

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

PAR
Bruno PAYETTE

ÉTUDE ET AMÉLIORATION DU PROCÉDÉ D'INFUSION POUR LA FABRICATION
DE PIÈCES AÉRONAUTIQUES EN MATÉRIAUX COMPOSITES

MONTRÉAL, LE 22 JUILLET 2015
©Tous droits réservés, Bruno Payette, 2015

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE

M. Simon Joncas, directeur du mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Christian Belleau, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Michel Rioux, membre du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Martin Levesque, examinateur externe
Hutchinson Aéronautique et Industrie Limitée – Directeur recherche et développement

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY

LE 26 JUIN 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉREURE

REMERCIEMENTS

Je tiens sincèrement à remercier la compagnie Hutchinson Aéronautique et Industrie Limitée, initialement Marquez Transtech, pour son soutien tout au long de mon projet, non seulement financièrement, mais également par la confiance qu'elle m'a accordée. Je tiens particulièrement à remercier Martin Levesque, directeur de la recherche et du développement chez Hutchinson, qui m'a soutenu et conseillé tout au long de mon projet. Je tiens également à remercier tous mes collègues qui ont participé de proche ou de loin au projet, particulièrement Antonin Leclair-Maréchal, Christian Dufour, Franck Guillemand, Jean-Yves Drapier, Youcef Terbouche, Maxime Joanis, Alex Bertrand et Jean-Philippe Larose. Je tiens finalement à remercier les organismes qui ont contribué financièrement au projet, le conseil national de recherche du Canada (CNRC), plus précisément le programme d'aide à la recherche industrielle (PARI) et particulièrement notre conseiller, René Crescent, qui a cru en notre projet depuis le début, ainsi que le programme national canadien accélération Mitacs, qui m'a soutenu financièrement pour la réalisation de deux stages en entreprise.

ÉTUDE ET AMÉLIORATION DU PROCÉDÉ D'INFUSION POUR LA FABRICATION DE PIÈCES AÉRONAUTIQUES EN MATÉRIAUX COMPOSITES

Bruno PAYETTE

RÉSUMÉ

Ce mémoire caractérise un procédé d'infusion de résine thermodurcissable qui causait de nombreux problèmes lors de la fabrication de pièces d'intérieur d'avions en matériaux composites et en présente l'amélioration. L'objectif était d'améliorer le procédé d'infusion en diminuant de 50% les temps de fabrication et de 25% les coûts de fabrication tout en augmentant la robustesse.

Plusieurs étapes du procédé d'infusion étaient particulièrement critiques, telles que l'opération de mise sous vide avec l'utilisation de films consommables, la fabrication de constructions sandwichs nécessitant une étape additionnelle de laminage contact ainsi que plusieurs manœuvres artisanales amenant des défauts récurrents sur les pièces produites.

Plusieurs améliorations ont été apportées au procédé afin d'atteindre les objectifs ciblés. Tout d'abord, le développement d'un contre-moule flexible réutilisable a permis d'éliminer les films consommables et par conséquent de simplifier l'étape de mise sous vide. Ensuite, l'intégration d'un noyau en mousse directement à l'étape d'infusion a permis d'éliminer l'étape de moulage contact réduisant ainsi les temps de fabrication. Puis, la mécanisation des étapes d'infusion de la résine via l'intégration d'une machine automatisée, combinée à l'ajout d'une post-cuisson, a également permis de réduire les temps de fabrication, mais surtout d'augmenter la robustesse du procédé.

Grâce aux améliorations apportées au procédé, les objectifs de ce projet ont été atteints. Basés sur des pièces typiques d'intérieur d'avions composites, les temps de fabrication ont été réduits de 53 % et les coûts de fabrication de 42 % par rapport au procédé initial, tout en diminuant la quantité de défauts sur les pièces produites.

Mots clés: Matériaux composites, procédé d'infusion, résine thermodurcissable, aéronautique, amélioration de procédé.

STUDY AND IMPROVEMENT OF INFUSION PROCESS FOR MANUFACTURING OF AIRCRAFT PARTS IN COMPOSITE MATERIALS

Bruno PAYETTE

ABSTRACT

This master's thesis characterizes a resin infusion process for composite materials generating several problems in the manufacture of aircraft parts, and presents its improvement. The objective was to improve the performance of the initial infusion process in reducing the production time of 50% and the production cost of 25%, while increasing the process robustness.

The process included critical steps, such as the use of vacuum bags, the production of sandwich constructions requiring wet layup to introduce a honeycomb core and several handmade tasks generating recurring defects on parts produced.

One key improvement to the process was to introduce the use of reusable vacuum bags to eliminate standard vacuum bags simplifying this stage. Also, the integration of a foam core directly at the infusion step allowed eliminating the wet layup and reducing the production time. In addition, the automated blending, degassing and infusing of resin through the introduction of an automated blending and infusing machine, plus the addition of a post-cure also have reduced production time and increased the process robustness.

Due to the improvement of the infusion process, the objectives of this research project were reached. Indeed, based on typical aircraft parts made of composite materials, production time was reduced by 53% and production cost was reduced by 42%, while the process robustness was increased.

Key words: Composites materials, resin infusion process, process improvement, aircrafts parts

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Revue des procédés de fabrication de matériaux composites	3
1.1.1 Moulage sous vide	4
1.1.2 Moulage par infusion	5
1.2 Phénomène d'imprégnation dans le procédé d'infusion	8
1.2.1 Milieu poreux et mécanisme d'imprégnation	8
1.2.2 Prévention de la formation de vides dans le procédé d'infusion	12
1.3 Étude des élastomères pour la fabrication de membranes flexibles	14
1.4 Revue de noyaux en mousse pour la fabrication de constructions sandwiche	27
1.5 Modélisation des coûts de fabrication des matériaux composites	29
1.5.1 Définition des coûts	30
1.5.2 Variables de modélisation des coûts	35
1.5.3 Techniques de modélisation des coûts	37
1.5.4 Effet du volume de production	38
CHAPITRE 2 REVUE DU PROCÉDÉ À L'ÉTUDE	41
2.1 Revue globale.....	42
2.2 Description des matières premières	47
2.2.1 Tissus	47
2.2.2 Résine.....	48
2.2.3 Noyau	49
2.3 Étude de cas	50
2.3.1 Description de la pièce.....	51
2.3.2 Étapes de fabrication	52
2.3.3 Coût de fabrication.....	56
2.3.4 Résumé des coûts de fabrication.....	60
2.4 Analyse de la robustesse du procédé	62
2.5 Requis techniques imposés aux panneaux du cockpit	65
2.6 Synthèse	67
CHAPITRE 3 AMÉLIORATION DU PROCÉDÉ D'INFUSION	71
3.1 Étape de mise sous vide	71
3.1.1 Revue de la méthode initiale de mise sous vide	72
3.1.2 Nouvelle technologie de mise sous vide	75
3.1.3 Développement des contres-moules flexibles.....	78
3.1.4 Étude de contamination.....	95
3.1.5 Coût et retour sur l'investissement des membranes réutilisables	104
3.2 Construction sandwiche	108

3.2.1	Type de noyaux à l'étude	109
3.2.2	Évaluation des noyaux	110
3.2.3	Moulage des noyaux en mousse	123
3.3	Mécanisation du procédé	128
3.4	Effet de la post-cuisson sur les performances thermomécaniques.....	137
3.5	Synthèse	139
CHAPITRE 4 GAIN DU PROCÉDÉ D'INFUSION AMÉLIORÉ		141
CONCLUSION		155
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		157

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Type de réticulation pour les silicones17
Tableau 1.2	Familles de silicones communément utilisés en industrie19
Tableau 1.3	Revue des silicones disponibles pour la fabrication de membranes flexibles21
Tableau 1.4	Variété de polyuréthanes disponibles sur le marché pour la fabrication de membranes flexibles25
Tableau 1.5	Noyaux en mousse pour la fabrication des constructions sandwichs28
Tableau 1.6	Équipements typique pour la fabrication d'une pièce composite33
Tableau 1.7	Variables à considérer dans les coûts en capital (équipements)34
Tableau 2.1	Pièces typiques du cockpit44
Tableau 2.2	Type de tissus47
Tableau 2.3	Caractéristiques de la résine48
Tableau 2.4	Propriétés physiques49
Tableau 2.5	Caractéristiques du noyau de type nid d'abeille PN250
Tableau 2.6	Étude de cas, description de la pièce52
Tableau 2.7	Étapes de fabrication du procédé d'infusion initial53
Tableau 2.8	Coûts des consommables du procédé d'infusion initial56
Tableau 2.9	Coût des matières premières du procédé d'infusion initial57
Tableau 2.10	Coût de la main d'œuvre du procédé d'infusion initial59
Tableau 2.11	Résumé des coûts de fabrication du procédé d'infusion initial61
Tableau 2.12	Analyse des non-conformités liées au procédé d'infusion initial63
Tableau 2.13	Requis techniques des panneaux - Cockpit Global XRS66

Tableau 3.1	Fonctions des composants de mise sous vide	73
Tableau 3.2	Description contre-moule flexible.....	76
Tableau 3.3	Évaluation et développement des contres-moules réutilisables	79
Tableau 3.4	Types d'élastomères évalués.....	80
Tableau 3.5	Types d'agents protecteurs pour les membranes flexibles.....	81
Tableau 3.6	Résultats du test de torture	85
Tableau 3.7	Connecteurs pour la fabrication des contres-moules réutilisables	89
Tableau 3.8	Évaluation des membranes 2D.....	92
Tableau 3.9	Contre-moules flexibles - évaluation 3D	93
Tableau 3.10	Étapes d'infusion avec un contre-moule réutilisable	94
Tableau 3.11	Essais de cisaillement adhésif en tension.....	97
Tableau 3.12	Description des laminés, analyse chimique.....	100
Tableau 3.13	Teneur en extractibles	101
Tableau 3.14	Coût de la membrane.....	105
Tableau 3.15	Coûts de fabrication de l'étape de mise sous vide	106
Tableau 3.16	Retour sur l'investissement avec l'utilisation d'un contre-moule réutilisable	107
Tableau 3.17	Type de noyaux à l'étude	109
Tableau 3.18	Plan d'expérience d'évaluation des noyaux.....	110
Tableau 3.20	Mesure de la densité des noyaux.....	111
Tableau 3.19	Résultat des tests de feu (FAR 25.853).....	113
Tableau 3.21	Essai de flexion trois points selon la norme ASTM C393	117
Tableau 3.22	Essai d'arrachement des inserts sur constructions sandwiches.....	118

Tableau 3.23	Résultats des essais d'arrachement sur constructions sandwiches.....	120
Tableau 3.24	Méthode standard de caractérisation des constructions sandwiches.....	122
Tableau 3.25	Patrons standards de perçage	125
Tableau 3.26	Description du système automatique de mélange et d'infusion.....	131
Tableau 3.27	Test de feu avec infusion automatisée	134
Tableau 3.28	Test de temps gel, mélange manuel versus automatique	135
Tableau 3.29	Comparaison de la technique manuelle versus automatisée	136
Tableau 3.30	Identification des configurations, propriétés thermomécaniques.....	137
Tableau 3.31	Comparaison des propriétés thermomécaniques	138
Tableau 4.1	Étapes de fabrication du procédé d'infusion amélioré	142
Tableau 4.2	Coût de la main d'œuvre, procédé d'infusion amélioré	145
Tableau 4.3	Coût des consommables , procédé d'infusion amélioré	146
Tableau 4.4	Coût des matières premières, procédé d'infusion amélioré	147
Tableau 4.5	Résumé des coûts de fabrication, procédé d'infusion amélioré	148
Tableau 4.6	Pièces typiques du cockpit, procédé d'infusion amélioré	149
Tableau 4.7	Analyse des non-conformités du procédé d'infusion amélioré	151

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Fabrication de matériaux composites par moulage sous vide 4
Figure 1.2	Fabrication de matériaux composites par moulage par infusion 6
Figure 1.3	Schéma du procédé CAPRI 6
Figure 1.4	Schéma du procédé VAP 7
Figure 1.5	Échelles de porosités dans un tissu 9
Figure 1.6	Milieu poreux, résine et fibre 9
Figure 1.7	Écoulement à travers un milieu poreux 10
Figure 1.8	Emprisonnement mécanique de vide 11
Figure 1.9	Modèle de Patel, nombre capillaire modifié Ca^* 12
Figure 1.10	Effet du taux volumique de vide sur les contraintes de cisaillement interlaminaires 13
Figure 1.11	Structure et application des composés de silicium 15
Figure 1.12	Procédé LSR 20
Figure 1.13	Résistance en cisaillement des noyaux en mousse 29
Figure 1.14	Structure des coûts de production 36
Figure 1.15	Procédé de fabrication en fonction des volumes annuels de production 38
Figure 2.1	Panneaux d'habillage du cockpit du Global Express 43
Figure 2.2	Distribution des coûts de fabrication moyens 46
Figure 2.3	Étude de cas, panneau du côté «Side Wall Lower Panel» 51
Figure 2.4	Proportion des coûts des matériaux 58
Figure 2.5	Proportion des coûts de la main d'œuvre 60

Figure 2.6	Proportion des coûts de fabrication du procédé initial, étude de cas	61
Figure 2.7	Dispersion des non-conformités liées au procédé d'infusion initial	63
Figure 2.8	Exemple de porosités et de vides	64
Figure 2.9	Requis d'enlignement des fibres des pièces avec un fini carbone	67
Figure 3.1	Schéma de mise sous vide avec un sac consommable	72
Figure 3.2	Contre-moule flexible réutilisable.....	75
Figure 3.3	Schéma du moule de torture.....	82
Figure 3.4	Moule de torture, application de la cire calibrée.....	83
Figure 3.5	Moule de torture, fabrication des membranes.....	83
Figure 3.6	Membranes pour les essais de torture	84
Figure 3.7	Exemple de membrane torturée	84
Figure 3.8	Nomenclature des membranes	85
Figure 3.9	Résultats du test de torture	86
Figure 3.10	Moule de torture ME-08 montrant les problèmes de fabrication	86
Figure 3.11	Dégénération du revêtement après 23 cycles, moule de torture	88
Figure 3.12	Exemple de membranes 2D	91
Figure 3.13	Montage d'essais de cisaillement adhésif en tension.....	96
Figure 3.14	Schéma d'échantillon de cisaillement adhésif selon l'ASTM D5868	97
Figure 3.15	Exemple d'œil de poisson sur un composite contaminé	98
Figure 3.16	Essais d'œil de poisson	99
Figure 3.17	Extraction type Soxhlet teneur en extractibles.....	100
Figure 3.18	Courbe de spectrométrie à transformée de Fourier (IRFT).....	101

Figure 3.19	Courbe de spectrométrie à transformée de Fourier (IRFT) de la membrane	102
Figure 3.20	Courbe d'injection chromatographie gazeuse (Inj/Gc/Ms).....	103
Figure 3.22	Mesure de la densité des noyaux.....	111
Figure 3.21	Exemple des échantillons #5 (HT101) brûlés selon la norme FAR 25.853	115
Figure 3.24	Essai de flexion, contrainte ultime en cisaillement des noyaux.....	117
Figure 3.25	Essais d'arrachement des inserts sur les noyaux en nid d'abeille (PN2).....	121
Figure 3.26	Essais d'arrachement des inserts sur noyaux en mousse (C70.90)	121
Figure 3.27	Moulage de constructions sandwiches avec un noyau de type nid d'abeille.....	123
Figure 3.28	Moulage de constructions sandwiches avec un noyau en mousse	123
Figure 3.29	Pièce typique avec un noyau en mousse	124
Figure 3.30	Comportement du front de résine, vue du dessous	126
Figure 3.31	Zones sèches en résine sous le noyau en mousse, patron #2	127
Figure 3.32	Système automatique de mélange et d'infusion.....	130
Figure 3.33	Programme d'infusion automatisée.....	133
Figure 3.34	Courbe de temps gel -Mélange manuel versus automatique.....	134
Figure 4.1	Pièce prête pour infusion procédé amélioré	141
Figure 4.2	Proportion des coûts de fabrication, procédé d'infusion amélioré.....	148
Figure 4.3	Distribution des coûts de fabrication moyens, procédé d'infusion amélioré.....	150
Figure 4.4	Dispersion des non-conformités du procédé d'infusion amélioré.....	152

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASTM	American society for testing and materials
BAMS	Bombardier aerospace material specification
BOM	Bill of material
CAPRI	Controlled atmospheric pressure resin infusion
DAD	Design approval design
DSC	Differential scanning calorimetry
FST	Fire, smoke, toxicity
FAR	Federal aviation regulations
HR	Humidité relative
HTV	High temperature vulcanization
IUPAC	International union of pure and applied chemist
LRI	Liquid resin infusion
LSR	Liquid silicone rubber
M&P	Material and process
MRP	Materials resources planning
NA	Non applicable
ND	Non disponible
PET	Polyethylene terephthalate
PES	Polyethersulfone
PMI	Polymethacrylimine
PVC	Polyvinyl chlorure
RIFT	Resin infusion under flexible tooling

ROI	Return on investment
RTM	Resin transfer molding
RTV	Room temperature vulcanization
SCRIMP	Seeman composites resin infusion molding process
TCM	Technical cost modelling
VAP	Vacuum assisted process
VARI	Vacuum assisted resin infusion
VARTM	Vacuum assisted resin transfer molding

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

cP centipoise ($= 10^{-3}$ Pa·s)

σ écart type

°C degré Celsius

°F degré Fahrenheit

g gramme

g/m² gramme par mètre carré

kg kilogramme

KPa kilopascal

Psi livre par pouce carré

lb livre

MPa mégapascal ($= 1$ N/m²)

m mètre

m² mètre carré

mm millimètre

min minute

μ moyenne

N newton

oz/vg² onze par verge carré

Pa pascal

po Hg pouce de mercure

rl rouleau

s seconde

INTRODUCTION

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans l'industrie aéronautique pour les nombreux avantages qu'ils amènent. Ils procurent notamment un avantage au niveau du poids, amenant des économies de carburant, mais également au niveau des propriétés et des performances pouvant être adaptées pour une fonction précise, en plus de la possibilité de mouler des pièces très complexes. Toutefois, certains procédés utilisés dans l'industrie sont souvent très coûteux, tels que les pré-imprégnés qui requièrent l'utilisation d'équipements spécialisés, incitant plusieurs compagnies à s'installer dans des pays où le coût de la main d'œuvre est moins dispendieux. Développer des techniques de fabrication moins coûteuses telles que le procédé d'infusion ciblé par ce projet devient donc primordial afin de rester concurrentiel et de conserver les emplois localement.

La compagnie Hutchinson Aéronautique et Industrie Limitée basée à Montréal est un chef de file en fabrication et en intégration de pièces en composites et thermoplastiques utilisées dans un éventail d'applications pour les secteurs de l'aérospatial et du transport terrestre. Depuis déjà quelques années, un procédé d'infusion de résine thermodurcissable est en production dans la compagnie Hutchinson pour la fabrication de pièces d'intérieur d'avions en matériaux composites. Ce procédé est assez artisanal, donc la compagnie est confrontée à plusieurs problèmes, tels que des difficultés à atteindre la cadence demandée due au temps de fabrication trop élevé et au manque de robustesse qui engendre plusieurs défauts sur les pièces produites.

Hutchinson souhaitait ainsi améliorer le procédé d'infusion initialement utilisé par l'entreprise en diminuant les coûts et les temps de fabrication et en augmentant la robustesse du procédé afin de diminuer les défauts de fabrication. Plus précisément, les objectifs étaient de diminuer les temps de fabrication de 50 % et les coûts de fabrication de 25 % en comparaison au procédé initial. La robustesse du procédé se devait également d'être améliorée par une diminution des défauts générant des non-conformités. La compagnie a

ainsi investi dans le développement d'un procédé d'infusion amélioré afin d'atteindre ces objectifs.

Cette étude vise tout d'abord à évaluer le procédé initial d'infusion en production dans la compagnie, qui sera présenté dans le chapitre 2. Cette évaluation permettra d'obtenir un portrait du procédé initial qui servira de référence afin de mesurer les gains amenés par le procédé d'infusion amélioré et de valider les pistes d'améliorations. Le développement et les améliorations du procédé seront ensuite présentés au chapitre 3. Afin de pallier aux différentes faiblesses ciblées, les pistes d'amélioration ciblées sont le développement d'un contre-moule flexible et réutilisable, l'intégration d'un noyau en mousse à l'étape d'infusion et la mécanisation des étapes reliées à la manipulation de la résine. Finalement, la performance du procédé d'infusion amélioré sera également mesurée afin d'être comparée à celle du procédé initial, présentée au chapitre 4. Les gains amenés par l'amélioration du procédé devront réduire les temps de fabrication de 50 % et les coûts de production de 25 %, tout en augmentant la robustesse du procédé, afin de rencontrer les objectifs de ce projet de recherche.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'objectif du projet de recherche consiste à améliorer le procédé d'infusion, comme expliqué dans l'introduction. Afin d'atteindre cet objectif, une revue du procédé initial est effectuée ainsi que le développement de nouvelles techniques de fabrication. Les améliorations ciblent les étapes problématiques du procédé, soit l'étape de mise sous vide, l'ajout d'un noyau dans la construction ainsi que le manque de robustesse dans le procédé qui amène plusieurs problèmes de qualité. Cette revue de la littérature présente les éléments couvrant la problématique, soit une revue des procédés de fabrication des matériaux composites, plus précisément du procédé d'infusion et du moulage sous vide. Une section est également consacrée aux phénomènes d'imprégnation dans le procédé d'infusion, étant un aspect critique dans la compréhension du procédé et représentant un élément important afin d'augmenter la robustesse du procédé. Une étude des élastomères pour la fabrication de membranes flexibles est également présentée, considérant que le développement d'une telle technologie est visé par l'amélioration pour contrer les problèmes amenés par les films jetables. Cette section sera suivie d'une revue des noyaux en mousse disponibles sur le marché pour la fabrication de construction sandwiches en matériaux composites. Finalement, considérant que l'un des objectifs est de diminuer les coûts de fabrication, une revue de la terminologie et des techniques de modélisation de coûts de procédés de fabrication de matériaux composites est présentée. Certains éléments seront repris lors de l'évaluation des coûts de fabrication du procédé initial et du procédé amélioré.

1.1 Revue des procédés de fabrication de matériaux composites

Une multitude de techniques et de procédés de fabrication sont utilisés en industrie pour la fabrication de matériaux composites tels que le moulage contact, sous vide, par compression, par injection, par pré-imprégné, etc. Les principales applications sont l'aéronautique, l'automobile, la construction et les équipements sportifs (Ngô, 2013, p. 10) ainsi que le biomédical et l'énergie éolienne (Ruiz, 2012, p. 23). Les matériaux couramment utilisés sont

les résines de type thermodurcissable ou thermoplastique, avec des renforts de fibres de verre, fibres de carbone ou fibres d'aramide. Deux méthodes de fabrication seront détaillées dans cette section, étant les deux procédés étudiés dans le cadre de ce projet de recherche, soit le moulage sous vide et le moulage par infusion.

1.1.1 Moulage sous vide

Le moulage sous vide consiste à étendre les plis de fibres dans le moule, appelé drapage des tissus, en ajoutant la résine à l'aide d'un pinceau et d'un rouleau. Le procédé est similaire au moulage contact, mais une fois le laminage des tissus et de la résine complété, une pellicule de mise sous vide est ajoutée par-dessus le montage afin d'appliquer une pression de consolidation pendant la polymérisation de la résine. La Figure 1.1 présente un schéma de fabrication du moulage sous vide. Des deux techniques de fabrication utilisées dans ce projet, celle-ci produit des laminés de moins bonne qualité que le moulage par infusion, entre autres à cause du volume de résine qui n'est pas contrôlé et qui est appliqué manuellement.

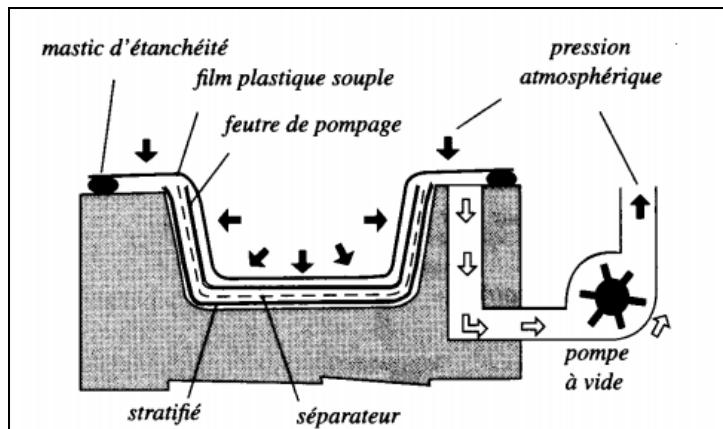


Figure 1.1 Fabrication de matériaux composites par moulage sous vide
Tirée de Ngô (2013, p. 10)

Pour l'ajout du noyau de type nid d'abeille et de la peau supérieure de la construction, la méthode de moulage sous vide est utilisée dans le procédé initial de l'entreprise Hutchinson visé par le projet de recherche. Cette étape est visée par l'amélioration du procédé due à la mauvaise qualité du laminage et aux temps de fabrication élevés.

1.1.2 Moulage par infusion

Le procédé par infusion de résine représente un procédé relativement économique, tout en permettant d'obtenir des taux volumiques de fibres supérieurs par rapport au moulage contact et moulage sous vide. Les techniques traditionnelles d'infusion ne permettent cependant pas une bonne répétabilité avec un manque de contrôle du procédé (Heider, 2012, p. 1). Ce procédé à moule fermé utilise une pompe à vide pour tirer la résine à travers les renforts fibreux. La différence de pression entre la pression atmosphérique dans le pot de résine et la pression de vide à la pompe génère la force requise afin que la résine s'infiltre dans les renforts (Milgram, 2005, p. 1). Une limite du procédé est reliée à la flexibilité des contremoules qui ne permet pas de contrôler l'épaisseur des laminés. Le procédé est cependant moins coûteux que les procédés RTM («resin transfer molding») qui permettent un contrôle d'épaisseur, avec deux outillages rigides. Toutefois, des coûts supplémentaires reliés aux outillages sont à considérer avec le RTM, nécessitant des volumes de fabrication plus élevés pour amortir les coûts d'outillages. De plus, le procédé d'infusion est généralement moins coûteux que les pré-imprégnés, principalement dû aux outillages et aux équipements générant des coûts supplémentaires requis avec ces technologies, tels que l'utilisation de four ou d'autoclave. La manipulation de tissus secs dans le procédé d'infusion par rapport à l'utilisation de tissus pré-imprégnés rend également le procédé plus simple avec plusieurs options d'optimisation.

Plusieurs variantes du procédé d'infusion sont présentées dans la littérature. Le procédé d'infusion traditionnel a été inventé par Bill Seemann, sous le terme de SCRIMP («Seeman composites resin infusion molding process»), à la demande de l'armée américaine. Il a été breveté par la compagnie TPI technology et délivré le 20 février 1990 (Milgram, 2005, p. 2). La Figure 1.2 montre un schéma de fabrication du procédé d'infusion traditionnel.

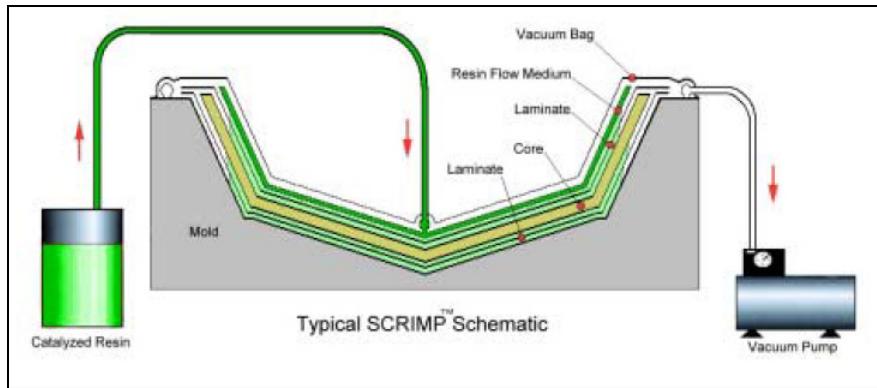


Figure 1.2 Fabrication de matériaux composites par moulage par infusion

Tirée de Milgram (2003, p. 1)

Le procédé VARTM («vacuum assisted resin transfer molding») est un dérivé de ce procédé, de même que les procédés VARI («vacuum assisted resin infusion»), RIFT («resin infusion under flexible tooling») et LRI («liquid resin infusion») qui sont très similaires utilisant les mêmes principes de base. Des variantes ont également été développées pour optimiser les performances, par exemple le procédé CAPRI («controlled atmospheric pressure resin infusion»), breveté par Boeing, qui consiste à optimiser la variabilité de l'épaisseur en fonction du volume de fibres grâce à la compaction de la préforme et la pression pendant l'infusion. La Figure 1.3 présente le schéma du procédé CAPRI.

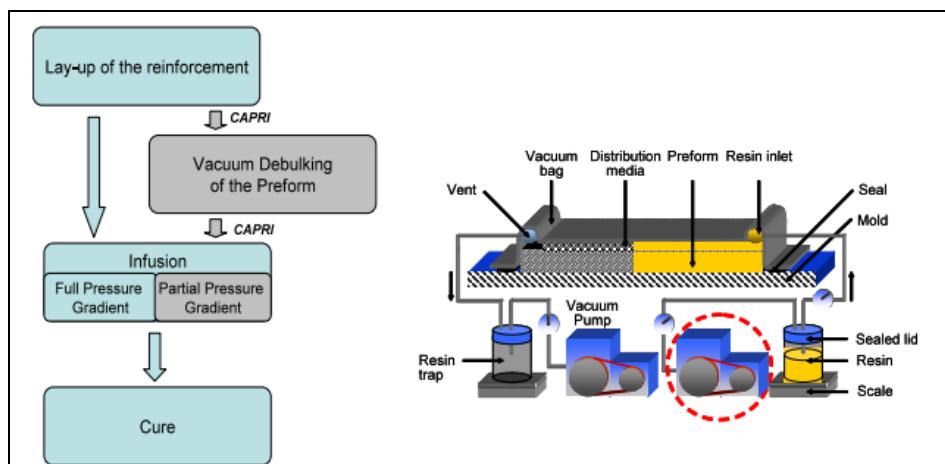


Figure 1.3 Schéma du procédé CAPRI

Tiré de Heider (2012, p. 2)

Le procédé VAP («vacuum assisted process»), développé et breveté par le groupe EADS est un autre exemple de variante du procédé d'infusion. Ce procédé plus robuste que le procédé d'infusion traditionnel, consiste à utiliser une membrane perméable à l'air afin de faciliter le retrait des gaz et de l'air emprisonnés dans le montage, minimisant la formation de vides et de porosités. La Figure 1.4 présente le schéma de ce procédé.

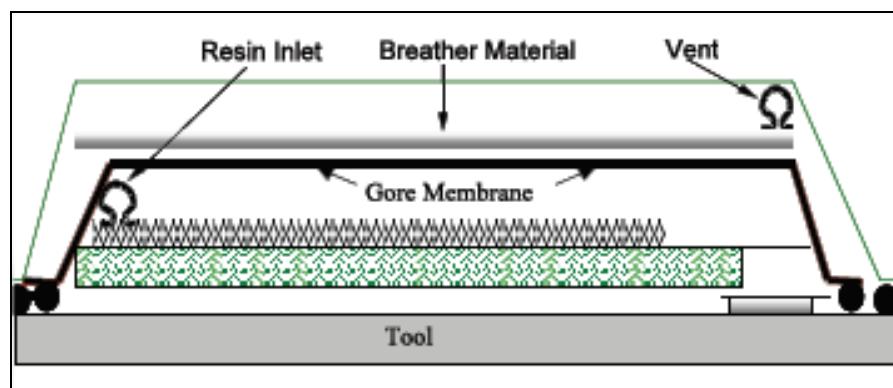


Figure 1.4 Schéma du procédé VAP
Tiré de Heider (2012, p. 2)

Les procédés d'infusion sont utilisés pour une multitude d'applications et sont compatibles avec tous les types de fibres et de résines couramment utilisées. La pression de vide appliquée lors de l'infusion et de la polymérisation permet d'obtenir des volumes de fibres plus élevés par rapport au moulage contact. Le taux volumique de fibres atteignable par le procédé d'infusion varie dans la littérature, variant de 45 à 55 % (Beckwith, 2007, p. 2) et jusqu'à 65 %, dépendamment du type de fibres, de l'architecture du tissu et du type de résine (Milgram, 2005, p. 1). Les étapes du procédé traditionnel d'infusion consistent à déposer l'empilement de tissus dans le moule, recouvert d'un tissu d'arrachage permettant d'arracher les consommables de la surface de la pièce après la polymérisation de la résine. Un médium d'infusion avec une très grande perméabilité est ensuite déposé sur la surface, permettant à la résine de voyager facilement par-dessus les renforts, facilitant l'imprégnation. Le tout est recouvert d'une pellicule collée en contour, permettant une pression de consolidation et le maintien du vide pendant tout le cycle de polymérisation. Au niveau de la résine, la plage de viscosité typique et recommandée pour une utilisation dans le procédé d'infusion est de 50 à 1000 cP (Beckwith, 2007, p. 2).

Tout comme le souligne Leclerc (2008) et Milgram (2003), un élément clé dans ce procédé est de contrôler les vitesses d'infusion et le front d'avancement, permettant une saturation complète des fibres, en évitant la formation de porosités et de zones sèches dans les pièces produites. Les stratégies d'infusion englobent plusieurs paramètres, tels que la température, la viscosité de la résine, l'architecture des fibres, la complexité de la géométrie, le niveau de vide, la position des entrées de résine et de vide, etc. La section 1.2 reprend les notions d'imprégnation, de perméabilité et de formation des porosités dans le procédé d'infusion.

1.2 Phénomène d'imprégnation dans le procédé d'infusion

L'une des difficultés du procédé d'infusion est de comprendre les phénomènes d'imprégnation des renforts et de formation de porosités qui deviennent rapidement très complexes, selon les matériaux utilisés (fibre et résine) et la géométrie des pièces produites. Pour améliorer la performance des procédés d'injection tels que le moulage par infusion, une bonne compréhension de ces phénomènes est requise. En effet, une mauvaise imprégnation peut devenir problématique, pouvant créer des problèmes de porosités, de zones sèches en résine et de zones mal imprégnées, représentant des coûts non désirables et étant pratiquement impossibles à réparer. La maîtrise de ces phénomènes est donc très importante afin d'optimiser et d'améliorer le procédé d'infusion, aspects traités par plusieurs auteurs, tels que Leclerc (2008), Ruiz (2012) et Lee (2005).

1.2.1 Milieu poreux et mécanisme d'imprégnation

Les notions de perméabilité, d'imprégnation des renforts et de porosités interagissent selon les principes et définitions des milieux poreux et cette section présente ces différents phénomènes expliqués selon Ruiz (2012) et Leclerc (2008). Un milieu poreux consiste en un matériau perméable avec un réseau de pores interconnectés (vide). Dans le cas des composites, le milieu poreux consiste aux renforts avec deux échelles de porosités avec l'utilisation de tissés, ou avec une seule échelle de porosités avec l'utilisation de non-tissés, caractérisés par la structure de ses pores ou interstices (vide). Dans ce projet de recherche, les pièces à l'étude sont constituées de renforts tissés (taffetas, sergé) constitués de deux échelles

de porosités. Dans le cas de renforts non-tissés tels que du mat, une seule échelle de porosité est présente. Tout d'abord, l'échelle macroscopique qui consiste aux vides entre les fibres (inter-fibres), avec un écoulement dominé par les forces visqueuses. Ensuite, l'échelle microscopique qui représente les vides dans les fibres (intra-fibres) avec un écoulement dominé par des forces capillaires. La Figure 1.5 illustre ces deux échelles de porosités.

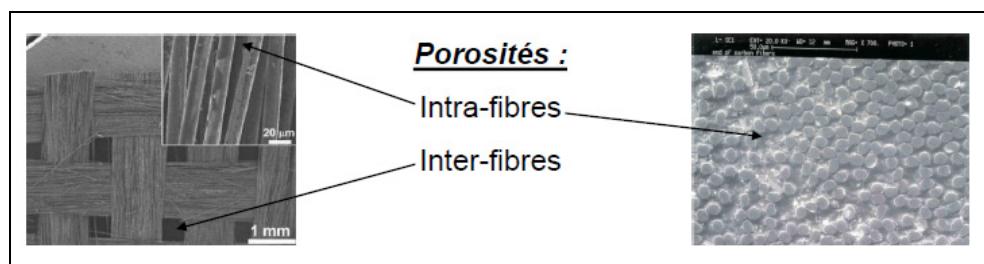


Figure 1.5 Échelles de porosités dans un tissu
Tiré du Ruiz (2012, p.7)

La porosité est un concept tridimensionnel et son ratio volumique influencera la perméabilité du renfort. Le processus d'infusion consiste en la résine qui remplit les vides (porosités) autour des fibres, représentées par le solide, jumelé à la résine qui s'infiltre entre les brins de la fibre, non visible sur la Figure 1.6 et représentant la deuxième échelle de porosité (microscopique).

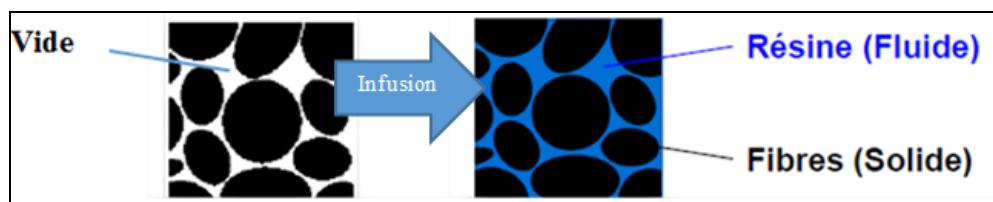


Figure 1.6 Milieu poreux, résine et fibre
Tiré de Ruiz (2012, p.9)

Au niveau de l'écoulement à travers le milieu poreux, le régime de Stokes ainsi que la capillarité s'applique dans le procédé d'infusion. Le régime de Stokes, appelé écoulement «rampant», se décrit comme un fluide visqueux s'écoulant lentement dans un lieu étroit autour d'un obstacle, les fibres représentant les obstacles et la résine le fluide, relié à l'échelle

macroscopique. La capillarité représente l'écoulement de la résine dans les fibres du renfort et reliée à l'échelle microscopique. La Figure 1.7 illustre ces phénomènes d'écoulement.

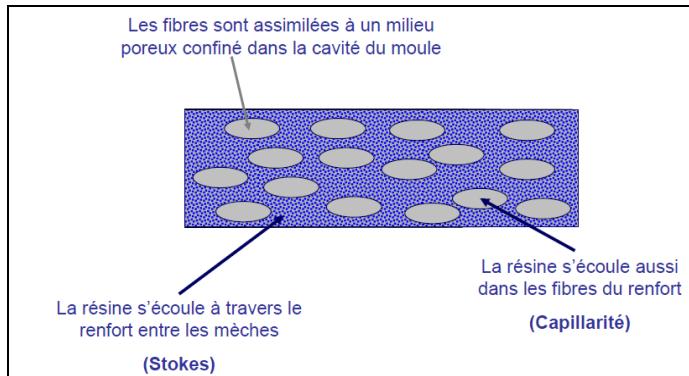


Figure 1.7 Écoulement à travers un milieu poreux
Tiré de Ruiz (2012, p.12)

Ces phénomènes d'écoulement et d'imprégnation sont dictés par la loi de Darcy¹, décrite dans les équations (2-1) et (2-2).

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{-\Delta P}{L} \quad (2-1)$$

$$\text{Ainsi, } K = \frac{\mu \cdot A}{\Delta P \cdot L} \quad (2-2)$$

Légende :

$Q (m^3 \cdot s^{-1})$: débit volumique;

$\mu (Pa.s)$: viscosité dynamique;

$\Delta P (Pa)$: différence de pression;

$v (m.s^{-1})$: vitesse de Darcy;

$K (m^2)$: perméabilité.

Les variables identifiées dans les équations (2-1) et (2-2) ont donc une influence directe sur la perméabilité, représentant ainsi les paramètres pouvant être modifiés afin d'optimiser la perméabilité et performance d'infusion. La perméabilité représente une variable importante

¹ 1 Darcy = $9,87 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$

dans le procédé d'infusion, permettant de mesurer la capacité du matériau à transmettre le fluide. Différents mécanismes d'imprégnation sont présents selon les vitesses d'infusion et la perméabilité, influençant la formation de vides par emprisonnement mécanique. Une imprégnation rapide avec une grande vitesse d'écoulement, dominée par les forces visqueuses, aura tendance à créer des vides dans les fibres. Tandis qu'une imprégnation trop lente avec une faible vitesse d'écoulement (forces capillaires dominantes) aura tendance à former des vides entre les fibres. La Figure 1.8 présente ces phénomènes d'emprisonnement mécanique de vides dans le procédé d'infusion.

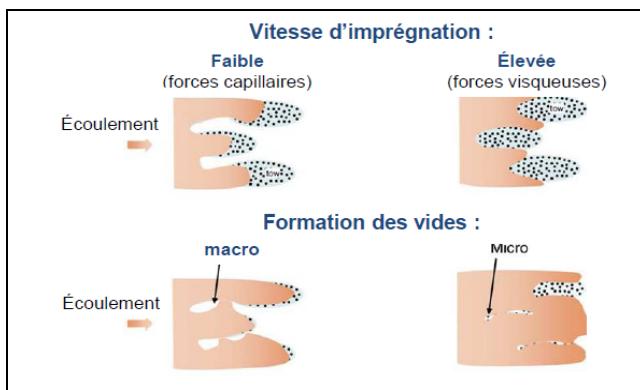


Figure 1.8 Emprisonnement mécanique de vide
Tiré de Leclerc (2008, p. 1860)

Une vitesse intermédiaire optimale d'infusion doit donc être trouvée afin d'éviter et de prévenir la formation de vides par emprisonnement mécanique. Cette vitesse optimale peut être modélisée, en calculant le nombre capillaire modifié, présenté dans l'équation (2-3).

$$Ca^* = \frac{\mu \cdot v}{\gamma \cdot \cos \theta} = \frac{\text{forces visqueuses}}{\text{forces capillaires}} \quad (2-3)$$

Légende :

Ca^* : nombre capillaire modifié;

μ (Pa.s) : viscosité dynamique;

v ($m.s^{-1}$) : vitesse de Darcy;

γ (N·m) : tension de surface;

θ (degré) : angle de contact.

La relation entre le taux de vide et le nombre capillaire modifié permet de créer le modèle de Patel, permettant d'obtenir une plage de vitesse optimale minimisant la formation de vides, présentée à la Figure 1.9.

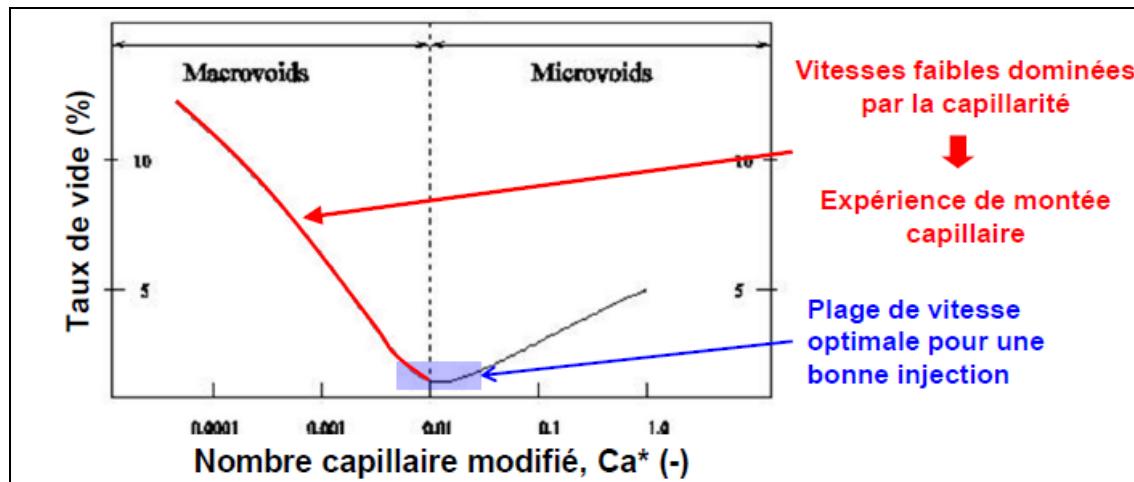


Figure 1.9 Modèle de Patel, nombre capillaire modifié Ca^*
Tiré de Ruiz (2012, p. 47)

1.2.2 Prévention de la formation de vides dans le procédé d'infusion

Dans les procédés d'injection de résine, de l'air résiduel est présent dans les pores de la préforme pouvant causer des vides sur le produit final, comme expliqué par Lee (2005), Leclerc (2008) et Ruiz (2012). Ces vides et porosités sont normalement causés par une perméabilité irrégulière et peuvent être améliorés en optimisant les stratégies d'injection, comme par la localisation des points d'injection et des événements, mais également par le contrôle du front d'avancement. En effet, l'air voyage pendant l'injection et est transporté dans la préforme par le front qui s'infiltre dans les pores, un front irrégulier amène un risque d'emprisonner de l'air dans les fibres se résultant par des porosités et des vides dans la pièce finale.

Les origines des vides et porosités sont multiples et leur effet sur les propriétés des composites peut être majeur. Un exemple de l'effet de vide sur les propriétés d'un composite

est présenté à la Figure 1.10, présentant la baisse de la contrainte de cisaillement inter-laminaire en fonction de l'augmentation du taux de vide dans le composite.

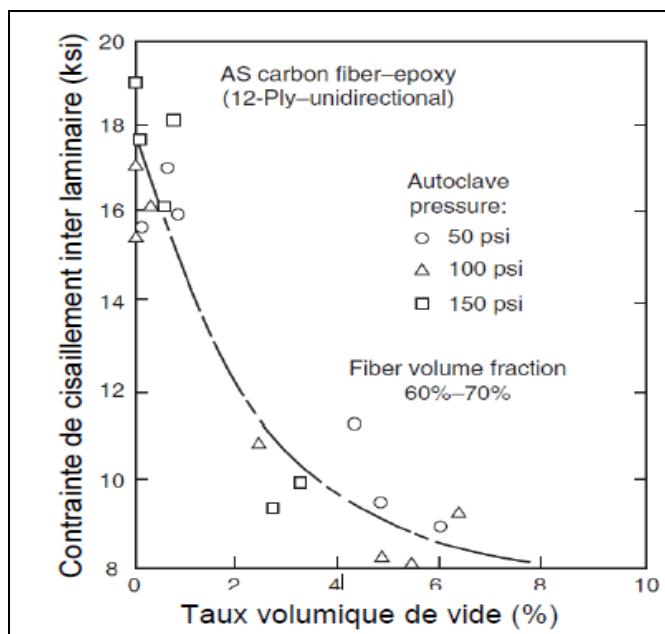


Figure 1.10 Effet du taux volumique de vide sur les contraintes de cisaillement inter-laminaire
Tiré de Ruiz (2012, p. 43)

Les trois principales sources de création de vides sont les suivantes, présentée par (Ruiz, 2012):

- Thermique (ébullition);
- Physico-chimique (nucléation, gaz dissout);
- Mécanique (emprisonnement d'air).

Pour limiter la formation de porosités et de vides, certains phénomènes et paramètres doivent être compris et étudiés. Tout d'abord, il est important de connaître la cinétique réactionnelle de la résine, afin d'éviter un début de polymérisation durant l'infusion. Il est également important de connaître la rhéologie de la résine, soit sa viscosité, sa tension de surface et son angle de contact, ainsi que les propriétés du renfort. Ces données sont utilisées entre autres pour le calcul de Darcy. Un bon dégazage de la résine est également important afin de

diminuer le taux de gaz initial dans la résine, mais également l'air incorporé pendant le mélange de la résine avec le durcisseur. Le dégazage n'a cependant aucun effet sur l'emprisonnement d'air durant l'infusion. Une pression d'infusion et de consolidation maximale permet de dissoudre les gaz plus facilement et de transporter les vides vers les événements. La pression de consolidation maximale permet de réduire le volume des bulles ainsi que de dissoudre une certaine quantité de gaz. L'utilisation de la saignée représente une autre solution pour réduire la présence de vides, en sortant les vides souvent présents dans le front d'avancement. Une perte de résine est cependant générée augmentant les coûts de fabrication.

La meilleure solution consiste au contrôle de l'infusion et de la vitesse d'écoulement, comme présenté par les différents auteurs cités dans cette section ainsi que démontré dans le modèle de Patel de la Figure 1.9 (Ruiz, 2012, p. 47). L'optimisation de l'infusion, entre autres pour réduire la formation de porosités générées dans le procédé initial, est présentée au chapitre 3 avec la mécanisation de cette étape du procédé.

1.3 Étude des élastomères pour la fabrication de membranes flexibles

Afin d'éliminer l'utilisation de films consommables, sources de plusieurs problèmes dans le procédé initial, une technologie de membrane flexible réutilisable est visée par l'amélioration du procédé. Une grande variété de produits et de compagnies offre des solutions pour la fabrication de membranes flexibles. Le silicium est le matériau le plus couramment utilisé et différentes variétés, avec des nomenclatures et des structures internes variées, sont disponibles sur le marché, comme expliqué par Moretto (2000). Le terme silicium est utilisé pour des composés dans lesquels des atomes de silicium sont liés par des atomes d'oxygène, où chaque atome de silicium porte un ou plusieurs groupes organiques. Pour des applications industrielles, ces ensembles organiques sont généralement un groupe de méthyle ou phényle. Le nom scientifique du silicium selon l'IUPAC («international union of pure and applied chemist») est le polyorganosiloxane. Ces structures polymères sont généralement décrites en utilisant les lettres M, D, T et Q selon le monomère qui les constitue. Les huiles de silicium sont liées à la lettre D. Les polymères de base pour les élastomères ou caoutchoucs sont

d'unité D et rassemblent les groupes qui réticulent. La structure principale de la résine silicone fortement ramifiée représente l'unité T, souvent combinée à l'unité D (huiles de silicone) pour rendre le silicone plus flexible. Les silicones peuvent également contenir des unités Q et M. La Figure 1.11 présente les composés dans la structure des silicones avec leurs applications courantes.

Starting compound	Structural unit		Application
	Symbol	Functionality	
$(CH_3)_3SiCl$ Monochloro-trimethylsilane	M	$ \begin{array}{c} CH_3 \\ \\ H_3C-Si-O_{0.5} \\ \\ CH_3 \end{array} $	chain end in silicone fluids, trimethylsilyl protecting groups
$(CH_3)_2SiCl_2$ Dichlorodi-methylsilane	D	$ \begin{array}{c} CH_3 \\ \\ H_3C-Si-O_{0.5} \\ \\ O_{0.5} \end{array} $	linear siloxane polymers, silicone fluids, rubbers, elastomers
CH_3SiCl_3 Trichloro-methylsilane	T	$ \begin{array}{c} O_{0.5} \\ \\ H_3C-Si-O_{0.5} \\ \\ O_{0.5} \end{array} $	silicone resins for paints, impregnating agents, masonry protection
$SiCl_4$ Tetrachloro-silane	Q	$ \begin{array}{c} O_{0.5} \\ \\ O_{0.5}-Si-O_{0.5} \\ \\ O_{0.5} \end{array} $	silicone resins

Figure 1.11 Structure et application des composés de silicone
Tiré de Moretto (2000, p.2)

Les silicones ont des propriétés qui varient selon leur composition d'où la multitude d'applications pour lesquelles ils sont utilisés. Dans le cadre de ce projet de recherche, ce sont les silicones flexibles de type élastomère et caoutchouc qui nous intéressent. Les polymères de silicone ont une faible température de transition vitreuse, une température de fusion équilibrée, une faible interaction moléculaire ainsi qu'une chaîne moléculaire très mobile (Moretto, 2000, p. 14). Ces propriétés les rendent particulièrement adaptés pour une

utilisation flexible comme des caoutchoucs. Les polymères de silicium peuvent incorporer une grande variété de groupes fonctionnels et positionnés différemment dans la chaîne. La position dans la chaîne moléculaire ainsi que le type d'unité dans les groupes peuvent être facilement modifiés afin d'ajuster les propriétés selon l'application ciblée. Une large gamme de silicium peut ainsi être créée, notamment avec une flexibilité à température ambiante, pouvant même être flexible dans certains cas jusqu'à -70°C. Les viscosités peuvent également être adaptées facilement, ainsi que les tensions de surface, en modifiant le groupe méthyle dans la structure.

Au niveau de la cuisson des siliciums, ils réticulent, aussi appelé la vulcanisation, sous forme de solide utilisant différents systèmes de cure. Les plus communs sont la réticulation par addition avec un catalyseur de type platine et par radicaux libres avec des peroxydes. Le Tableau 1.1 présente les différents types de réticulation communément utilisés, incluant les applications courantes, ainsi que quelques caractéristiques provenant de la littérature, selon Malczewski (2003), Moretto (2005) et Mosite (2007).

Tableau 1.1 Type de réticulation pour les silicones

Type de réticulation	Application courantes	Caractéristiques
<p>Réticulation par addition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Catalyseur majoritairement utilisé : Platine - Aussi appelé hydrosilylation - Système RTV («room temperature vulcanizing») et quelques HTV («high temperature vulcanizing») 	<ul style="list-style-type: none"> - Silicone liquide, une ou deux parties - Mousse - Caoutchouc à haute consistance - Moulage par injection - Agent démouleur - Adhésif 	<p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réticulation sans dégagement de sous-produits - Réticulation uniforme - Bonne adhésion <p>Limite :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Durée de vie en pot limitée - Possibilité d'inhibition - Dispensieux
<p>Par addition de radicaux libres avec peroxyde :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Système le plus ancien dans la réticulation des silicones - De type HTV, les peroxydes organiques se décomposent à haute température démarrant la réticulation avec les radicaux libres 	<p>Systèmes pré-catalysés :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Extrusion à haute consistance - Certains silicone de type B-stage <p>Systèmes deux parties :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Adhésif sensible à la pression - Revêtement 	<p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le catalyseur est difficilement contaminable - Plusieurs propriétés atteignables en modifiant le niveau de peroxyde <p>Limite :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Doit être conservé dans un endroit réfrigéré - La réaction peut-être inhibée par l'oxygène - Les résidus de peroxyde peuvent créer problèmes de polymérisation. - Postcure nécessaire pour éliminer les résidus de catalyseur, ce qui peut engendrer une dépolymérisation à haute température - Les résidus de peroxyde peuvent créer des sous-produits toxiques (chlorophénol ou PCB)

Type de réticulation	Application courantes	Caractéristiques
<p>Réticulation par condensation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cuisson à température ambiante (RTV) - Sous forme liquide, bicomposant ou monocomposant - Réagit à l'humidité - Catalyseur majoritairement utilisé : Beta 2 	<ul style="list-style-type: none"> - Moulage d'outillage - Encapsulement - Revêtement à haute performance - Agent scellant - Revêtement sensible à la pression - Adhésif médical - Adhésif électronique - Revêtement imperméable pour tissus 	<p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Peu dispendieux - Résistance à l'inhibition - Bonne adhésion - Bonne versatilité - Facile d'utilisation <p>Limite :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Durée de vie dépend de l'humidité - Peut-être inhibé par certains lubrifiants - Réticulation lente - Utilisation en couche mince dans un endroit ouvert (limitation)
<p>Réticulation par radiation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cuisson avec lumière ultraviolette ou réticulation avec rayon X et champs d'électrons 	<ul style="list-style-type: none"> - Revêtement de fibres optiques et de composants électroniques - Utilisation pour des applications sensibles à la chaleur 	<p>Avantage :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Très résistant à la température <p>Limite :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Très dispendieux

Les silicones peuvent être sous différents formats, selon le type de composés et l'utilisation visée. Le Tableau 1.2 présente un résumé des familles de silicones disponibles sur le marché, présenté dans la littérature, selon Malczewski (2003), Moretto (2005) et Mosite (2007). Un type de silicone peut se retrouver dans différentes familles.

Tableau 1.2 Familles de silicones communément utilisés en industrie

Type de silicones	Caractéristiques
Silicone liquide (LSR)	<ul style="list-style-type: none"> - Nouvelle classe de silicone depuis les années 1980 - Développé pour les procédés d'injection - Viscosité variable (basse à moyenne) et cuisson rapide - Système bicomposant augmentant la durée de vie du matériel. La partie A inclut le catalyseur (de type platine dans la majorité des cas) et la partie B l'agent de réticulation communément du polymethylhydrogensiloxane. Un agent inhibiteur peut également être ajouté dans la base du polymère - Souvent mélangé dans un mélangeur statique avant d'être injecté dans un outillage (voir Figure 1.12)
Silicone HTV	<ul style="list-style-type: none"> - Plage de viscosité: 20-100 Mooney à 25 °C. Beaucoup plus visqueux que les LSR - Les silicones HTV sont pâteux et peuvent être translucides ou colorés - Généralement sous forme de feuille, bande ou granule - Cuisson à haute température (jusqu'à 180 °C) - Les «B stage» font partie de cette famille de silicone
Silicone RTV monocomposant	<ul style="list-style-type: none"> - Utilise presque exclusivement un type de réticulation de type condensation - Durcit avec une exposition à l'humidité atmosphérique - Généralement utilisé comme scellant, adhésif ou revêtement - Souvent sous forme de pâte très visqueuse - Normalement dans des cartouches appliquées directement sur la surface visée. Le temps de cuisson dépend de l'humidité et durcit normalement après quelques minutes
Silicone RTV bicomposant	<ul style="list-style-type: none"> - Souvent utilisé comme mastic ou par coulée («casting»). Peut également être chargé pour la renforcer et augmenter la viscosité. - La partie A contient la base et la partie B l'agent de réticulation (généralement un alkoxysilane) et le catalyseur - Les ratios communs sont normalement entre 100 :1 et 10 :1

La Figure 1.12 présente le principe de mélange et d'injection du silicone de type LSR sous forme de schéma.

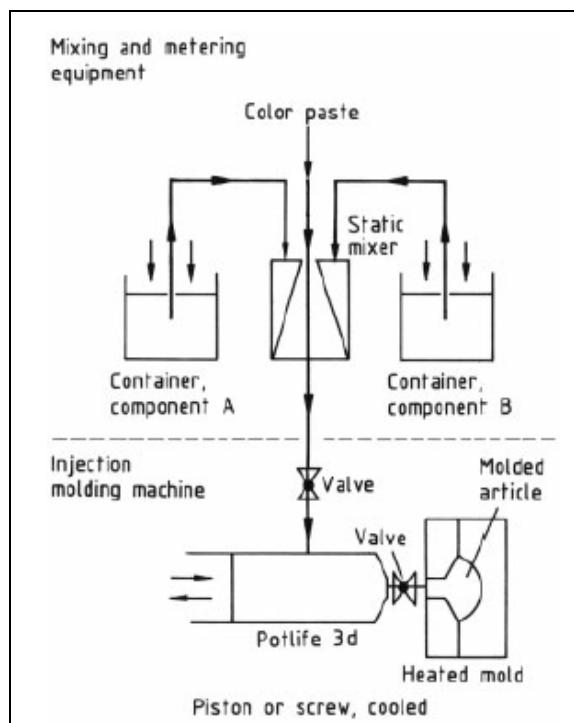


Figure 1.12 Procédé LSR
Tiré de Moretto (2005, p. 20)

Le Tableau 1.1 et le Tableau 1.2 démontrent que les silicones sont utilisés dans un large éventail d'applications et sous différents formats, avec différents types de réticulations. Le Tableau 1.3 présente une variété de silicones disponibles sur le marché utilisés principalement pour la fabrication de membranes flexibles pour utilisation avec les matériaux composites, rassemblant des RTV bicomposants et des silicones de type Stage B (HTV).

Tableau 1.3 Revue des silicones disponibles pour la fabrication de membranes flexibles

Fabricant	Produit	Type	Ratio volumique	Type de réticulation (catalyseur)	Temps de travail à 23°C	Cycle de cuisson	Dureté (Shore A)	Température d'opération maximale (°C)	Élongation à la rupture (%)	Viscosité à 23°C (cP)
Axon	SVB 20	RTV bicomposant	1 :1	Par addition (ND)	3 min	15 min	20	ND	500	15 000
Axon	ESSIL 125	RTV bicomposant	10 :1	Par polycondensation (ND)	4 h	24 h à 25°C ou 2-3 h à 60 °C	22	ND	350	20 000
Zhermack	ZA-13	RTV bicomposant	1:1	Par addition (variable)	45 min	150-180 min	13	ND	450	4 500
Zhermack	ZA-22	RTV bicomposant	1:1	Par addition (variable)	15 min	60 min	21	ND	380	4 000
Zhermack	HT-33	RTV bicomposant	1:1	Par addition (variable)	20 min	3 h à 23 °C	33	ND	430	8 000
Zhermack	HT-45	RTV bicomposant	1:1	Par addition (variable)	10 min	90 min à 23 °C	43	ND	370	8 500
Momentive	RTV662	RTV bicomposant	10:1	Par addition (platine)	4 h	24 h	68	200	235	120 000
Momentive	RTV664	RTV bicomposant	10:1	Par addition (platine)	2 h	24 h	62	200	245	120 000
Momentive	RTV668	RTV bicomposant	10:1	Par addition (platine)	2 h	24 h	62	200	240	120 000
Momentive	RTV426	RTV bicomposant	1:3 1:5 1:7	Par polycondensation (Beta 26)	126 min 68 min 43 min	7 h 121 h 3,6 h	21 25 28	204	321 309 257	37 000 35 500 32 000
Dow corning	3110 RTV	RTV bicomposant	10:1	Par addition (platine)	60 min	8 h	45	200	170	130
Dow corning	3112 RTV	RTV bicomposant	10:1	Par addition (platine)	60 min	8 h	58	250	127	280
Dow corning	3120 RTV	RTV bicomposant	10:1	Par addition (platine)	60 min	8 h	56	300	128	280
Smooth-On	EZ spray 20	RTV bicomposant	1:1	Par addition (platine)	3 min	20 min	20	260	470	11 000
Smooth-On	EZ spray 22	RTV bicomposant	1:1	Par addition (platine)	5 min	20 min	20	260	450	11 000
BJB	TC-5050	RTV bicomposant	10:1	Par addition (platine)	30 min	24 h à 25 °C ou 4 h à 66 °C	50	344	325	90 000

Fabricant	Produit	Type	Ratio volumique	Type de réticulation (catalyseur)	Temps de travail à 23°C	Cycle de cuissage	Dureté (Shore A)	Température d'opération maximale (°C)	Élongation à la rupture (%)	Viscosité à 23°C (cP)
Swirl	PRSI 308-556	RTV bicomposant	10:1	Par addition (platine)	3 min	40 min à 23°C	28	235	500	15 000 (A) 10 000 (B)
Wacker	Elastosil 1500	RTV bicomposant	1:1	Par addition (platine)	20 min	60 min à 23 °C + post cuisson 2-3 h	27	230	500	26 000
Mosite rubber	Mosite #14324	HTV de type B Stage	NA	Par addition (platine)	NA	30 min à 150 °C + post cuisson 3 h à 200 °C	40	204	1 100	NA
Mosite rubber	Mosites #14366	HTV de type B Stage	NA	Par addition (peroxyde)	NA	30 min à 150 °C + post cuisson 3 h à 200 °C	20	200	1 084	NA
Mosite rubber	Mosites #1453	HTV de type B Stage	NA	Par addition (peroxyde)	NA	30 min à 150 °C + post cuisson 3 h à 200 °C	50	230	650	NA
Torr	EL80	HTV de type B Stage	NA	Par addition (peroxyde)	NA	Déjà cuit ou non cuit	50	204	894	NA
Torr	EL1050T	HTV de type B Stage	NA	Par addition (platine)	NA	Déjà cuit ou non cuit	52	204	900	NA
Torr	EL2050	HTV de type B Stage	NA	Par addition (peroxyde)	NA	Déjà cuit ou non cuit	50	204	798	NA
Diversified Silicone	DSP50VB	HTV de type B Stage	NA	Par addition (ND)	NA	Déjà cuit ou non cuit	50	230	800	NA
Airtech	Airtech 4140 et 1050	HTV de type B Stage	NA	Par addition (ND)	NA	30 min à 177 °C + 4 h à 204 °C Offert aussi déjà cuit (1050)	50	315	700	NA
Airtech	Airtech 4124 et 1024	HTV de type B Stage	NA	Par addition (ND)	NA	30 min à 177 °C + 4 h à 204 °C Offert aussi déjà cuit (1050)	40	260	1 300	NA

^aNA: Non applicable

^bND: Non disponible

On constate qu'il y a une variété énorme de silicones offerts par différentes compagnies, avec des propriétés telles que la densité, la viscosité et l'élongation à la rupture qui varient,

amenant une multitude de possibilités pour la fabrication de membranes flexibles réutilisables.

En plus des silicones, d'autres matériaux sont également disponibles pour la fabrication de membranes flexibles, tels que des latex, des polysulfides et des polyuréthanes.

Le latex est un caoutchouc naturel extrait de l'arbre de type Hévéa («rubber trees»), principalement présent en Asie du Sud-Est. Afin de rendre ce caoutchouc utilisable comme élastomère flexible, le latex brut est habituellement traité avec de l'ammoniac et de l'eau. Appliqué habituellement au pinceau, ce matériau est un monocomposant et est peu coûteux. Il permet la fabrication de membranes minces, élastiques et avec de bonnes résistances à l'abrasion. Le latex a tendance à garder sa forme après avoir été déformé, ce qui peut être souhaitable, par exemple pour la fabrication de gants, ou non souhaitable selon l'utilisation que l'on en fait. La fabrication d'un outillage en latex peut cependant être assez fastidieuse, car un temps d'environ quatre heures est requis entre chaque couche afin que l'eau et l'ammoniac puissent s'évaporer, laissant une odeur désagréable. Il y a également beaucoup de retraits et plusieurs jours sont nécessaires afin de compléter le séchage. Quelques produits à base de latex font cependant leur apparition afin de contrer ces inconvénients (Smooth-on, 2008). La compagnie SR composite avec la technologie Sprayomer ainsi que la compagnie Smooth-On sont des exemples de compagnies offrant des solutions à base de latex pour la fabrication de membranes flexibles réutilisables.

Les caoutchoucs polysulfides sont des bicomposants et ont longtemps été les matériaux privilégiés pour la fabrication de moule dans les fonderies de bronze. Ils sont donc majoritairement utilisés pour la fabrication de moule de coulée. Flexibles et élastiques, certains moules sont en fonction depuis plus de 40 ans étant encore utilisables (Smooth-on, 2008, p. 3). Contrairement au latex, ces matériaux ne sont pas inhibés par de l'eau ou du soufre. La préparation du modèle est minime avant d'y couler le polysulfide. Cependant, une odeur nauséabonde émane pendant la fabrication avec ces matériaux, due aux durcisseurs à base de plomb qui sont présents. La précision du mélange est également très importante,

sinon la réaction ne sera pas complète. Le coût de ce matériel est supérieur à celui du latex et des polyuréthanes, mais inférieur aux silicones (Smooth-on, 2008, p.3).

Les caoutchoucs polyuréthanes sont des bicomposants et peuvent couvrir une multitude d'applications. Ils sont souvent utilisés pour fabriquer des outillages, par coulée ou bien par projection. Le ratio de mélange est très simple (1A : 1B) limitant les erreurs de mélange. Les uréthanes flexibles sont disponibles dans une large gamme de dureté, avec des temps de gel variables ainsi que des viscosités différentes. Contrairement au silicone, un dégazage n'est pas nécessairement requis, tout en ayant une bonne résistance à l'abrasion. Ils sont également moins dispendieux que les silicones et les polysulfides. Une limite se situe au niveau des propriétés de démoulage, considérant que contrairement au silicone, ils ont tendance à coller sur tout. Donc, les modèles doivent être traités en conséquence, ainsi que les matériaux en contact avec l'élastomère. Les uréthanes sont également très sensibles à l'humidité et peuvent créer des bulles si trop exposés. La durée de ces matériaux est également limitée lorsqu'en contact avec l'air (Smooth-on, 2008, p. 3). Des exemples de polyuréthanes utilisés pour la fabrication de membranes flexibles sont présentés dans le Tableau 1.4.

Tableau 1.4 Variété de polyuréthanes disponibles sur le marché pour la fabrication de membranes flexibles

Fabricant	Produit	Type de produit	Ratio volumique	Temps de travail à 23°C	Cycle de cuisson	Dureté (Shore A)	Température d'opération maximale (°C)	Élongation à la rupture (%)	Viscosité à 23°C (cP)
Axon	UPX 8400	Polyuréthane trois composants (dureté variable)	1 :1 :0 à 700	9 à 15 min	90 à 120 min à 70 °C	95	70	430	350 à 400
Smooth-on	PMC-746	Polyuréthane bicomposant	2A :1B	15 min	16 h à 23 °C + post cuisson 4 h à 65 °C	60	ND	650	1 200
Smooth-on	PMC-744	Polyuréthane bicomposant	2A :1B	15 min	16 h à 23 °C + post cuisson 4 h à 65 °C	44	ND	400	3 400
Smooth-on	PMC-770	Polyuréthane bicomposant	2A :1B	30 min	16 h à 23 °C + post cuisson 4 h à 65 °C	70	ND	750	3 000
Smooth-on	PMC-780	Polyuréthane bicomposant	2A :1B	25 min	48 h à 23 °C + post cuisson 4 h à 65 °C	80	ND	750	2 000
BJB	SP-47	Polyuréthane bicomposant	1 :1	40-45 s	10 à 20 min à 25 °C (2-3 jours cuisson complète)	45-50	ND	525	900
Duochem	Duroplat 390	Polyuréthane bicomposant	2 :1	20 min	6 h à 23 °C (7 jours cuisson complète)	80	ND	435	ND
Plastique GYF	Gyftane M6035	Polyuréthane bicomposant	ND	ND	ND	62	110	1 500	ND

ND : Non disponible

Les températures maximales ne sont pratiquement pas disponibles dans les fiches techniques, mais on peut considérer que les polyuréthanes sont habituellement moins résistants en température que les silicones (Smooth-on, 2008, p.3). La membrane UPX-8400 de Axon le démontre avec une température d'utilisation maximale de 70 °C et de 110 °C pour l'élastomère Gyftane M6035, des températures inférieures à celles présentées avec les silicones dans le Tableau 1.3.

L'industrie de l'aéronautique est la pionnière quant à l'utilisation de sacs de mise sous vide pour la fabrication de pièces composites (Mosite, 2008, p. 3). À l'origine, des films en nylon étaient utilisés collés en contour du moule avec un ruban adhésif. Ces films sont cependant utilisables pour une fabrication uniquement, générant de nombreux consommables. Ils amènent également des problèmes de fabrication, étant fragiles et causant des fuites. Ces films ne sont pas très flexibles et dans le cas de pièces complexes, il peut être difficile de les faire épouser parfaitement la forme du moule, créant des zones riches en résine. Le développement de membranes en élastomères a donc fait son apparition afin de remplacer les films jetables traditionnellement utilisés dans les procédés de mise sous vide. À la base coûteuses et sources de beaucoup d'interrogation, dont la contamination, la durée de vie et la compatibilité à l'époxy, leur introduction dans le domaine de l'aéronautique suscite encore plusieurs débats. En effet, les ingénieurs et professionnels de l'aéronautique peu familiers avec ces technologies vivent souvent des histoires d'horreur telles que la contamination de la surface de collage, le transfert de contaminants (plastifiants) sur les pièces produites, etc. (Mosite, 2007, p. 3).

Les différentes structures de silicone et les types de réticulation nuancent cependant ces risques. Par exemple, les silicones RTV qui sont souvent utilisés pour former des outillages complexes qui servent de conformateurs pendant le moulage de pièces composites sont plus sensibles à la contamination. Ce type de silicone utilise souvent un catalyseur de type platine et ce type de catalyseur est très sensible au soufre, à certains composés organiques, à certaines cires et à des huiles de machine. Si l'une des parties du RTV touche à l'une de ces substances, il sera contaminé de manière irréversible et différents types de problèmes surviendront. Inversement, les silicones et les élastomères qui réticulent en température sont beaucoup moins sensibles à la contamination, grâce à la réticulation (vulcanisation) qui est complète engendrant un risque minimum de contamination. Il est ainsi recommandé de post-curer les élastomères, quelques heures au-dessus de la température d'utilisation de la membrane pour s'assurer d'une vulcanisation complète.

Comme présenté dans la section 1.3, il y a une multitude de solutions pour la fabrication d'une membrane flexible réutilisable, aspect étudié dans le cadre de ce projet. Les silicones sont les matériaux qui sont le plus souvent utilisés en industrie, suivis des polyuréthanes. Le développement de cette technologie afin de remplacer l'utilisation de sacs consommables est présenté au chapitre 3.

1.4 Revue de noyaux en mousse pour la fabrication de constructions sandwiches

Dans cette section, est présentée une revue des matériaux disponibles pour la fabrication de constructions sandwiches en matériaux composites avec des noyaux en mousse pouvant être intégrés directement à l'étape d'infusion. Les noyaux présentés dans le Tableau 1.5 rassemblent plusieurs noyaux disponibles sur le marché, avec une présélection des noyaux pour applications à haute performance telles que l'aéronautique, nécessitant des propriétés anti-feu, antifumée et non toxique, communément appelées propriétés FST («fire, smoke, toxicity»). Ces requis sont obligatoires dans la fabrication de pièces d'avions.

Tableau 1.5 Noyaux en mousse pour la fabrication des constructions sandwiches

Compagnie	# de produit	Matériel	Densité du noyau (kg/m ³)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en tension	Module en tension (MPa)	Résistance ultime en cisaillement (MPa)	Module en cisaillement (MPa)	Température d'opération maximale (°C)
Evonik	Rohacell 110 RIST&RIMA	Mousse PMI (Polyméthacrylimide)	110	3,6	3,7	ND	2,4	70	180
Airex Baltek	T90.100	Mousse thermoplastique	110	1,4	2,2	120	0,8	20	150
Airex Baltek	C70.90	Polymère réticulé (base de PVC)	100	2,0	2,7	84	1,7	40	ND
Airex Baltek	T92.110	Mousse thermoplastique	105	1,8	2,4	145	1,05	23	150
Polymer Technologie	FR-3707	Mousse polyuréthane	112	1,2	1,4	ND	1,0	1,2	135
Sabic	XP110	Mousse à base de PEI (polyétherimide)	110	1,70	2,1	40	1,40	24	ND
NidaCore	PET 100	Mousse à base de polyéthylène téréphthalate (PET)	100	1,86	2,1	107,1	1,19	27,9	175
Diab	Divinicell F90	Mousse polymère	90	0,7	2,15	ND	1,1	9,5	220
Diab	Divinicell HT101	Mousse polymère	100	2,0	3,5	130	1,6	35	145

^aND : Non disponible

Une multitude de matériaux est disponible et seulement un aperçu est présenté dans le Tableau 1.5. Chaque compagnie offre une grande variété de densités, amenant des propriétés différentes, et seulement une valeur de densité par type de noyaux est présentée dans le Tableau 1.5, considérant que les densités varient environ de 50 à 200 kg/m³ pour chacune des familles. La densité finale de la construction dépend de la densité nominale du noyau, mais on doit également considérer qu'une quantité de résine sera absorbée par le noyau, variant selon la viscosité de la résine.

Les pièces du cockpit ciblées par ce projet sont soumises à des requis de déflexion, les noyaux supportant ainsi des efforts en cisaillement. Afin de comparer les noyaux entre eux, la résistance en cisaillement est reprise et présentée sur la Figure 1.13.

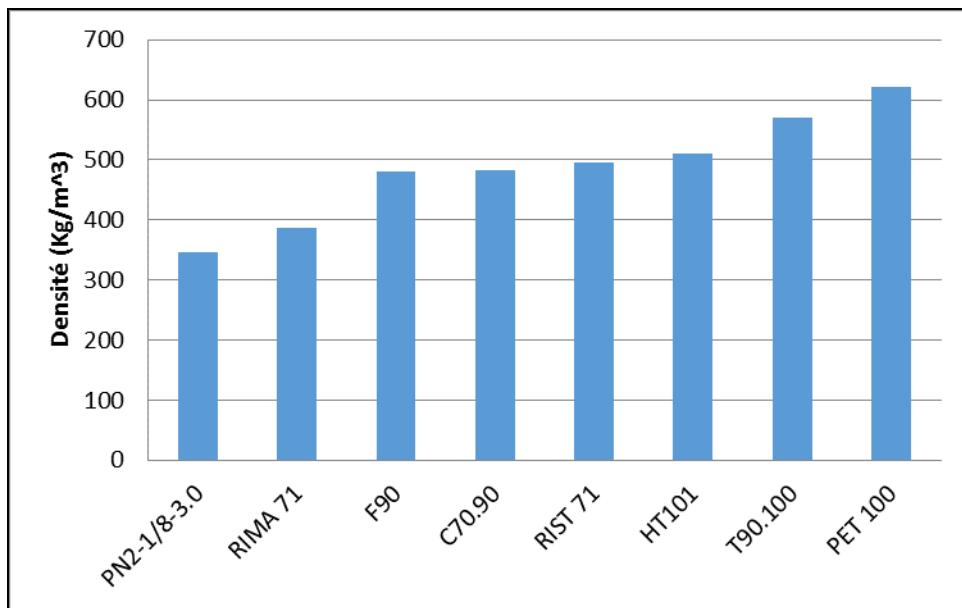


Figure 1.13 Résistance en cisaillement des noyaux en mousse

À l'analyse de la Figure 1.13, on constate que pour une densité similaire, les noyaux de type Rohacell, C70.90 et HT101 ont une résistance en cisaillement supérieure. Le développement de ces noyaux dans le procédé d'infusion est présenté au chapitre 4, à la section 3.2.

1.5 Modélisation des coûts de fabrication des matériaux composites

Considérant que l'objectif du projet de recherche est d'améliorer les temps, mais également les coûts de fabrication du procédé d'infusion, une revue de la terminologie et de techniques d'analyse et de modélisation des coûts de fabrication de procédés composites provenant de la littérature est présentée, selon Curran (2004), Schubel (2012), Schubel (2010), Hutchinson (2011), Bader (2002) et Schiller (2002).

1.5.1 Définition des coûts

La fabrication d'une pièce composite se traduit par différentes catégories de coûts. Cette section inclut de brèves définitions des types de coûts reliés à la production d'une pièce; les coûts récurrents ou non récurrents, coûts fixes ou variables, coûts directs ou indirects et les coûts en capital.

1.5.1.1 Coûts non récurrents versus récurrents

Les coûts non récurrents font généralement référence aux dépenses en capital effectuées avant la fabrication de la première unité. Ces coûts font partie de la phase de développement et représentent un investissement qui survient habituellement une seule fois dans le cycle du programme ou du produit. Les coûts non récurrents typiques sont les suivants :

- Travaux d'ingénierie initiaux (Design et développement);
- Outilages;
- Équipement de tests;
- Certification;
- Coût de fabrication en préproduction tel que la planification.

Les coûts récurrents font référence aux dépenses pour le paiement de la main d'œuvre, des matériaux et des fournitures nécessaires à la production d'une unité. Ainsi, les coûts récurrents sont nécessaires à la fabrication de la première unité de production, mais également au maintien et à l'amélioration de la production. Les coûts récurrents typiques sont les suivants:

- Approvisionnement;
- Frais généraux de production («overhead»);
- Matériaux (matières premières et consommables);
- Mise à niveau technique;
- Main d'œuvre;
- Service public.

Les coûts récurrents sont les types de coûts qui seront principalement étudiés dans le cadre de ce projet, en mesurant les gains amenés par le procédé d'infusion amélioré. Ces coûts sont similaires aux coûts variables, présentés à la prochaine section, et varient en fonction du volume de production.

1.5.1.2 Coûts fixes versus variables

Les coûts fixes et variables sont souvent confondus avec les coûts non récurrents et récurrents. Les coûts fixes et variables sont souvent associés à des études financières de plus haut niveau, par exemple des analyses de rentabilité et des décisions d'investissement. Des exemples de coûts fixes sont les suivants:

- Télécommunication;
- Salaire de l'exécutif (conseil d'administration);
- Location.

Ainsi, lorsqu'une entreprise est en cours d'évaluation financière, les coûts fixes sont souvent scrutés afin de voir si les bénéfices de l'entreprise sont supérieurs, ce qui représente un signe de santé économique générale. L'auteur Schiller (2002) définit les coûts fixes comme les coûts de production qui ne changent pas lorsque le volume de production est augmenté, d'où la relation avec les coûts non récurrents. En général, les coûts fixes ne changent pas et sont indépendants de la performance de l'entreprise. Ils sont donc traités comme un coût général de production nécessaire pour conserver l'entreprise opérationnelle. À l'inverse, les coûts variables sont définis comme étant les coûts qui varient en fonction des changements de volume de production (Curran, 2004, p. 10). Les coûts variables regroupent plusieurs coûts récurrents, tels que la main d'œuvre, les matériaux, les dépenses d'usinage, etc. Les entreprises s'assurent généralement de bien comprendre ces coûts afin de contrôler et de réduire leurs dépenses, avec l'objectif d'atteindre un profit. Cependant, ce contrôle doit se

faire avec réserve, car les coûts variables sont engagés afin de produire un produit de qualité, selon les attentes du client. Ainsi, selon Curran (2004), les réduire pourrait engendrer une diminution de la qualité pouvant amener des conséquences majeures au sein de l'entreprise.

1.5.1.3 Coûts directs versus indirects

Les coûts directs sont des coûts qui peuvent être ventilés et distribués dans des éléments ou des items spécifiques. Par conséquent, ils sont facilement associables à un résultat final tel qu'un produit, un service, un programme ou un projet. Ces coûts sont généralement chargés directement par un contrat, par exemple les items étant associés à la liste de matériel, communément appelée BOM («Bill of material») et faisant directement référence au produit final. D'autre part, les coûts indirects ne peuvent pas être directement identifiés au produit final et sont à l'opposé des coûts directs (Curran, 2004, p. 10). Ces coûts peuvent être difficiles à identifier et difficiles à associer à une opération ou au produit final. Ces coûts sont souvent pris en compte dans les frais généraux ou comme une charge répartie dans l'entreprise, ajoutés comme une portion du coût direct de la main d'œuvre. Ces coûts peuvent inclure les coûts de l'électricité, du nettoyage, de construction, d'entretien des bâtiments, etc.

1.5.1.4 Coûts en capital

Dans tous les procédés, des coûts en capital pour les outillages et équipements sont requis à la fabrication d'une pièce et doivent être pris en compte dans le coût global du procédé (Schubel, 2012, p. 4). Le Tableau 1.6 présente un exemple d'investissement en capital requis pour la fabrication d'une pale d'éolienne.

Tableau 1.6 Équipements typique pour la fabrication
d'une pièce composite de grand volume
Tiré de Schubel (2012, p.4)

Equipment	Cost (€)
Overhead crane	500k
Gelcoat applicator	40k
Vacuum unit	20k
Tool heaters	100k
Freezer	100k
Adhesives applicator	60k

Ces coûts varient considérablement selon l'échelle de production et le type de procédé. Les items qui doivent être considérés sont présentés dans le Tableau 1.7 et démontrent que le coût d'achat initial des équipements représente seulement une proportion des coûts totaux du procédé, considérant que d'autres coûts sont présents, tels que les coûts d'installation, les coûts de maintenance, etc.

Tableau 1.7 Variables à considérer dans les coûts en capital
(équipements)
Tiré de Schubel (2012, p.4)

Variable	Description
Purchase cost	£
Residual value	%
Parts per machine	#
Length	Machine length (m)
Width	Machine width (m)
Occupancy factor	Extra room taken up by auxiliary equipment (%)
Power usage	kW
Depreciation	%
Auxiliary equipment cost	%
Installation cost	Percentage of purchase cost (%)
Reliability	Percentage time working (%)
Machine lifetime	Effective machine lifetime (years)
Machine maintenance	Factor used to account for machine maintenance cost
Tooling maintenance	Factor used to account for tooling maintenance cost

Au niveau des outillages et équipements, le coût va beaucoup varier en fonction de la dimension de la pièce, du procédé de fabrication et des volumes annuels de production. Ces paramètres déterminent également le type d'outillage, soit des moules en composites plus économiques (faible volume annuel) ou bien des outillages plus coûteux lorsque les volumes le justifient (aluminium, acier, etc.). Particulièrement pour les faibles volumes de production, les coûts d'outillages peuvent représenter une grosse proportion du coût global de fabrication. Comprendre comment les outillages seront amortis devient ainsi crucial pour obtenir un coût de procédé efficient. Cet exemple est très bref, mais il permet de démontrer que les coûts en capital ne doivent pas se limiter à l'achat de l'équipement de base, mais doivent prendre en considération des paramètres tels que le volume de production et les coûts d'installation afin d'établir un portrait plus complet. Une estimation précise des coûts en capital est importante considérant que ces coûts représentent une proportion élevée du coût total de fabrication (Schubel, 2012).

1.5.2 Variables de modélisation des coûts

Plusieurs variables sont à prendre en compte lors d'une analyse technico-économique de procédés de fabrication. Les procédés composites sont des procédés complexes et pour obtenir un modèle de coûts exact, le procédé doit être détaillé de manière précise afin de saisir et capturer les différentes sources de dépenses. Il existe différents niveaux de détails qui peuvent être utilisés lors de la définition d'un modèle. Ce niveau de détails est influencé par plusieurs facteurs, dont la disponibilité de l'information et le type de procédés et d'applications. Les variables de modélisation de coûts pouvant servir de guide afin d'effectuer une analyse technico-économique de procédés, selon Schubel (2012), sont les suivantes :

- Pièces par an;
- Capacité du plan;
- Durée de vie du programme;
- Surface de la pièce;
- Épaisseur de la pièce;
- Durée de vie des machines;
- Coût de la main d'œuvre;
- Main d'œuvre indirecte;
- Heures de travail homme par jour;
- Heures de travail machine par jour;
- Coût du bâtiment;
- Valeur résiduelle des machines;
- Coût d'installation;
- Équipement auxiliaire;
- Assurances;
- Facteur d'occupation de l'équipement;
- Frais généraux d'administration;
- Dépenses R&D;
- Matières premières;
- Coût d'électricité;
- Coûts des consommables;
- Temps de cycle;
- Maintenance des machines;
- Maintenance de l'outillage;
- Dimension des machines;
- Niveau de la main d'œuvre;
- Coût en capital des équipements;
- Fiabilité des machines;
- Type d'outillage;
- Durée de vie de l'outillage;
- Coût de l'outillage;
- Nombre de pièces par outillage;
- Taux de rejet.

Toutes ces variables permettent de modéliser les coûts de fabrication d'un procédé de fabrication. Un exemple de la structure des coûts de production regroupant l'ensemble des types de coûts est présenté à la Figure 1.14.

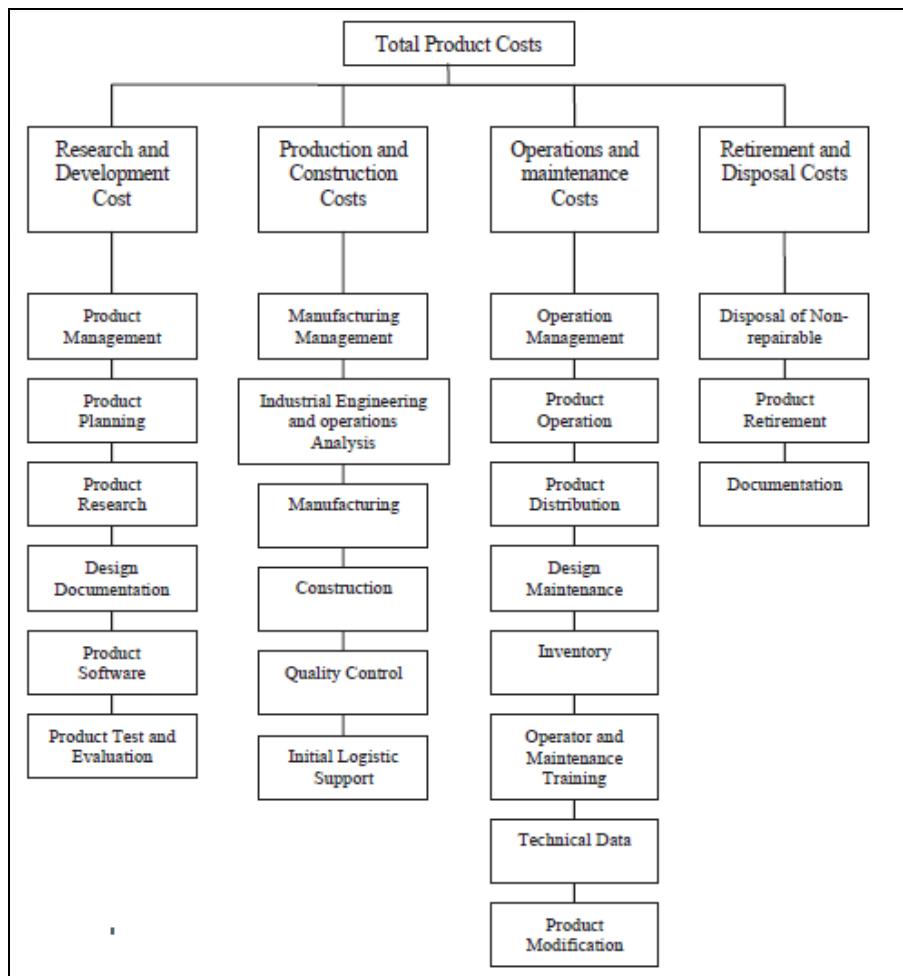


Figure 1.14 Structure des coûts de production
Tiré de Curran (2004, p. 11)

Cette structure rassemble l'ensemble des coûts, incluant la recherche et développement du produit, aux coûts de production, de maintenance et jusqu'à la fin de vie du produit. Dans le cadre de ce projet, principalement les coûts de production sont considérés.

1.5.3 Techniques de modélisation des coûts

Plusieurs approches existent et sont présentées par différents auteurs pour analyser et estimer les coûts de fabrication d'une pièce en matériaux composites. Trois approches reviennent souvent dans la littérature: l'approche paramétrique, l'estimation analogique et l'approche appelée «bottom-up costing». Le choix du type d'approche pour analyser et estimer les coûts de fabrication d'une pièce en matériaux composites varie selon l'information spécifique et le type d'analyse qui est requis (Schubel, 2012, p.1). Selon l'approche choisie, des techniques qui reviennent souvent dans la littérature sont les techniques comparatives, les modèles de coûts de procédés, les modèles de coûts paramétriques, puis la simulation du flux de procédés, expliquées par Bader (2002), Schubel (2012) et Hutchinson (2011). Ces techniques peuvent servir de guide pour l'évaluation de coûts de fabrication, selon l'application et le niveau de connaissance. Dans le cadre de ce projet de recherche, une méthode comparative de type paramétrique sera utilisée pour comparer le procédé d'infusion traditionnel avec le nouveau procédé développé. La technique utilisée s'inspire de la technique TCM («technical cost modelling», présentée par Schubel (2012) et Hutchinson (2011)).

La TCM est une méthode paramétrique combinée à une simulation du flux du procédé qui est largement utilisée dans l'industrie. Cette technique requiert toutefois une connaissance raisonnable du procédé afin de créer un modèle viable. L'exactitude des données brutes entrées dans le modèle détermine l'exactitude du modèle. La TCM est conçue pour suivre la progression logique du procédé avec une série d'équations paramétriques à chaque niveau de détails disponibles. Cette technique utilise notamment le logiciel Excel et permet de comparer des procédés entre eux afin de faciliter la prise de décision. Le modèle est séparé en plusieurs sections telles que l'outillage, l'équipement et le matériel, combinées aux variables de capacité de production, de main d'œuvre, de durée de vie du programme, etc. Cette technique permet donc de considérer l'ensemble des coûts nécessaires à une comparaison exacte entre deux procédés.

1.5.4 Effet du volume de production

Le volume de production doit être considéré dans le choix des technologies et des procédés de fabrication pour la production de pièces. Si les coûts non récurrents et les coûts fixes, tels que le coût en capital pour l'acquisition d'équipements sont très élevés, ces coûts ne pourront être amortis suffisamment rapidement si les volumes de production sont trop faibles (Schubel, 2012, p.3). Conséquemment, le choix des technologies et des procédés doit se faire en fonction des volumes de production. La Figure 1.15 présente des procédés de fabrication en fonction du nombre de pièces produites annuellement.

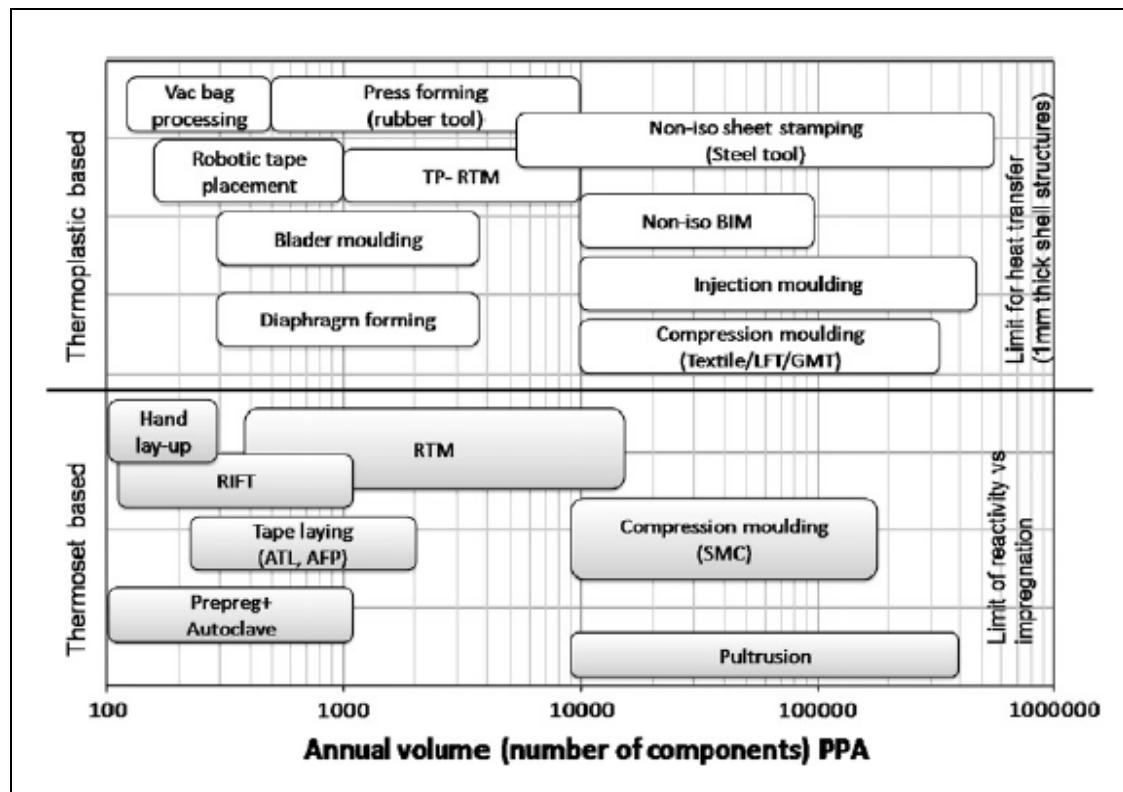


Figure 1.15 Procédé de fabrication en fonction des volumes annuels de production
Tiré de Schubel (2012, p. 3)

Le procédé d'infusion, qui est à l'étude dans ce projet, est identifié comme RIFT dans la Figure 1.15, utilisé principalement avec les résines thermodurcissables pour des volumes annuels qui varient environ entre 100 et 1000 unités, présenté selon Manson (2000).

La revue de la littérature présentée dans cette section a permis de traiter et d'expliquer les problématiques ciblées par le projet de recherche. Le procédé d'infusion ainsi que le moulage sous vide a été expliqué, suivi des phénomènes d'imprégnation et de la formation des vides et des porosités dans les procédés d'injection. La compréhension de ces phénomènes est importante afin d'optimiser ce type de procédé de fabrication. Une revue des élastomères pour la fabrication de membrane réutilisable a également été présentée, permettant d'identifier que les silicones et les polyuréthanes sont les matériaux privilégiés pour ce type d'application. Plusieurs types de noyaux en mousse pour la fabrication de constructions sandwiches ont également été présentés, provenant de différentes compagnies et de différentes matières polymères. Puis finalement, une revue de la terminologie et technique de modélisation des coûts fabrication des matériaux composites a été présentée, permettant d'identifier les types de coûts qui seront analysés dans le cadre de projet.

Le chapitre 2 qui suit présente la revue de procédé initialement en production chez Hutchinson, première étape afin d'atteindre les objectifs d'amélioration ciblés par le projet, dans le but de bien comprendre les faiblesses ainsi que d'obtenir des valeurs de référence.

CHAPITRE 2

REVUE DU PROCÉDÉ À L'ÉTUDE

Dans ce chapitre, la revue du procédé d'infusion initialement utilisé par Hutchinson est présentée, à travers des pièces typiques du cockpit. L'objectif est d'analyser le procédé dans un contexte industriel afin d'obtenir un portrait au niveau des temps et des coûts de fabrication ainsi que de la robustesse du procédé. Cette étude permettra d'identifier les faiblesses du procédé ainsi que de valider les sources d'amélioration ciblées dans le chapitre 1. L'étude servira également de référence afin de mesurer les performances des nouvelles techniques de fabrication développées dans le cadre de ce projet. La technique d'analyse utilisée s'inspire de la technique TCM présentée dans la revue de la littérature à la section 1.5. Les coûts récurrents de production sont étudiés, c'est-à-dire les coûts de la main d'œuvre et des matériaux, incluant les matières premières ainsi que les consommables de fabrication. Le taux utilisé pour calculer le coût de la main d'œuvre inclut les coûts directs et indirect, mais exclut les frais généraux fixes et représente un taux typique pour de la main d'œuvre aéronautique au Québec. Se référer à la section 1.5.1 de la revue de la littérature pour la définition des types de coûts. L'ensemble des coûts est majoré, toute proportion gardée, afin de protéger la confidentialité de l'entreprise. Les coûts non-récurrents ne sont donc pas considérés dans cette étude.

Une revue globale du procédé est tout d'abord présentée en se basant sur des pièces typiques du cockpit sélectionnées pour l'analyse, suivie d'une étude de cas plus détaillée sur l'une de ces pièces. Cette revue est basée sur des pièces typiques représentant les problématiques du procédé d'infusion intégrant les techniques initiales. Les défauts générés avec le procédé initial sont également présentés afin de quantifier la robustesse du procédé, suivis des requis techniques imposés aux pièces produites par le procédé à l'étude.

2.1 Revue globale

Les pièces en matériaux composites ciblées par le projet et produites par le procédé d'infusion sont des panneaux d'habillage pour l'intérieur des cockpits d'avions d'affaires de Bombardier, plus précisément le Global Express. Cet avion se classe comme un avion d'affaires et est considéré comme l'un des avions les plus luxueux sur le marché. L'un des looks recherchés est un fini carbone, avec un aspect de surface lustré et un enlignement parfait des fibres. Aucun défaut de surface n'est accepté. Plusieurs pièces dans le cockpit sont constituées majoritairement de fibres de carbone principalement dû à ces requis esthétiques de luxe. En effet, la fibre de carbone aurait pu être utilisée que localement dans les zones critiques, considérant que la fibre de verre, moins coûteuse, aurait été suffisamment performante selon les requis imposés à des panneaux d'habillage. Les requis techniques pour ces panneaux sont présentés plus loin dans ce chapitre. L'ajout de ces requis esthétiques amène plusieurs problèmes techniques, dont la présence récurrente de défauts reliés au manque de robustesse du procédé initial, tel que la présence récurrente de vides et de porosités. Toutefois, il faut également mentionner que les autres pièces qui ne sont pas en fini carbone, engendrent elles aussi des complications malgré que ces dernières n'ont pas les mêmes requis esthétiques étant recouvertes de cuir avant l'installation dans le cockpit. Encore une fois, le manque de robustesse du procédé entraîne des défauts nécessitant des réparations et des temps de finition supplémentaires posant ainsi problème au sein de l'entreprise partenaire pour la fabrication des panneaux d'habillage.

Une représentation des panneaux d'habillage du cockpit et une modélisation 3D de l'ensemble des pièces fabriquées par infusion sont illustrées par la Figure 2.1.

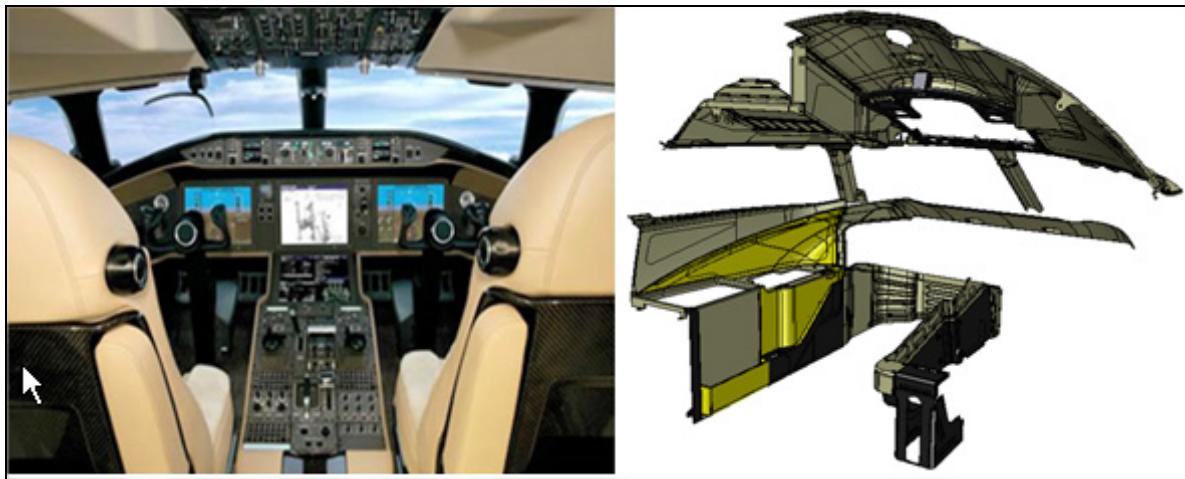


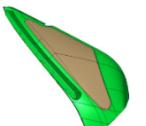
Figure 2.1 Panneaux d'habillage du cockpit du Global Express

Ces panneaux d'habillage sont les pièces que l'on peut toucher une fois l'assemblage du cockpit complété, recouvrant la structure et l'avionique. Un total de 70 panneaux composites de différentes constructions sont fabriqués par infusion, combinés à plusieurs sous-composants permettant l'assemblage sur la structure. Afin d'analyser le procédé dans son ensemble, les 70 pièces du cockpit sont séparées en trois catégories selon leur type de construction, c'est-à-dire fibre de verre monolithique, construction sandwiche et fini carbone. Afin de simplifier la lecture et l'analyse, chacune des trois catégories est représentée par une pièce typique de la catégorie, représentée en jaune sur la Figure 2.1. Le côté droit du mur de l'avion n'est pas illustré, toutefois on doit considérer que les trois pièces typiques ont leur miroir du côté droit. Ces trois pièces typiques serviront de référence afin de mesurer les gains amenés par les nouvelles techniques de fabrication.

La première catégorie de construction est celle des fibres de verre monolithiques, regroupant différentes configurations et empilements de renforts. Le cockpit contient 31 pièces en fibres de verre monolithiques. Certaines de ces pièces sont renforcées localement de fibres de carbone pour augmenter la rigidité selon des requis spécifiques imposés par le client. Ensuite, il y a les constructions sandwiches pour les pièces nécessitant une rigidité encore plus importante. Ces constructions sont principalement constituées de fibres de verre et d'un

noyau de type nid d'abeille et sont problématiques au niveau des temps de fabrication, avec une étape additionnelle de laminage contact pour l'ajout du noyau. Le cockpit contient 9 pièces de type construction sandwiche. Puis, il y a les pièces avec un fini carbone qui représente un total de 30 pièces. Une analyse des temps et des coûts de fabrication pour chaque catégorie basée sur une pièce typique est présentée dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Pièces typiques du cockpit

Construction	Quantité par cockpit	Pièce de référence	Temps de fabrication (min)	Coût de la main d'œuvre (\$)	Coût des consommables (\$)	Coût des matières premières (\$)	Coût total par pièce ^a (\$)
Fibre de verre monolithique	31		210	315,00	49,26	102,57	466,83
Construction sandwiche	9		330	495,00	98,46	245,79	839,25
Fini carbone	30		255	382,50	40,11	194,28	616,89
Moyenne pondérée :			265 min	367,07 \$	51,66 \$	160,29 \$	579,02 \$

^a Les coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

Les temps rapportés dans le Tableau 2.1 sont des temps moyens regroupant plusieurs fabrications récupérés dans le système informatique grâce au système MRP («materials resources planning»)² implanté au sein de l'entreprise. Chaque pièce est ainsi suivie dans le cycle de fabrication complet rassemblant le temps de chaque opération et incluant les matières consommées. Ces données, combinées à des relevés sur le plancher de production, ont été utilisées pour calculer le coût de la main d'œuvre ainsi que celui des matériaux.

Comme mentionné précédemment, le coût de la main d'œuvre est calculé avec un taux typique associé à la fabrication aéronautique au Québec excluant les frais généraux fixes et est majoré avec un taux gardé secret afin de protéger la confidentialité de l'entreprise. Le coût des matériaux est majoré avec le même taux afin de conserver la proportion entre les différentes catégories de coûts. Les coûts sont donc présentés à titre de référence afin d'analyser la distribution des coûts selon la main d'œuvre, les matières premières et les consommables et serviront à mesurer les gains des nouvelles techniques de fabrication développées dans le cadre de ce projet. Les coûts moyens sont pondérés en fonction du nombre de pièces de chaque catégorie dans le cockpit afin d'avoir une moyenne plus représentative de la réalité.

Les temps présentés regroupent l'ensemble des opérations reliées au procédé d'infusion, de la découpe des tissus à la découpe de la pièce finale, toutefois les étapes d'assemblage ne sont pas incluses. Des études de temps et de mouvements sur le plancher de production ont également été effectuées afin de valider les temps et la quantité de matière récupérée dans les gammes de fabrication. Une description détaillée du procédé est présentée dans l'étude de cas à la section 2.3.

²Système MRP: Provient d'un terme anglais, «Materials Resources Planning»: consiste en un système informatisé utilisé pour la gestion, la planification et le suivi des ressources de production.

L'analyse du Tableau 2.1 démontre que la main d'œuvre représente la majorité des coûts de fabrication, telle qu'illustrée sur la Figure 2.2.

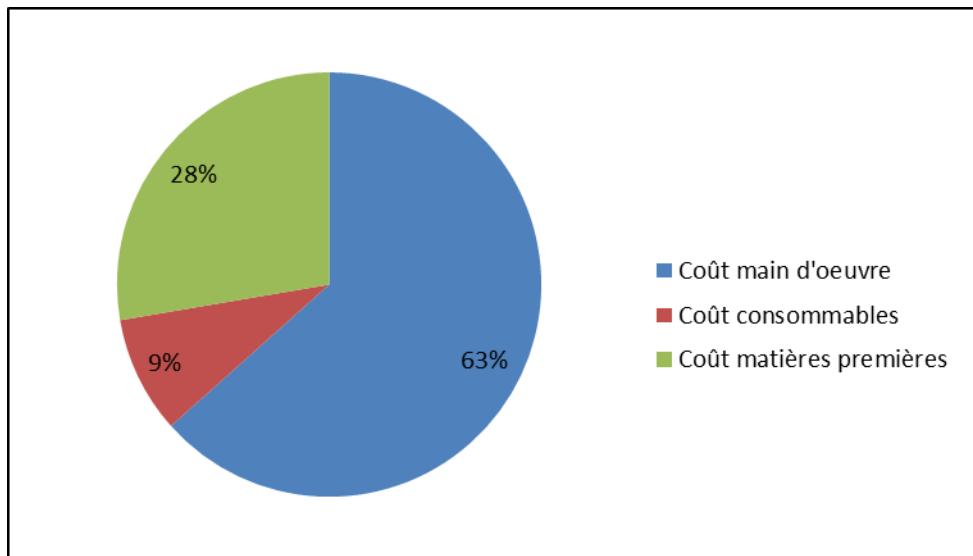


Figure 2.2 Distribution des coûts de fabrication moyens

Cette distribution moyenne des coûts de fabrication est basée sur les trois pièces typiques présentées précédemment. Dans les procédés de fabrication des composites, la main d'œuvre représente habituellement la majorité des coûts de fabrication, car les procédés sont souvent artisanaux avec plusieurs étapes manuelles. Le procédé d'infusion initial utilisé chez Hutchinson n'y fait pas exception avec un coût en main d'œuvre représentant plus de 60 % du coût de fabrication (Figure 2.2), basé sur les coûts moyens. Améliorer les procédés afin de diminuer les coûts de fabrication devient primordial afin de rester compétitif dans un marché manufacturier avec des pays émergeants qui ont un faible coût de la main d'œuvre, tels que le Mexique et l'Inde.

Les trois catégories de constructions seront comparées entre elles dans le chapitre 4 afin de mesurer les gains des améliorations amenées dans le procédé initial au niveau des temps et des coûts de fabrication. Spécifiquement, les pièces de type construction sandwiche ont été choisies pour l'étude de cas puisqu'elles englobent le plus grand nombre d'étapes de fabrication, avec des temps de fabrication et un coût en matériaux plus élevés. Ces

constructions sont problématiques et représentent un goulot dans le département d'infusion entraînant des difficultés à respecter les cadences de production demandées. L'étude de cas portera donc sur ce type de construction en reprenant la pièce typique de cette catégorie. Cette étude de cas présentant une analyse plus détaillée du procédé d'infusion initialement utilisé dans l'entreprise est présentée à la section 2.3. Tout d'abord, une description des matières premières utilisées dans la fabrication des pièces du cockpit est présentée dans la section 2.2.

2.2 Description des matières premières

Cette section a pour objectif de présenter les tissus et la résine mise en forme dans le procédé d'infusion pour la fabrication des pièces du cockpit ciblées par le projet. Les données proviennent des fiches techniques des fournisseurs. Les tissus et le type de résine ne peuvent pas être modifiés afin d'améliorer les performances du procédé et atteindre les objectifs, puisqu'ils sont imposés par l'entreprise partenaire.

2.2.1 Tissus

Trois types de tissus sont utilisés dans les pièces typiques ciblées par le projet (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 Type de tissus

Type	Fibre	Poids des tissus		Armure	Coût ^a (\$/m ²)
		0z/vg ²	g/m ²		
1	Verre E	9,60	325	Taffetas	13,32
2	Verre E	5,85	198	Taffetas	16,47
3	Carbone 6K	11,60	405	Sergé	258,27

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées

Peu d'information est présentée considérant que les tissus sont imposés et ne peuvent être modifiés. On peut tout de même constater que la fibre de carbone est extrêmement dispendieuse par rapport à la fibre de verre.

2.2.2 Résine

La résine de type thermodurcissable utilisée dans le procédé d'infusion est un époxy bicomposante. Le Tableau 2.3 et le Tableau 2.4 présentent les caractéristiques et propriétés récupérées sur la fiche technique de la résine utilisée pour la fabrication des pièces du cockpit.

Tableau 2.3 Caractéristiques de la résine

Caractéristiques	Description
Type de Résine	Thermodurcissable de type époxy, bicomposante
Description	Résine ignifuge, sans halogène et résistance aux UV
Ratio de mélange (massique)	100R/12D
Densité (mixée)	1,14
Viscosité (mixée)	1780 cP (à 25 °C)
Temps de travail (sur 200 gms)	36 min
Cycle de cuisson complet suggéré	7 jours à température ambiante
Cuisson accélérée	24 h à T° ambiante + 4 h à 100 °C
Couleur (mixée)	Ambré clair
Durée de vie (résine et durcisseur)	2 ans

Les caractéristiques, telles que la viscosité, le temps de travail et le cycle de cuisson recommandé, devront également être prises en compte dans l'amélioration du procédé. Il est à noter que la viscosité est élevée étant près de 2000 cP, considérant que la plage de viscosité recommandée pour le procédé est de 50 à 1000 cP, comme présenté dans la section 1.1 du chapitre 1.

Le Tableau 2.4 présente les propriétés physiques identifiées sur la fiche technique de la résine époxy utilisée dans la fabrication des pièces du cockpit.

Tableau 2.4 Propriétés physiques

Propriétés	Description
Résistance en tension ^a	185 MPa
Élongation en tension ^b	2,3 %
Résistance en flexion ^a	210 MPa
Module en flexion ^a	13 700 MPa
Résistance en compression ^b	125 MPa
Retrait ^b	0,0015
Dureté après polymérisation complète ^b	85 Shore D
Température de fléchissement sous charge à 66 Psi ^b	52 °C
Température de fléchissement sous charge à 264 Psi ^b	49 °C
Température de fléchissement sous charge à 66 Psi ^{b,c}	90 °C

^aTesté sur un laminé de 6 plis de fibre de verre type 1 avec une orientation de 0° (Tableau 2.2), cuisson sept jours à 25 °C.

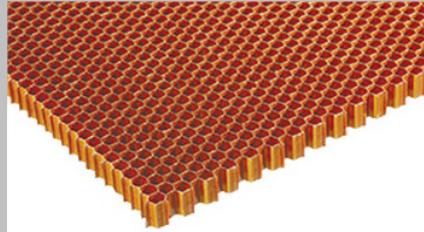
^bTesté sur résine pure, cuisson sept jours à 25 °C.

^cPost-cuisson de quatre heures à 100 °C.

2.2.3 Noyau

Dans le procédé initial, les 9 pièces renforcées d'un noyau sont constituées de nid d'abeille d'aramide de différentes épaisseurs. Un résumé des caractéristiques de ce type de noyau est présenté dans le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 Caractéristiques du noyau de type nid d'abeille PN2

Caractéristiques	Description
Identification	PN2-1/8-3.0
Descriptif	Nid d'abeille en fibre d'aramide de grade aéronautique (DuPont Nomex®)
Fournisseur	Plascore
Grosseur des cellules	1/8 pouces
Densité	48 kg/m ³ (3,0 lb/ft ³)
Résistance en compression	2,0 MPa
Résistance en cisaillement (direction «L»)	1,41 MPa
Résistance en cisaillement (direction «W»)	0,72 MPa
Illustration	

2.3 Étude de cas

L'étude de cas reprend la pièce typique de la catégorie des constructions sandwiches présentée dans le Tableau 2.1. Comme mentionné précédemment, ces configurations sont problématiques au niveau des temps et des coûts de fabrication, avec une étape additionnelle de moulage sous vide qui est nécessaire afin d'insérer le noyau de type nid d'abeille dans la pièce. Cette section présente une description de la pièce ciblée, les étapes de fabrication du procédé initial, suivies des coûts de fabrication.

Les données au niveau des temps et des matériaux proviennent d'étude de temps et mouvements ainsi que de l'analyse des gammes de fabrication de l'entreprise. Les résultats de cette analyse permettront de comprendre la distribution des coûts de fabrication et

serviront de référence pour mesurer les gains des nouvelles techniques développées dans ce projet, présentés au chapitre 4.

2.3.1 Description de la pièce

La pièce analysée dans cette étude, identifiée en jaune dans la Figure 2.3, représente l'un des panneaux du côté gauche du cockpit. Cette pièce a également son miroir du côté droit, non montré sur la Figure 2.3. Ce panneau supporte des charges reliées à des instruments ajoutés par Bombardier lors de l'assemblage sur la structure, d'où la présence d'une construction sandwiche afin d'augmenter la rigidité. Cette pièce est typique des pièces produites par le procédé d'infusion avec des temps de fabrication très longs et d'une qualité peu constante.

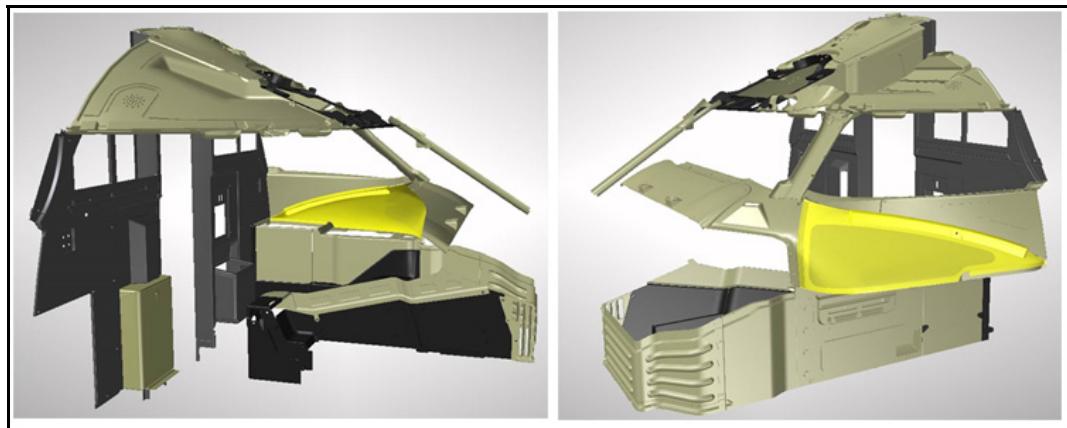
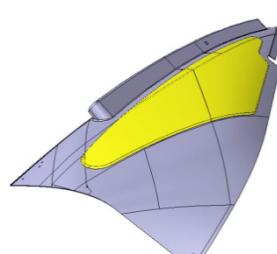


Figure 2.3 Étude de cas, panneau du côté «Side Wall Lower Panel»

Le Tableau 2.6 présente les caractéristiques de base de la pièce utilisée afin de calculer les coûts des matériaux.

Tableau 2.6 Étude de cas, description de la pièce

Items	Description						
Surface de la pièce	0,342 m ²						
Périmètre	2,833 m						
Poids moyen	0,884 kg						
«Side Wall Lower Panel»	<p>Construction (en jaune):</p>  <table border="1"> <tr><td>Fibre de verre 5,5 oz/vg²</td></tr> <tr><td>Fibre de verre 5,5 oz/vg²</td></tr> <tr><td>Nid d'abeille 0,220 po</td></tr> <tr><td>Fibre de verre 9,6 oz/vg²</td></tr> <tr><td>Fibre de verre 9,6 oz/vg²</td></tr> <tr><td>MOULE</td></tr> </table> <p>En gris: quatre plis de fibre de verre Épaisseur moyenne : 0,045 po</p> <p>En jaune: construction sandwiche Épaisseur moyenne : 0,265 po</p>	Fibre de verre 5,5 oz/vg ²	Fibre de verre 5,5 oz/vg ²	Nid d'abeille 0,220 po	Fibre de verre 9,6 oz/vg ²	Fibre de verre 9,6 oz/vg ²	MOULE
Fibre de verre 5,5 oz/vg ²							
Fibre de verre 5,5 oz/vg ²							
Nid d'abeille 0,220 po							
Fibre de verre 9,6 oz/vg ²							
Fibre de verre 9,6 oz/vg ²							
MOULE							

2.3.2 Étapes de fabrication

Le Tableau 2.7 présente les étapes de fabrication du procédé de base initialement utilisé par l'entreprise. Ces étapes seront reprises dans le chapitre 4 intégrant les nouvelles techniques développées dans le cadre de ce projet.

Tableau 2.7 Étapes de fabrication du procédé d'infusion initial

#	Étapes	Temps réel (délai)	Représentation
1	Découpe des tissus et consommables - Utilisation d'une machine de découpe à commande numérique	15 min	
2	Préparation du moule - Nettoyage à l'alcool - Traitement de surface - Récurrent : une couche d'agent démolant - Complet (~ aux dix pièces) : deux couches d'agent scellant + trois couches d'agent démolant	5 min (15 min de délai)	
3	Drapage des tissus - Deux couches de fibre de verre 9,6 oz/vg ² - Utilisation de ruban adhésif pour le maintien des tissus	40 min	
4	Positionnement des consommables - Tissus d'arrachage - Médium d'infusion - Montage et positionnement de l'infuseur avec le tuyau spiral et le médium	20 min	
5	Mise sous vide - Fermeture du sac avec ruban scellant - Application du vide - Test d'étanchéité	45 min	

#	Étapes	Temps réel (délai)	Représentation
6	Préparation et dégazage de la résine <ul style="list-style-type: none"> - Pesée de la résine et du durcisseur - Mélange manuel - Dégazage sous vide 	10 min	 
7	Infusion et polymérisation <ul style="list-style-type: none"> - Pression de vide maximale pour l'infusion et la consolidation (-29.9 po Hg) - Résine et moule à température ambiante pendant l'infusion et la polymérisation - Temps minimum avant démoulage: 16 heures 	15 min (16 h de délai)	
8	Démoulage partiel <ul style="list-style-type: none"> - Retrait des consommables - Sablage des imperfections telles que des plis de sac 	15 min	
9	Préparation de la résine <ul style="list-style-type: none"> - Pesée de la résine et du durcisseur - Mélange manuel 	5 min	
10	Positionnement du noyau <ul style="list-style-type: none"> - Utilisation d'un gabarit de positionnement - Maintien du noyau avec résine et adhésif pulvérisé à la canette 	10 min	

#	Étapes	Temps réel (délai)	Représentation
11	Laminage contact des tissus et consommables <ul style="list-style-type: none"> - Laminage du noyau et des tissus (deux couches de verre 5,5 oz/vg²) - Applications des consommables; film d'arrachage et feutre absorbant 	40 min	
12	Mise sous vide et polymérisation <ul style="list-style-type: none"> - Fermeture du sac avec ruban scellant - Application du vide - Température ambiante - Temps minimum avant démoulage: 16 heures 	30 min (16 h de délai)	
13	Démoulage complet de la pièce	15 min	
14	Découpe finale <ul style="list-style-type: none"> - Utilisation d'une machine à commande numérique à cinq axes - Utilisation d'un support de découpe pour supporter la pièce pendant la découpe 	10 min	
15	Finition <ul style="list-style-type: none"> - Nettoyage de la pièce - Sablage des défauts (surplus de résine, plis de sacs) 	55 min	
16	Pièce finale <ul style="list-style-type: none"> - Délais de sept jours avant polymérisation complète 	Total: 330 min (32,25 h de délai)	

On constate qu'il y a de nombreuses étapes nécessaires à la fabrication d'une pièce et que le procédé initial comporte plusieurs étapes manuelles. Les temps reliés à ces étapes ainsi que la quantité de matières premières et de consommables requis pour une fabrication sont présentés dans la section 2.3.3 afin d'évaluer le coût de fabrication.

2.3.3 Coût de fabrication

Les coûts de fabrication considérés dans cette analyse sont les coûts de la main d'œuvre calculés avec les temps de fabrication, en plus du coût des matériaux qui sont séparés en deux catégories. Tout d'abord, les coûts des consommables, présentés dans le Tableau 2.8, qui représentent les matières sacrificielles requises à la fabrication, mais ne se retrouvant pas dans la pièce finale.

Tableau 2.8 Coûts des consommables du procédé d'infusion initial

#	Description	Coût unitaire	Quantité/pièce	Coût/pièce ^a
1	Pellicule d'ensachage	6,99 \$/m	3 m	20,97 \$
2	Ruban adhésif	79,65 \$/rl	0,1 rl	7,97 \$
3	Ruban scellant	14,22 \$/rl	0,5 rl	7,11 \$
4	Tuyau spiral 3/8 po	4,17 \$/m	3,5 m	14,60 \$
5	Tuyau spiral 1/2 po	5,43 \$/m	1 m	5,43 \$
6	Tuyau rigide	0,60 \$/m	0,5 m	0,30 \$
7	Tissu d'arrachage - «PeelPly»	15,27 \$/m ²	1 m ²	15,27 \$
8	Média d'infusion	6,96 \$/m ²	1 m ²	6,96 \$
9	Film perforé	15,15 \$/m ²	1 m ²	15,15 \$
10	Feutre absorbant	4,71 \$/m ²	1 m ²	4,71 \$
			TOTAL	98,46 \$

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

Ces matériaux jetés après chaque fabrication représentent non seulement un coût, mais en plus ont un impact négatif sur l'environnement. Ce facteur est préoccupant considérant la quantité et le type de déchets générés. Ces matériaux sont difficilement recyclables et sont souillés à l'époxy, une résine thermodurcissable avec une réaction irréversible. Il devient donc pertinent de diminuer au maximum l'utilisation de périsables dans le procédé d'infusion.

La deuxième catégorie de coûts est les matières premières qui consistent aux renforts, la résine et le noyau. Dans le cas de la pièce à l'étude, deux types de tissés de fibre de verre de

masses surfaciques différentes sont utilisés. Ensuite, il y a une résine époxy incluant son durcisseur, puis le noyau de type nid d'abeille pour augmenter la rigidité de la pièce (Tableau 2.9).

Tableau 2.9 Coût des matières premières du procédé d'infusion initial

	Description	Coût unitaire	Quantité/pièce	Coût/pièce ^a
1	Fibre de verre 9,6 oz/vg ²	13,32 \$/m ²	1,675 m ²	27,59 \$
2	Fibre de verre 5,8 oz/vg ²	16,47 \$/m ²	1,675 m ²	22,31 \$
3	Résine époxy (inclus durcisseur)	122,73 \$/kg	1,40 kg	171,82 \$
4	Noyau (nid d'abeille)	116,58 \$/m ²	0,21 m ²	24,07 \$
				TOTAL 245,79 \$

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

Parmi la quantité de résine par pièce, près de 30 % de perte est considérée dans le procédé initial, due à la quantité perdue dans les tuyaux d'alimentation et le surplus de résine dans le pot de résine nécessaire pour éviter l'introduction d'air dans le montage. L'étape de moulage contact amène également une quantité de résine supplémentaire. Un facteur de perte est également inclus dans la quantité de fibres et de noyau, puisque les patrons ne sont pas de formes régulières. Par contre, cette perte est minime étant donné que la découpe de ces matériaux est effectuée sur un système de découpe automatisé et que le placement des patrons est optimisé par un logiciel.

Les quantités par pièce proviennent des gammes de fabrication et ont été validées lors d'analyse sur le plancher de production. La distribution des coûts incluant les consommables et les matières premières est présentée à la Figure 2.4.

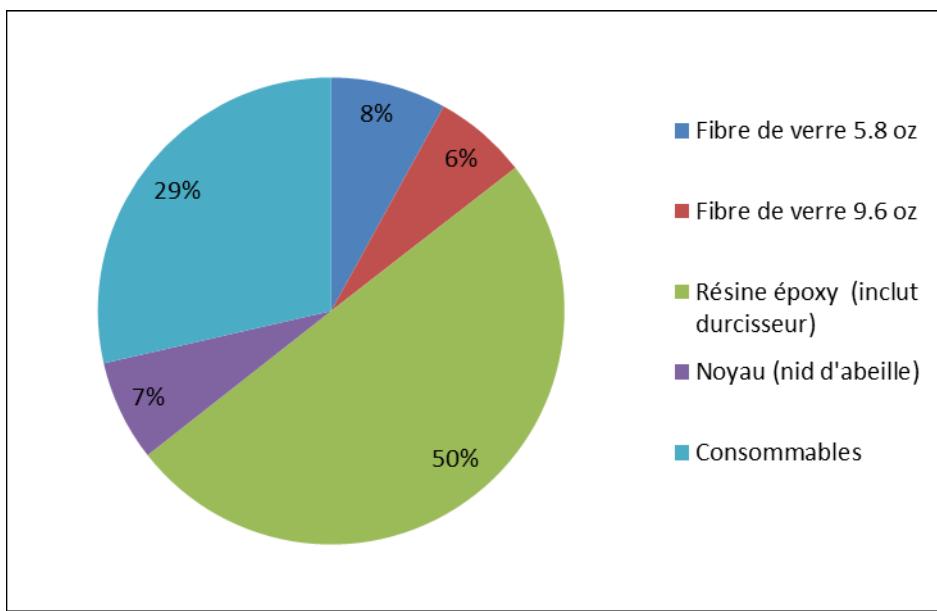


Figure 2.4 Proportion des coûts des matériaux

La résine représente le coût le plus important dans les matériaux dû à son coût unitaire très élevé et la perte générée par le procédé. Diminuer la perte de résine représente ainsi une piste d'amélioration afin de diminuer les coûts de fabrication. Le coût des consommables rassemble également une bonne proportion des coûts des matériaux et sera donc également ciblé par l'amélioration. Les autres coûts sont distribués plus équitablement entre 6 et 8 %.

Le Tableau 2.10 reprend les étapes de fabrication présentées au Tableau 2.2 incluant les temps et les coûts associés à chaque opération.

Tableau 2.10 Coût de la main d'œuvre du procédé d'infusion initial

#	Opération	Temps homme par pièce (min)	Délais (h)	Coût par pièce ^a
1	Découpe des tissus et consommables	15	-	22,50 \$
2	Préparation du moule (traitement récurrent)	5	0,25	7,50 \$
3-4	Drapage des tissus et consommables	60	-	90,00 \$
5	Mise sous vide	45	-	60,00 \$
6	Préparation et dégazage de la résine	10	-	15,00 \$
7	Infusion et polymérisation	15	16	22,50 \$
8	Démoulage partiel	15	-	22,50 \$
9	Préparation de la résine	5	-	7,50 \$
10-11	Positionnement du noyau et moulage contact	50	-	75,00 \$
12	Mise sous vide et polymérisation	30	16	45,00 \$
13	Démoulage complet	15	-	22,50 \$
14	Découpe finale (inclus temps d'installation)	10	-	30,00 \$
15-16	Finition (Nettoyage/sablage) et pièce finale	55	-	82,50 \$
TOTAL		330	32,25^b	495,00 \$

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

^bUn délai de 7 jours est compté afin de considérer la polymérisation complète.

Les temps de polymérisation (délais) sont des temps cachés, considérant qu'il n'y a pas de temps relié à la main d'œuvre qui est associé à ces étapes. On constate tout de même que deux cycles de polymérisation sont requis ajoutant un 16 h additionnel de délai en comparaison aux pièces monolithiques, doublant ainsi les délais avant l'obtention de la pièce finale. Les étapes 8 à 12 sont reliées à l'insertion du noyau, représentant ainsi une autre piste d'amélioration afin de diminuer les temps et les coûts de fabrication.

La Figure 2.5 présente la distribution des temps d'opération dans le procédé de fabrication à l'étude reprenant les temps présentés dans le Tableau 2.10.

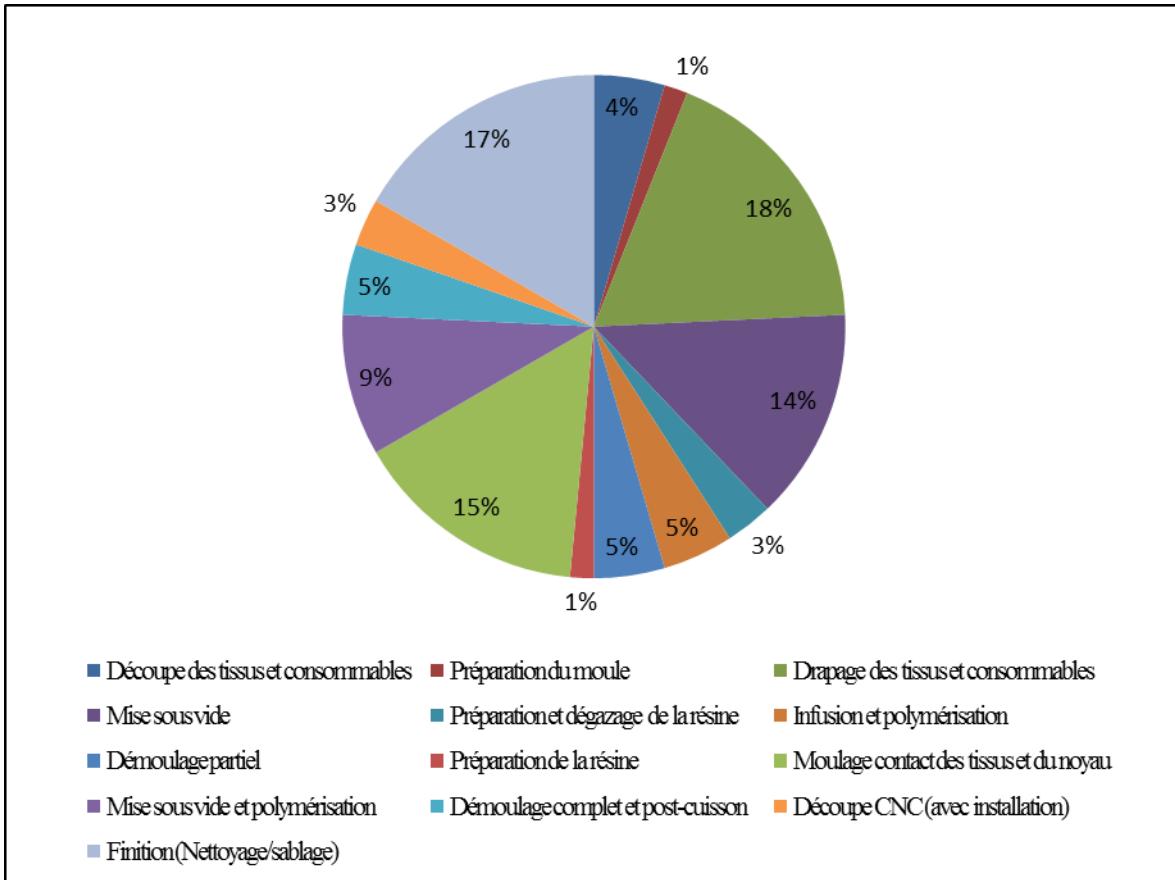


Figure 2.5 Proportion des coûts de la main d'œuvre

Il est possible de constater que les étapes de drapage (18 %), de mise sous vide (9 % et 14%), de finition (17 %) ainsi que les étapes reliées au laminage de la construction sandwiche (29 % combinées) sont les plus longues du procédé. Ces étapes seront ciblées dans l'amélioration afin de diminuer les temps globaux de fabrication.

2.3.4 Résumé des coûts de fabrication

Le coût total de fabrication de la pièce typique à l'étude peut être obtenu en additionnant le coût des matériaux, des consommables et des matières premières, présenté au Tableau 2.11.

Tableau 2.11 Résumé des coûts de fabrication du procédé d'infusion initial

Étapes	Coûts ^a
Main d'œuvre	495,00 \$
Matières premières	245,79 \$
Consommables	98,46 \$
TOTAL	839,25 \$

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

La distribution de ces coûts est présentée sur la Figure 2.6.

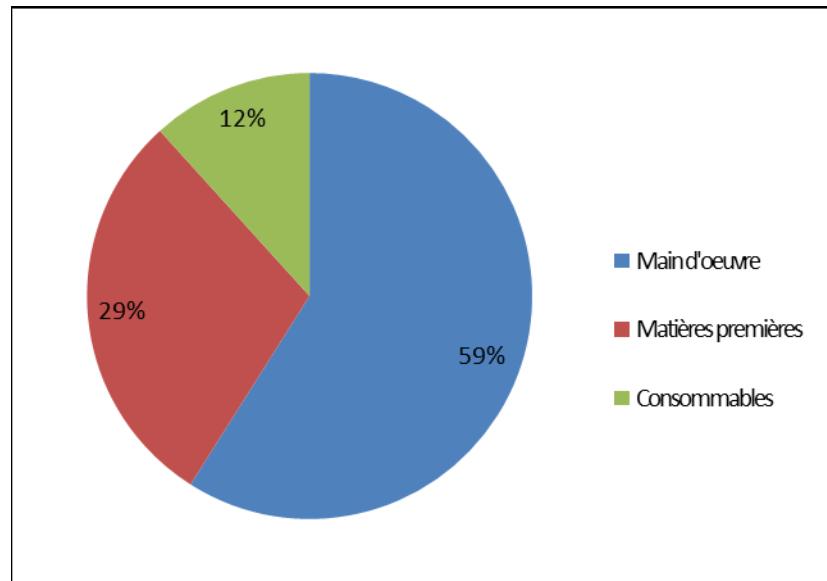


Figure 2.6 Proportion des coûts de fabrication du procédé initial, étude de cas

On constate que la main d'œuvre représente la majorité des coûts de fabrication, avec près de 60 % des coûts, les matières premières avec 29 % des coûts et les consommables avec 12 %. La distribution des coûts présentée à la Figure 2.6 est similaire à la distribution de la Figure

2.2, qui présentait la distribution basée sur les coûts moyens sur l'ensemble des pièces du cockpit, montrant ainsi que la distribution des coûts est similaire entre les différents types de pièces du cockpit (Tableau 2.1). Les temps de fabrication élevés expliquent les coûts élevés de la main d'œuvre. Les améliorations ciblées dans ce projet ont comme objectif de diminuer ces coûts.

En plus des coûts de fabrication reliés à la main d'œuvre et aux matériaux, les coûts reliés aux problèmes de robustesse du procédé ne sont pas à négliger. Les défauts ou non-conformités amenés par le procédé initial génèrent des rejets de pièces ou peuvent parfois être réparés, mais dans les deux cas, des coûts supplémentaires sont générés, aspect qui sera traité dans la section 2.4.

2.4 Analyse de la robustesse du procédé

Afin de quantifier la robustesse du procédé, les non-conformités générées par le procédé d'infusion sont analysées en répertoriant les types de défauts récurrents. Les défauts sont enregistrés par les inspecteurs du département et répertoriés dans le système informatique de la compagnie (système MRP) pouvant ensuite être analysés dans des fiches de calcul Excel. Cette analyse rassemble les non-conformités reliées au département d'infusion pour les pièces du cockpit ciblées par ce projet, sur une période d'un an, pour l'année 2012 (Tableau 2.12). Cette analyse sera reprise pour l'année 2014 avec le procédé d'infusion amélioré, présenté dans le chapitre 4, afin de mesurer les gains amenés par le projet de recherche au niveau de la robustesse du procédé.

Tableau 2.12 Analyse des non-conformités liées au procédé d'infusion initial

Type de non-conformités du département d'infusion	Quantité	Ratio des non-conformités (%)	Ratio des pièces produites (%)
Mauvais alignement des fibres, fibre en surface	125	24.2 %	4.8 %
Défauts de surface, esthétique, lustre insuffisant	104	20.2 %	4.0 %
Porosités et vides	152	29.5 %	5.8 %
Déclaminage	9	1.7 %	0.3 %
Contaminants	39	7.6 %	1.5 %
Zone sèche en résine	6	1.2 %	0.2 %
Manque de matériel	27	5.2 %	1.0 %
Mauvaise construction	47	9.1 %	1.8 %
Autres (panne électrique, problème de vide, etc.)	7	1.4 %	0.3 %
Total	516	100.0 %	19.8 %
Total annuel de pièces produites			2600
Taux de non-conformités			19.8 %

La dispersion des non-conformités est présentée sur la Figure 2.7.

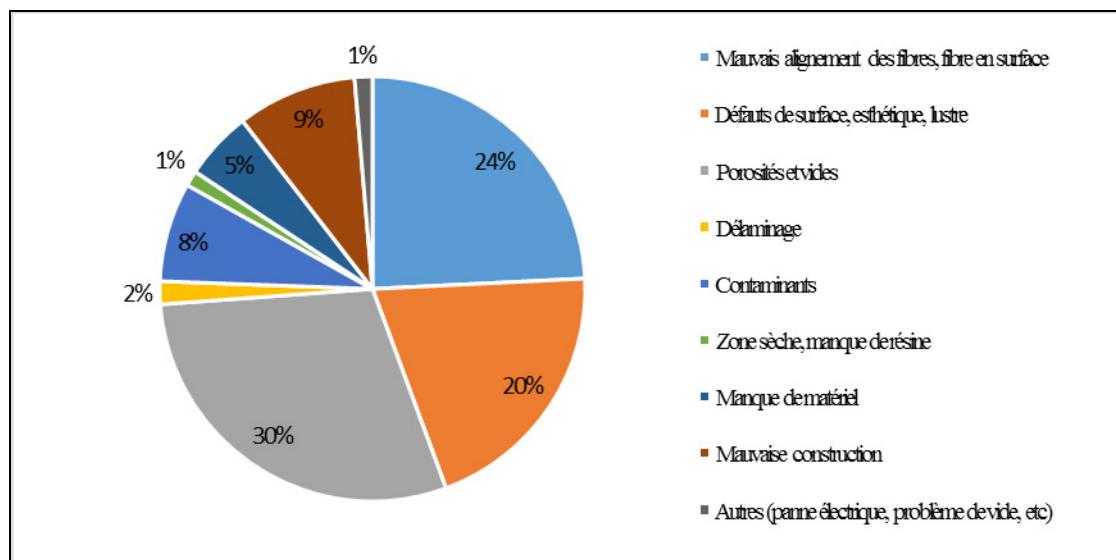


Figure 2.7 Dispersion des non-conformités liées au procédé d'infusion initial

Si possible, certaines de ces non-conformités sont réparées, sinon les pièces sont rejetées et détruites. La Figure 2.7 illustre la proportion de ces différents défauts. On constate à l'analyse des résultats que la présence de porosités et de vides représente une très forte proportion des non-conformités (29,5 %), suivi des défauts reliés aux tissus (24,2 %) et des défauts esthétiques (20,2 %). Comme présenté au chapitre 1, la présence de vides et de porosités peut être causée par une multitude de facteurs. La Figure 2.8 présente des exemples de porosités et de vides causant des non-conformités sur des pièces avec un fini carbone.

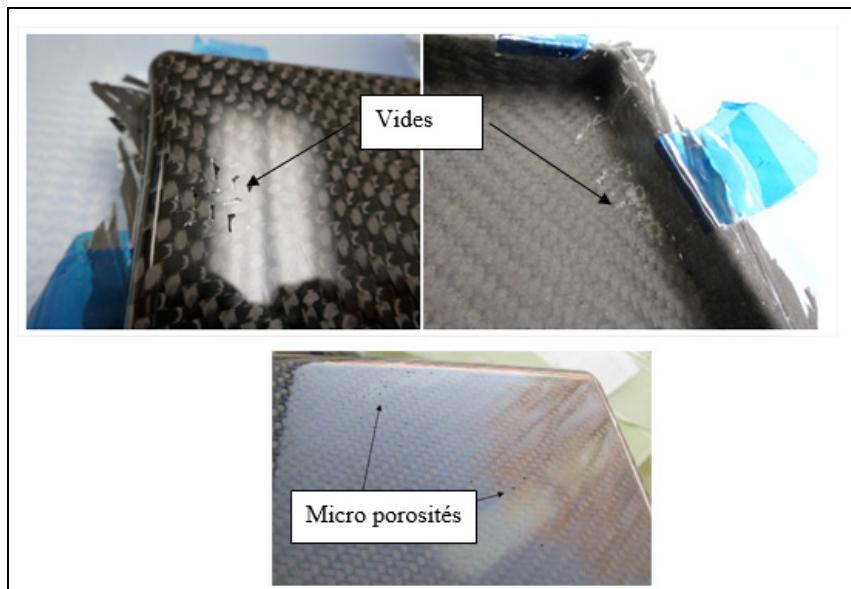


Figure 2.8 Exemple de porosités et de vides

Ces deux types de défauts (porosités et vides) sont la principale cause des non-conformités et considérant que les requis esthétiques sont très élevés pour les pièces avec un fini carbone, la moindre microporosité de surface cause une non-conformité. Des causes facilement identifiables observées en production sont tout d'abord des problèmes d'étanchéité dus à un mauvais montage, par exemple le ruban scellant qui décolle ou une fuite dans le sac entraînant de l'infiltration d'air dans la pièce. Une autre cause est l'introduction d'air par les tuyaux d'entrée de résine, due à une mauvaise fermeture des tuyaux après infusion ou par un manque de résine dans le pot pendant l'infusion. Ces différentes causes ont été identifiées lors de l'observation et de la participation à la fabrication des pièces sur le plancher de production. En éliminant ce type de problèmes dans le procédé, la présence de vides devrait

diminuer de manière importante. Cette faiblesse du procédé sera ciblée dans l'amélioration de l'infusion, présentée dans le chapitre 3. Il peut cependant être difficile de régler les problèmes de porosités pouvant apparaître malgré l'absence d'introduction d'air dans la fabrication. Comme présenté dans la section 1.2 du chapitre 1, plusieurs causes peuvent entraîner la formation de vides et de porosités et malgré un montage étanche, des problèmes peuvent survenir. La mécanisation des opérations de manipulation de la résine et d'infusion vise à améliorer cette faiblesse du procédé et sera présentée dans le chapitre 3.

2.5 Requis techniques imposés aux panneaux du cockpit

Les améliorations apportées au procédé ne doivent pas affecter l'atteinte des requis techniques imposés aux panneaux. Tel que mentionné précédemment, les pièces ciblées par ce projet sont des panneaux d'habillage d'intérieur d'avion et ne sont pas structurales, c'est-à-dire que l'avion pouvant voler sans que les pièces ne soient installées. Les panneaux doivent tout de même satisfaire aux requis techniques imposés par Bombardier. Certains de ces requis sont présentés à titre de référence dans le Tableau 2.13. Les améliorations apportées au procédé ne doivent pas affecter le respect de ces requis.

Tableau 2.13 Requis techniques des panneaux - Cockpit Global XRS

#	Requis	Description
1	Température	1.1 Température opérationnelle (en vol et au sol) : -50 °C à +65 °C 1.2 Température typique du cockpit : +15 °C à +32 °C 1.3 Température de survie au sol : -55 °C à +85 °C
2	Flammabilité	FAR Part 25.853 Appendix F
3	Poids	40 lb pour l'ensemble des panneaux d'habillage du cockpit
4	Rigidité	4.1 Déflexion de moins de 0,040 po avec une charge de 5,0 lb appliquée normale à la surface dans une section de 0,75 po de diamètre, considérant le panneau attaché à la structure 4.2 Les panneaux doivent survivre sans fissure apparente ou déformation permanente avec une charge statique de 200 lb appliquée sur une section de 1 pouce de diamètre, partout sur le panneau
5	Esthétique	5.1 Défauts apparents : Aucun défaut apparent accepté dans les surfaces visibles, tel que des fibres perdues, porosités, surplus de résine, etc. 5.2 Lustre : Applicable pour les pièces avec fini carbone. Lustre à respecter sur les surfaces visibles : <ul style="list-style-type: none"> - À 60° : Lustre moyen de 90 % sur les surfaces visibles - À 20° : Aucune valeur simple sous 50 % 5.3 Enlignement des fibres pour les pièces finies carbone (voir Figure 2.9) <ol style="list-style-type: none"> 1) Orientation suivant l'axe des fibres (45°): +/- 0,200" sur 15" 2) Alignement des fibres horizontales : +/- 0,375" sur 15" 3) Alignement des fibres verticales: +/- 0,375" sur 15"

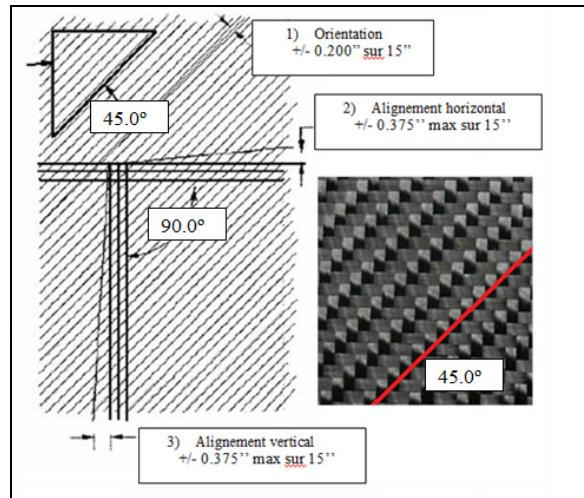


Figure 2.9 Requis d'enlignement des fibres des pièces avec un fini carbone

Uniquement les requis possiblement influencés par les développements et les améliorations apportés au procédé d'infusion sont présentés. Des requis plus spécifiques et certains requis environnementaux, tels que la moisissure, les champignons, la résistance au solvant, la corrosion, l'ozone, etc., ne sont pas présentés dans le Tableau 2.13, mais doivent être tout de même considérés dans le choix des matériaux et des technologies.

2.6 Synthèse

Cette revue du procédé a permis de mettre en contexte et de comprendre le procédé d'infusion initialement utilisé par l'entreprise, au niveau des temps et coûts de fabrication, mais également au niveau des matériaux et des défauts générés par le procédé.

Suite à l'analyse du procédé d'infusion initial présenté dans le chapitre 2, il est possible de constater que la main d'œuvre représente les coûts les plus importants dans la fabrication d'une pièce par infusion. Cela s'explique par les étapes de fabrication du procédé qui sont très manuelles et les temps de fabrication élevés. Le Tableau 2.7 décrivant les étapes de

fabrication l'illustre bien, avec 16 opérations nécessaires à la fabrication d'une pièce typique du cockpit.

L'opération de mise sous vide avec l'utilisation de sacs consommables est l'une des opérations critiques dans le procédé. Cette étape est très longue et est source potentielle d'introduction d'air pendant la fabrication, en plus de générer de nombreux déchets dus à l'utilisation de plusieurs consommables. Cette opération est donc visée par l'amélioration du procédé, avec le développement d'une membrane flexible réutilisable dans le but de remplacer l'utilisation de sacs consommables, sources de nombreux problèmes dans le procédé initial, tels que de l'infiltration d'air et des temps de fabrication élevés.

La fabrication des constructions sandwiches a également été identifiée comme problématique, due aux temps de fabrication et aux délais élevés. Les heures supplémentaires sont reliées à l'étape additionnelle de laminage contact afin d'introduire un noyau de type nid d'abeille à la construction, augmentant les coûts de la main d'œuvre, mais également les délais de fabrication dus à un cycle de polymérisation supplémentaire. Cette étape est également visée dans l'amélioration du procédé, présenté au chapitre 3.

Lors de la revue, il a également été démontré que les problèmes de robustesse et le côté artisanal du procédé amènent plusieurs problèmes techniques, tels que des temps de fabrication élevés, mais également la présence récurrente de défauts, majoritairement de la présence de porosités et des vides. Une amélioration de la robustesse du procédé a donc également été ciblée, par la mécanisation du procédé.

L'objectif du projet de recherche est d'améliorer le procédé d'infusion initialement utilisé par l'entreprise en diminuant les coûts et temps de fabrication tout en améliorant la robustesse du procédé. La revue du procédé initial présentée dans ce chapitre a permis de mettre en évidence les faiblesses du procédé initial et de valider les pistes d'améliorations qui sont ciblées par le projet de recherche. La revue servira de référence afin de mesurer les gains du nouveau procédé au niveau des temps de fabrication, des coûts de fabrication et de la

robustesse. Le développement et les améliorations apportées au procédé d'infusion sont présentés dans le chapitre 3 qui suit.

CHAPITRE 3

AMÉLIORATION DU PROCÉDÉ D'INFUSION

Les faiblesses du procédé d'infusion initialement utilisé dans l'entreprise ont été mises en évidence dans le chapitre 2. De plus, les valeurs de référence pour confirmer les objectifs ont été définies au niveau des temps, des coûts et de la robustesse du procédé. Ce chapitre présente maintenant les améliorations qui ont été apportées afin d'atteindre les objectifs de diminution des temps et des coûts de fabrication, avec un procédé d'infusion plus robuste que celui initialement utilisé dans l'entreprise partenaire.

Suite à la revue du procédé, les opérations ciblées pour l'amélioration et présentées dans ce chapitre sont l'étape de mise sous vide, l'étape de laminage contact et de mise sous vide pour l'intégration des noyaux, les opérations reliées aux manipulations de résine (mélange, dégazage et infusion) puis l'ajout d'un cycle de post-cuisson afin d'optimiser le cycle de polymérisation et les performances thermomécaniques des pièces produites.

3.1 Étape de mise sous vide

Telle que présentée dans les sections précédentes, l'étape de mise sous vide avec l'utilisation de sacs consommables est critique, étant très longue et source de plusieurs problèmes comme de l'infiltration d'air, des fuites, des zones avec surplus de résine, une mauvaise consolidation et la nécessité d'utiliser de nombreux consommables pour la fabrication. Les objectifs de développer une technologie de contre-moules flexibles avec membranes réutilisables pour remplacer ces sacs sont de diminuer les temps reliés à la mise sous vide par rapport au temps initial, de diminuer les défauts générés par l'infiltration d'air causée par l'utilisation de sacs consommables et finalement de réduire la quantité de périssables dans le procédé. La durabilité de la membrane constituée d'un élastomère flexible ainsi que l'absence de contamination se doivent cependant d'être démontrée. En effet, l'utilisation d'une telle membrane représente une réticence en aéronautique due aux risques d'affecter le collage et la peinture. De plus, les coûts de fabrication de la membrane ne doivent pas être trop élevés et

doivent être amortis rapidement considérant que les volumes annuels de fabrication ne sont pas énormes (50 à 70 cockpits par année), un retour sur investissement se doit donc d'être démontré en incluant les coûts nécessaire à la fabrication du contre-moule.

3.1.1 Revue de la méthode initiale de mise sous vide

Présentée sommairement dans la description du procédé au chapitre 2 ainsi qu'au chapitre 1 à la section 1.1, l'étape de mise sous vide consiste à recouvrir les tissus d'une pellicule d'ensachage, collée aux rebords du moule à l'aide d'un ruban scellant, pour ensuite y appliquer le vide à l'aide d'une pompe à vide. La mise sous vide du sac permet de conserver la pression à l'intérieur du sac permettant à la résine d'être aspirée et d'imprégnier les renforts pendant la phase d'infusion et d'assurer une pression de consolidation pendant la phase de polymérisation. Plus la pression de consolidation est élevée, meilleure sera la consolidation avec un taux volumique de renfort plus élevé. Le procédé initialement utilisé chez Hutchinson reprend les méthodes traditionnelles utilisées dans les procédés d'infusion, illustrées à la Figure 3.1.

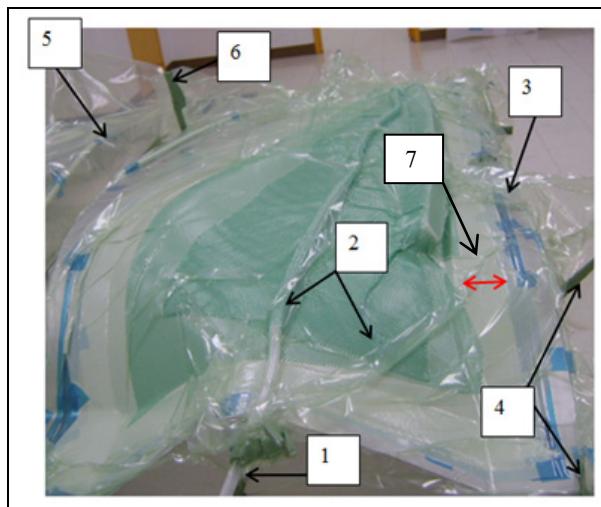


Figure 3.1 Schéma de mise sous vide avec un sac consommable

La réalisation d'un sac tel qu'illustré à la Figure 3.1 requiert beaucoup de temps et le maintien de son étanchéité complète est très difficile à assurer. Les composants identifiés ont

des fonctions précises qui devront être reprises dans la nouvelle technologie. Chacune de ces fonctions est expliquée au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Fonctions des composants de mise sous vide

#	Composants	Fonction
1	Entrée de résine	Assurer l'alimentation de résine dans le montage à partir du pot, non visible sur la photo.
2	Infuseur et médium d'infusion	<u>Infuseur (tuyau spiral)</u> : assurer la distribution de résine dans le médium d'infusion sur la longueur de la pièce, tuyau spiral enroulé et cousu avec du médium d'infusion. <u>Médium d'infusion</u> : assurer la distribution de résine sur toute la surface de la pièce.
3	Alimentation en vide	Relie la pompe à vide au montage et distribue la pression de vide à l'intérieur du montage (consolidation et aspiration de la résine) : tuyau plein connecté au moule à partir d'une pompe à vide et tuyau spiral en périphérie du moule distribuant le vide à l'intérieur du sac.
4	Ruban scellant	Communément appelé «dom-dom», assure l'étanchéité du montage en collant le sac sur le moule, appliqué en périphérie du moule.
5	Pellicule d'ensachage	Assurer une pression sur la préforme permettant une bonne consolidation en épousant la surface de la pièce. Maintenir une pression négative et assurer l'étanchéité du montage combiné au ruban scellant.
6	Oreille de lapin	Assurer un surplus de sacs afin d'épouser la surface du moule dans les zones creuses.
7	Tissu d'arrachage	Assurer l'arrachement du sac et du médium et amener un fini de surface rugueux sur la pièce (pour collage). Autre fonction : distribuer le vide jusqu'à la préforme à partir des tuyaux d'alimentation de vide (selon la flèche rouge sur la Figure 3.1).

Comme mentionné dans l'étude de cas de la section 2.3, basée sur la pièce typique des constructions sandwiches, 45 minutes sont consacrées à la mise sous vide du montage avant l'étape d'infusion, incluant un test d'étanchéité. L'étanchéité étant très critique dans le procédé d'infusion, la perte maximale tolérée est de deux pouces de mercure dans une période de cinq minutes, sinon l'infiltration d'air est jugée trop critique pouvant causer des vides et des porosités sur les pièces produites. De plus, une deuxième étape de mise sous vide est nécessaire pour l'intégration du nid d'abeille, avec un temps moyen de 30 minutes. Ce sac prend moins de temps considérant qu'il est moins critique, car il n'y a pas d'infusion de résine (laminage contact) limitant le risque d'introduction d'air. Ainsi, un vide minimal de -26 po Hg est requis pour cette opération, ce qui est plus facilement atteignable. Combinées entre elles, les opérations de mise sous vide dans le procédé initial sont donc de 75 minutes, représentant 23 % du temps total moyen de fabrication (Tableau 2.10). De plus, ce temps moyen est conservateur, car un facteur non considéré dans ce calcul est le fait qu'il est très fréquent que les sacs doivent être refaits avant l'infusion dus à des fuites très difficilement réparables qui sont détectées seulement suite au test d'étanchéité. Un autre facteur non considéré dans le calcul est la présence de zones riches en résine causées par les nombreux plis de sac qui doivent être sablées avant la prochaine étape, générant du temps supplémentaire. La technologie développée a comme objectif de diminuer ces temps, tout en assurant les fonctions présentées dans le Tableau 3.1.

Autres aspects traités dans la revue du procédé initial du chapitre 2, les opérations de mise sous vide amènent des problèmes de robustesse du procédé, étant sources de fuites et d'infiltration d'air. Ainsi, certains vides et porosités générés par le procédé proviennent des problèmes de robustesse causés par l'utilisation de sacs consommables. Les objectifs avec le développement des contre-moules flexibles sont donc de diminuer les temps reliés à l'étape de mise sous vide, mais également d'augmenter la robustesse du procédé en éliminant les problèmes reliés à l'utilisation de sacs consommables, en plus d'éliminer les matières sacrificielles générées à chaque fabrication. La nouvelle technologie qui a été développée est présentée à la section 3.1.2.

3.1.2 Nouvelle technologie de mise sous vide

Cette section présente le développement de la nouvelle technologie de mise sous vide avec l'utilisation d'un contre-moule flexible utilisant une membrane réutilisable. L'évaluation de la nouvelle technologie comprend une étude de durabilité comparant différents élastomères disponibles, des essais d'infusion sur géométrie 2D et 3D permettant de développer et raffiner la technologie, une étude de contamination afin de démontrer l'absence de transfert d'un contaminant tel qu'un plastifiant à la surface des pièces produites, ainsi que la démonstration d'un retour sur l'investissement pour la fabrication d'une membrane. L'ensemble des résultats ainsi que le choix final des matériaux ne sont cependant pas présentés, afin de conserver le secret industriel.

Le concept final du contre-moule flexible avec l'utilisation d'une membrane réutilisable est tout d'abord présenté, à la Figure 3.2.

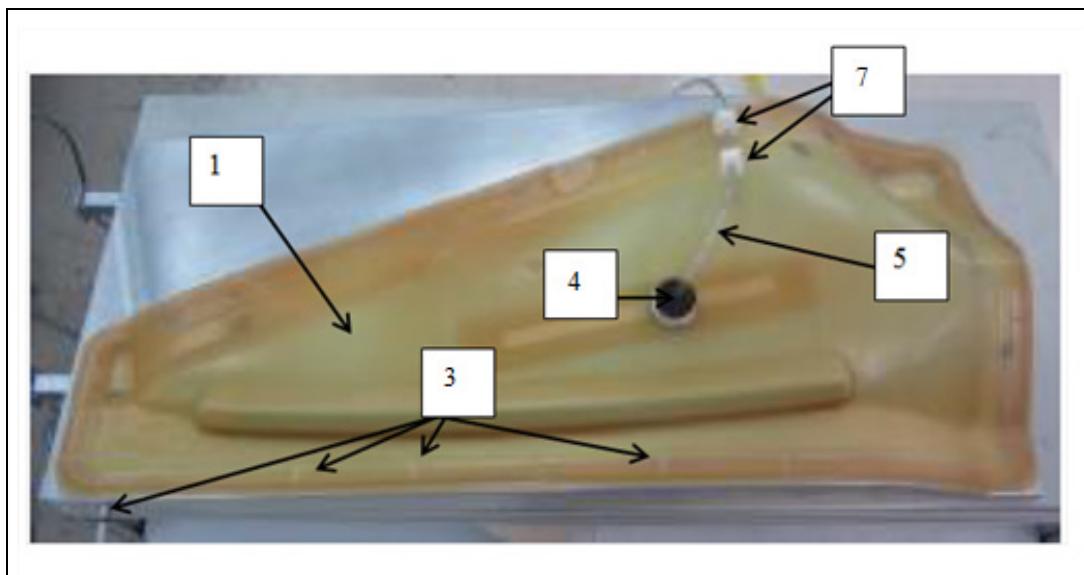


Figure 3.2 Contre-moule flexible réutilisable

Le concept montré à la Figure 3.2 permet d'éliminer l'ensemble des consommables de mise sous vide (sacs consommables, ruban scellant et tuyaux spiraux) et rassemble les mêmes fonctions que la technique initiale, mais avec des matériaux réutilisables. Les différents items sont présentés dans le Tableau 3.2 en expliquant brièvement les modifications apportées.

Tableau 3.2 Description contre-moule flexible

#	Composants	Description
1	Membrane	Membrane réutilisable qui remplace les sacs consommables, constituée d'un élastomère flexible.
2	Médium d'infusion	Assurer la distribution de résine sur toute la surface de la pièce. Élimination de l'infuseur. Situé sous la membrane (non montré sur la Figure 3.2).
3	Canaux de vide	Canaux d'alimentation de vide en pourtour intégrés à la membrane. Assure l'étanchéité du montage et l'aspiration de la résine. Élimination des tuyaux spiraux et du ruban scellant en contour.
4	Connecteur	Assurer la connexion avec le tuyau d'alimentation de résine. Remplace l'utilisation du ruban scellant autour du tuyau. Connecteur réutilisable.
5	Tuyau d'alimentation	Alimentation de résine avec un tuyau flexible qui remplace les tuyaux rigides difficiles à rendre étanche lors de la fermeture de l'entrée de résine
6	Tissu d'arrachage	Assurer l'arrachement du sac et du médium et amener un fini de surface rugueux sur la pièce (pour collage). Autre fonction : distribuer le vide jusqu'à la préforme à partir des tuyaux d'alimentation de vide. Aucune modification par rapport au procédé initial. Situé sous la membrane.
7	Clip	Assure l'étanchéité lors de la fermeture du tuyau de résine. Remplace l'utilisation de pinces en métal qui n'était pas toujours efficace.

La membrane (item 1) est constituée d'un élastomère flexible. Une étude plus détaillée sur le développement de cette membrane est présentée dans la section 3.1.3. Le tuyau d'alimentation de résine (item 5) est connecté à la membrane par l'entremise d'un connecteur (item 4), représentant un endroit très critique où l'air peut s'infiltre facilement dans la pièce. Un connecteur sur mesure a donc été développé, rassemblant une structure en aluminium

ainsi que des composants en plastique et un joint en élastomère pour l'étanchéité. Ensuite, l'alimentation en vide est assurée par une connexion dans le moule qui est distribué via des canaux intégrés à la membrane et au moule (item 3). Une rainure en contour intégrée au moule assure l'étanchéité grâce à la membrane qui s'y déforme lorsque le vide est appliqué, tel un joint d'étanchéité. Le vide est également distribué dans le tissu d'arrachage (item 6) et la préforme de fibres grâce aux canaux intégrés à la membrane, permettant ainsi d'aspirer la résine et d'imprégnier l'ensemble des tissus. Les clips en plastique (item 7) sont fermées lorsque l'infusion est terminée. Ces clips combinées à un tuyau flexible, facilitent le maintien de l'étanchéité après l'infusion. Dans le procédé initial, un tuyau rigide et une pince en métal étaient utilisés afin de fermer l'entrée de résine après l'infusion et l'étanchéité n'était pas toujours facile à assurer. Lors d'observations sur le plancher de production, l'introduction de bulles d'air par le tuyau d'entrée après fermeture de la pince a été répertoriée à plusieurs reprises. Ces problèmes seront réglés avec ce nouveau système plus simple.

Assurément, l'opération de mise sous vide est simplifiée avec l'utilisation de ce contre-moule engendrant une économie de temps considérable. En effet, le temps de mise sous vide est passé à seulement cinq minutes comparativement à 45 minutes avec la technique initiale, représentant une économie de temps de plus de 85 %. De plus, les risques d'introduction d'air dans la pièce pendant l'infusion sont réduits en éliminant les fuites à travers le sac. Les consommables qui étaient nécessaires à cette opération, soient les tuyaux spiraux, le ruban scellant et la pellicule, ont de plus été éliminés. Les gains complets au niveau des temps et des coûts seront présentés au chapitre 4.

On doit cependant considérer que la fabrication du contre-moule représente un coût et que sa longévité et sa durabilité deviennent importantes afin de ne pas augmenter le coût par rapport au procédé initial. Un retour sur l'investissement sera donc calculé à la section 3.1.5.

Cette section a présenté le concept final du contre-moule flexible, mais plusieurs essais ont été réalisés avant d'atteindre ce résultat. Tout d'abord, le choix de la matière pour la membrane flexible (item 1 du Tableau 3.2) était un élément clé à évaluer. En effet, la membrane est exposée à la résine époxy et la réaction lors de la polymérisation attaque les élastomères de manière considérable. Ensuite, le traitement de surface et les connecteurs étaient d'autres éléments à tester, en plus d'étudier les différentes stratégies de fabrication, au niveau de la fabrication de la membrane, mais également lors de l'infusion (position des entrées de résine, canaux de vide et de résine, etc.). Les différents essais expérimentaux qui ont été effectués sont présentés dans la section 3.1.3.

3.1.3 Développement des contres-moules flexibles

Comme expliqué plus tôt, les gains visés par l'utilisation des contres-moules flexibles sont la diminution des temps de mise sous vide, l'élimination de l'infiltration d'air causée par le montage et l'élimination des consommables de fabrication. Les risques avec l'utilisation d'un système réutilisable sont une dégradation prématuée de la membrane engendrant des coûts indésirables, une mauvaise étanchéité du système ainsi que des problèmes de contamination transmis sur les pièces produites. Tel que présenté à la section 1.3 du chapitre 1, plusieurs options sont disponibles sur le marché au niveau des élastomères et sélectionner la solution optimale n'est pas chose évidente. De plus, la connexion entre la membrane et le tuyau d'alimentation de résine doit également d'être parfaitement étanche et doit pouvoir s'intégrer facilement à la membrane. Aussi, la cible pour la durée de vie de la membrane est de 50 à 70 fabrications avec la même membrane, représentant la fabrication annuelle de cockpits. Tous ces éléments sont donc évalués dans cette section afin de développer la technologie finale présentée à la Figure 3.2, assurer sa durabilité et prouver l'absence de contamination transmise sur la surface des pièces produites. Le processus d'évaluation et de développement est présenté au Tableau 3.3.

Tableau 3.3 Évaluation et développement des contres-moules réutilisables

#	Type d'essai	Illustration	Objectif
1	Essais de torture		<ul style="list-style-type: none"> -Évaluer la durabilité des membranes et comparer différents élastomères et traitements de surface - Évaluer la résistance des membranes à l'époxy -Simuler les cas extrêmes avec coins vifs et formes concaves. -Les membranes sont amenées jusqu'à la rupture - Fabrication par laminage contact avec de la fibre de verre et de la résine époxy et mise sous vide avec la membrane
2	Essais d'infusion sur géométrie 2D		<ul style="list-style-type: none"> Simulation de fabrication par infusion sur géométrie 2D: -Vérifier l'effet sur le taux massique de renforts, la densité, l'épaisseur des laminés ainsi que la résistance au feu -Comparer différents connecteurs et stratégies de fabrication
3	Essais d'infusion sur géométrie 3D		<ul style="list-style-type: none"> -Essais sur géométrie 3D pour la sélection finale avant la mise en préproduction
4	Étude de contamination		<ul style="list-style-type: none"> -Démontrer l'absence de contamination transmise à la surface des pièces produites -Essais effectués : <ul style="list-style-type: none"> - Essais d'arrachement adhésif (montrés sur la figure) - Œil de poisson sur surface peinturée - Analyse chimique

Tout d'abord, pour choisir la matière de la membrane, une évaluation de différents élastomères, dont plusieurs silicones, polyuréthanes et latex a été réalisée, présentée au Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Types d'élastomères évalués

#	Fournisseur	# Produit	Matériaux	Coût (\$/kg) ^a	Dureté (Shore A)	Résistance à la déchirure (N/mm)	Elongation (%)	Viscosité (cP)
1	Sworl	PRSI-308-556	Silicone	141,00	30	31,5	660	15 000 (A) 10 000 (B)
2	Wacker	Elastosil 1500	Silicone	138,75	27	25,0	500	26 000
3	Axson	SVB 20	Silicone	187,50	20	15,0	500	15 000
4	Zhermack	HT33	Silicone	88,50	33	16,0	430	8 000
5	Smooth-on	PMC-746	Polyuréthane	45,00	60	17,5	650	1 200
6	Duochem	Duroplast 900	Polyuréthane	32,00	83	21,7	335	435
7	Plastique Gyf	Gyftane M6035	Polyuréthane	42,00	62	13,8	1 500	1 500
8	SR Composite	Sprayomer	Latex	ND	ND	ND	ND	ND

ND : Non disponible.

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

Tous les silicones présentés sont dans la famille des RTV et de type LSR, tel qu'expliqué à la section 1.3, avec un catalyseur de type platine, et sont les plus communs dans la fabrication de membranes flexibles pour utilisation avec les matériaux composites. On constate à l'analyse du Tableau 3.4 que les silicones sont beaucoup plus dispendieux que les polyuréthanes. Au niveau de la dureté, les silicones évalués varient entre 20 et 33 Shore A, tandis que les polyuréthanes sont plus mous, avec des duretés entre 60 et 83 Shore A. Au niveau des viscosités, les polyuréthanes sont également beaucoup plus liquides que les silicones, par exemple le Duroplat 900 de la compagnie Duochem qui est très liquide, avec une viscosité de 450 cPs. La viscosité des élastomères influence les techniques de fabrication de la membrane, pouvant être fabriquées par projection, par coulée ou bien par injection. À noter que peu d'information est disponible pour le latex Sprayomer et le fournisseur ne semble pas très ouvert à la partager.

Afin d'assurer la durabilité des membranes et s'assurer que la résine époxy n'y colle pas, il est recommandé par les fabricants d'élastomères d'appliquer des agents protecteurs, variant selon les compagnies et le type de matériaux utilisés. Deux types de solutions sont principalement disponibles, soit des agents démolant applicables entre chaque fabrication, soit des revêtements semi-permanents qui doivent être refaits après quelques fabrications. Différents types d'agents démolant et revêtements sont disponibles puisque les silicones, les polyuréthanes ou le latex ne requièrent pas nécessairement les mêmes produits. Certains matériaux disponibles et utilisés dans ce projet sont présentés au Tableau 3.5.

Tableau 3.5 Types d'agents protecteurs pour les membranes flexibles

#	Fournisseur	#Produit	Type	Application
1	McLube	McLube 1711L	Agent démolant	Aérosol
2	Zyvax	Composite shield	Agent démolant	Chiffon
3	Maverix	MavCoat 527ML	Agent démolant	Chiffon
4	Mosite	Mosites #14312	Revêtement (semi-permanent)	Pistolet
5	Sial	Ultra 4	Revêtement (semi-permanent)	Aérosol
6	Freeman	Monocoat E150	Revêtement (semi-permanent)	Chiffon
7	Freeman	Chemlease 4190	Agent démolant	Chiffon
8	ColorPlas	Matte top coat	Revêtement	Chiffon

Les différents élastomères combinés à différents agents protecteurs ont été évalués lors d'essais de cyclage dans un moule de torture, présentés à la section 3.1.3.1.

3.1.3.1 Essai de torture

Cet essai a comme objectif de valider l'hypothèse initiale qu'une membrane puisse résister à 50 fabrications avant d'atteindre la rupture. La durabilité des membranes exposées à la résine époxy dans des conditions difficiles, simulant un cas extrême avec des géométries complexes

et des coins très vifs, sera évaluée en comparant la solution des revêtements semi-permanents avec les agents démoluant. Un moule de torture a ainsi été conçu afin de cybler les membranes jusqu'à rupture. Le moule en aluminium est séparé en deux zones symétriques pour un total de quatre cavités. Deux zones creuses et deux zones avec des coins pointus afin de tester la membrane jusqu'à sa limite. Les zones sont doublées afin d'effectuer deux essais simultanément avec différents agents de surface. Le moule est présenté sur la Figure 3.3.

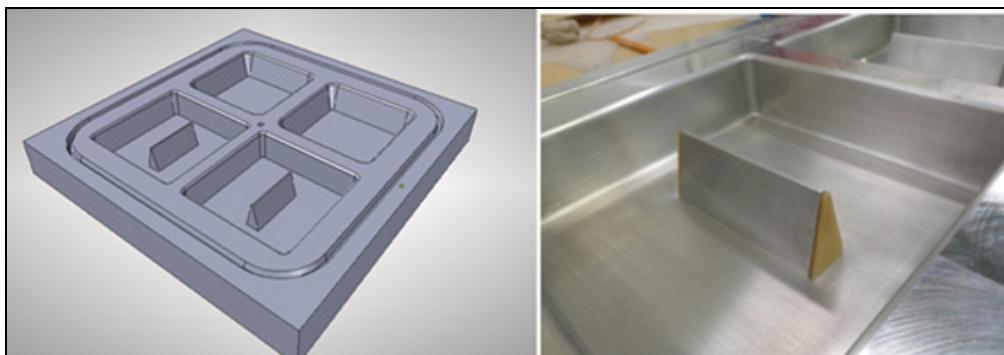


Figure 3.3 Schéma du moule de torture

- Nombre de cavités : 4;
- Dimensions du brut : (18 x 18 x 2) po;
- Dimensions des cavités: (6 x 6 x 1,5) po;
- Matériau: Aluminium 6061;
- Angle de démolage :
 - Cavité 1 (sans coin): 20°;
 - Cavité 2 (avec coin): 1°.

La première étape consiste à fabriquer les membranes. L'épaisseur de la pièce est simulée avec de la cire calibrée, appliquée avant de mouler l'élastomère. La Figure 3.4 présente cette étape.



Figure 3.4 Moule de torture, application de la cire calibrée

Les membranes sont ensuite fabriquées dans le moule, principalement par coulée et au pinceau, ou bien par projection. Quelques images lors de la fabrication sont présentées à la Figure 3.5.



Figure 3.5 Moule de torture, fabrication des membranes

Dans pratiquement tous les cas, des retouches au pinceau sont nécessaires, principalement dans les coins et zones plus complexes. Des exemples de membranes fabriquées dans ce moule sont présentés la Figure 3.6.

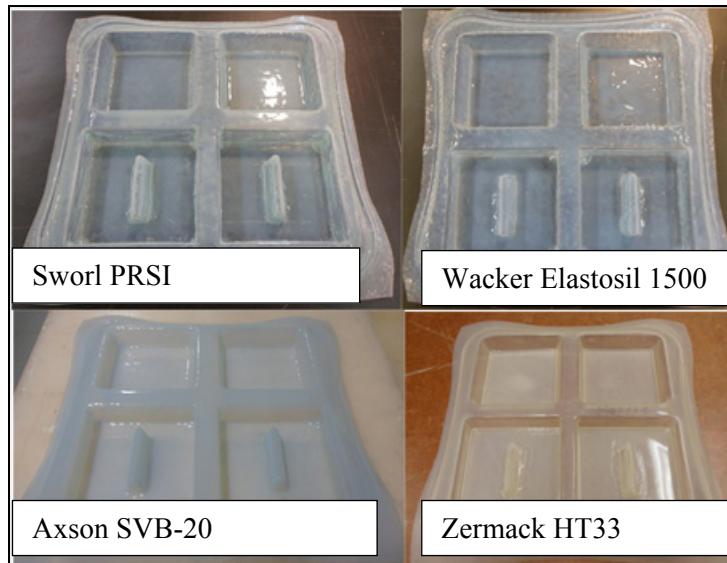


Figure 3.6 Membranes pour les essais de torture

Une fois les membranes fabriquées, des pièces avec fibres de verre et époxy ont été moulées à répétition par moulage contact et mises sous vide avec les membranes, jusqu'à la rupture de la membrane. Quelques exemples de rupture et de vieillissement obtenus sur différentes membranes sont présentés sur la Figure 3.7.

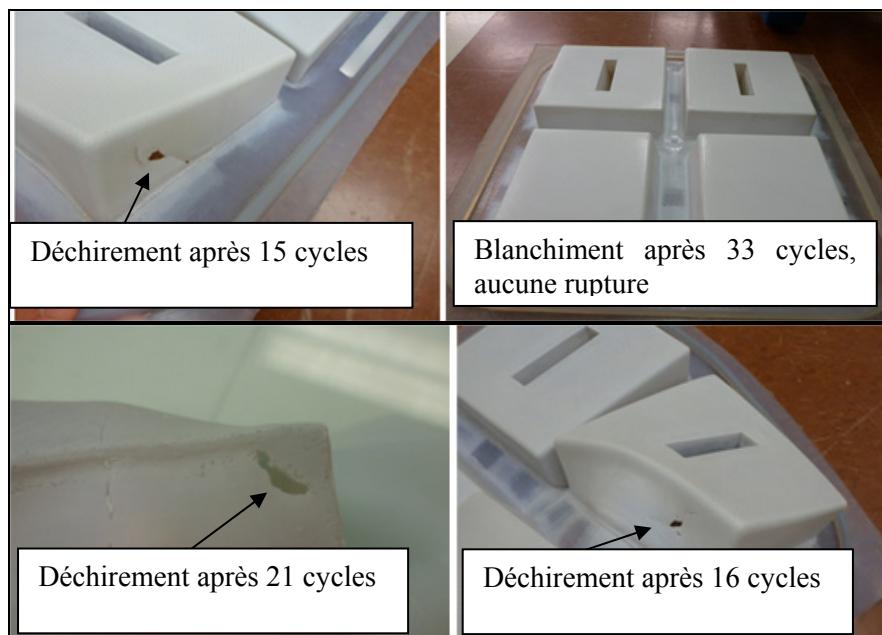


Figure 3.7 Exemple de membrane torturée

Les différents types d'élastomères présentés au Tableau 3.4 ont été évalués sur ce banc d'essai. Le détail des membranes testées et les résultats sont gardés confidentiels pour conserver le secret industriel. La nomenclature utilisée fait référence aux types d'élastomère ainsi qu'aux types d'agent démolant sans les identifier, présentée à la Figure 3.8. L'ordre des membranes et agents démolant dans les tableaux des résultats est aléatoire et ne fait pas référence à l'ordre des matériaux présentés dans les Tableau 3.4 et Tableau 3.5, pour éviter de relier le type de matériaux aux résultats (confidentialité).

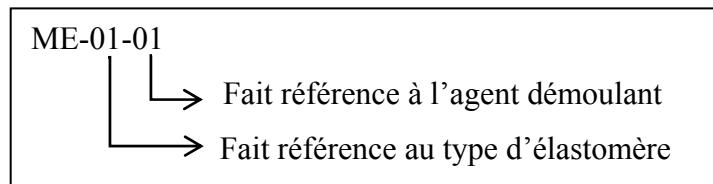


Figure 3.8 Nomenclature des membranes

Les résultats des essais de torture sont présentés dans le Tableau 3.6 et à la Figure 3.9.

Tableau 3.6 Résultats du test de torture

#	# Membrane	Nombre de cycles à la rupture
1	ME-01-01	15
2	ME-01-02	21
3	ME-02-01	11
4	ME-02-03	16
5	ME-03-01	19
6	ME-03-04	23
7	ME-04-04	57
8	ME-05-00	ND
9	ME-06-00	ND
10	ME-07-00	ND
11	ME-08-00	1

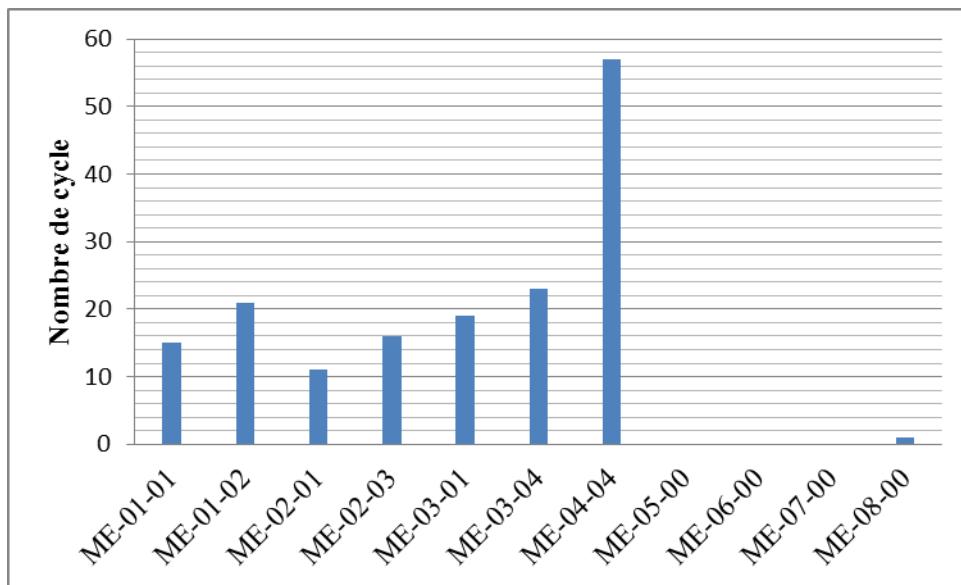


Figure 3.9 Résultats du test de torture

Chaque cycle représente un cycle de polymérisation de la résine et les essais sont réalisés à 40 °C afin de réaliser deux essais dans une même journée, limitant les délais. La membrane ME-08 a été éliminée rapidement de l'évaluation due à des problèmes de fabrication, présentée à la Figure 3.10. Un mauvais mélange entre la partie A et B a causé des problèmes puisque la membrane est très sensible à la précision des quantités et à la qualité du mélange, en plus de problèmes de collage avec la résine époxy. Ce type d'élastomère a donc été éliminé amenant déjà trop de problèmes.



Figure 3.10 Moule de torture ME-08 montrant les problèmes de fabrication

Les membranes ME-05, ME-06 et ME-07 n'ont pas été évaluées lors de ces essais, n'étant pas disponibles lors du déroulement des tests. Ces matériaux ont été évalués différemment lors des essais d'infusion présentés à la section 3.1.3.2 et leur durabilité n'a pu être évaluée sur le moule de torture. Des analyses futures pourront être considérées.

Les résultats ont permis de constater que la résine époxy attaque très rapidement les élastomères, certains types plus que d'autres, et que la présence d'agent démoulant ou revêtement est nécessaire afin d'augmenter la durée de vie des membranes. Un phénomène observé est le blanchiment des membranes sur les surfaces en contact avec la résine. La Figure 3.7 illustre bien ce phénomène, présentant le type de rupture obtenu et le blanchiment causé par l'attaque à l'époxy. Malgré la présence de coins vifs dans le moule de torture, ce sont les parois verticales à 1° (cavité 2) qui causent le plus de problèmes et les ruptures sont survenues le plus souvent à ces endroits. Ce phénomène peut s'expliquer en partie par l'épaisseur de la membrane qui est plus mince dans les parties verticales due à l'étiement du matériel. Le blanchiment démontre que la membrane se fait attaquer chimiquement par l'époxy, mais ne rend pas nécessairement la membrane inutilisable et dans plusieurs cas, la flexibilité de la membrane a été conservée malgré ce vieillissement. Le silicone s'est avéré être très sensible au blanchissement et à l'assèchement de la membrane entraînant un vieillissement prématûr avec le contact avec la résine époxy utilisée dans la fabrication des pièces du cockpit.

Un autre phénomène observé et présenté à la Figure 3.11 consiste en la dégradation du revêtement après plusieurs cycles de fabrication. Il est possible de réparer cette dégradation en enlevant le revêtement initial et en appliquant une nouvelle couche, représentant cependant des temps supplémentaires en plus d'un risque que des morceaux de matières dégradées se retrouvent dans la pièce finie devenant un contaminant non désiré. Les solutions de type revêtement (semi-permanent) doivent ainsi être considérées avec précaution. Malgré que les revêtements semblent performants, facilitant le démoulage, cette

solution n'est pas recommandée, due à la dégradation prématuée amenant des risques de contamination. Quoique les résultats pourraient être différents avec des matériaux ou une résine différente, puisque toutes les combinaisons possibles n'ont pas été testées.

Un traitement avec un agent démoulant est suggéré, malgré que ce traitement soit requis entre chaque fabrication pour éviter que la membrane colle à la pièce. Ce traitement est cependant très rapide, dans la majorité des cas appliqué au chiffon avec quelques minutes d'attente seulement.

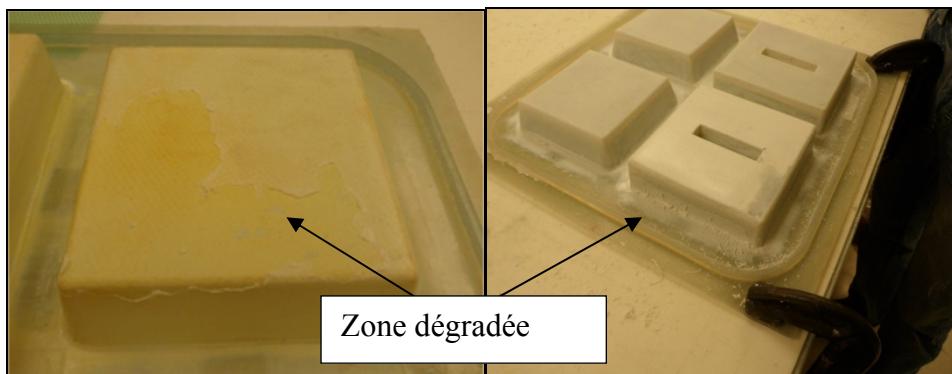


Figure 3.11 Dégradation du revêtement après 23 cycles, moule de torture

À l'analyse des résultats présentés au Tableau 3.6 , on constate qu'une seule configuration a résisté à plus de cinquante cycles avant rupture. Ce résultat permet tout de même de valider l'hypothèse de départ pour la durée de vie des membranes, c'est-à-dire un minimum de 50 cycles avant la nécessité de réparer ou bien de remplacer les membranes. Une fois ces essais complétés, des essais de moulage en infusion ont été réalisés et présentés à la section 3.1.3.2.

3.1.3.2 Infusion avec contre-moule réutilisable sur géométrie 2D et 3D

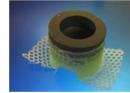
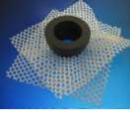
Une fois les matériaux pour la membrane et les agents démoulant réduits à seulement quelques choix potentiels, des essais réels d'infusion ont été réalisés sur géométrie 2D et 3D. Ces essais ont comme objectif de valider la technologie sur des essais réels en infusion et de sélectionner les concepts finaux (élastomère, traitement de surface, connecteur, stratégie de

fabrication, canaux de résine et de vide intégrés, etc.) qui seront utilisés pour la fabrication du contre-moule de préproduction.

La section des connecteurs dans le contre-moule représente un endroit très critique étant une source propice à l'infiltration d'air. Le choix du connecteur est donc important afin qu'il soit étanche, résistant et simple d'utilisation. Plusieurs choix sont disponibles sur le marché, quelques variétés sont présentées dans le Tableau 3.7

Tableau 3.7 Connecteurs pour la fabrication des contres-moules réutilisables

Fabricant	Description	Illustration	Coût
MVP	Connecteur 10 mm		29,23 \$
MVP	Adapteur de tube		ND
MVP	Insert # FLX-UI-200		ND
MVP	Insert # FLX-UI-400		ND
MVP	Connecteur UniInsert		93 \$
MVP	Connecteur IFA-1000-FLX		181,48 \$

Fabricant	Description	Illustration	Coût
Alan Harper	Insert Saddle		30,81 \$
Alan Harper	Insert Alan		20,27 \$
Alan Harper	Connecteur FIF 020		ND
RTM North	Prise d'injection		38,35 \$
RTM North	Prise d'injection		16,50 \$
RTM North	Profilé d'injection		19,50 \$
RTM North	Prise de vide		19,50 \$
Airtech	Connecteur d'infusion #RIC		ND
Airtech	Connecteur d'infusion		ND
Airtech	Valve de vide		ND

Différentes solutions et concepts sont ainsi possibles. On constate que les prix varient et que le connecteur ne doit pas devenir un consommable de fabrication, mais doit être réutilisable pour ne pas augmenter les coûts de fabrication. Plusieurs types de connecteurs ont été utilisé

lors d'essais de fabrication afin d'apporter des recommandations sur le choix optimal. Une solution sur mesure a cependant été développée, car les connecteurs commerciaux n'ont pas rencontrés les attentes escomptées, étant très difficile de les maintenir parfaitement étanches, causant des problèmes de porosité et de vides. Le connecteur développé sur mesure, avec un corps en aluminium, une bague en plastique ainsi qu'un joint d'étanchéité s'est avéré une solution moins coûteuse en comparaison avec les solutions disponibles sur le marché, en plus de régler les problèmes de fuites et d'infiltration d'air présents avec les connecteurs commerciaux essayés en infusion.

Plusieurs membranes 2D ont été fabriquées pour fins d'évaluation en infusion, avec différents types d'élastomères, de connecteurs et de stratégies de fabrication, certaines membranes sont présentées à la Figure 3.12.

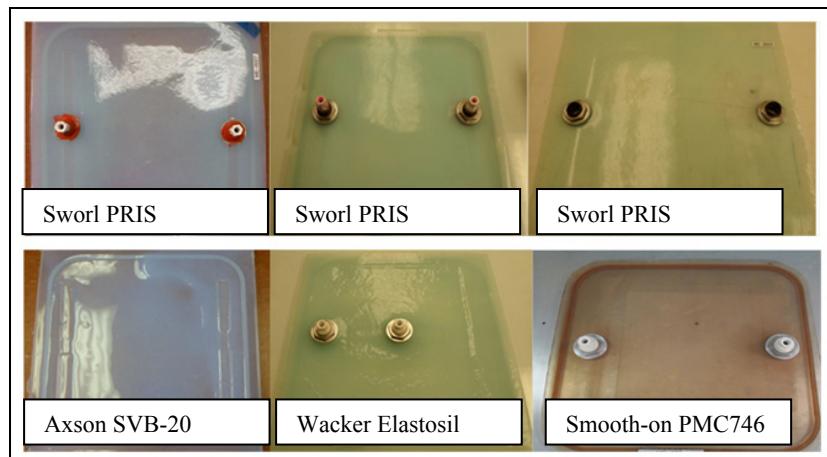


Figure 3.12 Exemple de membranes 2D

Ces images sont présentées afin de montrer quelques exemples de membranes 2D qui ont été évaluées, testant différents matériaux, différents connecteurs et différentes stratégies de fabrication. Ces essais ont permis de raffiner le concept avant les essais sur géométrie 3D et de tester les laminés produits. Les laminés fabriqués avec ces membranes ont permis de comparer les taux volumiques de fibre et l'épaisseur des pièces fabriquées avec membrane

par rapport aux sacs consommables. Des essais de feu ont également été réalisés selon la norme FAR 25.853, étant nécessaire suite à toute modification, le domaine aéronautique étant très stricte. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.8.

Tableau 3.8 Évaluation des membranes 2D

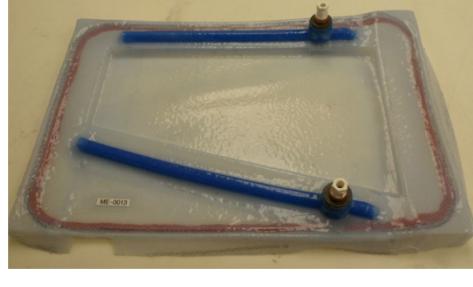
#	Description	Taux massique de fibres moyen	Épaisseur moyenne (mm)	Test de feu (Norme FAR 25,853)
1	Référence avec sacs consommables	60,12 %	1,35	Passe
2	Avec contre-moule flexible	60,50 %	1,32	Passe

^aLes laminés sont constitués de 4 plis de fibres de verre 9,6 oz/vg² et de la résine époxy. Les résultats proviennent d'une moyenne provenant de 3 laminés.

Comme présenté au Tableau 3.8, les résultats n'ont pas révélé de problèmes avec l'utilisation d'un contre-moule flexible, avec des taux massiques de fibres et des épaisseurs moyennes équivalentes étant très similaires. Les tests de feu se sont également avérés positifs.

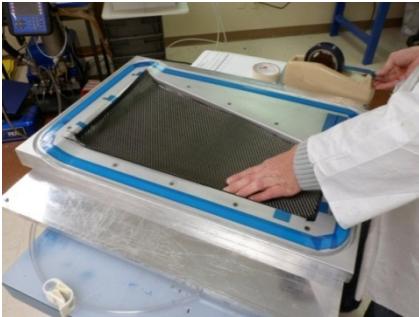
Avant de se lancer dans la production d'une minisérie de pièces avec utilisation d'une membrane, des essais de moulage sur géométrie 3D ont été réalisés. Ces essais, considérés comme une période de rodage, avaient comme objectif de raffiner la fabrication des membranes sur une géométrie 3D, étant plus compliquée qu'une simple membrane 2D. Les étapes d'infusion avec l'utilisation de cette nouvelle technologie ont également été établies en fabriquant plusieurs pièces prototypes, permettant des ajustements au procédé, augmentant sa maturité avant l'intégration en production. Ces essais de fabrication ont été effectués sur une géométrie relativement simple, mais tout de même avec une section creuse représentant un défi typique des pièces du cockpit. Plusieurs membranes ont été fabriquées, quelques exemples sont présentés au Tableau 3.9.

Tableau 3.9 Contre-moules flexibles - évaluation 3D

1- Wacker Elastosil – Connecteur MVP	2- Smooth-on PMC-746 – Connecteur MVP
	
3- Sworl PRSI – Connecteur sur mesure	4- Sworl PRSI – Connexion sous le moule
	
5- Zhermack HT33 – Connecteur AlanHarper	6- Wacker Elastosil – Connecteur MVP
	

Avec l'utilisation de cette technologie, les étapes de mise sous vide ne sont pas les mêmes qu'avec l'utilisation de sacs consommables. Le Tableau 3.10 présente sommairement les étapes incluses dans l'opération de mise sous vide intégrant les contres-moules réutilisables.

Tableau 3.10 Étapes d'infusion avec un contre-moule réutilisable

1- Montage des tissus	2- Préparation de la membrane
	
3- Connecteur intégré	4- Canaux de résine intégrés
	
5- Connecteur pour tuyau	6- Mise sous vide
	
7- Test d'étanchéité	8- Infusion
	

Suite aux tests de fabrication sur géométrie 3D, l'entrée de résine s'est avéré un endroit très difficile à mettre étanche. Tous les connecteurs commerciaux essayés se sont avérés être

problématiques au niveau de l'étanchéité, malgré l'ajout de silicone ou d'adhésif de type «loctite» dans les joints. Un connecteur conçu sur mesure a donc été développé, incluant un corps en aluminium, une bague en nylon ainsi qu'un joint en caoutchouc et fabriqué à l'interne chez Hutchinson, représentant une solution très économique. De plus, ces connecteurs ont été conçus de manière à ce qu'ils ne soient pas en contact avec la résine, le tuyau étant amené jusqu'à la surface de la pièce, rendant le connecteur réutilisable et ne représentant pas un coût récurrent. Ces connecteurs développés sur mesure se sont avérés être très étanches et recommandés pour la mise en production.

Suite aux essais avec les différents élastomères, au niveau de la durabilité mais également au niveau d'essais de fabrication sur géométrie 2D et 3D, il n'est pas possible de sélectionner une solution finale quant au choix des technologies et des matériaux pour la fabrication des contres-moules. Au niveau des élastomères, plusieurs choix sont disponibles et différents aspects doivent être pris en compte. Le type de résine et de procédé de fabrication, les températures de fabrication, la géométrie et la dimension des pièces produites en sont des exemples. Ces éléments influenceront le temps de travail requis avec le matériel, la viscosité, les techniques de fabrication, donc le choix du matériel. Le type de matériaux pour la membrane, l'agent de surface, le type de connecteurs et les stratégies de fabrication se concrétisent suite aux différents essais, mais avant d'intégrer une technologie en production, l'absence de contaminations à la surface de la pièce doit être prouvée. Ceci est présenté à la section 3.1.4.

3.1.4 Étude de contamination

Une crainte avec l'utilisation de membranes réutilisables est la contamination du composite par le contact avec l'élastomère. Le risque est tout de même minime considérant que la préforme de fibre est recouverte d'un tissu d'arrachage créant une barrière physique avec la membrane. Par contre, la résine sera tout de même en contact avec la membrane d'où la

nécessité de prouver l'absence de contamination. Une analyse de contamination a donc été effectuée afin de démontrer l'absence de transfert d'un plastifiant (phtalate) ou tout autre résidu provenant de la membrane sur la surface de la pièce composite. La crainte de la contamination est principalement causée par les risques potentiels d'affecter la performance des assemblages par collage et les problèmes d'adhérence de la peinture qui pourraient survenir si la surface est contaminée. Le risque est donc à considérer, car certains assemblages composites dans les panneaux du cockpit sont assurés par collage et que certaines pièces sont peinturées avant livraison au client. Des essais de cisaillement adhésif, des essais d'œil de poisson ainsi que des essais d'analyse chimique ont été effectués afin de prouver l'absence de contamination.

3.1.4.1 Essais de cisaillement adhésif en tension

Pour dissiper les craintes, des essais de cisaillement adhésif en tension ont été effectués selon la norme ASTM D5868. Des échantillons fabriqués avec membranes réutilisables ont été testés puis comparés à des valeurs de référence, provenant d'échantillons ayant été fabriqués avec sacs consommables. Le montage est montré sur la Figure 3.13.

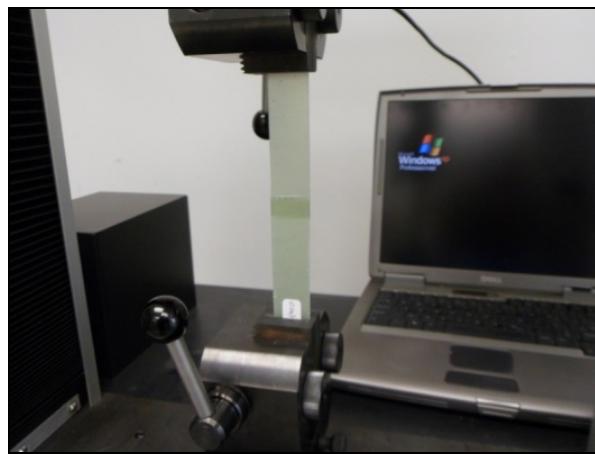


Figure 3.13 Montage d'essais de cisaillement adhésif en tension

Les échantillons sont constitués de laminés de quatre plis de fibre de verre de type 1 (9,6 oz/vg²), représentant une construction typique du cockpit, collé avec un adhésif uréthane

étant l'adhésif utilisé dans les assemblages composites à composites dans les pièces ciblées par le projet. La configuration des échantillons respecte les requis de la norme ASTM, présentés sur la Figure 3.14.

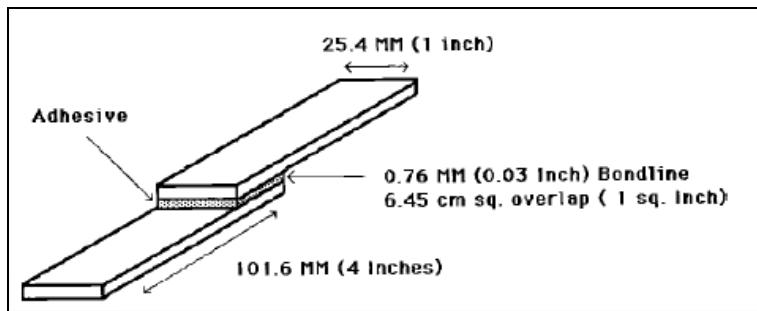


Figure 3.14 Schéma d'échantillon de cisaillement adhésif selon l'ASTM D5868

Un minimum de six échantillons a été testé, provenant de différents laminés, afin d'avoir un échantillonnage adéquat. Une préparation de surface est recommandée par la norme et un léger sablage est effectué avant collage. Des essais ont également été effectués sur des échantillons non sablés, afin d'avoir un cas extrême d'exposition à la membrane. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.11.

Tableau 3.11 Essais de cisaillement adhésif en tension

#	Description	Type de rupture	Résistance à la rupture (N)	Coefficient de variation [σ/μ] (%)
1	Référence - Sac, non sablé	Adhésive	2172,5	20,4 %
2	Avec membrane silicone, non sablée	Adhésive	2336,7	17,3 %
3	Référence - Sac, sablé	Cohésive	2782,4	16,7 %
4	Avec membrane silicone, sablée	Cohésive	2725,4	15,1 %

^aTesté à température ambiante.

À l'analyse des résultats, on constate que l'utilisation d'une membrane ne semble pas affecter la résistance en rupture du collage. Les résultats sont similaires entre les échantillons fabriqués, la variation étant considérée acceptable avec une variation des résultats entre 15 et 20 %. Au niveau des types de rupture, il n'y a pas de différence selon l'utilisation d'un sac ou d'une membrane. Les échantillons sablés ont une rupture cohésive tandis que ceux non sablés ont une rupture adhésive. Ce test est concluant et démontre que la performance en collage lors d'assemblage composite à composite ne sera pas influencée par l'utilisation des contre-moules flexibles. Les responsables M&P («Materials and Processes») au sein de l'entreprise partenaire acceptent ces résultats.

3.1.4.2 Essai d'œil de poisson («fish eyes»)

Un deuxième essai effectué consiste à des essais d'œil de poisson. La présence de contaminant peut créer des défauts en surface lorsqu'une peinture est appliquée sur la pièce composite, appelée œil de poisson, tels que montré à la Figure 3.15 illustrant une contamination au silicone.



Figure 3.15 Exemple d'œil de poisson sur un composite contaminé

Cet échantillon a été exposé à du silicone non durci, afin d'obtenir une référence du type de problème relié à une contamination. Afin d'éliminer le risque d'œil de poisson avec l'utilisation d'une membrane sur les pièces peinturées, six échantillons provenant de différents laminés fabriqués avec membrane ainsi que six échantillons fabriqués avec sac ont été recouverts de peinture. Comme illustré à la Figure 3.16, en aucun cas la présence d'œil de poisson n'est apparue, éliminant ainsi ces craintes.

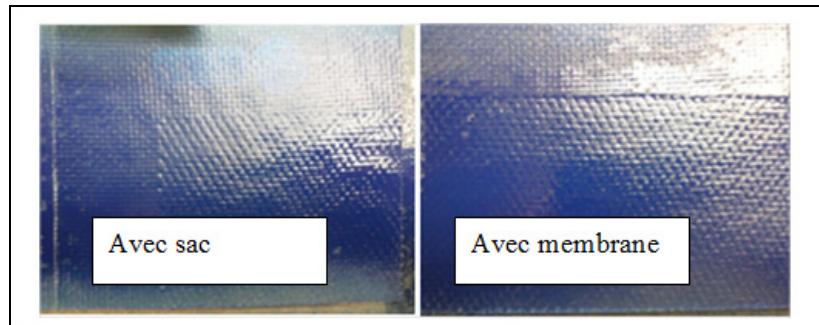


Figure 3.16 Essais d'œil de poisson

Il n'y a pas de différence visible entre la référence avec sac et les échantillons avec membrane, ce test est donc concluant, illustrant que l'utilisation de membrane n'affecte pas la qualité de la peinture. Encore une fois, les spécialistes M&P de l'entreprise partenaire acceptent ces résultats afin d'intégrer la technologie en production.

3.1.4.3 Analyse chimique de la contamination

Dans cette section, une analyse chimique réalisée par des chimistes du centre de recherche de Hutchinson à Montargis en France est sommairement présentée. L'objectif de ces analyses était de vérifier l'absence de contamination en surface de la pièce, plus précisément, la présence de phtalate (plastifiant). Ces essais ont été demandés par les responsables au sein de l'entreprise afin de prouver l'absence de contaminant en surface. Trois techniques analytiques ont été utilisées par le centre de recherche :

- 1- Extraction type Soxhlet effectuée selon la norme ISO 1 407 (procédé B) :
 - a. Solvant : acétone et dichlorométhane;
 - b. Analyse de la teneur en extractibles.
- 2- Spectroscopie d'infrarouge avec les transformées de Fourier (IRTF).
- 3- Injection chromatographie gazeuse couplée à un spectromètre de masse (Inj/Gc/MS).

Le Tableau 3.12 présente un résumé des laminés envoyés au centre de recherche pour ces analyses.

Tableau 3.12 Description des laminés, analyse chimique

#	Description	Configuration du laminé
1	Laminé fabriqué avec membrane en silicone vieillie (10 cycles)	Fibre de verre (x4) + époxy
2	Laminé fabriqué avec membrane traitée (agent démolant)	Fibre de verre (x4) + époxy
3	Laminé fabriqué avec membrane en silicone (sans traitement)	Fibre de verre (x4) + époxy
4	Laminé fabriqué avec sac consommable	Fibre de verre (x4) + époxy
5	Membrane seule (pour comparaison)	Membrane

Le premier test consistait à évaluer la teneur en extractibles (contaminants) effectué à l'aide de solvants, présenté à la Figure 3.17.



Figure 3.17 Extraction type Soxhlet teneur en extractibles

Les teneurs mesurées par le centre de recherche sont présentées dans le Tableau 3.13

Tableau 3.13 Teneur en extractibles

#	1	2	3	4	5
% d'extractibles à l'acétone	6,4	6,3	6,8	8,2	9,5
% d'extractibles au dichlorméthane	8,2	7,7	8,3	9,4	8,7
Couleur du solvant	Incolore	Jaune pâle	Jaune pâle	Incolore	Incolore

Cet essai n'a pas permis de mettre en évidence la présence de phtalates, même dans l'échantillon #5 constitué de la membrane. Donc, malgré le léger changement de couleur sur deux échantillons testés, la similarité des résultats présentés dans le Tableau 3.13 n'ont pas permis aux chimistes du centre de recherche de confirmer une présence de contamination. Cet essai ne semble donc pas bien s'appliquer pour détecter des traces de contaminations générées par l'utilisation d'une membrane constituée d'un élastomère, ne permettant pas de valider la présence ou non d'un plastifiant.

Le deuxième essai consiste à réaliser des essais de spectroscopie infrarouge à la surface des échantillons. Les courbes générées lors des essais sont superposées et présentées à la Figure 3.18.

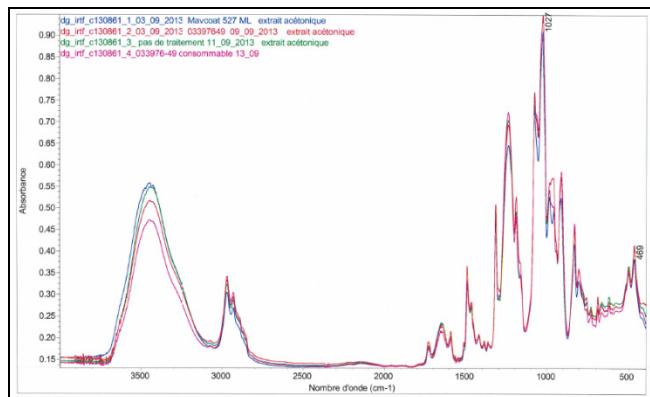


Figure 3.18 Courbe de spectrométrie à transformée de Fourier (IRFT)

Les courbes présentées pour les 4 échantillons composites sont similaires et les extractibles détectés sont majoritairement à base de cyclic phosphates ester (retardant de flamme). En résumé, le test détecte le retardant de flamme ajouté à la résine époxy, mais ne détecte aucune trace de contaminant de type phtalate.

Une hypothèse amenée par les chimistes du centre de recherche serait que cet essai ne permet pas de détecter des phtalates en trop faible concentration. S'il y avait eu une trace évidente de contaminant, les courbes auraient été très différentes, semblables à celle présentées sur la Figure 3.19, qui représente l'échantillon #5 (Tableau 3.12), étant uniquement la membrane.

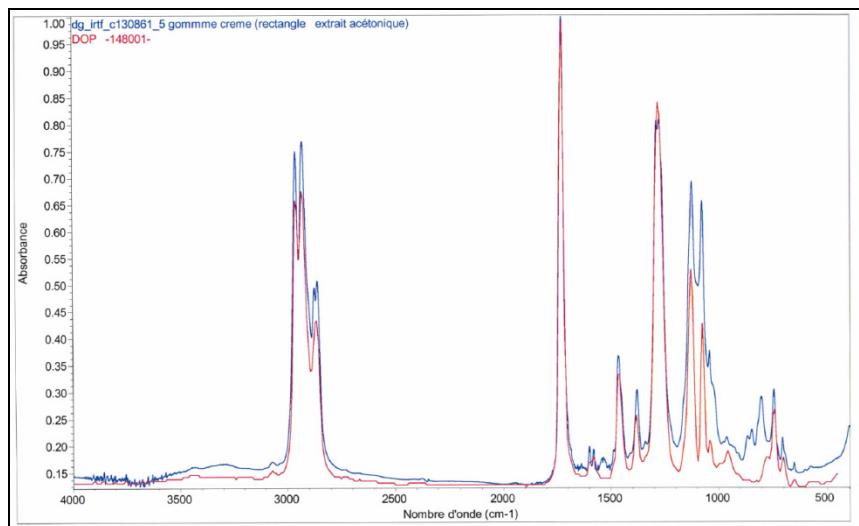


Figure 3.19 Courbe de spectrométrie à transformée de Fourier (IRFT) de la membrane

Le troisième et dernier test d'analyse chimique effectué par le centre de recherche consiste à l'injection chromatographie gazeuse couplée à un spectromètre de masse (Inj/Gc/MS). Le détail de ce test n'est pas présenté étant très complexe, mais ce test consiste également à relever des courbes pour détecter des irrégularités et détecter des traces de contaminant. Un exemple de courbe est présenté à la Figure 3.20 avec les 4 échantillons composites superposés.

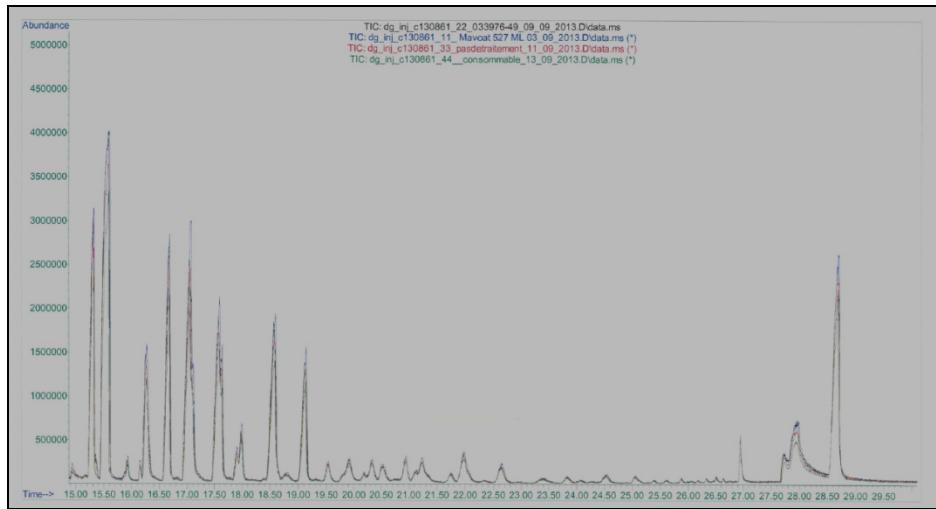


Figure 3.20 Courbe d'injection chromatographie gazeuse (Inj/Gc/Ms)

Aucune trace de phtalate n'a été détectée dans les courbes de résultats, confirmant les essais précédents, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de détecter la présence d'un plastifiant sur des échantillons en composite fabriqués avec membrane.

En résumé, les chimistes du centre de recherche ont validé que suite à ces analyses, les essais n'ont pas permis de mettre en évidence la présence de traces de contaminant d'un plastifiant (phtalate) à la surface des pièces, fabriquées avec membranes (avec et sans traitement), ou bien avec sacs consommables. Ils n'ont donc émis aucune mise en garde quant à l'utilisation de membranes réutilisables pour la fabrication de pièce composite par le procédé d'infusion. Des analyses complémentaires encore plus complexes permettant de détecter des concentrations très minimes pourraient toutefois confirmer ces résultats.

Suite à l'évaluation des contre-moules et à l'analyse de contamination, le choix des matériaux et concepts finaux ont été réalisés et l'absence de contamination a été prouvée. La prochaine étape consiste à évaluer le coût de la fabrication des contre-moules afin de valider le gain sur les coûts et de démontrer un retour sur l'investissement des améliorations apportées à l'étape de mise sous vide. Cette étape est nécessaire, car si un retour sur

l'investissement ne peut être démontré, cette technologie ne pourra pas être intégrée en production et généralisée aux pièces du cockpit.

3.1.5 Coût et retour sur l'investissement des membranes réutilisables

Il a été démontré précédemment que l'utilisation de contre-moules réutilisables réduit les temps de mise sous vide de manière considérable, près de 85% d'économie de temps sur l'étape de mise sous vide basée sur l'une des pièces typiques, en plus d'éliminer les consommables de fabrication présents avec l'utilisation des sacs jetables. La fabrication des contre-moules ne doit cependant pas amener une dépense trop élevée qui éliminerait les gains amenés par l'économie de temps dans le procédé d'infusion. Un retour sur l'investissement de moins d'un an se doit ainsi d'être démontré afin que la technologie soit viable et généralisée à l'ensemble des départements d'infusion. Si les coûts sont trop élevés, l'intégration de cette technologie en production est à risque et des solutions moins coûteuses devront être considérées. Cette section présente les coûts de fabrication d'une membrane ainsi que le retour sur l'investissement de la technologie développée.³

Les objectifs sont tout d'abord de calculer le coût de fabrication de la membrane, puis de démontrer un retour sur l'investissement sur les coûts non récurrents nécessaires à la fabrication de cette membrane. Plus précisément, cette dépense se devait d'être remboursée dans un délai inférieur à un an, soit moins de 50 fabrications selon les volumes annuels, grâce aux gains amenés sur le procédé. Les coûts non récurrents consistent aux outillages nécessaires à la fabrication de la membrane, tels que des supports rigides, outillages qui seront conservés et seront réutilisés afin de fabriquer une nouvelle membrane lorsque la première ne sera plus utilisable, trop usée ou déchirée.

La membrane, qui consiste en la partie flexible du contre-moule, est considérée comme un coût récurrent ayant une durée de vie limitée et sera comptée comme un coût de

³L'analyse des coûts de fabrication du contre-moule flexible ainsi que le calcul du retour sur l'investissement est basée sur la pièce typique des constructions sandwiches présentée dans l'étude de cas du chapitre 2.

consommables dans l'analyse du procédé amélioré présenté au chapitre 4. Dans la section précédente, il a été démontré que les membranes peuvent résister à plus de 50 fabrications avant de se déchirer (Tableau 3.6). Les membranes sont réparables, mais afin d'évaluer le pire scénario, le coût de la membrane est divisé par 50 et la membrane considérée comme inutilisable.

Le coût de la membrane est présenté au Tableau 3.14.

Tableau 3.14 Coût de la membrane

Description	Coût ^a
Coût des matériaux ^b	810,30 \$
Coût de la main d'œuvre	765,00 \$
Coût total	1 575,30 \$
Coût amorti (sur 50 fabrications)	31,51 \$

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

^bLe coût des matériaux rassemble le coût de l'élastomère flexible, ainsi que les matériaux requis lors de sa fabrication tels que de la cire calibrée. Le détail de la fabrication des membranes n'est pas donné pour conserver le secret industriel.

Représentant l'un des pires scénarios où la membrane serait refaite après 50 fabrications, le coût amorti de la membrane est de 31,51 \$.

Le Tableau 3.15 compare les coûts de fabrication reliés à l'étape de mise sous vide du procédé amélioré par rapport à l'ancienne technique afin de calculer le gain monétaire de l'utilisation du contre-moule, utilisée pour le calcul du retour sur l'investissement.

Tableau 3.15 Coûts de fabrication de l'étape de mise sous vide

Procédé	Coût récurrent	Coût de la main d'œuvre	Total ^a
Procédé initial avec pellicule d'ensachage	48,11 \$ ^b	105,00 \$ ^c	153,11 \$
Procédé amélioré avec contre-moule flexible	31,51 \$ ^d	15,00 \$ ^e	46,51 \$
Économie par fabrication avec l'utilisation d'un contre-moule	16,60 \$	90,00 \$	106,60 \$

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

^bLe coût récurrent dans le procédé initial consiste aux consommables de mise sous vide et inclut la pellicule d'ensachage, le ruban scellant et les tuyaux spiraux. Les coûts proviennent du Tableau 2.8.

^cLes coûts reliés à la main d'œuvre dans le procédé initial rassemblent les deux opérations de mise sous vide (infusion et moulage contact) et proviennent du Tableau 2.10.

^dLe coût récurrent dans le procédé amélioré consiste au coût amorti de la membrane, provenant du Tableau 3.14.

^eLe coût de la main d'œuvre dans le procédé amélioré a été calculé avec les temps reliés à l'utilisation d'un contre-moule flexible, présenté dans la section 3.1.

Comme indiqué au Tableau 3.15, l'économie se situe principalement au niveau de la main d'œuvre, grâce au gain de temps dans le procédé (10 minutes versus 75 minutes dans le procédé initial pour les temps de mise sous vide). Le gain est considérable, 106,60 \$ par fabrication représentant près de 70 % d'économie seulement pour l'opération de mise sous vide.

Aussi, le connecteur et les outillages nécessaires à la fabrication de la membrane sont considérés comme des coûts non récurrents et utilisés afin de calculer le retour sur l'investissement. Le coût de la membrane n'est pas considéré dans les coûts non récurrents, car il est amorti dans le coût de fabrication de la pièce, tel qu'expliqué précédemment. La période de recouvrement, souvent utilisée afin de mesurer le retour sur l'investissement (ROI : «return on investment»), a été calculé en comptabilisant le nombre de pièces fabriquées avec le contre-moule après lequel l'investissement est remboursé, grâce aux économies amenées par son utilisation. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.16 et illustrés sur la Figure 3.21.

Tableau 3.16 Période de recouvrement avec l'utilisation d'un contre-moule réutilisable

Description	Coût/ Période de recouvrement ^a
Coût non récurrent relié à la fabrication d'un contre-moule flexible	2 251,62 \$ ^b
Économie par pièce avec l'utilisation d'un contre-moule flexible	106,60 \$
Période de recouvrement	21,12 pièces

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

^bLes coûts non récurrents consistent aux outillages nécessaires à la fabrication d'un contre-moule.

Les résultats présentés au Tableau 3.16 démontrent qu'après la 22^e pièce fabriquée avec un contre-moule flexible, basés sur la pièce typique de l'étude de cas, le retour sur l'investissement est obtenu et les dépenses initiales reliées aux coûts des outillages ont été remboursées. L'objectif étant de 50 pièces, l'économie dans le procédé amenée par l'utilisation d'un contre-moule flexible est démontrée et justifie l'utilisation de cette technologie. La Figure 3.21 illustre le retour sur l'investissement et démontre que l'économie engendrée par l'utilisation d'une membrane augmente rapidement suivant le point du «ROI».

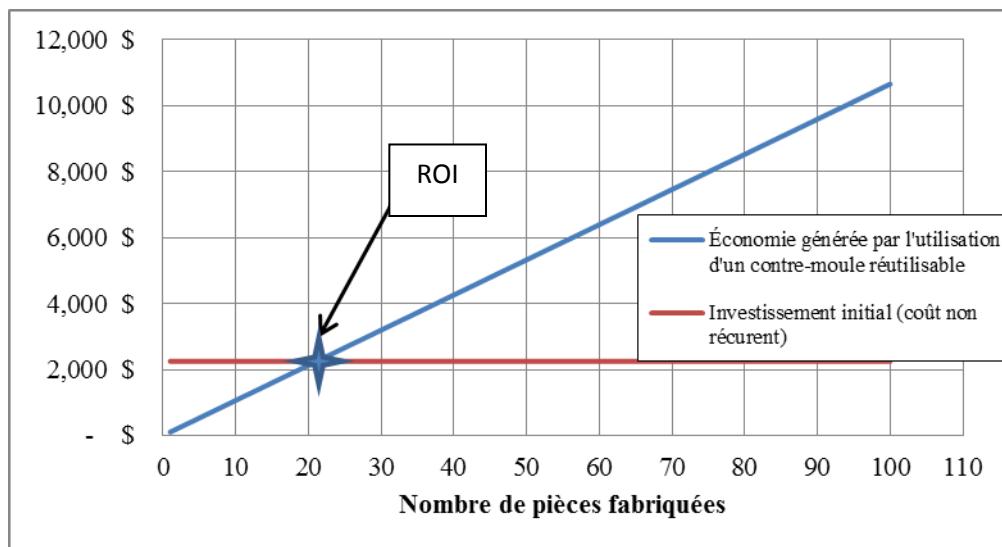


Figure 3.21 Retour sur l'investissement d'un contre-moule réutilisable

Dans cette section, la viabilité de la technologie des contre-moules flexibles a été démontrée, au niveau de la durabilité, de son utilisation en infusion, au niveau de l'absence de contamination, mais également au niveau d'un retour sur l'investissement rapide. La technologie est donc suffisamment mature afin d'être intégrée en production. La revue globale du procédé amélioré incluant cette technologie est présentée au chapitre 4. Suite à la revue du procédé présentée au chapitre 2, les opérations ciblées pour l'amélioration étaient tout d'abord l'étape de mise sous vide telle que présentée dans cette section. Par la suite vient l'amélioration reliée à l'étape de laminage contact avec le développement des noyaux infusables, présentée à la section 3.2.

3.2 Construction sandwiche

Comme démontré lors de l'étude de cas du chapitre 2, les opérations liées à l'étape de laminage contact et de mise sous vide nécessaires à l'intégration d'un noyau de type nid d'abeille dans la construction sandwiche amènent plusieurs problèmes et sont ainsi visées par l'amélioration du procédé. En effet, les opérations reliées à cette étape amènent des temps de fabrication élevés, ajoutent un cycle de polymérisation et représentent une étape difficilement répétable. Le nid d'abeille ne pourrait pas être intégré à l'étape d'infusion, car les cellules vides se rempliraient de résine, expliquant pourquoi l'étape de laminage contact par moulage sous vide est nécessaire. Le laminage contact étant un procédé artisanal et peu contrôlé, la qualité est peu constante et des temps de réparation sont souvent nécessaires, comme présenté dans la section 1.1. L'objectif de cette section est de comparer les noyaux de type nid d'abeille initialement utilisés avec des noyaux en mousse pouvant être intégrés directement à l'étape d'infusion. Cette amélioration permettrait de diminuer les temps et les coûts de manière considérable en éliminant l'étape de moulage contact. L'équivalence au niveau de la performance se doit toutefois d'être démontrée pour la résistance au feu, le poids et les performances mécaniques.

3.2.1 Type de noyaux à l'étude

Différents types de noyaux en mousse sont disponibles sur le marché pour la fabrication de constructions sandwiches en matériaux composites (se référer au Tableau 1.5). Le Tableau 3.17 présente les matériaux qui ont été évalués et comparés avec la référence (nid d'abeille) dans le cadre de ce projet de recherche.

Tableau 3.17 Type de noyaux à l'étude

#	Fabricant	Code produit	Matériaux	Densité nominal (kg/m ³)	Résistance en compression (MPa)	Module en compression (MPa)	Résistance en tension (MPa)	Module en tension (MPa)	Résistance en cisaillement (MPa)	Module en cisaillement (MPa)
1	Plascore	PN2-1/8-3.0	Aramid	48	2,00	ND	ND	ND	1,4 ^a	0,7 ^b
2	Airex	C70.90	PVC	100	2,00	130	2,7	84	1,70	40,0
3	Airex	T90.100	PET	110	1,40	85	2,2	120	0,80	20,0
4	Diab	Divinycell F90	PES	90	0,70	40	2,2	NA	1,10	9,5
5	Diab	HT101	Mousse polymère	100	1,50	105	3,5	130	1,60	35,0
6	Evonik	Rohacell Rist 71	PMI	75	1,70	ND	2,2	ND	1,30	12,0
7	Evonik	Rohacell Rima 71	PMI	75	1,70	ND	2,2	ND	1,30	42,0
8	Nidacore	PET 100	PET	100	1,86	84	2,1	107	1,19	27,9

^aDirection 'L' (nid d'abeille).

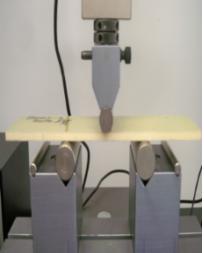
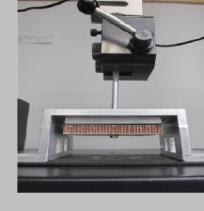
^bDirection 'W' (nid d'abeille).

Ces propriétés, présentées à titre de référence, consistent aux propriétés nominales du noyau et sont récupérées directement des fiches techniques des fabricants. Ces matériaux seront mis en forme par le procédé d'infusion afin d'être évalués et comparés entre eux, avec la résine époxy et la fibre de verre 9.6 oz/vg² représentant une construction typique du cockpit.

3.2.2 Évaluation des noyaux

Le poids des constructions sera comparé, combiné à différents essais selon le plan d'expérience du Tableau 3.18 . L'objectif est de démontrer que les performances des noyaux sont équivalentes ou supérieures à celle du nid d'abeille.

Tableau 3.18 Plan d'expérience d'évaluation des noyaux

#	Essais	Norme	Illustration	Explication
1	Résistance au feu	FAR 25.853 Section (a), Appendix F, Part I (a)(i)		<p>Il est obligatoire que les constructions respectent les requis au niveau du feu. Si ce test échoue la configuration sera éliminée étant un requis pour la qualification et certification aéronautique.</p> <p>Particularité du test : Exposition de l'échantillon pendant 60 secondes en position verticale, température de la flamme minimum de 1550 °F.</p> <p>Dimension des échantillons : 3 po x 12 po. Noyau exposé à la flamme.</p>
2	Cisaillement du noyau en flexion (trois points)	ASTM C393		<p>Les noyaux sont utilisés pour augmenter la rigidité dans des endroits critiques du cockpit, dû aux requis de déflexion imposés aux panneaux (Tableau 2.13).</p> <p>Les noyaux étant soumis au cisaillement, cet essai va permettre de comparer la performance des noyaux en mousse avec la référence (nid d'abeille).</p>
3	Arrachement d'insert	Procédure interne Hutchinson		<p>Cet essai a été développé sur mesure afin de simuler l'installation des panneaux sur la structure de l'avion.</p> <p>L'insert est collé dans le laminé à travers le noyau avec une colle polyuréthane et la force ultime d'arrachement est mesurée sur une cellule de charge.</p>

3.2.2.1 Évaluation du poids des constructions sandwiches

Telle que présentée dans le Tableau 3.17, la densité nominale des noyaux de type nid d'abeille est très faible par rapport aux noyaux de mousse, les nids d'abeilles étant remplis d'air. Cette section présente la différence de densité des constructions composites, une fois mises en forme par le procédé d'infusion et moulage contact dans le cas du nid d'abeille. Les résultats moyens sont présentés au Tableau 3.19

Erreur ! Source du renvoi introuvable..

Tableau 3.19 Mesure de la densité des noyaux

#	Type de noyaux	Épaisseur du noyau (mm)	Épaisseur du laminé (mm)	Densité du laminé (kg/m ³)	
1	Plascore	PN2-1/8-3.0	0,257	7,72	346,32
2	Airex	C70.90	0,243	7,62	483,12
3	Airex	T90.100	0,251	7,81	570,42
4	Divinycell	F90	0,253	7,80	480,71
5-6	Divinycell	HT101	0,258	7,79	509,55
7	Rohacell	RIST 71	0,255	7,82	496,48
8	Rohacell	RIMA 71	0,257	7,91	386,41
9	NicaCore	PET 100	0,252	7,81	620,36

Les résultats sont présentés sous forme de diagramme sur la Figure 3.22 afin de faciliter la comparaison.

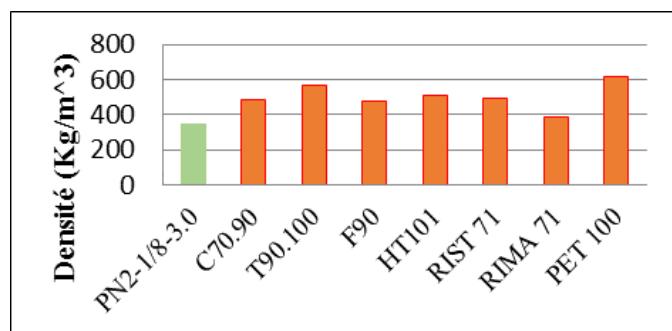


Figure 3.22 Mesure de la densité des noyaux

Ces résultats mettent en évidence une faiblesse des noyaux en mousse, créant des constructions plus lourdes avec des densités au-dessus de la référence du nid d'abeille. Ces résultats étaient prévisibles considérant les densités nominales présentées au Tableau 3.17. Toutefois, un facteur à considérer est que les noyaux en mousse absorbent une quantité de résine pendant l'infusion selon la proportion de cellules ouvertes, affectant la densité finale de la construction. Ce phénomène explique le manque de cohérence entre les densités nominales et les densités après infusion, tel que la différence entre les deux types de Rohacell qui possèdent la même densité nominale mais des densités une fois infusés très différente. En effet, le noyau Rohacell - RIMA 74 s'est avéré très performant au niveau de la densité. La différence s'explique par le fait que la série RIMA a été conçue spécialement pour l'infusion et pour minimiser l'absorption de résine avec des cellules fermées aux surfaces. Ce résultat démontre bien le phénomène d'absorption de la résine.

La comparaison des densités n'a pas éliminé directement les noyaux avec une densité plus élevée que la référence avec nid d'abeille. En effet, si les gains sur les coûts de fabrication suite à l'utilisation d'un noyau en mousse sont suffisamment élevés, l'augmentation du poids pour la section renforcée par un noyau en mousse peut être admissible. De plus, il est important de considérer que ce n'est pas l'ensemble des panneaux qui sont renforcés d'un noyau dans le cockpit (neuf pièces selon Tableau 2.1), et que seulement une portion de la pièce est couverte par le noyau. Donc, malgré que la densité des constructions sandwiches soit élevée, l'effet sur le poids total du cockpit est limité. L'objectif est que l'ensemble des panneaux pèsent sous les 85 lb (Tableau 2.13), donc une augmentation locale peut être acceptable si les autres gains compensent pour cette augmentation. De plus, un gain au niveau de la quantité de résine est à prévoir pouvant compenser légèrement l'augmentation de la densité des constructions sandwiches. Ce gain potentiel serait amené par l'étape de moulage contact qui sera éliminée avec l'intégration des noyaux en mousse à l'infusion, étape qui amenait initialement une quantité de résine peu contrôlée et parfois à la hausse.

L'effet de l'augmentation de la densité pour ces constructions sur le poids de la pièce sera mesuré sur la pièce typique de l'étude de cas (chapitre 2) et présenté dans la section 3.2.3.

3.2.2.2 Essai de feu selon la norme FAR 25.853

Les résultats des tests de feu sont critiques et si l'un des matériaux évalués échoue ce test, cette construction sera automatiquement exclue, étant un requis obligatoire pour des pièces d'intérieur d'avions (Tableau 2.13). Les résultats sont présentés au Tableau 3.20.

Tableau 3.20 Résultat des tests de feu (FAR 25.853)

#	Type de noyaux		Quantité testée ^a	Résultat	Temps d'extinction ^b [seconde]	Longueur brûlée [pouce]	Temps d'égouttement ^c [seconde]
1	Plascore ^d	PN2-1/8-3.0	3	Passe	0,00	4,30	0,00
2	Airex	C70.90	3	Passe	4,03	4,37	0,00
3	Airex	T90.100	3	Échec	33,33	3,27	0,00
4	Diab	F90	3	Passe	8,60	4,50	0,00
5	Diab	HT101	3	Échec	19,43	3,92	0,00
6	Diab	HT101	3	Échec	22,07	3,07	0,00
7	Rohacell	RIST 71	3	Échec	39,53	4,08	0,00
8	Rohacell	RIMA 71	3	Échec	>60,00	12,00	>3
9	Nidacore	PET 100	3	Échec	55,50	3,83	0,00
	Requis		3	-	≤15	≤6	≤3

^aConstruction des échantillons : 4 plis de fibre de verre 9,6 oz/vg², résine époxy, noyau ¼ po placé au centre du laminé. Les échantillons ont été polymérisés pendant un minimum de 7 jours à la température ambiante avant le déroulement des essais de feu.

^bTemps d'extinction moyen de l'échantillon suite au retrait de la flamme (exposition à la flamme de 60 secondes).

^cTemps d'égouttement moyen des matériaux en feu suite au retrait de la flamme.

^dConstruction avec le nid d'abeille servant de référence.

L'essai consiste à exposer l'échantillon d'une dimension de 3 pouces par 12 pouces, en position verticale, à une flamme d'une température de 1550 °F pendant 60 secondes, sur la section de l'échantillon, dans ce cas-ci le noyau exposé. Trois requis sont imposés par la norme et la moyenne de trois échantillons testés doit satisfaire chacun des requis afin que le test soit réussi. Si un seul des requis échoue, le test est considéré comme un échec. Par exemple, l'échantillon #3 (T90.100) a satisfait le requis de la longueur brûlée, mais le temps d'extinction moyen est supérieur à 15 secondes, donc le résultat est un échec.

Les essais sont réalisés par un laboratoire externe, approuvé par un DAD («Design Approval Designee»), nécessaire afin de certifier les essais auprès de Transport Canada. Suite à l'analyse des résultats, il est possible de constater que la majorité des matériaux ont échoué le test, seules les constructions avec la référence de nid d'abeille, le noyau C70.90 et le divinycell F90 ont réussi.

Le requis le plus critique est le temps d'extinction qui a causé des problèmes représentant la cause d'échec dans les essais effectués. Le noyau HT101 a été testé deux fois puisque le premier essai (#5) était près du requis de 15 secondes, donc un deuxième essai a été réalisé (#6), mais sans succès. Ce test est très dur pour la résine époxy et, lorsque combinée à un noyau en mousse, la flamme semble être alimentée par la construction ayant de la difficulté à s'éteindre, expliquant les temps d'extinction élevés. La propagation de la flamme semble cependant limitée, considérant que la longueur brûlée est dans la majorité des cas sous les requis de six pouces. Un exemple d'échantillons ayant échoué le test est présenté à la Figure 3.23 et on constate que la résine a brûlé complètement dans la section où la flamme était appliquée, exposant maintenant la fibre, phénomène comparable à un résultat de pyrolyse. La longueur de la flamme est malgré tout sous les six pouces, mais les temps d'extinction étaient en dehors des requis, représentant un échec.

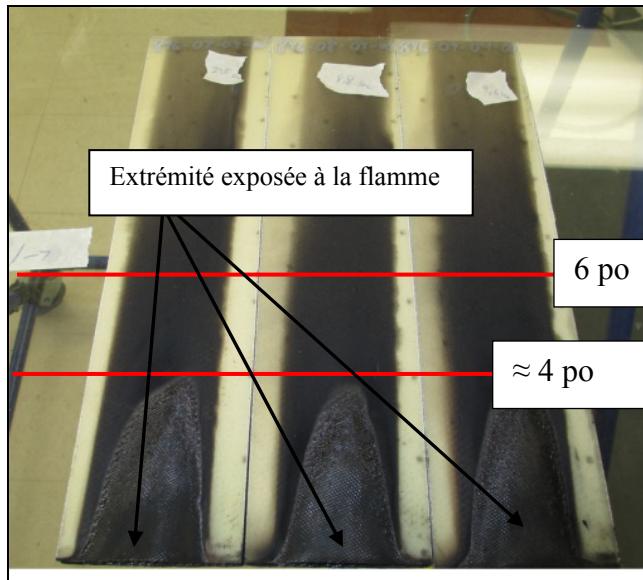


Figure 3.23 Exemple des échantillons #5 (HT101) brûlés selon la norme FAR 25.853

Pour répondre à ces tests, il ne suffisait pas que les noyaux rencontrent individuellement les requis, ils devaient répondre aux requis une fois mis en forme dans une même construction devant représenter la configuration finale, sans quoi le résultat est négatif. Ce phénomène semble très fréquent selon l'expérience de l'entreprise partenaire Hutchinson et amène un défi supplémentaire dans le choix des matériaux. Les matériaux ayant échoués les essais de feu sont éliminés des essais mécaniques, car ils ne pourront pas être utilisés dans cette configuration. Il est possible qu'avec un autre type de construction (nombre de plis différents, tissus différents, épaisseur de noyau différente) ou avec une autre résine époxy, les résultats aient été différents, mais avec la construction utilisée lors de ces essais, qui est celle typique des panneaux du cockpit à l'étude, les résultats sont négatifs.

3.2.2.3 Essai de flexion trois points sur constructions sandwiches

Comme mentionné précédemment, les noyaux sont ajoutés dans les constructions afin d'augmenter la rigidité de certaines pièces dans des zones du cockpit, majoritairement pour

supporter des instruments installés sur les panneaux et amenant des contraintes supplémentaires. Les requis généraux imposés aux pièces du cockpit (Tableau 2.13) inclut également des requis de déflexion, devant avoir un minimum de déformation selon une force appliquée. Donc, les noyaux sont soumis à des efforts en cisaillement. L'essai de cisaillement en flexion selon la norme ASTM C393, présenté à la Figure 3.24, a donc été sélectionné afin de comparer la performance des noyaux en mousse à la référence du nid d'abeille. L'objectif est de démontrer que les noyaux en mousse sont au minimum équivalents aux nids d'abeilles. Le montage du test est présenté à la Figure 3.24.

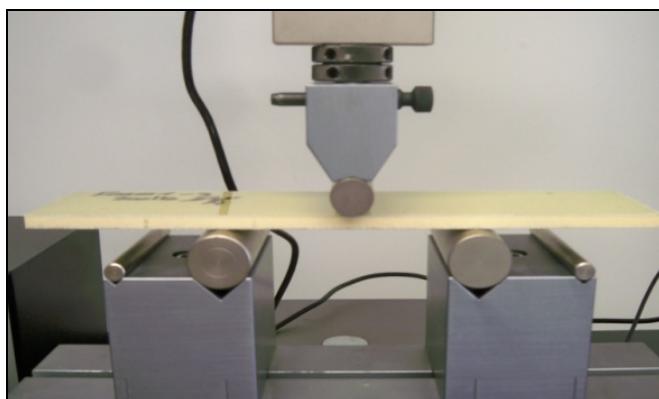


Figure 3.24 Essai de cisaillement en flexion
trois points

Les trois types de noyaux qui ont réussi les essais de feu ont été évalués en flexion, soit la référence (nid d'abeille) et les noyaux en mousse C70.90 et le divinycell F90.

Tableau 3.21 Essai de flexion trois points selon la norme ASTM C393^a

#	Identification	Épaisseur ^b du laminé	Contrainte ultime en cisaillement du noyau [FS, Ult.]	Force maximale moyenne [Pmax]	Contraintes en flexion des peaux [σ]	Moment de flexion maximal moyen
		(mm)	(KPa)	(N)	(MPa)	(N*mm)
1	PN2	7,72	792	866	98	212
2	C70.9 0	7,62	1014	1056	115	260
3	F90	7,80	860	937	92	230

^aCondition de test : Testé à température ambiante, résultats moyens de 5 échantillons

^bConstruction : 4 plis de fibre de verre 9,6 oz/vg² avec le noyau au centre de la construction. Tous les noyaux ont une épaisseur nominale de 6,35 mm (1/4 po)

La contrainte ultime en cisaillement est reprise et présentée sous forme de diagramme sur la Figure 3.25.

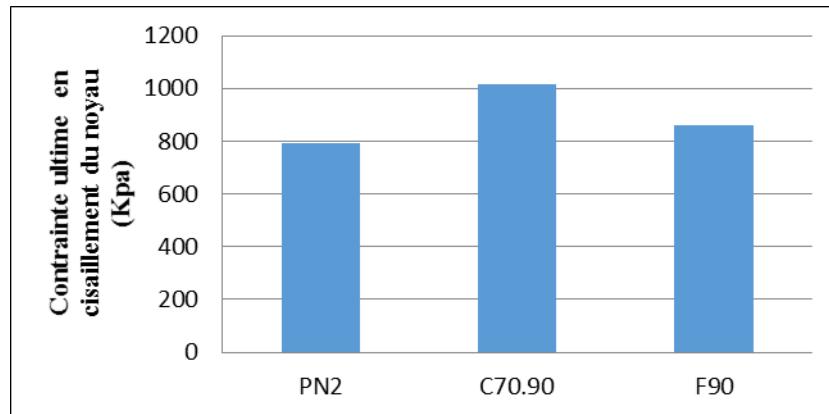


Figure 3.25 Essai de flexion, contrainte ultime en cisaillement des noyaux

Suite à l'analyse des résultats, on constate que le noyau de type Airex C70.90 est le plus performant lorsque soumis en cisaillement, avec une contrainte ultime supérieure aux autres noyaux testés. Par conséquent, la force maximale, la contrainte aux peaux ainsi que le moment de flexion sont supérieurs avec le noyau #2 (C70.90). Ces résultats sont rassurants quant à l'utilisation de noyaux en mousse, engendrant des résultats en cisaillement en flexion plus élevés que la référence (nid d'abeille PN2).

Un facteur également jugé critique est la résistance à l'arrachement des inserts ayant été dans le passé une source de plainte chez Hutchinson et de retour du client dû à des bris en service. L'utilisation de noyaux en mousse doit au minimum atteindre les mêmes performances que les noyaux de type nid d'abeille utilisés initialement. Un essai de résistance à l'arrachement des inserts est présenté dans la section suivante.

3.2.2.4 Essai d'arrachement d'insert dans les constructions sandwiches

L'essai d'arrachement a été conçu afin de simuler l'effort induit sur les panneaux lorsqu'ils sont installés sur la structure de l'avion. L'objectif est de démontrer que la modification du type de noyau n'affecte pas la performance d'arrachement des inserts qui sont collés à travers le noyau. Le type d'insert ainsi que la méthode d'assemblage sont représentatifs de la fabrication des panneaux du cockpit à l'étude. Le détail des essais est présenté dans le Tableau 3.22.

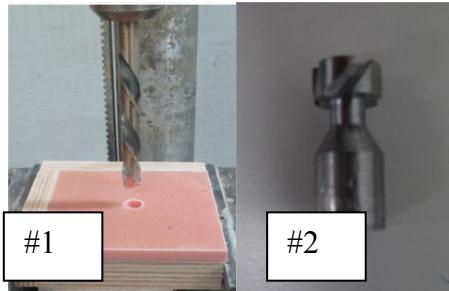
Tableau 3.22 Essai d'arrachement des inserts sur constructions sandwiches

Description			
<p>1- Fabrication des échantillons :</p> <p>a. Construction :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Noyau en mousse : infusion; - Nid d'abeille : infusion + moulage contact. <table border="1" style="margin-left: 200px;"> <tr> <td>Fibre de verre 5,8 oz/vg² (x2)</td> </tr> <tr> <td>Noyau 6,35 mm (1/4 po)</td> </tr> <tr> <td>Fibre de verre 9,6 oz/vg² (x2)</td> </tr> </table>	Fibre de verre 5,8 oz/vg ² (x2)	Noyau 6,35 mm (1/4 po)	Fibre de verre 9,6 oz/vg ² (x2)
Fibre de verre 5,8 oz/vg ² (x2)			
Noyau 6,35 mm (1/4 po)			
Fibre de verre 9,6 oz/vg ² (x2)			

Description

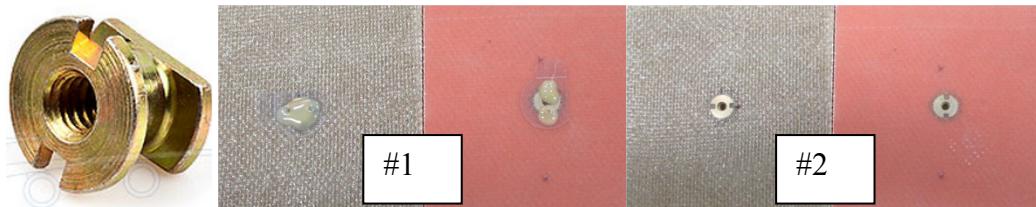
2- Assemblage des inserts :

- Perçage de la peau supérieure et du noyau (#1);
- Évidage de noyau en contour du trou avec la mèche #2 (permettre à la colle de s'injecter en contour).



3- Collage des inserts (#1) + finition (#2) :

- Adhésif à base de polyuréthane;
- Insert : NAS1836-08-07.



4- Réalisation des essais

a. Équipement de test :

- Support;
- Tige;
- Cellule de charge.



Description
<p>b. Conditions du test :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Normal à la surface; - Vitesse de déplacement : 0,05 po/min (1,27mm/min); - Testé à température ambiante; - Six échantillons testés par configuration. 

La référence (nid d'abeille PN2) est comparée au noyau en mousse de Airex C70.90 qui s'est avéré jusqu'à maintenant la solution de remplacement la plus performante. Les résultats de ces essais sont présentés au Tableau 3.23.

Tableau 3.23 Résultats des essais d'arrachement sur constructions sandwiches

#	Noyau	Masse de colle (g)	Force d'arrachement moyen (lb)	Écart-type (lb)	Coefficient de variation [σ/μ] (%)
1	PN2	1,44	390,80	34,46	9 %
2	C70.90	1,19	439,24	7,91	2 %

Suite à l'analyse des résultats, on constate que les constructions avec un noyau en mousse (C70.90) obtiennent une force d'arrachement moyenne supérieure à celle obtenue avec un noyau de nid d'abeille (PN2) et ce, malgré une plus faible application de colle à l'assemblage. La raison d'une quantité inférieure de colle est possiblement due à l'espace plus limité dans les noyaux en mousse comparativement aux cellules vides des nids d'abeille, laissant ainsi moins de place à la colle pour s'infiltrer. Les échantillons testés sont présentés à la Figure 3.26 et la Figure 3.27.



Figure 3.26 Essais d'arrachement des inserts sur les noyaux en nid d'abeille (PN2)



Figure 3.27 Essais d'arrachement des inserts sur noyaux en mousse (C70.90)

On constate également que la rupture est plus franche avec l'utilisation des noyaux en mousse, illustrée sur la Figure 3.26 et la Figure 3.27. Ces résultats peuvent s'expliquer par l'utilisation du noyau en mousse qui amène une densité supérieure, mais également à l'opération de moulage contact de la peau supérieure et du noyau. On constate effectivement une meilleure constance dans les résultats avec les noyaux en mousse, avec un coefficient de variation inférieur, qui peut s'expliquer en partie par l'intégration du noyau directement à l'opération d'infusion. En effet, l'étape de laminage contact nécessaire pour l'intégration du

nid d'abeille amène une variabilité au procédé et une qualité peu constante pouvant se refléter sur les résultats.

Les résultats des essais d'arrachement, combinés aux essais de flexion et de feu, ont rassuré les spécialistes M&P de Hutchinson quant à l'utilisation des noyaux en mousse pour renforcer certains panneaux du cockpit, comme solution de remplacement aux nids d'abeille. Une caractérisation plus complète a été réalisée afin de mesurer plus en détails la performance de ces noyaux avant leur utilisation en production. Cette analyse était toujours en cours lors de la rédaction de ce mémoire et ne sera donc pas présentée. Le plan d'expérience rassemblant les méthodes standards de caractérisation des constructions sandwiches est tout de même présenté dans le Tableau 3.24 à titre de référence.

Tableau 3.24 Méthode standard de caractérisation des constructions sandwiches

#	Norme	Description
1	ASTM C273	Méthode d'essai standard pour mesurer les propriétés en cisaillement de constructions sandwiches («core shear»)
2	ASTM C365	Méthode d'essai standard pour mesurer les propriétés en compression perpendiculaire à la surface de constructions sandwiches («flatwise compression»)
3	ASTM C297	Méthode d'essai standard pour mesurer les propriétés en tension perpendiculaire à la surface de constructions sandwiches («flatwise tension»)
4	ASTM C393	Méthode d'essai standard pour mesurer les propriétés en cisaillement par flexion de constructions sandwiches (trois points, quatre points, poutre courte, poutre longue) («core shea by beam flexure»)
5	ASTM D1781	Méthode d'essai standard pour mesurer le pelage adhésif d'une construction sandwiche («climbing drum peel»)
6	ASTM D7136	Méthode d'essai standard pour mesurer la résistance à l'impact de matériaux composites renforcés

Des essais sur des échantillons conditionnés en température et en humidité (85 % HR) seraient également nécessaires afin de réaliser une caractérisation complète des constructions sandwiches pour une utilisation en aéronautique, ainsi que des essais à froid et à chaud (-55 °C à +85 °C).

Il est à noter que le noyau C70.90 qui s'est avéré le plus performant suite aux essais effectués se retrouve également dans la liste des matériaux approuvés par Bombardier et est couvert par une spécification pour la fabrication de pièces d'intérieur d'avion (BAMS-832-001) («Bombardier Aerospace Material Specification»), permettant ainsi d'intégrer ce type de noyau beaucoup plus aisément, facilitant la qualification et la certification.

3.2.3 Moulage des noyaux en mousse

L'intégration dans le procédé d'infusion d'un noyau en mousse modifie les étapes de fabrication par rapport au procédé initial. Les schémas de la Figure 3.28 et la Figure 3.29 présentent sommairement les étapes de fabrication afin de démontrer le gain sur les délais de fabrication amenés par l'utilisation de noyaux en mousse. Ces gains seront chiffrés dans le chapitre 4, lors de la revue complète du procédé d'infusion amélioré.

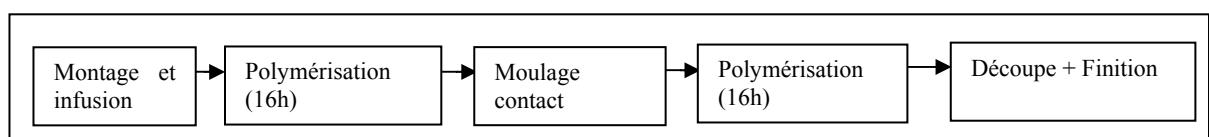


Figure 3.28 Moulage de constructions sandwiches avec un noyau de type nid d'abeille

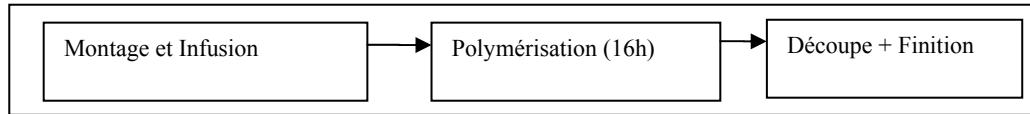


Figure 3.29 Moulage de constructions sandwiches avec un noyau en mousse

Pour la fabrication de pièces complexes, le noyau en mousse se doit d'être formé en température afin de lui donner la forme désirée. Ce formage n'est pas nécessaire avec les nids d'abeille qui peuvent se déformer sans apport de température, étant flexibles et considérant que les rayons de courbure des panneaux le permettent n'étant pas trop prononcés. Dans le cadre du projet de recherche, la procédure utilisée consiste à chauffer le noyau au four à 110 °C, qui s'est avéré être la température de formage optimale, et le maintenir pendant un minimum de deux minutes, le noyau devient formable très rapidement. Le noyau est ensuite positionné dans le moule avec un gabarit de positionnement et un poids y est déposé pendant le refroidissement (minimum de deux minutes). Le noyau conservera ensuite sa forme et pourra être intégré dans la préforme avant l'infusion. Un facteur de retrait doit être considéré, variant selon le type et la dimension du noyau utilisée. Cet aspect n'est pas critique, car la tolérance dimensionnelle du noyau n'est pas un enjeu. Le procédé de moulage des noyaux pourrait être optimisé dans le futur, par exemple avec l'utilisation du procédé de thermoformage.

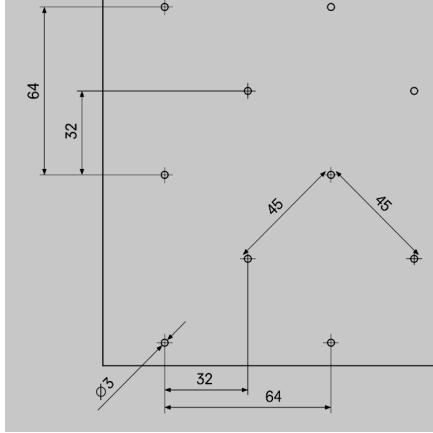
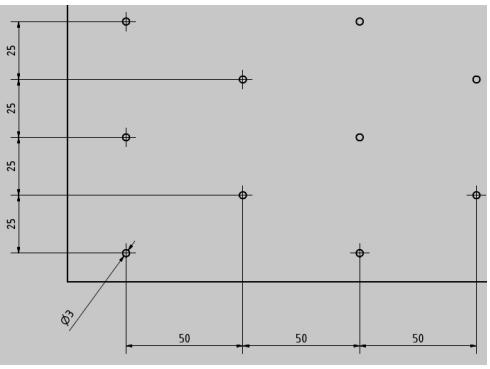
Les étapes de fabrication seront reprises lors de l'analyse complète du procédé présentée au chapitre 4. La Figure 3.30 présente la pièce typique de l'étude de cas fabriquée avec un noyau en mousse.



Figure 3.30 Pièce typique avec un noyau en mousse

Un chanfrein à 45° sur le contour du noyau permet à la fibre de se déformer plus facilement et d'éviter les surplus de résine en contour du noyau. Les noyaux doivent également être perforés afin faciliter l'imprégnation des renforts et s'assurer que la résine puisse mouiller les tissus sous le noyau évitant ainsi l'apparition de zones sèches en résine. Au niveau de la perforation, le fabricant (Airex) propose deux standards de perçage qui permettrait à Hutchinson de recevoir les planches (4 pieds par 8 pieds) déjà perforées, solution favorisée comparativement à un perçage sur mesure devant être effectué à l'interne, augmentant les coûts de fabrication. Le Tableau 3.25 présente les deux patrons proposés par le fabricant.

Tableau 3.25 Patrons standards de perçage

PATRONS	CROQUIS DE PERÇAGE
<p>Patron #1 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Percé avec mèche; - Diamètre des trous : 3 mm; - Diagonale entre les trous : 45 mm; - Distance entre les trous : 32 et 64 mm. 	
<p>Patron #2 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Perforé avec poinçon; - Diamètre du poinçon : 3 mm; - Diamètre sur le panneau \approx 2 à 3 mm; - Distance entre les trous : 50 et 25 mm. 	

Des panneaux 2D ont été infusés avec les deux patrons de perçage. Lors de l'infusion, le front de résine avance rapidement dans le médium d'infusion. Toutefois, tel qu'illustré à la Figure 3.31, le front est irrégulier sous le noyau amenant un risque de créer des zones sèches en résine dues à une mauvaise imprégnation.



Figure 3.31 Comportement du front de résine,
vue du dessous

Une infusion par le centre (radiale) a été utilisée dans la stratégie d'infusion présentée sur la Figure 3.30, expliquant les ronds d'imprégnation plus gros au centre de la plaque et diminuant selon le sens d'infusion (vers l'extérieur). Ce phénomène est propice à emprisonner des vides dans la pièce. Le patron # 2 s'est avéré problématique créant des zones mal imprégnées avec des vides et pauvres en résine sur certaines plaques fabriquées, comme illustré sur la Figure 3.32. Les trous poinçonnés se referment et semblent bloquer la résine qui a de la difficulté à bien imprégner les fibres sous le noyau, combiné à une distance totale plus élevée entre les trous par rapport au patron #1 (100 mm versus 64 mm).

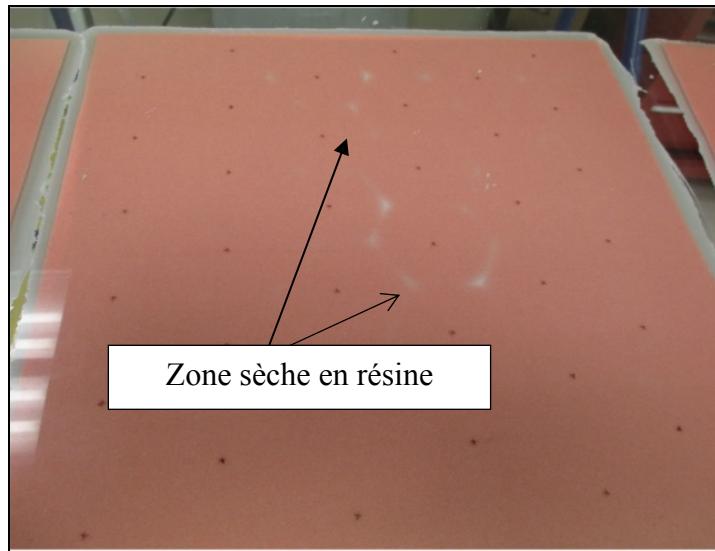


Figure 3.32 Zones sèches en résine sous le noyau en mousse, patron #2

Le patron #1 n'a pas causé ce type de problèmes et est donc le patron recommandé pour l'infusion de noyaux en mousse. Puisque ce patron peut être intégré aux panneaux directement par le fabricant, cette solution est recommandée à Hutchinson afin d'éviter un centre de charge supplémentaire.

L'évaluation présentée dans cette section a permis de sélectionner un noyau en mousse (C70.90) pouvant remplacer le noyau de type nid d'abeille dans la fabrication des constructions sandwichs. Cette amélioration amène un gain considérable au niveau des temps de fabrication, notamment en éliminant un cycle de polymérisation puisque l'étape de laminage contact n'est plus nécessaire. Plusieurs consommables seront ainsi éliminés. La résistance au feu a été démontrée, ainsi que l'équivalence avec la solution initiale (nid d'abeille) au niveau de la performance mécanique, démontrée grâce aux essais de cisaillement du noyau en flexion et des essais d'arrachement des inserts. La qualité des pièces produites est également améliorée par l'intégration des noyaux en mousse à l'infusion, suite à l'élimination de l'étape de laminage contact qui amenait des surfaces irrégulières et

une qualité peu constante. La robustesse du procédé pour la fabrication des constructions sandwiches est ainsi améliorée.

Une limite se situe toutefois au niveau du poids, étant donné la densité supérieure de la construction sandwiche avec le noyau en mousse, amenant une augmentation du poids final de la pièce. L'effet sur l'ensemble du cockpit n'est cependant pas problématique, considérant que seulement neuf pièces dans le cockpit sont renforcées par une construction sandwiche (Tableau 2.1) et que seulement une portion de ces pièces intègrent un noyau. De plus, considérant que l'étape de laminage contact est éliminée avec l'utilisation d'un noyau en mousse, une diminution de la quantité de résine consommée par le procédé devrait se refléter par une baisse du poids de la pièce. En effet, basé sur la pièce typique des constructions sandwiches, le poids de la pièce moulée avec un noyau en mousse de type C70.90 est de 0,864 kg, entraînant une légère augmentation de 0,020 kg en comparaison à la pièce avec un nid d'abeille (Tableau 2.6), représentant une différence de seulement 2,3 %.

Les prochaines améliorations amenées au procédé d'infusion sont les opérations reliées à manipulation de la résine avec la mécanisation du procédé, présentée dans la section 3.3.

3.3 Mécanisation du procédé

Traditionnellement, les étapes du procédé reliées à la manipulation de la résine, telles que la mesure et le mélange de la résine avec le durcisseur, le dégazage et l'infusion, sont des étapes très manuelles amenant de nombreuses sources d'erreurs dans le procédé. Les premières sources d'erreur sont reliées à la précision et la qualité du mélange. Un mauvais ratio de durcisseur amènera des problèmes de polymérisation, car la résine époxy est très sensible à la précision du mélange. La qualité du mélange de la résine avec le durcisseur est également importante, car un mauvais mélange peut également amener des problèmes de polymérisation avec des zones mal polymérisées.

Ensuite, un risque majeur se situe au niveau de l'infusion avec les techniques traditionnelles et l'utilisation d'un pot de résine, avec un risque d'introduire de l'air dans le montage.

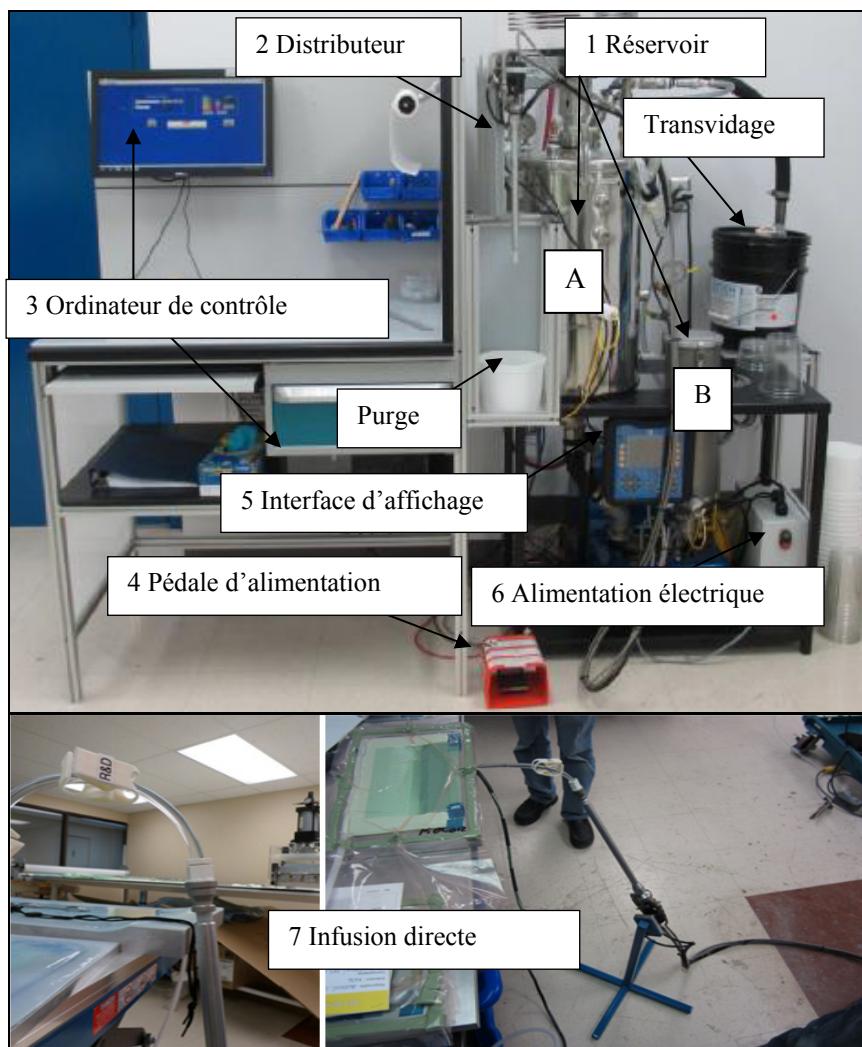
Malgré l'ajout d'une quantité de résine dans le fond du pot pour éviter l'aspiration d'air, il a été observé à plusieurs reprises sur le plancher de production que des tuyaux aspireraient de l'air dans le pot de résine, causé par un tuyau qui bouge, une quantité insuffisante de résine, un oubli de fermer l'entrée, etc. Les conséquences sont importantes sur la pièce, causant des dommages souvent non réparables (vides et porosités). En plus de considérer la perte de matières et de consommables qui sont générées par les méthodes initiales.

Un autre facteur à considérer, présenté dans le chapitre 2 dans l'étude de cas, est que suite au mélange de la résine et du durcisseur (3 minutes de brassage manuel), le mélange est dégazé 5 minutes dans une cloche à vide afin d'y retirer l'air. Cette étape diminue le temps de travail de la résine déjà très court (36 minutes selon le Tableau 2.3), pouvant être problématique avec les pièces de grande dimension, en plus de représenter une perte de temps pour les opérateurs.

Les objectifs en mécanisant ces étapes du procédé sont donc de réduire les temps reliés à la préparation de la résine et d'augmenter la robustesse du procédé, en limitant les risques d'erreurs reliées à ces opérations. Cette section présente l'intégration d'un système automatique de mélange et d'infusion de la résine. Afin de démontrer la fiabilité et la performance de la technologie développée, des tests de feu, des essais de temps de gel, des mesures du taux massique de fibres et une analyse des propriétés thermomécaniques (température de transition vitreuse par DSC et température de fléchissement sous charge) sont présentés. Le gain au niveau des matériaux et des temps reliés à ces améliorations sera présenté dans le chapitre 4 lors de la revue du procédé améliorée.

Une machine de mélange et d'infusion automatique a été intégrée au procédé. Cette machine rassemble plusieurs fonctions, permettant de dégazer les composants (résine et durcisseur), de les mélanger, de contrôler la quantité injectée, en plus d'enregistrer les paramètres d'infusion, tels que la température, la pression et le temps d'injection. Les objectifs en

intégrant cette machine dans le procédé sont de réduire les porosités et les bulles d'air dans les pièces, d'améliorer la qualité et l'homogénéité du mélange, de réduire les erreurs de manipulation, de réduire les temps de production ainsi que de diminuer la perte de résine. La traçabilité des pièces produites sera également améliorée grâce au système informatique connecté à la machine. Ce système permet d'enregistrer tous les détails d'identification de la pièce, d'imputer la quantité de résine tout en enregistrant les paramètres d'infusion. Auparavant, ces données étaient transcris manuellement dans les bons de travail. Certains paramètres, tels que les débits et les quantités injectées, n'étaient simplement pas contrôlés et enregistrés. La machine de mélange et d'infusion automatique est présentée à la Figure 3.33.



Les différentes fonctions et composants du système automatique sont ensuite présentés au Tableau 3.26.

Tableau 3.26 Description du système automatique de mélange et d'infusion

#	Items	Description
1	Réservoir (x2) et pompe	Réservoir sous vide en acier inoxydable pour la résine et le durcisseur (A et B). Unité de remplissage automatique (transvidage) directement à partir du 5 gallons de résine. Alimentation de la pompe par gravité.
2	Distributeur de résine	Consiste à un mélangeur statique permettant de mélanger la résine et le durcisseur. Machine avec ratio fixe (+/-1 %). Mesure volumétrique.
3	Écran et ordinateur de contrôle	Machine d'injection connectée à un ordinateur et utilisation d'un logiciel informatique (labview) pour personnaliser les programmes d'injection. Possibilité de contrôler la pression d'injection, le débit et la quantité de résine injectée. La Figure 3.34 montre l'affichage pendant une infusion, directement sur l'écran d'ordinateur. Activation à distance possible.
4	Pédale d'alimentation	Pédale d'alimentation permettant d'activer la machine manuellement.
5	Interface d'affichage	Permet d'utiliser la machine sans l'ordinateur et de voir certains paramètres en temps réel.
6	Alimentation électrique	Alimentation électrique de la machine.
7	Injection directe	Le distributeur de résine (mélangeur statique) est connecté directement au montage d'infusion, contrôlé avec le programme informatique.

Ce système automatique de mélange et d'infusion a permis d'éliminer plusieurs opérations manuelles, éliminant par la même occasion plusieurs sources d'erreurs. Le temps de travail de la résine est également augmenté, car le mélange se fait dans le mélangeur statique éliminant l'effet de masse présent dans le procédé d'infusion traditionnel utilisant un pot de résine, tout en éliminant le temps de dégazage. Une économie de résine est également

générée en évitant l'excédent de résine dans le pot lors du procédé initial, en plus de la réduction de la quantité de résine dans les tuyaux. De plus, puisque la quantité de résine infusée est contrôlée, l'arrêt de l'infusion est automatique, diminuant les pertes considérant qu'initialement une quantité de résine supplémentaire était souvent infusée se retrouvant dans les tuyaux de sortie. Ce gain sera chiffré dans le chapitre 4 lors de la revue du procédé améliorée.

Le contrôle du débit amène également un meilleur contrôle du procédé, permettant de modifier les vitesses d'infusion et de contrôler le front d'avancement. Une vitesse optimale (voir modèle de Patel à la Figure 1.9) permettant d'optimiser le flow tout en minimisant la formation de porosités, phénomène important à contrôler dans les procédés d'infusion afin d'en augmenter sa performance, comme expliqué dans la section 1.2. Cette vitesse optimale a été trouvée grâce aux essais d'infusion, variant entre 40 et 50 grammes par minute, pouvant varier selon le type de géométries et de constructions. Lors de la fabrication de la première pièce, le programme est enregistré et son débit est figé en fonction du front d'avancement. La machine amène une pression minimale afin d'amener la résine jusqu'à la sortie du mélangeur statique, afin que le vide prenne le relais pour aspirer la résine dans le montage. La pression ne doit pas augmenter afin de ne pas déformer le contre-moule qui est flexible. Le débit volumétrique de la machine est transformé en débit massique par le programme «labview» programmé spécialement pour cette application.

Ce contrôle permet d'infuser à une vitesse optimale limitant la formation de porosités dues à l'emprisonnement d'air, comme expliqué précédemment. Des programmes ont été créés dans le logiciel «labview» afin de contrôler et d'effectuer l'acquisition des paramètres de fabrication, tels que le débit et la quantité massique de résine infusée, la température de la résine, le temps d'infusion, la quantité de résine et de durcisseur dans les réservoirs ainsi que la traçabilité sur la pièce en cours de fabrication (numéro de pièce, numéro de moule, etc.). L'affichage est présenté à la Figure 3.34.

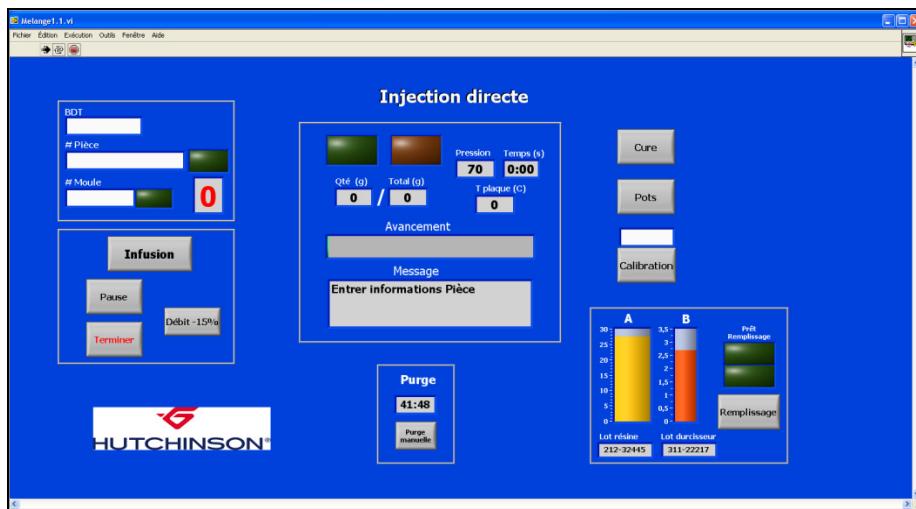


Figure 3.34 Programme d'infusion automatisée

Les limites de cette technologie sont principalement reliées à la logistique dans le département, considérant que la machine est fixe et que les 70 pièces du cockpit (70 moules) doivent être amenées à la machine lors de la phase d'infusion. La machine sera donc chargée et un goulot d'étranglement dans le département pourrait se créer. Considérant que les volumes annuels sont relativement faibles, soient entre 50 et 70 avions par année (représentant un total de 3 500 à 4 900 pièces annuelles), une coordination des opérations pourra être mise en place afin de s'adapter à cette nouvelle technologie. Une réorganisation du département est également nécessaire. Un plan de maintenance doit également être suivi afin de s'assurer que la machine soit maintenue et calibrée, dans le cas contraire, la précision du mélange pourrait être affectée. Des temps d'ingénierie sont également nécessaires afin de créer les programmes d'infusion pour chaque pièce, en plus du coût d'acquisition de l'équipement. Les gains amenés dans le procédé seront présentés au chapitre 4. Afin d'intégrer ces améliorations, des essais de feu, de temps de gel ainsi qu'une analyse des propriétés thermomécaniques a été demandée par les spécialistes M&P de Hutchinson afin de valider que ces propriétés ne sont pas modifiées par la nouvelle technologie. Tout d'abord, trois constructions typiques fabriquées avec le système automatique (mélange et infusion) ont été testées au feu, présentées dans le Tableau 3.27.

Tableau 3.27 Test de feu avec infusion automatisée

Construction		Quantité testée	Résultat	Temps d'extinction [seconde]	Longueur brûlée [pouce]	Temps d'égouttement [seconde]
1	4 plis de fibre de verre	3	Passe	7,6	3,4	0
2	2 plis de verre / Noyau $\frac{1}{4}$ po / 2 plis de verre	3	Passe	4,2	2,6	0
3	2 plis de verre / 1 pli de carbone	3	Passe	8,6	2,1	0
Critères d'acceptation		3	-	≤ 15	≤ 6	≤ 3

-Testé selon la norme FAR 25.853Section (a), Appendix F, Part I (a)(i).

Toutes les constructions ont réussi les essais de feu, ne bloquant donc pas l'utilisation du système automatique à cette étape. Un essai de temps gel a également été effectué sur une quantité de 300 grammes. Les temps de travail et températures au pic exothermique sont mesurés en comparant un mélange préparé manuellement à un mélange préparé automatiquement, présentés sur la Figure 3.35.

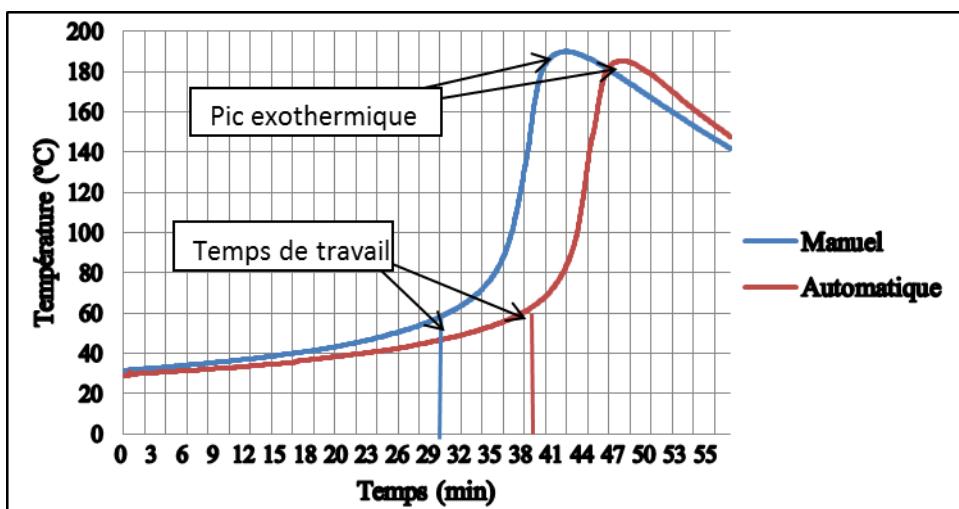


Figure 3.35 Courbe de temps gel -Mélange manuel versus automatique

Les résultats sont extraits du graphique et présentés dans le Tableau 3.28.

Tableau 3.28 Test de temps gel, mélange manuel versus automatique

	Temps de travail (min)	Température au pic exothermique (°C)
Mélange manuel	≈ 30	189,9
Mélange automatique	≈ 40	185,1

Le décompte pour le temps de travail débute au moment où la résine est prête pour l'infusion, ce qui explique le gain sur le temps de travail avec le mélange automatique. Le mélange n'a pas à être mélangé ni à être dégazé avant l'infusion, allongeant ainsi le temps de travail. De plus, considérant que le mélangeur statique est connecté directement au montage, il n'y a pas d'effet de masse et le temps de travail est réellement beaucoup plus long que les 40 minutes mesurées dans un 300 grammes de résine. La température au pic exothermique est similaire entre les deux méthodes, se situant entre 185 et 190 °C.

Une comparaison entre la solution initiale avec le pot de résine et la solution améliorée avec l'utilisation d'un système automatique est présentée au Tableau 3.29 en reprenant les objectifs initiaux reliés à ce développement.

Tableau 3.29 Comparaison de la technique manuelle versus automatisée

	Mé lange manuel et infusion avec pot de résine	Mé lange et infusion automatique
1. Présences de porosités et bulles d'air	Risque accru, car le mélange est manuel. Cinq minutes de dégazage sont nécessaires une fois le mélange complété. Risque d'infiltration d'air dans le pot de résine.	Limite les contacts avec l'air et dégazage en continu. Risque d'introduction d'air dans les connexions avec les tuyaux. Le débit contrôlé permet d'optimiser le front d'injection donc diminution des porosités.
2. Homogénéité du mélange	Mé lange manuel, risque possible de mauvais ratio et mauvais mélange.	Quantité volumétrique calibrée quotidiennement. Mélange assuré par le mélangeur statique. Meilleure répétabilité et fiabilité.
3. Temps de fabrication	Deux minutes de mélange manuel requis plus cinq minutes de dégazage.	Élimination du temps de mélange et dégazage. Gain sur les temps de fabrication. Spécialisation de la main d'œuvre.
4. Temps de travail	Temps de travail limité, car effet de masse dans pot de résine.	Aucun effet de masse, car la résine mélangée à la sortie du mélangeur statique est reliée directement au tuyau d'alimentation.
5. Contrôle	Débit non contrôlé, pression constante (pression de vide). Arrêt de l'infusion lorsque la fibre est saturée, quantité massique de résine peu constante durant la fabrication. Beaucoup de pertes inutiles.	Débit et quantité contrôlés avec un minimum de pression (éviter une pression positive dans le sac). Permet d'optimiser le front d'avancement. Arrêt de l'infusion lorsque la quantité de résine prévue est injectée, meilleur contrôle et diminution de la perte.
6. Traçabilité	Enregistrement des numéros de lot de la résine et du durcisseur manuellement sur les bons de travail. Paramètres d'infusion non enregistrés.	Enregistrement des numéros de lots, imputation de matière dans le système MRP de l'entreprise et enregistrement des paramètres d'infusion (température, temps, pression, quantité) automatique grâce au programme «labwiew».
7. Exposition à la résine	Plusieurs contacts avec la résine pour les opérateurs avec les techniques manuelles, en plus d'émanation de volatiles. Risque pour la santé des travailleurs.	Aucune exposition et contact avec la résine pendant les opérations du procédé, unique exception lors de la maintenance et nettoyage de la machine.

Les gains amenés par la mécanisation de ces étapes sont démontrés grâce aux nombreux avantages qu'ils amènent. La mécanisation du procédé vise les étapes de mélange et

d'infusion de la résine, mais l'ajout de cycle de post-cuisson est également ciblé afin d'augmenter la performance des pièces produites, présenté dans la section 3.4.

3.4 Effet de la post-cuisson sur les performances thermomécaniques

Dans le procédé initial, une attente de sept jours est nécessaire afin d'obtenir une polymérisation complète, la pièce n'étant pas considérée prête pour livraison avant ce délai. Afin de réduire ce délai, mais également afin d'évaluer l'effet d'une post-cuisson sur la performance des pièces produites, une analyse des propriétés thermomécaniques a été effectuée avant et après la post-cuisson. Les méthodes de mélange de la résine (manuelle versus automatique) seront également comparées, afin de s'assurer que la polymérisation est complète peu importe la méthode utilisée. Des mesures du taux de fibres, de la température de transition vitreuse mesurée par DSC ainsi que des essais de température de fléchissement sous charge ont été réalisées. Les différentes configurations testées et les résultats sont présentés dans le Tableau 3.30 et le Tableau 3.31 respectivement.

Tableau 3.30 Identification des configurations, propriétés thermomécaniques

	Construction	Méthode de mélange/infusion	Cycle de polymérisation
1	Fibre de verre, 6 plis	Manuelle	7 jours à la température ambiante
2	Fibre de verre, 6 plis	Automatique	7 jours à la température ambiante
3	Fibre de verre, 6 plis	Manuelle	16 h à température ambiante + 4 h à 88 °C
4	Fibre de verre, 6 plis	Automatique	16 h à température ambiante + 4 h à 88 °C
5	Fibre de carbone, 5 plis	Manuelle	7 jours à la température ambiante
6	Fibre de carbone, 5 plis	Automatique	7 jours à la température ambiante
7	Fibre de carbone, 5 plis	Manuelle	16 h à température ambiante + 4 h à 88 °C
8	Fibre de carbone, 5 plis	Automatique	16 h à température ambiante + 4 h à 88 °C

Les essais ont été réalisés par le groupe CTT, un laboratoire externe d'essai spécialisé affilié au cégep de St-Hyacinthe, qui sont accrédité par Transport Canada pour de nombreux tests. Les résultats sont présentés au Tableau 3.31.

Tableau 3.31 Comparaison des propriétés thermomécaniques

	Configuration	Taux massique de fibres ^a (%)	Coefficient de variation [σ/μ] (%)	Température de fléchissement sous charge ^b (°C)	Coefficient de variation [σ/μ] (%)	Température de transition vitreuse ^c (°C) ^c	Coefficient de variation [σ/μ] (%)
1	Verre-Manuelle-7 jours	58	0,8	44,0	1,3	73,3	3,5
2	Verre-Automatique-7 jours	59	0,9	44,6	1,0	73,1	1,6
3	Verre-Manuelle-Post cuisson	ND	ND	57,6	0,4	79,9	0,3
4	Verre-Automatique-Post cuisson	ND	ND	54,8	0,3	79,2	1,2
5	Carbone-Manuelle-7 jours	64	0,3	49,7	0,6	71,1	2,2
6	Carbone-Automatique-7 jours	66	0,1	53,7	3,2	72,2	1,1
7	Carbone-Manuelle-Post cuisson	ND	ND	73,2	1,5	77,6	1,6
8	Carbone-Automatique-Post cuisson	ND	ND	70,7	2,7	77,9	0,2

^aTaux massique de fibres (%) testé sur la norme ASTM D2584 et ASTM D1603. Test effectué par le Groupe CTT. Résultats moyens de 3 échantillons testés.

^bTempérature de fléchissement sous charge (1,8 MPa) testé selon la norme ISO 75-3. Test effectué par le Groupe CTT. Résultats moyens de 3 échantillons testés.

^cTempérature de transition vitreuse testée par DSC selon l'ASTM D3418. Test effectué par le Groupe CTT. Résultats moyens de 3 échantillons testés.

Suite à l'analyse des résultats, on constate que la post-cuisson améliore les propriétés thermomécaniques de manière considérable. La température de déflexion sous charge est

augmentée d'environ 30 % que ce soit avec l'utilisation de fibres de verre ou de carbone, et une augmentation d'environ 10 % pour la température de transition vitreuse avec l'ajout d'une post-cuisson. Donc, en plus de diminuer le délai de sept jours dans le procédé initial avant de considérer une pièce complètement polymérisée, il y a un gain au niveau des propriétés thermomécaniques des pièces composites produites grâce à l'ajout d'une post-cuisson dans le procédé. De plus, les résultats sont similaires entre la préparation manuelle et automatisée et ce, pour les différents matériaux utilisés. L'intégration du système automatique s'avère positive. Les taux massiques de renforts ne semblent également pas affectés par l'utilisation du système automatisé d'infusion, avec des résultats similaires selon les méthodes utilisées. Des taux d'environ 58 % pour les laminés de fibre de verre ont été mesurés et 65 % pour les laminés de carbone.

3.5 Synthèse

Les différentes améliorations amenées au procédé d'infusion ont été présentées dans ce chapitre. Tout d'abord, l'étape de mise sous vide a été améliorée avec le développement d'un contre-moule flexible réutilisable. Ensuite, les constructions sandwiches ont été améliorées en remplaçant les noyaux de type nid d'abeille par les noyaux en mousse pouvant être intégrés directement à l'opération d'infusion. Puis, la mécanisation du procédé a permis d'éliminer les opérations manuelles reliées au mélange et à l'infusion de la résine, en intégrant un système automatique au procédé d'infusion. Finalement, l'utilité d'un cycle de post-cuisson a été démontrée, permettant de diminuer les délais et d'assurer une polymérisation complète tout en optimisant les propriétés thermomécaniques du composite. Les étapes de développement ont été expliquées et l'équivalence, voire la supériorité, au niveau de la performance par rapport au procédé initial a également été démontrée dans ce chapitre. Les gains de ces améliorations sur les temps et les coûts de fabrication et sur la robustesse du procédé sont présentés dans le chapitre 4.

CHAPITRE 4

GAIN DU PROCÉDÉ D'INFUSION AMÉLIORÉ

Dans ce chapitre, les gains du procédé d'infusion amélioré sont mesurés au niveau des temps, des coûts et de la robustesse. Les gains sont basés sur les résultats d'une minisérie testée en préproduction, sur les mêmes pièces typiques que celles présentées au chapitre 2. L'étude de cas de la section 2.3 est également reprise en intégrant les améliorations présentées au chapitre 3.

Les améliorations apportées au procédé sont présentées sur une pièce du cockpit prête pour infusion, illustrée à la Figure 4.1. Le procédé d'infusion amélioré y est clairement présenté, avec l'utilisation d'une machine automatique de mélange et d'infusion, d'une membrane permanente ainsi qu'un noyau infusible situé sous la membrane, non visible sur la photo.

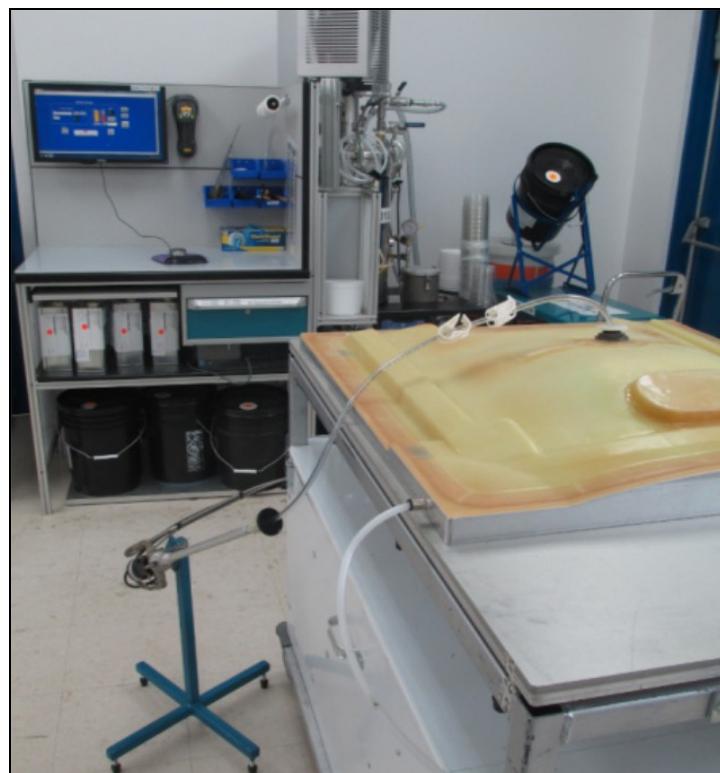


Figure 4.1 Pièce prête pour infusion procédé amélioré

Les étapes de fabrication, basées sur la pièce typique de l'étude de cas du chapitre 2, sont reprises en intégrant les améliorations apportées au procédé et présentées dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Étapes de fabrication du procédé d'infusion amélioré

#	Étapes	Temps réel (délai)	Représentation
1	Découpe des tissus et des consommables - Aucune amélioration apportée	15 min	
2	Préparation du moule - Aucune amélioration apportée	5 min (15 min de délai)	
3	Découpe et formage du noyau en mousse - Nouvelle étape qui remplace le laminage du noyau en nid d'abeille - Découpe manuelle avec gabarit - Chauffage au four à 110 °C (maintient 2 à 5 min) - Formage dans le moule avec un poids et refroidissement (2 à 5 min)	15 min	

#	Étapes	Temps réel (délai)	Représentation
4	<p>Drapage des tissus, du noyau et des consommables</p> <ul style="list-style-type: none"> - Positionnement des deux premiers plis - Positionnement du noyau en mousse - Positionnement des deux derniers plis - Tissu d'arrachage et médium d'infusion - Élimination des tuyaux spiraux utilisés pour distribuer la résine et le vide dans le procédé initial 	45 min	
5	<p>Mise sous vide</p> <ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de la membrane réutilisable - Aucun consommable nécessaire, le sac avec ruban scellant n'étant plus requis. - Connexion en contour du moule et distribution du vide à travers des canaux intégrés à la membrane et le tissu d'arrachage (tissu poreux) 	5 min	
6	<p>Infusion et polymérisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - Connexion à la machine de mélange et d'infusion - Démarrage du programme d'infusion - Arrêt automatique lorsque la quantité de résine programmée a été infusée. - Fermeture des clips et déconnexion de la machine - Polymérisation minimum de 16 h à température ambiante dans le moule 	15 min (16 h de délai)	

#	Étapes	Temps réel (délai)	Représentation
7	Démoulage de la pièce	15 min	
8	Post-cuisson - Quatre heures à 88 °C (Post-cuisson directement dans le moule avec plaque chauffante sous le moule ou au four).	5 min (4 h de délai)	
9	Découpe finale - Utilisation d'une commande numérique 5 axes - Utilisation d'un support de découpe - Aucune amélioration apportée	10 min	
10	Finition - Nettoyage de la pièce - Sablage des défauts (surplus de résine, plis de sacs) - Réduction des temps de finition, car l'étape de moulage contact a été éliminée	30 min	
11	Pièce finale - Polymérisation complète grâce à la post-cuisson (délai de 7 jours dans le procédé initial)	Total: 160 min (20,25 h de délai)	

Tout d'abord, les gains au niveau des coûts de la main d'œuvre reliés aux différentes étapes de fabrication sont présentés au Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Coût de la main d'œuvre, procédé d'infusion amélioré

#	Opération	Temps hommes par pièces (min)	Délai (h)	Coût par pièce ^a
1	Découpe des tissus et consommables	15	-	22,50 \$
2	Préparation du moule (traitement récurrent)	5	0,25	7,50 \$
3	Découpe et formage du noyau	15	-	22,50 \$
4	Drapage des tissus et des consommables	45	-	67,50 \$
5	Mise sous vide	5	-	7,50 \$
6	Infusion et polymérisation	15	16	22,50 \$
7	Démoulage de la pièce	15	-	22,50 \$
8	Post-cuisson	5	4	7,50 \$
9	Découpe finale	10		15,00 \$
10-11	Finition et pièce finale	30	-	45,00 \$
	Total	160	20,25	240,00 \$
	Procédé initial	330	36,25	495,00 \$
	Gain (%)	51,4 %	44,10 %	51,5 %

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

Basée sur la pièce typique des constructions sandwiches, l'économie en temps et en coûts de la main d'œuvre est de 51,4 % avec le procédé amélioré. Ce gain est amené par l'étape de mise sous vide qui a été simplifiée grâce à l'utilisation de membranes réutilisables, à l'élimination de l'étape de laminage contact suite à l'intégration d'un noyau en mousse ainsi qu'à l'utilisation d'une machine automatique de mélange et d'infusion et de l'ajout d'un cycle de post-cuisson. En plus de réduire le temps de la main d'œuvre, le retrait d'un cycle de polymérisation qui nécessitait un délai de 16 heures engendre une économie de plus de 40 % en délai d'attente. Également à considérer, la pièce est prête pour livraison après le délai de 20,25 heures grâce à la post-cuisson, considérant que dans le procédé initial, un délai de sept jours était compté pour atteindre la polymérisation complète.

Plusieurs consommables ont été éliminés avec les améliorations apportées au procédé, réduisant les périssables jetés à chaque fabrication, en plus d'une économie sur le coût de la pièce, présentée dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Coût des consommables, procédé d'infusion amélioré

#	Description	Coût unitaire ^a	Quantité/pièce	Coût/pièce
1	Ruban adhésif	79,65 \$/rl	0,1rl	7,97 \$
2	Tuyau rigide	0,60 \$/m	0,5m	0,30 \$
3	Tissu d'arrachage - PeelPly	15,27 \$/m ²	1m ²	15,27 \$
4	Média d'infusion	6,96 \$/m ²	1m ²	6,96 \$
5	Infuseur plat	5,94 \$/m	0,25m	2,97 \$
6	Membrane	31,51 \$/pièce ^b	1 pièce	31,51 \$
			Total	64,98 \$
			Procédé initial	98,46 \$
			Gain (%)	34,0 %

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

^bLe coût de la membrane provient du Tableau 3.14

La pellicule d'ensachage ainsi que les rubans scellant utilisés pour la mise sous vide dans le procédé initial ne sont plus requis grâce à l'utilisation de membrane réutilisable. Les tuyaux spiraux ont également été éliminés. Les tuyaux pleins rigides ont été remplacés par des tuyaux flexibles plus faciles à mettre étanche, ainsi que l'infuseur qui a été modifié en étant intégré à la membrane (item 5, infuseur plat). Le coût unitaire considéré pour la membrane (item 6) est celui du coût de fabrication amorti sur 50 pièces, représentant un scénario critique où la membrane serait refaite au complet après la 50^e pièce fabriquée. Ces valeurs ont été déterminées selon les résultats sur la durée de vie et l'évaluation des coûts de la membrane présentée au chapitre 3. Ce scénario est conservateur, car habituellement les problèmes qui surviennent sont des fissures mineures qui sont réparables permettant d'augmenter leur durée de vie. En effet, au moment de la rédaction du mémoire, certaines membranes ayant servi à fabriquer plus de 100 pièces étaient toujours utilisables. Le coût unitaire de la membrane pourrait donc être revu à la baisse lors d'analyses futures. L'élimination de l'opération de moulage sous vide rendue possible grâce à l'intégration des noyaux en mousse à l'infusion a également permis d'éliminer de nombreux consommables, tels que le film perforé et le feutre absorbant. Finalement, l'intégration de la machine dans le procédé a également réduit la quantité de consommables, en éliminant le pot de plastique requis pour le mélange et l'infusion tout en réduisant la longueur des tuyaux d'alimentation. Le mélangeur statique utilisé dans le procédé amélioré n'est pas considéré comme un

consommable et son coût est considéré comme négligeable, étant réutilisé sur une journée complète (deux quarts de travail) considérant que la résine y est purgée à chaque 20 minutes en cas d'inutilisation, évitant la polymérisation dans le mélangeur.

Puis, les gains au niveau des coûts des matières premières sont présentés au Tableau 4.4.

Tableau 4.4 Coût des matières premières, procédé d'infusion amélioré

#	Description	Coût ^a unitaire	Quantité/pièce	Coût/pièce
1	Fibre de verre 9,6 oz/vg ²	13,32 \$/m ²	1,675 m ²	22,31 \$
2	Fibre de verre 5,85 oz/vg ²	16,47 \$/m ²	1,675 m ²	27,59 \$
3	Résine époxy (inclut durcisseur)	122,73 \$/kg	0,900 kg	110,46 \$
4	Noyau en mousse	93,96 \$/m ²	0,210 m ²	19,73 \$
			Total	180,09 \$
			Procédé initial	245,79 \$
			Gain (%)	26,7 %

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

Les gains au niveau des coûts de la matière première proviennent principalement de la quantité de résine qui a diminué dans le procédé amélioré, passant de 1,4 kg à 0,9 kg par pièce. L'économie de résine provient en partie de l'élimination de l'étape de moulage qui était une source de perte de résine. Également, l'infusion automatique permet d'économiser une quantité importante de résine en contrôlant la quantité massique infusée et en limitant la perte causée par les mélanges manuels. Aussi, un léger gain au niveau du coût est relié au noyau, considérant que le noyau en mousse à un coût unitaire inférieur aux noyaux de types nid d'abeille.

Les gains totaux au niveau des coûts de fabrication, incluant la main d'œuvre, les matières premières et les consommables, sont rapportés au Tableau 4.5.

Tableau 4.5 Résumé des coûts de fabrication, procédé d'infusion amélioré

Coûts ^a	Procédé initial	Procédé amélioré	Amélioration
Main d'œuvre	495,00 \$	240,00 \$	51,5 %
Matières premières	245,79 \$	180,09 \$	26,7 %
Consommables	98,46 \$	64,98 \$	34,0 %
TOTAL	839,25 \$	485,07 \$	42,2 %

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées.

Au cumulatif, basé sur la pièce typique des constructions sandwiches, le gain sur le coût de la main d'œuvre, directement relié au temps de fabrication, est de 51,5 % et le gain sur le coût total de fabrication de 42,2 %.

Les améliorations apportées au procédé ont permis non seulement de diminuer les coûts de fabrication, mais également d'équilibrer la distribution des coûts. À l'analyse de la Figure 4.2, on constate que la main d'œuvre représente 50 % des coûts et que l'autre 50 % représente les matériaux et les consommables. Dans le procédé initial, la distribution des coûts était plutôt de 59 % pour la main d'œuvre et de 41 % pour les matériaux et consommables. Les améliorations du procédé ont donc balancé la répartition des coûts, en réduisant le besoin en main d'œuvre.

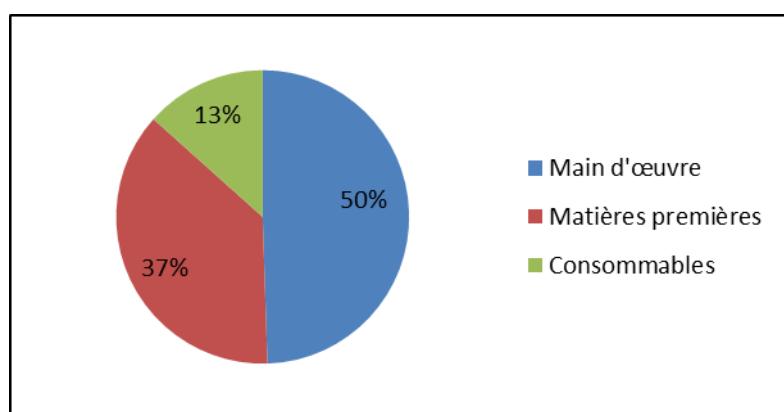


Figure 4.2 Proportion des coûts de fabrication, procédé d'infusion amélioré

Afin de détailler le procédé et de faciliter la compréhension, les améliorations ont été démontrées sur une pièce en particulier, représentant la pièce typique de la catégorie des constructions sandwiches. Toutefois, les améliorations du procédé ne se limitent pas uniquement à cette pièce, mais bien à l'ensemble des pièces du cockpit. Les trois catégories de constructions présentées au chapitre 2, soit les pièces en fibre de verre monolithique, les constructions sandwiches et les pièces avec fini carbone, sont reprises au Tableau 4.6 afin de démontrer les gains sur l'ensemble des pièces.

Tableau 4.6 Pièces typiques du cockpit, procédé d'infusion amélioré

Construction	Quantité par cockpit	Pièce de référence	Temps de fabrication (min)	Amélioration	Coût total de fabrication ^a	Amélioration
Fibre de verre monolithique	31		100	52 %	255,69 \$	45 %
Construction sandwiche	9		160	52 %	485,07 \$	42 %
Fini carbone	30		120	53 %	382,41 \$	38 %
Procédé amélioré :	70	Moyenne pondérée :	116 min	53 %	339 \$	42 %
Procédé initial :			245 min		579 \$	

^aLes coûts sont majorés afin de protéger la confidentialité de l'entreprise, toutes proportions gardées. Le coût total inclut les coûts de la main d'œuvre, des matières premières et des consommables.

La distribution du coût de fabrication moyen pour l'ensemble des pièces est présentée à la Figure 4.3.

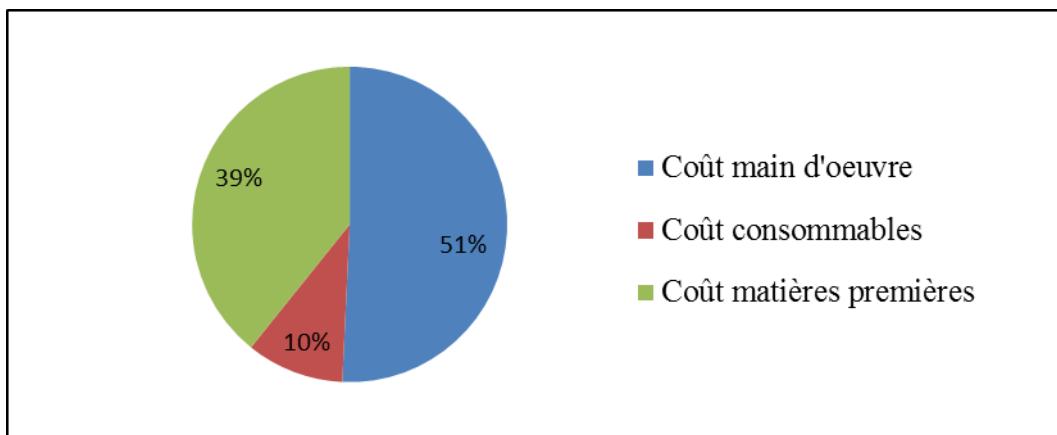


Figure 4.3 Distribution des coûts de fabrication moyens, procédé d'infusion amélioré

Les résultats présentés au Tableau 4.6 et la distribution des coûts présentés à la Figure 4.3 démontrent les gains obtenus avec l'amélioration du procédé. Les gains sont similaires selon le type de construction (fibre de verre monolithique, fini carbone et construction sandwiche), avec une économie moyenne sur les temps de fabrication de 53 % et de 42 % sur les coûts de fabrication totaux. En effet, le temps de fabrication moyen est passé de 245 minutes à 116 minutes et le coût moyen de fabrication moyen est passé de 579,02 \$ à 339,49 \$. De plus, l'équilibre entre les proportions des coûts est encore une fois démontré, grâce à une diminution du besoin en main d'œuvre, qui représentait initialement 63 % des coûts moyens (Figure 2.2) et qui est maintenant réduit à 51 %.

L'objectif initial du projet a donc été obtenu, soit de diminuer les temps de fabrication de 50 % tout en diminuant les coûts de fabrication d'au moins 25 %. L'effet sur la robustesse du procédé est ensuite démontré.

Dans le chapitre 2, les non-conformités reliées au procédé d'infusion pour l'année 2012 ont été présentées. La même analyse est présentée pour l'année 2014, considérant que les améliorations ont été intégrées en production durant cette période. L'objectif est de démontrer que les améliorations amènent une diminution du taux de non-conformités produites par le procédé d'infusion. L'analyse des données pour l'année 2014 est présentée dans le Tableau 4.7.

Tableau 4.7 Analyse des non-conformités du procédé d'infusion amélioré

Type de non-conformités du département d'infusion	Quantité	Ratio des non-conformités	Ratio sur pièces produites
Mauvais alignement des fibres, fibre en surface	174	26,1 %	3,1 %
Défauts de surface, esthétique, lustre insuffisant	26	3,9 %	0,5 %
Porosités et bulles d'air	379	56,8 %	6,8 %
Délaminage	3	0,4 %	0,1 %
Contaminants	20	3,0 %	0,4 %
Zone sèche en résine	0	0,0 %	0,0 %
Manque de matériel	15	2,2 %	0,3 %
Mauvaise construction	46	6,9 %	0,8 %
Autres (panne électrique, problème de vide, etc.)	4	0,6 %	0,1 %
Total	667	100,0 %	11,9 %
Total de pièces produites (annuelle)		5600	
Taux de non-conformité (année 2014)			11,9 %
Taux de non-conformité (année 2012)			20,2 %
Gain			41,1 %

Les non-conformités sont reprises et représentées sous forme de graphique, présenté à la Figure 4.4.

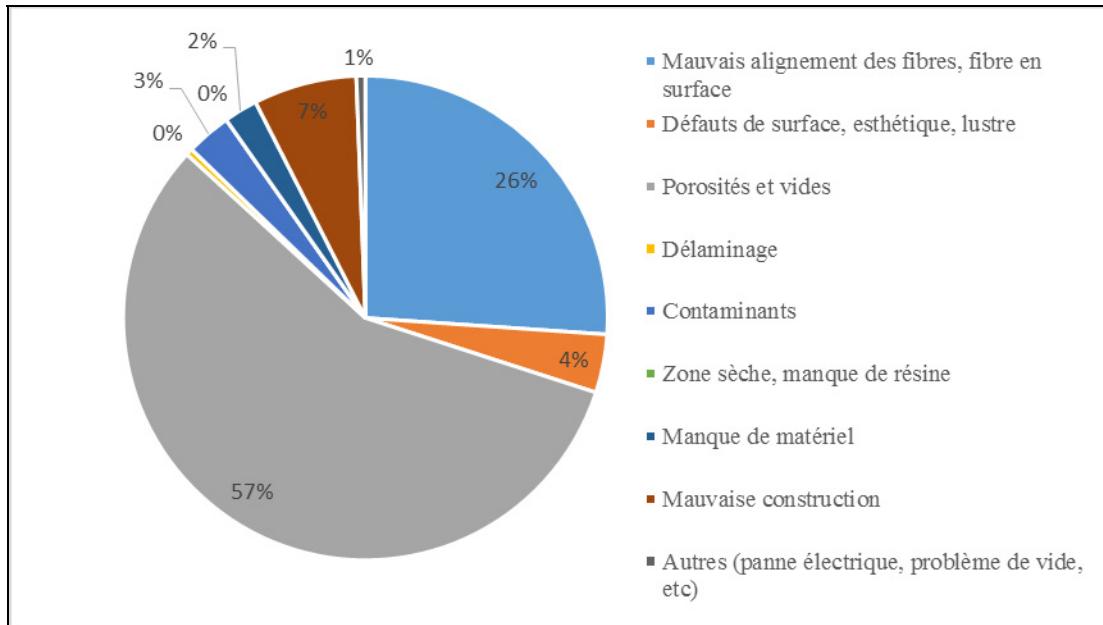


Figure 4.4 Dispersion des non-conformités du procédé d'infusion amélioré

À l'analyse du Tableau 4.7 et de la Figure 4.4, on constate que le taux de non-conformités, basé sur le nombre de pièces fabriquées au courant de l'année, s'est amélioré de 41,1 %, passant de 20,2 % pour l'année 2012 à 11,9 % en 2014. Les problèmes de porosités et de bulles d'air sont cependant encore bien présents, représentant 56,8 % des non-conformités identifiées au courant de l'année. Malgré ce ratio, une légère amélioration a été mesurée, considérant qu'en 2012 un total de 7,2 % des pièces produites amenaient une non-conformité causée par des porosités et des vides, tandis qu'en 2014 ce taux est passé à 6,8 %. Ce taux devrait s'améliorer pour l'année 2015, considérant que les modifications ont été intégrées au courant de l'année 2014 et que les améliorations au procédé prennent un certain temps avant de se refléter sur les non-conformités. Les analyses futures permettront de le valider. Les défauts esthétiques sont les types de défauts qui ont subi la plus grande amélioration, considérant que seulement 0,5 % des pièces produites ont eu ce type de défauts pour l'année 2014, contre 3,7 % en 2012.

Globalement, la robustesse du procédé semble donc s'être améliorée en diminuant le taux de non-conformités. Des analyses futures permettront de le valider, considérant que les

améliorations ont été intégrées au courant de l'année 2014 et que l'effet sur les non-conformités se fera sentir une fois les améliorations bien intégrées en production.

CONCLUSION

L'entreprise partenaire à ce projet de recherche, Hutchinson Aéronautique et Industrie Ltée, utilisait depuis plusieurs années un procédé d'infusion de résine thermodurcissable très artisanal qui causait de nombreux problèmes lors de la fabrication de pièces aéronautiques en matériaux composites. Les pièces en matériaux composites ciblées par le projet et produites par le procédé d'infusion sont des panneaux d'habillage pour l'intérieur des cockpits d'avions d'affaires de Bombardier, plus précisément le Global Express. L'objectif de ce projet était d'améliorer le procédé d'infusion initialement utilisé par Hutchinson au niveau de la performance, en amenant l'hypothèse d'une diminution de 50 % des temps de fabrication et de 25 % les coûts de fabrication tout en augmentant la robustesse du procédé en réduisant les non-conformités générées par le procédé.

Plusieurs étapes du procédé d'infusion étaient particulièrement critiques. Tout d'abord, l'opération de mise sous vide avec l'utilisation de sacs consommables était source potentielle d'introduction d'air pendant la fabrication, en plus d'être très longue et de générer de nombreux déchets. Ensuite, la fabrication de constructions sandwiches était problématique notamment due à l'étape de laminage contact nécessaire pour l'introduction d'un noyau de type nid d'abeille à la construction et demandant un cycle de polymérisation supplémentaire. Puis, plus globalement, les manœuvres artisanales du procédé amènent plusieurs problèmes techniques, mais également des défauts récurrents qui peuvent entraîner le rejet de la pièce. Ces faiblesses ont donc été ciblées par l'amélioration du procédé. La première amélioration a été apportée suite à la fabrication d'un contre-moule flexible réutilisable qui a permis l'élimination des sacs consommables simplifiant ainsi l'étape de mise sous vide. Ensuite, l'intégration d'un noyau en mousse directement à l'étape d'infusion a éliminé l'étape de laminage contact ainsi qu'un cycle de polymérisation. Puis, la mécanisation des étapes de mélange, de dégaze et d'infusion de la résine via l'intégration d'une machine automatique de mélange et d'infusion et l'ajout d'une post-cuisson ont réduit les temps reliés à plusieurs étapes en plus de réduire des délais d'attente. En effet, le cycle de post-cuisson qui a été intégré au procédé a augmenté les propriétés thermomécaniques des pièces produites

permettant ainsi de diminuer les délais avant de considérer la pièce complètement polymérisée et prête pour livraison au client. Toutes ces améliorations ont donc permis de réduire les temps et les coûts de fabrication de pièces en matériaux composites. Ces améliorations ont également éliminé plusieurs consommables et réduit l'utilisation de matières premières, principalement la résine pour laquelle la perte a été réduite suite aux améliorations apportées au procédé, notamment grâce au contrôle massique de l'infusion.

Grâce aux améliorations apportées au procédé d'infusion, les objectifs de ce projet de recherche ont été atteints. En effet, basés sur les pièces typiques de l'ensemble des 70 pièces du cockpit, les temps de fabrication ont été réduits de 53 % et les coûts de fabrication de 42 % par rapport au procédé d'infusion initialement utilisé par Hutchinson. Ces gains ont été calculés suite à une minisérie testée en production et pourront être réévalués une fois complètement intégrés en production sur du plus long terme. Au moment d'écrire ces lignes, les améliorations développées et présentées dans ce mémoire étaient complètement intégrées en production et cela pour l'ensemble des pièces du cockpit, avec des centaines de pièces fabriquées, démontrant la durée de vie des membranes, la fiabilité du procédé ainsi que les gains sur le procédé. Ce nouveau procédé d'infusion pourra maintenant être appliqué pour toutes nouvelles pièces en matériaux composites pour une application compatible, permettant à Hutchinson d'augmenter sa compétitivité grâce à un procédé plus économique tout en augmentant sa capacité de production.

Malgré les nombreuses améliorations et les gains amenés dans le procédé, plusieurs étapes sont toujours sources d'améliorations, telles que les étapes d'assemblage. Ces étapes n'ont pas été traitées dans ce projet, mais sont complexes considérant qu'une multitude d'attaches se rajoutent à ces panneaux pour l'assemblage sur la structure. Des procédés intégrant le moulage d'insert représente une belle piste d'innovation. Les opérations reliées à la manipulation et au préformage des tissus représente également une piste d'amélioration dans les procédés composites utilisant des tissus secs tels que l'infusion. Plusieurs développements se sont faits ces dernières années sur ce sujet, par exemple avec la manipulation automatisée des tissus secs. Il n'y a aucune limite tant qu'il y a de l'ambition et de l'imagination.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bader, M. G. 2002. «Selection of composite materials and manufacturing routes for cost-effective performance». *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, n°7, p. 913-934.
- Beckwith, Scott W. 2007. «Resin Infusion Technology: Part 3 – A Detailed Overview of RTM and VIP Infusion Processing Technologies». En ligne. 7 p. <http://www.nasampe.org/Other/TechColumnPart3.pdf>. Consulté le 13 septembre 2014.
- Curran, R., S. Raghunathan et M. Price. 2004. «Review of aerospace engineering cost modelling: The genetic causal approach». *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 40, n°8, p. 487-534.
- Heider, Dirck et John W. Gillespie Jr. 2012. «VARTM Variability and Substantiation». En ligne. 12 p. https://depts.washington.edu/amtas/events/jams_10/pap10-Heider.pdf. Consulté le 20 septembre 2014.
- Hutchinson, J. R., P. J. Schubel et N. A. Warrior. 2011. «A cost and performance comparison of LRTM and VI for the manufacture of large scale wind turbine blades». *Renewable Energy*, vol. 36, n°2, p. 866-871.
- Leclerc, J. S. et Edu Ruiz. 2008. «Porosity reduction using optimized flow velocity in Resin Transfer Molding». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, n° 12, p. 1859-1868.
- Malczewski, Regina M., Donald A. Jahn et William A. Jahn. 2003. «Peroxide or Platinum? Cure system considerations for silicone tubing applications». En ligne. 5 p. <http://www.dowcorning.com/content/publishedlit/52-1077-01.pdf>. Consulté le 15 novembre 2014.
- Manson, J-A.W, Wakeman, M.D et Bernet, N. 2000. «Composite processing and manufacturing – an overview». In *Comprehensive Composite Materials*, sous la dir. de ED. Kelly A. et Zweben C., Vol. 2, p. 577-607. Oxford : Elsevier Science.
- Mosite rubber companie Inc. 2007. «Silicone use in composite manufacturing» In *Le site de la compagnie Mosites Rubber Company*. En ligne. <<http://www.mositesrubber.com/technical/technical-info/silicone-rubber/>>. Consulté le 30 novembre 2014.
- Milgram, JH. 2005. «An Overview of the SCRIMP Technology». En ligne. 7 p. http://www.tpicomposites.com/media/5997/scrimp_overview_2005.pdf. Consulté le 13 septembre 2014.

- Moretto, H.-H. 2005. «Silicones». In *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, sous la dir. de Barbara Elvers, 5e édition, p. 1-40. Weinheim: Wiley-VCH.
- Ngô, Anh Dung. 2013. *Chapitre 1 Introduction aux matériaux composites* [Notes de cours SYS857 Matériaux composites]. Montréal : École de technologie supérieure.
- Ruiz, Edu. 2012. *Cours 1 Introduction to composite materials*. Notes de cours MEC6318 Fabrication des composites. Montréal : École Polytechnique de Montréal, 70 p.
- Ruiz, Edu. 2012. *Cours 2 Analysis of reinforcements impregnation by liquid injection*. Notes de cours MEC6318 Fabrication des composites. Montréal : École Polytechnique de Montréal. 61 p.
- Schiller, Bradley R. 2002. *Essentials of economics*, 4e édition. McGraw-Hill/Irwin, 495 p.
- Schubel, P. J. 2010. «Technical cost modelling for a generic 45-m wind turbine blade produced by vacuum infusion (VI)». *Renewable Energy*, vol. 35 n° 1, p. 183-189.
- Schubel, P. J. (2012. «Cost modelling in polymer composite applications: Case study - Analysis of existing and automated manufacturing processes for a large wind turbine blade». *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, n° 3, p. 953-960.
- Smooth-On. 2008. «How to make molds & casting» In *Le site de la compagnie smooth-On*. En ligne. <http://www.smooth-on.com/pdf/Smoothon_HTB_2008.pdf>. Consulté le 13 décembre 2014.
- SR Composites. 2006 *Sprayomer™ Technology*. En ligne. <<http://srcosmetics.com/>>. Consulté le 17 novembre 2014.
- Woo Il, Lee, Doh Hoon Lee et Moon Koo Kang. 2006. «Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process». *Composites Science and Technology*, vol. 66, n° 16, p. 3281-3289.