

Titre: Fabrication d'une pièce composite axisymétrique 3D à haut taux de fibres et à haute température par le procédé polyflex.
Title:

Auteur: Alexandre Ferreira Benevides
Author:

Date: 2011

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Ferreira Benevides, A. (2011). Fabrication d'une pièce composite axisymétrique 3D à haut taux de fibres et à haute température par le procédé polyflex.
Citation: [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/740/>

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

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/740/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Edu Ruiz
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

FABRICATION D'UNE PIÈCE COMPOSITE AXISYMÉTRIQUE 3D À HAUT
TAUX DE FIBRES ET À HAUTE TEMPÉRATURE PAR LE PROCÉDÉ
POLYFLEX

ALEXANDRE FERREIRA BENEVIDES

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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

DÉCEMBRE 2011

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

FABRICATION D'UNE PIÈCE COMPOSITE AXISYMÉTRIQUE 3D À HAUT
TAUX DE FIBRES ET À HAUTE TEMPÉRATURE PAR LE PROCÉDÉ
POLYFLEX

présenté par : FERREIRA BENEVIDES, Alexandre

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

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

M. BALAZINSKI, Marek, Ph.D., président

M. RUIZ, Eduardo-Antonio-Julian, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. TROCHU, François, Ph.D., membre

DÉDICACE

À mes parents qui ont toujours su me pousser à me dépasser,
à ma famille et à mon amour Pamela qui m'épaulent tous les jours.

«Votre temps est limité, alors ne le gaspillez pas à vivre la vie de quelqu'un d'autre. Ne laissez pas le bruit des opinions des autres avoir le dessus sur votre voix intérieure. Et, le plus important, ayez le courage de suivre votre cœur et votre intuition. Tout le reste est secondaire.»

Steve Jobs 1955-2011

REMERCIEMENTS

Je voudrais premièrement remercier Edu Ruiz, mon directeur de recherche, et François Trochu pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe depuis toutes ces années. C'est grâce à tous les projets auxquels j'ai pu participer au sein de la Chaire de recherche sur les Composites à Haute Performance (CCHP) et à tous les apprentissages qui en ont découlé que je crois pouvoir terminer mes études dans un projet aussi motivant. Un merci particulier à Edu Ruiz qui a su trouver un projet qui m'a interpellé et qui m'a incité à continuer à la maîtrise et ainsi approfondir encore plus mes connaissances dans le domaine. Le dévouement au travail d'Edu dans tous ses travaux de recherche en fait un exemple hors pair et aura un impact majeur sur ma façon d'attaquer tous les futurs projets de développement auxquels je participerai.

Je voudrais aussi grandement remercier Paul Trudeau pour avoir servi de mentor tout au long de ce grand projet. Pouvoir ainsi apprendre d'une personne avec tant d'expertise pratique aura été un point majeur dans ma formation. Toutes les séances de conception au tableau resteront bien ancrées dans ma tête et tout ce que j'y ai appris servira à me guider dans tous mes projets futurs.

Au cours de ma maîtrise, j'ai vraiment été choyé par l'équipe qui m'a entouré. Je voudrais donc aussi remercier Catherine Billotte et Mouhcine Rifay, d'autres associés de recherche du CCHP, qui ont été d'une très grande aide lors de différentes étapes du projet. Un grand merci à Christian-Charles Martel, Antonin Leclair-Maréchal et Alex Bourgeois, notre équipe technique, qui sont venus porter main forte sur plusieurs aspects du projet.

Finalement, l'ampleur de ce projet m'a permis de travailler avec plusieurs étudiants stagiaires. Travailler avec une équipe aussi diversifiée en compétences qu'amusante sera un de mes meilleurs souvenirs du projet. Je veux donc remercier Hugo Delage, Nicolas Latrimouille, Thierry Vial, David Benguigui, Julien Malbequi qui ont formé l'équipe du tonnerre des derniers mois de la maîtrise. Un gros merci aussi à Julian Gutiérrez, Bruno Payette, Félix Miron,

Magellan Charbonneau, Mathieu Commeau, Éric Jeanotte, William Albouy et Adrien Touzé pour toute l'aide apportée au projet.

Merci à toute l'équipe car, comme expérimenté dans ce projet, ce sont les équipes fortes par leurs compétences et leur éthique de travail qui permettent la réussite de gros projets comme celui-ci et j'ai eu la chance de travailler avec une grande équipe de cette trempe.

RÉSUMÉ

Le projet d'industrialisation du procédé Polyflex par la fabrication d'une pièce composite axisymétrique 3D à haut taux de fibres et à haute température s'inscrit dans le cadre de la poursuite des travaux Polyflex de la chaire sur les composites à haute performance (CCHP). Cette étape se veut un jalon important pour le développement du procédé Polyflex.

En se basant sur le savoir-faire du CCHP concernant l'injection flexible, un moule d'injection a été converti en moule Polyflex afin de valider l'utilisation de ce procédé dans un contexte plus industriel. Afin d'y parvenir, la conception de divers outillages industriels pour l'injection flexible a été mise en œuvre. Dans le lot, une nouvelle machine de compaction industrielle pour Polyflex présentant un nouveau panneau de contrôle facilitant l'utilisation par les opérateurs et une conception très compacte a été installée dans le laboratoire de fabrication industrielle des composites du CCHP (LFIC). La pièce prototype choisie pour le projet étant de dimension record pour les travaux du CCHP, un nouveau système pour l'injection de résine mono composante à haute température pour l'injection flexible a été mis en place. Ce système permet l'injection d'une grande quantité de résine avec la précision et le contrôle voulu pour les injections Polyflex. Afin de gérer toute l'information lors de la mise en commun de ces différents systèmes, un outil de contrôle centralisé a aussi été conçu et assemblé. Ce système versatile permettant l'acquisition de données et un contrôle de la fabrication a été d'une grande utilité pour le présent projet et est appelé à être utilisé dans plusieurs projets différents au LFIC.

Après la mise en service du nouveau moule Polyflex et de toutes les composantes nécessaires à son utilisation, les premières pièces composites axisymétriques à géométrie complexe ont pu être fabriquées avec succès. Ce premier projet dans la vague d'industrialisation du procédé d'injection flexible ouvre maintenant le porte à de nombreux autres projets ambitieux de fabrication de pièces composites structurelle importante, ce qui pourrait offrir des alternatives aux autres procédés comme le RTM, utilisés de nos jours pour la fabrication de ces pièces.

ABSTRACT

The industrialization of the Polyflex process by the production of an axisymmetric 3D composites material piece at high fiber volume and high temperature comes after all the Polyflex projects already done by the research chair on high performance composites (CCHP). This project really is a milestone in the development of the Polyflex composites manufacturing process.

With all the knowledge on flexible injection in the CCHP group, an injection mould has been modified to create a new Polyflex mould in order to validate the use of this manufacturing process in a more industrial context. In order to achieve this goal, the design of complementary systems has also been undertaken. The new industrial compaction machine for Polyflex presents a new more integrated control panel making it easier to use and is built on a small foot print design at the CCHP's composites industrial manufacturing laboratory (LFIC). Because the prototype piece chosen for the project is so big in dimension, a new high temperature mono component injection system as also been added to the set of tools available for the project. This new system makes it possible to inject a large volume of resin with the precision and control needed for Polyflex injections. In order to deal with all the information coming from all the tooling involved in the injection, a central control unit has also been assembled. This system is responsible for data acquisition and some control during every phase of the manufacturing process and has been useful for application in this project as well as in other CCHP projects at the LFIC.

After the launch of the new mould and all peripheral components, the firsts axisymmetric composites pieces with complex geometry were fabricated with success. This first project in the more industrialization wave of the flexible injection process opens a lot of ambitious manufacturing projects for main structural composites parts. This new way of making composites could then be an alternative to the other processes used today to make these pieces like RTM.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVI
LISTE DES ANNEXES	XVII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE LITTÉRAIRE SUR L'INJECTION FLEXIBLE, SOIT LE PROCÉDÉ BREVETÉ APPELÉ POLYFLEX.....	2
CHAPITRE 2 CONCEPTION D'UN MOULE POLYFLEX POUR UNE PIÈCE AXISYMÉTRIQUE 3D	6
2.1 Cahier des charges.....	7
2.2 Contraintes de conception:	7
2.3 Modification d'un moule existant pour Polyflex	8
2.3.1 Particularités d'un moule Polyflex	8
2.3.2 Modification vers Polyflex	11
2.4 Intégration du moule dans une structure d'injection	15
2.4.1 Outil de manutention et fermeture du moule Polyflex	20
CHAPITRE 3 MEMBRANE POLYFLEX 3D	23
3.1 Problématique.....	23

3.2 Conception du moule et fabrication du moule	23
CHAPITRE 4 CONCEPTION D'UNE MACHINE DE COMPACTION À GRANDE CAPACITÉ POUR POLYFLEX	28
4.1 Cahier des charges.....	28
4.1.1 Besoin d'une nouvelle machine de compaction	28
4.1.2 Améliorations du système	29
4.1.3 Spécifications et lignes directrice.....	30
4.2 Les composantes importantes.....	31
4.2.1 La pompe.....	31
4.2.2 Réservoir de fluide de compaction.....	33
4.2.3 Échangeur de chaleur	35
4.2.4 Panneau de contrôle hydraulique	36
4.2.5 Boîte de contrôle pneumatique.....	36
4.2.6 Tuyaux de fluide de compaction	38
4.3 Schéma global	38
4.4 Description de la machine	39
4.4.1 Démarrage de la machine de compaction	41
4.4.2 Recirculation en boucle fermée.....	41
4.4.3 Recirculation en boucle fermée avec chauffage.....	42
4.4.4 Circulation complète passant par le moule	42
4.4.5 Compaction statique.....	43
4.4.6 Mode de vidage du fluide de compaction	44
4.5 Sécurité d'opération	45
4.5.1 Valves de surpressions	45
4.5.2 Bouton d'arrêt d'urgence pour pression d'air	46

4.6 Conclusions et travaux futurs	46
CHAPITRE 5 SYSTÈME D'INJECTION MONOCOMPOSANTE À HAUTE TEMPÉRATURE	47
5.1 Cahier des charges	47
5.2 Contraintes de design	47
5.3 Conception	48
5.3.1 Pot d'injection	48
5.3.2 Balance et contrôle de la masse injectée	49
5.3.3 Échangeur de chaleur	50
5.4 Vue d'ensemble du système d'injection pour Polyflex	54
5.5 Améliorations apportées au système de base	55
5.5.1 Performances de l'échangeur de chaleur	55
5.6 Tests de performance de l'échangeur de chaleur	57
5.6.1 Configuration initiale	57
5.6.2 Deuxième configuration	59
CHAPITRE 6 SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES ET INDUSTRIALISATION DU PROCÉDÉ	61
6.1 Équipement disponible	61
6.2 Assemblage du système	61
6.2.1 Capteur 0-10V	62
6.2.2 Thermocouples	62
6.2.3 Assemblage multifonction	63
6.3 Interface versatile	64
6.3.1 Sous-VI acquisition.	64
6.3.2 Interface utilisateur simple	65

6.3.3	Interface utilisateur avancée.....	66
6.4	Contrôle d'injection.....	67
6.4.1	Intégration au sein de l'interface utilisateur.....	68
6.4.2	Contrôleur externe et fonctions.....	68
CHAPITRE 7 FABRICATION PF7		73
7.1	Procédures de fabrication.....	73
7.1.1	Technique de Préformage.....	73
7.1.2	Montage du moule.....	74
7.1.3	Préparation à l'injection	74
7.1.4	Injection.....	77
7.1.5	Démoulage	79
7.2	Analyses des pièces Polyflex	80
CONCLUSION		82
BIBLIOGRAPHIE		83
ANNEXES		84

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Cahier des charges PF7	7
Tableau 2-2 : Contraintes de conception PF7	7
Tableau 2-3 Propriétés d'un renfort pour fin de calculs.....	10
Tableau 4-1 Spécifications de l'assemblage de pompe.....	32
Tableau 4-2 : Spécification du réservoir de fluide de compaction.....	33
Tableau 4-3 : Caractéristiques Principales de l'échangeur de chaleur	35
Tableau 5-1 : Cahier des charges machine d'injection Polyflex	47
Tableau 5-2 : Contraintes de design	48
Tableau 5-3 : Pot de pression utilisé	48
Tableau 5-4 Valeurs	50
Tableau 5-5 Résultats des essais	55

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Premier moule Polyflex (PF1) [2]	2
Figure 1-2 Piston d'injection du fluide de compaction	3
Figure 2-1 Moule d'infusion existant.....	6
Figure 2-2 : Procédé d'infusion [6]	8
Figure 2-3 Procédé RTM (« <i>Resin transfer Molding</i> ») [8]	9
Figure 2-4 Procédé Polyflex [8]	9
Figure 2-5 Plateau supérieur avant et après modification	11
Figure 2-6 Plateau inférieur après modifications	12
Figure 2-7 Moule de cavité	12
Figure 2-8 Moule de cavité fabriqué par moulage et usinage	14
Figure 2-9 Unité de chauffage à l'huile RK-400.....	15
Figure 2-10 Système de chauffage et plaques chauffantes.	16
Figure 2-11 Structure d'injection	17
Figure 2-12 Analyse par éléments finis sur la structure.....	18
Figure 2-13 Analyse du fût.....	18
Figure 2-14 Analyse des plateaux inférieur et supérieur.....	19
Figure 2-15 Outil de manutention pour moule Polyflex	20
Figure 2-16 Plaque chauffante position élevée	21
Figure 2-17 Plaque chauffante orientation 90 degrés.....	21
Figure 2-18 Plateau mobile motorisé de l'outil de manutention en 2 positions.....	22
Figure 3-1 Élongation permise de la membrane	24
Figure 3-2 Moule mâle	25

Figure 3-3 Membrane fabriquée avec moule Mâle	26
Figure 3-4 Moule Femelle.....	27
Figure 4-1 Machine de compaction, première conception	29
Figure 4-2 : Modèle numérique et machine de compaction réelle.	31
Figure 4-3 Assemblage de la pompe sur la nouvelle machine de compaction	32
Figure 4-4 Réservoir de la nouvelle machine de compaction	34
Figure 4-5 : Échangeur de chaleur installé sur nouvelle machine de compaction	35
Figure 4-6 : Panneau de contrôle hydraulique	36
Figure 4-7 : Boîte de contrôle pneumatique.....	37
Figure 4-8 : Tuyaux de la nouvelle machine de compaction	38
Figure 4-9 Schéma du circuit de la machine de compaction.....	39
Figure 4-10 Panneau de contrôle de la machine de compaction et nomenclature	40
Figure 4-11 Valve de surpression du circuit hydraulique	45
Figure 5-1 Pot de pression.....	49
Figure 5-2 Ancien échangeur de chaleur pour Polyflex haute température	51
Figure 5-3 Échangeur, système multi-plaques	52
Figure 5-4 - Plaque de l'échangeur de chaleur	52
Figure 5-5 - Échangeur de chaleur dans sa première configuration.....	53
Figure 5-6 – Vue d'ensemble du système d'injection a)version CAD et b) version réelle.....	54
Figure 5-7 Viscosité des résines en fonction de la température	56
Figure 5-8 Température de la résine en fonction du temps.....	57
Figure 5-9 Température des éléments chauffant en fonction du temps	58
Figure 5-10 - Échangeur de chaleur avec les tubes chauffants	59
Figure 5-11 Température de la résine en fonction du temps.....	60

Figure 6-1 Carte National Instruments et expansions	61
Figure 6-2 Connecteur XLR 3 voies	62
Figure 6-3 Carte d'expansion NI pour thermocouples.....	62
Figure 6-4 Assemblage des composantes dans cabinet mobile.....	63
Figure 6-5 Fenêtre de diagramme, model de base	64
Figure 6-6 Menu déroulant pour ajout d'élément pour l'interface utilisateur	65
Figure 6-7 Exemple d'interface utilisateur simple	66
Figure 6-8 Interface utilisateur pour PF7	67
Figure 6-9 Contrôle d'injection	68
Figure 6-10 Valve de pincement de tuyaux pneumatique.....	69
Figure 6-11 Valve solénoïdes 24V utilisées.....	69
Figure 6-12 Boucle de contrôle	71
Figure 7-1 Préforme de fibre de verre pour essais d'injection	73
Figure 7-2 Moule monté sur l'outil d'injection.....	74
Figure 7-3 Circuit d'injection PF7	77
Figure 7-4 Pression d'injection régulée manuellement durant une injection complète	78
Figure 7-5 Courbes de pression.....	79
Figure 7-6 Pièce PF7 démoulée	80

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CCHP	Chaire sur les Composites à Haute Performance
LFIC	Laboratoire de fabrication industrielle des composite à St-Hubert
RTM	Resin Transfer Molding (Moulage par transfert de résine)
PF1	Moule d'injection flexible (Polyflex) numéro 1
PF2	Moule d'injection flexible (Polyflex) numéro 2
PF7	Moule d'injection flexible (Polyflex) numéro 7
t	Temps en secondes
x_f	Position finale en mètres
K	Perméabilité
ϕ	Perméabilité
μ	Viscosité
P	Pression initiale
K_1	Perméabilité principale
K_3	Perméabilité transverse
FS	Facteur de sécurité
PRV	Pressure relief valve (Valve de surpression)
CAD	Computer assisted design (Conception assistée par ordinateur)

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 SIMULATION DES ÉTAPES DE MANUTENTION	85
ANNEXE 2 DESSINS DE DÉTAIL ÉCHANGEUR DE CHALEUR.....	95
ANNEXE 3 PROCÉDURES DE PRÉFORMAGE	98
ANNEXE 4 PROCÉDURE DE MONTAGE DU MOULE	126
ANNEXE 5 PRÉPARATION À L'INJECTION.....	134
ANNEXE 6 FICHER DE CALCUL DE RÉSINE	141
ANNEXE 7 INJECTION	142
ANNEXE 8 CONVERSION D'UNITÉS	144

INTRODUCTION

Chaque jour, des milliers d'avions parcourent de grandes distances dans le ciel permettant le transport de personnes et de matériel dans tous les coins de la planète. Ces avions qui permettent ce tour de force ont bien évolué depuis leur début. La recherche de meilleures performances globales a amené les constructeurs à chercher de nouvelles technologies à intégrer au cœur de ces appareils. Au fil des années, les matériaux métalliques ont ainsi progressivement laissé place à un pourcentage de plus en plus élevé de matériaux composites. Afin de répondre à la demande, les techniques de fabrication des matériaux composites ont elles aussi bien évolué.

Bien que le procédé de fabrication présentement certifié pour la fabrication de pièces de structures maîtresses soit le moulage par transfert de résine, d'autres procédés font l'objet de recherche afin d'amener de nouvelles techniques sur le marché. Dans le cadre de ce projet de recherche, le procédé d'injection flexible Polyflex sera étudié afin de réaliser la fabrication d'une pièce de structure importante en matériaux composites. Le défi est d'amener le procédé Polyflex vers un état plus industriel pour la fabrication d'une pièce axisymétrique à géométrie complexe sur renfort 3D et à haut taux de fibres. Cette étape permettra de valider l'utilisation du procédé Polyflex et de créer une gamme d'outils industriels liés à Polyflex.

Ce mémoire est divisé en sept chapitres représentant chacune des étapes du projet. Le rapport est entamé avec la revue littéraire sur Polyflex au Chapitre 1 qui permet de jeter les bases et lignes directrices de la conception d'outillage Polyflex présenté au Chapitre 2. Cet outillage est ensuite mis en œuvre grâce aux membranes 3D présentées au Chapitre 3, à la nouvelle machine de compaction industrielle présentée au Chapitre 4 et au nouveau système d'injection mono-composante présenté au Chapitre 5. De plus, le système d'acquisition et automatisation permettant le bon suivi des fabrications Polyflex est présenté au Chapitre 6. Finalement, le résumé des résultats de fabrication de la première pièce moulée avec le nouveau moule Polyflex est présenté au Chapitre 7 suivi d'une conclusion sur l'ensemble du projet.

CHAPITRE 1 REVUE LITTÉRAIRE SUR L'INJECTION FLEXIBLE, SOIT LE PROCÉDÉ BREVETÉ APPELÉ POLYFLEX

Depuis la demande de brevet Polyflex en 2004 [1], plusieurs travaux préliminaires ont été effectués afin de comprendre le procédé. Les premiers travaux de recherche ont été effectués par Lothar Briones et ont été publiés dans son mémoire de maîtrise en 2005. Ces premiers essais ont été conduits afin de valider l'utilisation du procédé et des paramètres d'influence. Le premier moule Polyflex a ainsi été conçu pour des essais isothermes. La Figure 1-1 montre bien ce moule fabriqué en acrylique et ayant les deux cavités typiques des moules polyflex.

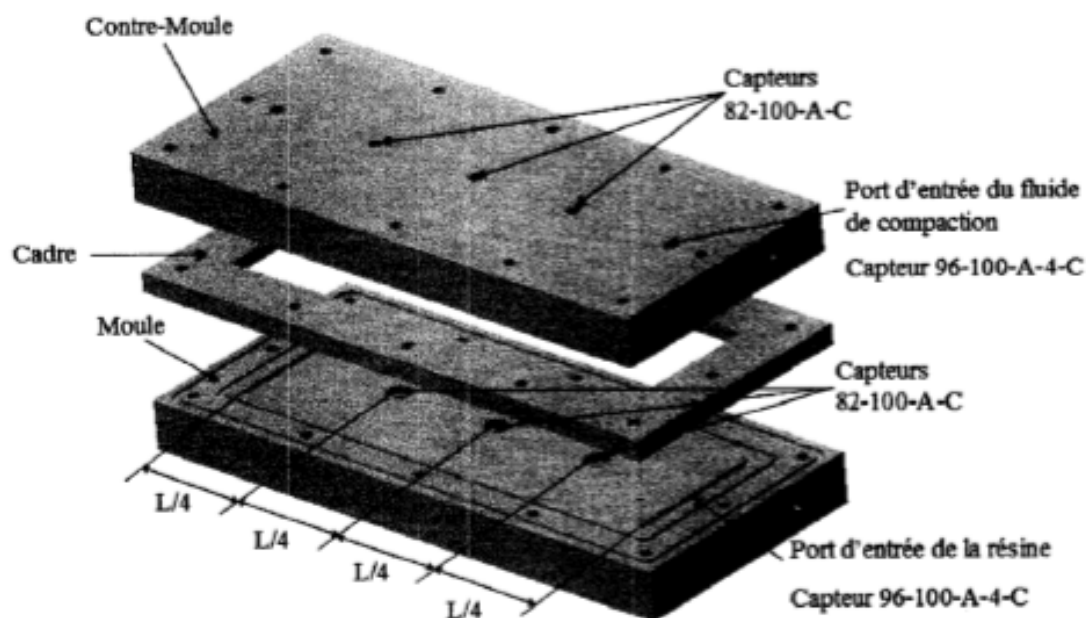


Figure 1-1 Premier moule Polyflex (PF1) [2].

Déjà dans ces essais, il a été montré que le « temps de fabrication du procédé Polyflex peut être largement réduit par rapport au procédé RTM » [2], ce qui a moussé l'intérêt de ce procédé pour la fabrication à plus haut volume.

Suite aux travaux de L. Briones, un autre étudiant a pris le relais des travaux polyflex dans le cadre d'une autre maîtrise au CCHP. Éric Allard a donc entrepris des travaux visant en un premier temps à « minimiser le temps de remplissage et améliorer la qualité des pièces produites » [3]. Dans un deuxième temps, le système PF1 a pu bénéficier de « la mise en place de nouveaux systèmes d'injection de la résine et du fluide de compaction »[3].



Figure 1-2 Piston d'injection du fluide de compaction.

Grâce à ces nouveaux systèmes d'injection de résine et de fluide de compaction, divers modes d'écoulement ont pu être utilisés permettant de noter que « le cyclage de pression de compaction induit une vitesse d'imprégnation plus élevée qu'une pression constante équivalente » [3]. Ces résultats mèneront plus tard à une étude plus approfondie des effets de la compaction et de ses modes d'écoulement dans le procédé Polyflex.

D'autres travaux de recherche effectués sur le même moule ont été entrepris afin de vérifier l'effet de l'utilisation de renforts tissés en remplacement des renforts à déposition aléatoire utilisés jusqu'à maintenant. Dans ses travaux, Tarik Daqoune a noté une grande différence dans

le mode d'imprégnation notant en outre que « l'écoulement de la résine se fait alors principalement au-dessus du renfort » [4]. En effet, lors des premiers essais sur renfort tissés, la résine injectée semble passer au-dessus créant ainsi des zones sèches après compaction. Des études plus approfondies sur l'influence de l'épaisseur de la cavité de compaction dans la bonne répartition de la résine au sein de la pièce tendent à montrer l'existence d' « une épaisseur optimale de la chambre de compaction » [4]. De plus, les essais effectués ont aussi montré une « nette amélioration de l'imprégnation » [4] lors de l'augmentation de la pression de vide dans la chambre d'injection. De plus, ces travaux ont montré l'intérêt d'analyser l'influence de la viscosité du fluide de compaction utilisé.

Lors de travaux subséquents, un deuxième moule Polyflex a été conçu afin de vérifier la possibilité d'utiliser Polyflex pour des pièces à géométrie plus complexe. Dans ses travaux, Philippe Causse a utilisé un moule permettant la fabrication d'une pièce rectangulaire présentant 2 plis à 90 degrés, soit le moule PF2. La fabrication de telles pièces présente un réel défi. En effet, une telle conception de moule ne pourrait être utilisée pour le procédé RTM dû aux parois verticales qui causeraient problème lors de la fermeture du moule [5]. Toutefois, grâce à la cavité de compaction, la fermeture d'un tel moule Polyflex est possible. De plus, on peut noter dans les conclusions de son article que la fabrication de pièce à parois parallèles à la direction de fermeture est possible et avec une bonne qualité de fabrication. Il est aussi à noter que le procédé Polyflex ne semble pas présenter de limite dans la complexité de la géométrie à fabriquer à condition que l'étape de préformage, qui joue un rôle de grande importance dans la fabrication de pièce par injection flexible, soit bien maîtrisée.

Les travaux de Chafik Abdellaoui viennent eux aussi amener de nouvelles informations dans la maîtrise du procédé polyflex. En effet, ses études sur le cyclage de la pression de compaction semblent montrer un effet à la fois sur l'épaisseur de la pièce finale et sur l'uniformité de l'épaisseur. De plus, ce cyclage, tout comme dans les travaux de E. Allard, semble pouvoir améliorer le temps d'injection global. Les travaux de Chafik apportent aussi la conception de la première machine de compaction dédiée au contrôle de la compaction dans le procédé Polyflex. Avec cette machine, il est possible d'imposer un cyclage défini lors de la fabrication Polyflex.

Cette machine servira de référence dans les travaux décrits dans le présent mémoire de maîtrise. Un autre paramètre important étudié par C. Abdellaoui est la possibilité de chauffer le fluide de compaction dans le cadre de l'utilisation de Polyflex dans un moule à haute température.

D'autres travaux Polyflex sont en cours au moment du début de ce projet de maîtrise. Toutefois, cette revue de l'état de l'art du procédé permet d'entreprendre les travaux sur une base de connaissances solides liées à l'injection flexible et qui permettront d'effectuer les choix judicieux dans la conception des différents éléments du projet.

CHAPITRE 2 CONCEPTION D'UN MOULE POLYFLEX POUR UNE PIÈCE AXISYMÉTRIQUE 3D

Afin de fabriquer une pièce composite axisymétrique 3D, un moule de qualité est nécessaire avec toutes les caractéristiques requises pour une fabrication à haute température. La conception a débuté à partir d'un moule existant servant aux essais antérieurs de fabrication de la même pièce par un autre procédé, soit l'infusion de résine. Une image du moule de départ est présentée à la Figure 2-1.

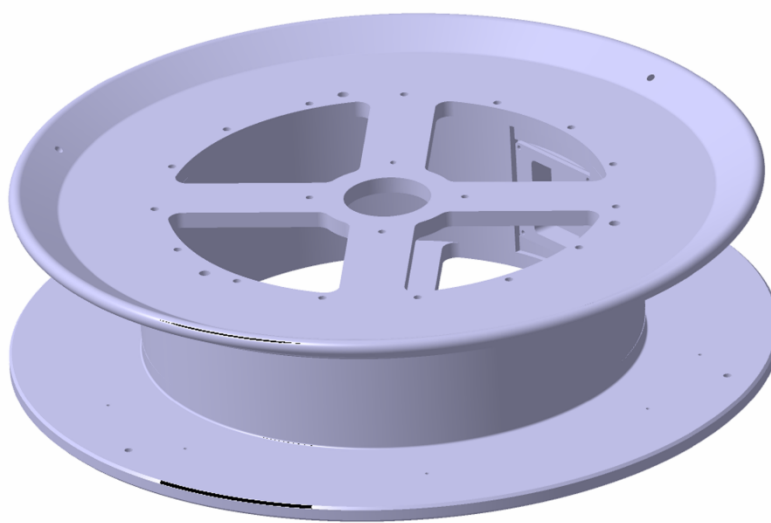


Figure 2-1 Moule d'infusion existant.

2.1 Cahier des charges

En début de projet, le cahier des charges du Tableau 2-1 a été produit afin de bien orienter la conception de l'outillage.

Tableau 2-1 : Cahier des charges PF7

Cahier des charges PF7
<ul style="list-style-type: none"> -Conception d'un moule d'injection Polyflex -Conception d'un moule de membrane pour Polyflex - Utilisation d'une résine époxy mise en œuvre à haute température - Utilisation d'un renfort en carbone tissé 3D - Conception pour une pièce d'épaisseur importante

2.2 Contraintes de conception

Avant de débiter la conception de tels outillages, il est important de prendre en compte les nombreuses contraintes qui se rapportent au projet. Celles-ci sont exposées dans le Tableau 2-2.

Tableau 2-2 : Contraintes de conception PF7

Contraintes de design PF7
<ul style="list-style-type: none"> -Procédé à haute température -Prodécé à haute pression de consolidation - Conception visant à adapter, pour diminuer le coût de l'outillage, le moule existant pour le procédé Polyflex

2.3 Modification d'un moule existant pour Polyflex

Afin d'adapter de façon appropriée un moule pour infusion pour le procédé Polyflex, il est important de bien en comprendre le fonctionnement et les différences majeures entre les deux procédés.

2.3.1 Particularités d'un moule Polyflex

Pour certaines applications, comme dans l'industrie navale par exemple, le procédé de fabrication des pièces en matériaux composites utilise des moules à paroi rigide simple. Ce procédé est appelé moulage par infusion sous vide. La Figure 2-2 illustre le fonctionnement de ce procédé.

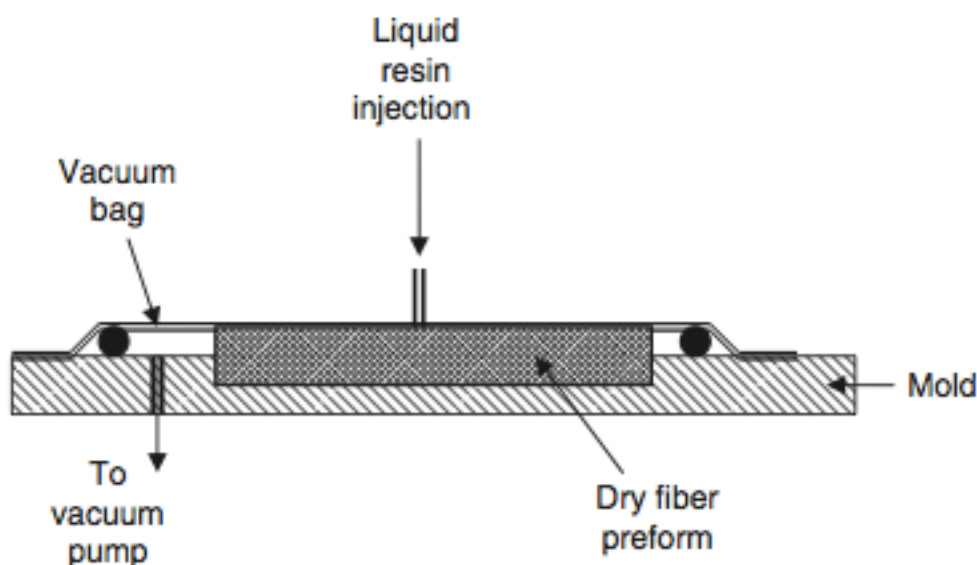


Figure 2-2 : Procédé d'infusion [6].

Certaines industries opteront plutôt pour un procédé de fabrication de pièces composites avec outillage rigide comme dans le procédé de moulage par transfert de résine (RTM). Ceci permet des productions de moyenne série[7]. La Figure 2-3 illustre le fonctionnement de ce procédé.

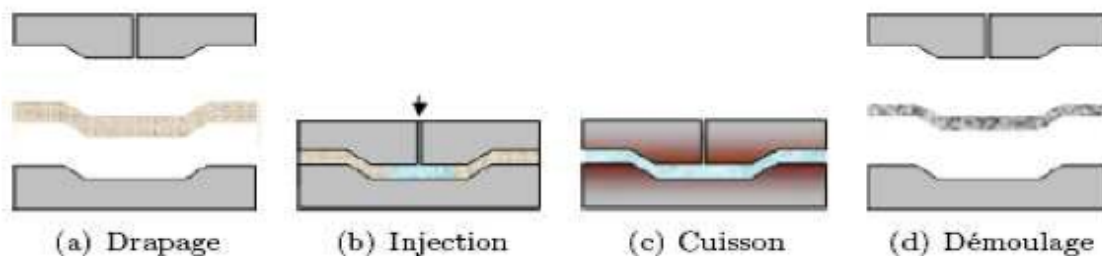


Figure 2-3 Procédé RTM (« *Resin Transfer Molding* ») [8].

La particularité du procédé Polyflex réside notamment dans sa double cavité constituée de deux chambres séparées par une membrane flexible. La Figure 2-4 illustre le fonctionnement du procédé.

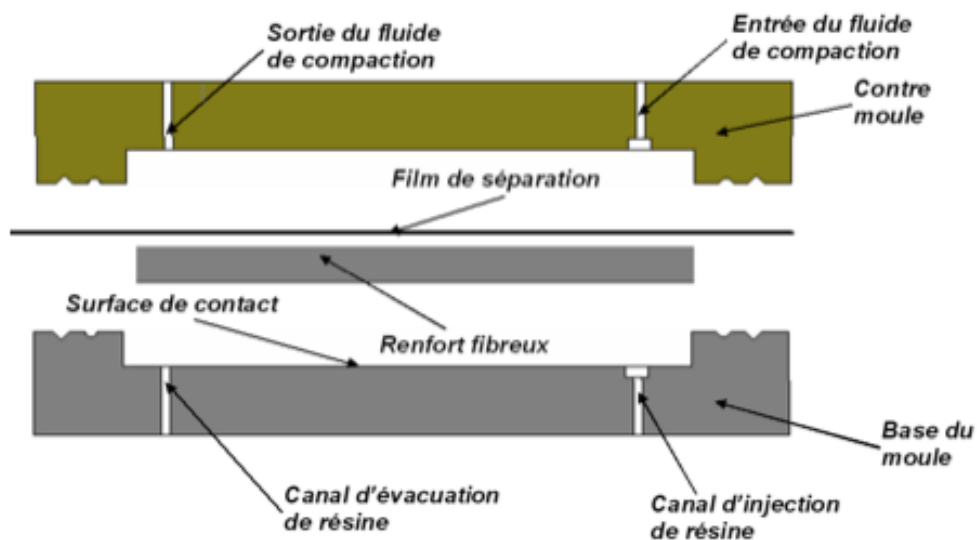


Figure 2-4 Procédé Polyflex [8].

Parmi ses nombreux avantages, le procédé Polyflex permet, entre autres, de fabriquer des pièces composites à haut taux de fibres et de maintenir une pression de consolidation uniforme sur toute la pièce pendant toute la période de polymérisation. De plus, le procédé peut également fonctionner à haute température et haute pression. Il est important de noter que la configuration du procédé Polyflex permet une injection complète de la pièce beaucoup plus rapide que

l'injection en moule rigide. En effet, grâce à la cavité de compaction et à la membrane flexible, l'injection flexible favorise une imprégnation transverse du renfort. Cette dernière particularité est facilement explicable. L'exemple suivant établit une comparaison entre le temps d'imprégnation planaire théorique d'une plaque de 400 mm de long et l'imprégnation transverse de la même plaque de 4 mm d'épaisseur. Dans le cas d'un calcul unidirectionnel à pression constante, le temps d'imprégnation d'un renfort avec les propriétés présentées au Tableau 2-3 est régi par l'équation suivante :

$$t = \frac{x_f^2}{\frac{2K}{\phi \cdot \mu} (P_i - P_f)}$$

Tableau 2-3 Propriétés d'un renfort pour fin de calculs

Propriétés	Valeur
Perméabilité $K_{1_{planaire}}$ (m^2)	1 e-11
Perméabilité $K_{3_{transverse}}$ (m^2)	1 e-11 (trouver valeur transverse +update du calcul)
Pression d'injection P (Pa)	200 000
Viscosité de la résine μ (Pa · s)	0,01
Porosité du renfort ϕ	0,5
Longueur $x_{f_{planaire}}$ (m)	400
Épaisseur $x_{f_{transverse}}$ (m)	4

Les calculs d'imprégnation sont assez simples si on dispose des spécifications du renfort concernant sa perméabilité. Dans le cas de l'imprégnation planaire, le temps d'imprégnation théorique serait de 200 s. En comparaison, le temps d'imprégnation dans le sens transverse serait

de 0,2 s car la perméabilité transverse est en général 10 fois plus faible que la perméabilité planaire. Cette différence est explicable par la grande différence dans la distance que la résine doit parcourir pour une injection complète. Cette petite démonstration illustre l'intérêt de favoriser une imprégnation transverse au niveau de l'injection.

2.3.2 Modification vers Polyflex

La modification pour arriver à un moule Polyflex commence par changer la géométrie de certaines sections du moule existant. Le plateau supérieur du moule d'infusion est donc réduit à un diamètre permettant d'étirer et passer une membrane dans le moule. La Figure 2-5 montre la modification apportée au moule afin d'ajouter ces nouvelles fonctionnalités à l'outillage.

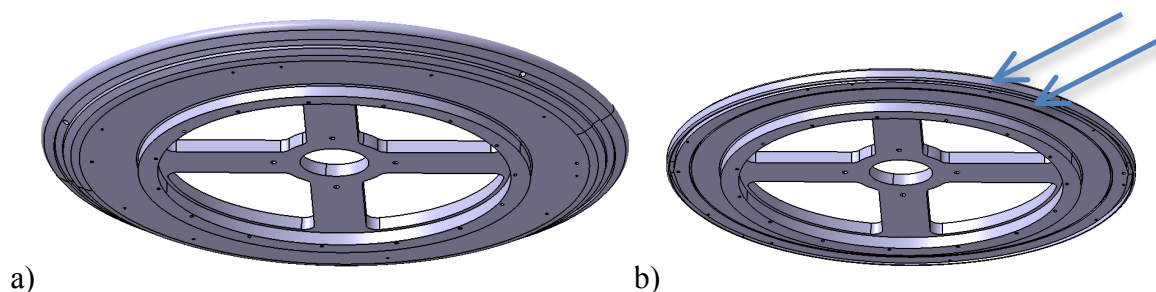


Figure 2-5 Plateau supérieur avant et après modification.

Le plateau inférieur ne demande pas de changement de géométrie autre que l'ajout d'une rainure pour le joint d'étanchéité dynamique et pour un insert permettant de maintenir les fibres en place. La Figure 2-6 décrit les modifications apportées au plateau inférieur.

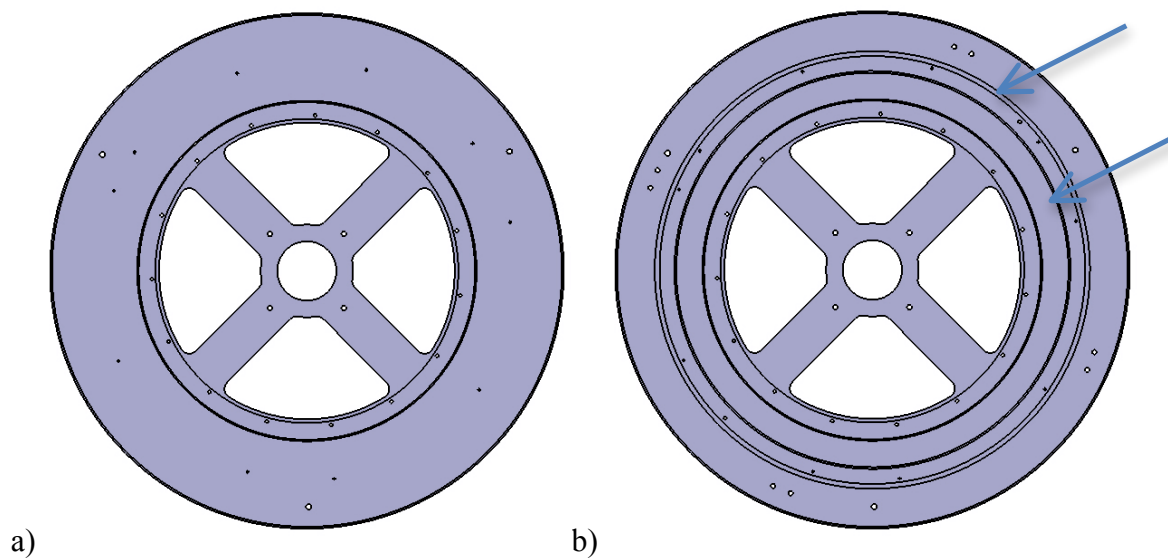


Figure 2-6 Plateau inférieur après modifications.

La dernière partie importante du moule Polyflex est le moule de cavité, qui permet de créer la géométrie de la pièce. La Figure 2-7 montre cette pièce importante de l'outillage. La chambre de compaction est utilisée afin de générer une pression de consolidation pendant toute la phase de polymérisation.

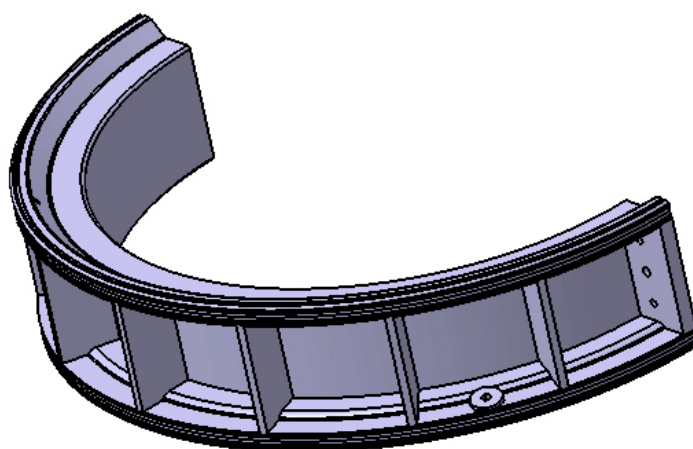


Figure 2-7 Moule de cavité.

Une étude de coût quant à sa fabrication afin de trouver la solution la plus avantageuse. L'idée est de pouvoir encore fournir ici un moule à faibles coûts tout en permettant une grande qualité de fabrication. Les choix envisagés pour la fabrication des moules de cavité ont été les suivants : fabrication par moulage et usinage, fabrication par usinage complet et fabrication par moulage en composites.

La pièce en composite a dû être rejetée à cause des requis à haute température. En effet, les résines à prix abordable n'offrent pas un maintien en température adéquat pour cette pièce. De plus, une pièce en composite aurait nécessité l'usinage d'une forme négative, la fabrication d'un moule et finalement la fabrication de la pièce elle-même.

Pour la comparaison entre le moulage et l'usinage, il a été facile de prendre la solution du moulage suivi de certaines opérations d'usinage. En effet, si on considère seulement le coût du matériel, il devient déjà clair que cette approche apporte une économie.

La solution retenue a permis de fabriquer les deux moules de cavité par moulage suivi d'usinage. La Figure 2-8 en montre le résultat final.

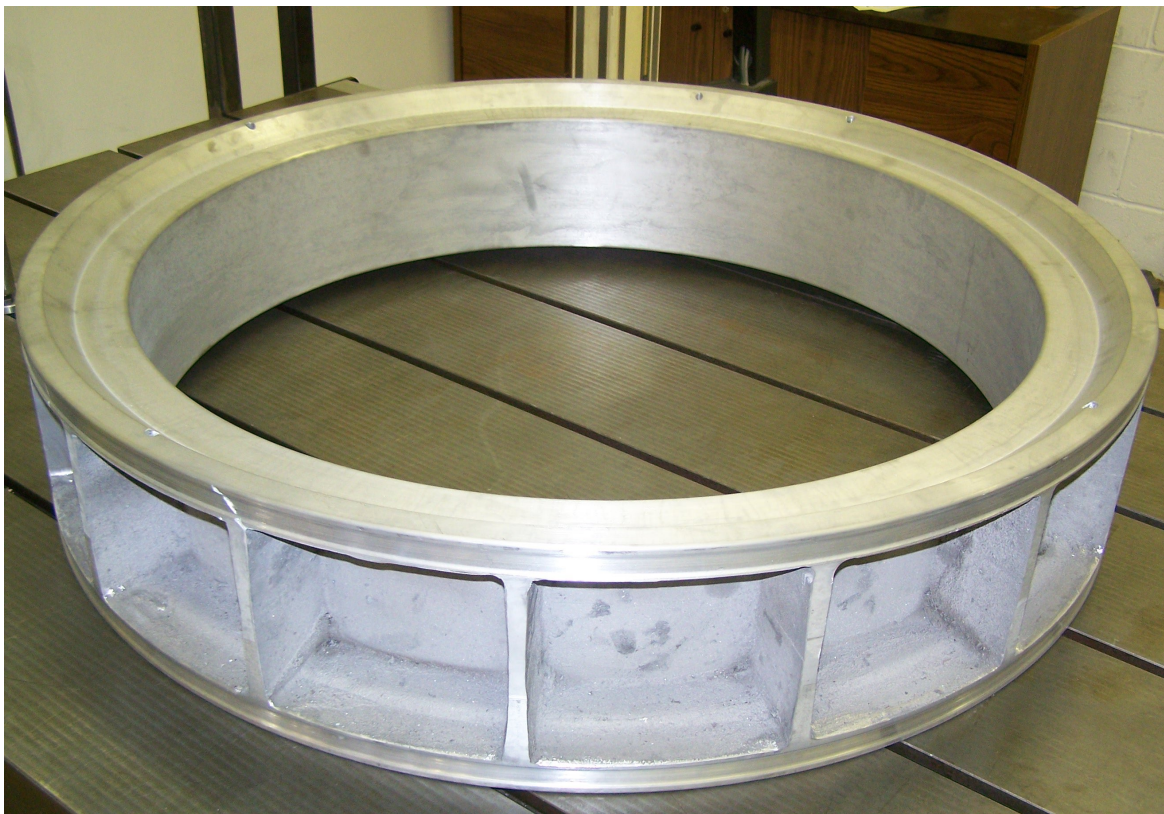


Figure 2-8 Moule de cavité fabriqué par moulage et usinage.

2.4 Intégration du moule dans une structure d'injection

Afin d'assurer un bon support mécanique du moule et d'en empêcher toute déformation, une structure d'injection a été mise en place. Celle-ci permet, entre autres, d'assurer l'intégrité du moule durant la phase de chauffage et donc son étanchéité. Cette structure sert aussi de source de chaleur par le biais de ses deux plaques chauffantes alimentées par une unité de chauffage. Cette unité de chauffage à l'huile d'une puissance de 5000W est présentée dans la Figure 2-9.



Figure 2-9 Unité de chauffage à l'huile RK-400.

Afin de transférer la chaleur produite par l'unité de chauffage, une série de canalisations ont été usinées dans deux plaques d'aluminium de 50 mm d'épaisseur. Ces plaques chauffantes sont présentées à la Figure 2-10.

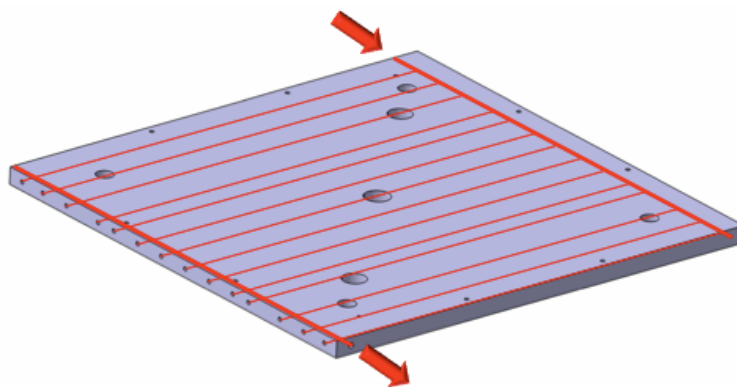


Figure 2-10 Système de chauffage et plaques chauffantes.

L'huile chauffée par l'unité de chauffage y est acheminée par des tuyaux isolés et intégrés au cœur même de la structure d'injection. Cette structure est réellement une solution à moindre coût afin de créer un chauffage in situ tout en procurant le maintien mécanique nécessaire à la réussite du projet. Sur la Figure 2-11, il est facile de comprendre la simplicité du système.

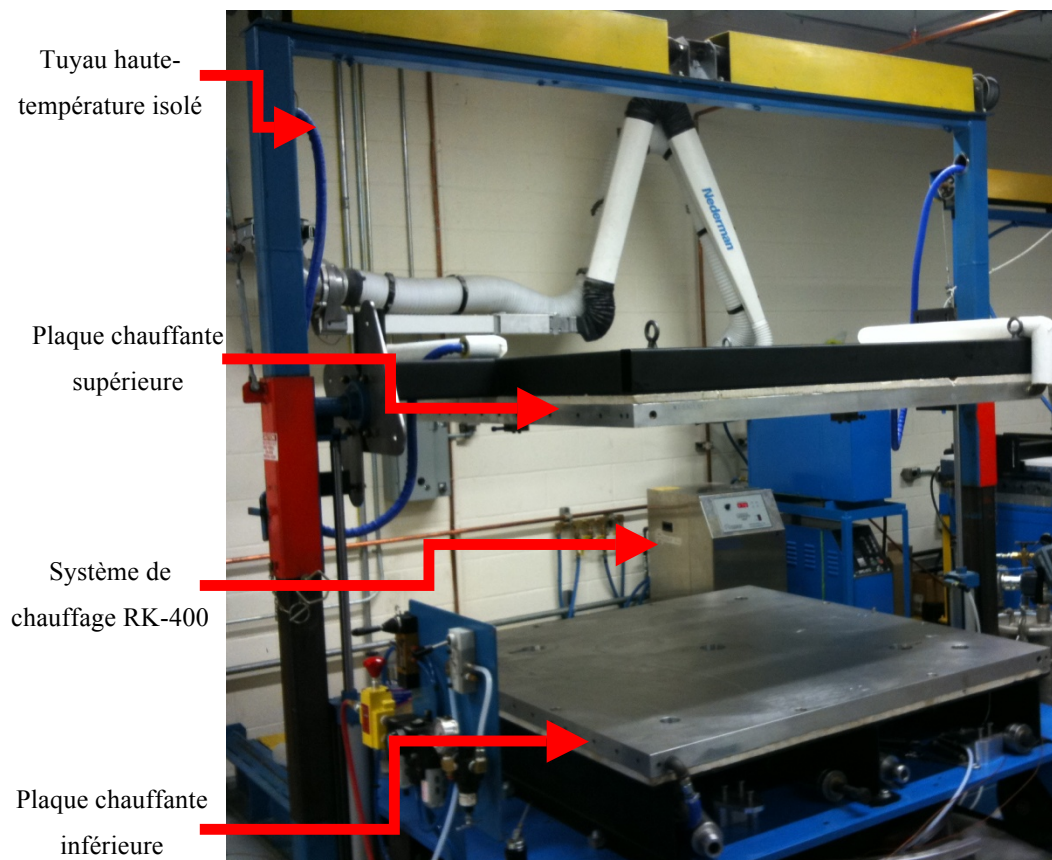


Figure 2-11 Structure d'injection.

En effet, ce système peu dispendieux utilise bien toute la matière de la structure sans toutefois en compliquer l'utilisation. Le système se ferme simplement à l'aide de 4 vis dimensionnées adéquatement pour l'utilisation. La pression interne du moule crée donc un chargement sur les plateaux inférieur et supérieur qui transfèrent cette charge aux plaques de chauffage renforcées par les tubes d'acier. Finalement, toute la charge est acheminée vers les vis qui maintiennent l'ensemble fermé. Des analyses par éléments finis ont aussi été effectuées sur la structure afin de s'assurer de sa fiabilité. La Figure 2-12 montre le résultat de ces analyses qui permettent de valider la conception du moule.

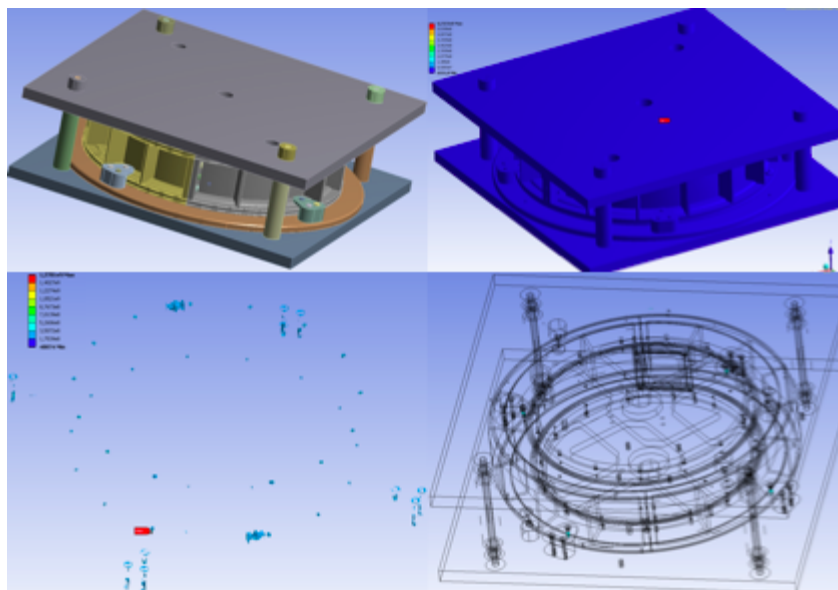


Figure 2-12 Analyse par éléments finis sur la structure.

Lors de cette analyse par éléments finis, chaque pièce a d'abord été analysée séparément afin de valider leur résistance individuelle. Cette étape a permis de rapidement valider toutes les pièces maîtresses du moule tirant profit des outils de symétrie cyclique des logiciels de calcul. Suite à cette vérification, toutes les pièces ont présenté une contrainte maximale de Von Mises convergeant vers une valeur inférieure à la contrainte maximale admise pour le matériau, soit 276 MPa.

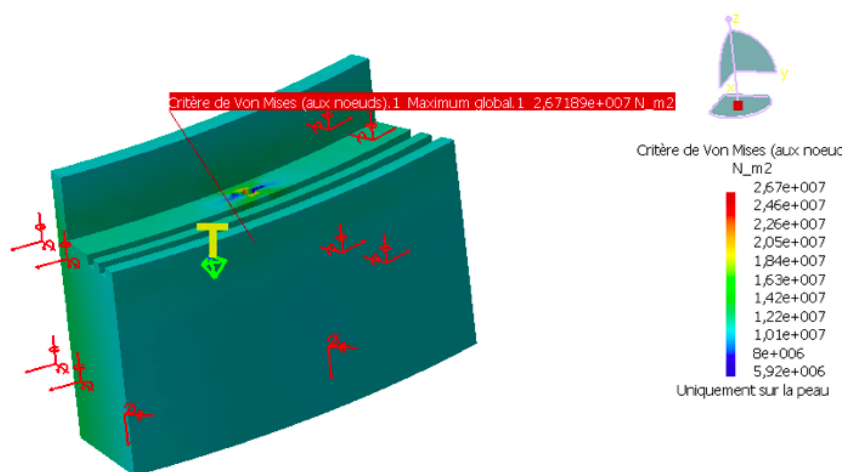


Figure 2-13 Analyse du fût

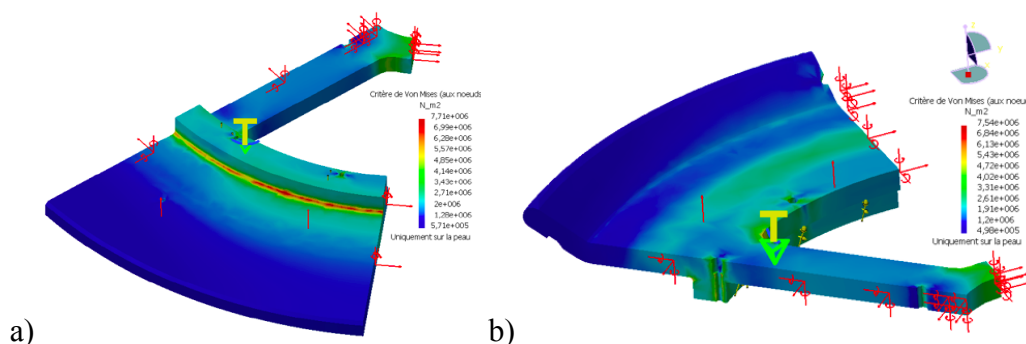


Figure 2-14 Analyse des plateaux inférieur et supérieur.

Suite à ces vérifications préliminaires, l'analyse de l'assemblage complet a été effectuée afin de valider les modes d'attache présents dans le moule. Cette dernière analyse a été conduite sous deux types de chargements, soit mécanique représentant la pression interne du moule pendant la fabrication et thermique représentant le chauffage du moule. Dans ce projet, la température de fabrication est assez élevée, ce qui met de l'importance sur l'effet thermique dans le chargement. Une analyse combinée de ces deux chargements a aussi été effectuée. Tout l'assemblage était adéquat pour le chargement. Toutefois, une recommandation a été faite concernant les grandes vis de fermeture. Celles-ci doivent être de grade supérieur afin de présenter une contrainte d'écoulement d'au moins 934.5 MPa. De l'acier de classe 12.9 a été utilisé afin d'accommoder cette contrainte. Des informations plus complètes concernant l'analyse par éléments finis sont disponibles dans le rapport *Analyse par éléments finis d'un système de fermeture de moule pour un Carter fabriqué par le procédé Polyflex* disponible dans les archives du CCHP.

2.4.1 Outil de manutention et fermeture du moule Polyflex

Ce projet particulier a présenté un défi de taille. Une pièce de cette envergure ne peut être manipulée aussi aisément que les échantillons de traction plus usuels. Le moule Polyflex a demandé une intégration dans un outil de manutention et de fermeture lui aussi peu coûteux. La Figure 2-15 donne un aperçu de ce système.

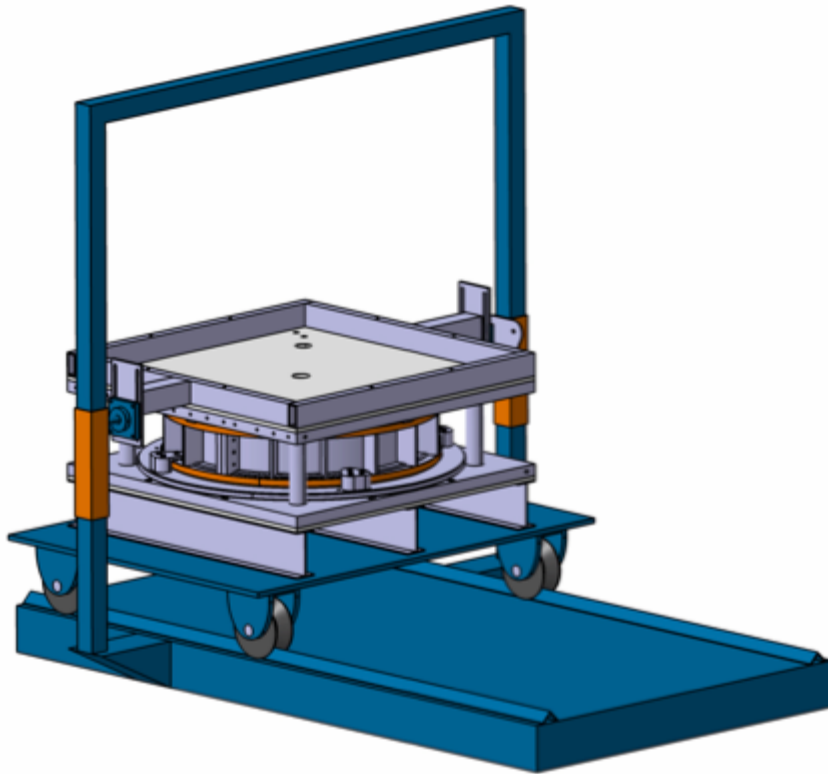


Figure 2-15 Outil de manutention pour moule Polyflex.

Ce système offre de nombreux avantages. En effet, plusieurs déplacements sont rendus possibles grâce à cet outil comme les levées et descentes de la plaque chauffante supérieure pesant à elle seule 900 kg. De plus, cette dernière permet aussi la rotation de cette charge sur 360 degrés. La Figure 2-16 et la Figure 2-17 illustrent ces différents positionnements de la partie supérieure.

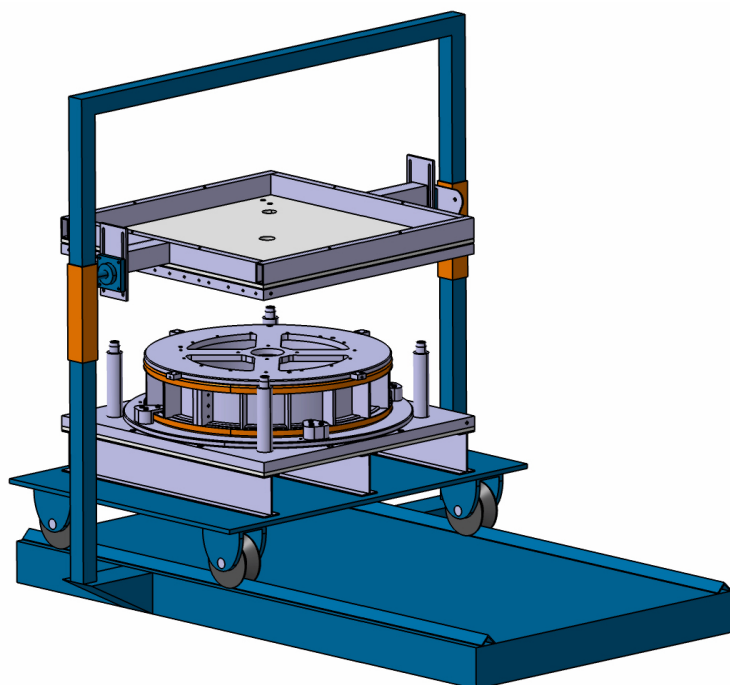


Figure 2-16 Plaque chauffante position élevée.

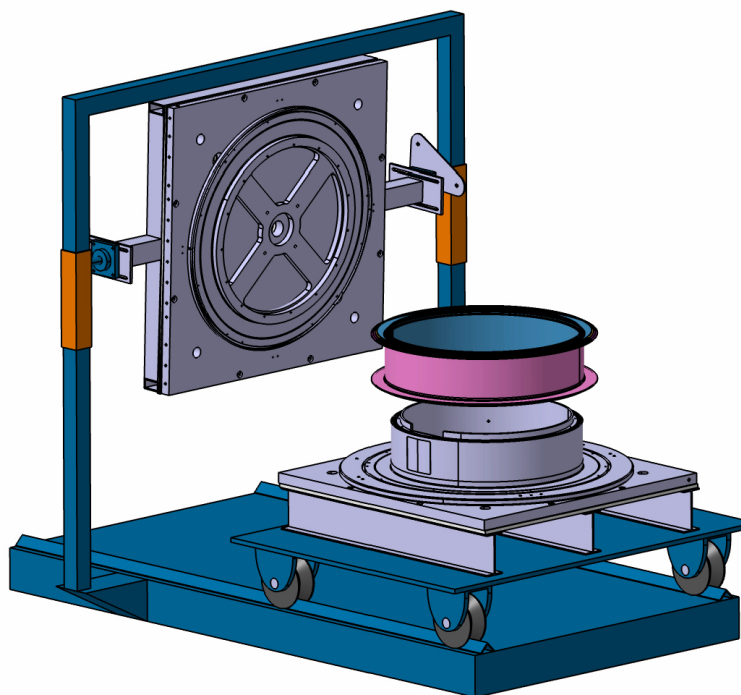


Figure 2-17 Plaque chauffante orientation 90 degrés.

De plus, la partie supérieure peut également servir de réceptacle pour la manutention du plateau supérieur du moule Polyflex. Cette dernière particularité présente beaucoup d'avantages pour réaliser les tâches prévues sur le moule Polyflex comme la manutention lors du démoulage de la partie supérieure et de son nettoyage en position verticale. De plus, les caractéristiques de cet outil de manutention amènent plus de sécurité dans les manipulations du moule.

Du côté de la base de l'outil de manutention, un plateau supportant toute la charge du moule a été motorisé à l'aide d'un moteur à air. Cet ajout procure plus de sécurité aux opérateurs de l'outillage. Cette option permet le positionnement du moule en 2 positions distinctes, soit sous la partie supérieure ou dans une zone libre facilitant le travail sur le moule. La Figure 2-18 montre ces deux positions.

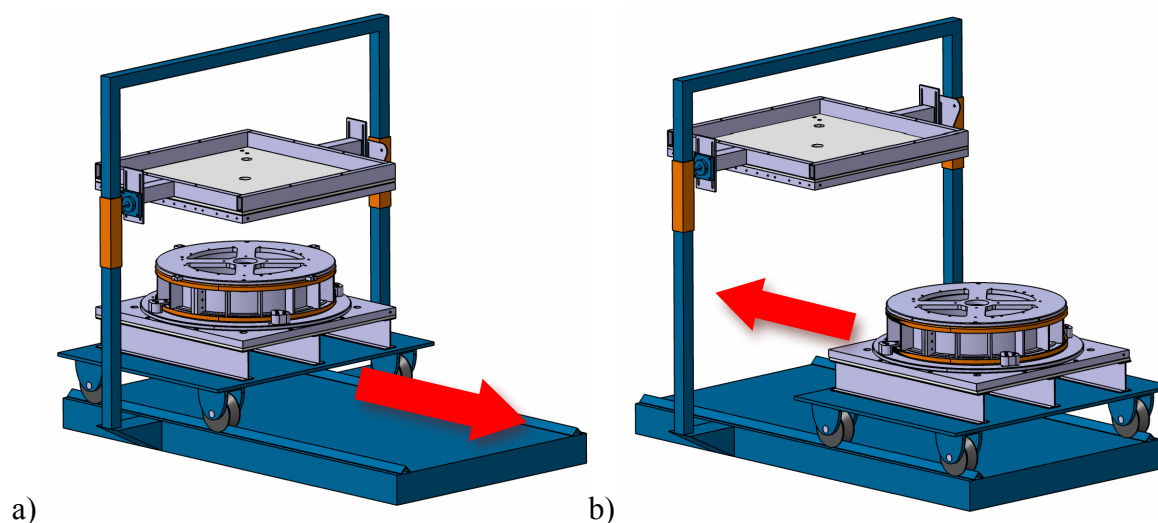


Figure 2-18 Plateau mobile motorisé de l'outil de manutention en 2 positions.

Afin d'éviter des surprises et des désagréments possibles lors de la manipulation réelle du moule, toutes ces étapes ont d'abord été simulées dans le programme de conception 3D CATIA V5. Les figures présentées à l'ANNEXE 1 permettent de visualiser toutes les étapes et les mouvements du moule ayant été vérifiés pendant la phase de conception.

CHAPITRE 3 MEMBRANE POLYFLEX 3D

3.1 Problématique

Il a déjà été mentionné plus haut que ce projet amène des défis de taille afin de réaliser le cahier des charges. Une grosse partie de ce défi vient de la nécessité de créer une membrane tridimensionnelle à la géométrie de la pièce qui est assez complexe. Afin de réussir ce tour de force, deux solutions ont été envisagées, soit un moule mâle et un moule femelle.

3.2 Conception du moule et fabrication du moule

La conception du moule de membrane est une partie importante de la réalisation de celle-ci. En effet, il est important de bien prendre en compte certains paramètres de fabrication comme le passage et l'étirement d'une membrane circulaire en une pièce lors de la séquence de montage du moule. Les matériaux ont donc été choisis afin de permettre une elongation suffisante sans dégradation de la membrane pour l'assemblage tout en permettant l'utilisation à haute température et à haute pression. La Figure 3-1 montre le type de tests effectués afin de s'assurer de ce requis.

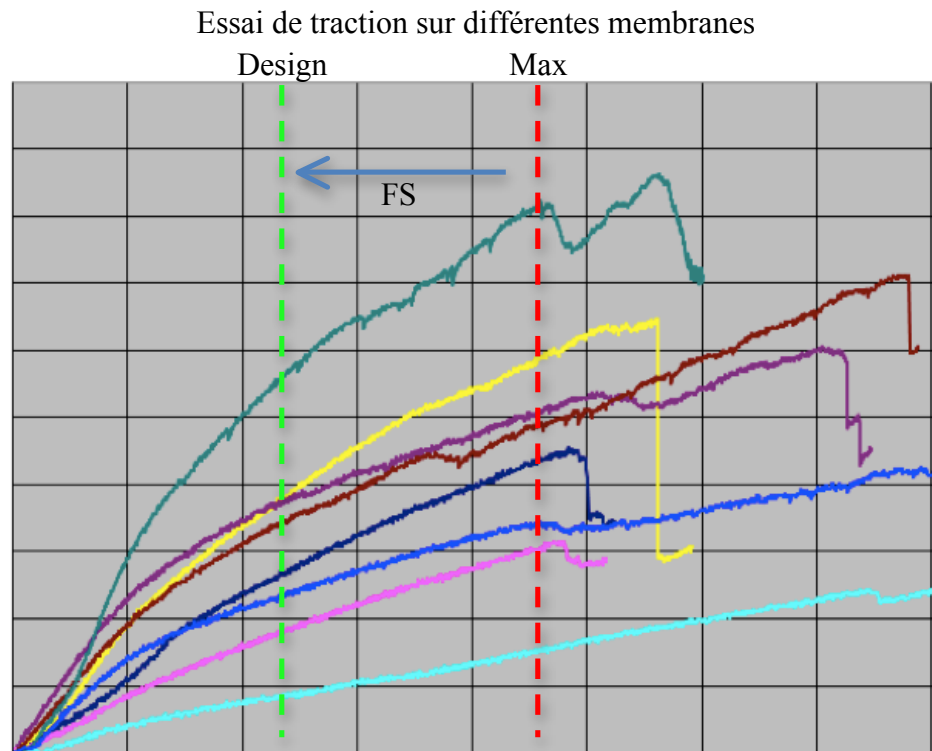


Figure 3-1 Élongation permise de la membrane.

Avec ce paramètre de design important, il est possible d'entreprendre une conception de moule pour notre membrane 3D. Le premier modèle de moule a été le moule mâle. La géométrie représentant un gros beigne a été créée afin de faire usiner un moule en MDF pour la fabrication de la membrane comme le montre la Figure 3-2.

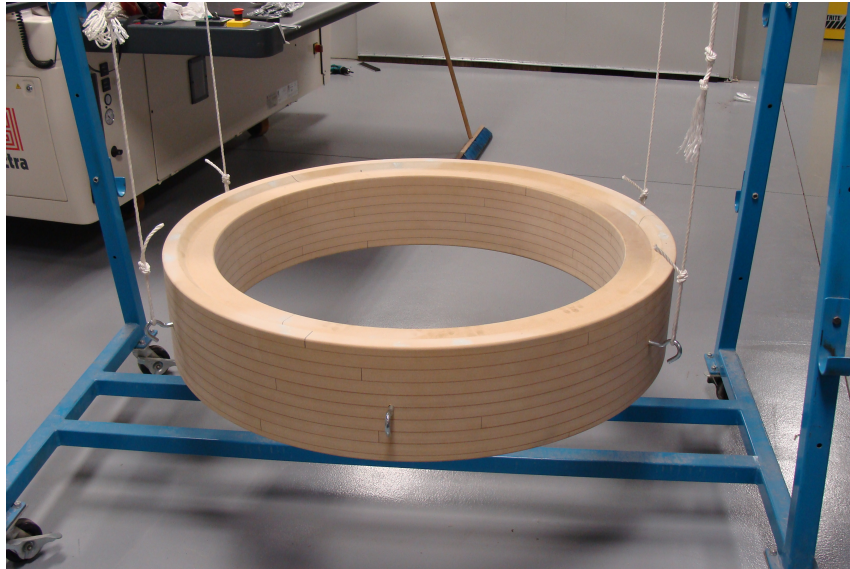


Figure 3-2 Moule mâle.

Suite à la fabrication d'une première membrane avec le moule mâle, il est devenu évident que la qualité de surface du côté non contrôlée ne serait pas acceptable pour la fabrication Polyflex. De plus, le moule en bois a subi des dommages dus à la température de fabrication des membranes 3D. La Figure 3-3 montre le résultat de cette fabrication.



Figure 3-3 Membrane fabriquée avec le moule mâle.

Suite à ce premier essai, un second moule a été conçu. Celui-ci a été fabriqué par moulage en aluminium et est de type femelle. Cette configuration est non pas sans trouble, notamment à cause des surfaces opposées dans un espace restreint, mais procure toutefois une qualité de surface adéquate étant donné que la surface en contact avec la pièce est du côté moule de membrane. La Figure 3-4 montre le moule d'aluminium ainsi conçu.

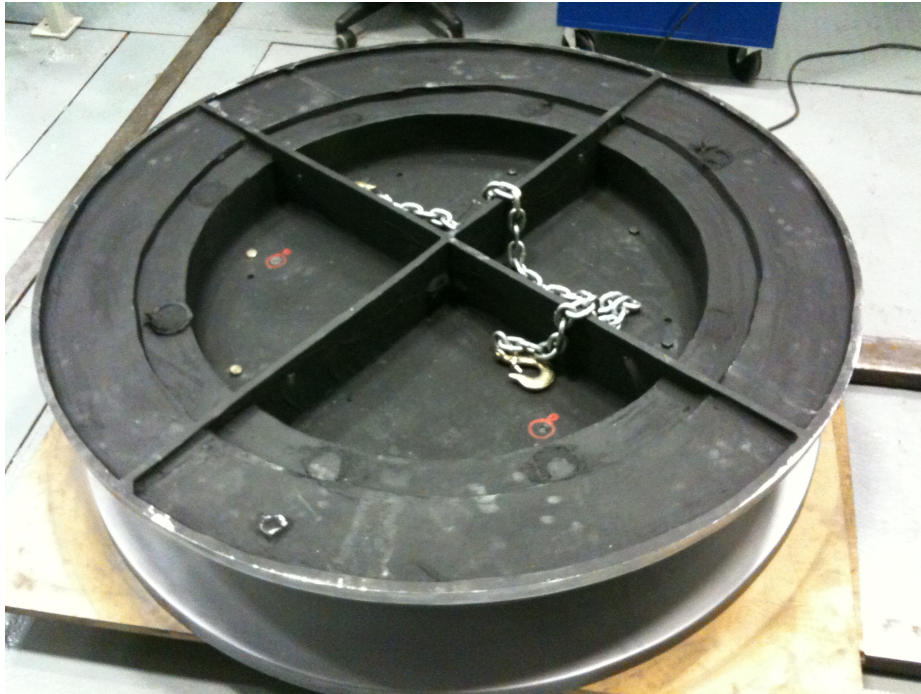


Figure 3-4 Moule femelle.

Suite à un nouvel essai de fabrication, une membrane tridimensionnelle axisymétrique a été créée avec un fini de surface adéquat et le bon respect de la géométrie de la pièce complexe. Il est donc possible de conclure que comme dans le cas de nombreuses fabrications de pièces composites, c'est le moule qui a le plus d'importance. Une bonne conception du moule de fabrication mène beaucoup plus rapidement à un succès de fabrication. Dans cette optique, toutes les phases de conception du projet ont été menées avec grand soin comme l'illustre ce rapport.

CHAPITRE 4 CONCEPTION D'UNE MACHINE DE COMPACTION À GRANDE CAPACITÉ POUR POLYFLEX

Lors de la fabrication de pièces avec le procédé Polyflex, un des équipements les plus importants est la machine de compaction. Celle-ci assure la pression de consolidation qui permet la fabrication de pièces composites de grande qualité. Cette machine doit opérer de l'huile sous pression à de hautes températures. Un autre aspect important de cet équipement de laboratoire est sa capacité d'opération dans un univers industriel demandant de la performance au niveau du chauffage de l'huile ainsi que du débit de transfert dans le moule. Le chapitre qui suit décrit le cahier des charges pour la nouvelle machine de compaction de type industriel ainsi que toutes les parties du système de compaction.

4.1 Cahier des charges

4.1.1 Besoin d'une nouvelle machine de compaction

Étant donné que le laboratoire opère en deux lieux différents, soit un à l'École Polytechnique de Montréal et l'autre à l'École Nationale d'Aérotechnique, le besoin d'une deuxième machine de compaction pour le laboratoire industriel de St-Hubert devient évident. De plus, en regardant la première machine de compaction, il est envisageable d'améliorer plusieurs points afin de créer l'équipement nécessaire au laboratoire industriel. La Figure 4-1 montre la conception qui est présentement utilisée à Polytechnique.



Figure 4-1 Machine de compaction, première conception.

4.1.2 Améliorations du système

La nouvelle machine de compaction devra être conçue avec une approche beaucoup plus industrielle. Dans cet objectif, les apprentissages liés à la première machine de compaction doivent être pris en compte. L'utilisation de la première machine était assez complexe pour un opérateur seul, car toutes les valves de commandes étaient trop distancées. Ainsi, le nouveau système se doit d'être simplifié afin de pouvoir être opéré par une seule personne. De plus, toutes les spécifications générales de la machine doivent être augmentées afin d'arriver à avoir des temps de cycle réduits tout en pouvant être utilisées pour des moules de plus grande dimension.

Cahier des charges

- I. -Simplifier l'opération du système complet**
- II. Augmenter le débit maximal de pompage**
- III. Augmenter la capacité en volume de fluide de compaction**
- IV. Améliorer le contrôle de la température et la rapidité de chauffage**

4.1.3 Spécifications et lignes directrices

Dès le tout début de la conception de la machine de compaction, les caractéristiques techniques de la machine ont été spécifiées comme listées ci-dessous :

Contraintes	
I.	Fonctionner avec des températures allant jusqu'à 180°C
II.	Avoir une capacité de stockage de fluide de compaction de 10 gallons
III.	Avoir un débit de pompage de 10 gal/min
IV.	Intégrer tous les dispositifs de sécurité nécessaires
V.	Regrouper toutes les commandes sur un panneau unique pour un seul opérateur
VI.	Occuper une aire au sol de moins de 9 pieds carrés

4.2 Composantes importantes

Les principales composantes choisies dans le but de répondre aux demandes techniques sur la machine de compaction sont présentées dans la section qui suit. Le modèle numérique ainsi que la machine de compaction réelle sont présentés à la Figure 4-2.

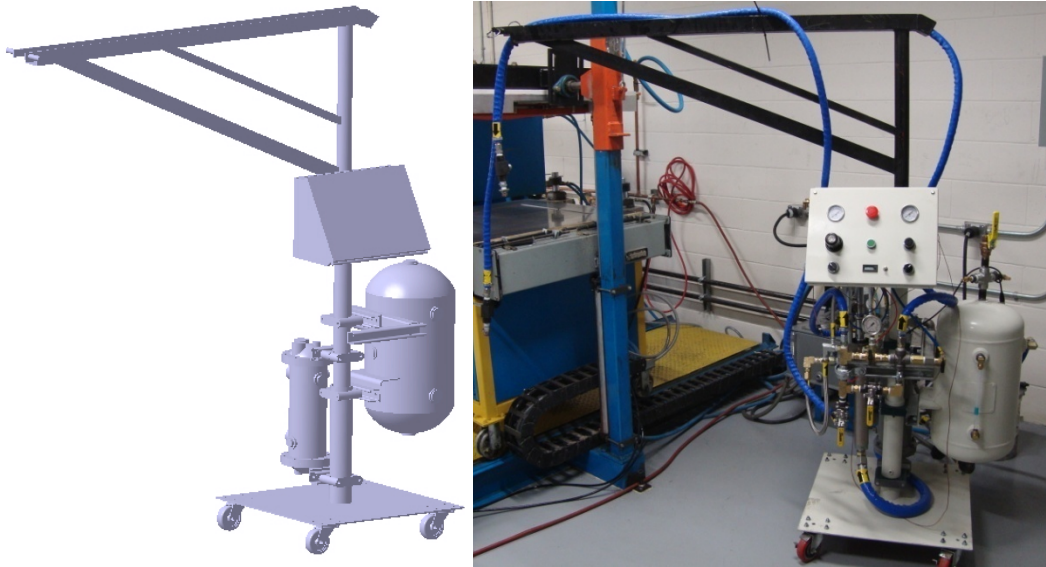


Figure 4-2 : Modèle numérique et machine de compaction réelle.

4.2.1 Pompe

Bien que l'ancienne machine de compaction était faite avec une pompe activée par un moteur électrique, la simplicité des modèles de pompe à moteur pneumatique a fait pencher la balance. De plus, pour cette machine de compaction en particulier, il a été possible de récupérer la pompe pneumatique d'un ancien système d'injection inutilisé. L'assemblage de la pompe est composé d'un cylindre d'air comprimé attaché à une pompe double action. Le piston du moteur à air de 5 pouces de diamètre active directement la pompe. Le déplacement total du moteur est de 4 pouces et crée un ratio de pression fluide à l'air de 11:1. La pression d'entrée d'air maximale est de 100PSI, ce qui implique une pression maximale sur le fluide de 1300 PSI. Ainsi, avec toutes les spécifications montrées dans le Tableau 4-1, cette pompe non utilisée remplit pleinement les requis pour la nouvelle machine de compaction industrielle.

Tableau 4-1 Spécifications de l'assemblage de pompe

Ratio de pression (Fluide : air)	11:1
Diamètre du piston du moteur à air	5"
Déplacement total du moteur à air	4"
Débit	0.050gal (192cc) par cycle



Figure 4-3 Assemblage de la pompe sur la nouvelle machine de compaction.

4.2.2 Réservoir de fluide de compaction

Le réservoir de fluide de compaction doit pouvoir contenir le fluide de compaction à la pression de design, soit 200PSI ainsi qu'à la température de design, soit 180°C. Un réservoir standard a donc été choisi. Ce réservoir offre de la versatilité par tous les ports de connexion disponibles et est aussi approuvé pour le vide jusqu'à 29,9 pouces de mercure. Une valve trois voies a été ajoutée sur le dessus du réservoir afin d'offrir les possibilités de dépressurisation et mise à la pression ambiante. Durant l'utilisation de la machine de compaction, le réservoir est toujours à la pression atmosphérique afin d'éviter la possibilité de dépassement de pression maximale. Finalement, le niveau de fluide de compaction dans le réservoir peut être vu par un tube transparent posé sur le côté de celui-ci. Le réservoir montré à la Figure 4-4 rencontre les spécifications présentées dans le Tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Spécifications du réservoir de fluide de compaction

Pression maximale	600 psi
Température minimale	-20 F
Température maximale	450 F
Volume	10 gal
Diamètre externe	12"
Approuvée pour le vide	29.9" Hg



Figure 4-4 Réservoir de la nouvelle machine de compaction.

4.2.3 Échangeur de chaleur

L'échangeur de chaleur choisi est constitué d'une coque en acier et de tubes de cuivre qui allient un bon transfert de chaleur et durabilité. Ce type d'échangeur de chaleur est recommandé lors de l'utilisation avec des fluides comme celui utilisé pour la machine de compaction. L'échangeur de chaleur est situé à la fin du circuit hydraulique, ce qui permet le chauffage et le refroidissement du fluide entrant dans le réservoir. L'échangeur de chaleur montré à la Figure 4-5 a les spécifications du Tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Caractéristiques principales de l'échangeur de chaleur

Aire effective	9.1 sq.ft
Capacité de refroidissement	525,000 Btu/hr
Débit maximal	60 gpm
Pression maximale (enveloppe acier)	300 psi
Pression maximale (tube de cuivre)	150 psi
Température maximale	150°C



Figure 4-5 : Échangeur de chaleur installé sur la nouvelle machine de compaction.

4.2.4 Panneau de contrôle hydraulique

Le panneau de contrôle hydraulique est situé directement en dessous du panneau de commande pneumatique. Celui-ci est principalement composé de valves qui acheminent le fluide de compaction dans la direction voulue. Le panneau de contrôle hydraulique contient aussi une valve de régulation de la pression. Celle-ci est branchée au système pneumatique où la pression du fluide de compaction est ainsi réglée. Le panneau de contrôle hydraulique est montré à la Figure 4-6.

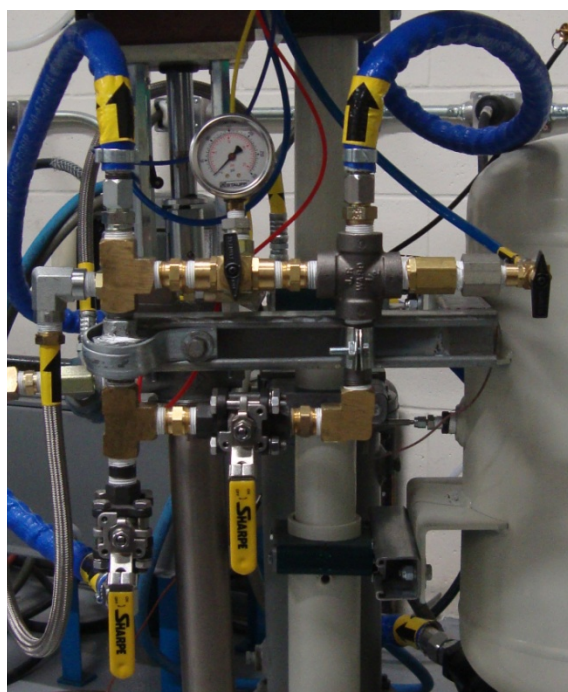


Figure 4-6 : Panneau de contrôle hydraulique.

4.2.5 Boîte de contrôle pneumatique

La boîte de contrôle pneumatique regroupe tous les régulateurs et boutons de contrôle nécessaires à l'opération de la machine de compaction. Ceux-ci régissent la pression d'air fournie au moteur pneumatique, ce qui affecte aussi le débit et la pression des lignes hydrauliques. Tel que montré à la Figure 4-7, le régulateur à la gauche du panneau contrôle la pression du cylindre pneumatique

de l'assemblage de pompe alors que celui de droite contrôle la pression des lignes pneumatiques via la valve de régulation de pression du panneau hydraulique par un ratio de pression air/fluide de 0.5. Tout le système logique pneumatique à l'intérieur de la boîte de contrôle fonctionne avec l'air comprimé de ligne à 100PSI.



Figure 4-7 : Boîte de contrôle pneumatique.

4.2.6 Tuyaux de fluide de compaction

La nouvelle machine de compaction nécessite des tuyaux hydrauliques résistants à la pression et à la température d'utilisation. Ainsi, les tuyaux choisis respectent ces spécifications et sont en plus isolés afin de diminuer les pertes de chaleur du système. Ces tuyaux sont aussi très flexibles et profitent des coupleurs JIC standard, ce qui facilite leur utilisation dans le système. Les tuyaux sont montrés à la Figure 4-8.



Figure 4-8 : Tuyaux de la nouvelle machine de compaction.

4.3 Schéma global

Un schéma global de la machine de compaction est présenté à la Figure 4-9. Celui-ci regroupe tous les systèmes de la machine allant vers le moule ainsi que tous les retours. La Figure 4-9 montre ce schéma en détails.

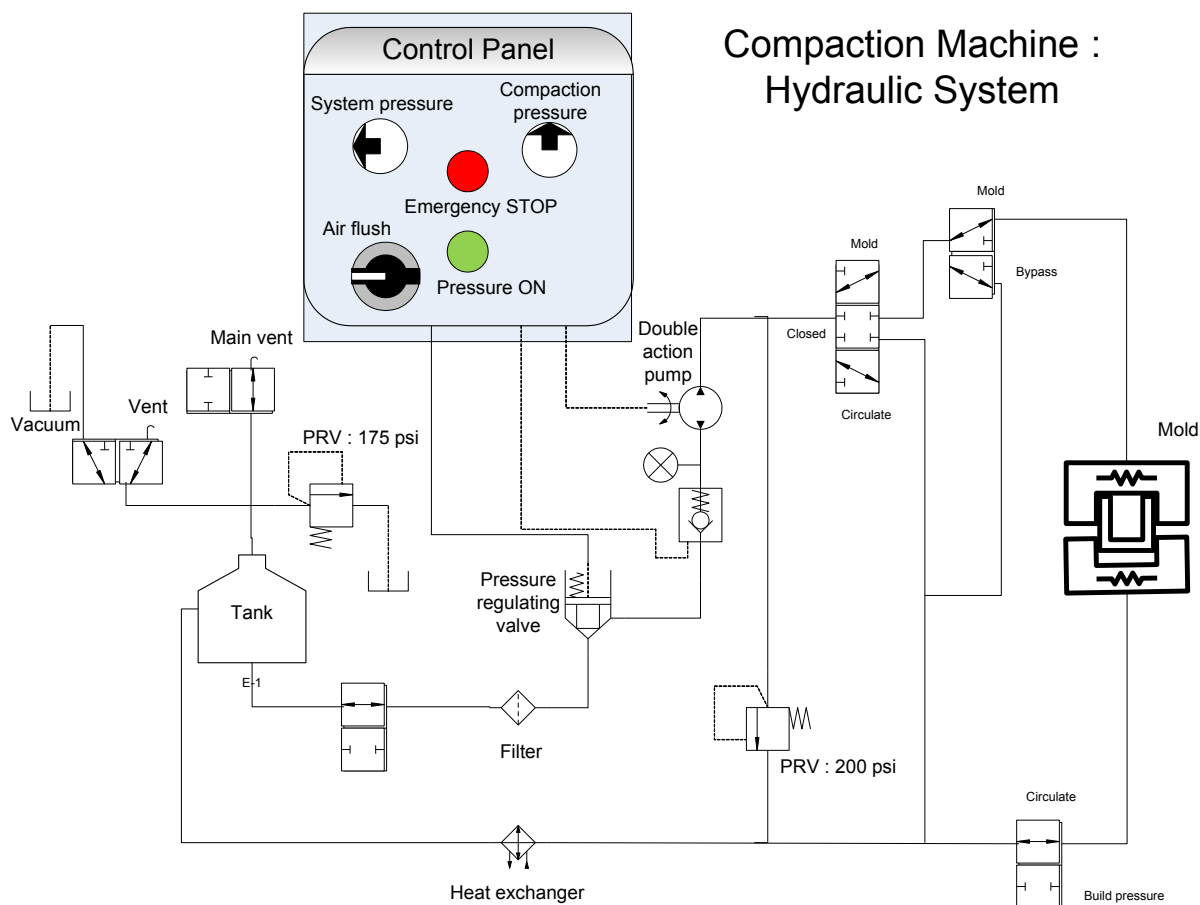


Figure 4-9 Schéma du circuit de la machine de compaction.

4.4 Description de la machine

La machine de compaction opère en six modes différents. Chacun de ces modes requiert de l'opérateur la manipulation des valves en fonction du mode recherché. La Figure 4-10 montre toutes les valves et boutons de contrôle ainsi que leur nom respectif.

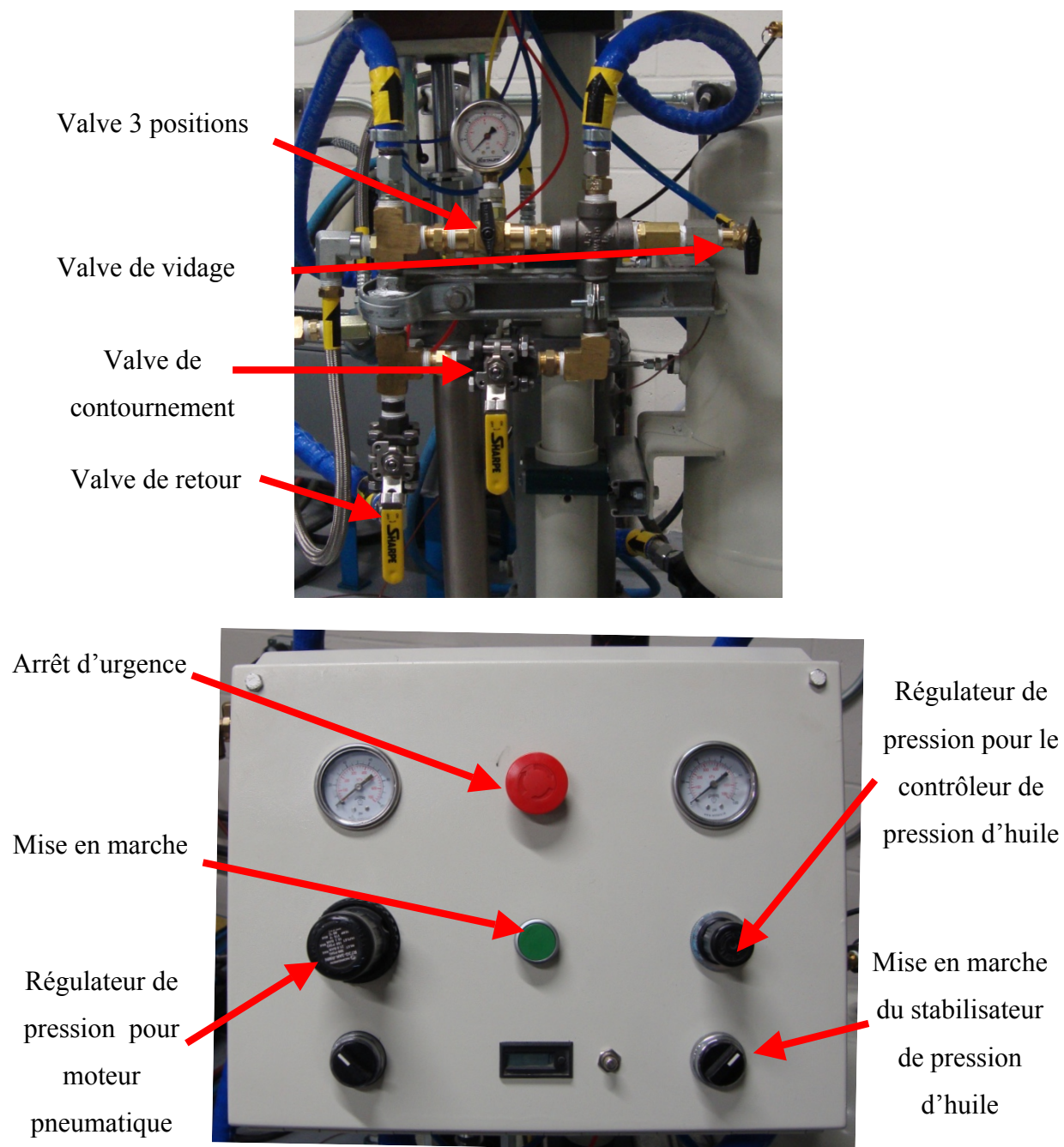


Figure 4-10 Panneau de contrôle de la machine de compaction et nomenclature.

4.4.1 Démarrage de la machine de compaction

Ces étapes sont requises avant l'utilisation de la machine de compaction afin de la rendre opérationnelle.

1. Brancher l'entrée d'air comprimé.
2. Mettre la valve maîtresse du circuit d'air comprimé en position ON.
3. Suivre les instructions pour le mode d'opération voulu.

4.4.2 Recirculation en boucle fermée

1. Positionner toutes les valves en position pour recirculation en boucle fermée :
 - a. valve 3 positions vers la gauche (retour vers échangeur de température et réservoir);
 - b. valve de vidage fermée;
 - c. valve de retour fermée;
 - d. valve de contournement fermée.
2. Relâcher le bouton d'arrêt d'urgence.
3. Vérifier et ajuster la pression d'air pour le moteur pneumatique.
4. Activer le bouton de mise en marche du stabilisateur de pression.
5. Vérifier la pression de stabilisation et ajuster à 0 pour le moment (NOTE : la pression de l'indicateur du stabilisateur de pression a un ratio 2:1 entre la pression d'air et la pression hydraulique).
6. Presser le bouton de mise en marche.
7. Ajuster la pression du stabilisateur à la pression voulue (NOTE : la pression de l'indicateur du stabilisateur de pression a un ratio 2:1 entre la pression d'air et la pression hydraulique).
8. Pour arrêter la circulation, activer le bouton d'arrêt d'urgence.

4.4.3 Recirculation en boucle fermée avec chauffage

1. Positionner toutes les valves en position pour recirculation en boucle fermée avec chauffage :
 - a. valve 3 positions vers la gauche (retour vers échangeur de température et réservoir);
 - b. valve de vidage fermée;
 - c. valve de retour fermée;
 - a. valve de contournement fermée.
2. Relâcher le bouton d'arrêt d'urgence.
3. Vérifier et ajuster la pression d'air pour le moteur pneumatique.
4. Activer le bouton de mise en marche du stabilisateur de pression.
5. Vérifier la pression de stabilisation et ajuster à 0 pour le moment (NOTE : la pression de l'indicateur du stabilisateur de pression a un ratio 2:1 entre la pression d'air et la pression hydraulique).
6. Presser le bouton de mise en marche.
7. Ajuster la pression du stabilisateur à la pression voulue (NOTE : la pression de l'indicateur du stabilisateur de pression a un ratio 2:1 entre la pression d'air et la pression hydraulique).
8. Démarrer le système de chauffage à l'eau pour l'échangeur de chaleur.
9. Pour arrêter la circulation, activer le bouton d'arrêt d'urgence.

4.4.4 Circulation complète passant par le moule

1. Placer toutes les valves en mode de circulation complète en passant par le moule :
 - a. valve 3 positions vers la droite (vers l'entrée du moule);
 - b. valve de vidage fermée;

- c. valve de retour ouverte;
 - d. valve de contournement fermée.
- 2. Relâcher le bouton d'arrêt d'urgence.
- 3. Vérifier et ajuster la pression d'air pour le moteur pneumatique.
- 4. Activer le bouton de mise en marche du stabilisateur de pression.
- 5. Vérifier la pression de stabilisation et ajuster à 0 pour le moment (NOTE : la pression de l'indicateur du stabilisateur de pression a un ratio 2:1 entre la pression d'air et la pression hydraulique).
- 6. Presser le bouton de mise en marche.
- 7. Ajuster la pression du stabilisateur à la pression voulue (NOTE : la pression de l'indicateur du stabilisateur de pression a un ratio 2:1 entre la pression d'air et la pression hydraulique).
- 8. Pour arrêter la circulation, activer le bouton d'arrêt d'urgence.

4.4.5 Compaction statique

- 1. Positionner toutes les valves en position pour compaction statique :
 - a. valve 3 positions vers la droite (vers l'entrée du moule);
 - b. valve de vidage fermée;
 - c. valve de retour fermée;
 - d. valve de contournement fermée.
- 2. Relâcher le bouton d'arrêt d'urgence.
- 3. Vérifier et ajuster la pression d'air pour le moteur pneumatique.
- 4. Activer le bouton de mise en marche du stabilisateur de pression.
- 5. Vérifier la pression de stabilisation et ajuster à 0 pour le moment (NOTE : la pression de l'indicateur du stabilisateur de pression a un ratio 2:1 entre la pression

d'air et la pression hydraulique).

6. Presser le bouton de mise en marche.
7. Ajuster la pression du stabilisateur à la pression voulue (NOTE : la pression de l'indicateur du stabilisateur de pression a un ratio 2:1 entre la pression d'air et la pression hydraulique).
8. Pour arrêter la compaction statique, ouvrir la valve de retour afin de revenir en circulation complète jusqu'à ce que le refroidissement soit satisfaisant.
9. Pour arrêter la circulation, activer le bouton d'arrêt d'urgence.

4.4.6 Mode de vidage du fluide de compaction

1. Positionner toutes les valves en mode de vidage du fluide de compaction :
 - a. valve 3 positions en position fermée;
 - b. valve de vidage fermée;
 - c. valve de retour ouverte;
 - d. valve de contournement ouverte.
2. Brancher l'alimentation niveau de vide dans le réservoir.
3. Laisser le fluide de compaction retourner au réservoir durant quelques minutes.
4. Fermer la valve de contournement.
5. Ouvrir la valve de vidage lentement afin de vider le fluide de compaction restant.
6. Fermer toutes les valves.

4.5 Sécurité d'opération

La machine de compaction comporte un bon nombre de mesures de sécurité sur plusieurs parties importantes. Les éléments comme le réservoir, les tuyaux, la pompe, le circuit d'air et le circuit hydraulique complet se doivent d'être sécuritaires pour l'opérateur.

4.5.1 Valves de surpression

La machine de compaction est équipée de deux valves de surpression. La première est assemblée directement sur le réservoir afin de prévenir toute pressurisation excessive du réservoir. Cette dernière s'ouvre lorsque la pression excède 150 PSI afin d'en atténuer la pression interne.

Le circuit hydraulique peut lui aussi présenter un danger s'il est mal contrôlé, car la pompe peut générer des pressions allant jusqu'à 1300 PSI. Avec toutes les valves manuelles, il serait envisageable qu'un opérateur oublie une mauvaise valve fermée entraînant la pressurisation du circuit. Afin de remédier à cette possibilité, une valve de surpression ajustable a été assemblée directement à la sortie de la pompe créant ainsi un canal de sortie pour l'huile contournant tout le circuit hydraulique et dirigeant le fluide directement vers le réservoir à pression atmosphérique. Cette valve est présentement ajustée afin d'assurer que la pression hydraulique ne puisse pas monter plus haut que 200 PSI dans tout le système. Cette valve de surpression est montrée à la Figure 4-11.



Figure 4-11 Valve de surpression du circuit hydraulique.

4.5.2 Bouton d'arrêt d'urgence pour pression d'air

Le circuit d'air comprimé est équipé d'un bouton d'arrêt d'urgence. En appuyant sur ce bouton, l'approvisionnement en air comprimé est coupé entraînant ainsi l'arrêt du moteur pneumatique actionnant la pompe, ce qui empêche toute nouvelle pression hydraulique de se former.

4.6 Conclusions et travaux futurs

En conclusion, cette nouvelle machine de compaction rencontre les requis d'une machine de type industriel grâce à ses nouvelles capacités. Avec une machine de compaction comme celle-ci, des pièces industrielles de grande taille peuvent être fabriquées avec le procédé Polyflex. Sa conception permet des temps de cycle bas et une empreinte au sol très réduite. De plus, les actions requises par l'opérateur ont été réellement simplifiées grâce aux panneaux de commandes d'air comprimé et de fluide de compaction regroupés au même endroit.

Pour la suite des travaux, il serait possible d'automatiser la machine de compaction en remplaçant toutes les valves manuelles et régulateurs par leur équivalent contrôlé via un contrôleur. Cet ajout serait assez simple à réaliser sans affecter tout le fonctionnement de la machine et pourrait améliorer les performances au niveau de la régulation de la pression hydraulique tout en simplifiant encore plus les actions de l'opérateur.

CHAPITRE 5 SYSTÈME D'INJECTION MONOCOMPOSANTE À HAUTE TEMPÉRATURE

La fabrication d'une pièce en matériaux composites avec le procédé Polyflex requiert un système d'injection avec contrôle de la quantité de résine injectée. De plus, pour ce projet industriel, un système d'injection de grande capacité est requis. Ainsi, la conception d'un système d'injection sur mesure devient nécessaire.

5.1 Cahier des charges

Lors de la conception du système, un cahier des charges a été établi afin de bien en orienter la conception. Celui-ci est présenté dans le Tableau 5-1.

Tableau 5-1 : Cahier des charges de la machine d'injection Polyflex

Cahier des charges de la machine d'injection Polyflex
<ul style="list-style-type: none"> -Injecter une résine à haute viscosité -Chauffer la résine à haute température -Dégazer la résine

5.2 Contraintes de design

Avant de débiter la conception d'une machine d'injection, il est important de prendre en compte les contraintes de design qui se rapportent à la phase d'injection. Ainsi, pour le projet en cours, le Tableau 5-2 liste les contraintes importantes.

Tableau 5-2 : Contraintes de design

Contraintes de design de la machine d'injection Polyflex
<ul style="list-style-type: none"> -Température d'injection allant jusqu'à 200°C -Pression d'injection allant jusqu'à 35 PSI -Contrôle sur la masse injectée, précision au 100g -Chauffage de la résine en deux temps pour sécurité

5.3 Conception

La conception de la machine d'injection pour le procédé Polyflex à l'échelle industrielle a rapidement été orientée grâce à la grande expertise en conception de machines d'injection présente dans l'équipe. De plus, certains choix devaient aller de paire avec l'équipement déjà disponible au laboratoire et répondant aux contraintes de design.

5.3.1 Pot d'injection

La conception du système d'injection s'est établie autour d'un pot de pression à grande capacité disponible au laboratoire industriel du CCHP. Le pot en question comporte plusieurs caractéristiques le plaçant comme choix idéal dans le contexte du projet avec ses budgets et échéanciers serrés. Le Tableau 5-3 décrit les principales caractéristiques du pot de pression utilisé.

Tableau 5-3 : Pot de pression utilisé

Spécifications	Valeur
Volume	50 l
Pression maximale	50 PSI
Chauffage	Gaine de chauffage externe

Mélangeur	Agitateur pneumatique intégré au couvercle
-----------	--

La Figure 5-1 montre le pot en question avec ses différentes composantes.



Figure 5-1 Pot de pression.

5.3.2 Balance et contrôle de la masse injectée

Le procédé Polyflex nécessite un contrôle de la masse injectée dans le moule. Afin de réaliser ce contrôle, une balance a été choisie pour suivre la quantité de résine sortant du pot durant une injection. Ainsi, il devient possible d'identifier le moment de fermeture de la valve d'injection afin d'avoir la quantité de résine voulue dans le moule.

La balance choisie est une balance provenant de Balances Industrielles Montréal et étant composée d'une tête de lecture de marque Ohaus, Defender 2000 et d'une base avec cellules de charges de marque Sartorius. Cette combinaison a permis d'avoir une capacité de mesure massique élevée tout en assurant une précision élevée. Le Tableau 5-4 montre les spécifications atteintes par cette balance.

Tableau 5-4 Valeurs

Spécifications	Valeurs
Charges maximale	150 kg
Précision	+/- 10 g
Options	Port de communication série
Dimension du plateau	19.7" x 15.7"

5.3.3 Échangeur de chaleur

L'échangeur est un élément d'importance capitale dans le système d'injection. Afin de remplir ses fonctions, il doit être en mesure de transférer suffisamment de chaleur à la résine passant en son centre à un certain débit en assurant la sortie de la résine à la température de sortie élevée voulue, et ce pendant toute la phase d'injection s'étalant sur quelques minutes.

La conception de cet échangeur de chaleur s'est faite à partir de travaux effectués au sein de la chaire CCHP. Un modèle antérieur d'échangeur de chaleur avait été préalablement conçu, mais avec beaucoup moins de puissance de chauffage que ce qui est requis pour le projet actuel. La Figure 5-2 montre l'échangeur de chaleur ayant servi de base de design avec sa capsule isolante.

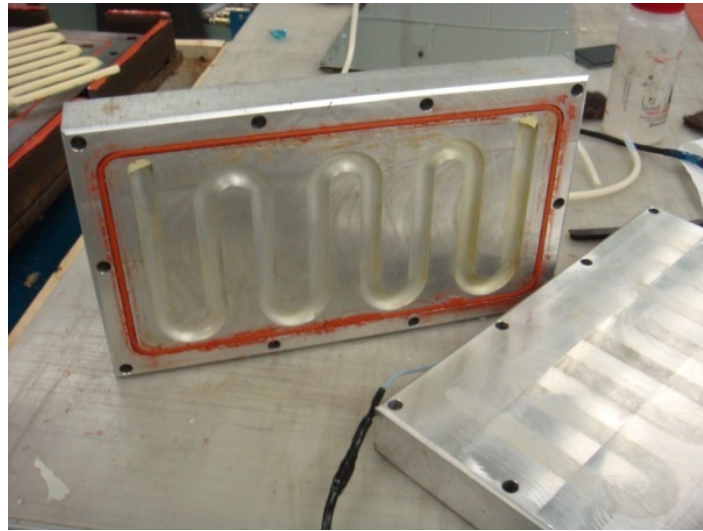


Figure 5-2 Ancien échangeur de chaleur pour Polyflex haute température.

Le nouvel échangeur a été conçu selon des critères de conception tel la facilité du nettoyage. Ceci étant un élément clé lors de l'injection de résine époxy, un grand soin a été pris afin d'en faciliter l'utilisation. Ainsi, la géométrie retenue offre un démoulage facile de la résine polymérisée. De plus, des chanfreins ont été inclus sur toutes les plaques de l'échangeur afin d'en faciliter l'ouverture après fabrication. Un autre aspect important de cet échangeur de chaleur est sa versatilité. En effet, il est possible d'augmenter ou de diminuer le nombre de plaque de ce système multi-plaques en insérant ou supprimant simplement des plaques supplémentaires. La Figure 5-3 montre le nouvel échangeur avec les éléments clefs de sa conception.

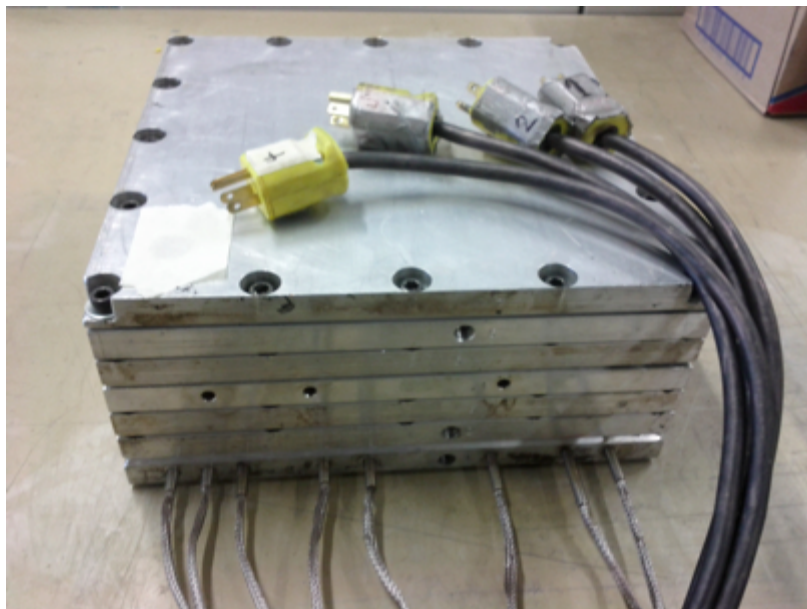


Figure 5-3 Échangeur, système multi-plaques.

Chaque étage de l'échangeur de chaleur possède des canaux serpentins permettant le transfert de chaleur vers la résine. De plus, pour créer l'étanchéité entre chaque étage, un joint torique haute-température a été utilisé. La Figure 5-4 montre un exemple d'une plaque et de ses composantes.

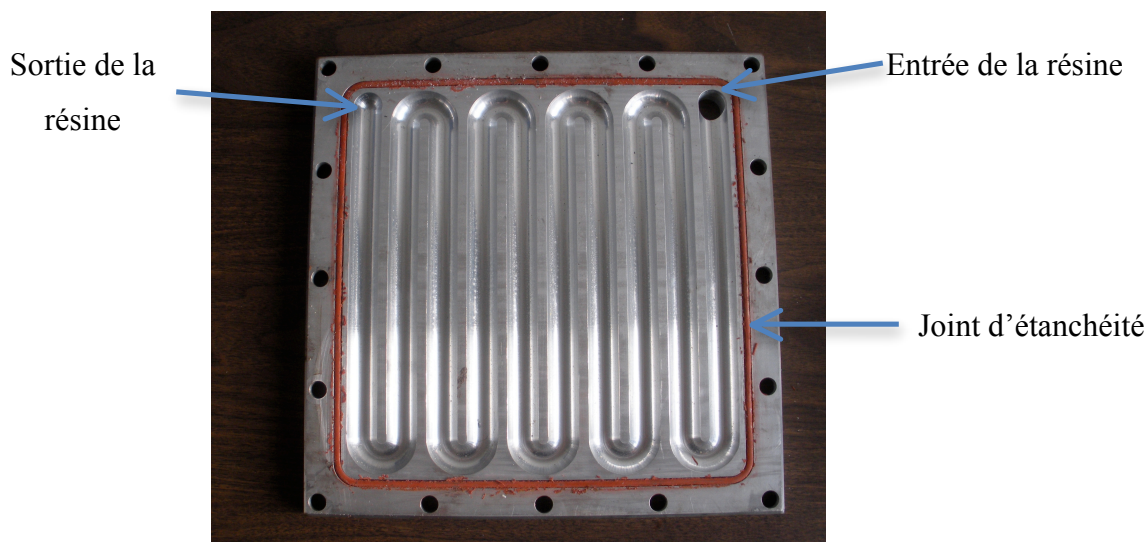


Figure 5-4 - Plaque de l'échangeur de chaleur.

Différents systèmes de chauffage ont été testés sur cet échangeur de chaleur afin de trouver le système le plus convenable pour notre application. Dans tous les cas, un thermocouple placé au centre de chaque plaque permet d'enregistrer sa température en temps réel. Les cinq plaques d'aluminium sont assemblées à l'aide de 16 vis en périphérie de l'échangeur.

La Figure 5-5 présente une vue assemblée de l'échangeur dans sa configuration initiale. L'échangeur est chauffé à l'aide de 6 bandes chauffantes situées sur les surfaces externes de l'assemblage (illustré en rouge). De plus, l'échangeur est isolé à l'aide de plaques isolantes réduisant ainsi les pertes de chaleur par convection.

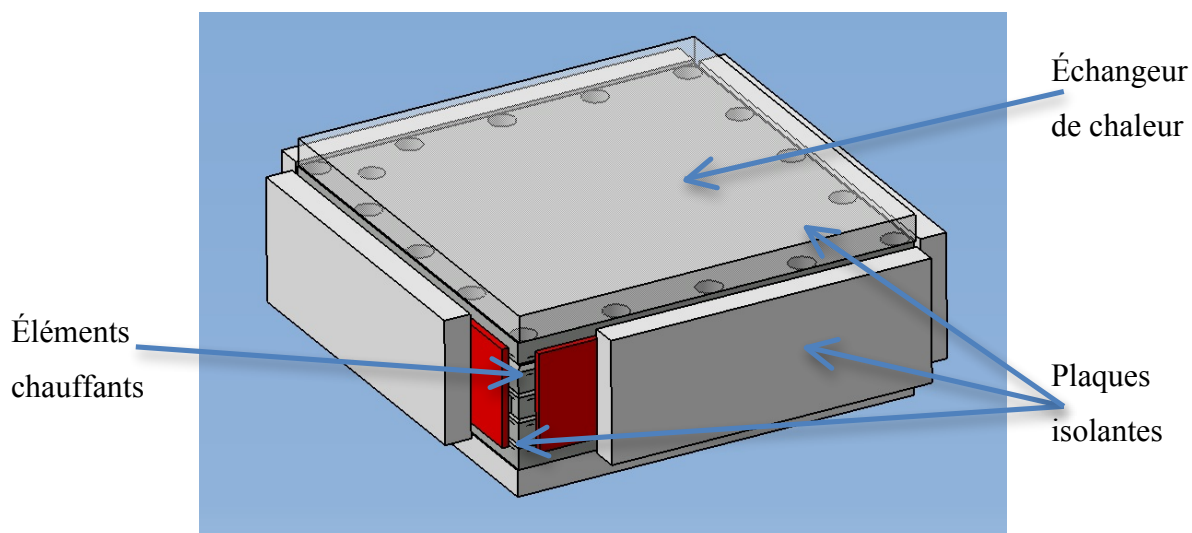


Figure 5-5 - Échangeur de chaleur dans sa première configuration.

5.4 Vue d'ensemble du système d'injection pour Polyflex

Le système d'injection complet est composé de plusieurs parties qui une fois assemblées les unes aux autres permettent l'injection d'une résine haute température avec contrôle de la masse injectée, et ce dans un temps d'injection très court vu la quantité de résine injectée.

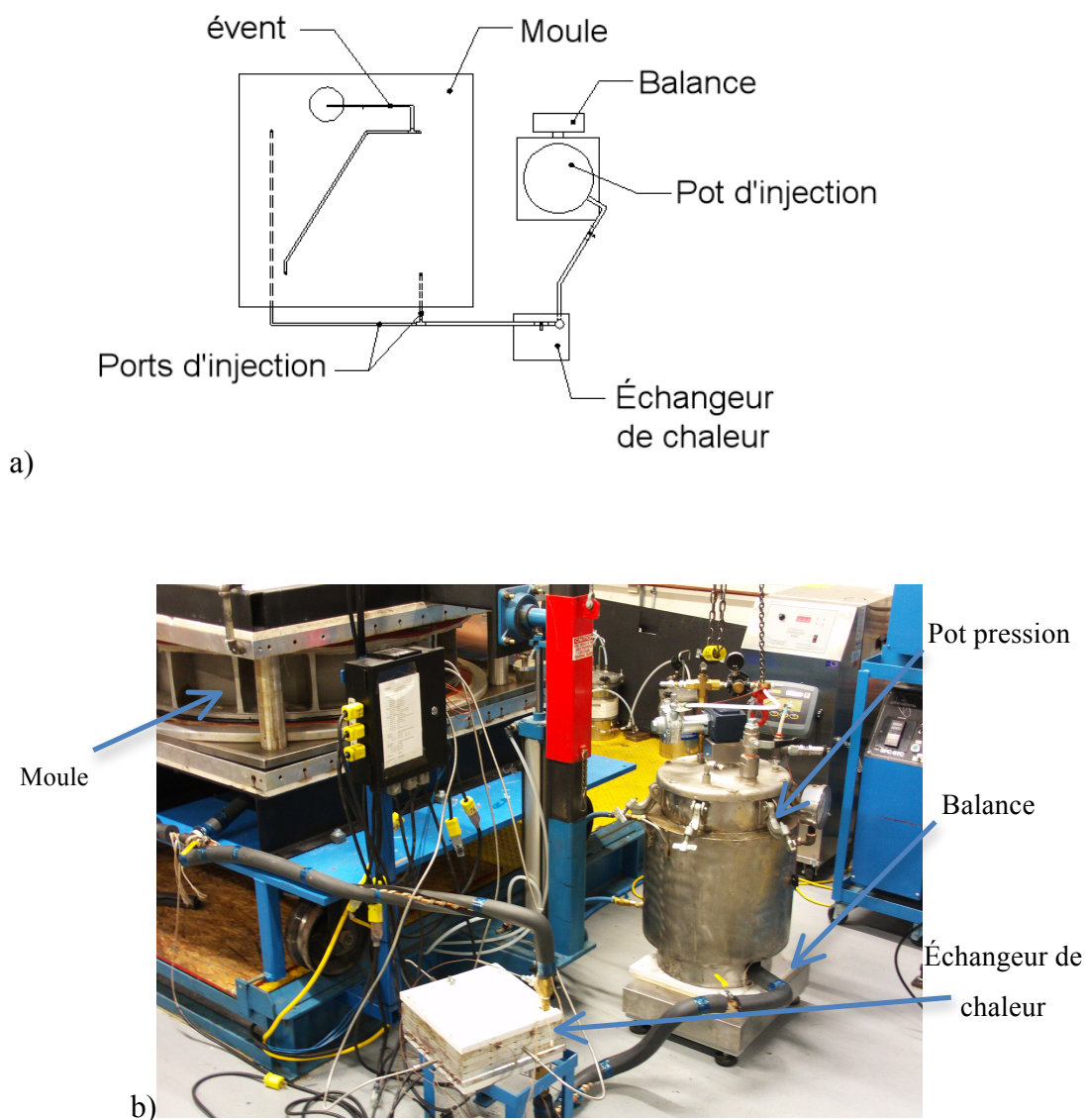


Figure 5-6 – Vue d'ensemble du système d'injection a) version CAD et b) version réelle.

Afin d'acheminer la résine du pot de pression vers le moule, des canalisations à haute températures sont utilisées. Deux ports d'injection sont situés en dessous du moule et deux ports d'évents sont situés sur le dessus du moule. Cette configuration permet donc l'injection contrôlée pour le procédé Polyflex.

5.5 Améliorations apportées au système de base

Suite aux premiers essais d'injection sur le projet, une série d'améliorations au système d'injections ont été abordées. Dans un premier temps, les performances de l'échangeur de chaleur ont été améliorées. De plus, le pot d'injection et les lignes d'injections ont eux aussi subi des changements mineurs.

5.5.1 Performances de l'échangeur de chaleur

Afin de réaliser une série d'essais de montée en température au sein de l'échangeur de chaleur, il a été important de trouver une résine compatible pour de tels tests. Il a finalement été décidé de modifier une résine bi composante peu coûteuse afin de répliquer les propriétés de la résine mono composante du projet. Cette modification permet entre autre de pouvoir réutiliser la même résine pour plusieurs tests, car aucun catalyseur n'est utilisé empêchant ainsi la polymérisation malgré la montée en température. Ce plan d'expérience visait donc à atteindre des caractéristiques similaires en viscosité et capacité thermique. .

La résine disponible au CCHP est la DER383. Celle-ci présente une capacité thermique semblable, mais une viscosité assez différente. Afin de ramener la viscosité près des valeurs de la résine utilisée dans le projet, une série d'essais au rhéomètre ont été performés afin d'identifier la concentration d'Aérosil 200 nécessaire. Le Tableau 5-5 montre les résultats de ces essais.

Tableau 5-5 Résultats des essais

PHR Aerosil 200	Viscosité obtenue (Pa.s)
0,549	0,373
4,417	78,7
1,083	0,61
2,972	5,97

3,109	7,14
3,527	12,68

La Figure 5-7 montre la courbe de la viscosité en fonction de la température de la résine trouvée, soit la DER383 avec une concentration de 3.52 PHR d'Aerosil 200. Sur ce graphique, on peut voir que les propriétés de la nouvelle résine sont similaires à celles de la résine officielle pour une plage de température allant de 60°C à 140°C.

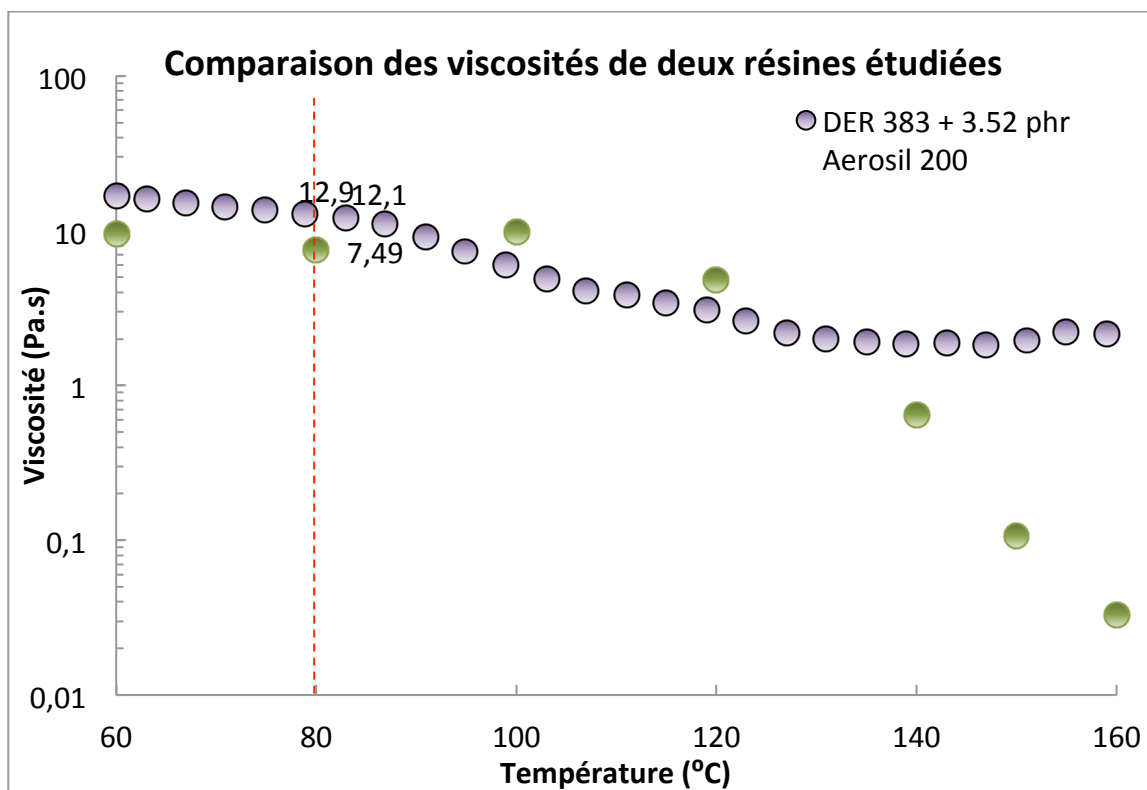


Figure 5-7 Viscosité des résines en fonction de la température.

5.6 Tests de performance de l'échangeur de chaleur

Lors des premiers essais de fabrication, il a été possible d'évaluer la performance de l'échangeur de chaleur dans sa configuration initiale. L'objectif de ces tests était d'élever la température de la résine DER 383 modifiée à une température fixe pour tout le temps d'injection. Pour les tests, la masse de résine a été fixée à la masse nécessaire pour les injections réelles.

5.6.1 Configuration initiale

Le premier test a été réalisé avec la configuration initiale de l'échangeur de chaleur. La pression dans le pot d'injection a été fixée à 5 Psi. De plus, toutes les plaques étaient préalablement chauffées à 200°C pour ce premier essai. La Figure 5-8 présente les résultats de ce premier essai en montrant l'évolution de la température à différents points de mesure. Les points intéressants pour ce test sont la température de la résine à la sortie de l'échangeur (courbe verte).

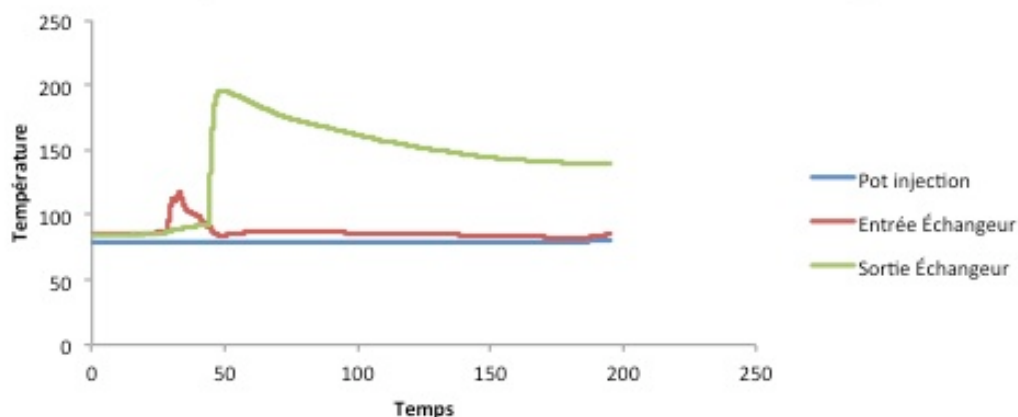


Figure 5-8 Température de la résine en fonction du temps.

Afin d'aider à comprendre la diminution de température importante dans le temps, les mesures de température au sein des plaques chauffantes ont aussi été analysées. La Figure 5-9 met en évidence que les zones 1 et 2, correspondant respectivement à l'entrée et au milieu de l'échangeur de chaleur, montrent une chute de température sur toute la phase d'injection. Ceci

oriente déjà les conclusions vers un manque de puissance disponible afin de soutenir ce transfert de chaleur.

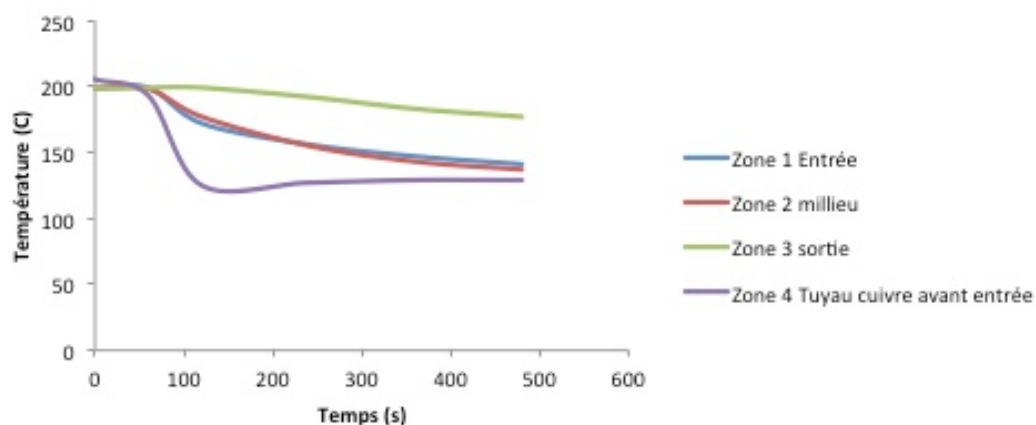


Figure 5-9 Température des éléments chauffant en fonction du temps.

Une autre hypothèse est émise en analysant ces données mettant en doute la capacité de contrôler la température centrale de l'échangeur de chaleur avec des bandes chauffantes externes. En effet, étant donné que les éléments chauffants sont situés en superficie de l'échangeur, la chaleur semble avoir une trop grande distance à parcourir avant d'arriver à la résine.

Dans les Figure 5-8 et Figure 5-9, il est aussi possible de remarquer que les bandes chauffantes placées avant l'entrée de l'échangeur de chaleur n'ont pas une puissance suffisante afin d'avoir un effet appréciable sur le gain de chaleur de la résine. En effet, il est facile de remarquer le retour de la température d'entrée de la résine à la température de la résine dans le pot d'injection quelques secondes après le début de l'injection. Ainsi, dorénavant les bandes chauffantes sur les tuyaux ne seront comptées que pour maintenir la tubulure à température voulue avant injection.

Finalement, les éléments chauffants eux mêmes sont endommagés après le cycle de transfert de chaleur à 200°C, car ce test se situait dans la plage d'utilisation maximale pendant une trop

grande période de temps. Ainsi, une nouvelle solution de chauffage s'impose pour l'échangeur de chaleur du projet.

5.6.2 Deuxième configuration

Dans la deuxième configuration de l'échangeur de chaleur, les éléments chauffants externes ont été remplacés par 18 cartouches chauffantes d'un diamètre de 0,25 pouce et d'une longueur de 8 pouces procurant chacune 650W. Cette solution a semblé assez avantageuse car, ayant une distance réduite avec la source de chaleur, la résine bénéficiera d'un meilleur contrôle de la température.

Afin de réaliser cette modification, des trous de passage pour les cartouches chauffantes ont été percés dans les plaques existantes. Les dessins de détails des trous sont dans l'annexe A. Huit trous ont été percés sur la plaque inférieure et trois trous ont été percés sur les autres. Cette configuration en pyramide permet une meilleure répartition de la puissance disponible vers les secteurs présentant un plus grand gradient de température. La Figure 5-10 montre l'échangeur de chaleur dans sa deuxième configuration.

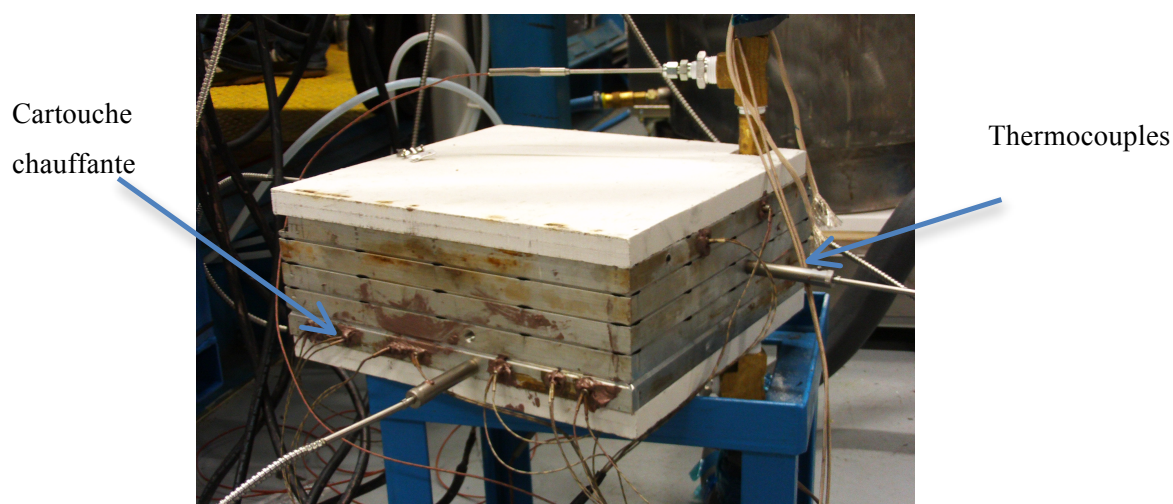


Figure 5-10 - Échangeur de chaleur avec les tubes chauffants.

Un autre problème rencontré lors de la mise en place de cette deuxième solution a été l'apport en électricité pour le contrôleur de température. Ce contrôleur a dû être modifié afin de fournir 9 lignes indépendantes de 110V à 15 A réparties sur 4 zones de contrôle. Il est opportun de remercier ici Antonin Leclair-Maréchal pour cette prouesse technique étant donné les éléments disponibles.

Suite à cette modification, un deuxième test d'injection a été fait pour vérifier l'efficacité du changement. Puisque le premier test a démontré que les bandes chauffantes sur la tubulure en cuivre ne sont pas efficaces, celles-ci ont été enlevées pour ce test.

De plus, un élément de sécurité arrivé dans le cadre de cette modification restreint la température de chauffage de l'échangeur de chaleur à 180°C. Ceci est prévu afin d'éviter de créer des points chauds pouvant déclencher la réaction en avance au sein de l'échangeur. La Figure 5-11 présente les résultats de l'injection dans la nouvelle configuration.

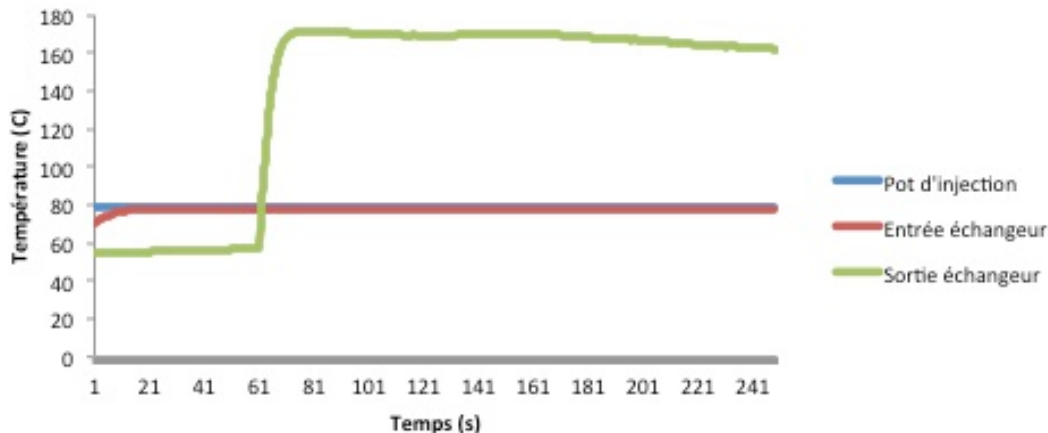


Figure 5-11 Température de la résine en fonction du temps.

Suite à cet essai, cette configuration de l'échangeur de chaleur est considérée acceptable, car la température de la résine à la sortie de l'échangeur de chaleur est restée suffisamment stable entre 170°C et 160°C durant toute l'injection.

CHAPITRE 6 SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES ET INDUSTRIALISATION DU PROCÉDÉ

Dans ce chapitre, il sera question des efforts qui ont été mis de l'avant afin d'amener le procédé Polyflex à un niveau plus robuste et industrialisé. Il sera notamment question du système d'acquisition de données et des ajouts de contrôle au procédé.

6.1 Équipement disponible

Pour la partie acquisition de données servant à garder une trace des paramètres de fabrication pour post-analyses, certains éléments étaient déjà disponibles au laboratoire industriel de St-Hubert. Une carte National Instruments installée dans un ordinateur ainsi que certaines cartes d'expansion ont été préalablement achetées. La Figure 6-1 montre le système de la gamme SCXI utilisé.



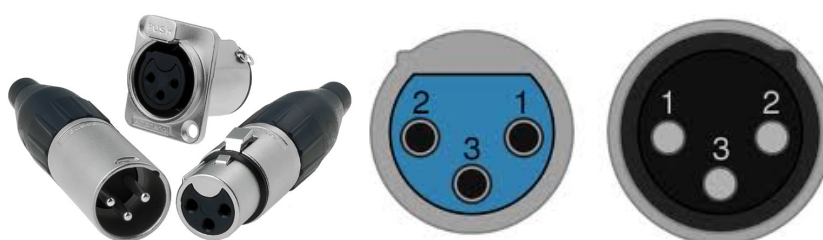
Figure 6-1 Carte National Instruments et expansions.

6.2 Assemblage du système

Par soucis d'uniformité au sein du laboratoire, il a été décidé de définir un standard interne pour tous les capteurs fréquemment utilisés comme les capteurs 0-10V avec alimentation 24V souvent utilisés dans les capteurs de pression et les thermocouples.

6.2.1 Capteur 0-10V

Plusieurs capteurs utilisent une sortie analogique 0-10V pour fournir les données au système d'acquisition. Dans ces capteurs, il est souvent nécessaire d'utiliser une source d'alimentation 24V. Ainsi, afin d'alimenter ces capteurs, il faut un connecteur pouvant faire voyager 3 signaux indépendants, soit en terme de connexion, le fil commun, le fil d'alimentation 24V et le fil de signal 0-10V. Le standard de connecteur qui a été adopté pour ces connexions est le XLR. La Figure 6-2 montre les connecteurs XLR choisis.



1- Commun, 2- 24V, 3- Signal

Figure 6-2 Connecteur XLR 3 voies.

6.2.2 Thermocouples

Afin d'acquiesionner les données de thermocouples présents dans plusieurs montages, une interface National Instruments est utilisée, soit le TC-2095. Cette carte d'expansion permet le branchement de 32 thermocouples en simultanément et ce de tous les types. Il suffit de bien configurer le port d'entrée dans le logiciel d'acquisition par après pour changer de type de thermocouple. Pour le LFIC, les thermocouples de type J ont été choisis comme standard. La Figure 6-3 montre la carte d'expansion permettant d'effectuer le branchement.



Figure 6-3 Carte d'expansion NI pour thermocouples.

6.2.3 Assemblage multifonction

Toutes les composantes du système d'acquisition sont assemblées dans un boîtier mobile offrant toute la flexibilité voulue. Cet assemblage en fait une plate-forme multifonction permettant le branchement de 32 thermocouples et 16 capteurs 0-10 volts. De plus, étant dans un cabinet mobile, il est réellement simple de passer d'un montage à un autre en ayant seulement à reconnecter les nouveaux capteurs standardisés sur le montage suivant. La Figure 6-4 montre l'assemblage du système d'acquisition dans un cabinet mobile.

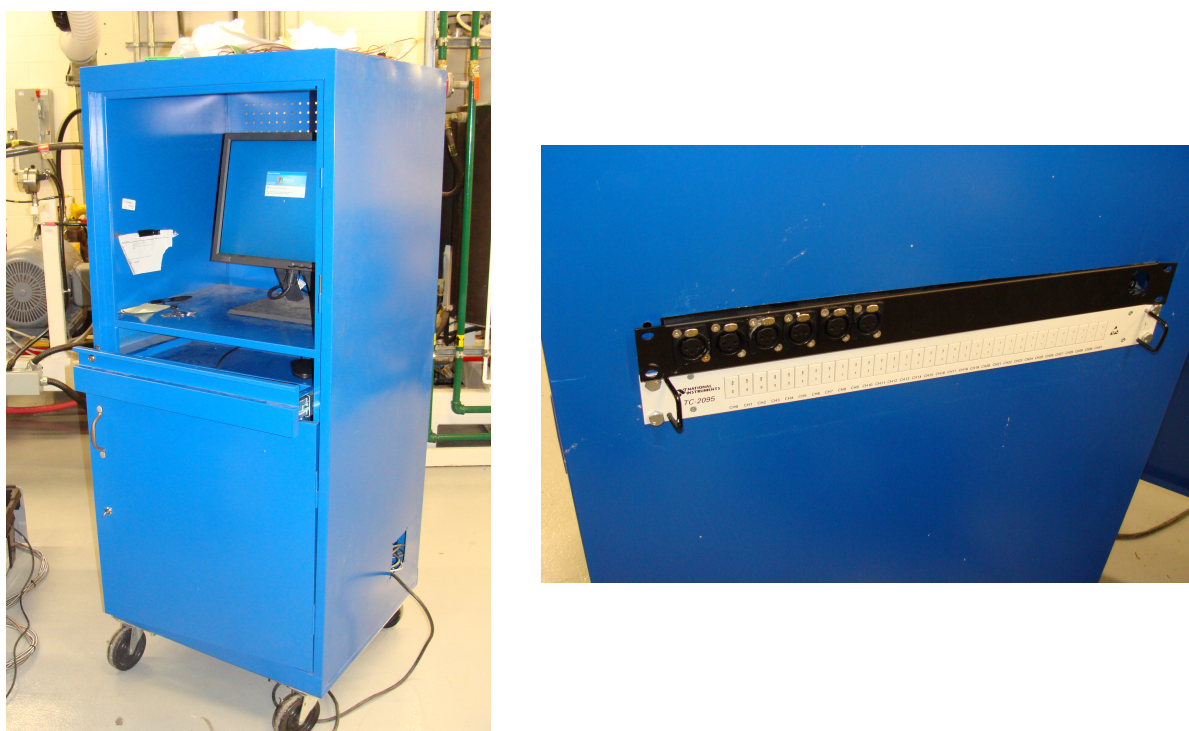


Figure 6-4 Assemblage des composantes dans un cabinet mobile.

6.3 Interface versatile

Afin de rendre l'utilisation du système d'acquisition le plus simple et versatile possible, une interface de base a été créée dans le logiciel Labview de National Instruments. Les interfaces ainsi créées dans labview se nomment des VI pour instrument virtuel. Ce VI peut donc ensuite être facilement intégré à n'importe quel autre projet avec une personnalisation de l'interface usagé simple tout en utilisant toute la robustesse du VI.

6.3.1 Sous-VI acquisition

Un fichier modèle a été mis en place afin de permettre à chacun de personnaliser le VI pour le montage voulu. Le modèle de base présente la fenêtre de diagramme montrée à la Figure 6-5.

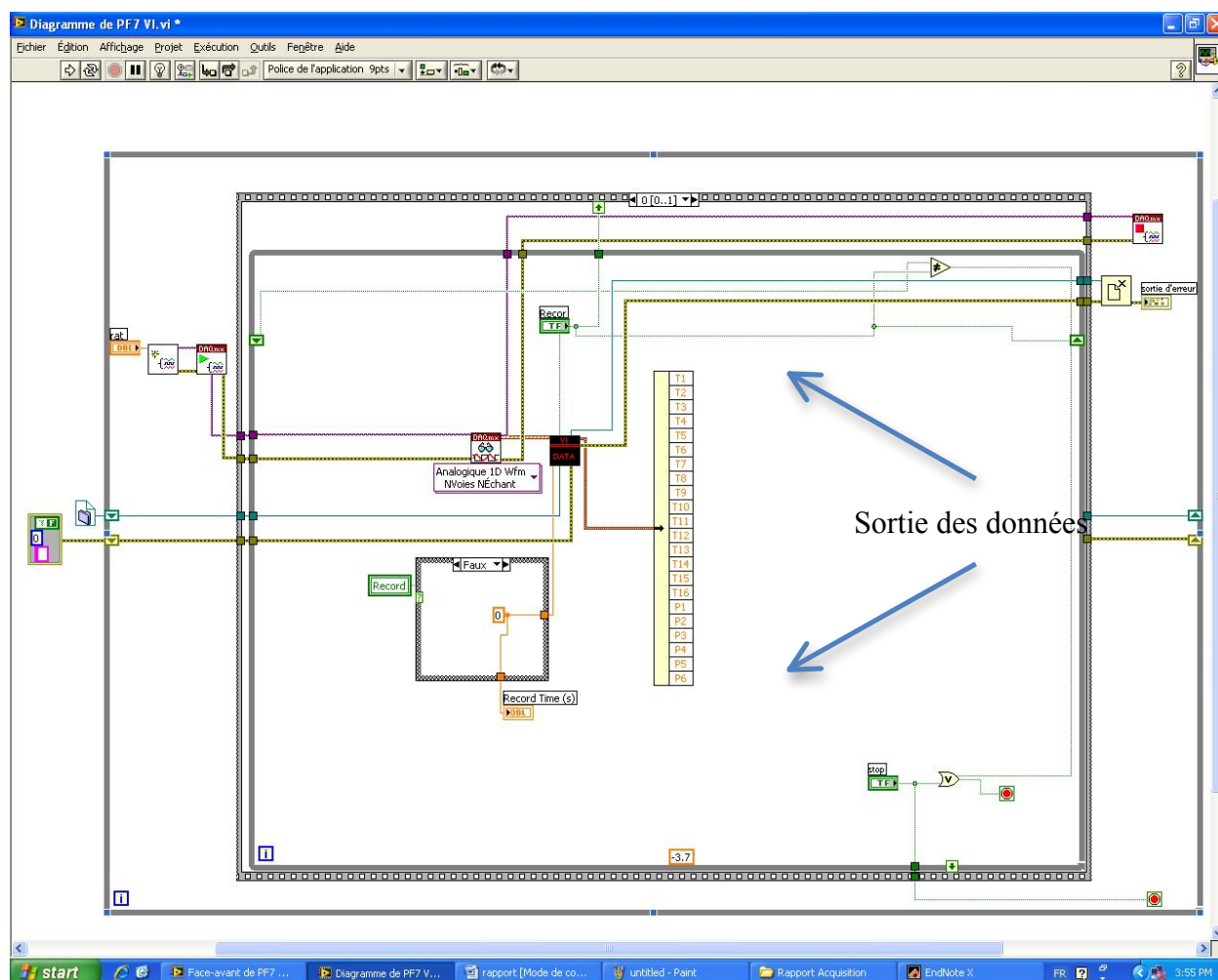


Figure 6-5 Fenêtre de diagramme, modèle de base.

6.3.2 Interface utilisateur simple

Le VI présenté ne comporte pas d'objet sur l'interface utilisateur. Il est à la discrétion de l'utilisateur d'ajouter des éléments d'affichage des données entrantes, et ce à la manière dont il le désire. Afin d'ajouter un nouvel élément à l'interface, il suffit de réaliser un clic droit de souris et un menu déroulant apparaîtra pour effectuer le choix d'élément d'affichage.

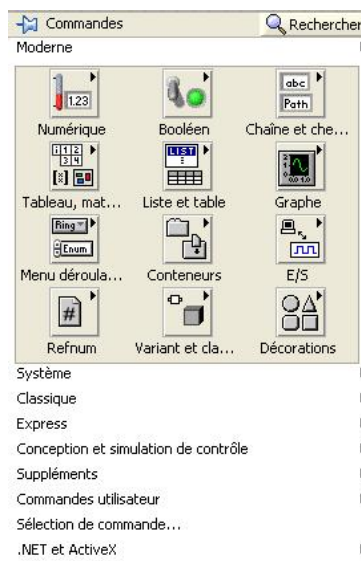


Figure 6-6 Menu déroulant pour ajout d'élément pour l'interface utilisateur.

La section « Numérique » du menu déroulant permet d'ajouter des thermomètres et des jauges de pression. Il est possible d'y intégrer des indicateurs numériques, de la même manière. La Figure 6-7 montre un exemple d'interface utilisateur simple utilisant le VI acquisition.

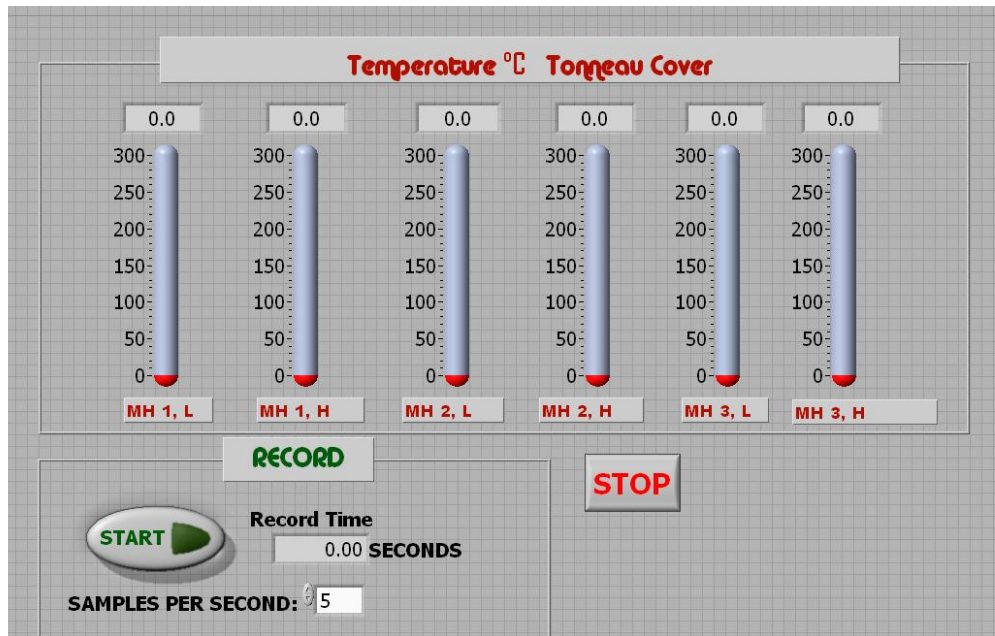


Figure 6-7 Exemple d'interface utilisateur simple.

6.3.3 Interface utilisateur avancée

Dans le cadre du projet de design pour une pièce axisymétrique à géométrie complexe, beaucoup de capteurs ont été utilisés. Avec plusieurs capteurs, l'interface devient rapidement chargée et il devient difficile de suivre l'évolution de tous les paramètres pendant une fabrication.

Afin de régler ce petit désagrément, une autre méthode peut être utilisée, soit la création d'une image personnalisée représentant le montage utilisé en totalité avec des espaces prévus pour l'indication des valeurs mesurées. Cette image peut ensuite être importée dans l'interface utilisateur et des valeurs numériques simples peuvent y être superposées. La Figure 6-8 montre le résultat qui peut être obtenu par ce processus.

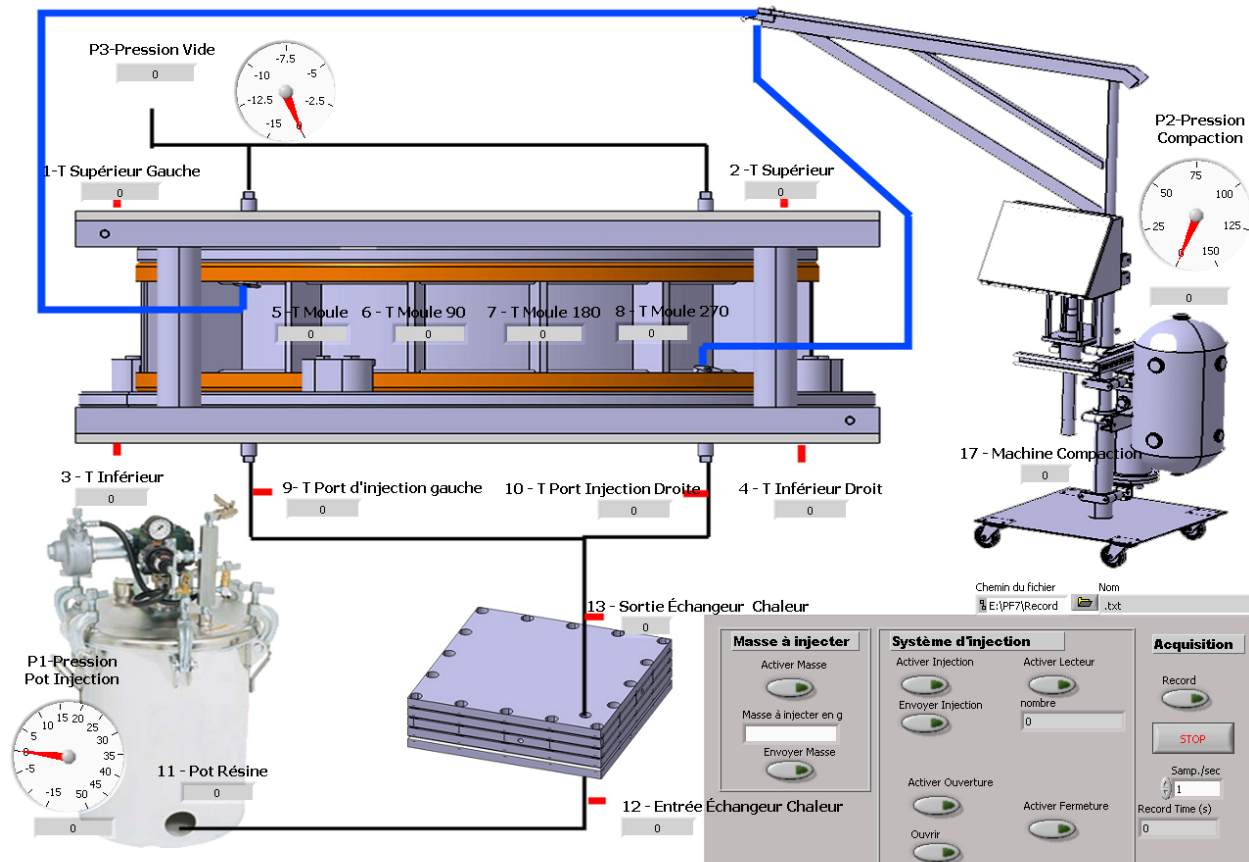


Figure 6-8 Interface utilisateur pour PF7.

Ainsi, avec ce système versatile, il est possible de réaliser une interface de suivi très facile à suivre au cours d'une fabrication en ayant accès de façon simple et intuitive à toutes les données nécessaires.

6.4 Contrôle d'injection

Dans le cadre du projet PF7, la phase d'injection est une étape très importante. En effet, la quantité de résine injectée doit être bien contrôlée pour le procédé Polyflex.

6.4.1 Intégration au sein de l'interface utilisateur

Afin d'en améliorer le contrôle, un module de gestion de l'injection a été ajouté à l'interface utilisateur. Ce module permet à l'utilisateur d'envoyer des consignes à un contrôleur externe afin d'en contrôler l'injection. Les consignes possibles sont la masse à injecter, ouverture de la valve, fermeture de la valve et lancement d'une injection automatique. La Figure 6-9 montre la section de l'interface utilisateur contrôlant l'injection.

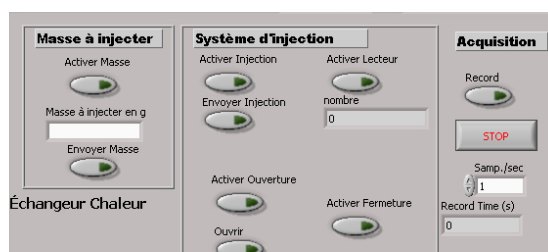


Figure 6-9 Contrôle d'injection.

6.4.2 Contrôleur externe et fonctions

Un contrôleur externe a été utilisé afin de gérer les communications entrantes et sortantes avec l'ordinateur ainsi qu'avec la balance utilisée pour le contrôle de la masse injectée.

6.4.2.1 Communication avec la balance

La balance décrite au chapitre précédant a été choisie avec l'option de communication série. Cette option rend possible la communication entre celle-ci et des périphériques externes. Ainsi, en démarrant la balance en mode communication, celle-ci envoie en continu la valeur lue sur son plateau de mesure en caractères ASCII qui doivent ensuite être interprétés par le contrôleur externe.

6.4.2.2 Moyen de contrôle physique

Afin d'ouvrir ou fermer le port de sortie du pot d'injection, une valve de pincement pneumatique a été fabriquée par le technicien du CCHP. Cette valve peut donc permettre le passage de la résine à l'intérieur d'un tuyau d'injection ou l'arrêter en pinçant le tuyau. La résine à l'intérieur

d'un tuyau d'injection ou l'arrêter en pinçant le tuyau. La Figure 6-10 montre cette valve de pincement pneumatique.



Figure 6-11 Valve de pincement de tuyaux pneumatique.

Afin d'actionner la valve de pincement, une valve solénoïde est intégrée au système. Un signal binaire de 24V est requis afin de l'actionner. Celui-ci peut être fourni par un contrôleur externe régissant ainsi le début et la fin de l'injection.



Figure 6-12 Valve solénoïdes 24V utilisées.

6.4.2.3 Contrôleur d'injection

Afin de contrôler cette injection, un contrôleur avec 2 ports de communication série et 2 sorties de contrôle 24V est requis. Le concept de la boucle de contrôle utilisée est présenté à la Figure 6-13.

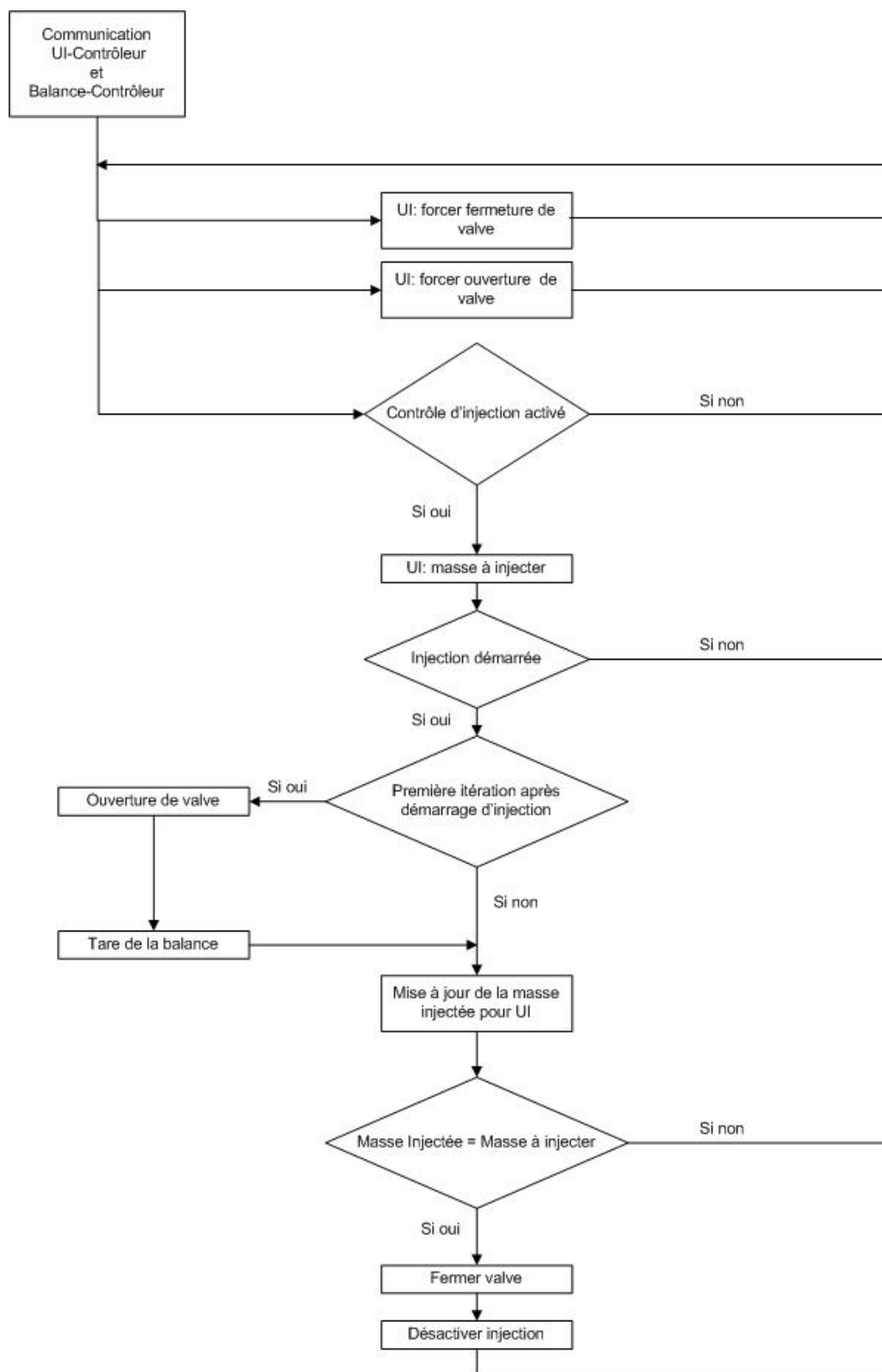


Figure 6-13 Boucle de contrôle.

Avec cette boucle de contrôle, il devient possible d'assurer une injection de résine avec une bonne précision sur la masse injectée.

CHAPITRE 7 FABRICATION PF7

Plusieurs développements ont été effectués dans le cadre du projet PF7 afin de réaliser des fabrications de haute qualité avec le procédé Polyflex. De plus, le souci d'amener le projet à un niveau industriel a grandement amélioré les façons de travailler au laboratoire.

7.1 Procédures de fabrication

Dans le cadre des essais préliminaires, il a vite été établi qu'une des plus grandes causes d'erreur était la mauvaise organisation lors des injections. Ainsi, plusieurs procédures ont été mises en place afin de minimiser les erreurs humaines.

7.1.1 Technique de préformage

Les essais d'injection nécessitent plusieurs préformes. Dans ce but, des préformes de débogage en fibre de verre moins coûteuses que les fibres réellement utilisées dans le projet ont été fabriquées à l'aide d'une procédure établie dans le cadre du projet. Cette procédure est décrite en ANNEXE 3. Il est très important de ne pas négliger les traitements de surface sur les moules tels que spécifiés dans la même annexe.

À la suite de la fabrication de préformes peu coûteuses montrées à la Figure 7-1, les préformes d'essais peuvent finalement passer à la préparation de l'injection.

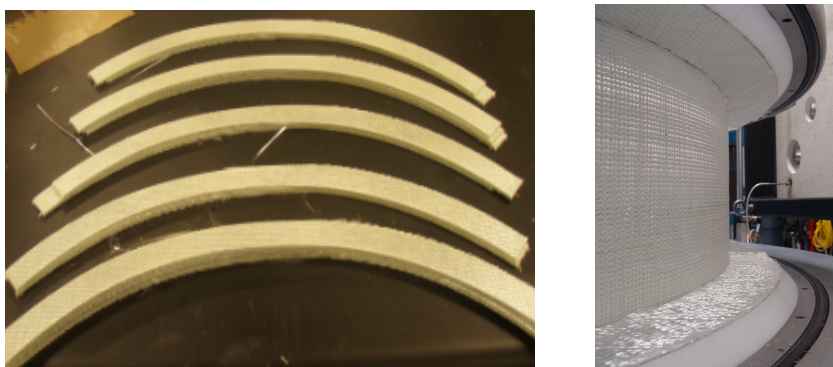


Figure 7-1 Préforme de fibre de verre pour essais d'injection.

7.1.2 Montage du moule

Afin d'assurer une plus grande efficacité lors du montage du moule, une procédure complète a été rédigée. De cette manière, les opérateurs effectuent les tâches dans un ordre optimisé et assurant la qualité du montage. La procédure complète est disponible à l'ANNEXE 4. La

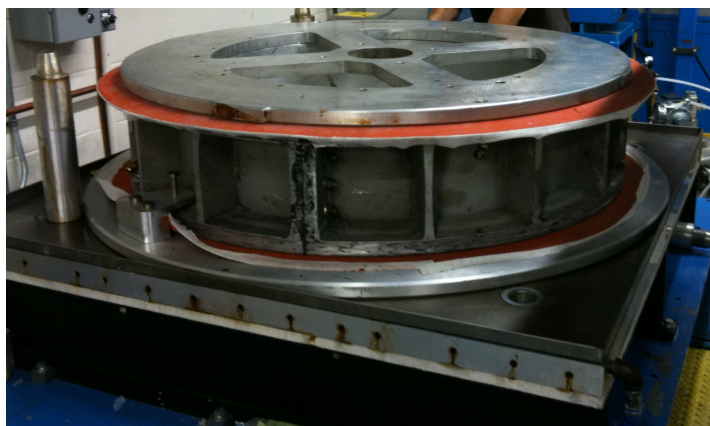


Figure 7-2 montre le moule après l'exécution de la procédure complète.

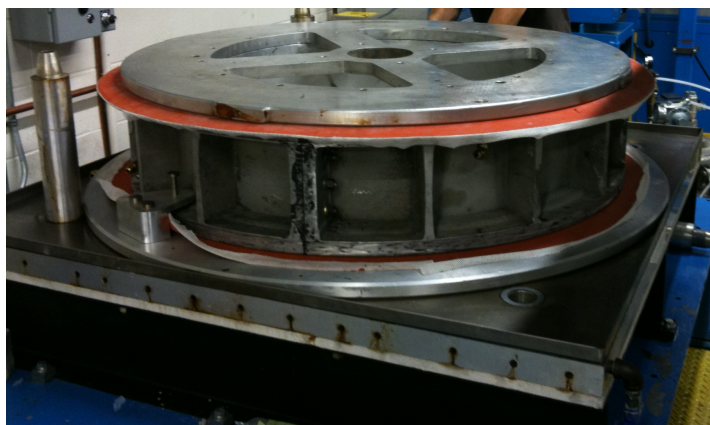


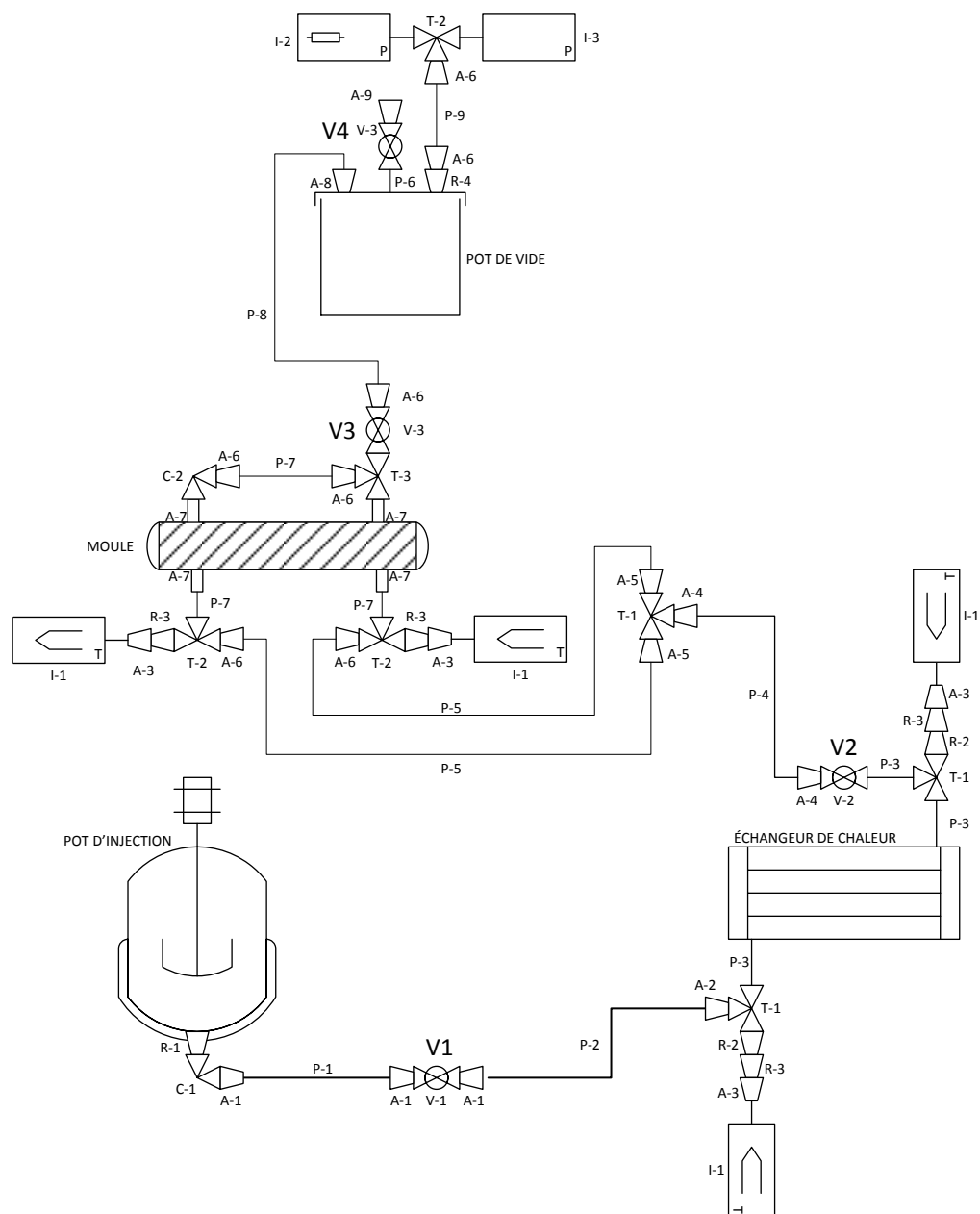
Figure 7-2 Moule monté sur l'outil d'injection.

7.1.3 Préparation à l'injection

Injecter une pièce industrielle demande une bonne préparation. PF7 requiert une grande quantité de résine et autant de fibre haute performance. Ces éléments représentent donc un gros montant

d'argent pour chaque essai. Ainsi, chaque essai doit être préparé avec soins afin de minimiser les risques de perte de matière et de temps. Dans ce but, une procédure de préparation à l'injection complète a aussi été préparée et elle est disponible en ANNEXE 5.

Une partie importante de cette préparation pour injection Polyflex consiste à bien calculer la quantité de résine à injecter dans la pièce. Pour le calcul, beaucoup d'éléments sont pris en compte tels tous les tuyaux utilisés, tous les raccords et toutes les valves. En effet, toute composante sans résine au moment du début de l'injection et qui sera pleine de résine à la fin de l'injection doit être prise en compte. Ceci demande donc une bonne minutie lors de l'installation des composantes. Dans ce but, la tuyauterie pour les injections PF7 a été standardisée dans la mesure du possible. La Figure 7-3 montre le schéma de circuit d'injection utilisé pour la préparation à l'injection.



LISTE DES PIÈCES			
NO.	DESCRIPTION	TAILLE	QTÉ.
A-1	ADAPTATEUR COMPRESSION	3/4M-3/4T	3
A-2	ADAPTATEUR COMPRESSION	1/2M-3/4T	1
A-3	ADAPTATEUR COMPRESSION POUR TC	1/8M-1/8T	4
A-4	ADAPTATEUR COMPRESSION	1/2M-1/2T	2
A-5	ADAPTATEUR COMPRESSION	1/2M-3/8T	2
A-6	ADAPTATEUR COMPRESSION	1/4M-3/8T	7
A-7	PORT D'INJECTION/ÉVENT	1/4M	4
	JOINT TORIQUE PORT INJECTION	-114	4
A-8	ADAPTATEUR POUSSER POUR CONNECTER	1/4M-3/8T	1
A-9	ADAPTATEUR PRISE VIDE	1/4M-3/8V	1
C-1	COUDE	3/4M-3/4F	1
C-2	COUDE	1/4M-1/4F	1
I-1	THERMOCOUPLE TYPE J	1/8	4
I-2	CAPTEUR DE PRESSION	1/4M	1
I-3	GAUCHE DE VIDE	1/4M	1
P-1	TUBE TEFLON 3/4	700MM	1
P-2	TUBE CUIVRE 3/4	400MM	1
P-3	TUYAU RIGIDE 1/2x3"	1/2M-1/2M	3
P-4	TUBE CUIVRE 1/2	1600MM	1
P-5	TUBE CUIVRE 3/8	1000MM	2
P-6	UNION	1/4M-1/4M	1
P-7	TUBE TEFLON 3/8	1100MM	1
P-8	TUBE TEFLON 3/8	1000MM	1
P-9	TUBE CUIVRE 3/8	1100MM	1
R-1	RÉDUCTEUR	1M-3/4F	1
R-2	RÉDUCTEUR	1/2M-1/4F	2
R-3	RÉDUCTEUR	1/4M-1/8F	4
R-4	RÉDUCTEUR	3/8M-1/4F	1
T-1	T	1/2F-1/2F-1/2F	2
T-2	T	1/4F-1/4F-1/4F	2
T-3	T	1/4M-1/4F-1/4M	1
V-1	VANNE À BILLE	3/4F-3/4F	1
V-2	VANNE À BILLE	1/2F-1/2F	1
V-3	VANNE À BILLE	1/4F-1/4F	2
*DIMENSIONS EN POUCES À MOINS D'INDICATION CONTRAIRE			

Figure 7-3 Circuit d'injection PF7.

Afin de minimiser les sources d'erreurs, un fichier de calcul afin de calculer la masse de résine à injecter en fonction de différents paramètres d'injection a été créé. Un modèle de ce fichier de calcul est présenté dans l'ANNEXE 6.

7.1.4 Injection

La phase d'injection est le moment le plus important dans l'injection Polyflex. Il est donc important que tout soit bien préparé et que tous les opérateurs soient prêts pour leur tâche. Pour le bon fonctionnement de l'injection, 3 opérateurs sont présentement nécessaires, car plusieurs systèmes en développement ne sont pas totalement incorporés au moment du rapport.

Ainsi, un opérateur doit être au poste de contrôle du système d'acquisition. Cet opérateur est chef d'équipe pendant la phase d'injection et c'est lui qui décide du début de l'injection. C'est aussi lui qui doit vérifier tous les paramètres d'injection pendant toute la phase d'injection. De plus,

après le transfert de résine dans le moule, c'est cet opérateur qui doit gérer la machine de compaction.

Un deuxième opérateur doit prendre en charge la régulation du débit pendant l'injection. Pour cela, l'opérateur dispose de différents outils mis en place pour le projet. En effet, le pot de pression est équipé d'un régulateur de pression qui peut être commandé par l'opérateur en poste. Ainsi, celui-ci peut augmenter et diminuer la pression dans le pot afin de suivre la charte d'injection sur les requis en terme de délais d'injection. Ainsi, à chaque 30 secondes, l'opérateur vérifie si la masse injectée est en norme avec ce qui a été décidé pour l'injection en cours. Il peut corriger en augmentant le débit d'injection par l'augmentation de la pression dans le pot ou le contraire. La Figure 7-4 montre l'évolution de la pression d'injection régulée afin d'arriver dans le temps d'injection prescrit.

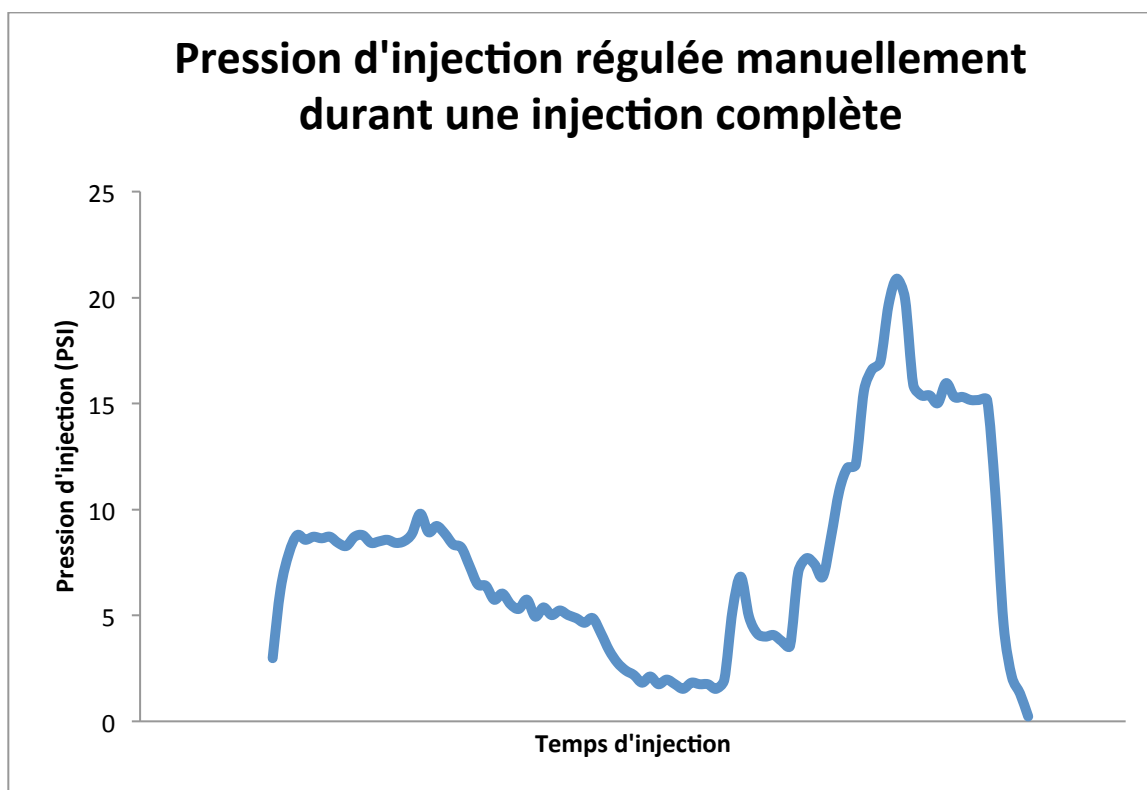


Figure 7-4 Pression d'injection régulée manuellement durant une injection complète.

Le troisième opérateur a pour mission d'assurer la fermeture manuelle du port de sortie au moment où la résine sort du moule. Cette opération se fait en fermant la valve à la sortie du moule et ferme ainsi le circuit d'injection. Suite à cette opération, la phase de compaction dure pour toute la période de polymérisation. La Figure 7-5 montre les courbes de pression pour la phase de dégazage, la phase d'injection et la phase de compaction d'une injection typique.

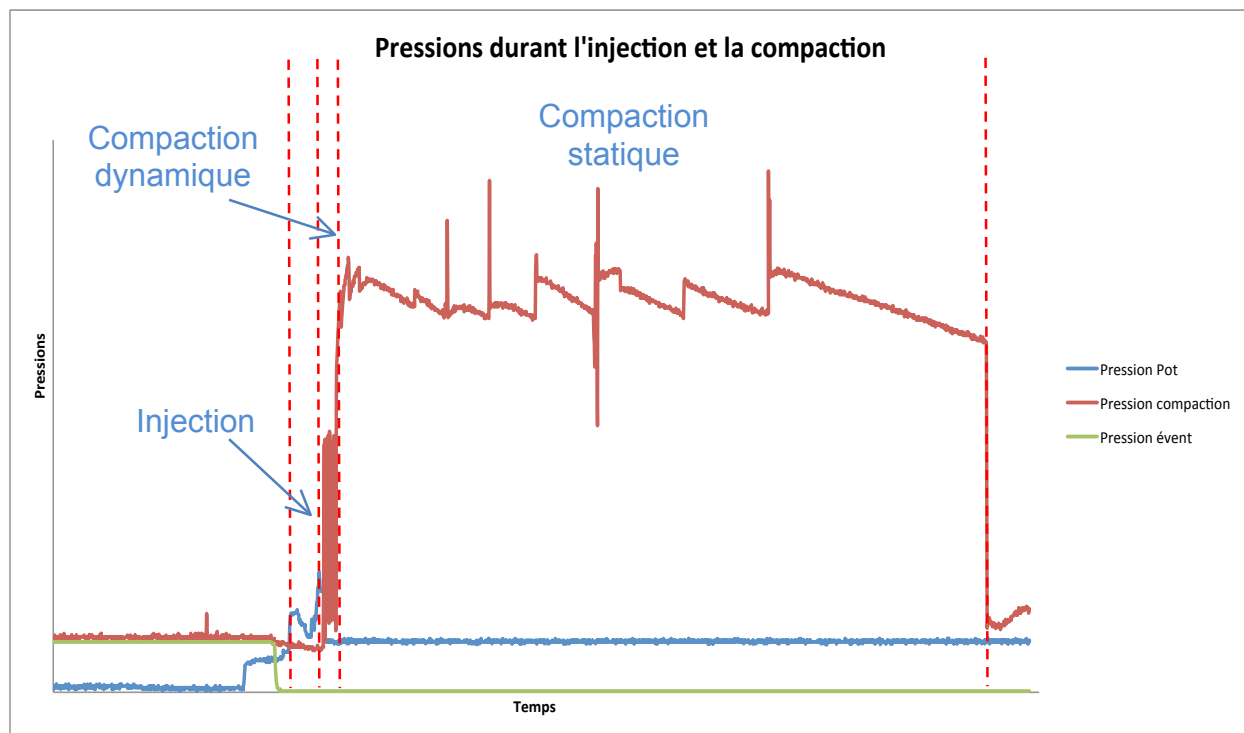


Figure 7-5 Courbes de pression pendant l'injection et la compaction.

7.1.5 Démoulage

La dernière étape du processus de fabrication est le démoulage. Il est bien important de suivre ici encore une fois un processus bien établi pour le démoulage. Il est très important de porter une attention particulière à ne pas endommager la pièce pendant le démoulage. En effet, de la négligence pourrait produire des marques dues aux outils utilisés et cela n'est pas souhaitable. La pièce ainsi démoulée est présentée à la Figure 7-6.



Figure 7-6 Pièce PF7 démoulée.

7.2 Analyses des pièces Polyflex

La pièce moulée par le procédé Polyflex présente une géométrie respectant bien les critères de conception. Tous les rayons, qui sont très petits pour une pièce composite moulée, sont parfaitement remplis. La qualité de remplissage ne comportant aucune bulle ou porosité apparente, malgré la grande quantité de résine présente, est le point saillant de cette fabrication. Aucune zone sèche n'est remarquée sur la pièce. De plus, le côté membrane de la pièce semble présenter un bon respect du dimensionnement initial avec de faibles variations. Des mesures sont prévues afin de mieux quantifier cet aspect.

Plusieurs types d'analyses pourront être effectuées sur les pièces axisymétriques fabriquées par le procédé Polyflex. Celles-ci permettront de vérifier certains critères de contrôle de qualité. En effet, les pièces PF7 pourront être analysées afin de vérifier entre autre le taux de fibres réel après fabrication et la qualité de la polymérisation de la résine. Certains autres paramètres comme une analyse topographique de la pièce serait intéressant à effectuer afin de vérifier la qualité de la fabrication de pièce complexe par le procédé Polyflex. Toutefois, l'objectif principal de ces travaux de recherche est considéré comme atteint par la fabrication avec le procédé Polyflex d'une première pièce avec outillage plus industriel.

CONCLUSION

Ce projet visait l'industrialisation de procédé Polyflex par la fabrication d'une pièce composite axisymétrique 3D à haut taux de fibres et à haute température. À partir des informations disponibles sur le procédé Polyflex, un moule existant a été modifié afin de permettre la fabrication par le procédé Polyflex. De plus, l'aspect industriel étant un élément important du projet, un cycle d'amélioration de tous les outils nécessaires à la fabrication industrielle a été effectué. Une nouvelle machine de compaction a donc été assemblée procurant une plus grande simplicité d'utilisation aux opérateurs tout en disposant de toutes les fonctionnalités requises pour l'injection par le procédé Polyflex. Dans un second effort d'optimisation des outils Polyflex, un système d'injection de résine mono composante à haute température a été conçu permettant notamment un contrôle précis de la masse de résine injectée tout en permettant les manipulations de base de la résine tels le chauffage et dégazage. Afin de bien gérer toutes les informations provenant des différentes étapes de fabrication de cette pièce aéronautique avec le procédé Polyflex, un système d'acquisition de données plus industriel a été mis en place au laboratoire de fabrication de St-Hubert. Finalement, profitant de toutes les améliorations apportées au système Polyflex plus industriel, les premières pièces prototypes axisymétriques ont pu être produites. Ces fabrications ont pu valider toute la conception de l'outillage Polyflex et des différentes composantes qui s'y rattache.

Grâce aux premières démonstrations de faisabilité de l'utilisation de Polyflex dans le cadre de la fabrication de pièces axisymétriques à géométrie complexe, cette nouvelle technologie offre de nouvelles avenues dans la fabrication des matériaux composites pour des pièces structurelles importantes. Bien que du raffinement sur le procédé puisse encore arriver afin de l'amener encore plus loin, il est déjà possible d'envisager le passage de cette technologie vers des pièces à échelle et géométrie réelle. Cette nouvelle étape à franchir viendrait confirmer la possibilité d'utiliser ce procédé novateur pour la fabrication de vraies pièces industrielles de très haute qualité pour l'industrie aéronautique.

Ainsi, il sera intéressant de voir tous les acquis du projet être mis en pratique dans d'autres projets d'envergure comme celui-ci avec le procédé d'injection flexible Polyflex.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. Ruiz et F. Trochu, "Mold assembly for composite component manufacture, has deformable material provided in gap between strengthener and compression chambers of base/cover molds, so as to pressurize matrix towards strengthener upon compression by fluid WO2005000566-A1; CA2434447-A1; EP1644180-A1; US2006233907-A1; CN1842411-A; IN200502681-P2; CN100566982-C; US7866969-B2; US2011068514-A1. Disponible: <Go to ISI>://DIIDW:2005075480.

- [2] École Polytechnique de Montréal. Département de génie mécanique et L. R. Briones, *Injection flexible dans moule isotherme : conception et analyse d'un nouveau procédé de fabrication de composites*, 2005.

- [3] École Polytechnique de Montréal. Département de génie mécanique et E. Allard, *Analyse expérimentale et optimisation d'un procédé d'injection flexible pour la fabrication rapide des composites*, 2006.

- [4] École Polytechnique de Montréal. Département de génie mécanique et T. Daqoune, *Analyse expérimentale sur des renforts tissés d'un procédé d'injection flexible pour la fabrication rapide des composites*, 2007.

- [5] P. Causse, E. Ruiz, et F. Trochu, "Experimental Study of Flexible Injection to Manufacture Parts of Strong Curvature," *Polymer Composites*, vol. 32, no. 6, pp. 882-895, 2011.

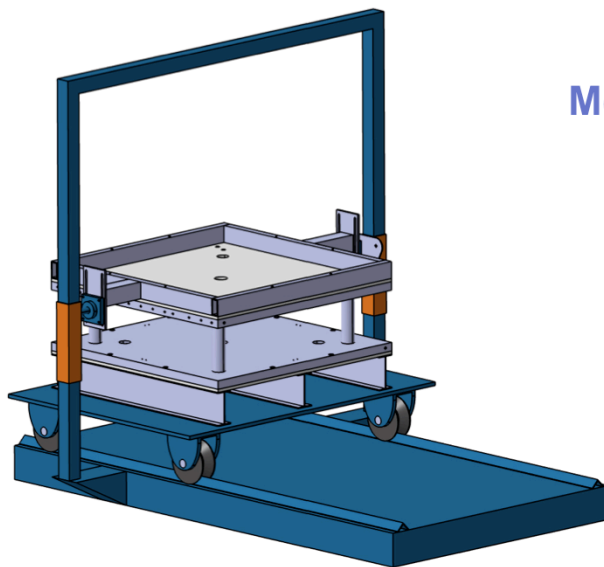
- [6] P. K. Mallick, "Fiber-reinforced composites materials, manufacturing, and design," pp., 2008.

- [7] T. G. P. Gutowski, *Advanced composites manufacturing*, New York ; Toronto: John Wiley & Sons, 1997.

- [8] École Polytechnique de Montréal. Département de génie mécanique et R. Y. Dube, *Développement d'un système d'injection pour la fabrication des composites*: École Polytechnique, Montréal (Canada), 2010.

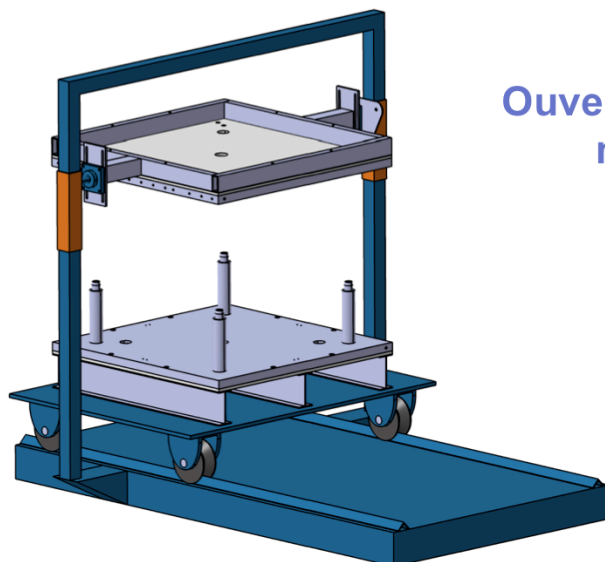
ANNEXE 1 Simulation des étapes de manutention

Procédure de fabrication



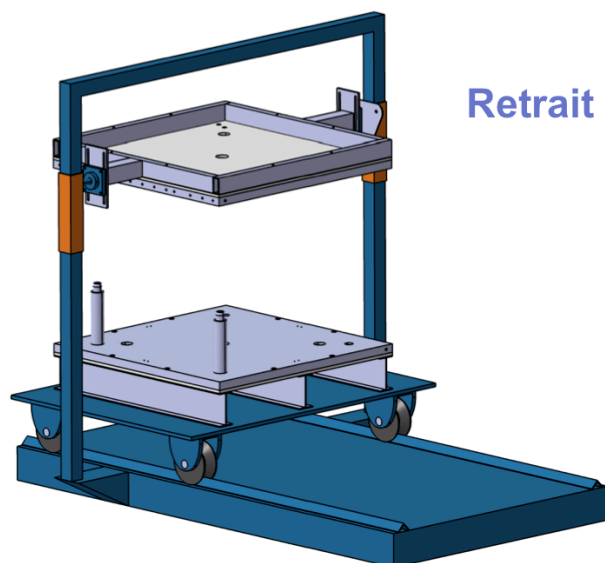
Moule au repos

Procédure de fabrication



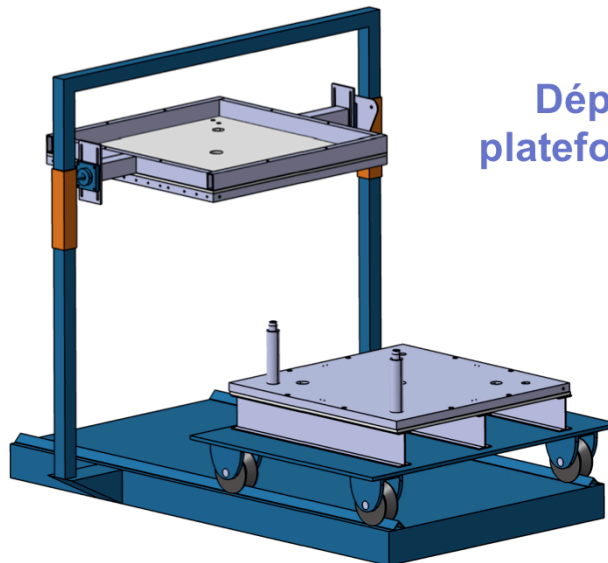
Ouverture de l'outil de
manutention

Procédure de fabrication



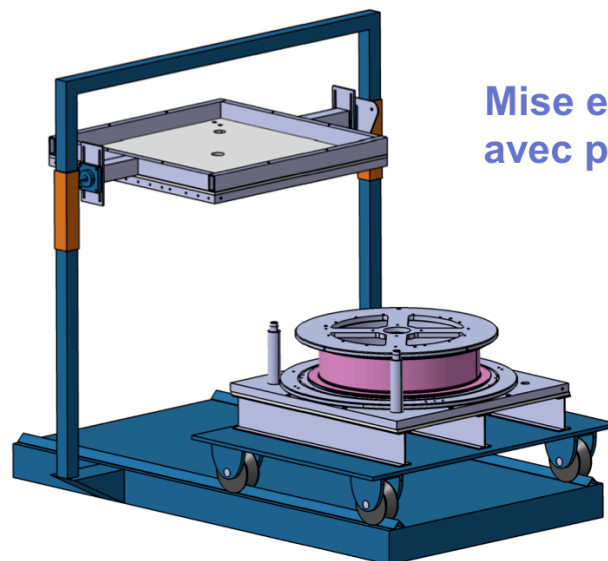
Retrait de 2 guides d'arrêt

Procédure de fabrication



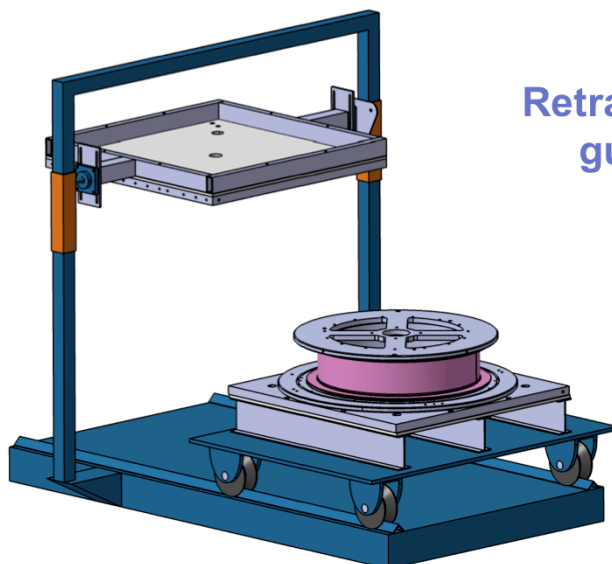
Déplacement de la
plateforme vers l'aire de
travail

Procédure de fabrication



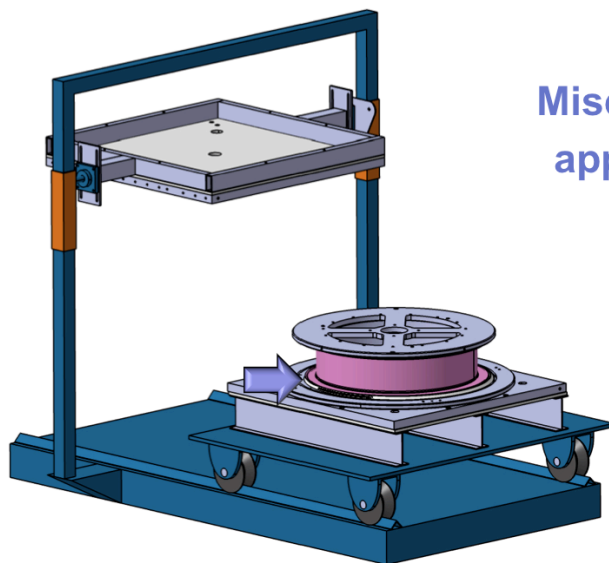
Mise en place du moule
avec préforme enroulée

Procédure de fabrication



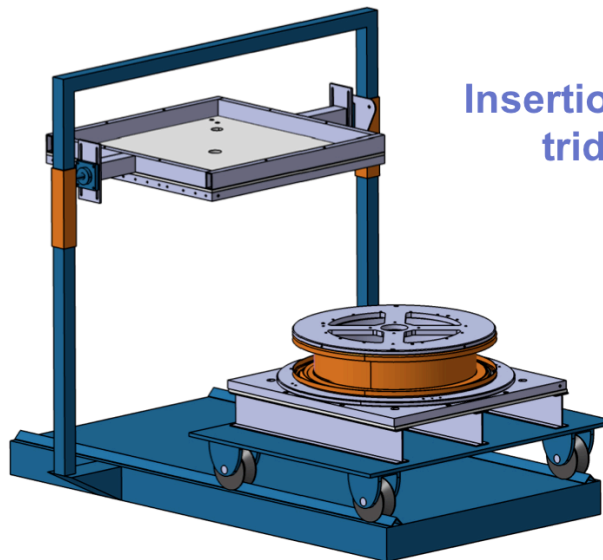
**Retrait des derniers
guides d'arrêt**

Procédure de fabrication



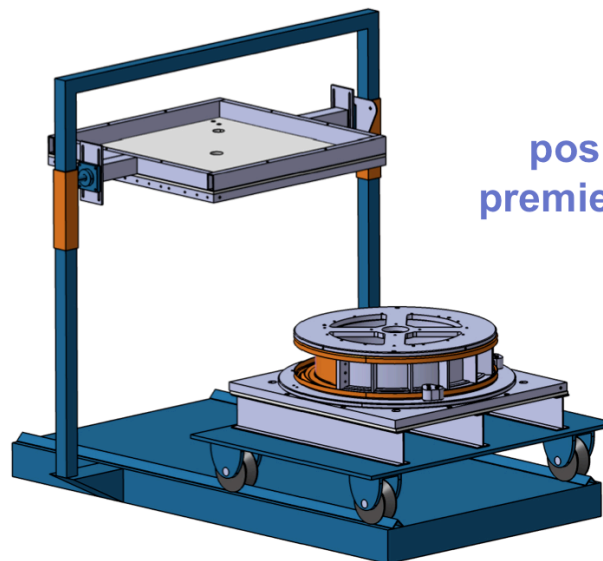
**Mise en place des
appuis de téflon**

Procédure de fabrication



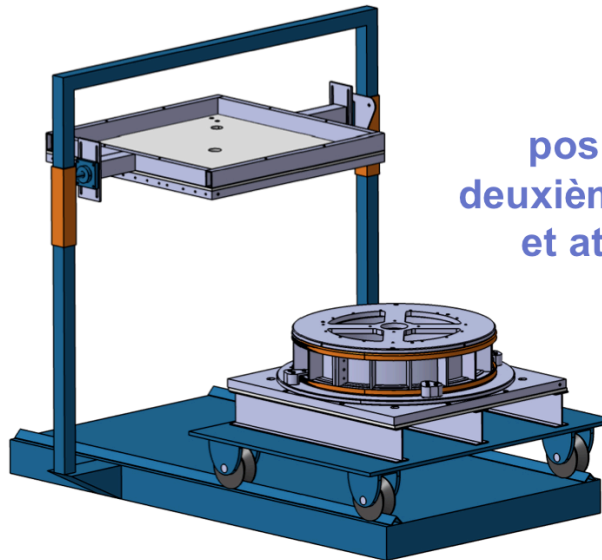
**Insertion de la membrane
tridimensionnelle**

Procédure de fabrication



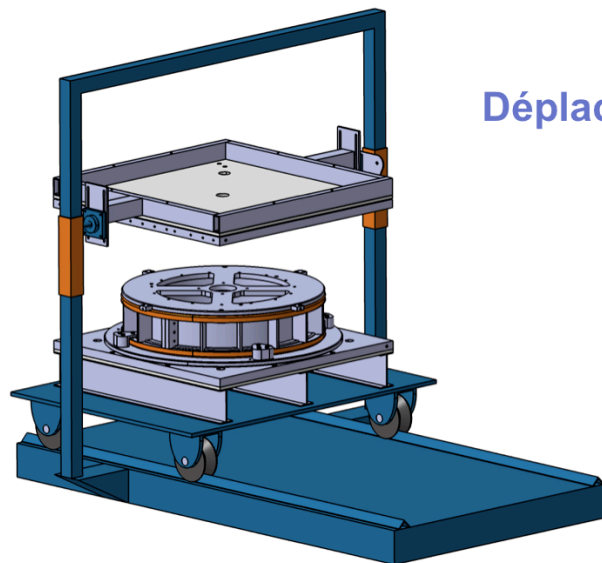
**Insertion et
positionnement du
premier moule de cavité**

Procédure de fabrication



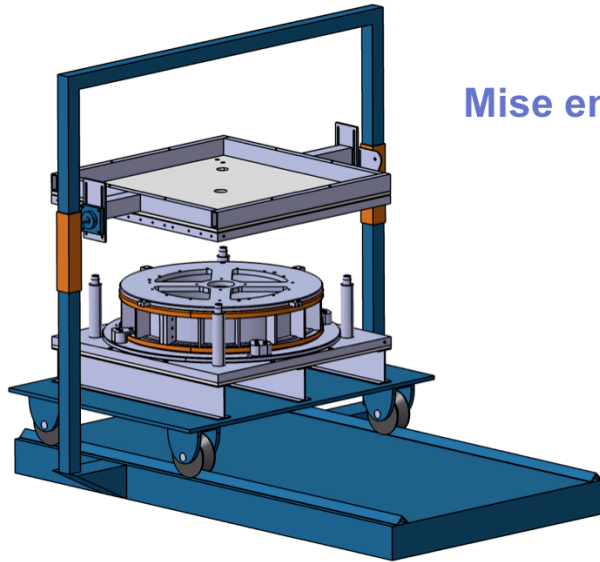
**Insertion et
positionnement du
deuxième moule de cavité
et attache des deux
pièces**

Procédure de fabrication



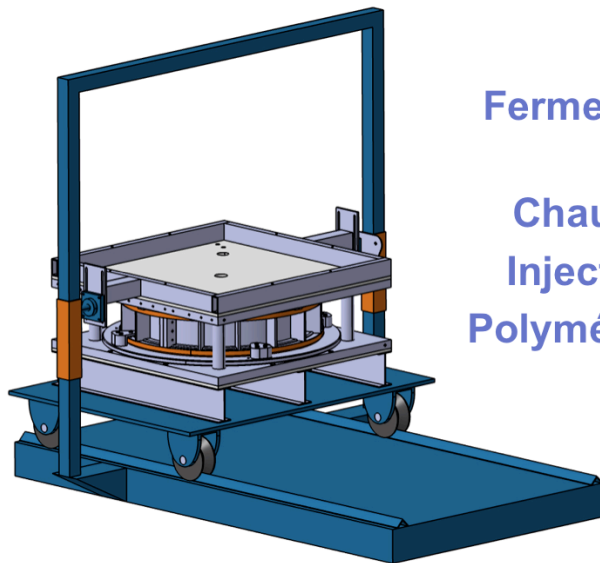
**Déplacement vers l'aire
d'injection**

Procédure de fabrication



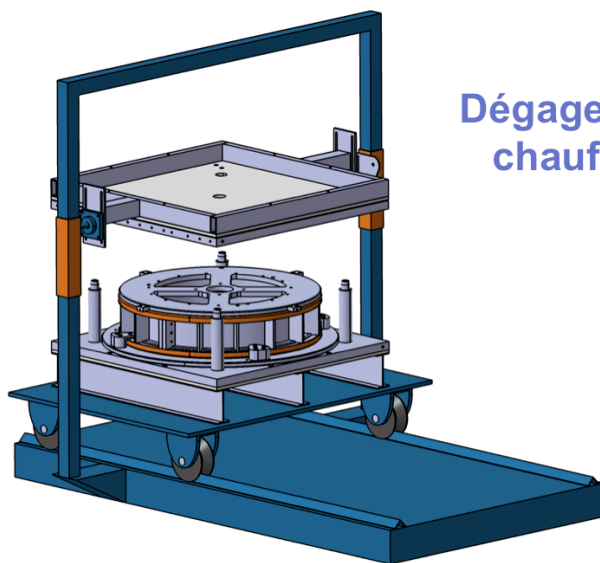
Mise en place des guides
d'arrêt

Procédure de fabrication



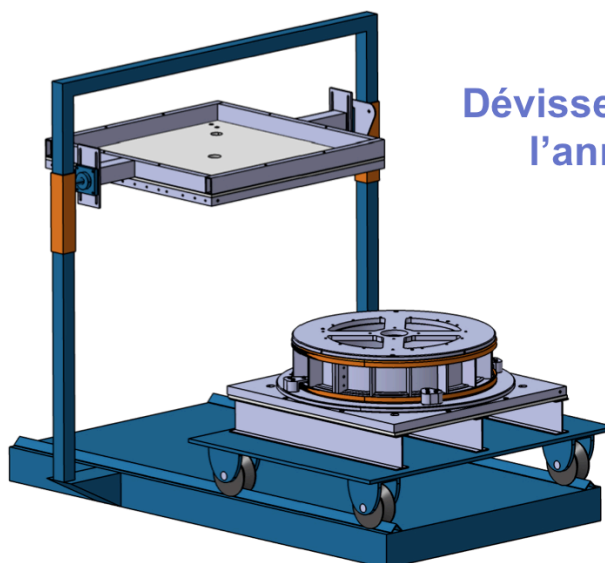
Fermeture complète du
système
Chauffage du moule
Injection de la résine
Polymérisation complète

Procédure de fabrication



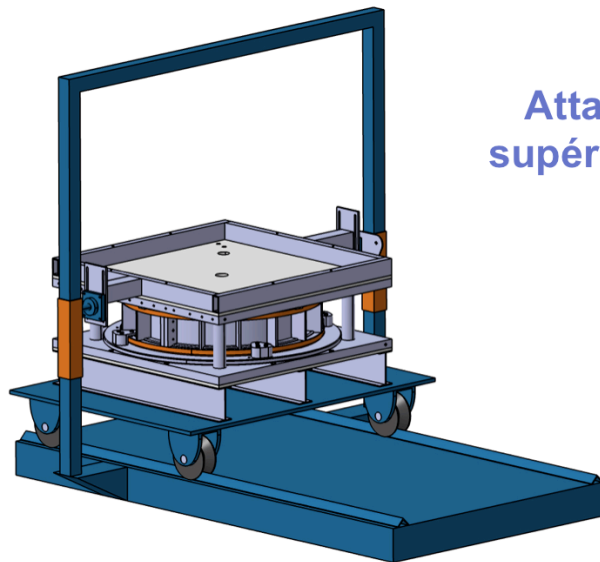
Dégagement de la plaque
chauffante supérieure

Procédure de fabrication



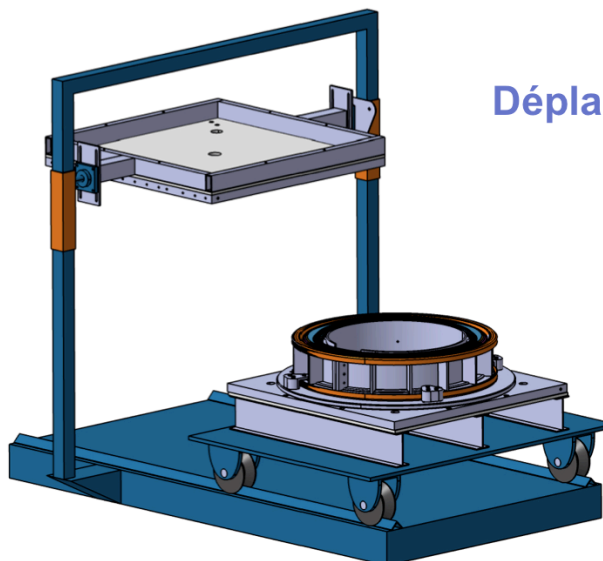
Dévisser toutes les vis de
l'anneau supérieur

Procédure de fabrication



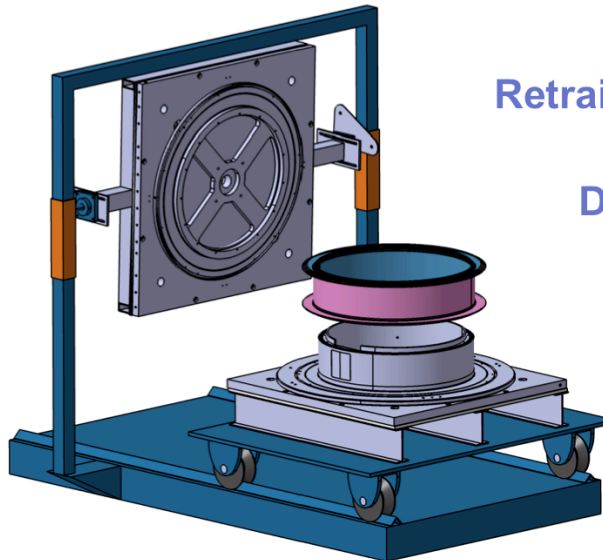
**Attache de l'anneau
supérieur au plateau de
levage**

Procédure de fabrication



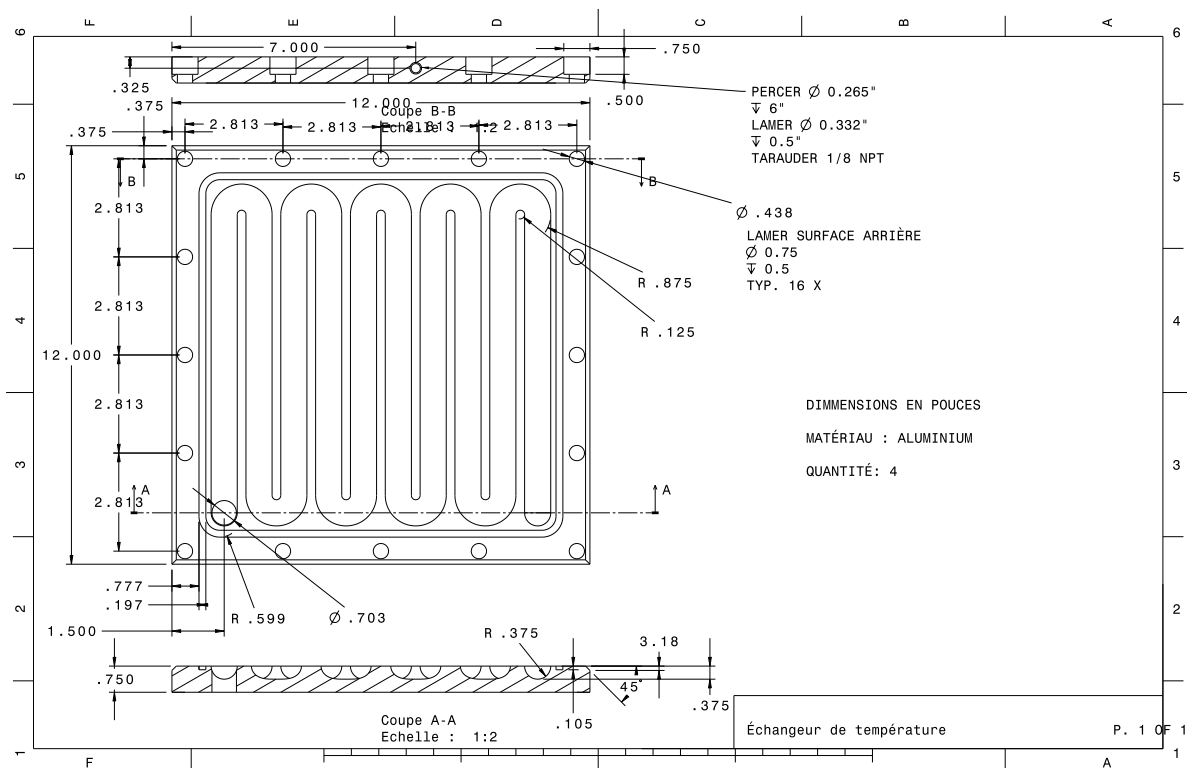
**Déplacement vers l'aire
de travail**

Procédure de fabrication

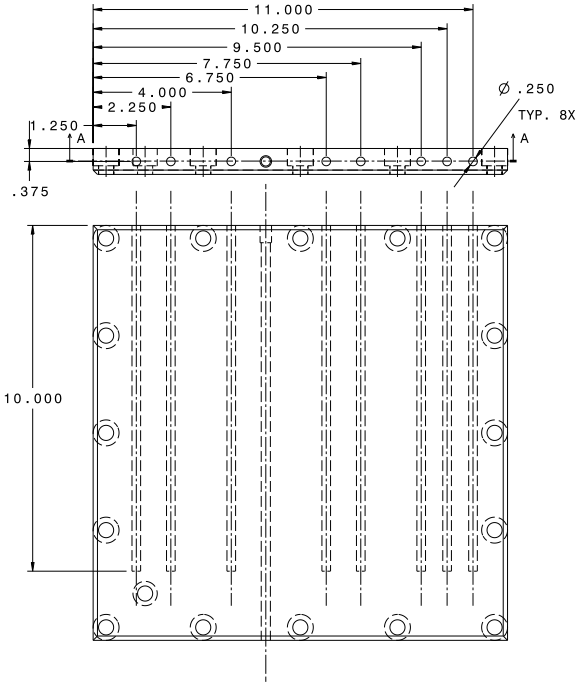
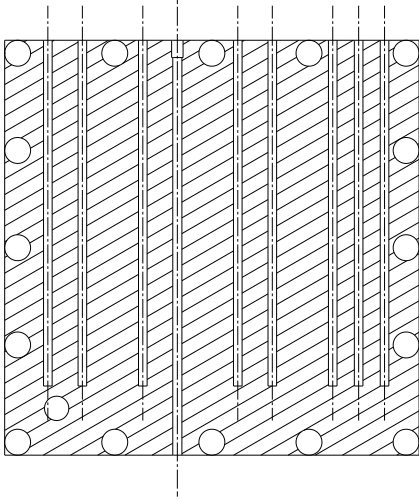


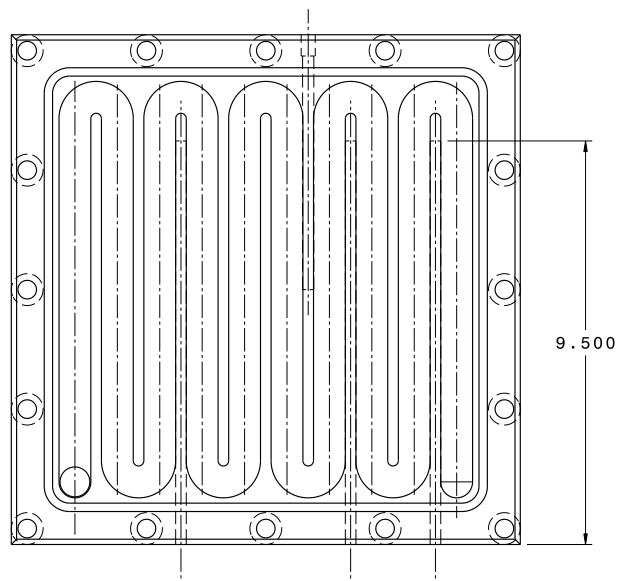
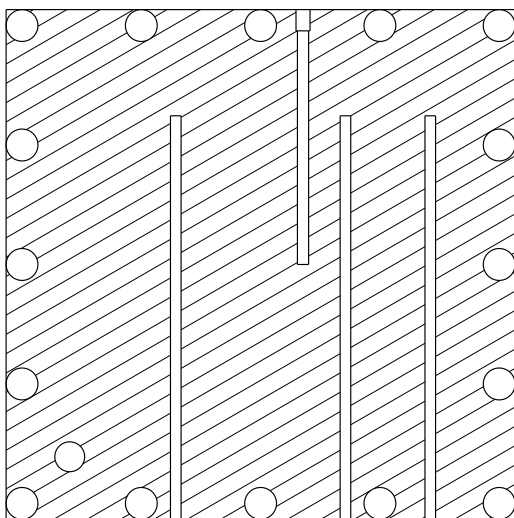
**Retrait de toutes les
pièces
Démoulage**

ANNEXE 2 Dessins de détail échangeur de chaleur



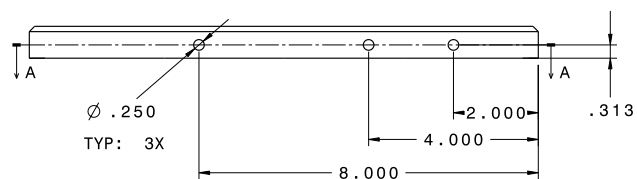
PERCER 8 TROUS
Ø 0.250
▽ 10.000
DIMENSION EN POUCES





PERCER 3 TROUS
 \varnothing 0.250
 ∇ 9.500

DIMENSIONS EN POUCES




ANNEXE 3 Procédures de préformage



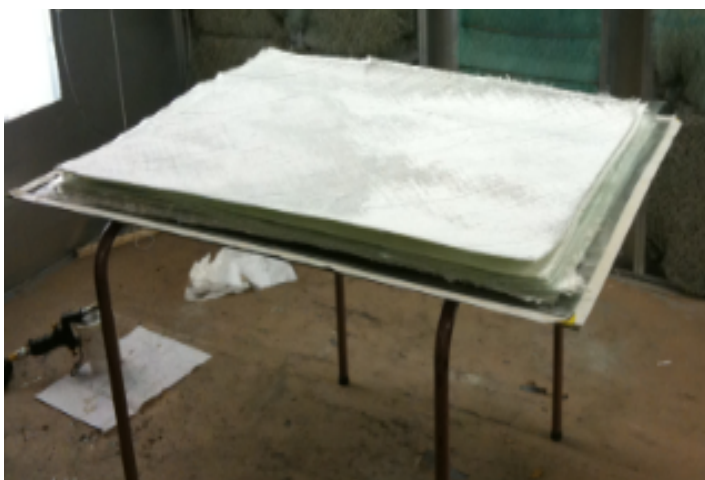
A. Préformage des brides

<i>Utilisation</i>	<i>Matériel</i>
<i>Matière première</i>	Fibre de verre
	Domdom
	Feutre
	Bâche à vide (environ 5m de longueur)
	Résine
<i>Sécurité</i>	Gants
	Lunettes
	Chaussures de sécurité
	Ventilation
	Protection contre le bruit
<i>Outils</i>	Prise de vide
	Ciseaux
	Pistolet à pulvériser
	Support de dépôt des rectangles

Photos	Étapes
	<p style="text-align: center;">Découpe des rectangles de fibres</p> <p>Placer le papier perforé sur la Lectra. Attention de faire dépasser le papier au-dessus des fourches de manière à bien faire glisser les bandes après découpe. Placer minutieusement la fibre sur le papier. Recouvrir le tout du film plastique (1). Régler l'ensemble des paramètres de découpe (dérive,...). Effectuer la découpe.</p> <p>Pour une préforme, six rectangles sont nécessaires.</p>
	<p style="text-align: center;">Vaporisation de la résine sur les rectangles</p> <p>Protéger le sol avec du papier kraft. Préparer ensuite le mélange à pulvériser. La résine utilisée sera la plupart du temps la « Lindoxy ». Il est important de respecter les rapports massiques suivants : 1,6 g de durcisseur pour 1g de résine.</p> <p>Diminuer la pression d'air (sur le pistolet) à 60 PSI (le temps de la pulvérisation).</p> <p>Peser les rectangles de fibres et les déposer sur le papier kraft. Pulvériser la résine de manière très superficielle sur les bandes. La</p>

masse de résine pulvérisée ne doit pas excéder 1.5% de la masse du rectangle.

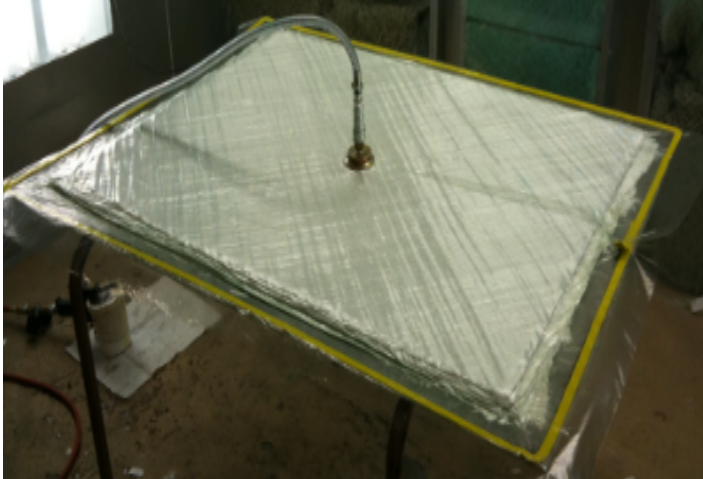
Positionnement des rectangles



Les rectangles sont superposés par lot de trois. Les lots (1) sont séparés par une épaisseur de film plastique (2) comme le montre la figure suivante.



Attention de bien positionner les rectangles de manière à éviter la formation de « plis » ou « bombements » lors du préformage.



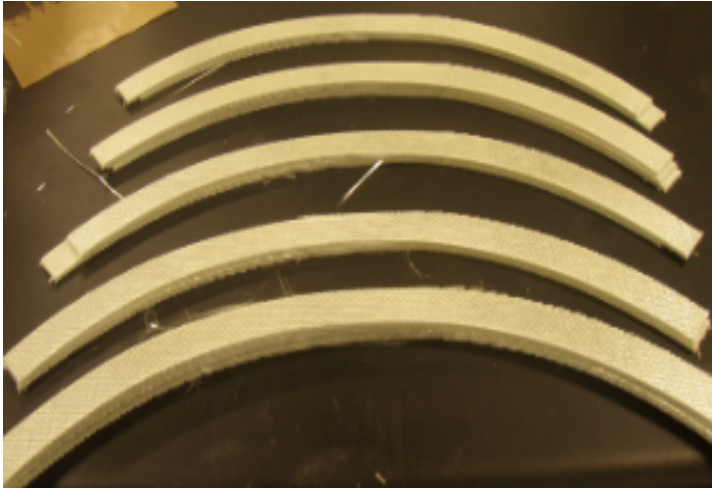
Étanchéité et mise sous vide

Le but de cette partie est d'assurer une bonne étanchéité. Pour cette raison, une bâche à vide est placée. Le domdom est utilisé (cf. [procédures techniques de « bagging »](#)). Une fois l'étanchéité assurée, le vide est fait.



Cuisson des rectangles

L'ensemble des rectangles est placé à 120°C pendant une heure trente minutes.



Découpe des brides

Les rectangles sont déposés sur la Lectra. Suivant le même mode opératoire que précédemment, découpez trente deux brides au total.



B. Préformage des demi-futs

<i>Utilisation</i>	<i>Matériel</i>
<i>matière première</i>	Fibre de verre
	domdom
	Feutre
	Bâche à vide (environ 5m de longueur)
	Résine
<i>Manipulation</i>	Œillets de levage
	Chaines
	Treuil
<i>Sécurité</i>	Gants
	Lunettes
	Chaussures de sécurité
	Ventilation
	Protection contre le bruit
<i>Outils</i>	Une cale en titane
	Rouleau en plexiglas
	Ciseaux
	Pistolet à pulvériser

Photos

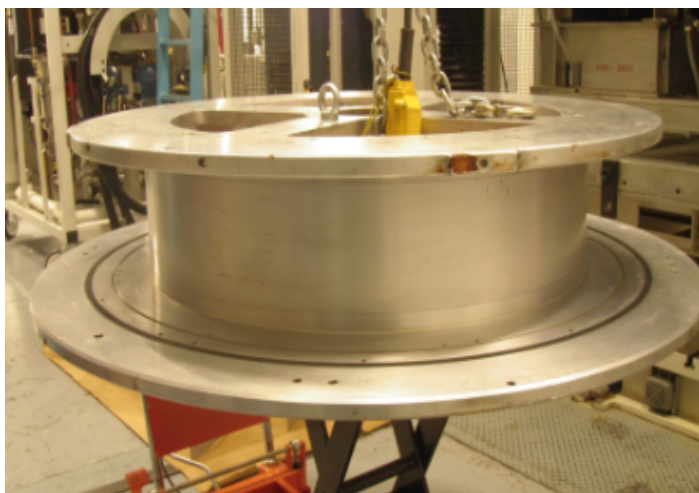
Étapes



Découpe des bandes

Placer le papier perforé sur la Lectra. Attention à faire dépasser le papier au-dessus des fourches de manière à bien faire glisser les bandes après découpe. Placer minutieusement la fibre sur le papier. Recouvrir le tout du film plastique (1). Régler l'ensemble des paramètres de découpe (dérive,...). Effectuer la découpe.

Pour une préforme, vingt bandes sont nécessaires. Pour les deux dernières couches, effectuer de la même façon la découpe de deux bandes complètes



Installation du moule

Au préalable, le moule doit être monté et traité. Pour ces deux étapes, se référer aux procédures : [manipulation du moule](#) et [traitement moule et membrane](#). Poser le moule assemblé sur un support mobile (chariot de transport,...). L'objectif de la manœuvre est de pouvoir travailler à hauteur d'homme tout en minimisant les déplacements du moule jusqu'au four.

Vaporisation des bandes



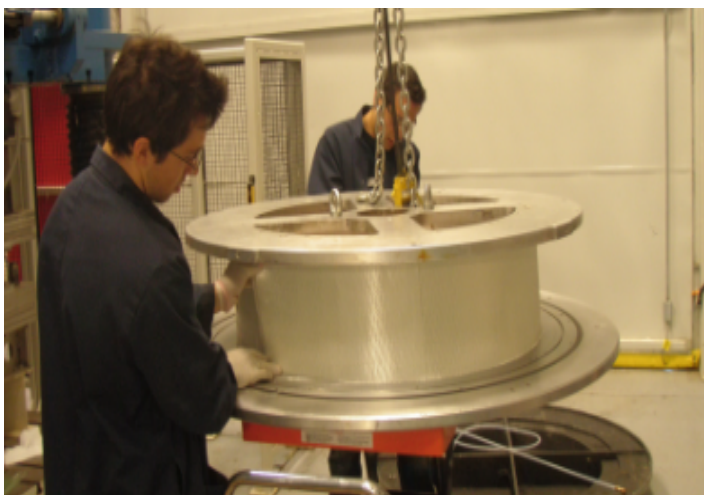
Protéger le sol avec du papier kraft. Préparer ensuite le mélange à pulvériser. La résine utilisée sera la plupart du temps la « Lindoxy ». Il est important de respecter les rapports massiques suivants : 1,6 g de durcisseur pour 1g de résine.

Diminuer la pression d'air (sur le pistolet) à 60 PSI (le temps de la pulvérisation).

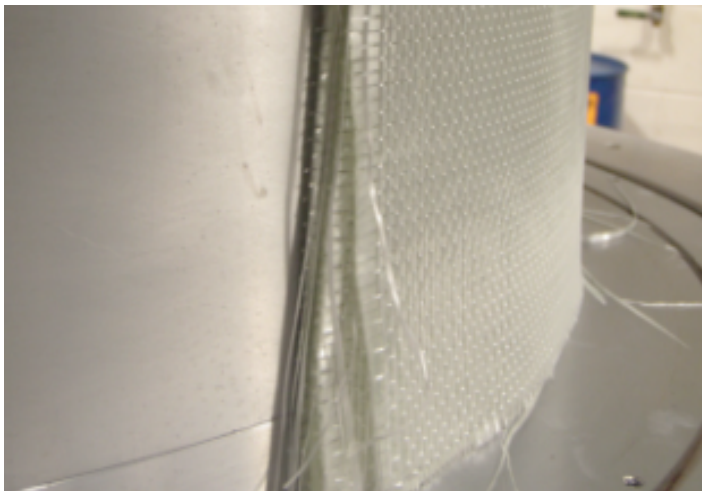
Peser chaque bande avant pulvérisation.

Déposer les bandes de fibres sur le papier kraft et pulvériser la résine de manière très superficielle sur les bandes. La masse de résine pulvérisée ne doit pas excéder 1.5% de la masse de la bande.

Dépôt des bandes



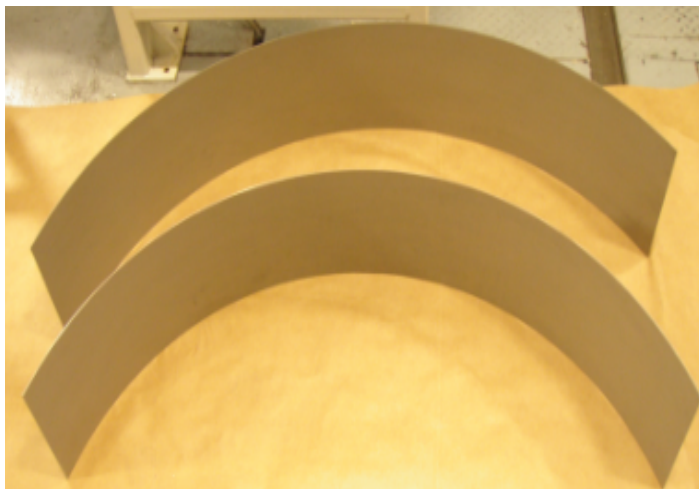
L'étape qui suit est critique et conditionne la qualité de la préforme. Deux personnes sont nécessaires. Les bandes sont déposées sur le fût. Le premier opérateur vient positionner la bande tandis que le second applique une légère tension sur cette dernière. La surface sur laquelle la résine a été pulvérisée est placée vers l'extérieur. Superposer dix couches de fibres sur le fût. Porter une attention particulière au placement des bandes en évitant la présence de « vagues » sur le fût.



Découpe des tissus superflus

Couper à chaque pose de bande les fibres qui se détachent. Il est important de soigner chaque bande pour faciliter la pose de la suivante. Pour les découpes, utiliser une paire de ciseaux. Attention à ne pas endommager

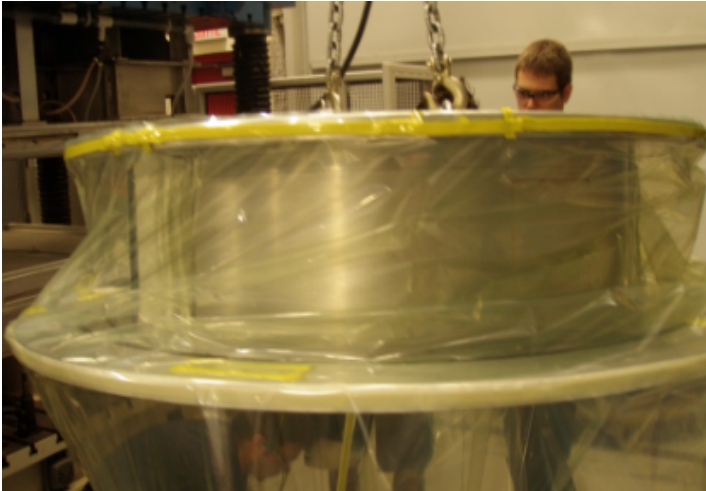
le moule en aluminium.



Mise en place de la cale

La pose de la cale (1,5 mm d'épaisseur) est essentielle pour assurer une préforme de qualité. Elle garantit un bel état de surface et une compaction optimale. Avant la pose, il est important de traiter la surface de cale à l'agent démoulant (cf. [procédure traitements de surface](#)). Attention à ne pas détériorer les fibres lors de la pose.

Mise sous vide



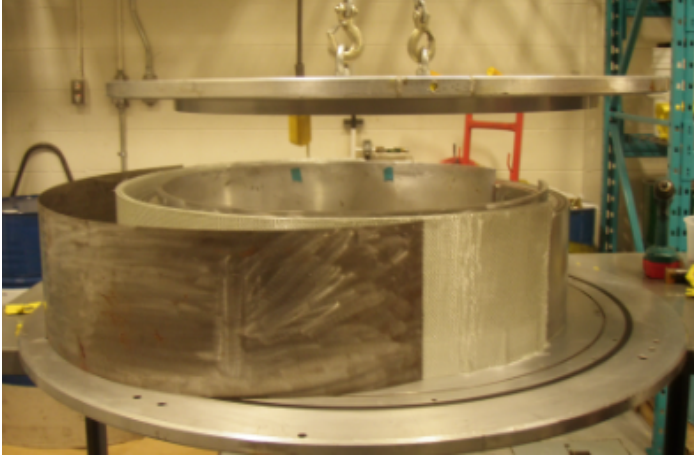
L'étanchéité est assurée par la bâche à vide (cf. [procédures différentes techniques de « bagging »](#)). Le moule Polyflex n'étant pas prévu pour le préformage, il faudra combler l'ensemble des trous présents sur les brides. Pour cette étape, utiliser du film plastique et du domdom. Lors de la mise sous vide, il est important de placer la prise de vide à l'opposé des fibres. De cette manière, on évite d'abimer la préforme avec la calle lorsque le vide sera fait.



Cuisson de la préforme

Placer l'ensemble dans le four pendant une heure et demie à 120°C.

Démoulage



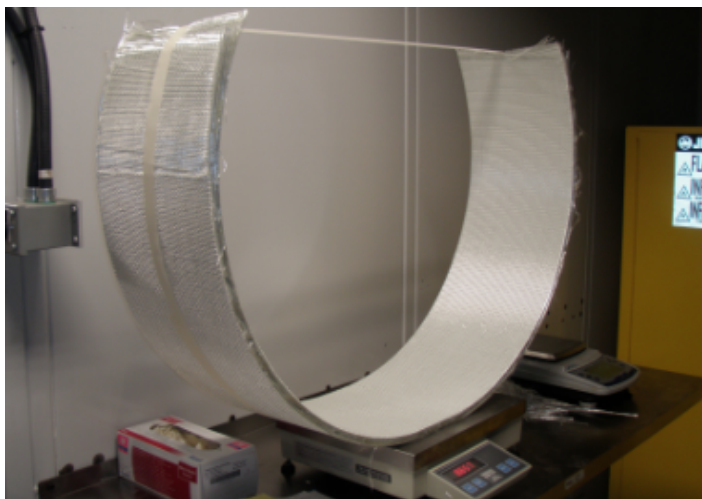
Il faudra porter une attention particulière au démoulage. Cette étape ne doit pas détériorer la préforme. Pour cette raison, il est préférable d'enlever la bride supérieure (cf. [procédure manipulation des moules](#)). Retirer ensuite la calée. Le retrait de la préforme nécessite deux personnes de manière à soulever les fibres sans les endommager. Le demi-fût ainsi fabriqué est stocké et en attente de découpe.



C. Préformage complet

<i>Utilisation</i>	<i>Matériel</i>
<i>Matière première</i>	Fibre de verre préformée
	domdom
	Feutre
	Résine
<i>Manipulation</i>	Œillets de levage
	Chaines
	Treuil
<i>Sécurité</i>	Gants
	Lunettes
	Chaussures de sécurité
	Ventilation
	Protection contre le bruit
<i>Outils</i>	Une cale en titane
	Rouleau en plexiglas
	Ciseaux
	Pistolet à pulvériser
	Courroie de serrage

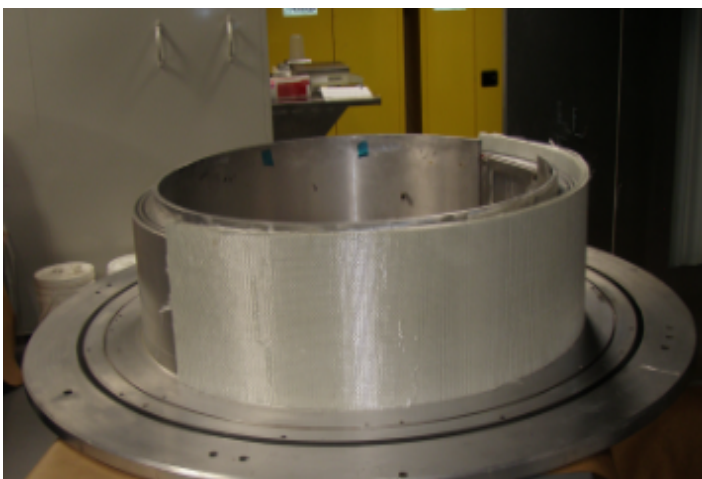
Photos



Étapes

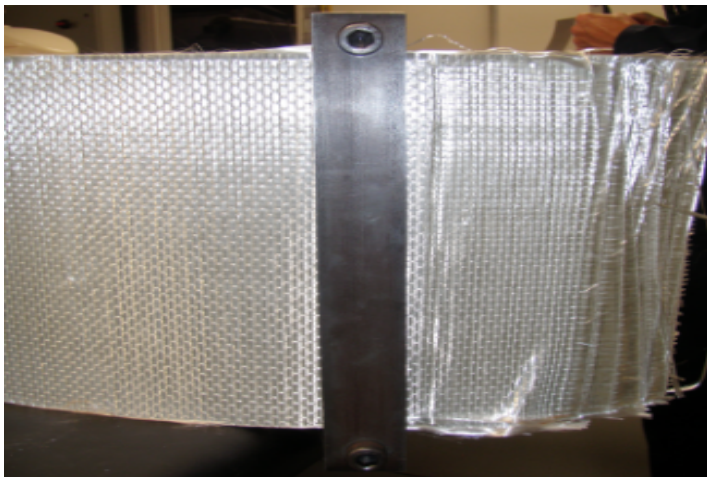
Pesée des fibres avant découpe

Il est important de peser les demi-futs avant découpe. Cette valeur donnera une indication sur la quantité de résine pulvérisée sur les fibres. La différence entre la masse des dix couches et celle du demi-fût donnera la masse de résine. Cette valeur sera prise en compte lors du calcul de la masse de résine à injecter (voir fiche de calcul Excel en annexe).



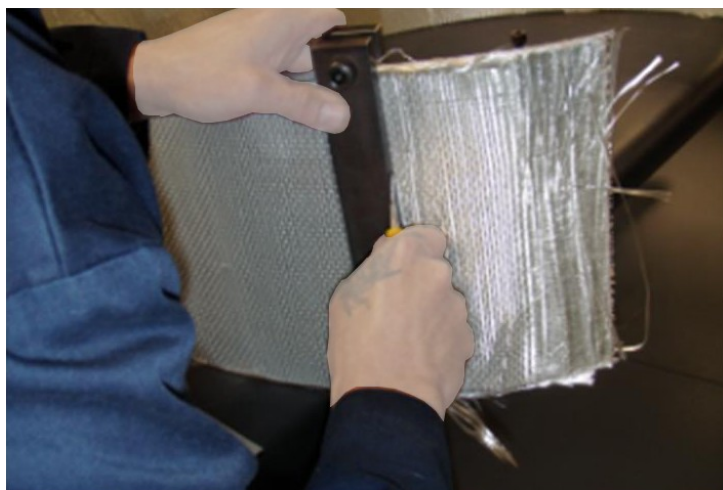
Prise des mesures

Les demi-futs étant légèrement plus grands que nécessaire, il est impératif de les recouper. Pour une meilleure précision, les pièces seront déposées sur le moule. Les mesures seront réalisées directement sur ce dernier.



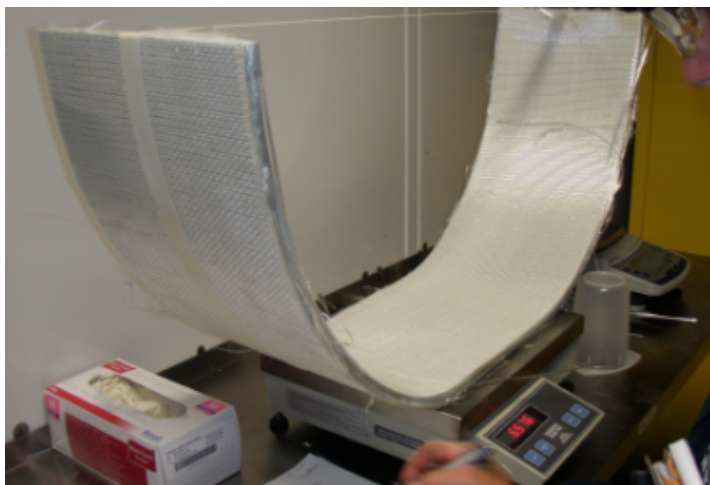
Placement de l'outil de découpe

L'outil de découpe s'assimile à un guide. Composé de deux plaques d'acier, il permet de faciliter la découpe. Laver l'outil à l'acétone de manière à s'assurer de sa propreté. Son placement est crucial. Pour cette raison, il est impératif d'utiliser un niveau. Une fois les plaques d'acier bien orientées, visser les deux vis de serrage.



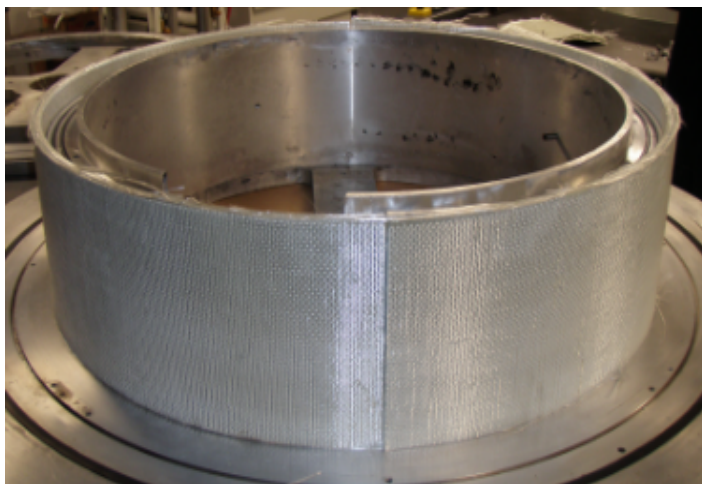
Découpe

L'étape de découpe est critique. Pour une découpe optimale, utiliser un couteau. Chaque couche de fibre est découpée. Maintenir la lame du couteau afin d'éviter tout flambement. La qualité de la découpe conditionnera la jonction entre les deux demi-futs. Attention de manière à ne pas détériorer la préforme le port de gants est obligatoire.



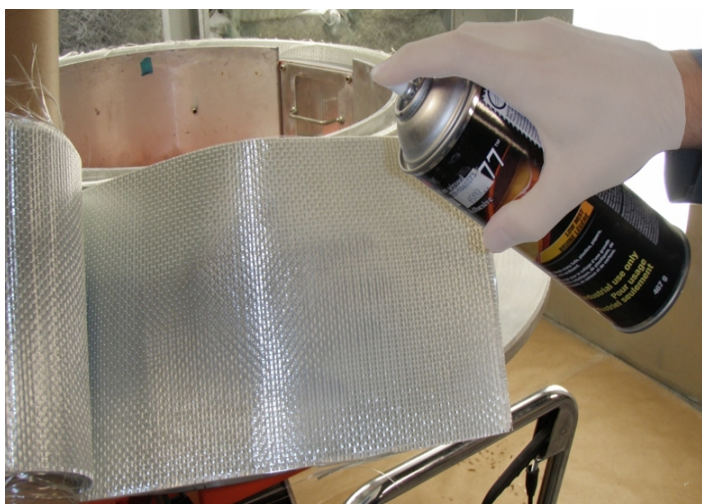
Pesée d'après découpe

Pour calculer la valeur exacte de résine à injecter, il est nécessaire de connaître la masse totale de fibres. Pour cette raison, peser les demi-futs. Utiliser la balance de précision 0.001g.



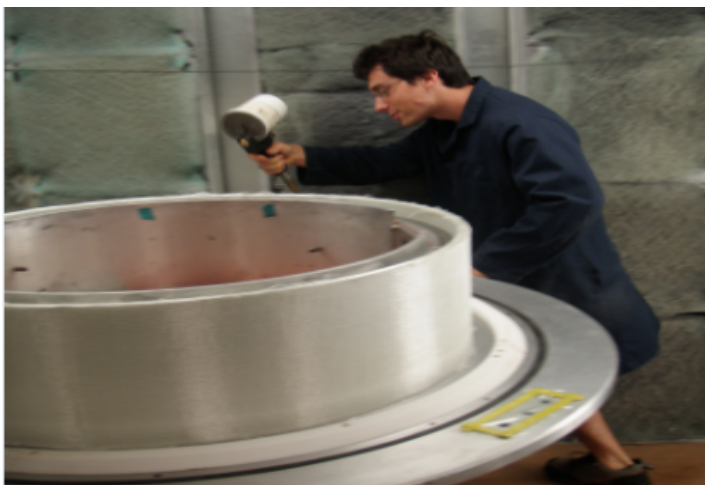
Placement des demi-fûts sur le moule

L'étape s'assimile à la vérification des découpes. Déposer les deux demi-fûts sur le moule. Vérifier les jonctions. Une légère pression est requise pour « plaquer » les demi-fûts contre le moule. Modifier les découpes si nécessaire.



Placement de l'avant-dernière bande

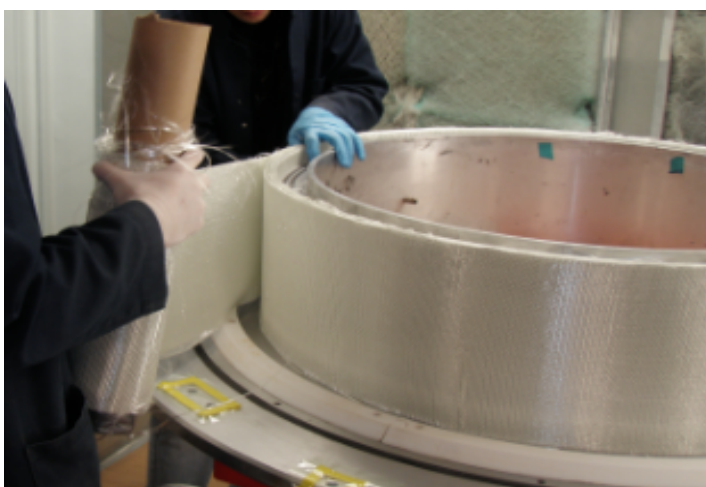
Avant de commencer l'opération, s'assurer que le poste de travail est bien organisé. Pour cette étape, le moule sera déposé sur le charriot de transport. Le charriot sera centré sous la hotte. De cette manière, l'opérateur pourra circuler autour. Pour maintenir la bande sur les demi-fûts, vaporiser la colle 3M sur une petite surface (environ 30cm). Positionner la nouvelle bande. Plaquer la bande sur le fût.



Vaporisation de la résine

La résine est vaporisée de manière très superficielle sur le fût. Il est important de respecter les rapports massiques suivants : 1.6 g de durcisseur pour 1g de résine.

Diminuer la pression d'air du réseau à 60 PSI (le temps de la pulvérisation). Peser le pot de résine avant et après pulvérisation de manière à connaître la masse de résine utilisée.

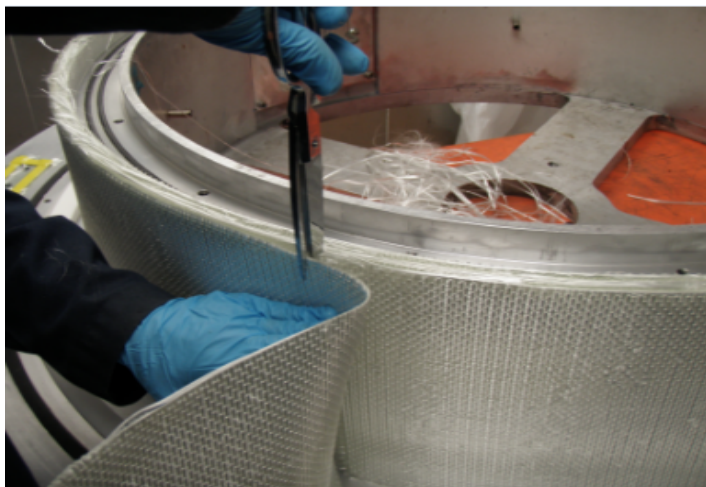


Dépôt de la 11^e bande

Deux opérateurs sont nécessaires. La bande est enroulée sur un rouleau. Une personne déroulera les fibres en appliquant une légère tension. La seconde veillera au bon positionnement de la bande.


L'étape est critique. Il est impératif d'éviter la formation de vagues ou bombements sur la préforme.

L'opérateur peut également utiliser un rouleau en plexiglass pour plaquer la bande.

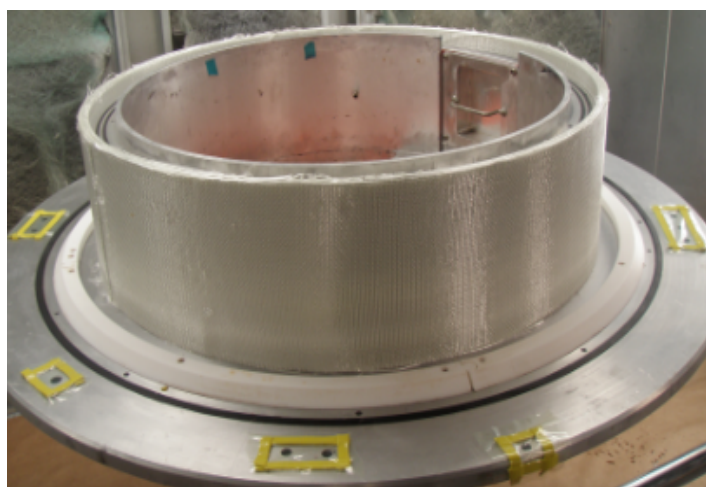


Découpe de la bande

Les bandes sont légèrement plus longues que nécessaire. Pour cette raison, découper la bande à la jonction.


Attention, la découpe doit être droite. 

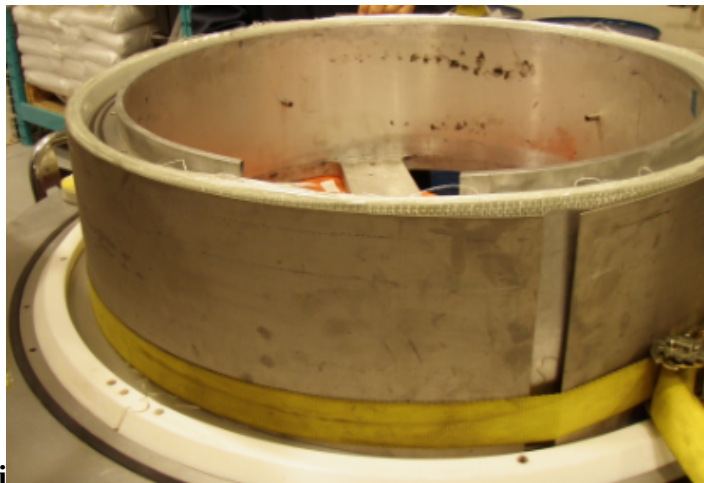
Sur la jonction, appliquer de la colle 3M de manière à maintenir les fibres.



Placement de la dernière bande

Idem placement de l'avant-dernière bande.

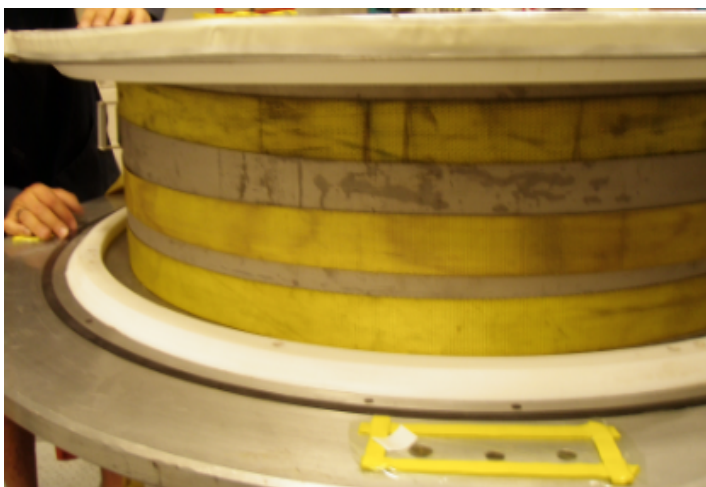
Attention à suivre toutes les étapes comme précédemment. 



Positionnement des cales et sangles

Utiliser les deux cales en titane. Les deux cales seront traitées à l'agent démoulant (cf. « [Procédure traitement de surface moule et membrane](#) »).

Placer délicatement les cales sur la préforme en faisant attention de ne pas l'endommager. À la jonction, placer deux feuilles d'aluminium (traitées également) de manière à ne pas marquer la préforme. Serrer la sangle pour maintenir l'ensemble.



Fermeture du moule

Maintenir la compaction de la préforme avec la sangle. Placer deux sangles supplémentaires. Vérifier le flambement des fibres.

Placer la bride supérieure (cf. « [procédure manipulation des moules](#) »).



Cuisson de la préforme

Placer l'ensemble dans le four pendant une heure et demie à 120°C.





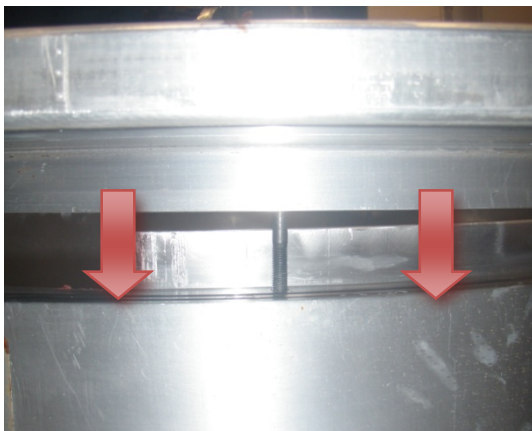
D. Manipulations du moule

<i>Utilisation</i>	<i>Matériel</i>
<i>Matière première</i>	Fibre de verre
	domdom
	Feutre
	Bâche à vide (environ 5m de longueur)
	Résine
<i>Manipulation</i>	Œillets de levage
	Chaines
	Treuil
<i>Sécurité</i>	Gants
	Lunettes
	Chaussures de sécurité
<i>Outils</i>	Une cale en titane
	Charriot Roulant
	28 vis HC M8x1.25x60mm
	3 vis HC M8x1.25x100mm

Fermeture :

Note : s'assurer du bon état des surfaces d'engagement, poncer légèrement les éventuels accrocs si nécessaire.

Photos	Étapes
	<p>Placer le fût sur un support mobile (table roulante ou chariot) ou au sol sous la zone de travail du treuil.</p>
	<p>Soulever la flasque inférieure (la plus grande) à l'aide du treuil et de deux œillets de levage prévus à cet effet. La flasque doit être orientée côté extérieur vers le haut.</p>
	<p>Descendre la flasque à ras du fût en veillant à l'alignement des repères sur le fût et la flasque.</p> <p>Placer 3 vis de positionnement (M8x1.25x100mm) pour s'assurer de l'alignement des perçages de la flasque et des taraudages du fût.</p>



Une fois positionnée, descendre la flasque le plus parallèlement possible au fût jusqu'à butée. Exercer manuellement si nécessaire une pression sur la flasque pour assurer son engagement.



Retirer les vis de positionnement, placer les vis de serrage (M8x1.25x60mm) et les serrer en croix en plusieurs passes jusqu'à accotement de la flasque avec le fût.

Vérifier l'écart au moyen de jauge d'épaisseur.

Placer les anneaux de levage dans deux trous consécutifs, lever le moule et le poser sur la tranche de la flasque.



Pendant qu'une personne maintient le moule à la verticale, une autre vient placer les anneaux de levage côté intérieur de la flasque dans deux trous opposés.



Relever le moule en faisant attention à son basculement et le reposer sur le support.

Placer la flasque supérieure de la même manière que l'inférieure en alignant les branches selon leur numérotation.

Ouverture :

Photos	Étapes
	<p>Dévisser entièrement les vis de la flasque supérieure.</p>
	<p>Placer les œillets de levage et lever la flasque à l'aide du treuil.</p> <p><u>Note</u> : Si la flasque reste bloquée, utiliser 4 crics hydrauliques placés à l'intérieur du fût, en appui entre les deux flasques.</p>
	<div data-bbox="1019 930 1089 1003" data-label="Image"> </div> <p>Si le désassemblage de la flasque inférieure est nécessaire, retourner l'ensemble fût + flasque inférieure de la même manière que décrit en 1.1.</p>
	<p>Démonter la flasque inférieure de la même manière que la supérieure.</p> <p><u>Note</u> : Si la flasque reste bloquée, utiliser le maillet en plastique sur la plage technique tout en maintenant une tension avec le treuil pour la déloger.</p>

E. Traitements de surface



Protocole de traitement du moule Polyflex

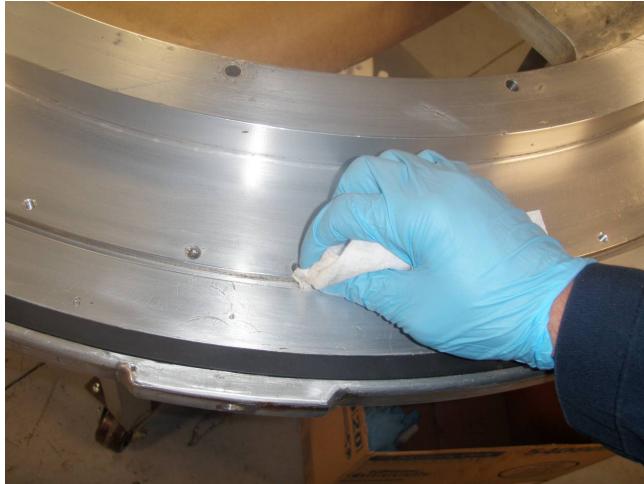
Matériel :

- Chemlease 15 Sealer
- Chemlease 70-90
- Dégraisseur
- Acétone
- Hotte aspirante
- Wypall
- Gants
- Lunettes

Le traitement du moule membrane comporte trois étapes distinctes qui doivent se dérouler sous la hotte aspirante en fonctionnement :

Photos

Étapes



Nettoyage :

Tout d'abord, nettoyer le moule au dégraisseur pour retirer l'huile et la résine. Ensuite, il est nettoyé en intégralité avec du « Wypall » et de l'**acétone**. Bien penser à nettoyer de la rainure des téflons.



Inspection des joints

Vérifier l'état des joints du fût et des brides :



Sealer : 1 couche, 30 minutes de séchage

L'application de la couche* du « **Chemlease 15 Sealer** » se fait avec un « Wypall » imbibé et sans frotter sur la totalité des surfaces. Après un temps de séchage d'environ 30 secondes, le Sealer perle à la surface du moule. Essuyer les gouttes avec un « Wypall » propre et sec. Cette opération permet de réduire la porosité surfacique et ainsi utiliser une moins grande quantité d'agent démoulant tout en assurant l'adhésion de celui-ci.



*Si le moule est utilisé pour la première fois ou si les surfaces ont été modifiées, 4 couches de **Sealer 15** sont nécessaires avec un intervalle de **séchage de 30**

minutes.



Agent démoulant : 4 couches, 30
minutes de séchage

L'application de l'agent démoulant, le « **Chemlease 70-90** », doit être réalisée de la même manière que le Sealer. Pour ce traitement, 4 couches sont déposées avec un intervalle de séchage de 30 minutes.

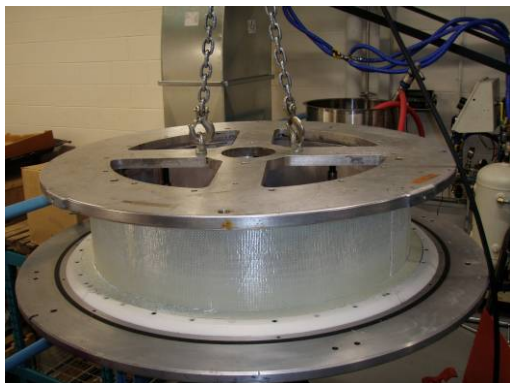
ANNEXE 4 Procédure de montage du moule



<i>Utilisation</i>	<i>Matériel</i>
<i>Manipulation</i>	Œillets de levage
	Chaines
	Treuil
<i>Sécurité</i>	Gants
	Lunettes
	Chaussures de sécurité
<i>Matériel et outils</i>	Chariot Roulant
	28 vis HC M8x1.25x60mm
	3 vis HC M8x1.25x100mm
	Moule de cavité
	Plateau inférieur et supérieur
	Membrane
	DomDom
	Ruban adhésif en feuille d'aluminium
	Crics
	Petit tournevis
	Rouleau

Assemblage du moule Polyflex et mise en place avant injection

Photos	Étapes
	<p>1. Transport du moule</p> <p>Le moule au complet (les deux brides et le fût) et contenant la préforme est monté sur la plate forme supérieure à l'aide du treuil</p> <div data-bbox="873 741 946 814" data-label="Image"> </div> <p>Opération pouvant comporter des risques, ne pas rester sous le moule</p>
	<p>2. Sécurisation du moule</p> <p>Placer le chariot orange avec les freins bloqués sous le moule. Descendre le moule à l'aide du treuil à environ 10cm au-dessus du chariot. Monter ensuite le plateau du chariot jusqu'à ce que le moule repose sur celui-ci.</p>
	<p>3. Desserrage de la bride supérieure</p> <p>Défaire les vis de la bride supérieure à l'aide d'une clé Allen 8mm</p>



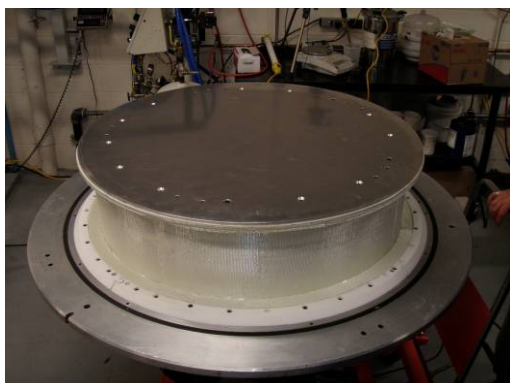
4. Démontage de la bride supérieure

Fixer les œillets sur la bride supérieure. Placer les crics sous les 4 branches et les lever simultanément. Une fois que la bride supérieure est soulevée, finir l'opération à l'aide du treuil.



Opération délicate : faire très attention et de ne pas endommager les brides de la préforme.

Remarque : poids de la bride supérieure 163lbs soit 74kg



5. Mise en place de l'anneau de découpe


Vérifier si l'anneau de découpe n'est pas coupant avant de l'installer. Si besoin, sabler les arêtes au papier de verre. Pour un bon centrage de l'anneau, utiliser les vis de positionnement.

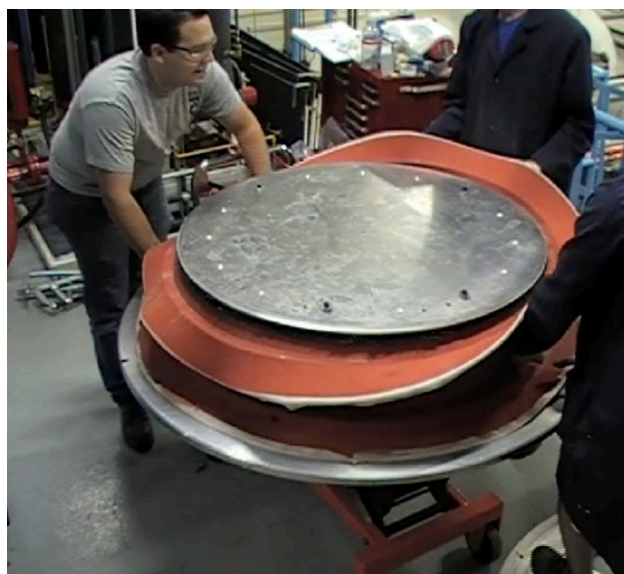


6. Insertion de la membrane

La membrane est insérée sur la préforme comme un pneu. Un côté est placé contre la préforme et le reste de la membrane est mis en place progressivement jusqu'à atteindre l'autre côté.



Au positionnement de la membrane, l'étiquette doit être sur les trous de positionnement proche de la branche  et faire attention aux brides



7. Démontage de l'outil de découpe

Faire attention aux brides



8. Protection des têtes de vis des téflons

Pour éviter que les perçages des téflons se combent de résine et ainsi simplifier le nettoyage, les têtes de vis sont recouvertes de ruban adhésif en aluminium. Bien plaquer le ruban sur les côtés de la tête de vis.



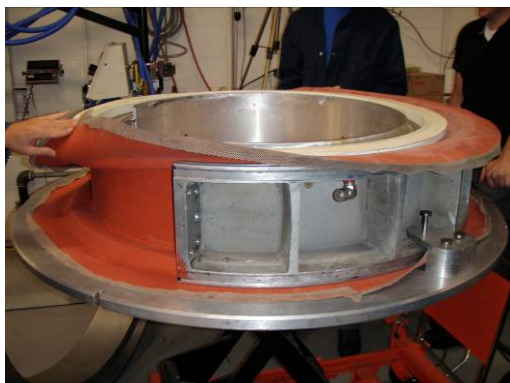
Ensuite, combler le reste du vide avec du Dom Dom.

Il faut également remplir de Dom Dom les jonctions entre les Téflons. Pour cela, dévisser les vis proches de la jonction. Placer une bande de ruban en aluminium sous le téflon en les soulevant et les remettre en place. Enfin, remplir de Dom Dom.



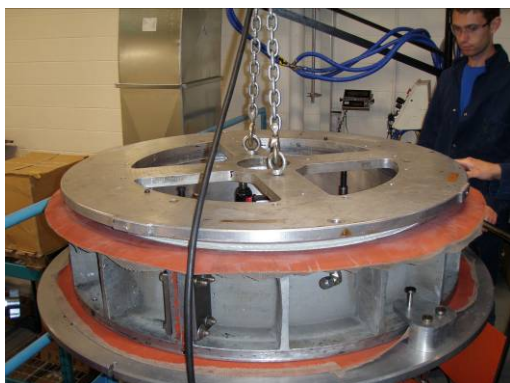
9. Installation du contre-moule arrière

Placer le contre-moule portant le n°1 en position arrière. Pour le bon positionnement, utiliser le bloc de centrage.



10. Installation du contre-moule avant

Placer le contre-moule portant le n°2 en position avant et mettre le bloc de positionnement.



11. Fermeture du contre-moule

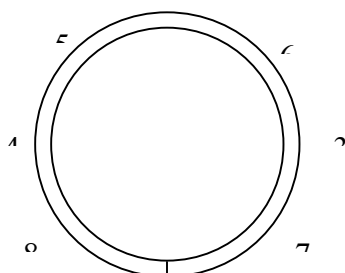
Placer les plaques de répartition et les vis de serrage du contre-moule. Appliquer un couple de 80lbs.ft

ORDRE DE SERRAGE ?

12. Insertion du joint carré partie 1

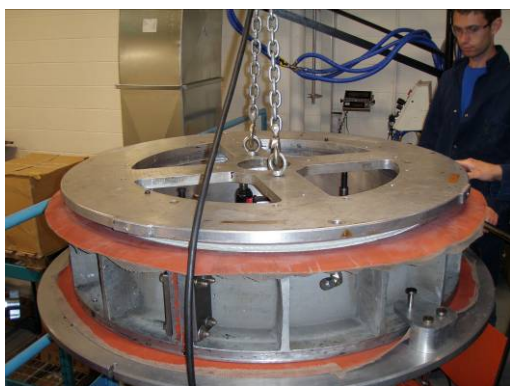
Pour insérer le carré Viton sur la partie supérieure des contre-moules, bien repérer la jonction du joint et la placer au niveau de la croix visible sur le moule de cavité.

Pour bien répartir l'ensemble du joint dans



la gorge, commencer par insérer la jonction. À l'opposé, mettre en place 1cm de joint dans la gorge. Faire de même entre les deux points d'ancrage des deux côtés et ainsi de suite (voir étape numérotation sur la photographie)

Enfin, pour finir l'application du joint, utiliser un rouleau.



13. Mise en place de la bride supérieure

À l'aide du treuil et des œillets de levage, soulever la bride. Placer quatre crics sur les branches de la bride inférieure en position haute. Venir déposer délicatement la bride dans la bonne position (correspondance des n° sur les branches) sur les crics. Ensuite, descendre avec précaution les crics.



Faire attention aux brides



14. Mise en place des serres

Les vis de la bride supérieure sont dévissées et les blocs de positionnement retirés. Ensuite, 4 serres placés au niveau des branches viennent plaquer les contre-moules contre la bride supérieure. À l'aide des crics, soulever l'ensemble.



Faire attention aux brides

	<p>15. Mise en place du joint carré partie 2</p> <p>Placer le joint sur la partie inférieure des contre-moules selon la même méthode.</p>
	<p>16. Repositionnement des contre-moules</p> <p>Remettre en place les contre-moules en abaissant les crics et replacer les blocs de positionnement.</p>
	<p>17. Resserrage des vis de la bride supérieure et vérification de l'accotement</p> <p>Resserrer les vis de la bride supérieure et à l'aide des cales d'épaisseurs, vérifier l'espacement entre le fût et la bride supérieure (0,038mm)</p>
	<p>18. Placement du moule Polyflex sur la presse</p> <p>Lever le moule à l'aide du chariot orange pour qu'il soit légèrement plus haut que le bac de récupération d'huile. L'avancer légèrement. Placer un cylindre sous entre le dessous du moule et la plaque de récupération et faire rouler le moule. Retirer le cylindre.</p>
	<p>19. Fermeture de la presse</p> <p>Placer les 4 plots où repose la plaque chauffante. Descendre la plaque. Placer les tiges de compression et serrer avec un couple de 80lbs.ft en respectant l'ordre suivant : avant gauche, arrière droit, arrière gauche, avant droit. Ensuite, augmenter le couple à 150lbs.ft</p>

ANNEXE 5 Préparation à l'injection

A. Montage des composantes d'injection :

Procédure d'injection Carter échelle 1/2



Photos

Étape 1 : Pot d'injection



Balance

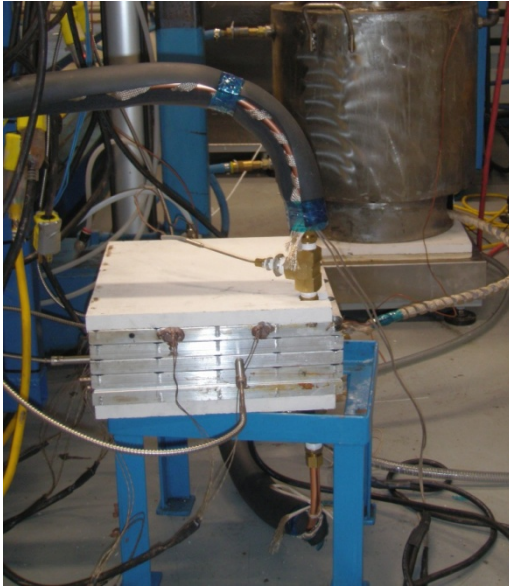
Système de
chauffage

- Nettoyer le pot (Corp. + couvercle + sortie de résine) avec de l'acétone ou de l'époxol
- Vérifier l'état du joint de fermeture sur le couvercle et faire un test de pression (à 35Psi) en s'assurant que le pot est bien fermé au niveau du couvercle (utiliser un outil si nécessaire) et à la sortie de résine
- Faire un test de vide (s'assurer que les pertes sont inférieures à 1Psi/30 min). Pour la conversion des unités, voir le tableau de conversion fournis à la fin de ce document. Changer le joint du couvercle si nécessaire
- Changer (si nécessaire) le coude en bas du pot de sortie de résine

- Vérifier le fonctionnement de la pompe de mélange.
- Vérifier le fonctionnement des vannes et leur orientation (vide + air comprimé)
- Vérifier la connexion avec le système de chauffage
- Vérifier le bon fonctionnement de la balance (connexions, indication de poids). Si le moniteur indique erreur 81, soulever le pot et redéposer le doucement. Répéter cette étape autant de fois si nécessaire

Photos

Étape 2 : Échangeur de chaleur



- S'assurer que toutes les étapes de préparation et de montage de l'échangeur de chaleur ont été respectées (voir Index)
- S'assurer que toutes les cartouches de chauffage sont placées
- Vérifier les connexions des cartouches et leur nombre
- S'assurer de la connexion des quatre thermocouples

Photos

Étape 3 : Moule

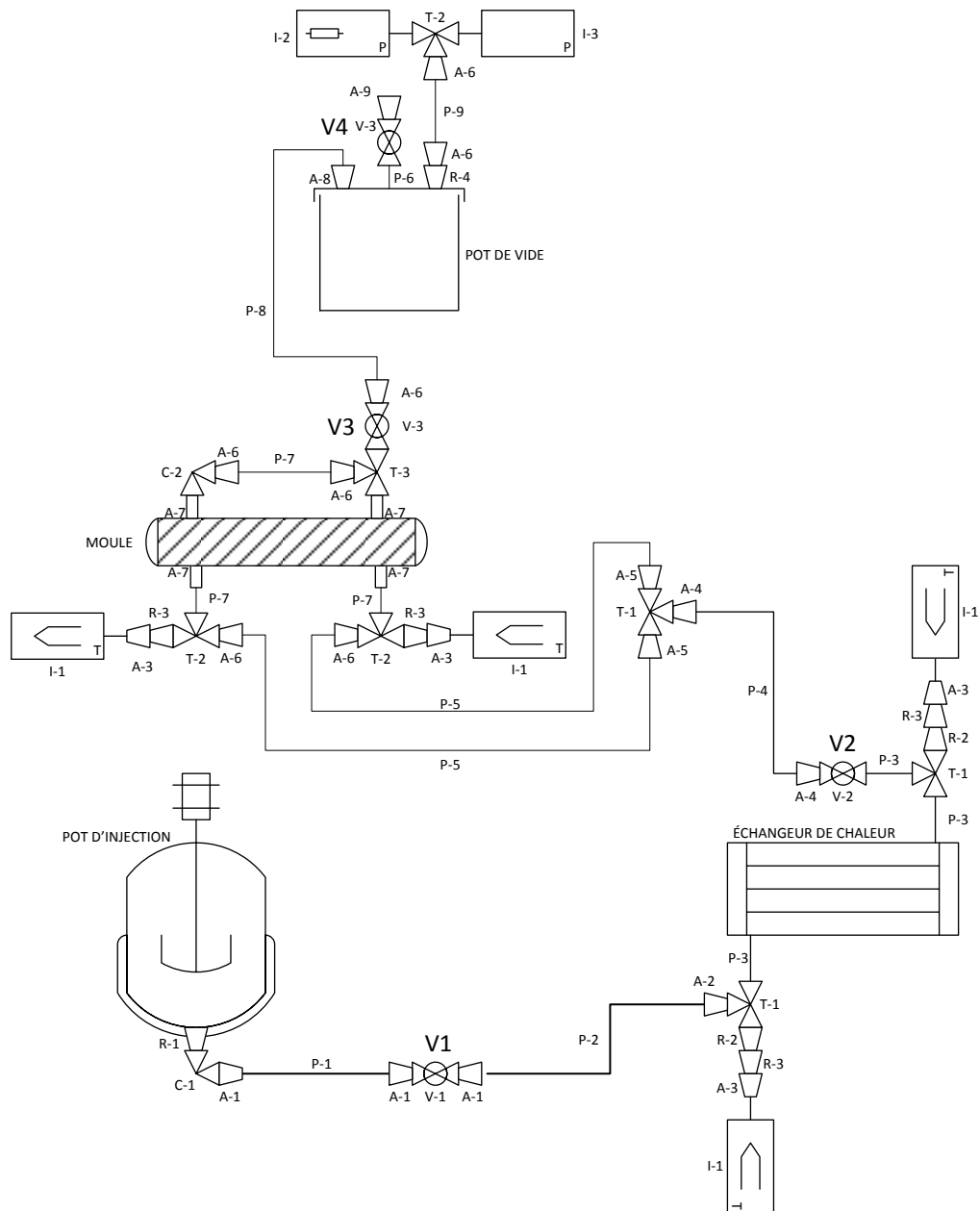


- S'assurer que toutes les étapes de préparation et de montage du moule ont été respectées, soit :

- Préformage
- Traitement des surfaces du moule
- Traitement de la membrane
- Montage du moule
- Montage sur système de fermeture

S'assurer que toutes les connexions sont faites selon les schémas présentés dans l'étape 5 (raccordement)

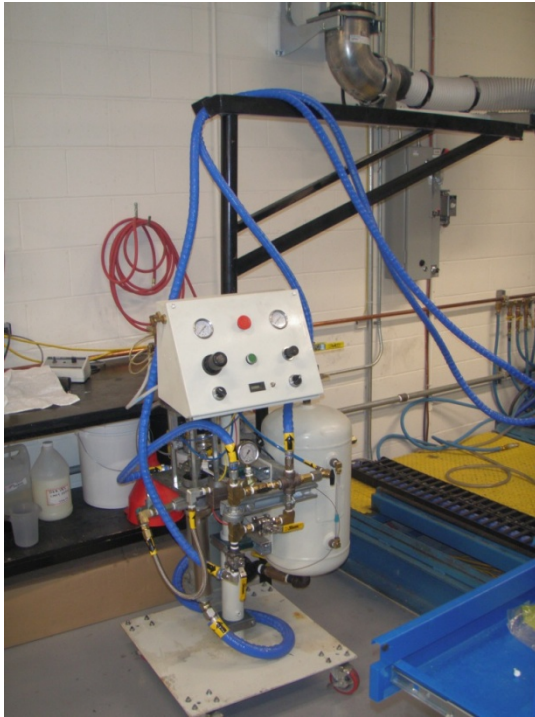
Étape 4 : Schéma de raccordement du moule



LISTE DES PIÈCES			
NO.	DESCRIPTION	TAILLE	QTÉ.
A-1	ADAPTATEUR COMPRESSION	3/4M-3/4T	3
A-2	ADAPTATEUR COMPRESSION	1/2M-3/4T	1
A-3	ADAPTATEUR COMPRESSION POUR TC	1/8M-1/8T	4
A-4	ADAPTATEUR COMPRESSION	1/2M-1/2T	2
A-5	ADAPTATEUR COMPRESSION	1/2M-3/8T	2
A-6	ADAPTATEUR COMPRESSION	1/4M-3/8T	7
A-7	PORT D'INJECTION/ÉVENT	1/4M	4
	JOINT TORIQUE PORT INJECTION	-114	4
A-8	ADAPTATEUR POUSSER POUR CONNECTER	1/4M-3/8T	1
A-9	ADAPTATEUR PRISE VIDE	1/4M-3/8V	1
C-1	COUDE	3/4M-3/4F	1
C-2	COUDE	1/4M-1/4F	1
I-1	THERMOCOUPLE TYPE J	1/8	4
I-2	CAPTEUR DE PRESSION	1/4M	1
I-3	GAUCHE DE VIDE	1/4M	1
P-1	TUBE TEFLON 3/4	700MM	1
P-2	TUBE CUIVRE 3/4	400MM	1
P-3	TUYAU RIGIDE 1/2x3"	1/2M-1/2M	3
P-4	TUBE CUIVRE 1/2	1600MM	1
P-5	TUBE CUIVRE 3/8	1000MM	2
P-6	UNION	1/4M-1/4M	1
P-7	TUBE TEFLON 3/8	110MM	1
P-8	TUBE TEFLON 3/8	1000MM	1
P-9	TUBE CUIVRE 3/8	1100MM	1
R-1	RÉDUCTEUR	1M-3/4F	1
R-2	RÉDUCTEUR	1/2M-1/4F	2
R-3	RÉDUCTEUR	1/4M-1/8F	4
R-4	RÉDUCTEUR	3/8M-1/4F	1
T-1	T	1/2F-1/2F-1/2F	2
T-2	T	1/4F-1/4F-1/4F	2
T-3	T	1/4M-1/4F-1/4M	1
V-1	VANNE À BILLE	3/4F-3/4F	1
V-2	VANNE À BILLE	1/2F-1/2F	1
V-3	VANNE À BILLE	1/4F-1/4F	2
*DIMENSIONS EN POUCES À MOINS D'INDICATION CONTRAIRE			

Photos

Étape 5 : Machine de compaction



- S'assurer du niveau de l'huile dans le réservoir à l'aide de la jauge de niveau (ajouter de l'huile si nécessaire)
- Brancher les tuyaux dans la cavité de compaction du moule
- Connecter avec l'air comprimé
- Connecter avec le vide
- Suivre la procédure d'injection avant de passer au point suivant
- Se référer au manuel d'utilisation de la machine avant de la démarrer

ANNEXE 6 FICHER DE CALCUL DE RÉSINE

Calcul des pertes de résine	Calcul des pertes de résine		
	Tuyaux	Diamètre interne	Longueur
	tuyaux 1/2 cuivre (mm)	11,07	1600,00
	tuyaux 3/8 cuivre(mm)	7,80	2000,00
	tuyaux cuivre 3/4 (mm)	15,88	400,00
	tuyaux 3/8 teflon (mm)	6,60	1410,00
	tuyaux 1/2 teflon (mm)	9,60	0,00
	Volume tuyauterie (cm3)		377,10
	Fittings	Volume	Nombre
	T 1/2 NPTF	17,40	3
	T 1/4 NPTF	4,30	3
	T 3/4 NPTF		
	Coude 1/4 NPT	3,00	1
	Comp fittings pour tube 1/2 à 1/2 NPTM	5,00	2
	Comp fittings pour tube 3/8 à 1/2 NPTM	4,60	2
	Comp fittings pour tube 3/8 à 1/4 NPTM	2,20	4
	Comp fittings pour tube 3/4 à 3/4 NPTM	8,00	2
	Comp fittings TC à 1/2 NPT	3,00	2
	Comp fittings TC à 1/4 NPT	0,70	2
	Nipple 1/2 NPTM 3" (echangeur)	13,40	3
	Nipple 1/4 NPTM 1"	1,80	4
	Nipple 1/4 NPTM 2"		
	Ball valve 1/2 NPT	10,20	1
	Ball valve 1/4 NPT	3,50	1
	Bal valve 3/4 NPT	25,00	1
	Port injection	7,13	4
	Volume Fittings (cm3)		234,1022957
	Échangeur de chaleur		
	Nombre de plaques chauffantes avec serpentins	6	
	perte échangeur de chaleur (cm3)	2105,82	
	Epaisseur moyenne du film plaque chauffante (cm)	0,0107	
	Film plaque chauffante (cm3)	59,64375168	
	Volume Échangeur@RT (cm3)	2165,463752	
	Expansion thermique volumique (160C)	1,00966	
	Volume ÉchangeurR (cm3)	2186,382132	
	Parties moule (cm3) (teflons + rebord de joint)	10	
	Volume de pertes Total (cm3)	2807,58	

ANNEXE 7 Injection

- 1- S'assurer que les vannes de distribution de l'huile de chauffage vont vers le moule Carter1/2
- 2- Démarrer le système de chauffage
- 3- S'assurer que le pot est propre de toute impureté et que la vanne de sortie située en bas du pot est fermée
- 4- Placer une plaque isolante sur le plateau de la balance
- 5- Placer le pot sur la plaque isolante et faire la remise à zéro
- 6- Fermer hermétiquement le pot et refaire le test de pression et de vide
- 7- Remplir le pot d'injection avec la quantité nécessaire de résine en s'assurant que le système de chauffage à eau est fermé
- 8- Démarrer le système de chauffage à eau
- 9- Démarrer la pompe de mélange
- 10- Mélanger pendant un certain temps
- 11- Mettre le pot sous vide quand la température de la résine atteint la température voulue.
- 12- À la température d'injection du moule :
 - Faire un test d'étanchéité sous pression dans la cavité de compaction
 - Faire un test de vide dans la cavité d'injection
- 13- Mettre la cavité de compaction sous vide (à l'aide de la machine de compaction)
- 14- Mettre la cavité d'injection sous vide (V1 et V2 fermées, V3 ouverte)
- 15- Faire un test de vide dans la cavité d'injection (V1 et V2 fermées. V3 ouverte). À la fin du test, la V3 doit être fermée.
- 16- Vérifier que toute la tuyauterie de la partie entrée est chauffée avec le ruban chauffant et isolé
- 17- Vérifier les paramètres d'injection en terme de température
- 18- Arrêter la pompe de mélange de la résine et le système de chauffage à eau
- 19- Mettre le pot sous pression

- 20- Ouvrir les vannes V2 et V3, fermer V1
- 21- Ouvrir la vanne V1 et surveiller la diminution du poids de la résine
- 22- Fermer les vannes V2et V3 quand la quantité calculée est atteinte
- 23- Lancer la compaction dynamique pendant la période de temps désirée
- 24- Fermer la vanne V3 dès qu'il y a de la résine qui sort du moule
- 25- Lancer la compaction statique pendant toute la durée de fabrication
- 26- Injection terminée, attendre la fin de la cuisson
- 27- Refroidir le moule jusqu'à une température sécuritaire en baissant la température du système de chauffage à l'huile et en enlevant les plaques isolantes autour du moule
- 28- Démoulage de la pièce

ANNEXE 8 Conversion d'unités

Température	Fahrenheit to Celsius: $C = (F - 32) \cdot \frac{5}{9}$	Celsius to Fahrenheit: $F = C \cdot \frac{9}{5} + 32$
Pression	1bar = 14.50377 Psi	1Psi = 2.036021 In.Hg