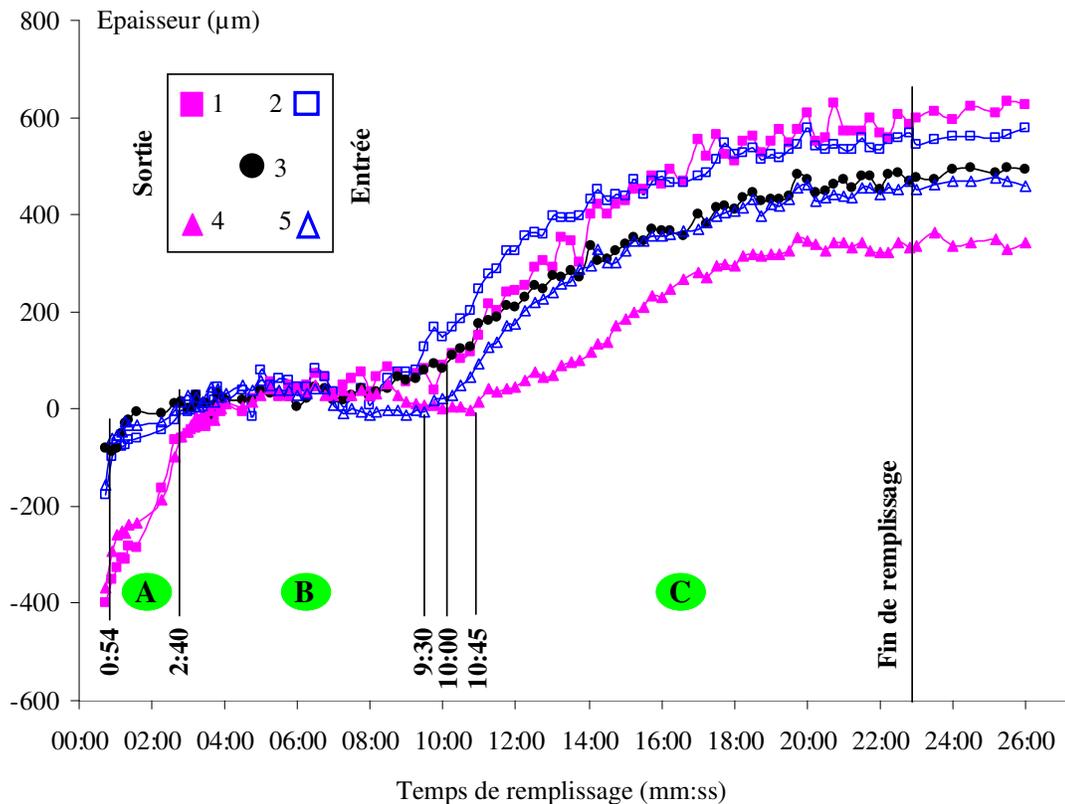


Figure 7-5 Variation de l'épaisseur de l'empilement de la préforme en fonction du temps de remplissage mesurée pour 5 points choisis.

Dans les mesures, la phase de remplissage peut être divisée en trois parties. Tout d'abord, la résine remplit le drainant (zone A) après 2 min et 40 s. La résine commence à entrer dans le drainant au point 2, plus proche de l'entrée. Ensuite les points 3 et 5 sont atteints, les points 1 et 4 sont remplis à la fin. Comme nous l'avons observé visuellement, ces phénomènes montrent que dans le drainant le front de résine n'est pas homogène. Deuxièmement, l'évolution de l'épaisseur est assez stable pendant environ 8 minutes dans la zone B. Cela signifie que la résine imprègne le système sans variation de volume. Dans cette zone, aucun écoulement de résine ne peut être observée dans le tuyau de sortie, confirmant que l'imprégnation de résine n'est pas encore finie. Pendant toute la période, la résine remplit les vides disponibles dans la préforme sans changement de volume. Puis, à environ 10 minutes, une autre augmentation est observée clairement. Elle commence presque en même temps du voisinage de l'entrée de résine et du centre de la plaque (points 2,3 et 5), et ensuite à la sortie de la résine (points 1 et 4). Le début de cette augmentation est identifié à la figure 7.5 par le changement de pente de la variation d'épaisseur (voir également les figures 7-6, 7-7 et 7-8). Enfin, la préforme est remplie dans la phase C, les points 1 et 2 et les points 3 et 5 sont soumis à des variations similaires ; l'augmentation est moins importante au point 4, à proximité du tuyau de sortie. A partir de 26 min, la résine sort dans le tuyau : la phase de remplissage est finie.

La variation de l'épaisseur moyenne de la préforme est 690 µm (drainant + préforme), mesurée sur 800000 points correspondant à 280 × 280 mm². L'augmentation de

7.6 Corrélation des résultats expérimentaux

l'épaisseur totale varie de 520 à 960 μm , mais est plutôt distribuée de façon homogène. Il existe quelques variations locales sensibles, comme nous pouvons le voir sur la figure 7-5, pour la région 1. La plupart sont autour du coin supérieur gauche, une zone riche de résine correspondant à la plus grande variation d'épaisseur a été observée. Enfin, la variation d'épaisseur moyenne du drainant est estimée dans la phase A est de 140 μm .

Comme mentionné précédemment, la variation d'épaisseur peut caractériser l'avancement du front de résine dans la préforme au cours de la phase de remplissage. Le gonflement de la préforme apparaît lorsque la résine arrive au fond de la préforme entre en contact avec la plaque chauffante. Les temps du gonflement de la préforme observé à partir de chaque région sont indiqués au tableau 7-2. Il est clair que le gonflement apparaît d'abord à l'entrée de résine, puis au centre de la plaque, et enfin à la sortie de résine. Il est vérifié que le même ordre d'infusion peut être déduit des résultats des micro-thermocouples.

Tableau 7-2 Temps correspondant au début du gonflement de la préforme observé dans 5 zones (voir figure 7-5).

N° de la zone observée	1	2	3	4	5
Temps correspondant au début du gonflement de la préforme (s)	600	495	510	645	570

7.6 Corrélation des résultats expérimentaux

Les résultats des micro-thermocouples et de la méthode de projection de franges ont été comparés dans ce même test. Les figures 7-6, 7-7 et 7-8 présentent les résultats de projection de franges que nous avons obtenus à l'endroit où les thermocouples sont placés. Ici, nous rappelons que les trois thermocouples ont été placés dans le pli 22 de la préforme, respectivement, à proximité de l'entrée de la résine, au centre et à côté de la sortie de la résine (voir figure 7-3). Les résultats sont obtenus par la méthode de projection de franges qui sont les valeurs moyennes mesurées dans les trois zones 100 pixels \times 100 pixels centrées sur chaque position du thermocouple. Sur la figure 7-6, la réponse du thermocouple proche de l'entrée de la résine présente un minimum à 440 s, et la pente de la variation de l'épaisseur change à 500 s. Nous pouvons imaginer que ces réponses sont certainement liées à un même phénomène : la résine arrive proximité de la plaque. Ici, il existe un petit décalage entre les deux techniques de mesure, car la détection de la valeur minimum de la température par thermocouple correspond au moment où la résine arrive dans l'environnement du pli 22, près de la plaque chauffante, par contre la variation de l'épaisseur de la préforme présente le temps nécessaire à la résine pour traverser l'ensemble de l'empilement de la préforme.

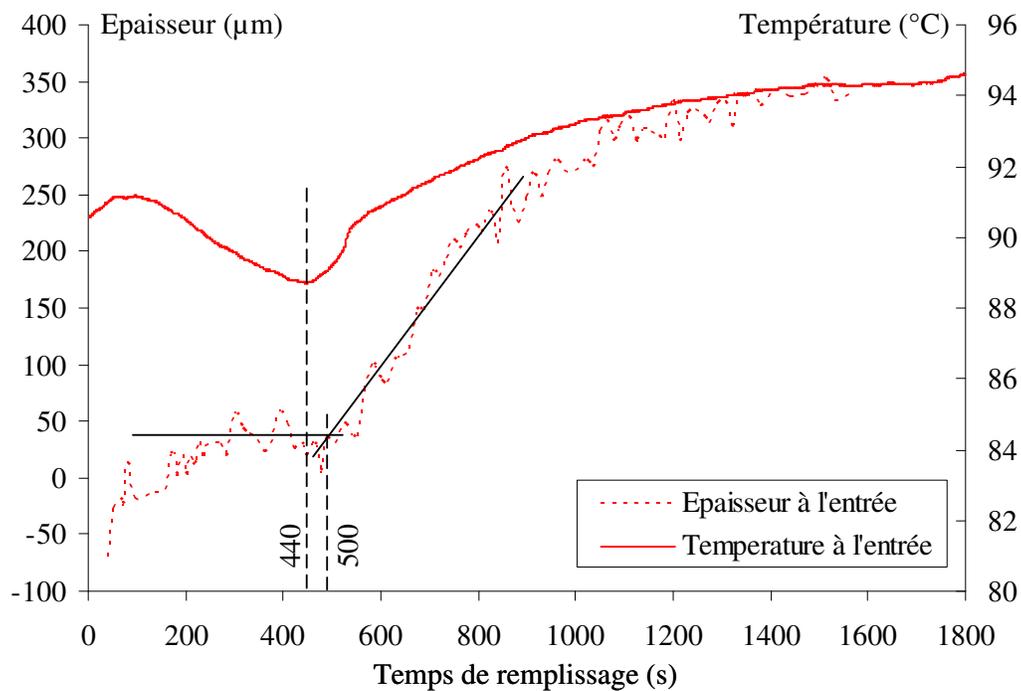


Figure 7-6 Evolution de la température et de l'épaisseur de la préforme sur le pli 22 au voisinage de l'entrée de résine.

Cette corrélation de la réponse du thermocouple et de la variation d'épaisseur est également vérifiée par les deux autres positions (voir figures 7-7 et 7-8). Les températures minimales mesurées par les thermocouples coïncident quasiment avec le changement d'épaisseur au centre et en sortie de résine. Nous remarquons que le délai entre les deux techniques de détection devient le plus en plus court (voir tableau 7-3), lorsque les positions sont plus proches de la sortie, et les détections du thermocouple et de la projection de franges sont même inversées à la position de la sortie de résine. Ces phénomènes pourraient provenir de la résine qui s'écoule sur la plaque chauffante en direction de la sortie, créant ou révélant un type de « race-tracking » [40,41], ce qui faciliterait la saturation du bas de la préforme avant la détection effectuée par thermocouple (voir figure 7-9).

7.6 Corrélation des résultats expérimentaux

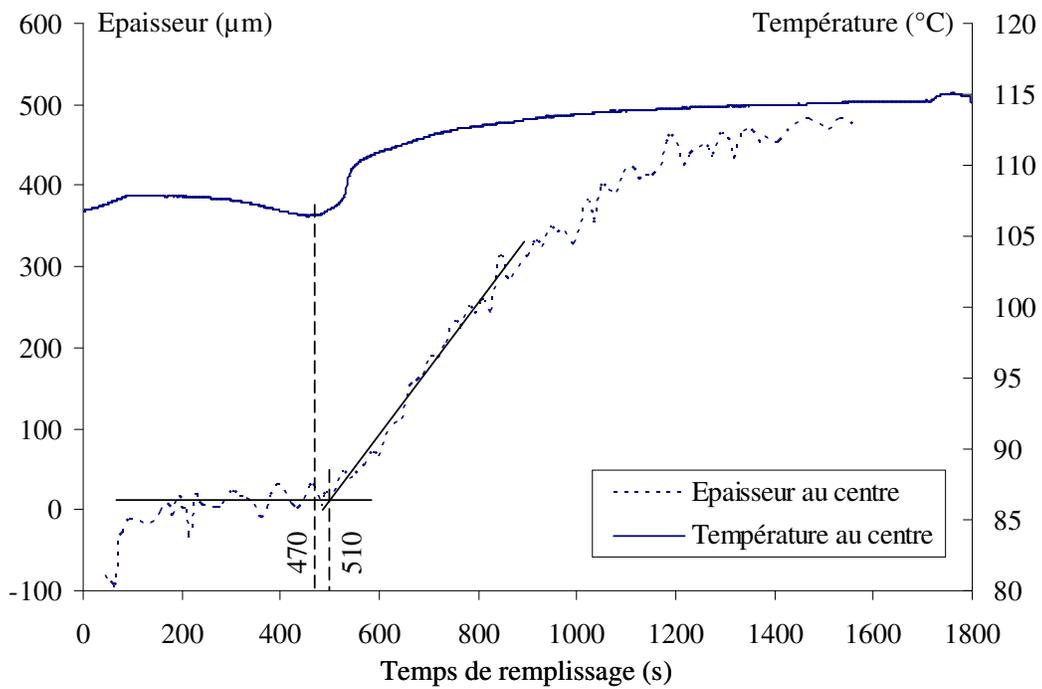


Figure 7-7 Evolution de la température et de l'épaisseur de la préforme au centre du pli 22.

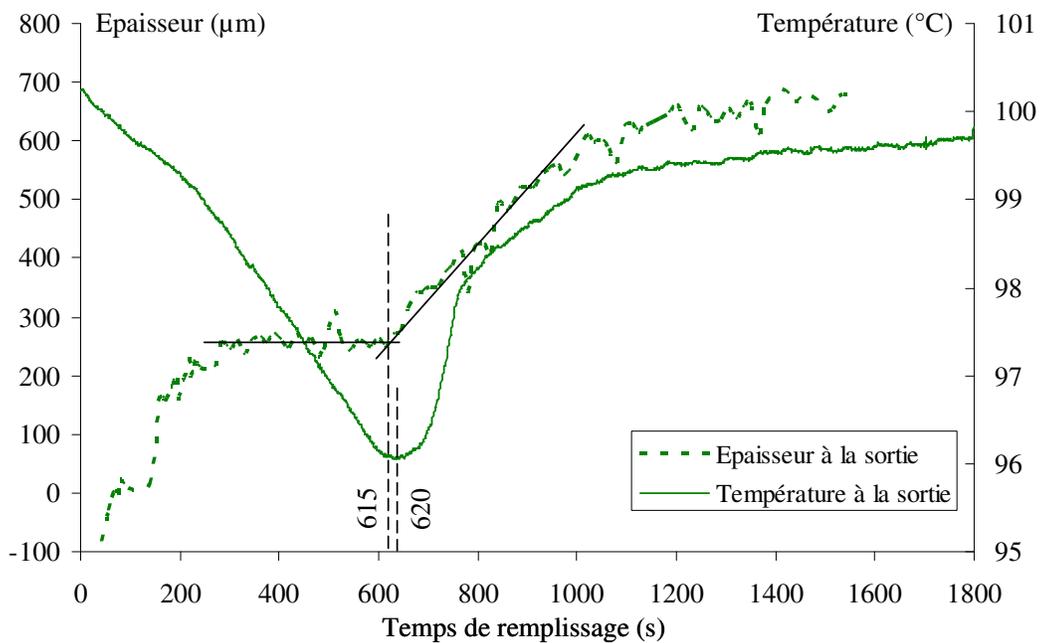


Figure 7-8 Evolution de la température et de l'épaisseur de la préforme sur le pli 22 au voisinage de la sortie de résine.

Tableau 7-3 Comparaison du temps d'arrivée de la résine entre les micro-thermocouples et la méthode de projection de franges.

	Entrée	Centre	Sortie
Temps d'apparition de la température minimum (s)	440	470	620
Début du gonflement de la préforme (s)	500	510	615
Le délai entre la température minimale et le gonflement de la préforme (s)	60	40	5

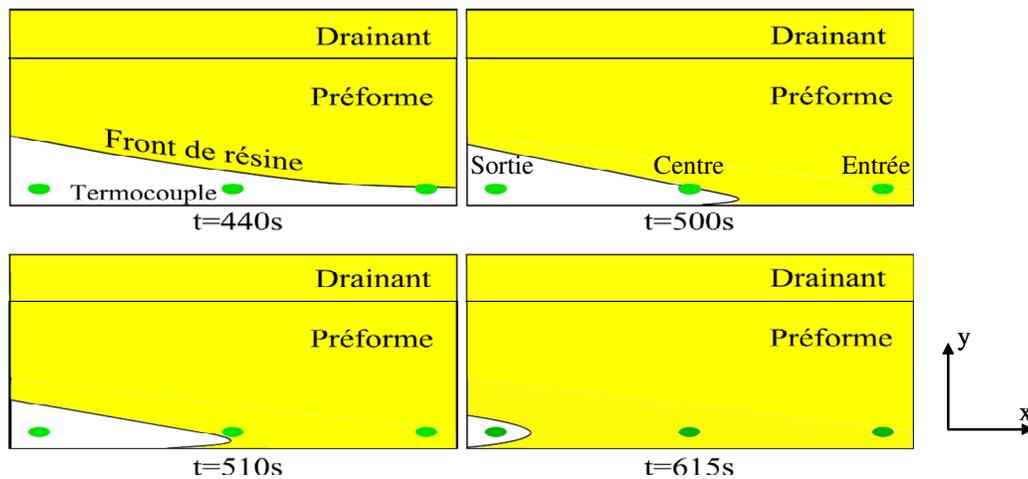


Figure 7-9 Estimation de la forme du front de résine dans la préforme et effet de « race-tracking ».

7.7 Conclusion

Dans le cas présent, les expériences ont été menées pour avoir un premier aperçu sur les mécanismes complexes au cours du procédé LRI et surtout pendant la phase de remplissage. Deux techniques de mesure ont été utilisées pour caractériser l'écoulement de résine et le comportement de la préforme avec un faible intrusivité. La méthode de projection de franges donne une mesure quantitative de la variation de l'épaisseur de la préforme. Les deux types de résultats montrent une bonne corrélation. A partir des résultats, nous pouvons conclure aux trois étapes d'un scénario pour la phase de remplissage d'une plaque : 1^{ère} le remplissage du drainant, 2^{ème} le remplissage du vide sans changement du volume global, 3^{ème} le gonflement de la plaque à cause de la résine qui sépare le réseau des fibres dans la préforme.

*Partie 4 Comparaison expérience
/ simulation numérique pour un
essai d'infusion de résine sous la
condition réelle*

Chapitre 8 : Analyse de la mise en œuvre du procédé LRI standard

8.1 Introduction	126
8.2 Caractéristique de la préforme sèche avant l'infusion de résine	126
8.2.1 Essai de compression transversale de la préforme.....	127
8.3.2 Compaction de la préforme sous un sac à vide.....	129
8.3 Infusion de la plaque sous conditions standards	127
8.3.1 Condition d'infusion de résine.....	127
8.3.2 Montage expérimental.....	129
8.3.3 Calcul de la porosité initiale de la préforme.....	129
8.3.4 Caractéristique de l'écoulement de la résine pendant la phase de remplissage.....	129
8.3.4.1 Mesure de la température	129
8.3.4.2 Suivi de l'avancement du front de résine	132
8.3.4.3 Mesure de la masse de résine	132
8.4 Cuisson et refroidissement.....	134
8.5 Conclusion.....	134

8.1 Introduction

Dans la deuxième partie, nous avons présenté notre modèle numérique et optimisé les paramètres importants du procédé d'infusion de résine par des simulations numériques. L'approche expérimentale a montré les travaux concernant la caractérisation du procédé LRI pour suivre les paramètres clés dans la fabrication des matériaux composites. Pour combiner la partie numérique et la partie expérimentale et pour valider et améliorer le modèle numérique, une comparaison entre l'expérience et la simulation numérique doit être réalisée. Pour cela, les conditions aux limites doivent être identiques et il faut déterminer les lois de comportement des matériaux.

8.2 Caractéristique de la préforme sèche avant l'infusion de résine

8.2.1 Essai de compression transversale de la préforme

Pour caractériser la préforme sèche avant l'infusion de résine, un essai indépendant de compression transverse sur la même référence de tissus UD qu'on a utilisé précédemment est réalisé au sein du laboratoire de Hexcel Corporation sur une machine de type Z300 ZWICK 300 kN. L'épaisseur initiale de la préforme après mesure est $22 \pm 0,5$ mm (valeur moyenne obtenue par des mesures simples aux 4 côtés de la préforme avec un régle, pour l'instant, on n'a pas très bon moyen à mesurer cette épaisseur). Les courbes de la pression et du taux volumique de fibres en fonction du déplacement sont obtenues et présentées sur la figure 8-1. Au début de la courbe de compression, la figure 8-1 montre qu'il y a de très fortes déformations correspondant à de très faibles contraintes. Cela correspond à la disparition des vides macroscopiques entre plis, puis au réarrangement des mèches les unes par rapport aux autres. A partir de ces deux courbes, nous pouvons estimer le déplacement et le taux volumique de fibres de la préforme sous vide à 1 mbar, qui sont respectivement égales à 8,0 mm et 53%.

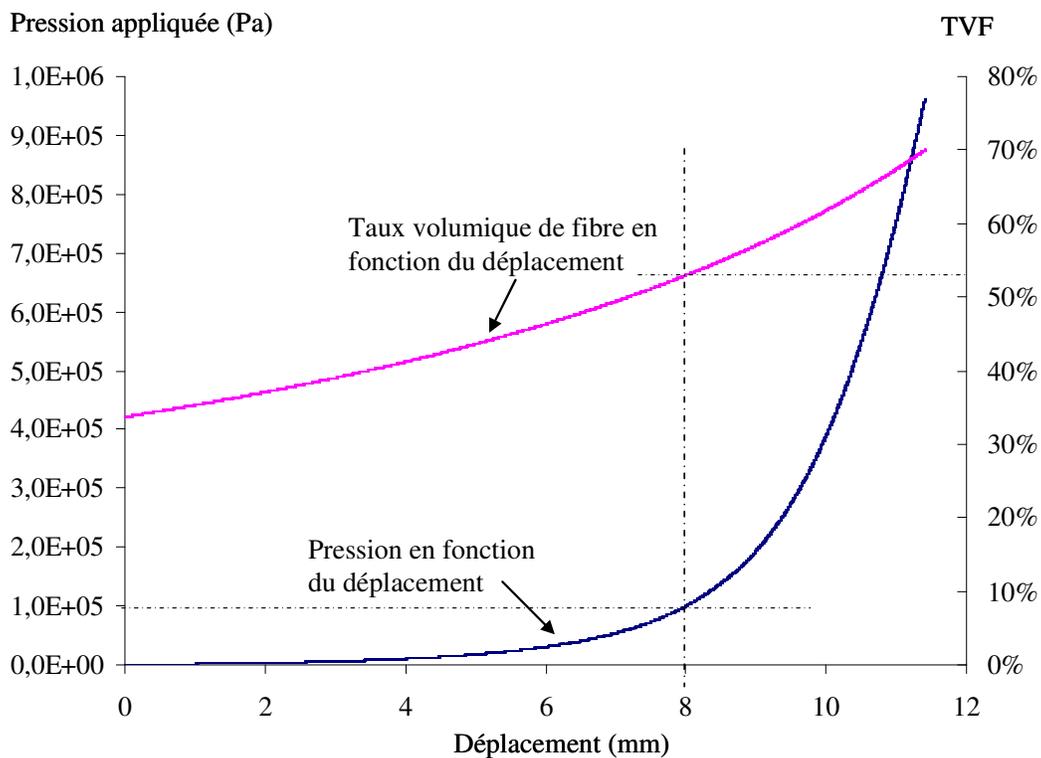


Figure 8-1 Courbes d'un essai de compression transversale de la préforme.

8.2.2 Compaction de la préforme sous un sac à vide

Pour vérifier l'essai de compression et obtenir une épaisseur de la préforme plus précise sous un sac à vide, une mesure d'épaisseur de la préforme après la compaction sous sac à vide à 1 mbar a été réalisé par une machine à mesurer tridimensionnelle (voir figure 8-2). Une mesure d'épaisseur de la préforme initiale donne 22 mm avec la même méthode de mesure précédente. La préforme sèche est posée sur une surface parfaitement plane. Un sac à vide permet d'effectuer une condition sous vide à 1 mbar à cette préforme. Après les mesures d'épaisseur sur 25 points choisis sur la surface de la préforme, une valeur moyenne donne l'épaisseur de la préforme sèche sous vide qui est de 13,996 mm avec un écart-type de 0,06 mm, elle correspond à un taux volumique de fibres de 53,1%. Nous avons trouvé quasiment les mêmes valeurs pour l'épaisseur de la préforme et le taux volumique de fibres dans les deux essais. Cet essai permet donc de valider l'essai de compression de la préforme.

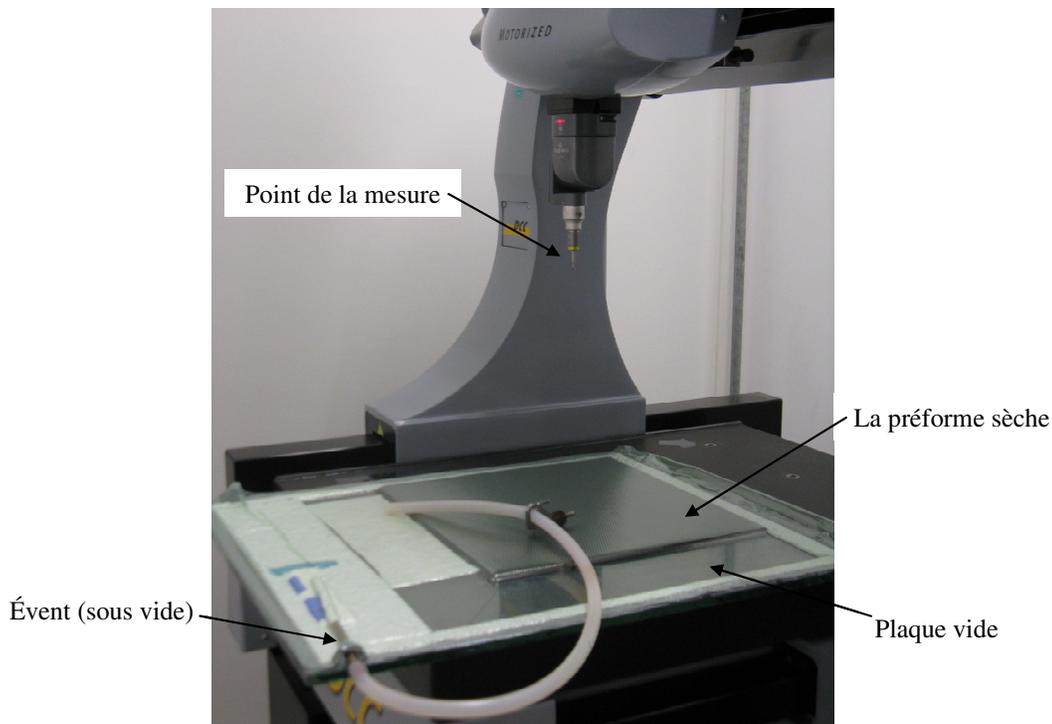


Figure 8-2 Mesure de l'épaisseur de la préforme sèche sous sac à vide avant infusion : machine à mesurer tridimensionnelle avec le dispositif de mise sous vide.

8.3 Infusion de la plaque sous conditions standards

8.3.1 Conditions d'infusion de résine

Cet essai est un essai industriel standard, c'est-à-dire un essai d'infusion par LRI sur une plaque chauffante avec un couvercle fermé. Comme tous les essais précédents, la préforme est réalisée par des tissus de carbone avec une référence G1157 E01. La préforme choisie à 48 plis avec la séquence suivante $[0_6, 90_6, 90_6, 0_6]_S$. Ses dimensions sont 335 mm × 335 mm. L'épaisseur, relativement grande, est choisie pour permettre le suivi du front de résine dans de bonnes conditions. La mise en place de l'empilement de la préforme est la même que celle que nous avons présentée dans le chapitre 2. Un drainant et un peel-ply sont placés en dessus de la préforme pour avoir une couche de

résine bien filtrée avant que celle-ci n'entre dans la préforme. L'empilement de la préforme est fermé aux quatre côtés par des adhésifs pour assurer que la résine s'écoule dans la bonne direction dans la préforme (voir figure 2-2). La résine utilisée est une époxyde RTM6. Elle est pré-chauffée à 80°C dans un pot de chauffage avant d'entrer dans la préforme. La plaque chauffante est maintenue à une température au centre de la préforme d'environ 120°C avant que la résine entre dans la préforme ; pour avoir cette température, la consigne de la machine chauffante est d'environ 130°C. La compaction de la préforme est effectuée avant infusion de la résine avec un vide de 1,4 mbar. La pression appliquée sur la préforme correspond à la pression atmosphérique.

8.3.2 Montage expérimental

Le montage expérimental est représenté sur la figure 8-3, l'entrée et la sortie de la résine sont présentées sur cette figure, et une balance est utilisée pour mesurer la masse de résine entrée dans le système d'infusion. Un micro-thermocouple (TC1) est inséré au milieu du tuyau d'entrée «Ω» pour suivre la température de la résine en entrée et détecter le temps initial de l'infusion. Pour initialiser la mesure de la masse de résine, un autre micro-thermocouple (TC2) lié avec la centrale d'acquisition de la masse de la résine est placé au même endroit que le thermocouple précédent. Dans le tuyau de sortie, un micro-thermocouple (TC7) est utilisé pour contrôler l'évolution de la température de la résine sortie et par conséquent, pour déterminer le temps de fin de remplissage.

Pour détecter la température de la préforme et le front de la résine pendant l'infusion, 4 micro-thermocouples (TC3-TC6) sont placés suivant l'épaisseur de la préforme. Les positions des micro-thermocouples sont représentées sur la figure 8-4. Tous les micro-thermocouples sont situés au centre du pli et parallèlement aux fibres de carbone.

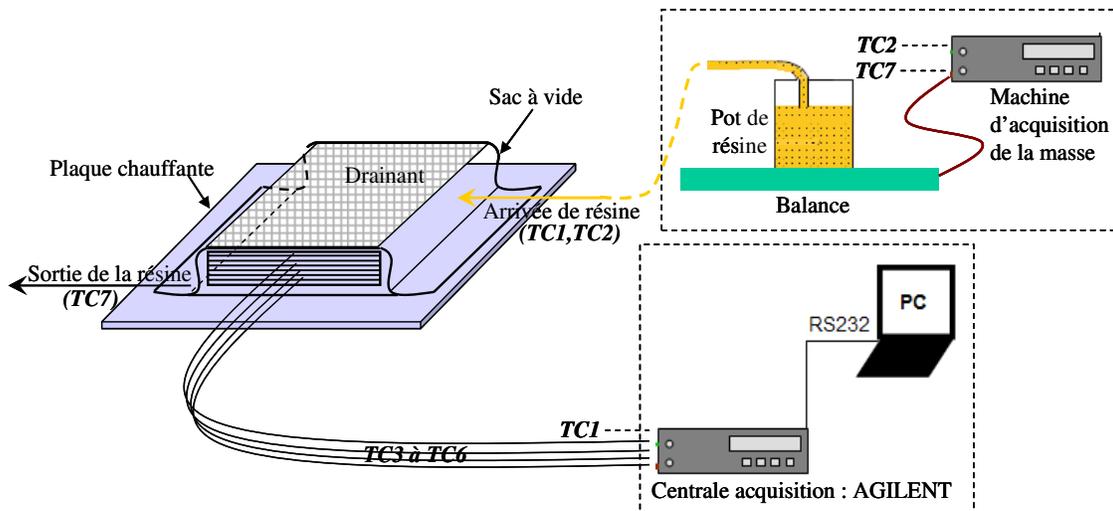


Figure 8-3 Montage expérimental d'infusion de la plaque dans des conditions industrielles standards.

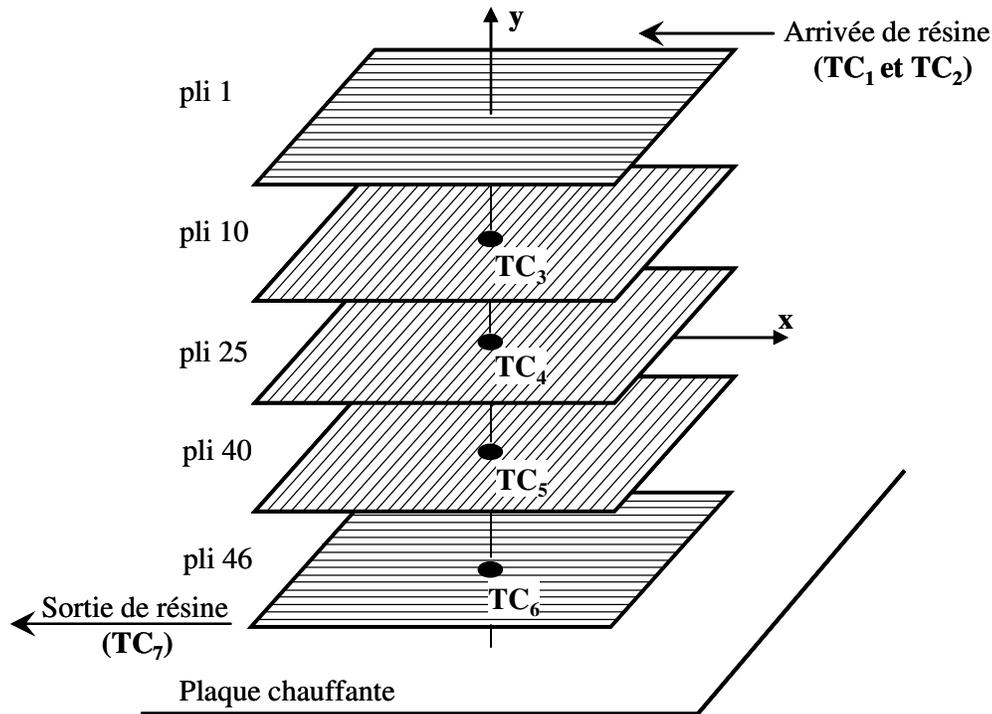


Figure 8-4 Positionnements des micro-thermocouples dans les tuyaux d'entrée et de sortie de la résine et dans la préforme.

8.3.3 Calcul de la porosité initiale de la préforme

Avant l'infusion, la masse mesurée de l'assemblage de l'empilement de 48 plis de tissus unidirectionnels carbone (G1157 E01) est $M_t = 1560$ g. L'épaisseur initiale de la préforme sèche avant la compaction est de $h = 20 \pm 0,5$ mm (mesure d'épaisseur initiale de la préforme avec la même méthode de mesure précédente). Compte tenu des dimensions de la préforme et de la masse volumique des fibres de carbone ($\rho_f = 1,78 \times 10^3$ kg/m³) [98], la porosité initiale de la plaque est 61% (d'après l'équation 8-1):

$$\phi = 1 - \frac{M_t}{V_t \cdot \rho_f} \quad (8-1)$$

Ici, V_t représente le volume total de l'empilement de la préforme. Dans l'équation 8-1, nous avons considéré qu'il n'y a que des fibres carbone dans la préforme (les fils de trame en fibre de verre sont remplacés par des fibres de carbone).

8.3.4 Caractéristique de l'écoulement de la résine pendant la phase de remplissage

8.3.4.1 Mesure de la température

❖ Température de la résine

La figure 8-5 représente l'évolution de la température mesurée par le thermocouple TC1 qui est placé dans le tuyau « Ω » d'entrée et lié à la centrale d'acquisition de la température. A partir de cette mesure, nous pouvons connaître l'évolution de la

température de la résine entrée. Il est important de détecter le temps 0 de la phase de remplissage. L'évolution de la température de la résine en entrée reste à un niveau assez faible, entre 82°C et 92°C. Cette évolution est la même que celle que nous avons présentée dans l'essai d'infusion avec le couvercle fermé : la chute de la température indique l'arrivée de la résine (le temps initial de l'essai d'infusion de la résine est de 52 s), l'augmentation de la température est due à l'effet de la plaque chauffante.

Les micro-thermocouples TC2 et TC7 sont placés dans les tuyaux « Ω » d'entrée et de sortie. Ils sont branchés à la machine d'acquisition de la masse de résine, ils peuvent mesurer la température de la résine d'entrée et de la sortie en même temps que la mesure de la masse de la résine. Grâce à ces deux évolutions, il est possible d'initialiser l'évolution de la masse de la résine absorbée (à 70 s) et d'estimer le temps de remplissage. La figure 8-6 présente ces évolutions de la température. L'évolution de la température du TC2 est identique à celle du TC1 car ils sont situés au même endroit. Pour la température de la résine sortie (mesurée par TC7), nous avons obtenu une évolution assez faible, sur une gamme de température allant de 104°C à 108°C. L'augmentation de la température dans la dernière partie montre le moment où la résine sort du tuyau car la résine est plus chaude que le tuyau souple. On en déduit la fin du remplissage et, par différence, le temps total de remplissage, ici 1100 s.

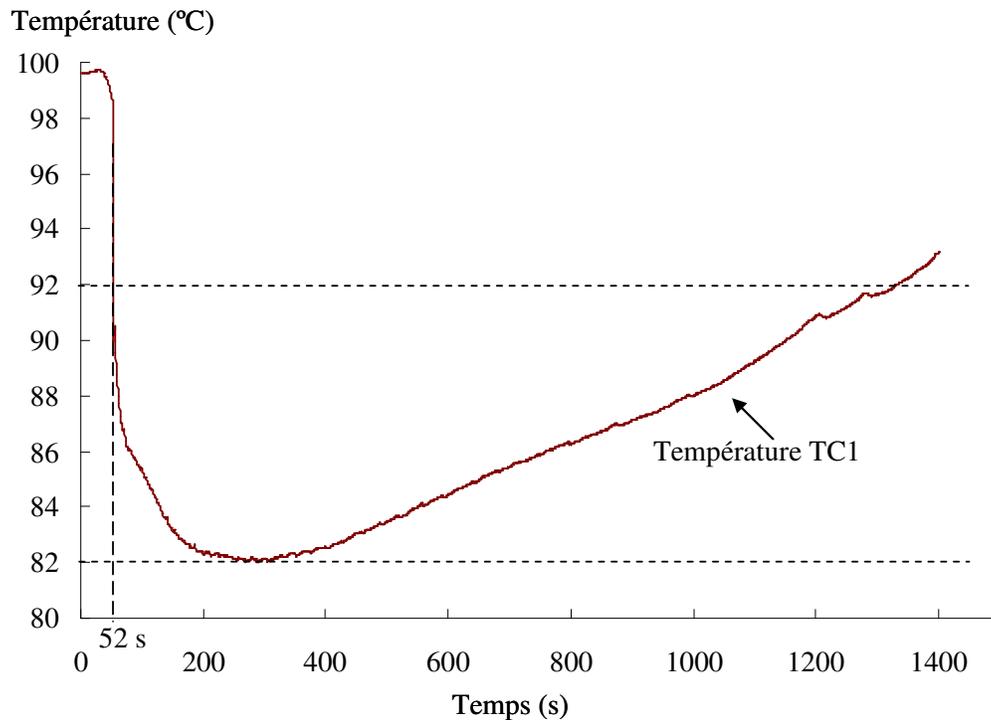


Figure 8-5 Evolution de la température de résine d'entrée pendant la phase de remplissage obtenue par la centrale d'acquisition de la température.

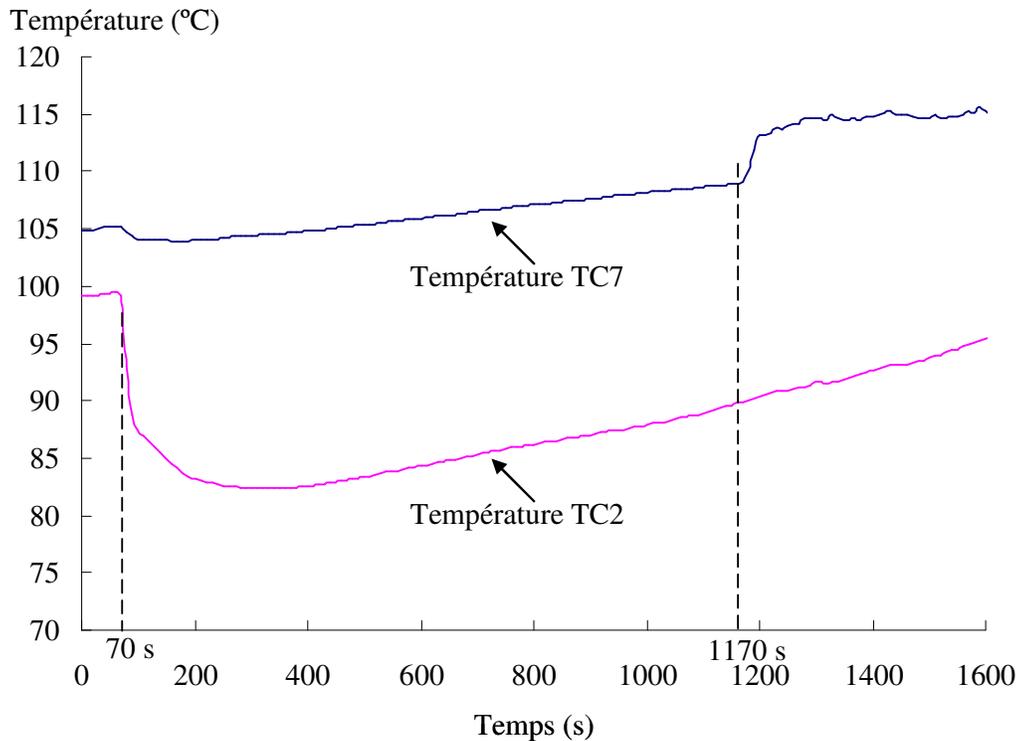


Figure 8-6 Evolution de la température de la résine entrée et sortie pendant la phase de remplissage mesurées en même temps que l'acquisition de masse de la résine.

❖ Température de la préforme

La figure 8-7 représente les évolutions de température de la préforme au cours de la phase de remplissage, elles sont mesurées par les 4 micro-thermocouples qui sont placés dans l'épaisseur de la préforme. Le temps 0 correspond au point initial de la mesure. Avant l'infusion de la résine, un gradient de température d'environ $0,27\text{ °C/pli}$ est trouvé dans l'épaisseur de la préforme. Pendant le remplissage, l'évolution de la température de la préforme est celle qu'on a présentée au chapitre 5: une zone de stabilisation de la température au début d'infusion de la résine, ensuite une zone de diminution de la température à cause de l'entrée de la résine dans la préforme, et après l'arrivée un minimum de la température, une zone d'augmentation du fait du chauffage par le moule en bas de l'empilement. Plus spécifiquement, on peut noter une zone d'augmentation très rapide sur l'évolution du TC6 à environ 960 s : elle correspond à la conduction de la chaleur entre la plaque chauffante et la résine. De même, sur la courbe d'évolution de la température du TC3, il y a deux petites variations qui se trouvent après 1200 s, ces phénomènes correspondent à l'ouverture du couvercle pour vérifier qu'un remplissage complet a été effectué.

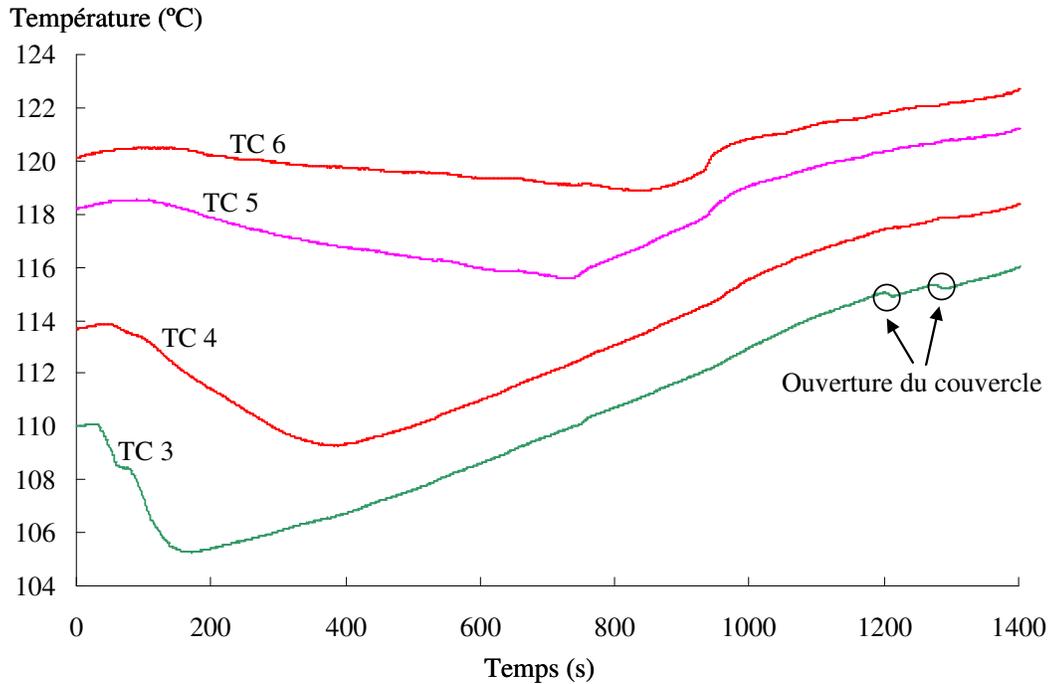


Figure 8-7 Evolution de la température de la préforme pendant l'infusion de la résine mesurée par les 4 micro-thermocouples placés suivant l'épaisseur de la préforme.

8.3.4.2 Suivi de l'avancement du front de résine

L'arrivée du front de résine au niveau des différents thermocouples est estimée par le temps correspondant à la température minimale de chacun. Il faut ôter à ce temps le temps de référence, déterminée par TC1. Les valeurs obtenues sont notées dans le tableau 8-1. Le temps de fin de remplissage est d'environ 1100 s, ce temps est obtenu à partir de la figure 8-7. Le TC6 qui est placé plus bas dans la préforme, indique que le front de résine arrive au pli 46 à environ 795 s (le point minimum) et que le front de résine est en contact avec la plaque chauffante à environ 960 s. Une différence de 140 s ($1100 \text{ s} - 960 \text{ s} = 140 \text{ s}$) existe entre la fin du remplissage et l'arrivée de la résine sur la plaque au centre. Cette différence peut indiquer que le front de résine n'est pas tout à fait homogène dans la préforme. Comme les mesures présentées au chapitre précédent, la résine infuse principalement suivant l'épaisseur de la préforme.

Tableau 8-1 Temps d'apparition de la température minimale mesurée par les 4 thermocouples placés dans la préforme.

Thermocouple	TC3	TC4	TC5	TC6
Temps (s)	130	350	690	795

8.3.4.3 Mesure de la masse de résine

Le pot de résine est posé sur une balance qui est liée avec un système d'acquisition appelé « Enregistreur Eurotherm ». Cette machine peut enregistrer la quantité de résine absorbée par le système d'infusion automatiquement, de plus, elle a deux ports pour connecter les thermocouples. Nous avons utilisé ces deux ports pour

8.3 Infusion de la plaque sous conditions standards

détecter les températures de la résine d'entrée et de la sortie, et également pour initialiser l'acquisition de la masse de résine et mesurer le temps de remplissage. Les évolutions de la température mesurées par l'enregistreur Eurotherm sont montrées sur la figure 8-6. L'évolution de la masse de la résine en fonction du temps de remplissage pendant la phase d'infusion est présentée sur la figure 8-8.

Dans la figure 8-8, nous pouvons observer que la vitesse d'entrée de la résine diminue pendant la phase de remplissage. Au début de l'essai d'infusion, la résine entre rapidement dans le tuyau et dans le drainant, cela correspond à une pente très forte au début de la courbe. A l'aide du temps de remplissage estimé par le TC7 (voir figure 8-6), la masse de résine absorbée par le système d'infusion est d'environ 705 g. Avec la condition industrielle, pour assurer une infusion vraiment complète, après que la résine sort de la préforme, nous devons laisser la résine remplir le tuyau « Ω » et une partie du tuyau extérieur. Donc, la masse de résine augmente encore après 1100 s. Puisque la vitesse du front de résine est très faible après l'infusion de la préforme, l'augmentation de la masse est très faible, il faut attendre normalement quelques minutes pour couper l'entrée de la résine.

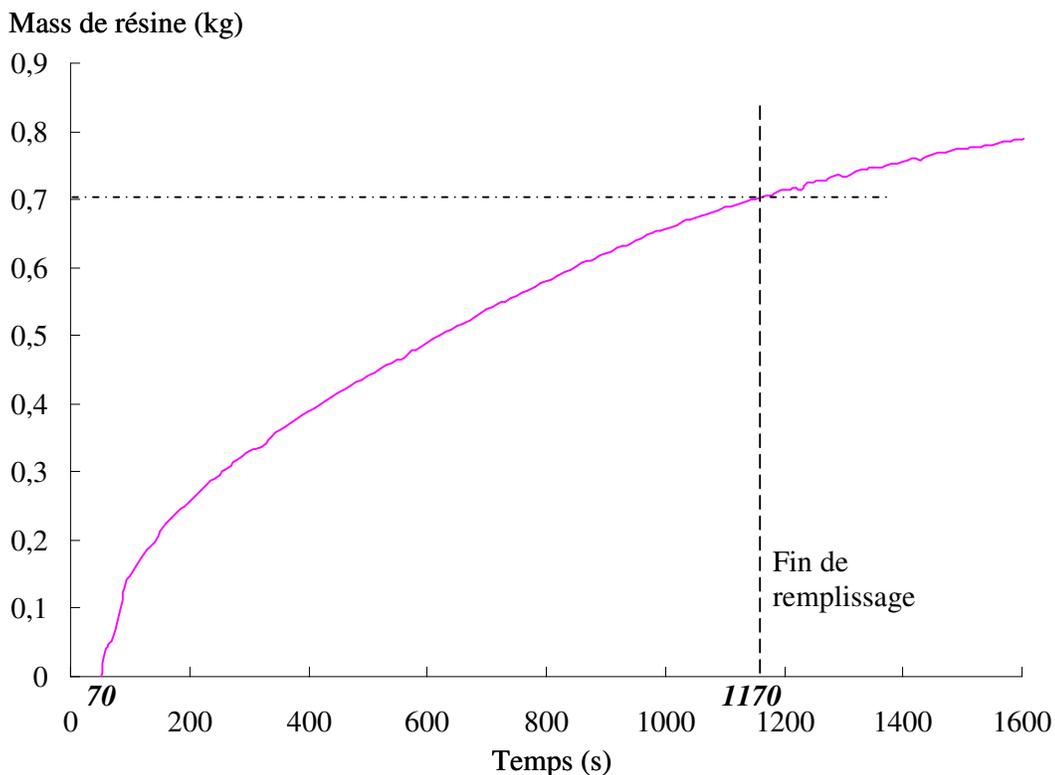


Figure 8-8 Masse de résine absorbée par le système d'infusion au cours de la phase du remplissage.

Après la soustraction du temps initial, le débit de la résine au cours de la phase de remplissage est représenté sur la figure 8-9, il peut confirmer notre explication sur l'évolution de la masse de résine. Un débit important peut être observé au début de l'infusion dans le tuyau d'entrée et le drainant. Une fois que la résine commence à entrer dans la préforme, le débit diminue. Après 1100 s, le débit de la résine devient désordonné, car dans un premier temps, la résine sort du tuyau de manière discontinue.

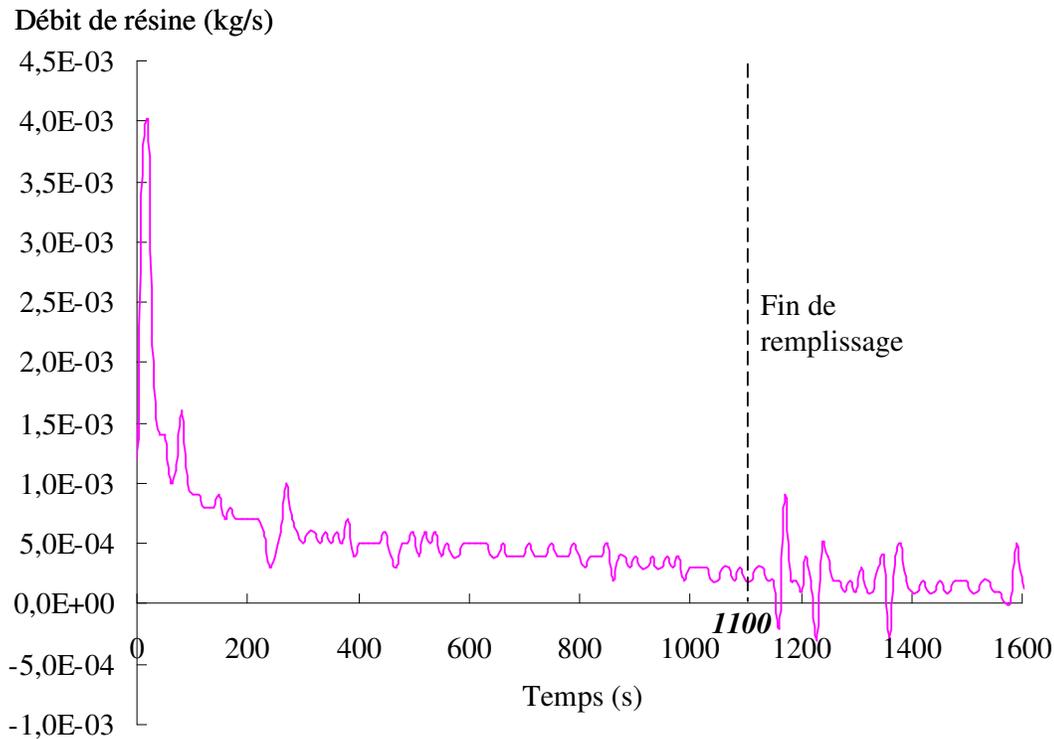


Figure 8-9 Débit de résine au cours de l'infusion.

8.4 Cuisson et refroidissement

Après la phase de remplissage, la température de la préforme est d'environ 120°C. Ensuite elle augmente jusqu'à 180°C par la plaque chauffante (normalement, la consigne de la plaque chauffante est 190°C) pendant environ 30 min. Ce niveau de température est maintenu pendant environ 2 heures pour la phase de cuisson. Enfin, la plaque est refroidie jusqu'à la température ambiante.

Le démoulage de la pièce finale est réalisé après le refroidissement. A l'aide de deux comparateurs (voir figure 2-6, page 25), on obtient la valeur moyenne de l'épaisseur de la plaque (mesurée en 25 points) est égale à 12,11 mm. Le taux volumique de fibres de la plaque est estimé à 62%. Pour estimer la quantité de résine dans la plaque finale, une mesure de la masse de la plaque finale montre 2,1 kg. Nous savons bien que la masse de la préforme avant l'infusion de la résine est de 1,56 kg, donc la masse de résine dans la plaque composite finale est égale à 540 g. Un calcul montre que la porosité de la plaque finale est d'environ 0,7% (voir l'annexe 4). Malgré la présence de plusieurs micro-thermocouples dans la préforme, nous avons obtenu une pièce composite de bonne qualité. Nous pouvons considérer encore une fois que les micro-thermocouples utilisés dans notre étude expérimentale ont une intrusivité négligeable pour le suivi du procédé.

8.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé un essai d'infusion d'une plaque par le procédé LRI dans les conditions standards et nous avons réalisé des études expérimentales sur cet essai. Avant l'infusion de la résine, nous avons mesuré tous les paramètres correspondant aux conditions réelles notamment pour les entrer et utiliser dans la

8.5 Conclusion

simulation numérique. De plus, un essai de la compaction de la préforme sèche sous sac à vide va servir à la comparaison avec la simulation numérique. Pendant l'infusion de la résine, nous avons surtout détecté des paramètres importants et nous allons comparer ces résultats avec les calculs numériques. Cette comparaison sera décrite dans le chapitre suivant. Puisque cet essai d'infusion de la résine est effectué avec le couvercle fermé, la mesure de l'évolution de l'épaisseur de la préforme avec la méthode de projection de franges ne peut pas être faite au cours du remplissage. Enfin, la très faible porosité de la pièce finale montre une bonne intégration des micro-thermocouples dans leur environnement.

Chapitre 9 : Comparaison expérience / simulation numérique pour le procédé d'infusion de résine

9.1 Introduction	138
9.2 Simulation numérique d'un essai de compression transversale	138
9.2.1 Loi de comportement de la préforme	138
9.2.2 Conditions aux limites.....	139
9.2.3 Simulation numérique	139
9.3 Simulation numérique de l'infusion d'une plaque par le procédé LRI	139
9.3.1 Hypothèses.....	139
9.3.2 Paramètres d'entrée.....	140
9.3.2.1 Préforme.....	140
9.3.2.2 Résine.....	140
9.3.3 Conditions aux limites.....	141
9.3.4 Résultats et comparaisons.....	142
9.3.4.1 Résultats numériques et comparaisons avec les résultats expérimentaux	142
9.3.4.2 Ecoulement de la résine pendant la phase de remplissage	144
9.3.4.3 Masse de résine absorbée au cours de l'infusion.....	145
9.3.4.4 Epaisseur de la préforme	146
9.4 Discussions	147
9.4.1 Evolution d'épaisseur de la préforme	147
9.4.2 Evolution de la température.....	148
9.4.3 Evolution de la perméabilité de la préforme	150
9.5 Conclusion.....	155

9.1 Introduction

Dans le chapitre 8, un essai d'infusion d'une plaque par le procédé LRI a été présenté, nous avons analysé expérimentalement cet essai et nous avons réussi à suivre des paramètres importants au cours de la phase de remplissage. Dans ce chapitre, pour valider et améliorer le modèle numérique, nous simulons cet essai réel et comparons ses résultats avec les résultats expérimentaux.

Pour une comparaison correcte, les paramètres entrés dans la simulation numérique sont représentatifs des conditions expérimentales. La loi de comportement de la préforme et les conditions aux limites correspondant aux conditions réelles sont utilisées dans le calcul.

9.2 Simulation numérique d'un essai de compression transversale

Avant de simuler le procédé d'infusion de résine, nous souhaitons valider la première étape de la simulation numérique : la compression transversale sur l'empilement de la préforme sèche.

9.2.1 Loi de comportement de la préforme

Pour obtenir la loi de comportement de la préforme, un essai de compression transverse sur la même référence de tissus que nous voulons infuser a été réalisé et présenté sur la figure 8-1. Après analyse des résultats, ils peuvent être transférés à la réponse sous la forme des contraintes de Cauchy fonctions des déformations logarithmiques (voir figure 9-1). Nous considérons ici les effets de Poisson négligeables, il y a une absence de déformations dans le plan de la préforme lors de la sollicitation dans son épaisseur.

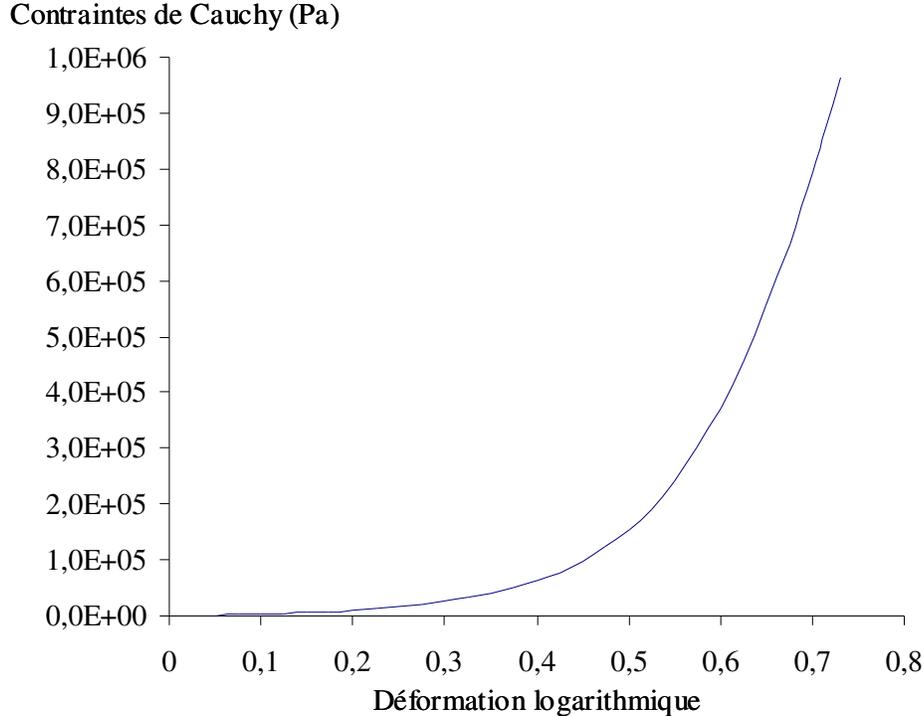


Figure 9-1 Courbe de compression transversale sur les UD G1157 secs.

9.2.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites pour l'essai de compression transversale des empilements de la préforme sous sac à vide sont représentées sur la figure 9-2. Le sac à vide avec un niveau de 1 mbar crée une pression mécanique sur la surface supérieure de la préforme. La continuité du déplacement et du vecteur contrainte sont prescrite entre le drainant et la préforme. La préforme étant maintenue en position par des adhésifs placés sur les cotés, une condition aux limites de déplacement horizontal nul sur les cotés semble raisonnable. Sur le fond de la préforme, la condition aux limites imposée est une condition de déplacement vertical nul puisque l'ensemble posé sur un moule rigide (aluminium). Enfin, nous considérons que le drainant ne se déforme pas suivant son épaisseur.

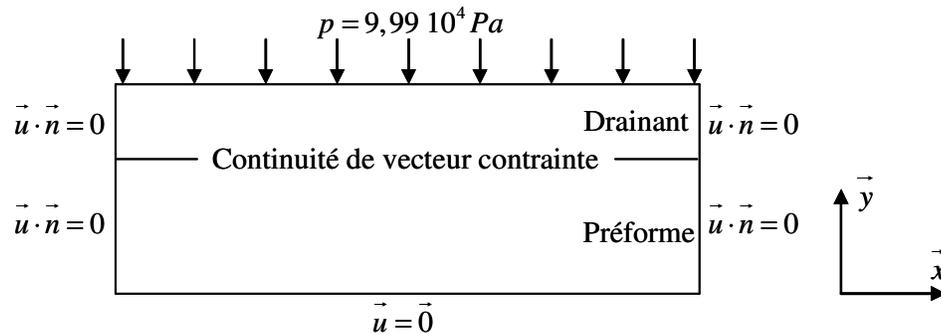


Figure 9-2 Conditions aux limites pour l'essai de compression transversale (\vec{u} : déplacement).

9.2.3 Simulation numérique

Les paramètres d'entrée correspondent bien aux informations présentées dans l'essai de la compression dans le chapitre précédent. L'épaisseur initiale de la préforme mesure $22 \pm 0,5$ mm (voir le paragraphe 8.2.1), la porosité initiale après calcul est de 66% (calculé par l'équation 8-1). Les simulations ont été réalisées avec 1118 éléments triangulaires. Les résultats et une comparaison avec les résultats expérimentaux sont donnés dans le tableau 9-1. Les résultats de la simulation numérique pour la partie purement mécanique dans notre modèle montrent la très bonne corrélation avec les mesures expérimentales.

Tableau 9-1 Résultats des essais de la compression et de la simulation numérique.

	Essai de compression avec la machine Z300 ZWICK	Essai de compaction sous sac à vide 1 mbar	Simulation numérique
Epaisseur de la préforme (mm)	14	13,996	14
Taux volumique de fibres	53%	53,1%	53%

9.3 Simulation numérique de l'infusion d'une plaque par le procédé LRI

9.3.1 Hypothèses

A l'aide des études suivant l'écoulement de la résine pendant le remplissage, nous

savons que la résine remplit le drainant très rapidement et infuse la préforme principalement suivant l'épaisseur. Les hypothèses sur l'écoulement de la résine dans le modèle numérique peuvent être adaptées.

A partir des mesures de la température de la préforme (voir figure 8-7), nous savons qu'il existe environ 10°C de différence suivant l'épaisseur de la préforme. Sous condition industrielle, ce n'est donc pas une infusion isotherme. Par contre, notre modèle numérique ne peut pas traiter le problème thermique pour l'instant. Il est probable que nous allons rencontrer des difficultés pour la comparaison entre résultats numériques et expérimentaux, surtout au niveau du temps de remplissage du procédé.

9.3.2 Paramètres d'entrée

9.3.2.1 Préforme

Concernant les paramètres géométriques, présentés au paragraphe 8.3.3, l'épaisseur initiale des 48 plis de tissu UD mesure $20 \pm 0,5$ mm avant compression dans le sac à vide, les dimensions du pli sont 335 mm \times 335 mm. La porosité initiale a été calculée par l'équation 8-1 et vaut 61%. Tous les paramètres d'entrée de la préforme sont complétés et présentés dans le tableau 9-2.

Tableau 9-2 Paramètres d'entrée dans le modèle numérique pour la préforme.

Paramètres	Valeur
Dimension surfacique	335 mm \times 335 mm
Epaisseur initiale	20 mm
Porosité initiale	61%
Densité de la fibre de carbone	$1,78 \cdot 10^3$ kg/m ³
Diamètre de la fibre de carbone	$5 \cdot 10^{-6}$ m
Constante de Kozeny	10

9.3.2.2 Résine

C'est la résine RTM6 qui est toujours utilisée pour nos essais d'infusion. La densité de cette résine est de $1,11 \cdot 10^3$ kg/m³ à 25°C avant cuisson [99]. De plus, sa dilatation thermique a été choisie à $11 \cdot 10^{-5}$ m/°C (dilatation thermique pour les résines époxydes [100]).

La viscosité isotherme pour la résine RTM6 est présentée sur la figure 9-3. L'évolution entre les niveaux à 100°C et à 120°C est plus stable que les autres niveaux de température. D'après les mesures de température pendant la phase de remplissage, nous savons que la température de la résine entrée est entre 82°C et 92°C (voir la figure 8-6), et celle de la préforme est entre 110°C et 120°C (voir la figure 8-8). Concernant ces températures, dans un premier temps, nous avons considéré que la température de la résine est fixée à 100 °C au cours de la phase de remplissage, car nous n'avons pas d'informations pour la viscosité de la résine entre 100°C et 120°C. Nous considérons que la viscosité de la résine est une constante égale à 0,058 Pa.s (estimée pendant les premières 30 min sur la figure 9-3). De plus, après un calcul, la densité de la résine pour 100°C vaut environ $1,08 \cdot 10^3$ kg/m³. Cette viscosité et cette densité de la résine vont être utilisées dans notre calcul numérique.

Viscosité dynamique (Pa.s)

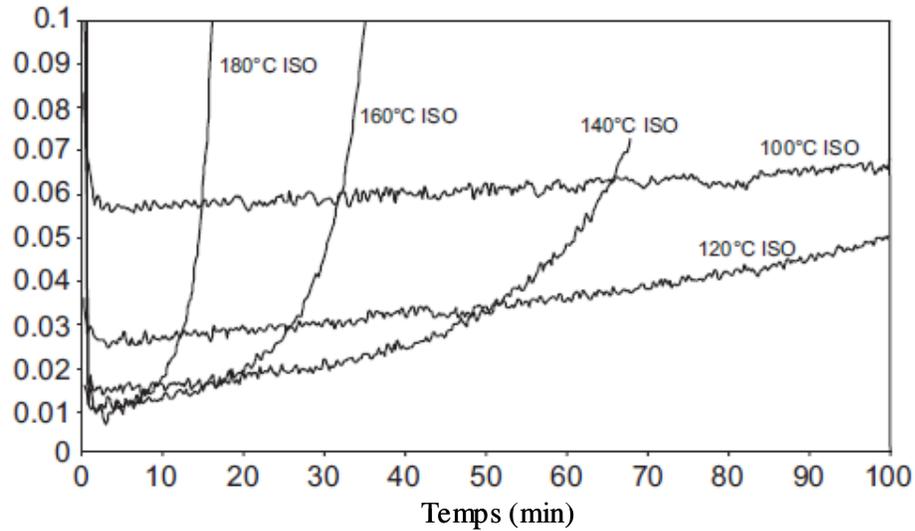
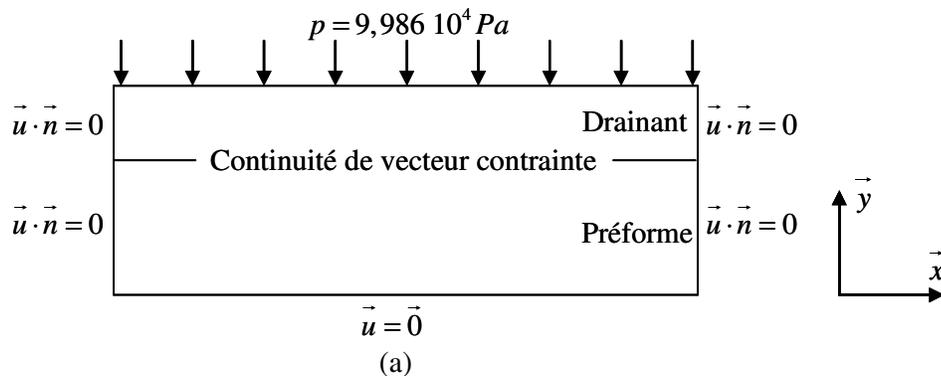


Figure 9-3 Viscosité isotherme de la résine HexFlow© RTM6.

9.3.3 Conditions aux limites

Pour l'essai d'infusion d'une plaque par le procédé LRI, les conditions aux limites de la partie solide sont les mêmes que celles dans le test de la compression simple sauf le niveau du vide qui est 1,4 mbar (voir figure 9-4 (a)). Les conditions aux limites de la partie liquide sont présentées sur la figure 9-4. La résine pénètre dans le drainant grâce à la dépression. Les continuités de la vitesse normale de la résine et de la pression sont imposées à l'interface entre la zone purement fluide et la zone de préforme humide. Enfin, la résine ne peut pas sortir par les bords latéraux et la surface supérieure à cause des adhésifs et de la présence du sac à vide.



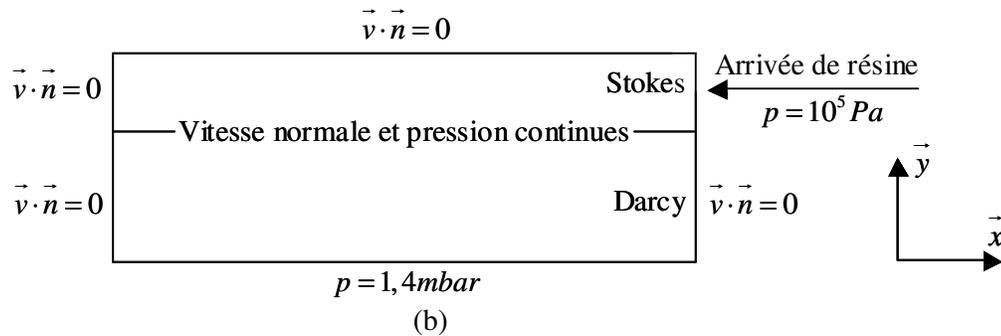


Figure 9-4 Conditions aux limites pour l'infusion d'une plaque dans des conditions standards (a) pour la partie solide (\vec{u} : déplacement), (b) pour la partie fluide (\vec{v} : vitesse de la résine, p : pression de la résine).

9.3.4 Résultats et comparaisons

9.3.4.1 Résultats numériques et comparaisons avec les résultats expérimentaux

Les simulations ont été réalisées avec 1458 éléments triangulaires et une formulation mixte en vitesse-pression. Nous avons intégré la loi de comportement des tissus UD G1157 (voir figure 9-1) et représenté le plus précisément possible les conditions aux limites (voir figures 9-2 et 9-4). Les résultats numériques et une comparaison générale entre les résultats expérimentaux et la simulation numérique sont donnés dans le tableau 9-3. Pour les mesures après la compaction de la préforme, les résultats expérimentaux se rapprochent fortement de la simulation numérique. Etant donné que nous avons réalisé un essai d'infusion d'une plaque avec couvercle fermée, nous n'avons pas obtenu la variation d'épaisseur de la préforme au cours de l'infusion, ce qui va être comparée dans un essai ci-après. Nous ne pouvons pas calculer le volume de la préforme après remplissage car il manque l'épaisseur de la préforme, donc le taux volumique de fibres et la masse de résine absorbée ne peuvent pas être déterminés. Par contre, nous pouvons comparer la masse de résine de la simulation numérique avec la valeur mesurée par « Enregistreur Eurotherm » (voir figure 8-8), même si cette mesure est une masse absorbée par tout le système d'infusion (on considère qu'il y a peu de résine dans le drainant après la phase de remplissage). Si l'on observe le temps de remplissage, les deux résultats sont proches. Pour les cas tests, le temps pour remplir le drainant est environ 100 s, mesuré visuellement.

Une autre comparaison pour justifier et exploiter un essai d'infusion d'une plaque avec 24 plis des tissus UD G1157 est présentée dans le tableau 9-4. Le protocole expérimental et le dépouillement conduisant aux grandeurs de référence sont les mêmes que pour des résultats présentés ci-dessus. Cet essai permet d'obtenir deux renseignements supplémentaires : (1) le caractère prédictif de la simulation, réalisée ici pour une épaisseur différente (2) l'accroissement d'épaisseur mesuré pour une plaque de 24 plis, dans des conditions qui sont cependant différentes (couvercle ouvert). Comme pour la comparaison précédente, pour le calcul purement mécanique, les études numérique et expérimentale sont très proches. Si nous regardons la variation de l'épaisseur et le taux volumique de fibres (TVF) de la préforme, il y a une bonne corrélation entre l'approche numérique et l'approche expérimentale. Pour la masse de résine absorbée, nous l'avons calculée. Elle correspond bien à l'épaisseur de la préforme mesurée, elle conduit aussi à une bonne corrélation avec celle de la simulation numérique. Par contre, les temps de remplissage sont différents.

Tableau 9-3 Comparaison générale numérique/expérimentale pour un essai d'infusion d'une plaque avec 48 plis des tissus UD G1157.

		Expérimentale	
Condition initiale	Epaisseur de la préforme (mm)	20	
	Dimension surfacique	335 mm × 335 mm	
	Taux volumique de fibres	39%	
	Masse de la préforme (g)	1560	
		Expérimentale	Numérique
Après compaction	Epaisseur de la préforme (mm)	13 ± 0,5	12,7
	Taux volumique de fibres	60%	61%
Après remplissage	Accroissement d'épaisseur (mm)		1,25
	Taux volumique de fibres		56%
	Masse de résine absorbée par la préforme (g)	705	750
	Temps de remplissage pour la préforme (s)	1000	890

Tableau 9-4 Comparaison générale numérique/expérimentale pour un essai d'infusion d'une plaque avec 24 plis des tissus UD G1157.

		Expérimentale	
Condition initiale	Epaisseur de la préforme (mm)	10	
	Dimension surfacique	335 mm × 335 mm	
	Taux volumique de fibres	39%	
	Masse de la préforme (g)	780	
		Expérimentale	Numérique
Après compaction	Epaisseur de la préforme (mm)	6 ± 0,5	6,35
	Taux volumique de fibres	65%	61%
Après remplissage	Accroissement d'épaisseur (mm)	0,55	0,6
	Taux volumique de fibres	56%	56%
	Masse de résine absorbée par la préforme (g)	350	375
	Temps de remplissage pour la préforme (s)	500	410

9.3.4.2 *Écoulement de la résine pendant la phase de remplissage*

La figure 9-5 présente les résultats expérimentaux et numériques concernant la position du front de résine au cours de la phase de remplissage. Pour les résultats issus de la simulation numérique, nous avons choisi 5 nœuds suivant l'épaisseur de la préforme (il y a uniquement 5 nœuds dans l'épaisseur) pour analyser la position du front. L'écoulement étant unidirectionnel suivant l'épaisseur sous les hypothèses de l'écoulement de la résine dans notre modèle numérique, ces 5 nœuds sont choisis sur la même ligne et au milieu de la préforme. Pour l'instant, le modèle numérique ne peut pas donner directement la position du front de résine, nous l'avons estimé par la variation de la pression de résine au cours de l'infusion (voir tableau 9-5). Pour les résultats expérimentaux, nous avons utilisé les micro-thermocouples pour caractériser le front de résine par la mesure d'évolution de température de la préforme. Les résultats ont été présentés sur la figure 8-9. Les thermocouples sont placés suivant l'épaisseur et sur la même ligne au milieu de la préforme. La résine mettant 50 s arriver pour au milieu du drainant, on doit retrancher ce temps à chaque thermocouple pour déterminer l'évolution du front de résine en fonction du temps à travers l'épaisseur de la préforme. Ainsi, les temps d'arrivée du front de résine mesuré par thermocouples sont modifiés et présentés dans le tableau 9-6. Ici, pour le temps d'arrivée à la position 100%, nous avons pris le moment où la résine est en contact avec la plaque chauffante, ce qui a été aussi estimé par le thermocouple placé au plus bas (sur le pli 46). Comme nous l'avons expliqué précédemment, pour l'évolution de température de la préforme, nous avons observé une augmentation très rapide après avoir obtenu le minimum de la température. Ce phénomène peut être dû au fait que la résine est en contact avec la plaque chauffante (voir le paragraphe 5.3.1 dans le chapitre 6). Pour présenter les résultats expérimentaux de manière rigoureuse, nous avons indiqué les erreurs de mesures par les thermocouples (voir table 9-6).

Si nous regardons les études de la position du front de résine au milieu de la préforme, une bonne corrélation peut être trouvée entre l'expérience et la simulation numérique.

Tableau 9-5 Evolution de la position du front de résine calculée par la simulation numérique.

Position (H/H ₀)	0%	25,4%	57,9%	80,9%	100%
Temps d'arrivée de la résine (s)	0	110	365	585	890

avec H l'épaisseur de la zone remplie et H₀ l'épaisseur de la préforme

Tableau 9-6 Evolution de la position du front de résine mesurée par les micro-thermocouples.

Position (H/H ₀)	0%	18,75%	50%	81,25%	93,75%	100%
Temps d'arrivé de la résine (s)	0	80 ± 5	300 ± 5	640 ± 5	745 ± 5	900 ± 5

avec H l'épaisseur de la zone remplie et H₀ l'épaisseur de la préforme

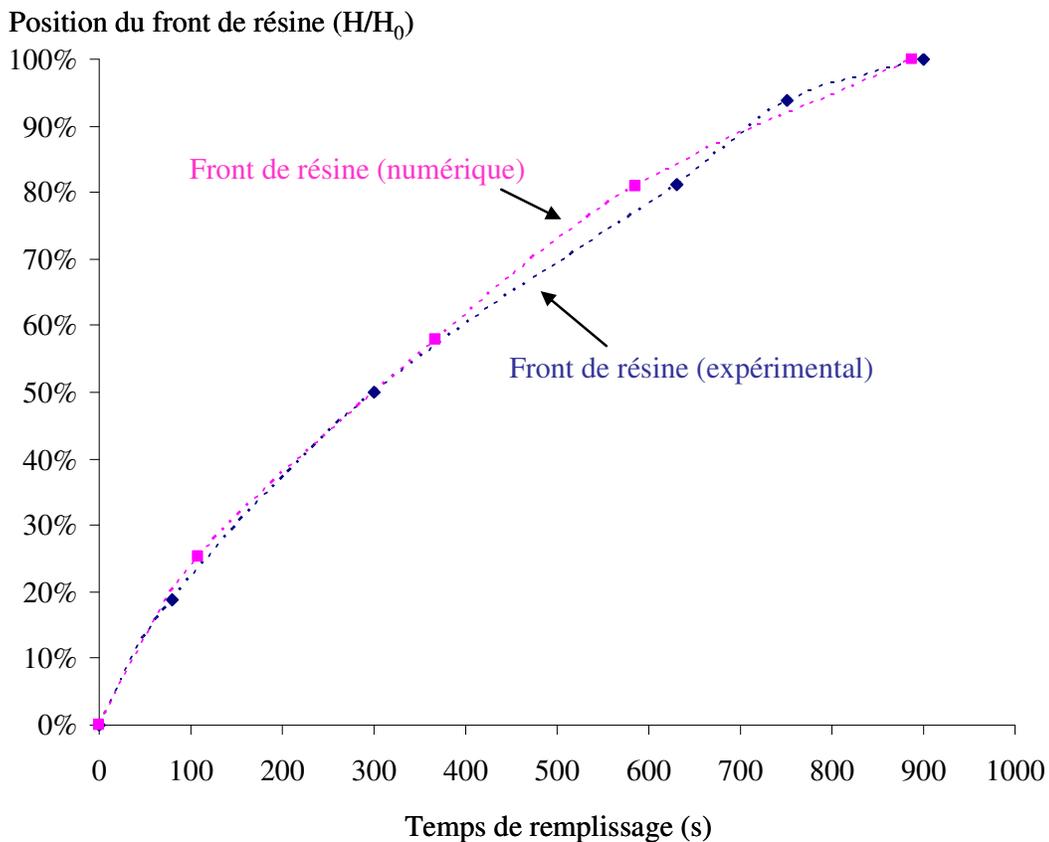


Figure 9-5 Position du front de résine en fonction du temps pour un essai d'infusion d'une plaque par le procédé LRI standard.

9.3.4.3 Masse de résine absorbée au cours de l'infusion

La masse de la résine absorbée par la préforme au cours de remplissage dépend du volume total de la préforme et du taux volumique de fibres. A chaque instant, dans la zone remplie nous pouvons calculer le volume de résine absorbée par chaque élément via la porosité locale et le volume élémentaire. L'évolution de la masse de résine au cours de l'infusion est présentée sur la figure 9-6. Une évolution non-linéaire peut être observée. Cette courbe de la masse augmente rapidement au début d'infusion, puis cette augmentation devient plus faible. Comme on le sait, la vitesse d'augmentation de la masse de la résine est corrélée au temps de remplissage.

Par ailleurs, la masse calculée par la simulation numérique devient stable après 600 s. C'est-à-dire qu'au début, la préforme a une grande variation de volume, cette variation diminue petit à petit à cause de la résine qui s'écoule de plus en plus lentement. A 600 s, il y a environ 96% de la préforme qui a été remplie et la vitesse de résine est déjà très faible, donc à chaque incrément du temps, très peu d'éléments sont remplis, et nous avons une faible variation du volume de la préforme. Nous avons supposé que la déformation longitudinale était négligeable, donc pour notre modèle numérique bidimensionnel, l'évolution du volume de la préforme est bien liée à son épaisseur, donc l'évolution de la masse de résine peut être confirmée par la variation d'épaisseur de la préforme dans la figure 9-7.

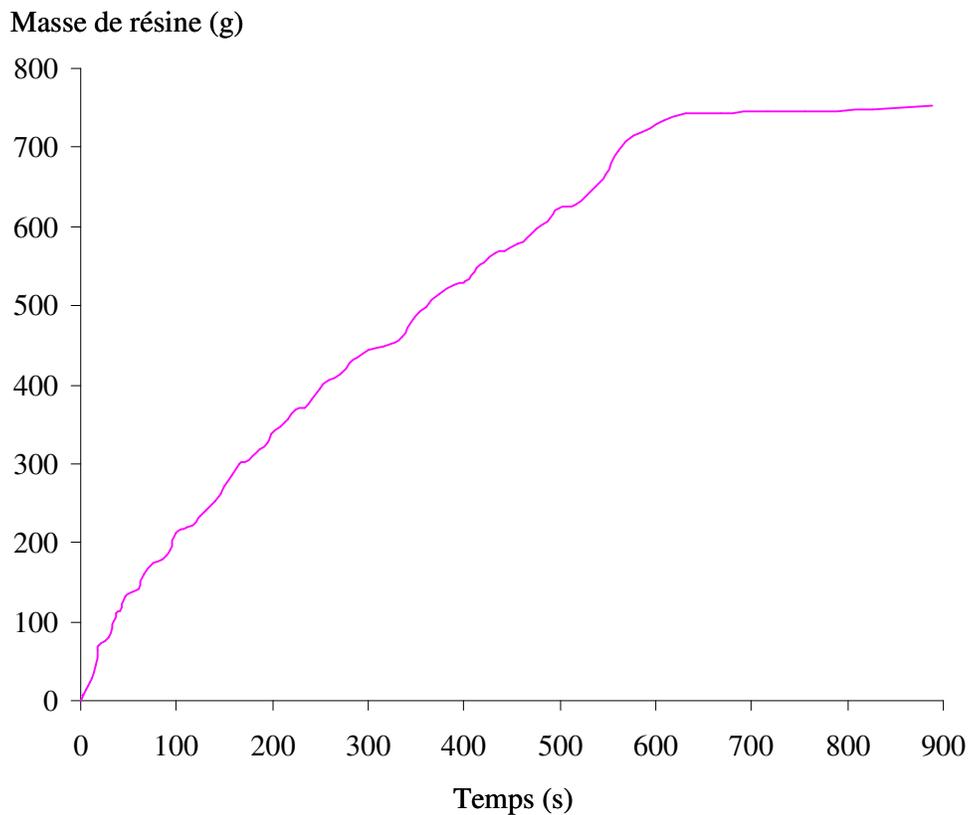


Figure 9-6 Masse de résine absorbée au cours de remplissage calculée par la simulation numérique.

9.3.4.4 *Épaisseur de la préforme*

Les évolutions de l'épaisseur de la préforme et du taux volumique de fibres pendant le remplissage sont présentées dans la figure 9-7. Le modèle de Terzaghi est utilisé pour la modélisation de l'interaction de l'écoulement de la résine et la déformation de la préforme. L'épaisseur de la préforme augmente au cours du remplissage car la pression hydrostatique de la résine entraîne une dilatation. Si nous comparons l'augmentation de la préforme prédite par le modèle et celle mesurée expérimentalement par la méthode de la projection de franges (voir figure 7-5), l'augmentation obtenue par simulation numérique est continue jusqu'à la fin de remplissage. Nous ne pouvons pas observer une réelle zone de stabilité de l'épaisseur (zone B dans la figure 7-5) au début de l'infusion. Dans la relation de Terzaghi (l'équation 3-14), une fois la résine entrée dans la préforme, la pression hydrostatique de la résine est prise en compte, mais d'un point de vue expérimental, la préforme commence à gonfler lorsque la résine est en contact avec la plaque chauffante. Par contre dans les calculs, au tout début, la petite zone de stabilisation (durée 30 s) est attribuée au fait que la première ligne d'éléments n'est pas uniformément remplie. Il n'y a donc pas d'évolution d'épaisseur au tout début. Pour l'autre zone stabilisation à la fin du remplissage, ce phénomène a été décrit dans le paragraphe précédent. Concernant l'évolution du taux volumique de fibres, il correspond bien à la variation de l'épaisseur de la préforme.

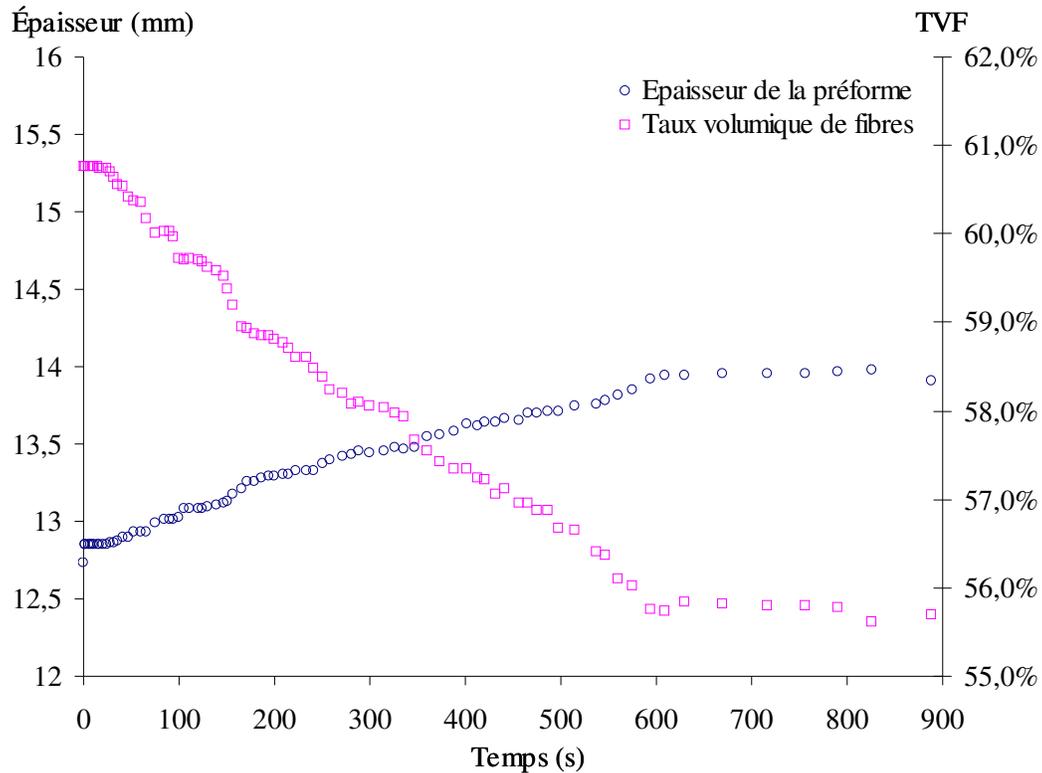


Figure 9-7 Evolution d'épaisseur de la préforme et du taux volumique de fibres pendant le remplissage.

9.4 Discussions

Une comparaison a été faite entre l'étude expérimentale et la simulation numérique pour un cas test d'infusion d'une plaque par le procédé de LRI. Maintenant, nous voulons proposer quelques études de sensibilité aux principaux paramètres (épaisseur de la préforme, température et perméabilité) des approches expérimentales et/ou numériques.

9.4.1 Evolution d'épaisseur de la préforme

Nous avons déjà présenté les essais d'infusion d'une plaque sous conditions standard pour deux épaisseurs différentes de la préforme, 24 plis (dans chapitre 2) et 48 plis. D'abord, nous voulons les comparer et discuter les résultats du tableau 9-7. Nous avons obtenu des plaques avec presque le même taux volumique de fibres. De plus, on peut observer que les paramètres de sortie importants sont 2 fois plus grands pour 48 plis que pour 24 plis. La température de la préforme de l'essai avec 24 plis ($\approx 103^\circ\text{C}$) étant plus faible que l'essai avec 48 plis ($\approx 113^\circ\text{C}$), le temps de remplissage de la préforme pour l'essai avec 24 plis est la moitié du temps pour l'essai avec 48 plis. Si nous regardons la masse de résine dans la plaque finale, il y a quasiment un rapport $\frac{1}{2}$ entre la valeur dans l'essai avec 24 plis par rapport à celle avec 48 plis. Par contre, pour l'épaisseur de la plaque finale, il n'y a pas tout à fait un rapport $\frac{1}{2}$ entre ces deux tests infusions. La masse de résine dépend fortement de la porosité de la préforme, et l'épaisseur de la plaque est lié à plusieurs paramètres, par exemple, le niveau de vide, la masse de résine, le taux de réticulation (dépendant la température). Ensuite, nous avons aussi comparé les résultats de la simulation numérique pour ces deux cas test (voir

tableau 9-8). Nous avons observé les mêmes tendances que celles décrites précédemment dans le tableau 9-7. Les taux volumiques de fibres sont quasiment identiques pour les deux calculs. Pour l'essai avec 24 plis, les autres paramètres importants sont environ 50% de celles obtenues pour l'essai avec 48 plis. Cependant, la différence pour le temps de remplissage est un peu plus grande : comme nous l'avons déjà montré dans le chapitre 4 (voir figure 4-15), le temps de remplissage n'est pas proportionnel à l'épaisseur de la préforme.

Tableau 9-7 Comparaison des résultats expérimentaux pour deux essais d'infusion d'une plaque.

	Avec 24 plis	Avec 48 plis
Epaisseur de la préforme avant l'infusion (mm)	10	20
Taux volumique de fibres initial de la préforme	39%	39%
Temps de remplissage pour la préforme (s)	500	1000
Epaisseur moyen de la plaque composite finale (mm)	6,25	12,1
Masse de résine dans la plaque composite finale (g)	270	540
Taux volumique de fibres de la plaque composite finale	60%	62%

Tableau 9-8 Comparaison des résultats numériques pour deux essais d'infusion d'une plaque.

	Avec 24 plis	Avec 48 plis
Epaisseur de la préforme après la compaction sous vide (mm)	6,35	12,7
Temps de remplissage pour la préforme (s)	410	890
Masse de résine absorbée par la préforme pendant la phase de remplissage (g)	375	750
Accroissement d'épaisseur de la préforme pendant la phase de remplissage (mm)	0,6	1,25
Taux volumique de fibres de la préforme après la phase de remplissage	56%	56%

9.4.2 Evolution de la température

Les mesures de température de la préforme et de la résine ont indiqué que le champ de température dans les essais réels ne sont stables ni dans la préforme ni dans la résine. Nous avons déjà étudié le front de résine suivant l'épaisseur de la préforme à l'aide des micro-thermocouples pour différentes conditions du procédé dans le chapitre 6. Ici nous choisissons de comparer 3 différents cas test : le test de référence avec couvercle fermé

(tableau 9-6), le test avec couvercle ouvert (tableau 6-5) et le test dans une étuve (tableau 6-7). Afin de comparer les différents résultats dans différentes conditions, nous avons initialisé les données dans les tableaux 6-5 et 6-7 en retranchant le temps nécessaire pour remplir la moitié du drainant. Cette comparaison est donnée dans le tableau 9-9 et les évolutions du front de résine dans ces 3 cas tests différents sont présentées sur la figure 9-8. A partir de la figure 9-8, nous pouvons observer que le front de résine arrive au même point dans la préforme pour les 3 cas tests à des temps très différents. Concernant les conditions d’infusion de résine, ces différences viennent surtout du changement de la condition thermique, ce qui souligne l’importance de la température dans le procédé d’infusion de résine.

Actuellement, le modèle numérique ne peut pas prendre en compte la variation de la température. De plus, nous manquons d’informations sur la viscosité de la résine RTM6 : nous disposons seulement de la viscosité pour 100°C et 120°C. Les temps de remplissage calculés en utilisant la viscosité à 100°C (0,058 Pa.s) et à 120 °C (0,03 Pa.s) sont respectivement de 888 s et 523 s. On note la grande sensibilité de la viscosité, et par conséquent du temps de remplissage, à la température. Compte tenu des limitations du modèle numérique utilisé, nous avons retenu une valeur moyenne de 100°C, cette température étant la plus proche de la moyenne de température entre la résine et la préforme. Même si le temps de remplissage obtenu dans ces conditions est proche du temps obtenu expérimentalement, il apparaît nécessaire pour le futur de valider le modèle prenant en compte un champ de température plus réaliste et une loi de variation $\eta(\alpha, T)$ (α : le taux de réticulation de la résine, T : la température de la résine).

Tableau 9-9 Résultats des mesures du front de résine suivant l’épaisseur de la préforme dans 3 cas tests différents.

	Position du front	Pli 0 (0%)	Pli 9 (18,75%)	Pli 24 (50%)	Pli 39 (81,25%)	Pli 45 (93,75%)
Test couvercle ouvert	Temps (s)	0	220	695	1395	1845
Test dans une étuve	Temps (s)	0	80	400	800	1100
Test standard	Temps (s)	0	80	300	640	755

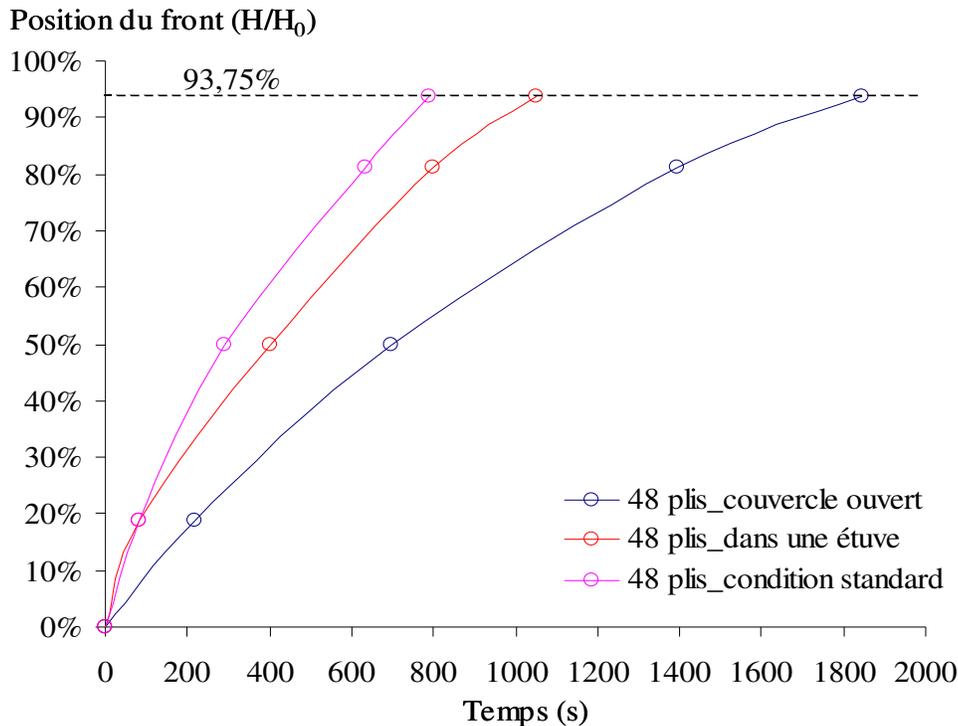


Figure 9-8 Comparaison du front de résine au cours de remplissage mesuré par des micro-thermocouples dans 3 cas tests différents.

9.4.3 Evolution de la perméabilité de la préforme

Les études d'évolution de la perméabilité de la préforme ont été présentées au chapitre 4, on sait que le temps de remplissage est très sensible à la variation de perméabilité, c'est pourquoi nous allons revenir sur ce paramètre.

Perméabilité constante

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 3, la relation de Carman-Kozeny a été utilisée pour calculer la perméabilité de la préforme (voir l'équation 3-11). Dans cette relation, la perméabilité est une fonction du taux volumique de fibres de la préforme. Le taux volumique de fibres diminuant au cours de l'augmentation d'épaisseur de la préforme lié à l'infusion de résine (voir figure 9-7), nous observons que la perméabilité augmente au cours du temps. Son évolution est présentée dans la figure 9-9. Si maintenant nous considérons que la perméabilité reste une constante pendant l'infusion de résine, est-ce que le profil du front de résine change ou reste le même? Pour des raisons d'homogénéité (il faut que le temps de remplissage ne soit pas très loin de celui précédemment décrit), une valeur de perméabilité de $4 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ a été choisie pour cette étude. Nous simulons à nouveau cas test d'infusion (une plaque avec 48 plis) et présentons les résultats dans le tableau 9-10. A partir de ces résultats, nous pouvons observer que les paramètres de sortie sont quasiment inchangés sauf le temps de remplissage (on a 1110 s par rapport à 890 s précédemment). Nous tirons les informations sur le front de résine et les notons dans le tableau 9-11. Ensuite l'évolution de la position du front de résine est tracée et comparée avec le calcul précédent (voir figure 9-10). La variation d'épaisseur de la préforme étant non-linéaire, le profil d'évolution du front de résine n'est pas linéaire même si une perméabilité constante est

utilisée. La différence sur la vitesse d'infusion a engendré une évolution différente de la position du front de résine. Pour la première partie des courbes dans la figure 9-10, la résine s'écoule plus rapidement dans le cas utilisant la perméabilité constante ($4 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$), car l'évolution de la perméabilité sur la figure 9-9 présente une valeur inférieure cette constante. Par contre, quand la perméabilité présentée sur la figure 9-9 devient supérieure à $4 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$, la courbe bleue (utilisant la relation Carman-Kozeny) sur la figure 9-10 indique une vitesse d'infusion plus grande que celle de la courbe rouge sur la même figure (perméabilité égale à $4 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$) dans leur deuxième partie.

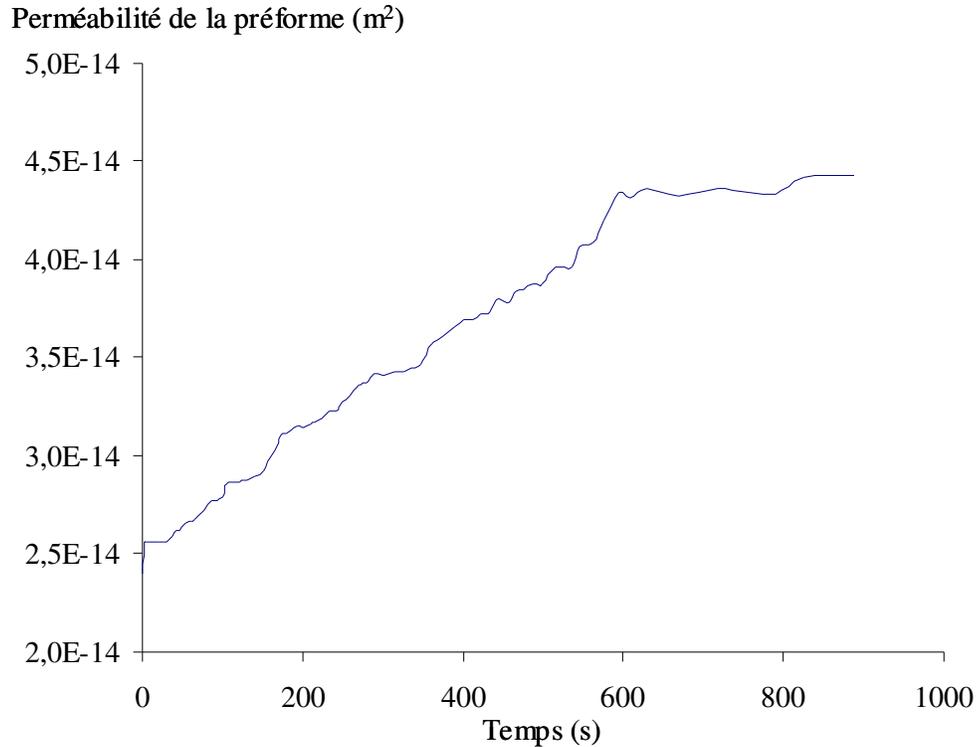


Figure 9-9 Evolution de la perméabilité de la préforme au cours du remplissage calculée par la relation de Carman-Kozeny.

Tableau 9-10 Résultats de la simulation numérique pour le test d'infusion d'une plaque avec 48 plis utilisant une perméabilité constante ($4 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$).

Condition initiale	Epaisseur de la préforme (mm)	20
	Dimension surfacique	335 mm × 335 mm
	Taux volumique de fibres	39%
Après compaction	Epaisseur de la préforme (mm)	12,7
	Taux volumique de fibres	61%
Après remplissage	Accroissement d'épaisseur (mm)	1,25
	Taux volumique de fibres	56%
	Masse de résine absorbée par la préforme (g)	755
	Temps de remplissage pour la préforme (s)	1110

Tableau 9-11 Evolution de la position du front de résine calculée par la simulation numérique en utilisant une perméabilité constante ($4 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$).

Position (H/H ₀)	0%	25,4%	57,9%	80,9%	100%
Temps d'arrivé de la résine (s)	0	85	390	725	1110

avec H l'épaisseur de la zone remplie et H₀ l'épaisseur de la préforme

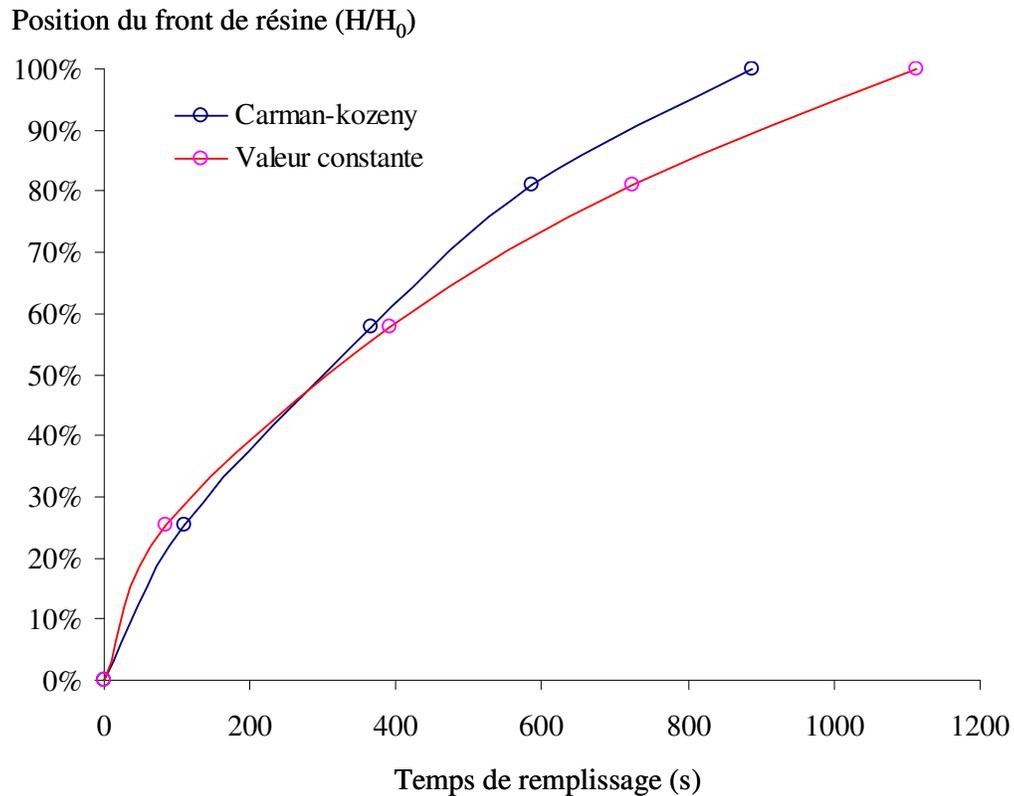


Figure 9-10 Evolution de la position du front de résine calculée par deux modèles différents : Perméabilité constante et Perméabilité déterminée par la relation de Carman-Kozeny.

Perméabilité de tissus UD G1157

Une expression analytique de la perméabilité du tissu unidirectionnel (UD avec une référence de G1157) de fibres de carbone est utilisée dans ce cas test de la simulation numérique, elle est obtenue expérimentalement d'après les travaux de thèse de R. Nunez [57]. La perméabilité est d'une fonction du taux volumique de fibres (*TVF*) et obtenue sous la forme suivante :

$$K_s = 1,626 \cdot 10^{-11} \cdot (TVF)^3 - 2,815 \cdot 10^{-11} \cdot (TVF)^2 + 1,474 \cdot 10^{-11} \cdot (TVF) - 2,048 \cdot 10^{-12} \quad 9-1$$

Les résultats de la simulation numérique utilisant la fonction de la perméabilité de tissus UD G1157 sont représentés dans le tableau 9-12 (mêmes conditions initiales que le tableau 9-10). Comme nous n'avons pas changé les autres propriétés de la préforme, quand nous comparons ces résultats avec ceux du tableau 9-3, nous notons que la vitesse de l'infusion et, par conséquent, le temps de remplissage ont évolué fortement. Concernant les travaux de R. Nunez, il a mesuré un débit stationnaire et déterminé une vitesse en fût vide \bar{v} et la perméabilité stationnaire transversale K_s grâce à la loi de Darcy, c'est-à-dire qu'il a considéré un temps de remplissage correspondant la vitesse en fût vide. Mais dans notre modèle numérique, nous avons calculé le temps de remplissage avec une vitesse réelle \bar{v}_r ($\bar{v}_r = \bar{v} / \phi$, ϕ : la porosité de la préforme). Donc nous pouvons obtenir analytiquement une relation entre la perméabilité

transversale utilisée dans notre modèle numérique K et la perméabilité K_s présentée dans l'équation 9-3 ci-dessous (voir annexe 5)

$$K = \phi^2 \cdot K_s \quad 9-3$$

Tableau 9-12 Résultats de la simulation numérique pour le test d'infusion d'une plaque avec 48 plis utilisant une perméabilité de tissus UD G1157 mesurée expérimentalement (équation 9-1).

Après compaction	Epaisseur de la préforme (mm)	12,7
	Taux volumique de fibres	61%
Après remplissage	Accroissement d'épaisseur (mm)	1,25
	Taux volumique de fibres	56%
	Masse de résine absorbée par la préforme (g)	750
	Temps de remplissage pour la préforme (s)	235

Pour la validation du modèle numérique, nous utilisons les mesures de R. Nunez et modifier par l'équation 9-3 afin de re-simuler l'essai d'infusion d'une plaque. Ses résultats numériques et ses comparaisons avec les calculs utilisant la relation de Carman-Kozeny sont représentés dans le tableau 9-13. Nous avons obtenu la très bonne corrélation entre les deux calculs, notamment le temps de remplissage ; nos simulations numériques ont été confirmées par les calculs analytiques et les mesures expérimentales. Si on trace l'évolution de la position du front calculée par le modèle numérique 2 (utilisant la perméabilité UD G1157 mesurée), elle présente aussi une bonne corrélation avec les résultats numériques à utiliser le modèle numérique 1 : détermination de la perméabilité par la relation de Carman-Kozeny (voir figure 9-11).

Tableau 9-13 Comparaison de la simulation numérique pour un essai d'infusion d'une plaque utilisant la relation de Carman-kozeny et la perméabilité de tissus UD G1157.

		Numérique 1 (Carman-Kozeny)	Numérique 2 (perméabilité de tissus UD G1157)
Après compaction	Epaisseur de la préforme (mm)	12,7	12,7
	Taux volumique de fibres	61%	61%
Après remplissage	Accroissement d'épaisseur (mm)	1,25	1,25
	Taux volumique de fibres	56%	56%
	Masse de résine absorbée par la préforme (g)	750	750
	Temps de remplissage pour la préforme (s)	890	875

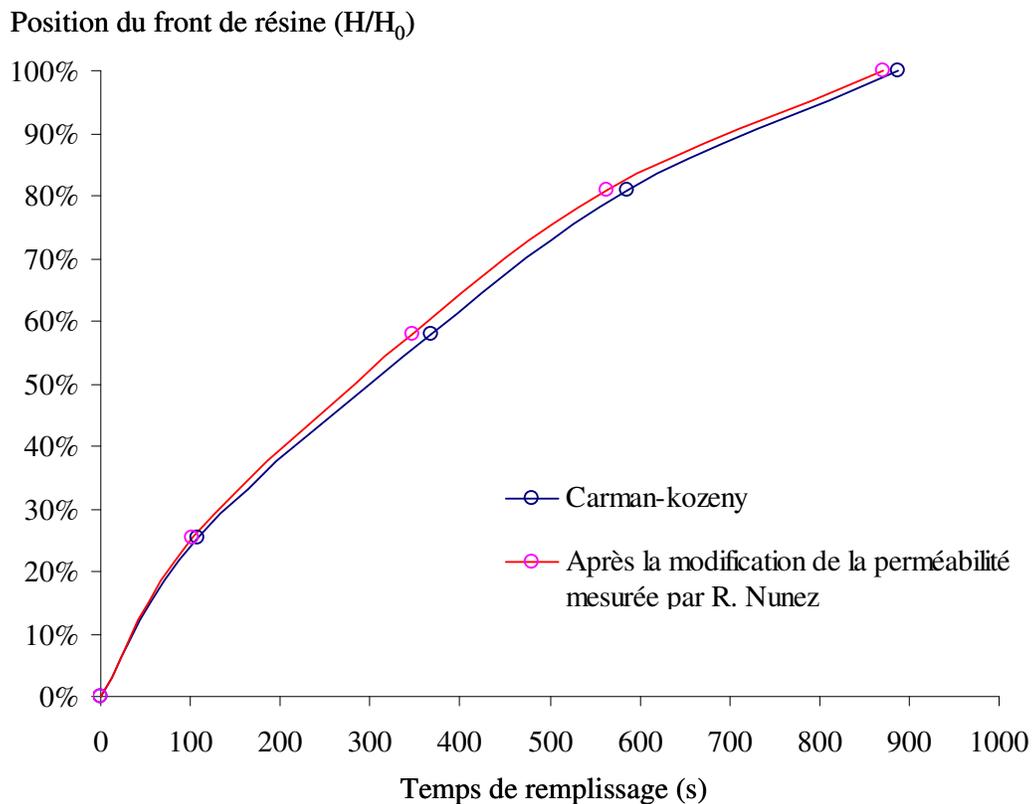


Figure 9-11 Comparaison de la position du front de résine pour un essai d'infusion d'une plaque calculée par la relation de Carman-kozeny et la perméabilité de tissus UD G1157 mesurée.

9.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une simulation numérique et ses comparaisons avec les résultats expérimentaux basés sur l'essai d'infusion d'une plaque par le procédé LRI sous des conditions industrielles standards. A partir des comparaisons entre la simulation numérique et l'expérience sur les paramètres importants optimisés dans le chapitre précédent, on conclut que le modèle numérique est capable de traiter le problème de la compaction puis de l'écoulement de résine dans un milieu poreux en grandes déformations pour la phase d'infusion de résine dans un procédé LRI. Même si nous avons obtenu une bonne corrélation entre les études numérique et expérimentale, il y a encore des difficultés à résoudre tant en ce qui concerne la simulation numérique et que les mesures expérimentales.

Au niveau des simulations numériques, d'abord, nous avons essayé d'entrer les paramètres nécessaires correspondant aux conditions réelles, mais il est difficile d'avoir tous les paramètres corrects, par exemple, la viscosité de la résine et l'épaisseur de la préforme initiale. Pour la viscosité de la résine, nous n'avons pas suffisamment d'informations. De plus, la mesure d'épaisseur de la préforme initiale est difficile, la précision sur cette mesure n'est pas satisfaisante. Pour 48 plis de tissus UD G1157 utilisés chaque fois dans les essais d'infusion précédent, les mesures d'épaisseur initiale de la préforme présentent d'environ 15% de la variation, soit entre 19 mm et 22 mm. Ensuite, comme nous l'avons expliqué dans l'introduction du modèle numérique, pour l'instant, nous nous intéressons à l'interaction entre l'écoulement de la résine et la

déformation de la préforme au cours de l'infusion. La variation de la température ne peut pas être prise en compte dans la simulation numérique car la partie thermique et chimique n'est pas modélisée et nous ne pouvons donc pas comparer directement les résultats numériques avec les propriétés de la plaque finale.

Au niveau des mesures expérimentales, le point clé est de suivre l'évolution de l'épaisseur de la préforme. Concernant les conditions industrielles, il est vraiment difficile de suivre l'évolution d'épaisseur de la préforme dans le test d'infusion avec couvercle fermé. D'un point de vue expérimental, quand la résine sort de la préforme, l'infusion n'a pas arrêté et la résine continue d'entrer par le côté du tuyau d'entrée pendant quelques minutes. Pour l'instant, la mesure de la variation d'épaisseur de la préforme n'a pas encore été effectuée pour cette période, mais cette mesure doit être envisagée afin d'améliorer notre compréhension du procédé.

Conclusion générale

Les procédés d'infusion de résine constituent une branche de la famille LCM très prometteurs pour l'élaboration de pièces en matériaux composites, notamment les procédés LRI et RFI. Nous avons vu dans le premier chapitre qu'ils permettent, non seulement de fabriquer des pièces composites hautes performances plus légères, épaisses et complexes mais qu'ils entraînent aussi une réduction importante des coûts de main d'œuvre et d'outillage, ce qui explique leur développement ces dernières années, tout particulièrement dans le domaine aéronautique. Ces types de procédés sont basés sur un écoulement de la résine liquide (pour RFI, le cycle de température impose le changement d'état de la résine solide à l'état liquide) à travers l'épaisseur d'un renfort fibreux dénommé préforme. Un sac à vide remplaçant le demi-moule supérieur, l'épaisseur et le taux volumique de fibres de la pièce finale ne sont pas complètement contrôlés, donc l'optimisation du procédé et des propriétés des pièces composites est difficile à réaliser. Pour optimiser les paramètres de conception et fabrication des matériaux composites par infusion de résine, un modèle numérique isotherme, développé au laboratoire, a été utilisé. Il décrit l'interaction mécanique entre les déformations du milieu poreux compressible et l'écoulement de résine pendant la phase d'infusion [1]. Avec ce modèle numérique, il est possible de simuler des procédés LRI/RFI pour des géométries industrielles classiques. Pour valider ce modèle numérique, une comparaison entre les simulations numériques et les études expérimentales d'un essai d'infusion d'une plaque par le procédé LRI a été réalisée dans des conditions industrielles.

L'étude de sensibilité du modèle numérique nous a permis de mettre en évidence les quatre paramètres pertinents qui gouvernent le procédé d'infusion : le temps de remplissage, l'épaisseur de la préforme, le taux volumique de fibres et la masse de résine absorbée. Ces paramètres ne sont pas indépendants, ils sont fortement liés entre eux. Premièrement, le temps de remplissage est très sensible à la perméabilité de la préforme, qui est un paramètre intrinsèque pour les procédés d'infusion de résine. La perméabilité dépend du taux volumique de fibres. De plus, le temps de remplissage est lié à l'épaisseur de la préforme. Deuxièmement, l'épaisseur de la préforme et le taux volumique de fibres sont liés par une loi de comportement déterminée par un essai de compaction. Enfin, la masse de résine dépend du volume de la pièce et de la porosité de la préforme, en d'autres termes, elle est liée à l'épaisseur et au taux volumique de fibres de la préforme. En revanche, le débit de résine dépend de la vitesse de résine infusée, qui est directement liée avec les conditions aux limites appliquées dans la simulation numérique.

Pour obtenir les informations sur les paramètres importants des procédés d'infusion de résine, notamment les paramètres optimisés par les études numériques pendant la phase de remplissage, des capteurs *in-situ* et la projection de franges sont adaptés dans des études expérimentales. Ces deux méthodes permettent de minimiser l'influence des

capteurs sur les procédés d'infusion de résine. Dans un premier temps, des micro-thermocouples ont été placés dans les tuyaux de la résine et la préforme, ils ont conduit à une première estimation de la température dans le système d'infusion. A partir de ces mesures, on a noté environ 10°C de différence de température suivant l'épaisseur de la préforme dans des conditions du procédé standard. De plus, la température de la résine subit une variation de 10°C pendant la phase de remplissage et celle pour la préforme est entre 3°C et 10°C, selon la position dans la préforme. Donc, en fait, la phase de remplissage dans le procédé d'infusion de résine n'est pas une phase isotherme. Ensuite, deux différents types de capteur ont été mis en place : le capteur à fibre optique et les micro-thermocouples sont employés pour suivre le procédé entier, surtout pour la détection du front de résine pendant le remplissage dans les différentes conditions industrielles. Dans ces conditions expérimentales, nous avons obtenu une bonne corrélation entre ces deux techniques de mesure. Les micro-thermocouples pourraient être utilisés pour caractériser l'écoulement de la résine pendant l'infusion. Les mesures ont montré que le temps de remplissage est lié fortement à la viscosité de la résine. La viscosité est liée à la température de la résine et de la préforme. Donc le champ de température influence l'écoulement pendant l'infusion. Nous avons observé aussi que le front de résine n'est pas homogène ni dans le drainant ni dans la préforme à cause du point d'entrée de la résine. Pour l'écoulement de la résine dans la préforme, même si la résine remplit le drainant très rapidement, l'écoulement bidimensionnel a été observé dans la préforme. Par contre, en général, la résine remplit la préforme pli par pli suivant l'épaisseur. L'hypothèse d'écoulement de la résine peut donc être adaptée. En revanche, dans un plan du pli, la résine s'écoule principalement de l'entrée à la sortie et l'effet de « race-tracking » a été rencontré sur les bords de la préforme. Les mesures de la variation d'épaisseur de la préforme au cours de l'infusion ont montré que la méthode de la projection de franges peut donner une mesure quantitative directe. On notera toutefois qu'une mesure par projection de franges nécessite d'adapter les conditions de fabrication standard. A partir des résultats obtenus par la projection de franges, la variation d'épaisseur de la préforme met en évidence trois étapes d'un scénario pour la phase de remplissage d'une plaque. La 1^{ère} étape est un gonflement du drainant, qui correspond au remplissage du drainant. Du fait de la grande différence sur le niveau de la perméabilité entre le drainant et la préforme (normalement l'ordre de 10^{10}), la résine remplit très rapidement le drainant. La 2^{ème} étape montre un remplissage des vides sans changement du volume global et la 3^{ème} étape note le gonflement de la plaque à cause de la résine qui sépare le réseau des fibres dans la préforme. De plus, entre la 2^{ème} et la 3^{ème} étape, l'ordre du gonflement de la préforme peut être observé d'abord à l'entrée de résine, puis au centre de la préforme et enfin à la sortie de résine, ce qui correspond à l'ordre d'infusion détecté par les micro-thermocouples. Enfin, à partir des résultats obtenus, on peut imaginer un scénario plus exploratoire : une fois que la résine est en contact avec la plaque chauffante, une partie de la résine s'écoule selon la direction de cette plaque, créant un film qui s'écoule rapidement vers le côté de la sortie par un effet de « race-tracking ».

A partir des expériences d'infusion de résine dans des conditions réelles, les conditions aux limites ont été obtenues et entrées dans le modèle numérique. Un essai de compression transversale sur la même préforme employée dans l'essai d'infusion a permis d'avoir une loi de comportement pour simuler numériquement la phase de la compaction. Des simulations numériques et des comparaisons avec les résultats expérimentaux ont été réalisées pour les essais d'infusion d'une plaque par le procédé

LRI sous des conditions industrielles standards. A partir des comparaisons entre la simulation numérique et l'expérience sur des paramètres importants, notre modèle numérique est capable de traiter et simuler l'écoulement de résine dans un milieu poreux compressible en grandes déformations pour la phase de remplissage dans un procédé LRI. En général, il y a une bonne corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux, mais certaines difficultés et limites ont été rencontrées dans nos simulations numériques et mesures expérimentales.

Au niveau de nos simulations numériques, nous avons essayé d'entrer les paramètres nécessaires correspondant bien aux conditions réelles, mais il est difficile d'avoir tous les paramètres corrects, par exemple, la viscosité de la résine, la constante de Kozeny et l'épaisseur de la préforme initiale. Pour la viscosité de la résine, nous n'avons pas suffisamment d'informations. En revanche, la mesure d'épaisseur de la préforme initiale est difficile et la précision sur cette mesure n'est pas satisfaisante. Comme nous l'avons déjà présenté, le modèle numérique utilise la relation Carman-Kozeny pour déterminer la perméabilité de la préforme, la constante de Kozeny de 10 ne peut pas s'adapter à tous les types de préforme. Pour l'instant, nous nous intéressons à l'interaction entre l'écoulement de la résine et la déformation de la préforme au cours de l'infusion ; le modèle simule uniquement la phase de remplissage, c'est-à-dire qu'il manque la modélisation thermique et chimique. En d'autres termes, la variation de la température lors de l'infusion et les phénomènes de retrait de la résine au cours de la réticulation ne sont pas pris en compte dans la simulation numérique. Nous ne pouvons pas comparer directement les propriétés de la plaque finale avec des résultats calculés numériquement. Par ailleurs, le temps de remplissage calculé par la simulation numérique n'est pas très stable, il y a une certaine variation par rapport au changement du nombre d'éléments dans la préforme. Nous nous sommes placées dans des conditions permettant d'obtenir un temps de remplissage numériquement stable.

Les perspectives à ce travail sont nombreuses. Pour le modèle numérique, d'abord les méthodes d'identification des différents paramètres du procédé peuvent améliorer la précision, par exemple pour la viscosité de la résine, la constante de Kozeny et l'épaisseur de la préforme initiale. Ensuite, le plus important est d'ajouter la partie thermique et chimique. De plus, pour simuler le front de résine plus précisément, le traitement de l'interface du front de résine doit être ajouté dans le modèle numérique. Pour l'approche expérimentale, la mesure de la variation d'épaisseur de la préforme pendant le procédé entier est importante et indispensable. Jusqu'à présent, nous n'avons pas réussi à suivre la variation d'épaisseur de la préforme pendant les phases de réticulation et de refroidissement. Il nous manque une partie de la compréhension des phénomènes mis en jeu sur ces deux phases, nous ne pouvons pas corrélérer les épaisseurs après la compression, après l'infusion et après le refroidissement. Afin d'obtenir l'évolution du front de résine précisément, il est possible de placer plusieurs capteurs à fibre optique à différents points de la préforme. Ces résultats permettront en outre de contrôler de façon systématique les mesures des micro-thermocouples. De plus, le suivi de l'avancement de la réticulation sera également effectué à différents niveaux dans la préforme. Finalement, il y a encore un facteur clé pour nous qui est la perméabilité, c'est toujours un paramètre essentiel dans les procédés d'infusion de résine, qui est un facteur prédominant dans la modélisation et simulation numérique.

Bibliographie

Bibliographie

1. Celle P. Couplages fluide / milieu poreux en grandes déformations pour la modélisation des procédés d'élaboration par infusion. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2006.
2. Dursapt M. Mise en forme des matériaux composites. Cours de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne.
3. Barrau J.J, Guedra Degeorges D. Structures en matériaux composites. Techniques de l'ingénieur, BM 5080.
4. Negrier A, Rigal J.C. Présentation des matériaux composites. Techniques de l'ingénieur, A 7790.
5. Chatain M. Matériaux composites : présentation générale. Techniques de l'ingénieur, AM 5000.
6. Benjamin W. Resin transfer moulding – Sampe Monograph No.3. Covina: Sampe International Business Office; 1999.
7. Barbero E.J. Introduction to composite materials design. Taylor & Francis Group, ISBN 1560327014, 1998.
8. Qi B, Raju J, Kruckenberg T, Stanning R. A Resin Film Infusion process for manufacture of advanced composite structures. Composite Structures, 47 (1-4): 471-476, 1999.
9. Antonucci V, Giordano M, Inserra S, Nicolais L. A case study of resin film infusion technology: the manufacturing of a composite stringer. In: the 10th European Conference on Composite Materials (ECCM-10), 3-7 June, Brugge, Belgium, 2002.
10. Thibaudeau M, Shenoï R.A. Understanding flow behaviour in the resin infusion process. In: 10th European Conference on Composite Materials (ECCM-10), 3-7 June, Brugge, Belgium, 2002.
11. Antonucci V, Giordano M, Nicolais L, Calabro A, Cusano A, Cutolo A, Inserra S. Resin Flow monitoring in resin film infusion process. Journal of Materials Processing Technology, 143-144: 687-692, 2003.
12. Han N.L, Suh S.S, Yang J.M, Han H.T. Resin film infusion of stitched stiffened composite panels. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 34 (3): 227-236, 2003.
13. Willians C, Summerscales J, Grove S. Resin infusion under flexible tooling (RIFT): a review. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 27 (7): 517-524, 1996.
14. Jedidi J. Etude du comportement en cyclage hygrothermique d'un matériau composite épais. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2004.
15. Liotier P.J. Durabilité de nappes renforcées par nappes unidirectionnelles cousues. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008.
16. Celle P, Drapier S, Bergheau J.M. Numerical Modelling of Liquid Infusion into Fibrous Media Undergoing Compaction. European Journal of Mechanics, A/Solids, 27: 647-661, 2008.

Bibliographie

17. Celle P, Drapier S, Bergheau J.M. Numerical Aspects of Fluid infusion inside a Compressible Porous Medium Undergoing Large Strains. *European Journal of Computational Mechanics* 17: N°5-6-7,819-827, 2008.
18. Celle P, Luca P, Drapier S, Bergheau J.M. Numerical Modelling of Infusion Processes (LRI and RFI). In: 52nd International Technical Conference, SAMPE, Baltimore, 3-7 June, B287, 2008.
19. Loos A.C, MacRae J.D. A process simulation model for the manufacture of a blade-stiffened panel by the resin infusion process. *Composites Science and Technology*, 56:273-288, 1996.
20. Brusckie M, Advani S.G. Finite element/control volume approach to mold filling in anisotropic porous media. *Polymer Composites*, 11(6): 398-405, 1990.
21. Trochu F, Gauvin R, Gao D.M. Numerical analysis of the resin transfer molding process by the finite element method. *Advance Polymer Technology*, 12(4): 329-342, 1993.
22. Bickerton S, Simacek P, Guglielmi S, Advani S.G. Investigation of draping and its effects on the mold filling process during manufacturing of a compound curved composite part. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28A: 801-816, 1997.
23. Luo J, Liang Z, Zhang C, Wang B. Optimum tooling design for resin transfer molding with virtual manufacturing and artificial intelligence. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(6): 877-888, 2001.
24. Bechet E, Ruiz E, Trochu F. Adaptive mesh generation for mould filling problems in resin transfer moulding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(9): 813-834, 2003.
25. Simacek P, Advani S.G. Desirable features in a mold filling simulation for liquid molding process. *Polymer Composites*, 25(4): 355-367, 2004.
26. Joubaud L, Achim V, Trochu F. Numerical Simulation of Resin Infusion and Reinforcement Consolidation Under Flexible Cover. *Polymer Composites*, 26(4): 417-427, 2005.
27. Robinson M.J, Kosmatka J.B. Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Simulation for thick laminate structures. In: the 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials, Schaumburg, IL, 7-10 April, 2008.
28. Ambrosi D, Preziosi L. Modelling matrix injection through elastic porous preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29: 5-18, 1998.
29. Correia N.C, Robitaille F, Long A.C, Rudd C.D, Simacek P, Advani SG. Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36: 1645-1656, 2005.
30. Ouahbi T, Saouab A, Bréard J, Ouagne P, Chatel S. Modelling of hydro-mechanical coupling in infusion processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38: 1646-1654, 2007.
31. Ouahbi T, Saouab A, Breard J, Park C.H. Modélisation numérique du couplage hydro-mécanique en milieu fibreux déformable. In : 19ème Congrès Français de Mécanique, (CFM09), Marseille, France, 24-28 août 2009.

Bibliographie

32. Govignon Q, Bickerton S, Kelly P.A. Simulation of the complete resin infusion process. In: the 9th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM-9), Montreal (Quebec) Canada, 8-10 July, 2008.
33. Ecole Polytechnique Montréal, Canada et ESI Group: Manuel Pro-Flot. 2005.
34. ESI GROUP: User's Guide & Tutorials PAM-RTM. 2004.
35. Desplentere F. Multiscale modelling of stochastic effects in mould filling simulations for thermoplastic composites. Thèse de doctorat, Katholieke Universiteit Leuven, 2007.
36. Binetruy C. Physique du moulage des composites avancés : aspects théoriques. www.techniques-ingenieur.fr, AM 3718-1, 3-5, 2006.
37. Elbouazzaoui O. Caractérisation de la perméabilité transverse de nouveaux renforts multiaxiaux cousus pour composites structuraux. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France, 2004.
38. Yang C, Grattoni C.A, Muggeridge A.H. Flow of water through channels filled with elastically deformable polymer gels. In European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, Vol.13, Page 8, Italy, 2000.
39. Darvy H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont, 1856.
40. Advani S.G, Sozer E.M. Liquid Molding of Thermoset Composites. *Comprehensive Composite Materials*, Chapter 2.23, 807-844, 2003.
41. Bickerton S, Advani S.G. Characterization and modelling of Race-tracking in liquid composite molding processes. *Composites Science and Technology*, 59: 2215-2229, 1999.
42. Bickerton S, Simacek P, Advani S.G. Investigation of draping and its effects on the mold filling process during manufacturing of compound curved composite part. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28A: 801-816, 1997
43. Dullien F.A.L, *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*. Volume 21, New York, 1979.
44. Kaviany M. *Principles of heat transfer in porous media*. Springer-Verlag New York, New York, ISBN 0387945504, 1995.
45. Park J, Kang M.K. A numerical simulation of the resin film infusion process. *Composite Structures*, 431-437, 2003.
46. Bear J. *Dynamic of Fluids in Porous Media*. ISBN: 0486656756, 1990.
47. Kaviany M. *Principles of heat Transfer in Porous Media*. Springer-Verlag New York, 1995. ISBN 0387945504.
48. Drapier S, Monatte J, Elbouazzaoui O, Henrat P. Characterization of transient through-thickness permeabilites of Non Crimp New Concept (NC2) multiaxial fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36: 877- 892, 2005.
49. Chan A.W, Hwang S.T. Anistropic in-plane permeability of fabric media. *Polymer Engineering and Science*, 31(16): 1233-1239, 1991.

50. Lekakou C, Johari M.A.K.B, Bader M.G. Compressibility and flow permeability of two-dimensional woven reinforcements in the processing of composites. *Polymer Composites*, 17(5): 666-672, 1996.
51. Lai Y.H, Khomanmi B, Kardos J.L. Accurate permeability characterization of preforms used in polymer matrix composite fabrication processes. *Polymer Composites*, 18(3): 368-377, 1997.
52. Han K, Lee C.W, Rice B.P. Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. *Composites Science and Technology*, 60(12-13): 2435-2441, 2000.
53. Stadtfeld H.C, Erninger M, Bickerton S, Advani S.G. An experimental method to continuously measure permeability of fiber preforms as a function of fiber volume fraction. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 21(10): 879-899, 2002.
54. Robinson M.J, Kosmatka J.B, An alternative method of measuring permeability for the VARTM process. SAMPE Long Beach, California, USA, 2006.
55. Scholz S, Heider D. Measurement of transverse permeability using gaseous and liquid flow. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38: 2034-2040, 2007.
56. Nunez R, Vautrin A, Henrat P. Problématique de la mesure de perméabilité transverse de préformes fibreuses. In : 15ème Journée nationale Composite, Marseille, France, 2007.
57. Nunez R. Mise en place d'une méthodologie de mesure et d'analyse de la perméabilité transverse. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France, 2009.
58. Ngo N.D, Tamma K.K. Microscale permeability predictions of porous fibrous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 3135-3145, 2001.
59. Terzaghi K, Peck R.B, Mesri G. Soil mechanics in engineering practice. Jones Wiley & Sons, New York, ISBN 0471086584, 1967.
60. Kempner E.A, Hahn H.T. A unified approach to manufacturing simulation for composites. In proceedings of the First Korea-U.S. Workshop on Composite Materials, Seoul, Korea, 1998.
61. Gray W.G, Schrefler B.A. Thermodynamic approach to effective stress in partially saturated porous media. *European Journal Mechanics, A/Solids*, 20:521-538, 2001.
62. Jäger W, Mikelić A. On the roughness-induced effective boundary conditions for an incompressible viscous flow. *Journal of Differential Equations*, 170(1): 96-122, 2001.
63. Rivière B, Yotov I. Locally conservative coupling of Stokes and Darcy flows. *Journal on Numerical Analysis*, 42(5): 1959-1977, 2005.
64. Karper T, Mardal K.A, Winther R. Unified finite element discretizations of coupled Darcy-Stokes flow. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 25(2): 311-326, 2008.
65. Pacquaut G, Bruchon J, Moulin N, Drapier S. Utilisation d'une méthode Level Set pour le couplage Stokes-Darcy : application aux procédés d'élaboration par infusion de résine. In : 9ème colloque national en calcul des structures, Giens, France, 2009.

Bibliographie

66. Advani S.G, Sozer M. Comprehensive composite materials, chapitre 2.23; 807-844, 2003.
67. Valdes-Parada F.J, Alberto Ochoa-Tapia J, Alvarez-Ramirez J. Validity of the permeability Carman-Kozeny equation: A volume averaging approach. *Physical A*, 388; 789-798, 2009.
68. Vacher S, Molimard J, Gagnaire H, Vautrin A, Suivi par capteurs à fibres optiques de la fabrication des matériaux composites par procédé RFI, in « Contrôle de santé structurale », ed. Marc TURPIN, Instrumentation, Mesure, Métrologie RS série I2M Vol. 3 N° 1-2, 185-198,2003.
69. Vacher S. Capteurs à fibres optiques pour le contrôle de l'élaboration et la caractérisation mécanique des matériaux composites. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2004.
70. Demirel M. Mesures de déformation et de température par capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg : optimisation de la mesure et application au contrôle de procédé de fabrication de pièces composites. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2009.
71. Weitzenböck J.R, Shenoï R.A, Wilson P.A. Radial flow permeability measurement. *Composites Part A*, 30:781-79, 1999.
72. Trochu F. Hoareau C, Gauvin R, Vincent M. Experimental analysis and computer simulation of RTM through multilayer fibre reinforcements. In: ICCM/9 composites and processing science, vol.3. Madrid: Woodhead Publishing Ltd; 481-488, 1993.
73. Mogavero J, Advani S.G. Experimental investigation of flow through multi-layered preforms. *Polymer Composite*, 18(5):649-655, 1997.
74. Stedil. Felt permeability testing apparatus. US patent No.3, 577,767; 1971.
75. Parnas R.S. Permeability characterization. Part 1. A proposed standard reference fabric for permeability. *Polymer Composite*, 16(6):429-445, 1995.
76. Han K.K, Lee C.M, Rice B.P. Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. *Composite Science Technology*, 60:2435-2441, 2000.
77. Walsh S.W. In-situ sensor method and device. US Patent No.5, 210,499; 1993.
78. Lim S.T, Lee W.I. An analysis of the three-dimensional resin-transfer mold filling process. *Composite Science Technology*, 60:961-975, 2000.
79. Kissinger C, Mitschang P, Neitzel M. 3-Dimensional fluid propagation in RTM-processing. In: Crivelli Visconti I, editor. *Advancing with composites 2000*, Milan:Verlag, 93-98, 2000.
80. Wang P, Demirel M, Drapier S, Vautrin A, Henrat P. In-plane and transverse detection of the fluid flow front during the LRI manufacturing process, In: 9th International Conference on Flow Processes in Composite Materials Montréal (FPCM-9), Québec, Canada, 8-10 July, 56, 2008.
81. Stöven T, Weyrauch F, Mitschang.P, Neitzel M. Continuous monitoring of three-dimensional resin flow through a fibre preform. *Composites Part A*, 34:475-480, 2003.

Bibliographie

82. Govgnon Q, Bickerton S, Morris J, Kelly P.A. Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion process. *Composites Part A*, 39:1412-1426, 2008.
83. Drapier S, Molimard J, Vautrin A, Henrat P. Characterisation of the preform thickness variation during the infusion-based manufacturing processes using fringe projection, In: 9th International Conference on Flow Processes in Composite Materials, Montréal (FPCM-9), Québec, Canada, 8 ~ 10 July, 2008.
84. Mulle M. Eprouvettes technologiques instrumentées à cœur par fibre optique à réseau de Bragg pour l'analyse du comportement thermomécanique du matériau composite dans la structure. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier -Toulouse III, 2007.
85. Craig M. Optical fiber sensors for advanced composite materials. *Comprehensive Composite Materials*, chapter 5.21, 2003.
86. Vacher S, Molimard J, Vautrin A, Gagnaire H, Henrat P. Monitoring of resin infusion process by embedded optical fibres. In: 12th European Conference on Composite Materials (ECCM 12). Biarritz, France, 29 August ~ 1 September 2006.
87. Vacher S, Molimard J, Gagnaire H, Vautrin A. A Fresnel's reflection optical fiber sensor for thermoset polymer cure monitoring. *Polymers and polymer composites*, 12/4: 269-276, 2004.
88. Liu Y.M, Ganesh C, Steele J.P, Jones J.E. Fiber optic sensor development for real-time in-situ epoxy cure monitoring. *Journal of Composite Materials*, 31(1): 87-102, 1997.
89. Drapier S, Molimard J, Wang P, Vautrin A, Henrat P. Prediction and characterization of the resin flow and the fibrous preform behaviour during Liquid Resin Infusion (LRI). In: 13th European Conference on Composite Materials (ECCM 13). Stockholm, Sweden, 2 ~ 5 June, 2008.
90. Wang P, Drapier S, Molimard J, Vautrin A, Minni J.C. Characterization of Liquid Resin Infusion (LRI) Filling by Fringe Pattern Projection and in-situ Thermocouples. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41: 36-44, 2010.
91. Bickerton S, Advani S.G. Characterization and modelling of race-tracking in liquid composite molding process. *Composite Science Technology*, 59: 2215-2229, 1999.
92. Lawrence J.M, Barr J, Karmakar R, Advani S.G. Characterization of preform permeability in the presence of race tracking. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35:1393-1405, 2004.
93. Duan Y.X, Tan Z.Y, Zhao Y, Sun J. Compression Responses of Preform in Vacuum Infusion Process. *Chinese Journal of Aeronautics*, 21: 370-377, 2008.
94. Breque C, Dupre J.C, Bremand F. Calibration of a system of projection moiré for relief measuring: biomechanical applications. *Optics and Lasers in Engineering*, 41: 241-260, 2004.
95. Gigliotti M, Jacquemin F, Molimard J, Vautrin A. Transition Saddle-Cylinder Shape of Thin Unsymmetric [0/90] Square Plates under Hygrothermal Loads: Fringe Projection Method and Variational Approach. *Applied Mechanics and Materials*, 3-4: 217-222, 2005.

Bibliographie

96. Surrel Y. Phase stepping: a new self-calibrating algorithm, *Applied Optics*, 32:3598-3523, 1993.
97. Molimard J. Application de méthodes optiques à la mécanique expérimentale. Habilitation à diriger des recherches à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2005.
98. Fiche de données HEXCEL.
99. Fiche caractéristique de données HEXCEL pour la résine époxy RTM6.
100. Daniel G. Matériaux composites. ISBN 2-7462-1098-3, 5ème édition, P32, 2005.
101. Yi X.S. Research and development of advanced composites technology, National defence industry press, ISBN 7-118-04488-1, 2006. (In Chinese)
102. Ramaswamy B. Numerical simulation of unsteady viscous free-surface flow. *Journal of Computational Physics*, 87(2): 495, 1990.
103. Souli M, Ouahsine A, Lewin L. ALE formulation for fluid-structure interaction problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(5-7): 659-675, 2000.
104. Hughes T.J.R. Multiscale phenomena: Green's functions, the Dirichlet-to-Neumann formulation, subgrid scale models, bubbles and the origins of stabilized methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 127(1-4): 387-401, 1995.
105. Masud A, Hughes T.J.R. A space-time Galerkin/least-squares finite element formulation of the Navier-Stokes equations for moving domain problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 146(1-2, 5): 91-126, 1997.

Bibliographie

Annexes

Annexe 1 : Calcul analytique d'injection RTM pour le cas test 1

- Calcul la vitesse de Darcy V et la vitesse réelle V_r :

La relation de Darcy s'exprime sous la forme :

$$V = -\frac{K}{\eta}(\nabla P + \rho g) \quad A1-1$$

Nous négligeons le terme ρg , donc nous pouvons avoir la vitesse moyenne de la résine ou de Darcy est :

$$V = -\frac{K}{\eta}(\nabla P) \quad A1-2$$

Les valeurs de perméabilité dépendent de la structuration et de l'état de saturation du milieu poreux. La vitesse réelle V_r est déduite de la connaissance de la vitesse de Darcy par la relation [36] :

$$V_r = \frac{V}{\phi} \quad A1-3$$

Et plus, nous avons la pression en fonction de hauteur :

$$P(y) = P \left(1 - \frac{y}{y_{\max}(t)}\right) \quad A1-4$$

Ici $y_{\max}(t)$ est la frontière de hauteur du fluide (c'est une fonction dépendant du temps).

Nous avons donc les expressions de la vitesse de Darcy et la vitesse réelle de la résine ci-dessous :

$$V = -\frac{KP}{\eta} \cdot \frac{1}{y_{\max}(t)} \quad A1-5$$

$$V_r(t) = \frac{KP}{\eta\phi} \cdot \frac{1}{y_{\max}(t)} = \frac{A}{y_{\max}(t)} \quad A1-6$$

Avec une constante $A = \frac{KP}{\eta\phi}$

Nous avons :

$$\begin{aligned} y_{\max}(t) &= \int_0^t V_r(t) dt \\ &\Rightarrow V_r(t) \cdot \int_0^t V_r(t) dt = A \end{aligned} \quad A1-7$$

Si $V_r(t) = Z'$ $\Rightarrow \int_0^t V_r(t) dt = \int_0^t Z' dt = Z(t) - Z(0) = Z(t) - B$

Avec une constante $B = Z(0)$

Donc l'équation A1-7 va devenir :

$$Z'(Z-B) = A \quad A1-8$$

Si on dit $W = Z-B$, on a $W' = Z'$

Donc l'équation A1-8 est exprimée :

$$\begin{aligned} W'W &= A \\ &\Rightarrow W = \sqrt{2At + C} + B \end{aligned}$$

avec C est une constante

Parce qu'on a $Z(0) = B$, donc on sait $C = 0$

Donc $\Rightarrow Z = \sqrt{2At} + B$

Finalement:

$$V(t) = \phi \sqrt{\frac{A}{2t}}$$

$$V_r(t) = \sqrt{\frac{A}{2t}}$$

$$y_{\max}(t) = \sqrt{2At}$$

$$0 \leq y_{\max}(t) \leq H$$

$$\frac{P(y)}{P} = 1 - \frac{y}{\sqrt{2At}}$$

$$0 \leq t \leq T ; \quad 0 \leq y \leq H ; \quad 0 \leq P(y) \leq P$$

Où : T est le temps de remplissage
 H est la hauteur maximale
 P est la pression d'injection

- **Calcul du temps de remplissage (T)**

$$H = \int_0^T V_r(t) dt = \sqrt{2A} [\sqrt{t}]_0^T = \sqrt{2AT}$$

$$T = \frac{H^2}{2A} = 0.35^2 * 0.5 / 2 * 0.001 = \mathbf{30.6 \text{ secs}}$$

- **Calcul du volume de résine injectée**

Nous savons la porosité de préforme, donc le volume de résine injectée est :

$$\begin{aligned} \text{Volume de résine injectée} &= \text{Volume total} * \text{Porosité} \\ &= 0.35 * 0.35 * 0.005 * 0.5 \\ &= \mathbf{3.06E-4 \text{ m}^3} \end{aligned}$$

Annexe 2 : Formulation ALE

La formulation ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) est une méthode généralise les descriptions Lagrangian et Eulerian et combinant les avantages des deux méthodes. Il bien adaptée pour étudier les matériaux milieux continus.

1 Rappelle les descriptions des méthodes Lagrangian et Eulerian

Les descriptions des Lagrangian et Eulerian sont aussi utilisées pour décrire les physiques d'un milieu continu. On sait que la méthode élément fini qui est décrit pour calculer les propriétés de matériau dans les nombres de points limités.

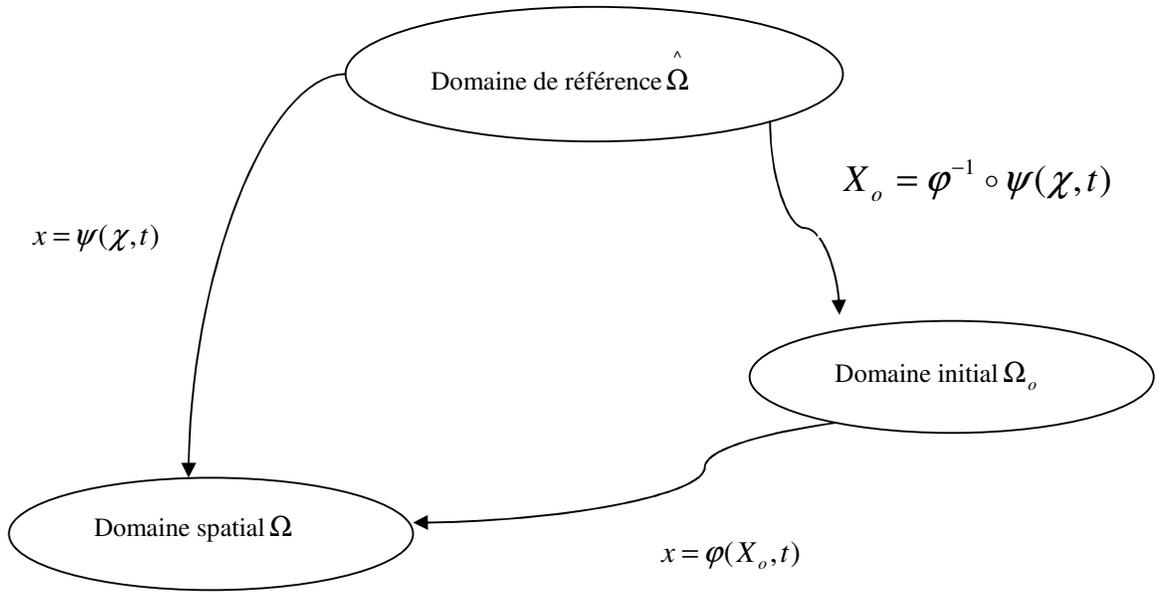
Pour les méthodes Lagrangiennes, il a présenté les points qui sont coïncide dans la base pratique. Cette description peut décrire bien les mouvements des conditions aux limites et peut éviter les effets de convection. Par contre, pour le matériau est très déformé, les éléments du maillage deviennent très distors (concernant les fluides et solides avec grandes déformations), ils nécessitent un remaillage de la structure très coûteux en temps de calcul [102,103] et générant un certain nombre d'approximations notamment lors de la projection des points.

Pour les méthodes Eulériennes, il a présenté les points qui sont fixés dans la base spatiale. Il peut décrire les problèmes de distorsion sans remaillage, mais il va rencontrer les problèmes du traitement des interfaces mobiles [104] et les conditions aux limites [105].

2 Introduction du ALE formule

Le formalisme ALE est introduit sur la figure ci-dessous. Les notations suivantes sont utilisées ; X_o désigne les coordonnées du matériau à l'instant initial dans le domaine initial Ω_o , x désigne les coordonnées courantes du matériau dans le domaine spatial Ω , et enfin χ désigne la position des particules matérielles dans le domaine de référence $\hat{\Omega}$. Les fonctions de transformation : $x = \varphi(X_o, t)$ et $x = \psi(\chi, t)$ et les relations entre un domaine et l'autre : $X_o = \varphi^{-1} \circ \psi(\chi, t)$, $\chi = \psi^{-1} \circ \varphi(X_o, t)$.

En particulier, lorsque $\varphi = \psi$, les coordonnées initiales et référence sont coïncide, les descriptions ALE sont équivalent les descriptions Lagrangiennes. Par ailleurs, si la coordonnée référence est identique, les coordonnées référentiel et spatial sont coïncide et les descriptions ALE ont devenir les descriptions Eulériennes.



La formulation ALE consiste à exprimer le problème à résoudre dans le domaine de référence. Si nous avons une fonction G , nous savons que :

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &= f(x, t) \\ &= f(\psi(\chi, t), t) \equiv f^*(\chi, t) \\ &= f(\varphi(X_o, t), t) \equiv f^{**}(X_o, t) \end{aligned}$$

La dérivée matérielle G dans le repère spatial s'écrit :

$$\dot{G} = \frac{\partial f^{**}}{\partial t} \Big|_{X_o} = \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{X_o} = \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_x + \mathbf{u} \cdot \nabla_x f \quad \text{A2-1}$$

Avec $\mathbf{u} = \frac{\partial x}{\partial t} \Big|_{X_o}$ vitesse des particules matérielles dans le domaine de spatial.

La dérivée matérielle G dans le repère référence s'écrit:

$$\dot{G} = \frac{\partial f^{**}}{\partial t} \Big|_{X_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{X_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{\chi} + \mathbf{w} \cdot \nabla_{\chi} f^* \quad \text{A2-2}$$

Avec $\mathbf{w} = \frac{\partial \chi}{\partial t} \Big|_{X_o}$ vitesse des particules matérielles dans le domaine de référence.

Pour avoir une expression d'ALE, la vitesse convective des particules $\mathbf{C}(X_o, t)$, égale à la différence entre la vitesse des particules $\mathbf{u}(X_o, t)$ et la vitesse du domaine de référence $\hat{\mathbf{u}}(\chi, t)$, est introduite :

$$\mathbf{C}(X_o, t) = \mathbf{u}(X_o, t) - \hat{\mathbf{u}}(\chi, t)$$

Avec: $\hat{\mathbf{u}}(\chi, t) = \frac{\partial \psi(\chi, t)}{\partial t} \Big|_x$

Nous avons :

$$\begin{aligned}\mathbf{u} &= \frac{\partial x}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial \psi(\chi, t)}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial \psi(\chi, t)}{\partial t} \Big|_{\chi} + \frac{\partial \chi}{\partial t} \Big|_{x_o} \cdot \nabla_{\chi} \psi(\chi, t) \\ &= \hat{\mathbf{u}} + \mathbf{w} \cdot \nabla_{\chi} \psi(\chi, t) = \hat{\mathbf{u}} + \mathbf{w} \cdot \frac{\partial x}{\partial \chi}\end{aligned}$$

donc : $\mathbf{C} = \mathbf{w} \cdot \frac{\partial x}{\partial \chi}$ A2-3

A partir les équations A2-2 et A2-3, nous pouvons obtenir :

$$\begin{aligned}\dot{G} &= \frac{\partial f^{**}}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{\chi} + \mathbf{w} \cdot \nabla_{\chi} f^* \\ &= \frac{\partial f^{**}}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{\chi} + \mathbf{w} \cdot \nabla_{\chi} f^* \cdot \frac{\partial x}{\partial \chi} \\ &= \frac{\partial f^{**}}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{\chi} + \mathbf{w} \cdot \nabla_{\chi} f \cdot \frac{\partial x}{\partial \chi} \\ &= \frac{\partial f^{**}}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{\chi} + \mathbf{w} \cdot \frac{\partial x}{\partial \chi} \cdot \nabla_{\chi} f\end{aligned}$$

Finalement :

$$\dot{G} = \frac{\partial f^{**}}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{\chi} + \mathbf{C} \cdot \nabla_{\chi} f$$
 A2-4

Si on voit les équations A2-1 et A2-4, on peut avoir rapidement l'équation suivant :

$$\frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{x_o} = \frac{\partial f^*}{\partial t} \Big|_{\chi} - \hat{\mathbf{u}} \cdot \nabla_{\chi} f$$
 A2-5

3 Equation de conservation de la masse

Nous savons l'expression d'Eulerienne d'équation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} \Big|_x + \text{div}_x(\rho \mathbf{u}) = 0$$
 A2-6

avec ρ la densité de la fluide.

Combinaison les équations A2-5 et A2-6 :

$$\frac{\partial \rho(\chi, t)}{\partial t} \Big|_{\chi} - \hat{\mathbf{u}} \cdot \nabla_{\chi} \rho(x, t) + \text{div}_x(\rho \mathbf{u}) = 0$$
 A2-7

Nous pouvons donc avoir l'équation de conservation de la masse en expression d'ALE.

$$\frac{\partial \rho(\chi, t)}{\partial t} \Big|_{\chi} + \mathbf{C} \cdot \nabla_{\chi} \rho(x, t) + \rho \cdot \text{div}_x(\mathbf{u}) = 0$$
 A2-8

4 Equation de la quantité de mouvement

Nous savons l'expression d'Eulérienne d'équation de la quantité de mouvement :

$$\text{div}_x(\sigma) + f^v = \rho(x, t) \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \Big|_x + \rho(x, t) \mathbf{u} \cdot \nabla_x \mathbf{u}$$
 A2-9

Combinaison les équations A2-5 et A2-9 :

$$div_x(\sigma) + f^v = \rho(x,t) \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \Big|_x - \rho(x,t) \hat{\mathbf{u}} \cdot \nabla_x \mathbf{u} + \rho(x,t) \mathbf{u} \cdot \nabla_x \mathbf{u}$$

Nous pouvons donc avoir équation de la quantité de mouvement en expression d'ALE.

$$div_x(\sigma) + f^v = \rho(x,t) \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \Big|_x + \rho(x,t) \mathbf{C} \cdot \nabla_x \mathbf{u} \quad \text{A2-10}$$

D'un point de vue numérique, la dérivée temporelle est calculée en un même point du maillage [1]. Pour cette raison les indices sont omis des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement A2-8 et A2-10. Le lecteur doit néanmoins garder en mémoire que ces dérivées sont conceptuellement différentes.

$$div(\sigma) + f^v = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \mathbf{C} \cdot \nabla \mathbf{u} \quad \text{A2-11}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{C} \cdot \nabla \rho + \rho div(\mathbf{u}) = 0 \quad \text{A2-12}$$

Annexe 3 : Combinaison loi de Hagen-Poiseuille et loi de Darcy

Effectivement, nous avons 2 approches pour modéliser l'écoulement d'un fluide visqueux dans un milieu poreux compressible, qui sont :

- une approche microscopique : loi de Kozeny et loi de Hagen Poiseuille.
- une approche macroscopique : loi de Darcy et l'équation de Brinkman.

Dans la cadre du procédé d'infusion de résine, pour l'approche microscopique, on considère que l'écoulement de résine dans la préforme comme un écoulement de dans un canal. Pour la loi de Hagen-Poiseuille, il adapte à l'écoulement stationnaire d'un fluide dans un pore cylindrique. En négligeant les effets d'inertie, l'écoulement dans un pore cylindrique peut être décrit par l'équation de Navier et Stokes (l'équation A3-1) en coordonnées cylindriques suivant l'axe z [1] (voir la figure A3-1). Si on définit une vitesse superficielle, la loi de Hagen-Poiseuille peut être décrite sous la forme comme l'équation A3-2.

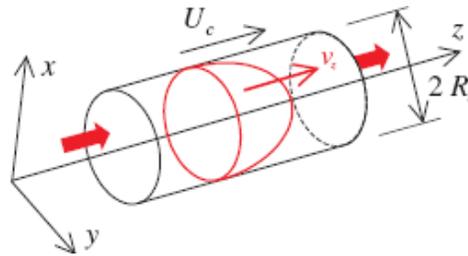


Figure A3-1 Ecoulement d'un fluide dans un pore cylindrique.

$$\rho g_z - \frac{\partial p(z)}{\partial z} + \eta \Delta v_z(r) = 0 \quad \text{A3-1}$$

$$U_c = -\frac{R_c^2}{8\eta} \left[\frac{\partial p(z)}{\partial z} - \rho g_z \right] \quad \text{A3-2}$$

avec ρ la densité de la résine, η la viscosité dynamique de la résine, v_z la vitesse suivant z , U_c la vitesse superficielle dans le canal et R_c la rayon du canal.

Après ajouter un facteur de circularité γ (généralement entre 0,85 et 1,15) dans l'équation A3-2, on peut obtenir la loi de Kozeny, qui est exprimé dans l'équation A3-3. En intégrant de cette équation sur la section du cercle, une expression pour le débit volumique Q est donnée dans l'équation A3-4 [1].

$$U_c = -\frac{1}{\gamma} \frac{R_c^2}{8\eta} \left[\frac{\Delta p}{L} - \rho g_z \right] \quad \text{A3-3}$$

avec L la longueur du canal (voir la figure A3-2)

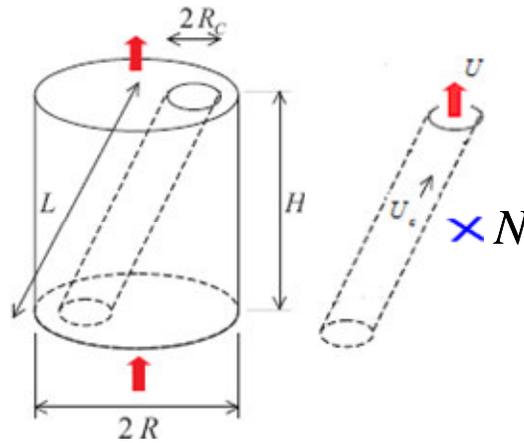


Figure A3-2 Modèle de Kozeny.

Si on ajoute un débit total Q dans les pores, car:

$Q = SU = NS_c U = (S\phi \frac{H}{L}) \cdot (\frac{H}{L} U_c)$, finalement il peut exprimer comme la forme A3-4.

$$Q = S \cdot \phi \cdot \left(\frac{H}{L}\right)^2 \cdot U_c \quad \text{A3-4}$$

avec H la hauteur du canal, S la surface totale des pores, U la vitesse moyenne dans le milieu pore, S_c la surface du canal et ϕ la porosité du milieu.

$$Q = -\frac{1}{\eta} \left[\frac{1}{\gamma} \frac{R_c^2}{8} \phi \left(\frac{H}{L}\right)^2 \right] \cdot S \cdot \left[\frac{\Delta p}{L} - \rho g_z \right] \quad \text{A3-5}$$

On sait que la loi de Darcy peut être introduite comme l'équation A3-6. Donc, en combinaison la loi de Hagen-Poiseuille et la loi de Darcy (combinaison les équations A3-5 et A3-6), on peut obtenir la relation de Carman-Kozeny sous la forme A3-7. En exprimant la surface spécifique pour un milieu constitué de fibres de diamètre moyen d_f , l'équation A3-7 est évolué à l'équation A3-8 (ou 3-10) [1].

$$Q = -\frac{KS}{\eta} \left[\frac{\Delta p}{L} - \rho g_z \right] \quad \text{A3-6}$$

$$K = \frac{1}{\gamma} \frac{R_c^2}{8} \phi \left(\frac{H}{L}\right)^2 \quad \text{A3-7}$$

$$\bar{K} = \frac{d_f^2}{16h_k} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad \text{A3-8}$$

Annexe 4: Calculer le taux du vide dans la pièce finale

Nous considérons que le taux volumique du vide (TVV) est le rapport entre le volume du vide V_a dans la plaque et le volume total V_t de la plaque, qui s'exprime sous la forme ci-dessous.

$$TVV = \frac{V_a}{V_t} \quad A4-1$$

Le volume de la pièce finale se compose en trois composantes, qui sont le volume des fibres V_f , le volume de la résine à l'état solide V_{rs} et le volume du vide. Donc le taux volumique du vide peut être calculé par l'équation A4-2.

$$TVV = \frac{V_t - V_f - V_{rs}}{V_t} \quad A4-2$$

Nous pouvons trouver le volume total de la plaque lorsque les paramètres géométriques sont connus, surtout l'épaisseur de la plaque car les déformations dans le plan du pli sont négligés. Pour le volume des fibres, il est constant pendant le procédé d'infusion. Le volume de la résine peut être obtenu à partir la masse de la résine absorbée par la préforme. Les détails du calcul sont montrés à partir des équations suivantes.

$$V_t = L \cdot W \cdot H = 33,5 \text{ cm} \times 33,5 \text{ cm} \times 1,211 \text{ cm} = 1359,04 \text{ cm}^3$$

L est la longueur de la plaque, W est la largeur de la plaque et H est l'épaisseur de la plaque.

$$V_f = \frac{M_f}{\rho_f} = \frac{1560 \text{ g}}{1,78 \text{ g/cm}^3} = 876,4 \text{ cm}^3$$

M_f est la masse des fibres ou de la préforme initiale et ρ_f est la densité de la fibre carbone.

$$V_{rs} = \frac{M_r}{\rho_{rs}} = \frac{540 \text{ g}}{1,14 \text{ g/cm}^3} = 473,68 \text{ cm}^3$$

M_r est la masse de la résine entrée dans la préforme et ρ_{rs} est la densité de la résine RTM6 après la polymérisation.

Donc, nous avons trouvé le TVV de notre plaque finale égal à **0,66%**.

Annexe 5: Une comparaison de la détermination de perméabilité

Dans l'annexe 1, nous avons présenté la détermination de temps de remplissage utilisant une vitesse réelle (voir équation A5-1). Si nous utilisons une vitesse fût vide, le temps de remplissage peut être calculé et présenté dans l'équation A5-2. Nous devons considérer que le temps de remplissage dans ces deux cas est identique, donc nous obtenons une relation de la perméabilité entre ces deux cas différents, exprimée dans l'équation A5-3.

$$\begin{aligned}V_r(t) &= \sqrt{\frac{A_1}{2t}} \\A_1 &= \frac{KP}{\eta\phi} \\H &= \int_0^T V_r(t) dt = \sqrt{2A_1} [\sqrt{t}]_0^T = \sqrt{2A_1} T \\T &= \frac{H^2}{2A_1}\end{aligned} \tag{A5-1}$$

où : T est le temps de remplissage, H est la hauteur de la préforme, P est la pression d'injection, K est la perméabilité transversale.

$$\begin{aligned}V(t) &= \phi \sqrt{\frac{A_2}{2t}} \\A_2 &= \frac{K_s P}{\eta\phi} \\H &= \int_0^T V(t) dt = \phi \sqrt{2A_2} [\sqrt{t}]_0^T = \phi \sqrt{2A_2} T \\T &= \frac{H^2}{\phi^2 \cdot 2A_2}\end{aligned} \tag{A5-2}$$

où : K_s est la perméabilité stationnaire transversale mesurée par R.Nunez [57].

$$K = \phi^2 \cdot K_s \tag{A5-3}$$

