

Titre: Développement d'un système d'injection pour la fabrication des composites.
Title: composites.

Auteur: Robin Dubé
Author:

Date: 2009

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Dubé, R. (2009). Développement d'un système d'injection pour la fabrication des composites. [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/187/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/187/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: François Trochu, & Edu Ruiz
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME D'INJECTION
POUR LA FABRICATION DES COMPOSITES

ROBIN DUBÉ
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
NOVEMBRE 2009

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME D'INJECTION
POUR LA FABRICATION DES COMPOSITES

présenté par : DUBÉ, Robin

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

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

M. BIRGLEN Lionel, Ph.D., président

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

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

M.. DAOUD Ahmed, M.Sc.A., membre

DÉDICACE

À mes parents, Marie, Mario et ma femme Marie-Eve...

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein de l'équipe du CCHP et de l'École Polytechnique de Montréal avec le soutien financier de General Motors du Canada et la Fondation Canadienne pour l'Innovation (FCI). La fabrication et les essais expérimentaux ont eu lieu à l'École Nationale d'aérotechnique. Je tiens fortement à remercier tous ceux qui ont permis et participé à la réalisation de ce projet.

Dans un premier lieu, je désire remercier mon directeur Dr. François Trochu et mon co-directeur Dr. Edu Ruiz. Leur soutien et leur motivation depuis les 3 dernières années m'ont amené à prendre la décision d'effectuer une maîtrise en ingénierie. Ils m'ont offert une position de choix avec une équipe multidisciplinaire jeune et dynamique. De plus, la qualité de ce mémoire n'aurait été accessible sans la patience et la minutie de François Trochu.

Ensuite, je veux par-dessus tout offrir mes plus sincères remerciements à mon mentor tout au long du projet, Paul Trudeau. Il a été une source inépuisable de conseils, un ami et son cheminement représente un modèle à suivre pour ma carrière future. Je tiens également à remercier Pierre-Luc Harvey qui a travaillé sur la modélisation, Mouhcine Rifay, Alex Bourgeois et Christian-Charles Martel, qui m'ont toujours donné une aide technique efficace lorsque ce fut nécessaire.

Finalement, je tiens particulièrement à remercier Jean-François Désilets pour toutes ses idées ingénieuses apportées au projet et sa constante disponibilité à m'aider. Ma maîtrise aurait été tout autre sans lui.

Aussi, je remercie, François Trochu, Edu Ruiz et Ahmed Daoud, ainsi que le président Lionel Birglen, qui ont accepté d'être membres du jury.

RÉSUMÉ

Dans le cadre des travaux de recherche de la Chaire sur les composites à haute performance (CCHP) sur la production en série des composites, un nouveau système d'injection a été conçu et fabriqué. Un des buts visés avec un tel système est de mieux optimiser et commander les procédés de mise en forme des composites. Un autre objectif consiste à diminuer le temps et donc le coût de fabrication des composites permettant ainsi une utilisation plus fréquente de ces matériaux pour des productions en série.

Le système d'injection joue un rôle prédominant dans le moulage rapide des composites. Dans l'optique d'atteindre le temps de cycle le plus court possible et de réaliser des productions plus fiables, il est essentiel d'automatiser les différentes étapes de la production. La stratégie d'injection est mise en œuvre en fonction des équipements utilisés pour la fabrication. Un système d'injection inadéquat peut occasionner des pertes de temps et d'argent. Dans les procédés traditionnels de mise en forme par transfert de résine à basse pression (procédé RTM), des valves pneumatiques sont généralement utilisées. Ces valves permettent aux industriels d'automatiser les étapes de la fabrication et d'éliminer les tubes reliant normalement les ports d'entrée au système d'injection et les tubes d'évacuation de l'excès de résine aux événements. Malheureusement, ces outils typiquement pneumatiques sont fragiles et doivent être purgés avec un solvant, ce qui rend particulièrement laborieux les injections réalisées avec une résine époxy.

Ce phénomène a bien été étudié et compris dans l'industrie des polyuréthanes, notamment dans l'utilisation d'outillages à basse pression. Au cours des années, les équipements des systèmes d'injection dans cette industrie sont passés de la basse

pression pneumatique à une haute pression hydraulique. Les équipements ont vu leur fiabilité augmenter et la qualité des produits fabriqués s'est grandement améliorée.

Ce mémoire décrit les étapes de la conception, réalisé par Robin Dubé, d'un système d'injection de résine à deux composants, soit une résine polymère thermodurcissable de type époxy. L'innovation principale de ce système repose sur l'outil de commande du mélange : la tête de mélange avec jets convergents. Les travaux décrits dans ce mémoire ont permis de construire un système avec cette technologie à haute pression, adaptée aux résines époxy. On commence par une introduction aux matériaux composites et une présentation des technologies commerciales de mélange. Ensuite, le cahier des charges de notre système d'injection est établi dans le chapitre 3, ainsi que le choix des composantes requises pour sa construction. Ce même chapitre décrit les principales composantes choisies pour le développement du système d'injection et leurs fonctions. Le choix d'un mélangeur à haute pression est aussi justifié et son principe de fonctionnement y est décrit. Le chapitre 4 présente la synthèse de fonctionnement utilisée pour l'automate programmable, la modélisation du système, puis les différentes étapes de la fabrication et de l'assemblage du système. Le fonctionnement du système, sa mise en route et les résultats des premières injections sont expliqués au chapitre 5. Finalement, la conclusion souligne les avancées obtenues dans le domaine de l'injection des résines thermodurcissables de type époxy suite au développement de notre système d'injection. De plus, quelques recommandations sont faites, entre autre, pour l'intégration future d'un dispositif permettant l'injection simultanée d'un troisième composant dans la formulation de la résine.

ABSTRACT

A new injection system has been designed and manufactured at the chair on composites of high performance (CCHP). The focus of the chair is to manufacture high-performance composites for the high volume production industry. One of the goals with this system is to optimize and control the manufacturing process. Another objective is to reduce the fabrication time of composite structural parts, thus cutting production costs and hence, enabling a more widespread use of composite materials for high-volume applications.

The injection system plays an important role in achieving rapid molding. In order to achieve the fastest and the most reliable cycle times, it will be essential to automate the different processing steps. The injection strategy followed by the mixing head arrangement can either drive the process quickly or cost valuable time and possibly introduce unwanted process scrap. In traditional low pressure RTM processes, pneumatic valves are being used. These valves aid manufacturers in automating the injection process; additionally they help to eliminate throw-away tubing for feed lines and vents. Unfortunately these devices, typically pneumatic, are not robust and do not flush clean when using epoxies. With a rapidly curing epoxy resin this will most likely be an issue.

This phenomenon was well understood in the polyurethane manufacturing industry when companies used low pressure equipment. Over the years the industry moved from low pressure pneumatic systems to high pressure hydraulically actuated systems. The reliability of the equipment improved, as well as the quality of the final products.

This report looks at the development steps of an epoxy type bi-components thermoset polymer, made by Robin Dubé. The use of an impingement mixing head with an epoxy resin is the principal innovation of the system. The works described in this thesis has lead to the manufacturing of an injection system using high pressure mixing technology. We start by introducing composites materials and commercial mixing technologies. Then, the specifications of the injection system are established in the chapter 3 and the selection of the required parts for its construction is made. The operation of every part is explained, particularly the principle of the impingement mixing head. The chapter 4 looks at the operation steps used to program the programmable logic controller, the modelisation of the machine, as well as the manufacturing and the assembly of the system. In conclusion, the obtained results for the injection of an epoxy thermoset resin with our system are underlined and some recommendations are done.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES ANNEXES	XVII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 RAPPEL SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES ET LEURS PROCÉDÉS DE FABRICATION	5
1.1 Matériaux composites	5
1.1.1 Matrice	5
1.1.2 Renforts.....	7
1.2 Procédés de mise en forme	7
1.2.1 Procédés à moule ouvert	8

1.2.2	Procédés à moule fermé	9
1.3	Outils de mise forme	13
1.3.1	Moules.....	13
1.3.2	Systèmes de fermeture	14
1.3.3	Systèmes d'injection	14
CHAPITRE 2	REVUE DES PRINCIPAUX SYSTÈMES D'INJECTION ET DE LEURS COMPOSANTES	15
2.1	Méthodes de mélange.....	15
2.1.1	Mélangeur statique.....	16
2.1.2	Mélangeur dynamique.....	17
2.1.3	Mélangeur par jets convergents	19
2.2	Pompes	21
2.2.1	Pompes à déplacement positif.....	22
2.3	Machines d'injection existantes	26
CHAPITRE 3	CAHIER DES CHARGES ET CHOIX DES COMPOSANTES...	28
3.1	Cahier des charges	28
3.1.1	Performances de fonctionnement.....	29
3.1.2	Caractérisation rhéologique de la résine utilisée.....	31

3.1.3	Conditions d'utilisation au laboratoire.....	32
3.2	Solution proposée	33
3.3	Choix des composantes	36
3.3.1	Tête de mélange	36
3.3.2	Pompes à haute pression	41
3.3.3	Pompes de bourrage	45
3.3.4	Appareil de mesure du débit	46
3.3.5	Réservoirs et agitateurs	48
3.3.6	Filtre	50
3.3.7	Unité hydraulique.....	50
3.3.8	Capteurs	52
CHAPITRE 4	SYSTÈME DE COMMANDE, DÉFINITION DE L'ASSEMBLAGE ET FABRICATION	54
4.1	Automate programmable	54
4.1.1	Fonctionnement du système d'injection	56
4.1.2	Mode manuel.....	58
4.1.3	Logique de commande en température	58
4.1.4	Recirculation à basse pression	60

4.1.5	Recirculation à haute pression	60
4.1.6	Injection à débit contrôlé.....	61
4.1.7	Injection à pression contrôlée	61
4.2	Définition de l'assemblage.....	62
4.3	Fabrication du système.....	65
4.3.1	Châssis	65
4.3.2	Assemblage	66
CHAPITRE 5 MISE EN ROUTE ET PREMIERS RÉSULTATS		72
5.1	Fonctionnement du système	72
5.2	Mise en route et calibration.....	83
5.3	Premières injections.....	87
CONCLUSION.....		94
RÉFÉRENCES.....		97
ANNEXES.....		98

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Caractéristiques des pompes à pistons	23
Tableau 2.2: Caractéristiques des pompes à vérin	25
Tableau 2.3 : Quelques propriétés de 7 systèmes d'injection	26
Tableau 3.1 : Caractéristiques de fonctionnement requises	29
Tableau 3.2 : Soumissions obtenues pour la tête de mélange	38
Tableau 3.3 : Identification des détails de la Figure 3.6	40
Tableau 3.4 : Soumissions obtenues pour les pompes à haute pression	44
Tableau 3.5 : Soumissions obtenues pour les débit-mètres	47
Tableau 3.6 : Soumissions obtenues pour les réservoirs.....	49
Tableau 3.7 : Soumissions obtenues pour les agitateurs	50
Tableau 3.8 : Soumissions obtenues pour les capteurs	52
Tableau 4.1 : Calcul des entrées et sorties du PLC	55
Tableau 4.2 : Différentes étapes de la logique de chauffage.....	58
Tableau 4.3 : Nombres de Reynolds pour la résine et le durcisseur pour deux tailles de tubes	70
Tableau 5.1 : Informations sur les accessoires mécaniques du système	73
Tableau 5.2 : Paramètres des menus de la page de configuration.....	77
Tableau 5.3 : Description des éléments des deux orifices de la tête de mélange.....	86

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Schéma du procédé de moulage par transfert de résine.....	12
Figure 1.2: Schéma du procédé d'injection flexible.	12
Figure 2.1: Mélangeurs statiques typiques (gauche) et mélangeur assemblé sur une valve d'injection (droite).....	16
Figure 2.2: Schéma d'un mélangeur dynamique (gauche) et photographie d'une tête de mélange dynamique (droite).	18
Figure 2.3: Schéma (gauche) et photo (droite) d'une tête de mélange.	20
Figure 2.4: Schémas de deux différentes techniques pour mouvoir les pistons.	23
Figure 2.5: Photo (gauche) et schéma (droite) d'une pompe à vérin.	24
Figure 3.1 : Viscosité en fonction de la température de la résine Lindoxy 190.....	31
Figure 3.2 : Presse du laboratoire LFIC.	32
Figure 3.3 : Schéma complet du nouveau système d'injection avec mélange par jets convergents.	33
Figure 3.4 : Schéma de fonctionnement pour un des deux composants de la machine d'injection.	34
Figure 3.5 : Schéma de la tête de mélange FPL10hp fermée (gauche), ouverte (centre) et en photo (droite).	39
Figure 3.6 : Principe d'insertion d'un troisième produit.....	40
Figure 3.7: Pression en fonction du temps pour une pompe à vérin et une pompe multi- pistons. Volk [6]	43
Figure 3.8 : Pompe multi-pistons rotatifs de Rotary Power.....	45

Figure 3.9 : Valve hydraulique et unité hydraulique (droite).....	51
Figure 3.10 : Position de chaque capteur sur les circuits.	53
Figure 4.1: Photo de l'interface-usager PanelView Plus 700.	57
Figure 4.2 : Positionnement en largeur (gauche) et linéaire (droite) des éléments de machines d'injection.	63
Figure 4.3 : Vues isométriques de la modélisation finale du système d'injection.....	64
Figure 4.4 : Coupage et soudure du châssis.	66
Figure 4.5 : Châssis et réservoirs après la peinture.	66
Figure 4.6 : Vue de la machine avant l'isolation thermique.	67
Figure 4.7 : Photo de la machine d'injection assemblée avant l'isolation thermique.....	68
Figure 4.8 : Caractéristiques du tube de liaison entre le système et la tête de mélange. .	71
Figure 5.1 : Position des composantes mécaniques pour l'opérateur.	74
Figure 5.2 : Page d'accueil de l'interface utilisateur.....	76
Figure 5.3 : Page donnant une vue d'ensemble du procédé.	78
Figure 5.4 : Page pour injecter avec commande en débit de l'interface utilisateur.	79
Figure 5.5 : Page de calibration de l'interface-usager.....	81
Figure 5.6 : Page d'enregistrement des données de l'interface-usager.....	82
Figure 5.7 : Roulette de l'ajustement volume déplacé par les pistons de la pompe à haute pression.	85
Figure 5.8 : Schéma d'un ensemble orifice et aiguille de la tête de mélange.	86
Figure 5.9 : Échantillon mélangé à la main.....	87
Figure 5.10 : Premier échantillon de résine injecté.....	88

Figure 5.11 : Schématisation des cônes de convergence des jets.	90
Figure 5.12 : Afficheurs de pression facilitant l'ajustement des orifices de la tête de mélange à haute pression.	91
Figure 5.13 : Dernier échantillon de résine époxy injectée avec le nouveau système....	92
Figure 5.14 : Vue des stries créées lors des injections.....	93

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Différents tableaux référencés au Chapitre 1	98
Annexe 2 : Précisions sur les systèmes de fermeture.....	100
Annexe 3 : Revue détaillée des systèmes d'injection existants.	103
Annexe 4 : Caractéristiques de la résine Lindoxy 190 et du durcisseur LS 252V.....	115
Annexe 5 : Vue de l'assemblage de la tête de mélange FPL 10 hp de Cannon.....	118
Annexe 6 : Fiche technique des pompes à haute pression de Rotary Power.	119
Annexe 7 : Fiche technique (page 1) de la pompe de bourrage de Viking GV-1424....	120
Annexe 8 : Fiche technique des débit-mètres VC0,4-F4-PS de Cannon.	121
Annexe 9 : Liste détaillée des entrées et sorties du PLC.	123
Annexe 10 : Liste de matériel pour l'automate programmable.....	128
Annexe 11 : Schéma hydraulique	131
Annexe 12 : Liste des fichiers accessibles dans un répertoire électronique.	132

INTRODUCTION

La mise en forme des matériaux composites à matrice thermodurcissable requiert qu'une résine liquide imprègne un renfort fibreux dans un moule de géométrie désirée. Les mécanismes qui régissent l'écoulement de la résine à l'intérieur d'un renfort poreux ont fait et font toujours l'objet d'études scientifiques. Plusieurs lois de comportement existent pour prédire et simuler les phénomènes d'imprégnation de pièces composites. Elles permettent de mieux concevoir les moules et d'optimiser les stratégies d'injection. Les travaux de caractérisation ont permis d'identifier les paramètres qui ont une influence sur la qualité du produit final. Toutes ces recherches seraient cependant vaines sans la possibilité de commander efficacement des paramètres d'injection comme le débit, la pression et la température d'injection de la résine. Les systèmes d'injection sont nécessaires en recherche pour aider à valider les démarches théoriques visant à comprendre les phénomènes d'écoulement d'une résine polymère réactive à travers un renfort fibreux. Dans l'industrie, ils permettent de commander les paramètres d'injection qui gouvernent la production rentable des pièces composites de qualité.

Les machines d'injection sont utilisées depuis longtemps dans plusieurs industries. Leur complexité va du simple pot ouvert à l'air ambiant dans lequel la résine pré-mélangée est aspirée vers le moule jusqu'aux systèmes complètement automatisés qui commandent avec précision plusieurs paramètres. Dans le domaine des résines thermodurcissables comme les époxy par exemple, les équipements d'injection doivent mélanger deux ou plusieurs produits et ensuite les injecter dans le moule. Les techniques de mélange présentement utilisées sont essentiellement à basse pression et permettent d'atteindre une bonne qualité de mélange pour une gamme limitée de débit et de pression. Il y a beaucoup de place pour l'amélioration de la qualité des mélanges, mais surtout au niveau de la robustesse et de la fiabilité des systèmes d'injection pour époxy.

Les recherches menées dans d'autres industries comme celle des polyuréthanes par exemple ont permis de progresser des techniques de mélange à basse pression vers les technologies à haute pression. Les facteurs motivant cette migration sont principalement la robustesse, la précision et la fiabilité des équipements à haute pression. L'objectif central du projet de maîtrise est de développer un système d'injection d'une résine thermodurcissable époxy bi-composant robuste et fiable. Cette machine d'injection utilise un système de mélange à haute pression qui permet d'obtenir des mélanges de qualité contrôlée, même dans une production en série.

Les travaux de développement du système d'injection décrit dans le présent ouvrage sont l'œuvre de l'auteur, c'est-à-dire moi-même, Robin Dubé. C'est à partir d'une vague idée innovatrice de Paul Trudeau que j'ai démarré mes travaux de maîtrise. J'ai mené les travaux complets du développement du système, de la modélisation sur ordinateur jusqu'à la mise en route, en passant par le choix des équipements et l'assemblage mécanique. À quelques reprises la Fondation Canadienne pour l'Innovation est mentionnée, mais il faut préciser que cet organisme n'a participé à aucune décision. C'est dans le but d'obtenir un système d'injection répondant à ses besoins que la Chaire à décider d'effectuer ce travail exceptionnel et unique de développement. Suite à cette introduction, le mémoire est organisé en cinq chapitres comme suit :

1. Le Chapitre 1 offre au lecteur un rappel sur les matériaux composites et leurs procédés de mise en forme.
2. Le Chapitre 2 présente une revue de la littérature sur les différentes composantes utilisées dans les systèmes d'injection comme les pompes et les

têtes de mélange. Quelques caractéristiques des principales machines d'injection existantes offertes par divers fabricants sont résumées.

3. Le Chapitre 3 expose les principales étapes du développement du système d'injection. Le cahier des charges est détaillé, de même que les circuits chimiques des principales composantes et les éléments constitutifs du système. Ce même chapitre donne ensuite la liste des fournisseurs choisis.
4. Le Chapitre 4 couvre premièrement les travaux faits pour le système de commande. Il dévoile ensuite la conception de l'assemblage du système sur ordinateur selon les contraintes du cahier des charges. Le chapitre se termine avec un résumé sur les différentes étapes de fabrication et d'assemblage du système dans le Laboratoire de fabrication intégrée des composites (LFIC) de l'École Polytechnique de Montréal à St-Hubert.
5. Le Chapitre 5 décrit en détail la mise en route du système, son fonctionnement et les résultats des premières injections. Une attention particulière est donnée à la première calibration du système.

La conclusion dresse un bilan sur les travaux menés, donne des recommandations pour les travaux futurs et suggère certaines améliorations possibles du système.

Trois contributions originales sont présentées dans ce mémoire :

1. La machine d'injection originale développée avec mélangeur à haute pression tient compte des exigences industrielles futures pour la fabrication des

composites à haut volume de production. Les composantes utilisées pour cette machine font partie des besoins industriels pour une production en série à haut débit. Une technologie d'injection à haute pression a été développée en s'inspirant des machines d'injection de polyuréthanes. Les coûts initiaux reliés à celle-ci sont plus élevés, mais ils ont démontré par le passé une robustesse hors de l'ordinaire atteignant le million d'injections avec très peu d'entretien.

2. Le choix de composantes bien adaptées pour la production en série des composites à matrice thermodurcissable constitue un autre aspect innovateur de ce projet. L'utilisation d'une telle technologie n'existe pas pour les résines thermodurcissables. Ce projet a le potentiel pour devenir le premier pas d'une avancée significative pour l'injection des polymères thermodurcissables à haute cadence.
3. La programmation de l'automate a été réalisée sur mesure avec le logiciel RS Logix 5000 de Allen-Bradley. Elle repose sur une large expérience en injection de polymères et permet un commande précis et flexible du procédé.

CHAPITRE 1

RAPPEL SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

ET LEURS PROCÉDÉS DE FABRICATION

1.1 Matériaux composites

Présentement reconnus pour leurs performances élevées dans les industries aéronautique, automobile, militaire et sportive, la production des matériaux composites connaît présentement une croissance rapide. À performance mécanique équivalente, ils permettent une réduction de poids par rapport aux autres matériaux, tout en assurant une bonne résistance à la corrosion. Par définition, « un composite est le résultat de l'association de plusieurs matériaux non miscibles, dont les propriétés combinées sont mises à profit, comme dans le cas d'un renfort fibreux et d'une matrice polymère thermodurcissable », Labouly [1]. Les charges mécaniques sont supportées par le renfort et la matrice protège le renfort de l'environnement extérieur, assure la cohésion du matériau et distribue les charges au renfort.

1.1.1 Matrice

Les matrices peuvent être de différents types : métalliques, céramiques et polymères. La majeure partie des composites est fabriquée à l'aide des matrices polymères : leur température de mise en œuvre permet l'utilisation d'équipements plus simples. Une bonne adhérence est obtenue entre la matrice polymère et les fibres, qui assure une

excellente répartition des charges mécaniques. Les matrices polymères comprennent deux grandes familles, les thermoplastiques et les thermodurcissables.

1.1.1.1 Thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des polymères caractérisés par de longues chaînes moléculaires. Leur cohésion est assurée par de faibles liaisons de Van der Waals ce qui leur permet de facilement se liquéfier avec une augmentation de température, pour prendre une autre forme. Cela constitue le principal attrait de ce type de matrice : elle est stockée sous forme de billes et peut être simplement fondue, puis mise en forme. Les thermoplastiques les plus courants sont les suivants : le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le sulfure de polyphénylène (PPS), le polyether ether ketone (PEEK) et les polyamides (PA).

Avantages

- Mise en forme propre
- Entreposage simple à température ambiante
- Temps de fabrication rapide
- Réparation de défauts possible
- Recyclable (en principe)

Inconvénients

- Haute viscosité (imprégnation difficile des renforts fibreux)
- Déformables à faible température

1.1.1.2 Thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des polymères qui, lors de la polymérisation, subissent une transformation de leurs chaînes moléculaires appelée réticulation et forment un réseau tridimensionnel indissociable. Les thermodurcissables les plus courants sont les

suivants : le polyester, le vinylester, l'époxy, le polyuréthane, le phénolique et le polyimide.

<u>Avantages</u>	<u>Désavantages</u>
<ul style="list-style-type: none"> • Faible viscosité • Liquides à température ambiante • Polymérisation contrôlée 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessitent la manipulation de constituants dangereux • Entreposage limité et risqué • Non-recyclables

1.1.2 Renforts

Les renforts fibreux sont généralement faits de verre, d'aramide ou de carbone. Ils se présentent sous forme de fibres courtes, de mats et de fibres unidirectionnelles ou tissées. Les fibres sont la principale cause de l'anisotropie des composites : leur orientation donne une structure hétérogène qui présente des propriétés mécaniques différentes selon chaque direction de l'espace. Les renforts confèrent aux composites rigidité et résistance. Ils supportent les charges appliquées sur les pièces et améliorent ainsi beaucoup les propriétés de la matrice. Le Tableau A de l'Annexe 1 résume les avantages et désavantages des trois principales fibres.

1.2 Procédés de mise en forme

Il existe une différence majeure entre la construction de structures métalliques et les composites. Les utilisateurs des matériaux métalliques disposent de pièces de formes

simple : plaque, tube, tuyau etc., qu'ils percent, coupent et soudent afin d'obtenir un produit final. La mise en œuvre des matériaux composites exige généralement de travailler directement avec les produits bruts, le renfort et la matrice, pour fabriquer directement la pièce désirée. Le matériau est créé en même temps que la pièce est fabriquée. La grande diversité des formes que peuvent prendre les matériaux composites a donné lieu à l'élaboration de plusieurs méthodes de mise en œuvre. Les différents procédés de fabrication de matériaux composites ont été répertoriés par Gutowski [2]. ils peuvent être classés en deux familles : les procédés à moule ouvert et à moule fermé.

1.2.1 Procédés à moule ouvert

La fabrication des matériaux composites à base de résine thermodurcissable consiste à mouiller un renfort fibreux avec la matrice polymère, tout en lui donnant la forme désirée avant que la polymérisation ne se produise. Avec l'utilisation d'un moule ouvert, un côté de la pièce est en contact avec le moule tandis que l'autre est à l'air ambiant. De ce fait résultent des pièces finales dont la qualité du fini de surface n'est possible que sur les parois directement en contact avec le moule. De plus, à moins qu'il y ait utilisation de renforts pré-imprégnés, ce type de pratique ne permet pas d'appliquer une force de compaction suffisante lors de la consolidation du composite. Ainsi, le taux volumique de fibres obtenu, qui est directement en lien avec les propriétés mécaniques du composite, est assez faible. Les utilisateurs des procédés à moule ouvert s'exposent aussi à des risques pour leur santé en raison des émanations de vapeurs de styrène ou autres produits toxiques.

Les principaux procédés de cette famille sont le moulage contact, la projection simultanée de fibres et l'enroulement filamentaire. Les principaux avantages de ces procédés résident dans le développement rapide des outillages pour produire de

nouvelles pièces et le coût réduit des investissements initiaux. Les inconvénients sont les émissions volatiles élevées, les risques pour la santé des travailleurs et l'inconstance des résultats.

1.2.2 Procédés à moule fermé

La seconde classe de procédés utilise des moules fermés. L'objectif reste le même : imprégner le renfort fibreux en lui donnant sa forme final avant le gel de la résine thermodurcissable. Toutes les surfaces de la pièce moulée sont en contact avec le moule, qui comprend une partie inférieure et supérieure. Le moulage par transfert de résine (LCM) s'effectue en quatre étapes : le positionnement d'une préforme fibreuse dans l'outil et la fermeture du moule, le cycle d'injection, la polymérisation de la résine et le démoulage. Les équipements nécessaires pour ces procédés sont d'abord le moule, un système d'ouverture et de fermeture un système d'injection et dans certains cas, un système de commande de la température du moule.

1.2.2.1 Procédés de fabrication par infusion

Les différents procédés de fabrication par infusion consistent à faire le vide dans la cavité d'un moule composé d'une paroi rigide recouverte par un film plastique étanche. Une résine polymère est infusée par gravité à travers le renfort fibreux sous l'effet du vide appliqué. Les différents procédés d'infusion, aussi référencés sous les acronymes VARI (« *Vacuum Assisted Resin Infusion* »), VARTM (« *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* ») et RIFT (« *Resin Infusion under Flexible Tooling* »), ont fait l'objet d'une revue de littérature par Williams [3].

Avantages des procédés d'infusion

- L'exposition des opérateurs à des risques industriels est réduite : le contact avec des produits nocifs et l'émanation de vapeurs styrène, inhérents aux procédés à moules ouverts, sont considérablement réduits.
- Différentes géométries peuvent être infusées. Les pièces ne sont limitées, ni en taille ni en forme.
- Grâce à la membrane flexible, la pression est appliquée uniformément en tout point.
- L'application du vide à l'intérieur du moule retire l'air, les volatiles et l'excès de résine.
- L'équipement requis est rudimentaire : une pompe, un réservoir de vide et des lignes d'alimentation peuvent être achetés à faible coût et sont peu volumineux.
- La fabrication des pièces est effectuée dans un local commun à température et pression ambiantes.

Inconvénients

- Les cycles de fabrication sont longs.
- L'automatisation est difficile.
- La préparation du moule pour chaque infusion est longue et délicate, notamment au niveau de l'étanchéité lors de la mise sous vide.
- La surface finale côté membrane est imprécise.
- Beaucoup de déchets non-réutilisables sont créés.

1.2.2.2 Procédé avec renforts pré-imprégnés et autoclave

Le procédé le plus utilisé en aéronautique consiste à positionner dans un moule ouvert des fibres pré-imprégnées et des couches de renforts tissés avec différentes orientations et de mettre le tout sous vide. Ensuite, le montage est placé à l'intérieur d'un autoclave permettant de le pressuriser à environ 6 bars et de le chauffer selon le cycle de cuisson recommandé. Il permet de produire des pièces de qualité respectant les normes élevées de l'industrie aéronautique. Les coûts reliés à ce type de production sont très élevés. Ceci a motivé le développement d'autres procédés moins dispendieux. Les principaux coûts sont générés par l'autoclave qui doit pouvoir contenir des pièces de grande taille et par le prix élevé des pré-imprégnés.

1.2.2.3 Moulage par transfert de résine

Le procédé de moulage par transfert de résine (RTM) consiste en une injection à basse pression d'une matrice polymère à travers un renfort sec placé à l'intérieur d'un moule fermé rigide. L'utilisation du procédé pour fabriquer des composites à matrice thermodurcissable est relativement récente (depuis 3 décennies), mais connaît une forte expansion. Grâce à la rapidité du procédé et à la quantité réduite de consommables, le RTM est bien adapté aux productions en moyenne série (de l'ordre de 10,000 pièces/an Gutowski [2]). Ce type de procédé intéresse notamment l'industrie automobile.

Examinons en détail les différentes étapes du procédé :

- a) Une préforme est découpée aux dimensions finales de la pièce, puis déposée dans la partie inférieure du moule.

- b) Le moule est fermé en s'assurant de son étanchéité afin de prévenir les fuites de résine. Une résine liquide catalysée est ensuite injectée sous pression et s'écoule à travers le renfort fibreux.
- c) La pièce polymérisé grâce à l'action du catalyseur ou à un apport calorifique.
- d) Le moule est ouvert et la pièce est démoulée.

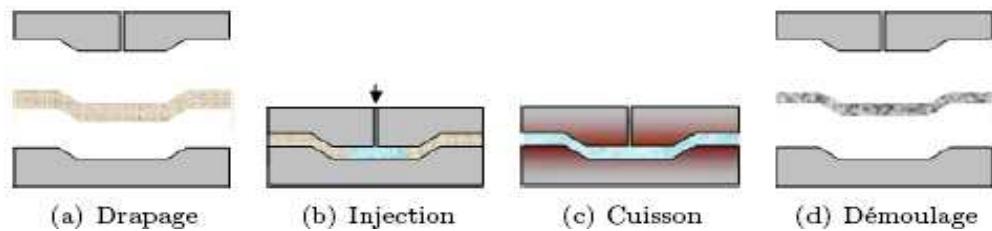


Figure 1.1: Schéma du procédé de moulage par transfert de résine.

Il existe plusieurs variantes du procédé RTM dans l'industrie. Parmi celles-ci l'injection flexible est le procédé sur lequel ont porté les principaux travaux décrits dans ce rapport. La Figure 1.2 décrit un moule flexible typiquement utilisé dans ce nouveau procédé.

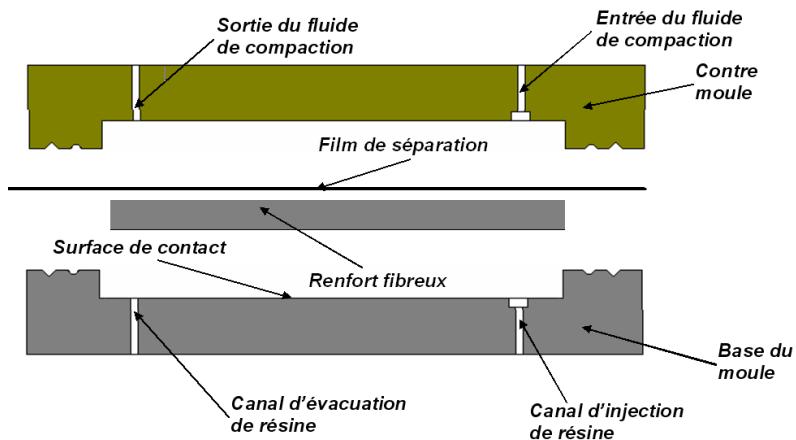


Figure 1.2: Schéma du procédé d'injection flexible.

Ce procédé développé par la chaire permet un temps de production plus court que le RTM. La clé de ce procédé réside dans l'utilisation d'un fluide de compaction qui facilite et accélère l'imprégnation de la résine à travers le renfort fibreux. Les étapes pour la mise en forme par injection flexible sont les suivantes :

1. Positionner la préforme fibreuse et fermeture du moule.
2. Injecter une quantité calculée de résine dans la cavité contenant le renfort.
3. Compackter le composite pour compléter l'imprégnation du renfort et atteindre le taux volumique de fibre désiré.
4. Consolider le composite et polymériser la résine.
5. Démouler la pièce à la fin de la polymérisation.

1.3 Outils de mise forme

Suivant l'évolution des techniques de mise en forme des composites, des outils de plus en plus performants et appropriés ont vu le jour. Les équipements destinés à la fabrication des composites par transfert de résine à l'intérieur d'un moule fermé se retrouvent dans trois grandes catégories : les moules, les systèmes de fermeture et les systèmes d'injection.

1.3.1 Moules

Il existe multiples méthodes de construction de moules. Allant des moules en bois jusqu'aux moules en alliage ferreux ultra-résistants, plusieurs solutions s'offrent aux fabricants de composites. Le Tableau B de l'Annexe 1 résume et compare les

caractéristiques de plusieurs types de moules. Les moules en composite sont légers et s'adaptent particulièrement bien aux productions en petite série. Les moules en aluminium sont plus lourds, mais offrent une excellent conductibilité thermique facilitant la commande en température de l'outil. Il s'adaptent bien aux productions en moyenne série. Enfin, les moules en acier représentent la solution de choix pour les productions en grande série. Ils sont très résistants, permettent un fini de surface de première qualité et ils supportent de hautes pressions. Cependant, ils sont très lourds et nécessitent des systèmes de fermeture puissants.

1.3.2 Systèmes de fermeture

Pour la production en série de pièces composites, il est essentiel de posséder un système permettant de manipuler facilement les moules. Dans le contexte de production en série, les manipulations des moules doivent être précises et ergonomiques pour les opérateurs. Selon le procédé de mise en forme utilisé et le type de moule choisi, le système de mesure doit répondre à des critères mécaniques et géométriques spécifiques. Des définitions plus précises se trouvent à l'Annexe 2 pour les procédés suivants : RTM, CRTM, ACRTM et l'injection flexible.

1.3.3 Systèmes d'injection

Le troisième élément nécessaire pour une production en série des composites est le système d'injection. Celui-ci commande l'injection de la résine thermodurcissable dans le moule fermé contenant le renfort fibreux. La commande peut porter uniquement la pression ou s'étendre à plusieurs variables. Ce mémoire porte sur le développement d'un système d'injection original pour une résine époxy bi-composant. Une revue des principaux systèmes d'injection existants est faite au Chapitre 2 suivant.

CHAPITRE 2

REVUE DES PRINCIPAUX SYSTÈMES D'INJECTION ET DE LEURS COMPOSANTES

On ne peut développer un nouveau système d'injection innovateur si l'on n'est pas bien informé sur ce qui existe déjà. Le présent chapitre décrit premièrement les principales méthodes de mélange utilisées avec les résines polymères thermodurcissables. Après avoir pesé les avantages et inconvénients de chaque technique, le mélange par jets convergents qui est la plus prometteuse et innovante avec la résine époxy est revue plus en détail. Ensuite, les deux catégories de pompes essentiellement utilisées lors du mélange par jet convergent sont analysées. Puis, un résumé critique des principaux systèmes d'injection commercialisés clos le chapitre.

2.1 Méthodes de mélange

Le cœur d'un système d'injection industriel est sa tête de mélange. Plusieurs technologies existent pour mélanger les différents composants qui font partie de la formulation de résine à injecter. Bien évidemment, certaines machines utilisées en recherche ou pour des productions en petit volume fonctionnent avec une résine pré-mélangée par l'utilisateur. Outre ces simples systèmes, le choix des pièces pour une machine d'injection dépend des besoins de la tête de mélange et du cahier des charges. Un résumé des principaux équipements de mélange est offert par Rudd et al.[4]. Il énumère entre autres les buses et valves d'injection, les mélangeurs statiques et les têtes de mélange par jets convergents. À ceux-ci sera ajoutée une description des mélangeurs

dynamiques qui utilise le mouvement d'une géométrie mécanique à l'intérieur du débit des composants de la résine pour leur assurer un mélange de qualité.

2.1.1 Mélangeur statique

Le mélangeur statique est utilisé dans de multiples applications industrielles devant délivrer un polymère bi-composant comme les adhésifs, scellants et résines thermodurcissables. Les mélangeurs statiques se retrouvent souvent sous une forme cylindrique telle qu'illustrée sur la Figure 2.1.



Figure 2.1: Mélangeurs statiques typiques (gauche) et mélangeur assemblé sur une valve d'injection (droite).

Le mélangeur statique est généralement relié à une buse d'injection ou une valve permettant de démarrer et d'arrêter le passage des fluides à mélanger, puis de le nettoyer avec un solvant. Les deux parties entrent par une extrémité du mélangeur et sont forcées

à se mélanger à l'aide d'ailettes fixes qui donnent un mouvement de rotation à l'écoulement. En sortie du mélangeur statique, un seul produit plus ou moins uniforme peut être injecté sous pression.

Les mélangeurs statiques présentent les avantages suivants :

- Peut être utilisé sur une large gamme de viscosités de fluide.
- Permet le mélange en continu.
- Requiert peu d'espace.
- Aucune pièce n'est en mouvement.
- Insensible à la température.
- Peu coûteux.

Cependant, ce type de technologie est inadapté à une production en série de plus de 10 000 pièces par an. Tout d'abord, le mélangeur doit être nettoyé avec du solvant et de l'air pressurisé à chaque injection, ou il doit être remplacé. Or ce nettoyage est rarement parfait. Ceci entraîne une variabilité dans les conditions de production et donc dans la qualité des pièces. De plus, chaque injection engendre une perte de polymère significative, qui est incompatible avec une production en série. Le débit maximal obtenu avec un mélangeur statique reste relativement faible. Ceci empêche de diminuer adéquatement les temps de cycle. Il existe cependant d'autres alternatives comme les mélangeurs dynamiques.

2.1.2 Mélangeur dynamique

Afin d'améliorer la qualité des pièces composites et de mélanger des produits plus visqueux, des mélangeurs dits dynamique ont été développés. Une tête de mélange dynamique commande les débits d'entrée de deux ou plusieurs liquides dans une

chambre cylindrique où tourne une vis de mélange. La Figure 2.2 montre un simple schéma à gauche d'un mélangeur dynamique et une photographie à droite.

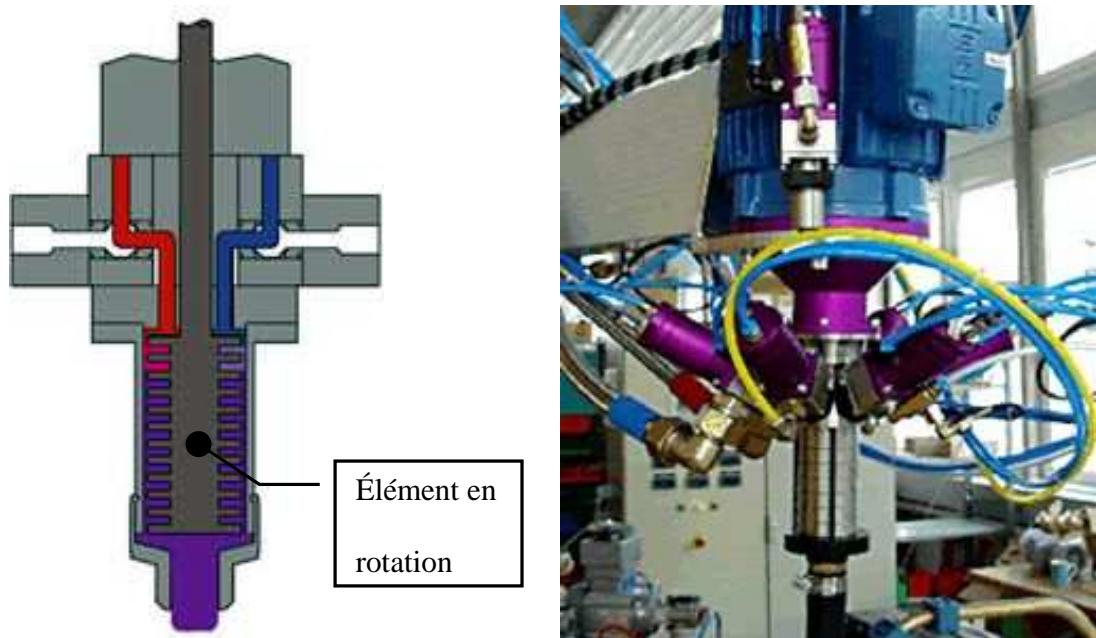


Figure 2.2: Schéma d'un mélangeur dynamique (gauche) et photographie d'une tête de mélange dynamique (droite).

Le mélangeur dynamique permet d'atteindre une bonne qualité de mélange. Ce type de mélangeur est disponible en plusieurs dimensions et styles. Son coût est évidemment plus élevé que celui des mélangeurs statiques. Les inconvénients reliés à cette technologie sont la limite en débit et le besoin de nettoyer la chambre de mélange au solvant et à l'air après chaque injection. Il existe aussi des mélangeurs qui combinent les technologies statiques et dynamiques pour répondre aux exigences du marché. La troisième catégorie de mélangeurs repose sur une technologie totalement différente : le mélange par jets convergents à haute pression.

2.1.3 Mélangeur par jets convergents

Les têtes de mélange par jets convergents furent développées pour l'industrie des mousses polyuréthanes utilisant le procédé de moulage par injection de produits réactifs (RIM, « *Reaction Injection Molding* »). Les valves et buses d'injection conventionnelles sont trop lentes, salissantes et désordonnées pour le RIM, Macosco [5]. La technique de mélange par jets convergents consiste à forcer l'interpénétration de deux ou plusieurs jets à haute pression, typiquement de 100 à 200 bars, à l'intérieur d'un cylindre non pressurisé. Simple et efficace, il en résulte un mélange continu permettant d'atteindre de grands débits d'injection. Cette technologie a fait depuis longtemps ses preuves pour le procédé RIM. Le premier outil de mélange par jet convergent a été reporté par Harreis (1969) tandis que la première machine de RIM avec auto-nettoyage et recirculation a été décrite par Pahl et Schlüter (1971). Les têtes de mélange par jets convergents possèdent les caractéristiques suivantes :

- Recirculation des réactifs près de la chambre de mélange pour maintenir la température et l'uniformité des produits, et assurer une réponse rapide pour l'injection.
- Valves à ouverture rapide assurant une commande stoechiométrique du mélange dès le début de l'injection.
- Buses d'injection réglables pour accélérer les jets convergents à grande vitesse.
- Chambre de mélange à l'endroit où les jets convergents se rencontrent.
- Conception de la chambre pour assurer son remplissage rapide pour la convergence des jets.
- Piston autonettoyant expulsant tout réactant hors de la chambre de mélange à la fin de l'injection.

La Figure 2.3 montre à gauche le schéma d'une tête de mélange régulière et une photographie à droite. La partie inférieure du schéma permet de voir les deux entrées de réactants en lignées l'une vers l'autre avec un léger angle.

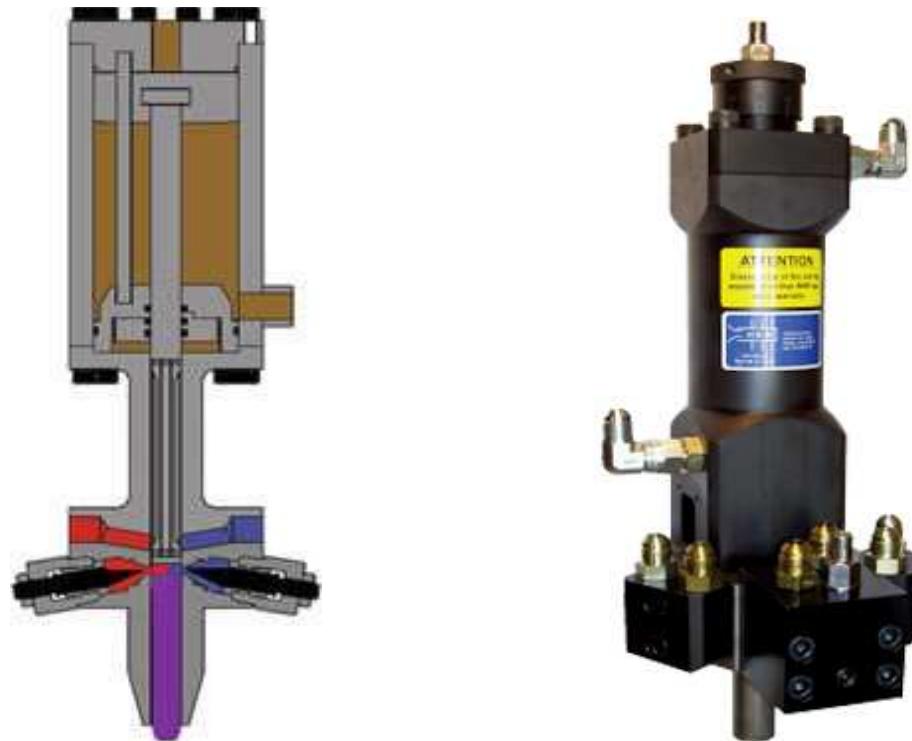


Figure 2.3: Schéma (gauche) et photo (droite) d'une tête de mélange.

La technologie de jets convergents à haute pression est certainement celle qui répond le mieux aux exigences de l'industrie avec les avantages et inconvénients suivants :

Avantages

- Grande variété de débits possibles.
- Excellente qualité de mélange.
- Possibilité de mélanger plus de

Inconvénients

- Coûteux (10 à 20 K\$).
- Nécessite une unité hydraulique haute pression pour être opérée.

- deux produits.
- Système autonettoyant.
- Aucun solvant requis.
- Aucun gaspillage de réactants.
- Robuste (garanti pour un minimum de 100,000 injections).
- Pompes à haute pression requises pour injecter les réactants dans la tête de mélange.

L'incorporation d'une telle technologie sur une machine d'injection n'est pas simple. Tel qu'indiqué dans les inconvénients, ceci requiert des équipements à haute pression, mais en revanche, ce type d'équipement est en général plus robuste et fiable, deux qualités particulièrement importantes pour la production en série. Une fois la tête de mélange choisie, le concepteur d'équipement d'injection doit faire face à un second choix : le type de pompe pour les réactants.

2.2 Pompes

Il existe une vaste gamme de pompes disponibles à travers le monde. Ce dispositif permettant d'aspirer ou de refouler un fluide a initialement été inventé pour le transport de l'eau. Depuis le début de l'ère industrielle, de multiples technologies de pompes ont été développées et adaptées pour certaines tâches spécifiques ou des fluides particuliers.

Les pompes peuvent être classées de différentes façons. Volk [6] propose de les diviser en deux familles selon leur principe de fonctionnement, soit les pompes cinétiques et les pompes à déplacement positif. Les pompes cinétiques provoquent un changement de pression pour pomper un fluide qui s'écoulera naturellement de la région de haute pression vers celle de basse pression. Ce type de pompe ne permet pas de mesurer la quantité de fluide pompé, ni d'en commander le débit. Elles sont adaptées

aux fluides de faible viscosité, fonctionnent à basse pression et en débit continu. Ces caractéristiques les rendent difficilement utilisables dans le domaine de l'injection des plastiques.

D'un autre côté, les pompes à déplacement positif sont couramment utilisées dans les procédés de fabrication par injection. Elles permettent une commande précis du volume et du débit. Des fluides d'une large gamme de viscosité peuvent être pompés et atteindre de très hautes pressions.

2.2.1 Pompes à déplacement positif

Les pompes à déplacement positifs utilisent différents mécanismes pour prendre un certain volume de fluide, le mettre sous pression et l'évacuer. Les principaux mécanismes utilisés sont : les pistons radiaux ou axiaux, les lobes, engrenages, vannes coulissantes, vis, tube flexible, impulsor flexible, arbres sinusoïdaux, diaphragmes et vérins. Les principes de fonctionnement des principaux types de pompes d'intérêt pour le projet seront décrits dans la suite. Les mécanismes de choix pour l'injection des plastiques sont les pistons et les vérins. Leur capacité à pomper des fluides chargés et leur commande précise en volume sont deux caractéristiques qui ont motivé leur utilisation.

2.2.1.1 Pompe à multiples-pistons

La catégorie des pompes multi-pistons englobe plusieurs types de pompes. Les pistons peuvent être entraînés de différentes façons. La Figure 2.4 illustre deux de ces méthodes mécaniques. Il faut bien comprendre que la grande majorité des pompes sont

entraînées par un moteur électrique. Ainsi, un mécanisme doit permettre de passer du mouvement rotatif de l'arbre du moteur vers le mouvement de translation des pistons.

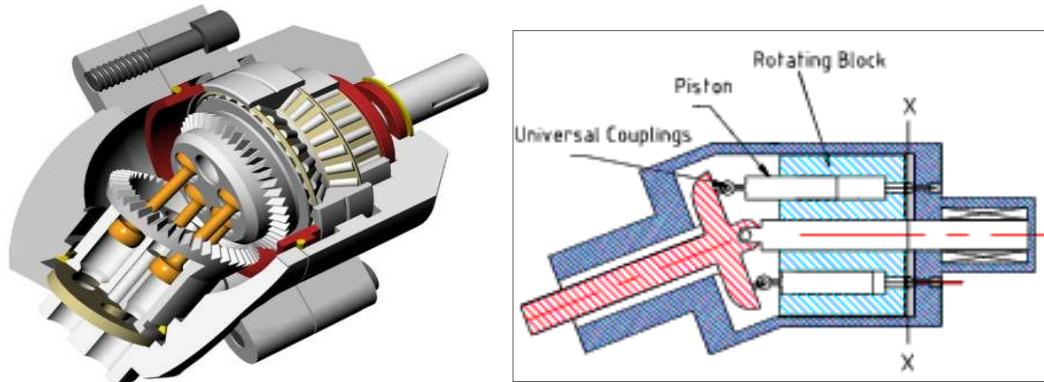


Figure 2.4: Schémas de deux différentes techniques pour mouvoir les pistons.

Typiquement, plusieurs pistons sont utilisés dans ce type de pompe. Il en résulte un débit et une pression quasi-uniforme. Les caractéristiques maximales des pompes à piston sont excellentes comme on peut le voir dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1: Caractéristiques des pompes à pistons

Caractéristique	Valeur
Capacité maximale (L/min)	2650
Pression maximale (bars)	345
Viscosité maximale (cSt)	11000
Dimension de particule maximale (cm)	1.3
Amorçage à sec sans aide	Oui
Hauteur d'aspiration (m H ₂ O)	7.62

Une pompe multi-piston de très grand calibre peut laisser passer des particules de 1.3 centimètres de diamètre au maximum. Cette donnée doit être interprétée comme la capacité d'une pompe à transporter un fluide chargé. Dans le domaine des composites, les charges sont couramment utilisées pour diminuer les coûts de production, mais également pour réduire les problèmes reliés au retrait de la résine et pour améliorer certaines propriétés de la formulation de résine. Les pompes à vérin sont ainsi les mieux adaptées comme il sera discuté dans ce qui suit.

2.2.1.2 Pompe à vérin

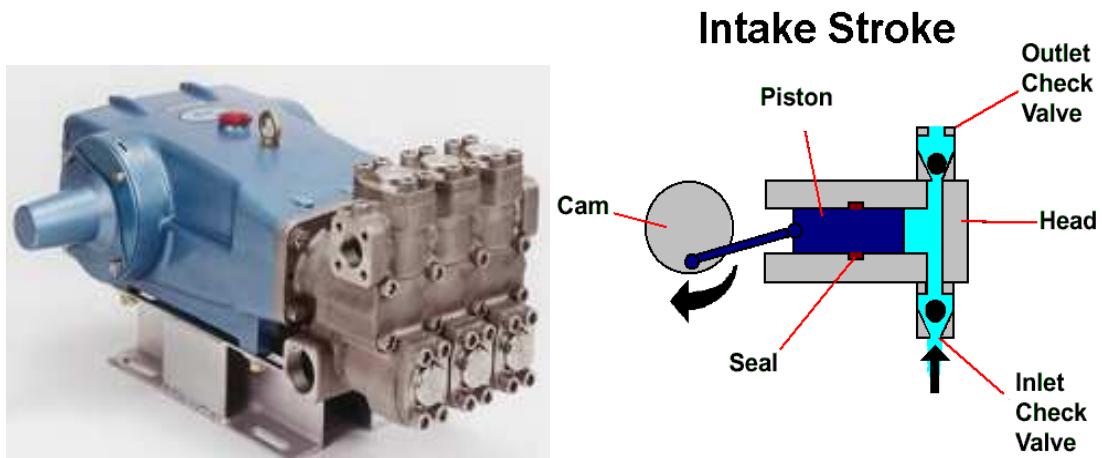


Figure 2.5: Photo (gauche) et schéma (droite) d'une pompe à vérin.

La Figure 2.5 illustre les éléments d'une pompe à vérin. Constituées d'un ou plusieurs ensembles de plongeur et cylindre, les pompes à vérin sont couramment utilisées dans les applications nécessitant une haute pression et des débits importants. Les ensembles plongeur, qui a la forme d'un piston allongé et cylindre, dans lequel se déplace le plongeur, peuvent être à simple ou à double action. Le cycle d'une pompe à simple action est : remplissage de la cavité, compression du fluide vers la sortie, puis

emplissage à nouveau de la cavité. Pour une pompe à double action, les deux côtés du plongeur sont utilisés. Ainsi, quand le plongeur comprime le fluide d'un côté, du fluide est aspiré sur le côté opposé et vice-versa.

Les caractéristiques d'une pompe à vérin indiquées dans le Tableau 2.2 peuvent surprendre. Il s'agit cependant de propriétés maximales, considérées indépendamment. Ainsi, la pompe qui atteint la pression la plus élevée le fera à un faible débit.

Tableau 2.2: Caractéristiques des pompes à vérin

Caractéristique	Valeur
Capacité maximale (L/min)	4542
Pression maximale (bar)	6900
Viscosité maximale (cSt)	11000
Dimension de particule maximale (cm)	1.5
Amorçage à sec sans aide	Oui
Hauteur d'aspiration (m H ₂ O)	6.1

La commande précise en volume de ces pompes ajouté à leur excellente résistance à l'usure même avec des fluides chargés en font un équipement de choix pour l'injection des polymères. Les pompes à piston créent cependant des débits qui fluctuent beaucoup en pression. Cela les rend plus difficiles à commander, même si elles sont très populaires, notamment, dans l'industrie des mousses polyuréthanes.

2.3 Machines d'injection existantes

Il existe plusieurs niveaux de qualité dans les systèmes d'injection. Chacun est adapté pour des besoins spécifiques. Il est nécessaire de connaître quelques-unes de ces machines pour bien comprendre où en est cette industrie en constante expansion. Cette section offre un résumé des systèmes d'injection existants. L'Annexe 3 présente une revue critique détaillée des systèmes d'injection qui est résumée ici-bas. Pour l'injection de résine thermodurcissable, plusieurs types de système d'injection sont commercialisés. Ils se différencient par les propriétés suivantes : technique de mélange, niveau d'automatisation, températures et pressions d'injection, plage de débit d'injection, volume maximal par injection, types de résines compatibles, qualité des composantes, puis coût initial et coût d'entretien. Le Tableau 2.3 présente quelques propriétés de 7 différents systèmes d'injections commercialement disponibles.

Tableau 2.3 : Quelques propriétés de 7 systèmes d'injection

Système	Tech. de mélange	Automatisation	Volume de production	Valeur (CAD \$)
Pot de pression	manuelle	absente	artisanal	100 à 1000
Patriot de MVP	statique	minimale	faible	5000 à 10000
Megaject de MVP		complète	faible à moyen	60000 à 70000
Machines de JHM		de minimale à complète	faible à moyen	8000 à 55000

Système	Tech. de mélange	Automatisation	Volume de production	Valeur (CAD \$)
Machine GlasCraft	statique	modérée	faible	12000 à 20000\$
Machine Radius	manuelle	complète	moyen	100K à 150K
Machine Cannon	jets convergents	complète	élevé	150K à 200K

Il est aisé d'observer une corrélation directe entre le coût du système d'injection et le volume de production possible avec celui-ci. Cela s'explique par le fait qu'une production en série de pièces composites n'est possible qu'avec un système complètement automatisé, robuste, fiable et qui élimine toute étape manuelle de l'injection. Entre autre, le nettoyage d'une tête d'injection, le changement du mélangeur statique et des tubes plastiques à chaque injection ralentissent la cadence de production. Le seul système qui utilise le mélange par jets convergents est par le fait même celui qui permet la production en série. Cette technologie de mélange développée pour l'industrie des polyuréthanes est la plus adaptée à la production en série.

Il existe beaucoup d'autres constructeurs de machines d'injection. La Chine possède plusieurs fabricants qui offrent des systèmes complets à des prix très compétitifs. Il n'existe cependant aucun système à haute pression conçu exclusivement pour les résines thermodurcissables de type époxy, vinylester ou polyester. L'utilisation grandissante et les développements importants des procédés de moulage avec ces résines motivent le passage vers les technologies d'injection avec mélangeurs fonctionnant à des pressions élevées. Plus robustes, fiables, précis et durables que les technologies à basse pression, les équipements à haute pression ont été choisis pour développer le nouveau système d'injection qui sera décrit dans la suite.

CHAPITRE 3

CAHIER DES CHARGES ET CHOIX DES COMPOSANTES

Après une revue globale des technologies permettant d'injecter des polymères thermodurcissables, le présent chapitre porte sur le développement du système d'injection proposé. Après avoir précisé le cahier des charges, on commencera par présenter les principaux choix des composantes du système, puis un schéma général de la machine d'injection sera exposé.

3.1 Cahier des charges

Le cahier des charges a été défini à partir des objectifs et des conditions d'utilisation du système d'injection bi-composant. Ce projet a été lancé dans le cadre de recherches visant à optimiser la qualité et diminuer le temps de fabrication des composites dans l'industrie automobile. Cette industrie doit répondre chaque année à une demande de production massive de pièces. Le système développé, objet de ce mémoire, sera utilisé dans un laboratoire de recherche de type industriel. De là proviennent une série de contraintes dans la définition du cahier des charges. Les exigences fixées pour le système peuvent être classées en trois parties principales : les performances visées en fonction, les caractéristiques rhéologiques de la résine polymère thermodurcissable utilisée et les conditions pratiques d'emploi de la machine en laboratoire.

3.1.1 Performances de fonctionnement

Le cadre de fonctionnement visé pour le système développé est l'industrie automobile et le défi est de taille. En 2007 par exemple, le constructeur automobile General Motors a produit 9 349 818 véhicules, dont 6 259 520 automobiles destinées au grand public, selon l'OICA [7]. Bien évidemment, seuls quelques véhicules de niche verront leur carrosserie passer de l'acier vers les matériaux composites. Cependant, il est réaliste de penser qu'une machine d'injection attitrée à une chaîne de montage doit au minimum fabriquer 50 000 pièces de grande taille par an.

Pour les besoins du présent cahier des charges, les caractéristiques de fonctionnement sont résumées dans le Tableau 3.1. Celles-ci reposent sur la production d'une pièce automobile de grande taille, un capot par exemple.

Tableau 3.1 : Caractéristiques de fonctionnement requises

Caractéristique	Valeur
Volume de résine par injection	Jusqu'à 6 L
Plage de températures	20 à 120 °C
Débit d'injection	Jusqu'à 150 g/s
Pression maximale d'injection	10 bars
Type de résine	Époxy
Nombre de composants	2 ou plus

Caractéristique	Valeur
Viscosité	0.001 à 1 Pa.s

À partir du volume maximal de résine à injecter décrit dans le Tableau 3.1 et du volume de production annuel précédemment défini, il est possible d'approximer la quantité de résine nécessaire chaque jour comme suit :

$$V_{jour} = \frac{N_{an}}{365} * V_{injection} = \frac{50\,000}{365} * 6 = 821.5 \text{ Litres}$$

Pour une journée de travail de 16 heures, cela équivaut à 50 litres consommés par heure. Considérant qu'en industrie, la machine d'injection sera toujours reliée à un système de remplissage automatique, une autonomie de 4 heures minimum est suffisante. Ainsi, un volume total minimal pour les réservoirs de 200 litres est visé. Pour le débit, il est plausible de croire que l'injection d'une pièce devrait durer moins d'une minute, ce qui équivaut à environ 100 g/s pour une pièce de 6 litres. La valeur choisie a été de 150 g/s pour assurer de répondre facilement à ce débit maximal. La valeur de 10 bars pour la pression maximale d'injection a été fixée selon les pressions utilisées présentement dans l'industrie, tel que définit au Chapitre 1.

Ensuite, pour une production en série il est évident que l'entretien du système d'injection doit être minimal. La fiabilité de chaque composante est cruciale. À chaque arrêt de la production d'une chaîne de montage automobile, les pertes se calculent en dizaine de milliers de dollars. Ainsi, la garantie de chaque manufacturier sur la durée de vie de leur équipement constituera un des principaux critères de choix pour les composantes du système.

3.1.2 Caractérisation rhéologique de la résine utilisée

Les résines utilisées pour la production en série des composites sont de plus en plus performantes. Leur propriétés, comme la viscosité par exemple, varient en fonction de la température. La résine époxy que notre système utilise provient de la compagnie Lindau Chemicals Inc. ; c'est la résine Lindoxy 190 avec le durcisseur anhydride LS 252V. Ce système de résine à haute performance est stable, donne d'excellentes propriétés mécaniques et était disponible pour le projet. À l'aide du Rhéomètre MCR501 de Anton-Paar, la viscosité de la résine a été mesurée en fonction de la température. La Figure 3.1 présente les résultats avec la viscosité en ordonnée sur une échelle logarithmique. Tel qu'attendu, la dépendance de la viscosité avec la température est exponentielle. Les propriétés de cette résine thermodurcissable sont présentées à l'Annexe 4 du présent rapport.

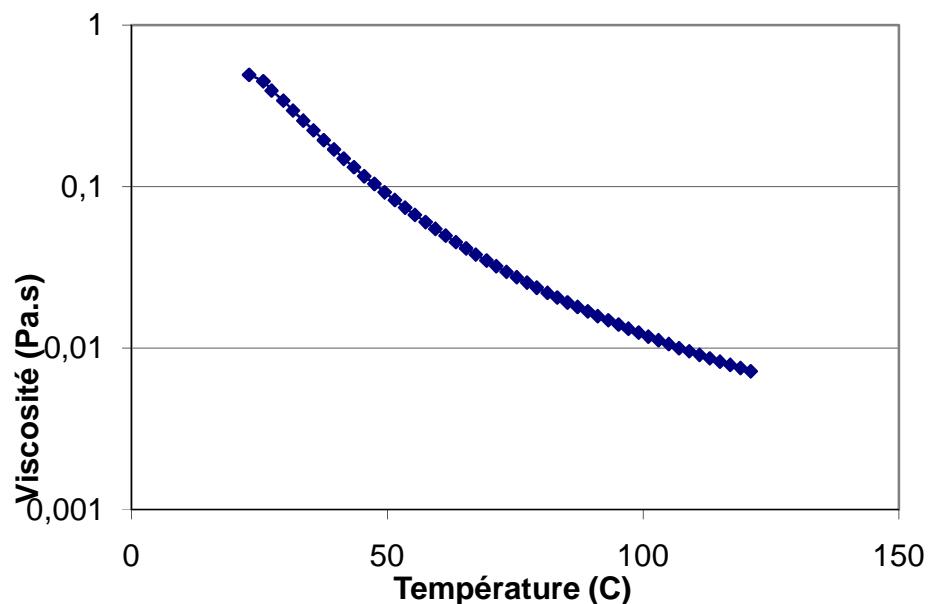


Figure 3.1 : Viscosité en fonction de la température de la résine Lindoxy 190.

3.1.3 Conditions d'utilisation au laboratoire

La machine a été construite au Laboratoire de Fabrication Intégrée des Composites (LFIC) de l'École Polytechnique de Montréal, situé à l'École Nationale d'Aérotechnique de St-Hubert, Qc. Elle sera utilisée avec la presse de précision de 400 tonnes avec chariot sur rail de la compagnie Eagle Press présentée sur la photo de la Figure 3.2.



Figure 3.2 : Presse du laboratoire LFIC.

Il a été évalué qu'un espace maximal de 1,2 par 2 mètres avec une hauteur de 3 mètres pouvait être alloué au système d'injection. De plus, il doit être possible de relier la tête d'injection au moule sans contraindre les mouvements de la presse. Cette contrainte, additionnée aux contraintes de production et au système de résine utilisé représentent le cahier des charges utilisé pour la conception. Cette première étape de la conception étant éclaircie, la recherche de solutions pour ce nouveau système d'injection de résine époxy bi-composant pouvait être entamée.

3.2 Solution proposée

C'est au moment où la technologie de mélange fut choisie que le schéma final de fonctionnement a pu être dessiné. Cependant, ce choix est justifié dans la section 3.3.1 du présent chapitre. Avant de passer aux explications, observons la Figure 3.3 qui illustre le schéma de ce nouveau système d'injection pour l'époxy. Les principaux équipements sont la tête de mélange, les réservoirs et les pompes à haute pression.

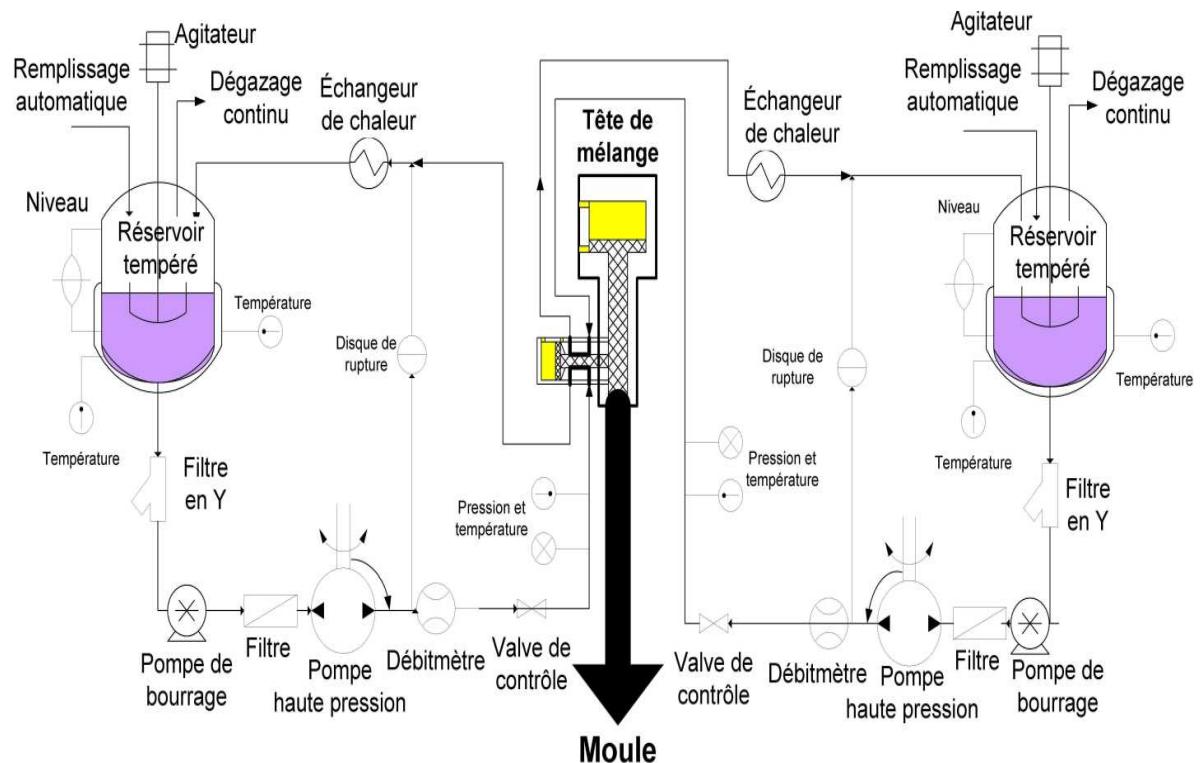


Figure 3.3 : Schéma complet du nouveau système d'injection avec mélange par jets convergents.

Le schéma montre une pompe à cylindrée variable, mais une pompe à vérin double action pourrait aussi être utilisée. Le choix de la pompe est expliqué dans la section 3.3.2

Les autres accessoires essentiels sont mieux identifiés sur la Figure 3.4 qui montre les détails du circuit de recirculation pour un composant chimique avec l'agitateur, le débitmètre, les filtres, l'échangeur de chaleur, valves et autres accessoires de commande.

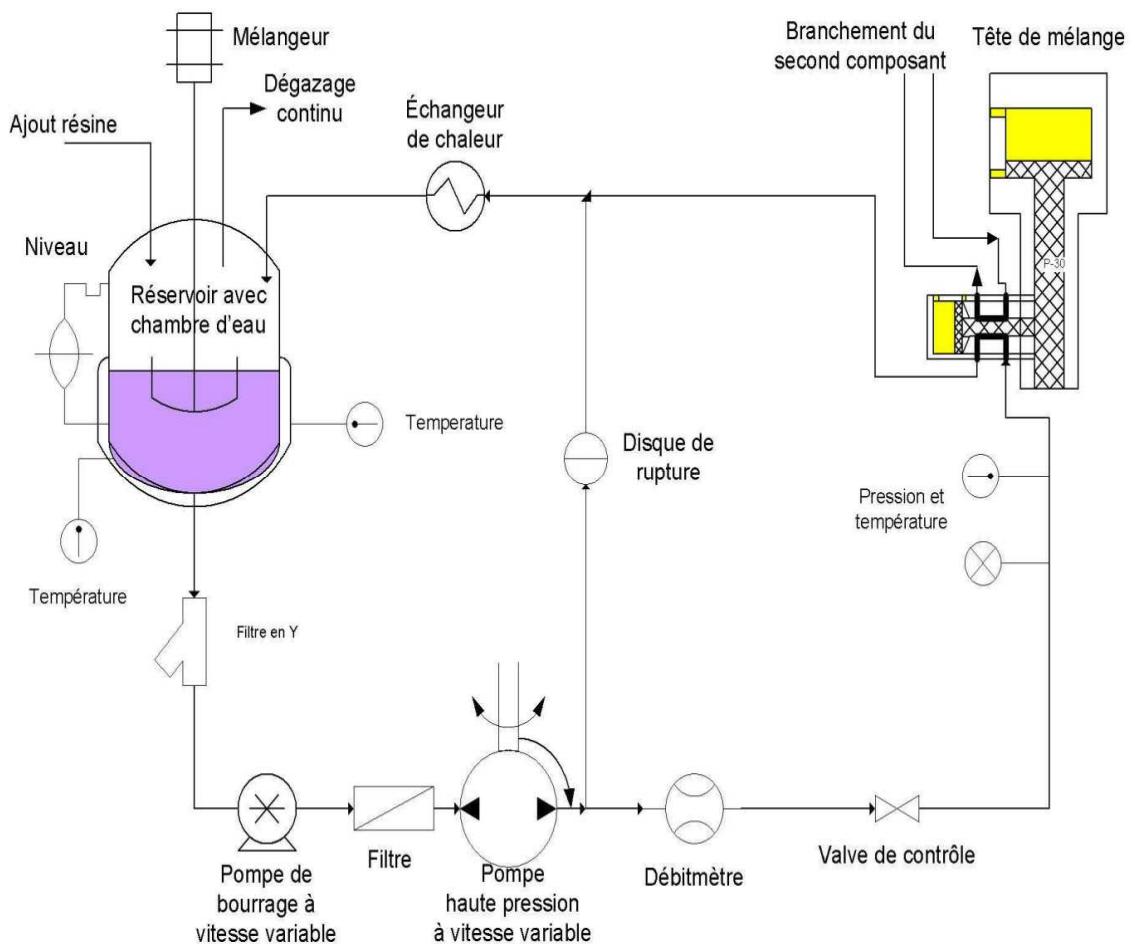


Figure 3.4 : Schéma de fonctionnement pour un des deux composants de la machine d'injection.

Sur la Figure 3.4, on voit que le réservoir est suivi d'un pré-filtre, puis d'une pompe. Cette pompe de bourrage doit être utilisée en cas de dégazage continu. Le dégazage continu consiste à maintenir une pression relative négative constante à l'intérieur du

réservoir dans le but d'extraire les gaz dissous dans la résine. Cependant, la pompe à haute pression nécessite une pression absolue de 0,7 bars, d'où la nécessité d'utiliser une pompe de bourrage pour alimenter la pompe à haute pression à partir du réservoir de résine qui est maintenu sous vide.

Suivant la pompe à haute pression, on observe que le circuit se sépare en deux vers un disque de rupture et vers un appareil de mesure du débit. Le disque de rupture prévient toute surpression dans le circuit, ceci permet d'assurer la sécurité des opérateurs. Il est aussi important de mentionner que la pompe à haute pression intègre aussi un circuit de surpression qui retourne à l'entrée tout fluide pressurisé au-delà de 250 bars. Ainsi, le disque de rupture agit comme un double niveau de sécurité assurant qu'aucun opérateur ne soit exposé aux risques d'un éclatement des conduites chimiques en cas de mauvais fonctionnement mécanique.

La composante suivante sur le circuit est la valve de commande, qui permet de couper le lien entre la machine et la tête de mélange en cas d'entreposage et pour l'entretien du système. Un échangeur de chaleur et des capteurs apparaissent également sur le schéma de la tête de mélange. Les capteurs permettent de connaître en permanence la température et la pression à différents points spécifiques du système. Ces données permettent non seulement d'automatiser la machine, mais assurent aussi la sécurité de l'opérateur en déclenchant l'arrêt du système si une valeur lue est en dehors de limites fixées. La solution proposée étant maintenant décrite, la phase suivante consiste à choisir chacun des équipements du système d'injection.

3.3 Choix des composantes

Le choix des principales composantes de la machine fut une étape laborieuse et un élément critique du travail de développement. Il a fallu dans un premiers temps analyser les besoins et choisir la technologie la mieux adaptée. Il faut également comparer les multiples produits de plusieurs fournisseurs, demander des soumissions et procéder à l'achat du produit choisi. Cette section du mémoire explique brièvement les décisions technologiques prises pour les principales composantes du système d'injection fondé sur la technique de mélange par jets convergents.

3.3.1 Tête de mélange

Le choix de la technologie de mélange représente la décision la plus importante dans le cadre de ce travail. C'est pourquoi, les raisons qui ont motivé le choix de la technologie à haute pression par jets convergents seront approfondies. Tel que mentionné au Chapitre 2, plusieurs technologies de mélange sont disponibles. Cependant, une seule est clairement indiquée pour une production industrielle : le mélange par jets convergents, pour les raisons suivantes :

- Fiabilité et robustesse des équipements à haute pression.
- Durée de vie très longue (garantie d'un minimum de 100 000 injections sans entretien).
- Élimination des pertes de résine.
- Élimination des consommables tels que les tuyaux et les mélangeurs statiques.

- Élimination de l'utilisation de solvant pour le nettoyage de la tête de mélange, des tuyaux et des mélangeurs après chaque injection.

Il est utile de rappeler le procédé de mélange par jets convergents afin de bien comprendre les explications qui vont suivre. Le mélange par jets convergents s'effectue à haute pression en projetant à travers de petits orifices chaque composant du mélange de résine l'un vers l'autre dans une chambre de mélange. La transition de la haute pression, typiquement 100 bars avant l'orifice, vers la basse pression de la chambre de mélange libère une énorme quantité d'énergie. De ce débit chaotique et énergétique résulte une excellente qualité de mélange.

Un facteur prépondérant pour le choix de la tête de mélange est sa fiabilité et sa robustesse. Pour atteindre les critères de sécurité en termes de haute pression, les circuits et équipements sont construits pour supporter une pression supérieure à 250 bars. Par conséquent, les pompes, les conduites, les valves et autres accessoires du nouveau système sont significativement plus robustes et durables que les équipements à basse pression généralement utilisés. Les investissements initiaux élevés pour ces systèmes performants sont largement compensés par les économies engendrées par la diminution des arrêts en production, des périodes d'entretien et du nombre de pièces défectueuses.

Passons maintenant à la sélection du fournisseur. Plusieurs compagnies produisent des têtes de mélange. Les fabricants suivants ont soumissionné pour le projet : Graco, Krauss Meffei et Cannon. Le Tableau 3.2 résume les soumissions obtenues. Le choix s'est arrêté sur le fournisseur Cannon, originaire d'Italie, en raison de leur prix compétitif, du temps de livraison raisonnable et de leur excellente renommée.

Tableau 3.2 : Soumissions obtenues pour la tête de mélange

Compagnie	Composantes	Nb. unités	Prix unitaire	Total (\$)
Graco	Tête de mélange 6/10 « L »	1	18500.00	18500.00
Krauss Maffei	Tête de mélange Mk 8/12 ULKP 2 K VV	1	16704.00	16704.00
<u>Cannon</u>	<u>FPL10HP tête de mélange</u> <u>Jeu d'aiguilles et orifices</u> <u>Capteurs de proximité</u> <u>Câbles de capteurs</u>	<u>1</u>	<u>16283.00</u> <u>inclus</u> <u>Rabais FCI de 5%</u>	<u>16283.00</u>

La tête de mélange choisie est la FPL 10 hp de Cannon. Elle possède deux pistons dont les mouvements sont illustrés sur les deux schémas de gauche sur la Figure 3.5. Il faut savoir que plusieurs têtes de mélange sont fabriquées avec seulement un piston. La configuration des deux pistons de la tête de mélange que nous avons choisie force la résine à s'écouler dans une chambre de mélange avec un angle de 90°. Ceci augmente la turbulence de l'écoulement et améliore la qualité du mélange. Nous avons choisi la dimension de la tête en fonction des débits désirés. Dans le cas présent, l'injection d'un capot de voiture peut prendre 6 litres de résine, qui doit être injectée en environ une minute. Il en résulte un débit de $100 \text{ cm}^3/\text{s}$. Donc, la tête de mélange installée sur le système d'injection a été choisie pour des débits de 50 à $260 \text{ cm}^3/\text{s}$.

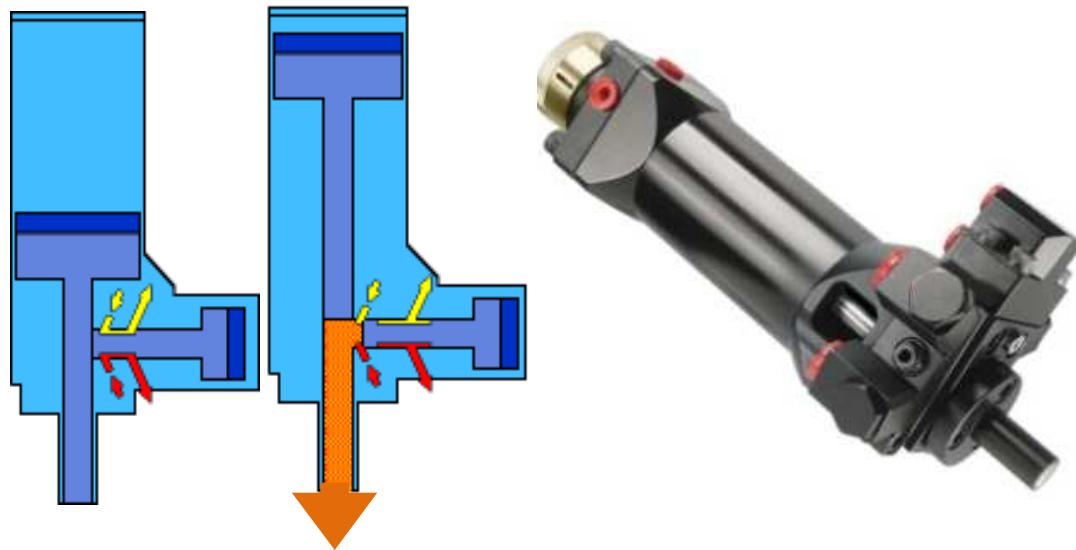


Figure 3.5 : Schéma de la tête de mélange FPL10hp fermée (gauche), ouverte (centre) et en photo (droite).

Un autre avantage d'une tête de mélange par jets convergents à haute pression est de permettre une recirculation des composants. Cette recirculation permet la stabilisation du débit, de la pression et de la température du système avant de procéder à une injection. Ceci facilite aussi le chauffage du système. Une fois la machine réglée au débit de départ demandé, le cylindre de nettoyage et le cylindre secondaire sont ouverts à l'aide d'une pression d'huile de 200 bars. Cette ouverture extrêmement rapide dure typiquement 20 millisecondes pour le cylindre secondaire. La fermeture du cylindre de nettoyage est un peu plus lente et permet de nettoyer efficacement la chambre de mélange en éjectant toute quantité restante de résine mélangée vers le moule. Ce nettoyage ne nécessite l'utilisation d'aucun solvant et ni aucune manipulation de l'opérateur.

Un troisième avantage majeur de ce type de tête de mélange réside dans la possibilité de mélanger 2 à 6 composants chimiques simultanément. Dans l'optique de l'ajout d'un faible pourcentage de catalyseur à la formulation de la résine, il est possible d'utiliser un dispositif d'insertion qui ajoute ce dernier produit dans la chambre de mélange tel

qu'illustre sur la Figure 3.6. Cependant, le présent système serait difficilement adaptable à plus de 3 composants. Le Tableau 3.3 permet d'identifier les éléments présents de la Figure 3.6.

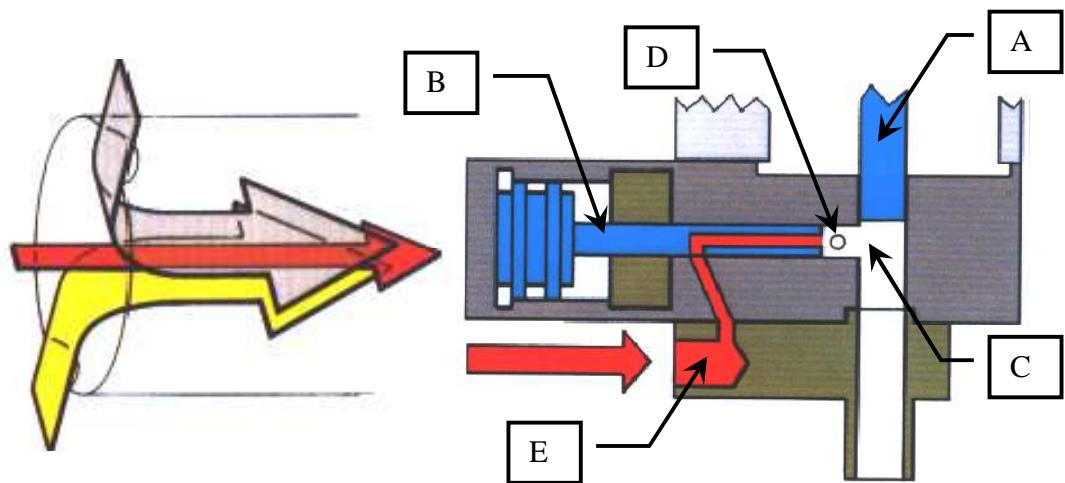


Figure 3.6 : Principe d'insertion d'un troisième produit.

Tableau 3.3 : Identification des détails de la Figure 3.6

Élément	Description
A	Piston de nettoyage
B	Piston secondaire
C	Chambre de mélange
D	Entrée des deux composants du mélange / Point de convergence des jets
E	Entré du troisième composant

L'élément « E » du schéma représente le troisième composant ajouté par l'intermédiaire d'une cavité à l'intérieur du piston secondaire. La schématisation à la gauche de la Figure 3.6 représente comment le troisième composant, un catalyseur par exemple, est inséré au milieu du mélange à haute pression. Ce dispositif requiert l'utilisation d'une pompe avec plongeur précise, qui assurera l'alimentation exacte et uniforme de la quantité de catalyseur nécessaire à la réaction.

Une vue éclaté de la tête de mélange est présentée à l'Annexe 5. Il est possible d'y observer les différents accessoires inclus dans cet équipement à haute pression, dont les orifices et aiguilles qui servent à réguler la pression, la direction et la dimension des jets convergents. La dimension des accessoires doit être choisie en fonction de la viscosité des polymères injectés. Dans notre cas, les orifices suggérés par le fabricant ont un rayon de 1,5 et 2 mm respectivement pour la résine et le durcisseur de Lindau Chemical Inc. L'utilité des aiguilles et orifices pourra mieux être comprise lors de la description de la calibration du système au Chapitre 5.

3.3.2 Pompes à haute pression

Les pompes à haute pression constituent le second choix important à effectuer pour un système d'injection industriel, le premier étant la technologie de mélange. Grâce à une meilleure compréhension des phénomènes physiques de l'écoulement d'une résine polymère dans un renfort fibreux, les procédés d'injection ont pu être améliorés et paramétrés. En effet, lors de l'injection d'une pièce composite à haute performance, il faut commander précisément le débit ou la pression, deux grandeurs physiques qui sont reliées. Les nouvelles formulations de résine sont conçues pour être injectées à des températures de plus en plus élevées. Les pompes doivent réagir rapidement à une commande d'ajustement de débit, résister à de hautes températures tout en délivrant un

fluide chimique souvent corrosif à haute pression. Les pompes utilisées avec l'isocyanate et le polyol, les deux produits primaires pour le polyuréthane, sont toutes deux indiquées pour ce travail. Les deux types de pompes disponibles pour cette tâche sont les pompes à piston et à vérin, qui ont été décrites dans le Chapitre 2.

La technologie de pompe qui a été sélectionnée et installée sur le système d'injection est une pompe multi-pistons à haute pression avec cylindrée variable. Ce type de pompe offre des simplifications significatives autant au niveau mécanique que pour son asservissement. Les pompes à pistons possèdent les avantages et limitations suivants.

Avantages

- La quantité de résine requise pour une injection n'est pas limitée.
- Aucun délai n'est requis pour la recharge d'un cylindre.
- L'ensemble forme un groupe moteur et une pompe très compacte.
- L'utilisation d'un accouplement magnétique élimine les problèmes de fuite par les joints d'étanchéités de l'arbre d'entraînement.
- Seul la vitesse de rotation de son moteur électrique est à asservir.
- Une multitude de dimensions sont disponibles pour obtenir le débit désiré.
- La précision est très élevée et le temps de réponse est rapide.

Limitations

- Ces pompes ne fonctionnent pas bien avec des charges comme les poudres, qui ont un effet abrasif limitant leur durée de vie.

- Les résines de viscosité supérieure à 2 Pa.s ne peuvent pas être pompées facilement.

Les limitations sur les charges ne sont pas significatives, car le système injectera de la résine pour des pièces composites à haute performance. Donc, les charges comme les poudres de talc et autres ne sont pas utilisées dans ces composites. Un autre avantage qui n'a pas encore été cité porte sur la pression de sortie des pompes. Il existe une différence marquée entre la pression d'un fluide transporté par une pompe à vérin et une pompe multi-pistons avec cylindrée variable. La Figure 3.7 montre la différence de stabilité en pression entre des pompes à vérin et à pistons. Cette stabilité facilite la commande du procédé. Il est à noter qu'une légère fluctuation de pression existe tout de même avec les pompes à pistons multiples, même si elle n'est pas observable sur la Figure 3.7.

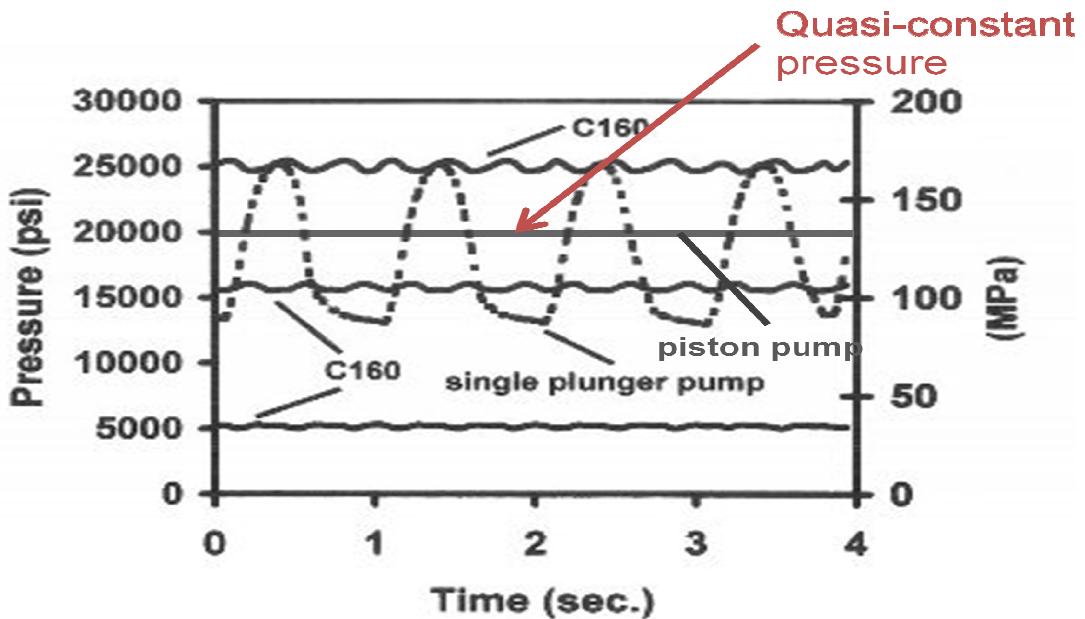


Figure 3.7: Pression en fonction du temps pour une pompe à vérin et une pompe multi-pistons. Volk [6]

Les compagnies Rexroth, Linden et Flo Draulic ont été sélectionnées pour soumissionner sur le projet. Le Tableau 3.4 résume les offres reçues. Le distributeur choisi est Flo Draulic, qui proposait les deux groupes de pompes à un prix avantageux : des pompes du fabricant Rotary Power qui sont reconnues pour leur durabilité dans l'industrie des polyuréthanes. Les spécifications de la pompe C07 dans l'Annexe 6 correspondent aux caractéristiques exigées. Entre autres, la plage de débit d'une telle pompe va de 30 à 260 cm³/s ce qui convient à la plage de débits conseillés de 50 à 260 cm³/s pour opérer la tête de mélange. La capacité de ces pompes permet même d'envisager l'utilisation future d'une plus grosse tête de mélange.

Tableau 3.4 : Soumissions obtenues pour les pompes à haute pression

Compagnie	Composantes	Pièces incluses	Qté.	Total (\$)
Rexroth	A2VK28MAGR1G1PE1-SO	Pompe	2	23444.00
Linden	A2VK28-S02 neuf Accouplement Accessoires	Pompe Accouplement	2	24000.00
<u>Flo Draulic</u>	<u>Pompe Rotary Power C07</u> <u>Acc. magnétique de 50 Nm</u> <u>Moteur 575/3/60 de 5 HP</u> <u>Contrôleur moteur à fréquence variable</u>	<u>Pompe</u> <u>Accouplement</u> <u>Moteur</u> <u>Contrôleur</u>	<u>2</u> 	<u>23128.20</u> <u>inclus</u> <u>Rabais FCI</u> <u>de 10%</u>



Figure 3.8 : Pompe multi-pistons rotatifs de Rotary Power.

La Figure 3.8 montre un des deux ensemble pompe, accouplement et moteur tel que reçu de la compagnie Flo Draulic. Deux types d'accouplement entre le moteur et la pompe sont disponibles chez ce fabricant, soit un accouplement mécanique ou magnétique. L'accouplement magnétique a été sélectionné parce qu'il confère à la pompe une meilleure tenue en température au voisinage de 150°C. De plus, cet accouplement élimine les problèmes de fuites et tout risque de blessures pour l'opérateur.

3.3.3 Pompes de bourrage

Le système d'injection en développement n'intègre pas de pompe de bourrage pour le moment. L'utilité de ces pompes a été expliquée à la section 3.2. L'objectif des

travaux de ce mémoire est premièrement de vérifier la qualité et l'efficacité du système d'injection pour de la résine époxy avec les technologies à haute pression. Les pompes de bourrage représentaient un investissement important, mais non essentiel. Il sera possible de les ajouter dans l'assemblage ultérieurement. Le seul inconvénient est qu'il n'est pas possible de fonctionner en dégazage continu sans ces pompes de bourrage. Cependant, on peut quand même dégazer la résine de façon cyclique en arrêtant les pompes pendant un moment. Un fournisseur pour ce type de pompe a tout de même été sélectionné. C'est le fabricant Viking Pumps. La fiche technique de la pompe que nous avons choisie pour notre système d'injection se trouve à l'Annexe 7.

3.3.4 Appareil de mesure du débit

Une des composantes les plus importantes pour l'asservissement du système d'injection est l'appareil de mesure du débit. Les pompes à haute pression que nous avons choisies sont très précises sur le volume transporté. En leur donnant une certaine vitesse de rotation, il est possible d'en déduire le débit sortant théorique avec beaucoup de précision. La pompe C07 de Rotary Power possède un déplacement de 11,5 cm³/rotation à plein régime. Ce débit doit être contrôlé par un appareil de mesure de débit. Le débit-mètre, en plus de permettre un asservissement précis de la pompe, offre une sécurité additionnelle en cas de cavitation. La cavitation est un phénomène de croissance de bulles gazeuses à l'intérieur d'un fluide. La résine pompée, lorsque les conditions physiques de cavitation sont présentes, peut laisser croire au débit-mètre que la pompe ne fournit pas la quantité de fluide demandée. Pour compenser ce manque de débit, la vitesse de la pompe augmente, entraînant par le fait même un accroissement de la cavitation. Ce dangereux cercle vicieux a déjà mené à des catastrophes en production. Pour prévenir ce phénomène, toute différence de mesure du débit entraîne un arrêt d'urgence du système.

Il existe plusieurs technologies de débit-mètres. La solution la plus fiable, économique et conseillée par le fabricant de la tête de mélange est le débit-mètre à engrenage. L'autre solution envisagée était le débit-mètre de Coriolis. Celui-ci coûte près de trois fois le prix du débit-mètre à engrenages. Le résumé des soumissions de quatre fournisseurs est détaillé dans le Tableau 3.5. Le débit-mètre de Coriolis est inutilisé dans l'industrie des systèmes d'injection et son prix est exorbitant, donc il n'a pas été retenu ici. Le débit-mètre que nous avons sélectionné est celui de Cannon qui possède des engrenages anti-grippage. Le grippage peut subvenir malgré la filtration élevée de la résine. Ainsi, il s'avère prévoyant d'utiliser ce type d'engrenage qui permet d'éviter des arrêts subis en production. La fiche technique de ce produit se trouve à l'Annexe 8.

Tableau 3.5 : Soumissions obtenues pour les débit-mètres

Compagnie	Composantes	Nb.unités	Total (\$)
ECE	Débit-mètre et capteur	2	5385.15
Hoskin Scientifique	Débit-mètre et capteur	2	4204.24
Hoskin Scientifique	Débit-mètre Coriolis et capteur	2	9002.00
Provan	Débit-mètre et capteur	2	7081.45
Cannon	Débit-mètre, capteur et base de branchement	2	3617.68 inclus rabais FCI de 5%

3.3.5 Réservoirs et agitateurs

Comme mentionné au début de ce chapitre, les réservoirs constituent la partie la plus volumineuse de la machine. Ils régulent la température des composants chimiques de la résine, assurent son uniformité, permettent son dégazage et contiennent la quantité de résine nécessaire pour une production continue. En raison du débit d'injection estimé dans le cahier des charges en production, soit 50 litres par heure et tenant compte des contraintes dimensionnelles de notre laboratoire, le volume de chaque réservoir a été fixé à 120 litres, valeur supérieur au 200 litres totaux du cahier des charges. À ce volume s'ajoute celui du fluide caloporteur contenu dans la double paroi, qui permet de commander la température de la masse de résine. Plusieurs accessoires sont connectés au réservoir comme l'agitateur, l'interrupteur de niveau, les capteurs de température et de pression. De recherches infructueuses ont permis de conclure qu'aucun réservoir existant ne répondait à nos besoins. Nous avons donc conçu un réservoir sur mesure. La conception inclut différentes méthodes pour optimiser l'écoulement dans un réservoir comme :

- Les tubes de retour assurent un écoulement en douceur sur les parois.
- Ces mêmes tubes de retour forment des barrières contre la mise en rotation de la résine et la formation d'un vortex central.
- Une croix à la sortie de la résine empêche la formation de tout vortex.
- Les points de retour et sortie sont éloignés de façon à empêcher une interconnexion entre ceux-ci.

Le Tableau 3.6 récapitule les soumissions obtenues pour la fabrication de nos deux réservoirs jumeaux. L'acier au carbone a été sélectionné pour la fabrication des réservoirs parce que la résine époxy n'est pas corrosive et ne motive pas le choix d'un

matériel plus coûteux. Entre les soumissionnaires, le constructeur de réservoir Gil-fab s'est démarqué par son prix compétitif, sa capacité à offrir un réservoir à double paroi et sa proximité.

Tableau 3.6 : Soumissions obtenues pour les réservoirs

Compagnie	Composantes	Qté.	Prix unitaire	Total (\$)
Comairco	Réservoir 30 gal	2	10095.00	20190.00
Pittsburg Spray	Réservoir 30 gal	2	5746.00	11492.00
<u>Réservoirs Gil-Fab</u>	<u>Réservoir 30gal double paroi</u>	<u>2</u>	<u>6300.00</u> <u>inclus rabais FCI de 18%</u>	<u>12700.00</u>

Une composante essentielle des réservoirs est l'élément chauffant. Ceux-ci ont une puissance de 2400 W et permettent de chauffer les composants chimiques de 20 à 50 °C en plus ou moins 70 minutes. L'isolation thermique des réservoirs est assurée par une épaisseur de mousse polyuréthane de faible densité résistante aux produits chimiques. Une épaisseur de 13 mm a été estimé suffisante pour isoler chaque réservoir, mais surtout prévenir les opérateurs contre des éventuelles brûlures. Pour l'isolation thermique des conduites, une mousse silicone de faible densité conçue à cet effet a été utilisée.

Pour les agitateurs, quatre fabricants ont accepté de coopérer et ont offert les soumissions résumées dans le Tableau 3.7. Le prix de cet équipement est surprenant. Le coût des pâles, de la boîte d'engrenage et surtout du joint d'étanchéité mécanique en est la cause. La compagnie choisie est PCP Inc. pour le prix et le délai de livraison.

Tableau 3.7 : Soumissions obtenues pour les agitateurs

Compagnie	Composantes	Livraison (sem.)	Qté.	Total (\$)
Nortec SGS	Agitateur et moteur	6-7 semaines	2	13500.00\$
Hayward Gordon	Agitateur et moteur	6-8 semaines	2	14388.00\$
DeWallace	Agitateur et moteur	3-4 semaines	2	16210.00\$
<u>PCP inc</u>	<u>Agitateur avec impulsleur</u> <u>Moteur électrique 230/3/60</u>	<u>3 semaines</u>	<u>2</u>	<u>9545.50\$</u> <u>inclus rabais</u> <u>FCI de 15%</u>

3.3.6 Filtre

Lorsque le liquide sort de l'un des réservoirs, il est filtré une première fois à l'aide d'un filtre grossier en forme de « Y ». Ce filtrage préliminaire est par la suite complété par un filtre à sac beaucoup plus fin et permettant un entretien rapide. Ce dernier permet de retenir toutes particules plus grandes que 100 microns. Ce niveau de filtration élevé est important pour le fonctionnement de la pompe à haute pression et le débit-mètre.

3.3.7 Unité hydraulique

L'unité hydraulique pressurise l'huile nécessaire au fonctionnement de la tête de mélange par jets convergents. Les deux pistons de cet équipement sont actionnés hydrauliquement. Des valves hydrauliques automatisées gèrent l'alimentation de la

pression hydraulique fournie par une pompe à huile pour commander l'ouverture ou la fermeture des pistons. La Figure 3.9 montre une valve hydraulique à gauche et l'unité hydraulique de droite. Le schéma de l'assemblage est donné à l'Annexe 11.

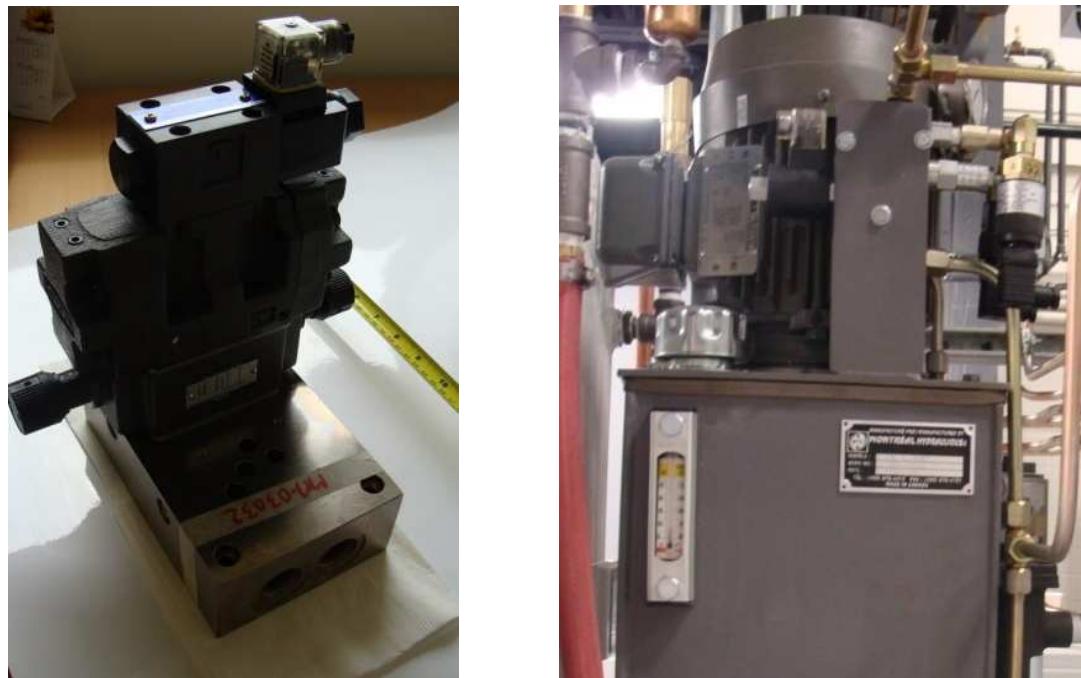


Figure 3.9 : Valve hydraulique et unité hydraulique (droite).

L'unité hydraulique permet de fournir une pression de 200 bars avec un débit de 8,9 L/min. Elle est utilisée conjointement avec un accumulateur à décharge rapide, qui permet d'atteindre le temps de 20 millisecondes pour l'ouverture du piston de mélange. Le débit nécessaire est de 1200 L/min (20 L/sec) et se calcule comme suit :

$$Q_{hydraulique} = \frac{V_{cylindre}}{T_{ouverture}} = \frac{0,1 \text{ L}}{0,02 \text{ sec}} * \frac{60 \text{ sec}}{1 \text{ min}} = 300 \text{ L/min}$$

Le temps d'ouverture du piston qui commande le passage du mode de recirculation au mode d'injection doit être extrêmement court. Ce temps affecte la qualité du mélange au début et à la fin d'une injection

3.3.8 Capteurs

Les capteurs appropriés à la mesure des températures et pressions du système d'injection furent choisis parmi les compagnies GP50, Conval Québec et Hoskin Scientifique et le Tableau 3.8 résume les soumissions reçues. Pour une différence évidente de prix et pour le fait qu'elle offrait tous les capteurs nécessaires, la compagnie Hoskin Scientifique a été sélectionnée.

Tableau 3.8 : Soumissions obtenues pour les capteurs

#	Compagnie	Composantes	Délais de livraison	Total (\$)
1	GP50	9 capteurs de pression RTD non disponible	4 semaines	7830.00\$ Inclus Rabais FCI de 5%
2	Conval Québec	10 capteurs de pression 1 gauge	6-8 semaines	8024.15\$ Inclus Rabais FCI de 25%
3	<u>Hoskin</u> <u>Scientifique</u>	<u>9 capteurs de pression</u> <u>9 RTD (+ puits therm.)</u>	<u>2 semaines</u> <u>5 semaines</u>	<u>7424.00\$</u> <u>Rabais FCI de 20%</u>

Les capteurs de pression choisis sont conçus pour mesurer une pression absolue de 0 à 11 bars. Ils sont dotés de membranes affleurantes qui protège cette instrumentation contre toute intrusion de résine qui risquerait potentiellement de se gélifier. Les

équipements avec résistance thermique (RTD) eux sont installés dans des puits thermiques. Ainsi, si un quelconque bris survient, leur réparation peut être effectuée sans arrêt de la production. La Figure 3.10 présente la position de chacun des capteurs. Cette section termine la discussion sur le choix des composantes du système d'injection proposé.

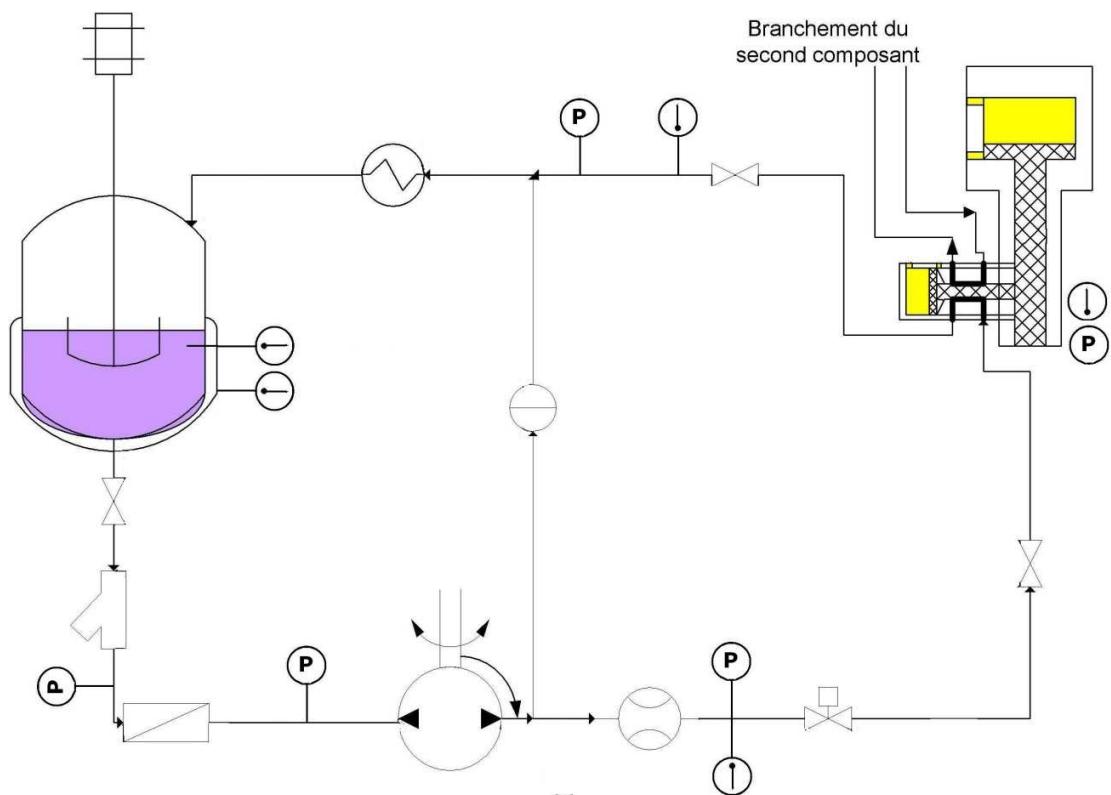


Figure 3.10 : Position de chaque capteur sur les circuits.

CHAPITRE 4

SYSTÈME DE COMMANDE, DÉFINITION DE L'ASSEMBLAGE ET FABRICATION

Le chapitre précédent a traité du choix des différentes composantes du système fabriqué dans le cadre des travaux décrits dans ce mémoire. Ce chapitre présente l'automate programmable, dont la conception a été faite par un partenaire industriel, ainsi que la modélisation du système sous le logiciel Catia et les différentes étapes de fabrication.

4.1 Automate programmable

L'automatisation du système est effectuée par un contrôleur à logique programmable (l'abréviation PLC sera utilisée dans la suite) de marque Allen-Bradley, model CompactLogix. Celui-ci gère le fonctionnement du système d'injection avec flexibilité et fiabilité. Le premier point traite des entrées et sorties du PLC pour le système d'injection, puis présente une synthèse sur le fonctionnement de la machine du point de vue du programmeur est présentée en trois parties : le mode manuel, le mode de circulation à basse pression et le mode de circulation à haute pression.

Le premier exercice visant à évaluer de la taille de l'automate a porté sur le recensement du nombre de canaux d'entrées et de sorties (I/O signifiera entrées/sorties dans la suite) présents dans le système. Ces canaux ont ensuite été divisés selon leur type de fonctionnement, analogique ou digital. Le Tableau 4.1 précise le nombre de canaux

I/O du système, excluant les paramètres entrés par l'opérateur sur l'interface de la machine.

Tableau 4.1 : Calcul des entrées et sorties du PLC

ENTRÉES		SORTIES	
NUMÉRIQUES	ANALOGIQUES	NUMÉRIQUES	ANALOGIQUES
2 interrupteurs de proximité	9 capteurs de pression	6 démarreurs	4 vitesses moteur (contrôleurs à fréquence variable)
2 interrupteurs de niveau	9 RTD (resistive thermal detector)	6 arrêts moteurs	
2 sens de l'écoulement	2 débit-mètres	2 valves d'eau	
1 signal de la presse		2 valves chimiques	
2 interrupteurs de pression hydraulique		3 valves hydrauliques	
1 interrupteur d'urgence			
Totaux	10	20	19
			4

Ainsi, un total de 53 canaux I/O sont présentement fonctionnels sur le système, excluant ceux de l'interface utilisateur. Ce nombre pourrait être appelé à grandir avec l'avancement du projet. Un espace supplémentaire pour une augmentation de 33% du nombre de canaux I/O a été prévu dans le boîtier du PLC. Dans le but d'affiner et de concrétiser la compréhension de l'automatisation, l'Annexe 9 donne une description des tous les canaux I/O présents. Dans cette annexe, l'indice « a » fait référence au circuit de résine tandis que l'indice « b » réfère au circuit du durcisseur. Une fois les canaux d'entrées et sorties définis, leur fonctionnement ou le moment de leur utilisation dans le procédé était encore indéterminé. Une description de l'interaction désirée entre

l'utilisateur et le système d'injection avec mélange par jets convergents a permis de cerner le fonctionnement désiré de l'interface.

4.1.1 Fonctionnement du système d'injection

Pour permettre au programmeur de développer un logiciel sur mesure, le fonctionnement du système d'injection a été décrit dans les 4 sections suivantes du mémoire. Tout d'abord, la sélection de l'interface entre le système et l'utilisateur est expliquée, puis le fonctionnement du système avec ses trois modes de fonctionnement principaux est décrit : manuel, circulation à basse pression et circulation à haute pression.

L'utilisateur de l'équipement doit pouvoir choisir le mode de fonctionnement et entrer les données caractéristiques de la fabrication. Une interface utilisateur est donc essentielle et doit permettre d'offrir une compréhension intuitive du fonctionnement du système. Pour faire un choix éclairé de l'interface utilisateur, il faut connaître les conditions de son utilisation. Le système d'injection est destiné à un environnement industriel exigeant, exposé à la poussière et à l'humidité, et qui risque d'être en contact avec des produits chimiques comme des colles, des résines et des solvants. Ainsi, un critère essentiel pour la sélection de l'interface-usager a été la robustesse de l'écran. L'option d'utiliser un écran tactile a été éliminé pour éviter que l'opérateur ne le salisse avec de la résine. Le choix d'écran s'est donc arrêté sur le PanelView Plus 700 d'Allen-Bradley présenté sur la Figure 4.1.

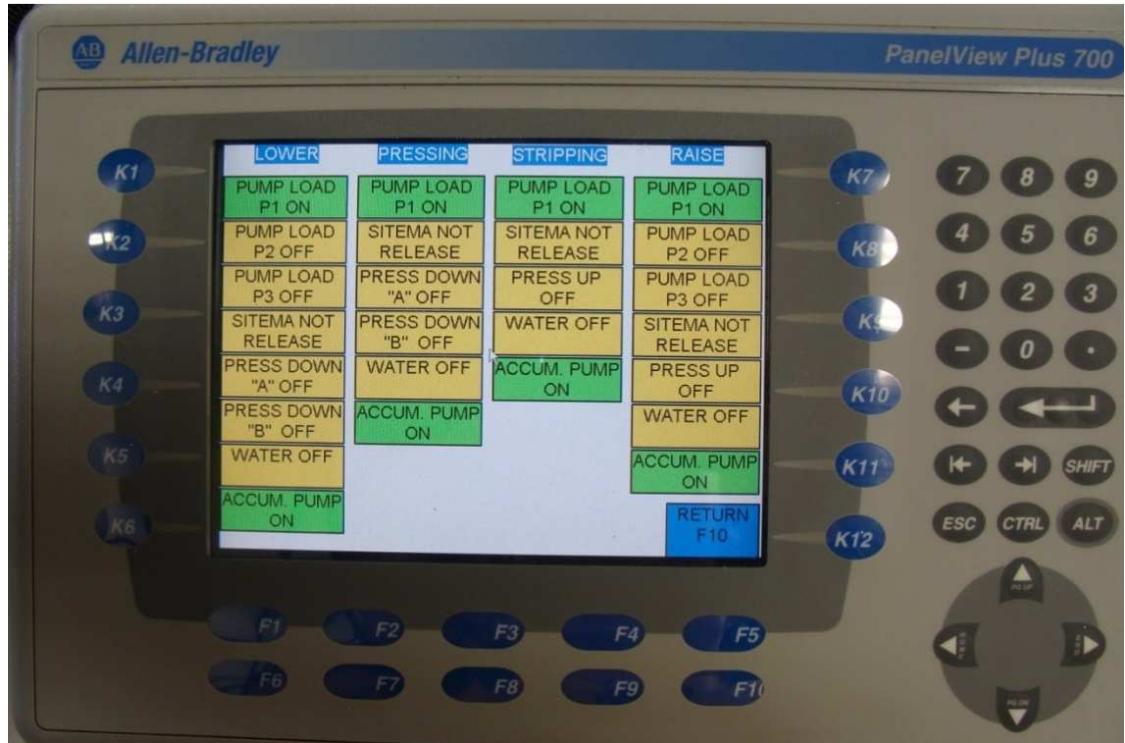


Figure 4.1: Photo de l'interface-usager PanelView Plus 700.

En plus de l'interface-usager, plusieurs composantes du PLC ont été sélectionnées. La machine d'injection possède des capteurs de pression et des thermocouples qui permettent d'analyser en laboratoire et de commander le comportement du système. Pour traiter ces données, il est essentiel de pouvoir les diriger de l'automate vers un ordinateur, soit par le réseau, soit par branchement direct. Une carte Ethernet a donc été ajoutée dans la liste des matériels présentée à l'Annexe 10. Cette liste contient toutes les pièces d'Allen Bradley qui furent nécessaire pour assembler l'automate. Passons maintenant à la description des modes de fonctionnement du système d'injection.

4.1.2 Mode manuel

Il est nécessaire de pouvoir opérer manuellement la machine. Pouvoir démarrer manuellement les pompes pour le remplissage ou activer un moteur est nécessaire pour le démarrage, l'entretien ou la vérification du système. Le mode manuel est contenu dans une page de l'interface utilisateur qui permet à l'opérateur d'actionner indépendamment toutes les composantes du système. Même en mode manuel, le programme permet à l'utilisateur de visualiser ou d'enregistrer les données de pression, de température et de débit.

4.1.3 Logique de commande en température

La logique de commande de la température des composants chimiques est présente dans tous les modes autres que celui manuel. Les composantes asservies par cette logique sont les éléments chauffants et les valves solénoïdes. Il y a un circuit de chauffage par composant, qui est composé de la chambre d'eau entourant le réservoir de résine, d'un échangeur de chaleur installé sur le retour de la résine polymère, d'un élément chauffant dans la chambre d'eau, d'une valve solénoïde et de deux outils de mesure de la température, un pour l'eau et un pour la résine. La boucle de chauffage se définit textuellement comme présenté dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Différentes étapes de la logique de chauffage.

Étape	Actions	Composante(s) en jeu
1	Vérifier si la valve de vidange d'eau est fermée	Valve de vidange d'eau
2	Vérifier si le chauffe-eau est fermée	Élément chauffant

Étape	Actions	Composante(s) en jeu
3	Prendre la température avant l'échangeur de chaleur (T6)	T6
4	Prendre la température après l'échangeur de chaleur (T3)	T3
5	Prendre la température du water jacket (T2)	T2
6	Prendre la température de la résine (T1)	T1
7	_____si $T1 < T$ utilisateur Allumer témoin de chauffage	T1, T set point
8	_____tan que $T2 < T_{max}$ réservoir Allumer le chauffe-eau	T_{max} réservoir, T2 Élément chauffant
9	_____si $T1 > T$ utilisateur Arrêter le chauffe-eau Ouvrir la valve de vidange d'eau pour X1 secondes	T1, T Élément chauffant Valve eau, X1
10	_____si $T1 = T$ utilisateur Arrêter le chauffe-eau	T1, T Élément chauffant
11	_____si $(T6 - T1) > (T1 + X2)$ Ouvrir la valve de vidange d'eau pour X3 secondes	T6, T1, X2 Valve eau

Toutes les valeurs inconnues dans la boucle de chauffage sont définies dans les paramètres de chauffage accessibles par l'interface-usager. La boucle finale est quelque peu plus complexe que celle décrite et est disponible dans le répertoire du projet sous un fichier RS Logix 5000. La liste des fichiers du répertoire est disponible à l'Annexe 12. Entre autre, quelques limites de températures sont ajustables par l'utilisateur tel que définit à la section 5.1.1.2.

4.1.4 Recirculation à basse pression

Dans ce mode, le système peut fonctionner à basse pression. Le mode de recirculation à basse pression consiste à pomper les deux composants chimiques à vitesse réduite. Ce mode est utilisé pendant le chauffage du système et entre deux cycles d'injection différents. Dans ce mode, la boucle de chauffage qui commande la température des fluides est activée. L'unité hydraulique est maintenue active pour s'assurer que les deux pistons de la tête de mélange bouchent la chambre de mélange. Quand tout le système est prêt, les deux pompes à haute pression sont démarrées à vitesse réduite jusqu'à ce que le système atteigne sa température de circulation et qu'une injection soit commandée. Lorsque l'opérateur, qui a préalablement entré les données requises, demande une injection, le système passe à un troisième mode : la recirculation à haute pression.

4.1.5 Recirculation à haute pression

Le mode de recirculation à haute pression permet de stabiliser le système avant une injection. La température et le débit sont ajustés selon les paramètres entrés par l'utilisateur. Évidemment, les débits doivent être réglés en fonction du rapport de mélange des composants pour la formulation de résine utilisée. Ce rapport est pour le moment fixé, jusqu'au jour où un autre type de résine sera utilisé. Une fois le système prêt pour une injection, celle-ci peut être démarrée par l'opérateur. Cette étape nous amène à discuter des deux types d'injection possibles : l'injection à débit contrôlé et l'injection à pression contrôlée.

4.1.6 Injection à débit contrôlé

Une injection contrôlée en débit est relativement simple à automatiser. La vitesse des pompes à haute pression est d'abord fixée pendant le mode de circulation à haute pression selon le débit demandé par l'opérateur. Ensuite, l'unité hydraulique maintient une pression d'huile de 200 bars pour assurer un délai d'actionnement des pistons très court. Comme mentionné précédemment, ce temps d'ouverture affecte directement la qualité du mélange des premiers grammes de résine injectée. Au moment où l'opérateur commande l'injection, le piston autonettoyant et le piston de mélange s'ouvrent subseqüemment. Lorsqu'ouverts, ces pistons laissent s'écouler hors du système le mélange de la résine et du durcisseur pompés par les pompes chimiques. L'ouverture du second piston provoque ce passage du mode de recirculation à l'injection proprement dite. À ce moment, les jets des deux composants sous haute pression convergent dans la chambre de mélange et s'écoulent vers le moule. Pendant l'injection, les vitesses des pompes sont asservies selon les débits entrés avant l'injection par l'utilisateur. Au moment précis où la masse de résine demandée par l'opérateur est injectée, le piston de mélange et le piston autonettoyant sont fermés. Cela termine l'injection et le système retourne en mode recirculation à basse pression. Pendant une injection, toute surpression provoque un arrêt instantané des pompes et la fermeture de la tête d'injection.

4.1.7 Injection à pression contrôlée

Une autre technique pour automatiser une injection de résine dans un moule est le commande en pression. Le système est équipé d'un capteur de pression qui doit être installé tout près du port d'entrée du mélange de résine dans la cavité du moule. Pour ce type d'injection, les étapes sont les mêmes que précédemment, à une différence près : pendant l'injection, les vitesses des pompes à haute pression sont asservies selon la

pression dans le moule définie par l'opérateur. Si la pression dépasse la valeur demandée, les pompes sont ralenties tout en conservant le rapport du mélange et vice-versa. Encore une fois, l'utilisateur doit préalablement entrer tous les paramètres de l'injection, soit la masse de résine à injecter, les pressions d'injection et le rapport de mélange. Lorsqu'une injection est terminée, le système retourne en mode recirculation à basse pression. Si une pression dans le système ou le moule dépasse une valeur limite fixée par l'utilisateur, cela provoque un arrêt des pompes et la fermeture de la tête de mélange.

Plusieurs rencontres avec le programmeur et l'élaboration séquentielle des modes de fonctionnement ont permis de mener à bien le choix de toutes les composantes du PLC, ainsi que sa programmation. Le logiciel RS Logix 5000 de Rockwell Automation a été utilisé pour la programmation. D'autres logiciels du fabricant comme RS View et RS Linx sont utilisés pour respectivement programmer l'interface-usager et transférer de données du PLC vers un ordinateur ou commander à distance le PLC. Quelques images de l'interface utilisateur sont présentées au Chapitre 5 dans l'explication sur le fonctionnement du système. Après avoir établi les caractéristiques requises pour l'automate programmable, la conception du système d'injection a nécessité une autre étape majeure : la définition de l'assemblage.

4.2 Définition de l'assemblage

La définition de l'assemblage a représenté un défi de taille en raison des contraintes dimensionnelles du laboratoire. Tout d'abord, les machines de ce type utilisent normalement deux ou trois fois l'espace disponible pour le projet. Plusieurs dispositions des éléments ont dû être envisagées. Dans les systèmes existants, deux types

principaux de positionnement des éléments sont rencontrés ; linéaire avec les réservoirs côté à côté ou en largeur avec un réservoir à chaque extrémité. La Figure 4.2 ci-dessous montre des photos de deux systèmes qui illustrent bien les deux types de disposition.



Figure 4.2 : Positionnement en largeur (gauche) et linéaire (droite) des éléments de machines d'injection.

Pour respecter les contraintes horizontales, il a été nécessaire d'utiliser la hauteur maximale disponible. De plus, cette hauteur maximale a été utilisée afin maximiser l'effet de la force de gravité pour pousser la résine vers les pompes. En effet, un positionnement plus élevé des réservoirs par rapport aux pompes permet d'augmenter la pression à l'entrée de ces dernières. Pour diminuer la longueur du système, les pompes furent positionnées verticalement, ce qui représente une innovation importante au niveau de la conception. Cette idée a permis de libérer assez d'espace pour pouvoir un jour augmenter la puissance de pompage du système. L'élaboration du modèle présenté sur la Figure 4.3 tient compte de toutes les contraintes d'espace, d'accessibilité des pièces et

respecte les schémas des circuits de recirculation des composants. L'Annexe 12 indique où ce modèle CATIAV5 est situé dans le répertoire électronique du projet.



Figure 4.3 : Vues isométriques de la modélisation finale du système d'injection.

Cette modélisation de l'assemblage du système représente plusieurs mois de travail et a permis d'optimiser au maximum la disposition précise de chaque élément. Ce nouveau système d'injection utilisant la technique de mélange par jets convergents est très compact tout en laissant les espaces nécessaires à son entretien ou à sa réparation. Il suffit de retirer les boulons qui fixent de n'importe laquelle des pièces pour pouvoir la changer facilement. Les dimensions « hors-tout » sont de 1,2 mètres de largeur, 2 mètres

de longueur et 3 mètres de hauteur. Après avoir défini les conditions d'assemblage, la fabrication du système d'injection a pu démarrer. Les principales étapes sont décrites dans la section suivante.

4.3 Fabrication du système

Les étapes de conception résumées précédemment ont permis d'analyser les besoins, d'évaluer les solutions possibles et de sélectionner la solution la mieux adaptée. Cette étape critique du développement du système d'injection, qui a duré plus d'un an, a permis d'économiser temps et argent lors de la fabrication et de l'assemblage. Cette section résume les différentes étapes de la fabrication du système d'injection.

4.3.1 Châssis

Première pièce de l'assemblage à être construite, le châssis représente le support d'un casse-tête sur lequel toutes les autres composantes sont venues s'imbriquer. Les dimensions et positions de chacun des supports furent établies à partir des dessins techniques des fournisseurs utilisés lors de la modélisation de l'assemblage sur ordinateur. Robuste, solide, facile à assembler et à modifier, l'acier a été le matériel de choix pour le châssis. Un tube de 3 par 3 pouces d'épaisseur 0,1875 pouces a permis de construire un châssis avec une solidité bien au-delà de celle requise. La coupe, la soudure et la peinture du châssis ont été effectuées à l'École Nationale d'Aérotechnique et quelques photographies sur la Figure 4.4 et la Figure 4.5 montrent l'envergure des travaux.

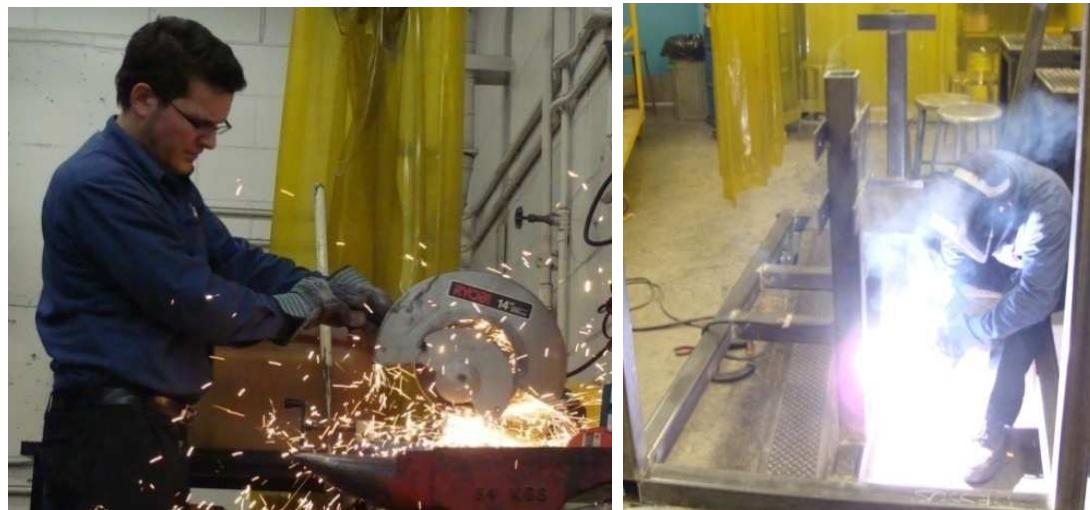


Figure 4.4 : Coupage et soudure du châssis.



Figure 4.5 : Châssis et réservoirs après la peinture.

4.3.2 Assemblage

Suite à la réception des équipements, leurs assemblage sur le châssis a été rapide et efficace. La plomberie et le filage furent sous-traités pour des raisons temps et de sécurité. Tout l'assemblage s'est déroulé impeccablement, démontrant par le fait même l'importance de faire une bonne conception au préalable. Le résultat final est illustré sur les photos de la Figure 4.6 et la Figure 4.7.



Figure 4.6 : Vue de la machine avant l'isolation thermique.



Figure 4.7 : Photo de la machine d'injection assemblée avant l'isolation thermique.

Pour relier le système d'injection au chariot mobile de la presse Eagle présentée au Chapitre 3, des tubes flexibles de 16 mètres de longueur pour la haute pression ont été installés entre la tête de mélange et la machine. Ainsi, il est aisément de relier la tête de mélange avec un moule installé dans la presse sans contraindre les mouvements de celle-ci. De plus, comme le système d'injection fonctionne toujours en recirculation en dehors des temps d'injection, les 16 mètres de tubes s'échauffent tout de même au bout d'un moment après le démarrage. Aucune isolation additionnelle n'a été installée sur ces tubes de liaison, de façon à leur laisser un maximum de liberté de mouvement. La sélection des tubes de liaison entre la tête de mélange par jets convergents et le système d'injection a été effectuée en fonction de la pression maximale de fonctionnement de 200 bars et du type d'écoulement obtenu au débit maximal de la machine. L'écoulement dans ces tubes doit être laminaire. Un calcul du nombre de Reynolds en fonction de la température et du diamètre du tube a été effectué pour la résine et le durcisseur. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.3. Voici l'exemple d'un calcul :

$$RE(25^{\circ}C) = \frac{\rho * Q * D}{\nu * A} = \frac{1239 \langle kg/m^3 \rangle * 0,000267 \langle m^3/s \rangle * \left(5/16 * 0,0254\right) \langle m \rangle}{0,449 \langle Pa.s \rangle * \left(\pi \left(5/16 * 0,0254\right)^2 / 4\right) \langle m^2 \rangle}$$

$$= 118$$

où ρ = densité du fluide ν = viscosité du fluide
 Q = débit dans le tube A = aire transversale interne du tube
 D = diamètre interne du tube

Tableau 4.3 : Nombres de Reynolds pour la résine et le durcisseur pour deux tailles de tubes

Résine Lindoxy 190						
Température °C	25	40	60	80	100	120
Nb. Re (dia. 5/16")	118,062	311,822	96,733	2236,69	<u>4417,47</u>	7067,96
Nb. Reynolds (dia. 3/8")	81,9872	216,543	67,1757	1553,26	<u>3067,69</u>	4908,3
Durcisseur LS-252V						
Température °C	25	40	60	80	100	120
Nb. Re (dia. 5/16")	35,34	88,34	265,04	530,10	1060,19	1514,56
Nb. Reynolds (dia. 3/8")	24,54	61,35	184,06	368,12	736,25	1051,78

Les résultats du tableau montre qu'en chauffant la résine de 25 à 100°C, le nombre de Reynold passe de 82 à 3068 dans un tube possédant un diamètre interne de 3/8". Cette variation est causée par le changement de viscosité de la résine présenté au Chapitre 3 dans la Figure 3.1. Pour un tube de diamètre inférieur, soit de 5/16", le nombre de Reynold pour la Lindoxy 190 atteint une valeur de 4417. Cette valeur est supérieure à 4000 et signifie que l'écoulement dans ce tube serait turbulent à cette température pour la résine. Cette analyse a donc permis de constater qu'un diamètre de 3/8" pour les tubes flexibles était suffisant pour assurer un écoulement laminaire, soit un nombre de Reynolds en dessous de 4000, pour une température allant jusqu'à 100°C. Le tube choisi pour transporter les deux résines pressurisées est le produit numéro H243 fourni par la compagnie Eaton. Ses caractéristiques sont montrées sur la Figure 4.8. Le tube interne de ce tuyau est en téflon renforcé par un tissage en acier inoxydable de type

304. Pour la période de la mise en route du système présentée au Chapitre 5, un support à boyaux a été installé sur la machine. Il facilite l'accès à la tête de mélange qui se doit d'être accessible pendant cette étape finale du développement de notre système d'injection d'époxy bi-composant.

H243 PTFE Hose



#	Hose I.D.			Hose O.D.			Working Press. (PSI)		Min. Burst Pressure		Min. Bend Radius		Wt. Per 100 Ft.		Avail. Lengths
Part Number	mm	in	fraction	mm	in	fraction	bar	psi	bar	psi	mm	in	Kg/m	lbs/ft	feet
H24303	4,8	0.19	3/16	7,9	0.31	5/16	206,9	3,000	827,4	12,000	50,8	2,00	2,7	6	50
H24303-150R									661,9	9,600*					150
H24304	6,4	0.25	1/4	9,1	0.36	23/64	206,9	3,000	827,4	12,000	76,2	3,00	3,6	8	50
H24304-100R									661,9	9,600*					100
H24305	7,9	0.31	5/16	10,7	0.42	27/64	172,4	2,500	689,5	10,000	101,6	4,00	4,5	10	50
H24305-100R									551,6	8,000*					100
H24306	9,5	0.38	3/8	12,7	0.50	1/2	137,9	2,000	551,6	8,000	127,0	5,00	5,4	12	50
H24306-100R									413,7	6,000*					100
H24308	12,7	0.50	1/2	16,3	0.64	41/64	120,7	1,750	482,7	7,000	165,1	6,50	6,8	15	50
H24308-100R									379,2	5,500*					100
H24312	19,1	0.75	3/4	22,6	0.89	57/64	69,0	1,000	275,8	4,000	228,6	9,00	10,0	22	50
H24316	25,4	1.00	1	28,6	1.13	1-1/8	69,0	1,000	275,8	4,000	304,8	12,00	22,2	49	50
									241,3	3,500*					

Inner Tube: PTFE

Reinforcement: Single Stainless Steel Braid, 1" Size Double Stainless Steel Braid (Type 304)

Temp. Range:

-65°F to +450°F
(-54°C to +232°C)

Typical Application:

Hydraulic, air and steam-lines. Particularly suited for air compressor discharge lines where vibration and high temp are present.

FDA Accepted Material

*For applications above +300°F (+149°C)

Note:

Not for use in applications requiring static dissipation.

For more information on PTFE hose options refer to the Everflex Catalog, document number E-HOEV-MC001-E.

Hose End Reference

C-O-C

'E' Series

Figure 4.8 : Caractéristiques du tube de liaison entre le système et la tête de mélange.

CHAPITRE 5

MISE EN ROUTE ET PREMIERS RÉSULTATS

Le chapitre précédent a montré l’assemblage et la fabrication du système d’injection pour résines époxy avec mélange par jets convergents. Ce chapitre décrit la mise en route du nouveau système conçu. La première section explique comment ce système relativement complexe est opéré. Tout d’abord, les fonctions des différentes composantes mécaniques sont détaillées, puis les différents paramètres accessibles à travers l’interface avec l’utilisateur de l’automate programmable sont décrits. La section 5.2 résume les étapes de mise en route, qui ont permis de valider la programmation et de calibrer le système. Finalement, dans la section 5.3, on analyse les résultats des premières injections de résine époxy bi-composants.

5.1 Fonctionnement du système

Il existe deux types de fonction nécessaires à une utilisation autonome et sécuritaire du système d’injection : les manipulations mécaniques et l’utilisation de l’interface-usage. Le système d’injection intègre plusieurs équipements mécaniques auxquels une attention particulière doit être portée afin d’assurer une utilisation sécuritaire et viable. Le Tableau 5.1 résume les fonctions de chaque accessoire identifié sur la Figure 5.1 et opérable manuellement sur le système d’injection.

Tableau 5.1 : Informations sur les accessoires mécaniques du système

#	Accessoire	Description
1	Valve pré-filtres	Située à la sortie de chaque réservoir. Normalement ouverte. Permet l'entretien des filtres.
2	Pré-filtre	Filtration grossière. Fermer la valve des filtres et dévisser le bouchon pour nettoyer le grillage de filtration.
3	Filtre	Filtration à 100 micron. Fermer la valve des filtres et retirer le couvercle pour changer le sac de filtration. La petite valve permet de purger l'air du filtre.
4	Valve post-filtres	Située à la suite des filtres. Normalement ouverte. Permet l'entretien des pompes.
5	Multi-valves	Situées au branchement des tuyaux de la tête de mélange. Normalement ouvert.
6	Valve de drainage	Située au bas du retour vers le réservoir. Normalement fermée.
7	Disque de rupture	Situé près de la pompe à haute pression. Comprend 2 valves d'entretien normalement ouvertes. Pression de rupture de 4500 psi à 120° Celsius. Prévient le bris d'équipement et les risques de blessure en cas de surpression.
8	Valve de surpression	Près de chaque réservoir. S'ouvre en cas de surpression dans le fluide caloporteur.
9	Valves pour l'eau	Ouvre ou ferme l'alimentation en eau.

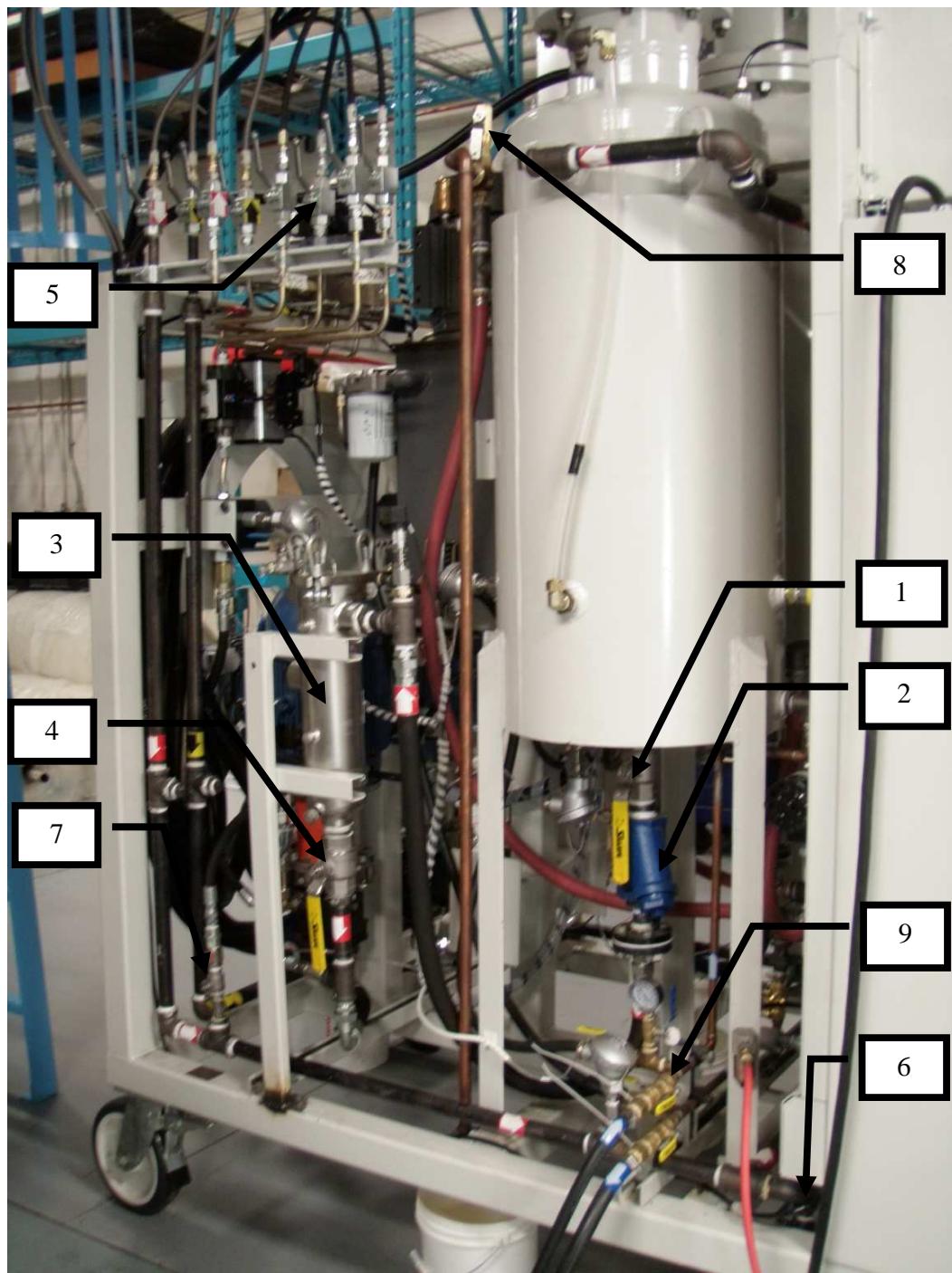


Figure 5.1 : Position des composantes mécaniques pour l'opérateur.

(Se référer au Tableau 5.1 pour la nomenclature de chaque élément numéroté.)

Outre les accessoires mécaniques, les opérateurs du système d'injection doivent se familiariser avec l'utilisation de l'interface-usager. Les paramètres de l'interface avec l'utilisateur doivent être bien définis. La prochaine section présentera les menus suivants : accueil, configuration, vue d'ensemble du système, injection contrôlée en débit, injection contrôlée en pression, calibration et données enregistrées. Il faut noter que les différents menus de l'interface-usager sont programmés en anglais sur le logiciel RS View.

5.1.1.1 Accueil

La page d'accueil de la Figure 5.2 est la première présentée à l'opérateur lors de la mise sous tension du système d'injection. L'opérateur doit s'identifier s'il veut pouvoir accéder à tous les paramètres modifiables du système. Cependant, dans le cas où le système serait déjà réglé, l'opérateur qui ne s'est pas identifié a tout de même accès à tous les paramètres nécessaires pour réaliser une injection. La touche « Login » permet d'accéder au menu d'identification. La seconde fonction de cette page permet de diriger l'utilisateur vers toutes les autres interfaces de l'automate programmable :

- Alarmes
- Configuration
- Vue d'ensemble du procédé
- Injection contrôlée en débit
- Injection contrôlée en pression
- Calibration
- Données enregistrées

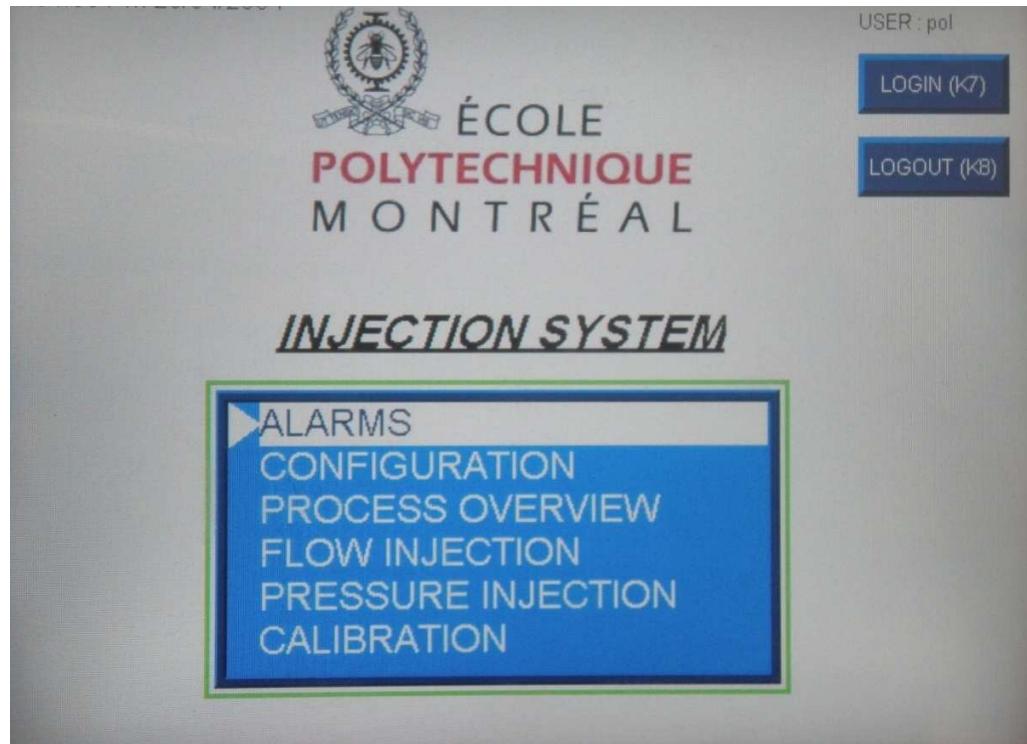


Figure 5.2 : Page d'accueil de l'interface utilisateur.

5.1.1.2 Configuration

La page de configuration permet d'accéder à tous les paramètres de base de l'automatisation du système d'injection. Que ce soit pour régler les valeurs utilisées pour la logique de chauffage, des critères de pré-injection ou pour l'ajustement des conditions d'alarme du système, tous les réglages s'y trouvent. Le Tableau 5.2 explique brièvement le contenu de chacun des sous-menus de la page de configuration.

Tableau 5.2 : Paramètres des menus de la page de configuration

Menu	Utilité / Paramètres accessibles
TANK A et TANK B	Réglage des vitesses d'agitation. Définition des températures maximales du fluide caloporteur et des paramètres de chauffage.
PRODUCT PUMPS	Ajustement des vitesses de rotation des pompes en mode de recirculation à basse pression et à haute pression et en mode manuel.
DENSITY / FLOW	Paramètres des débit-mètres, dont la densité de la résine.
FLOW PID	Ajustement des paramètres du contrôleur PID pour une injection à débit contrôlé.
PRESSURE PID	Ajustement des paramètres du contrôleur PID pour une injection à pression contrôlée.
PRESSURE CORRECTION	Calibration de tous les capteurs de pression.
ALARMS	Définition des critères d'alarme.
MANUAL MODE	Activation manuelle des composantes asservies du système.
FLOW PARAMETERS	Critères conditionnels à une injection en débit contrôlé.
PRESSURE PARAMETERS	Critères conditionnels à une injection en pression contrôlée.

5.1.1.3 Vue d'ensemble du système

La page qui est le plus couramment utilisée représente une vue globale de tous les éléments du système. L'état de chaque composante y est toujours montré ainsi que les différentes températures, pressions et les deux débits. La Figure 5.3 permet d'observer l'interface programmée. Une autre fonction de cette page est d'offrir à l'usager de se diriger vers les deux menus d'injection : l'injection contrôlée en débit et l'injection contrôlée en pression.

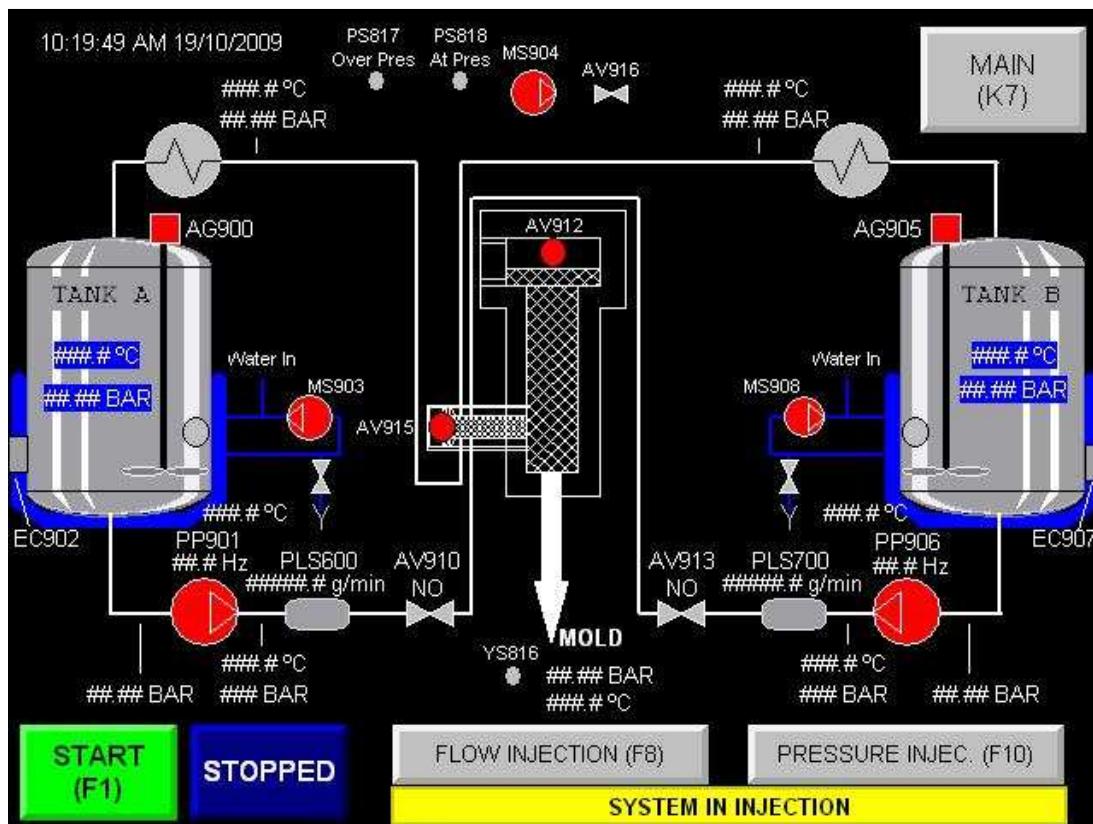


Figure 5.3 : Page donnant une vue d'ensemble du procédé.

5.1.1.4 Injection contrôlée en débit et injection contrôlée en pression

Les deux menus d'injection se présentent de façon similaire. L'opérateur qui désire procéder à une injection entre à l'écran les différents paramètres de celle-ci tels qu'illustré sur la Figure 5.4.

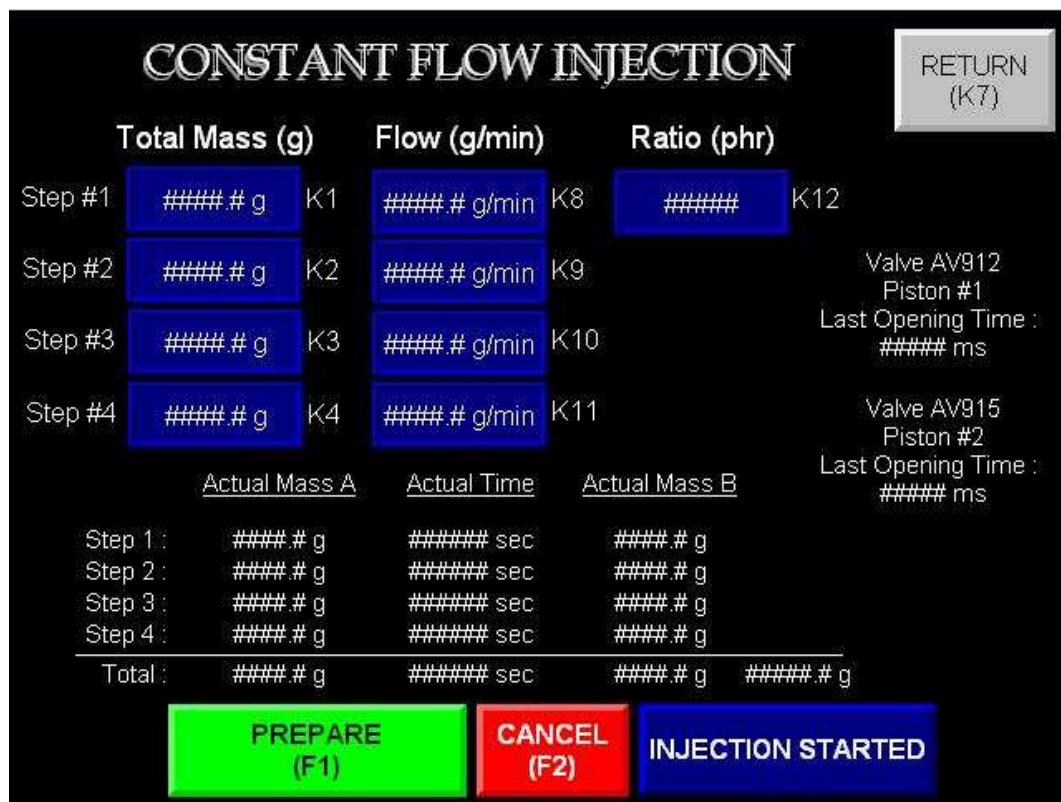


Figure 5.4 : Page pour injecter avec commande en débit de l'interface utilisateur.

Le système permet de faire une injection comportant jusqu'à quatre étapes. Pour chacune des étapes d'une injection contrôlée en débit, l'utilisateur définit la masse totale de résine et le débit. La possibilité de faire varier le rapport du mélange à chaque étape n'a pas été incluse, car elle est inutile pour le moment. Cependant, il sera facile d'ajouter

cette fonction ultérieurement. L'interface d'injection affiche les données de la dernière injection réalisée ainsi que le dernier temps d'ouverture de chacun des pistons de la tête de mélange par jets convergents. Rappelons qu'un temps d'ouverture trop long indique un problème de piston. Quand l'utilisateur veut procéder à une injection, l'automate programmable vérifie que le système a atteint sa température de recirculation. Lorsque le système est à la température spécifiée dans les sous-menus des réservoirs de la page de configuration, l'usager peut enclencher la préparation à l'aide de la touche « Prepare ». Le système d'injection règle alors la vitesse des pompes selon le débit demandé par l'utilisateur. Une fois cette vitesse atteinte, l'opérateur peut alors engager la phase d'injection.

La vitesse de rotation des pompes (RPM_a et RPM_b) est fonction du rapport massique du mélange (K), de l'ajustement du déplacement volumétrique par rotation des pompes (V_a et V_b), la densité des fluides (ρ_a et ρ_b) et du débit total de résine mélangée demandé (Q). Par exemple, pour les valeurs suivantes,

$$K = 160 \text{ phr} \quad V_a = 6 \text{ cm}^3/\text{rotation} \quad V_b = 9.6 \text{ cm}^3/\text{rotation}$$

$$\rho_a = 1.105 \text{ g/cm}^3 \quad \rho_b = 1.082 \text{ g/cm}^3 \quad Q = 3000 \text{ g/min}$$

les vitesses de rotations se calculent comme suit :

$$RPM_a = \frac{Q_a}{\rho_a V_a} = \frac{Q / (1 + K/100)}{\rho_a V_a} = \frac{3000 / (1 + 160/100)}{1.105 * 6} = 174 \text{ rpm}$$

$$RPM_b = \frac{Q_b}{\rho_b V_b} = \frac{Q / (1 + 100/K)}{\rho_b V_b} = \frac{3000 / (1 + 100/160)}{1.082 * 9.6} = 178 \text{ rpm}$$

Les deux valeurs sont très proches, même si le rapport de mélange de 160 phr, car le déplacement volumétrique des pompes est ajusté pour celui-ci. C'est-à-dire que $V_a/V_b=1,6$.

5.1.1.5 Calibration

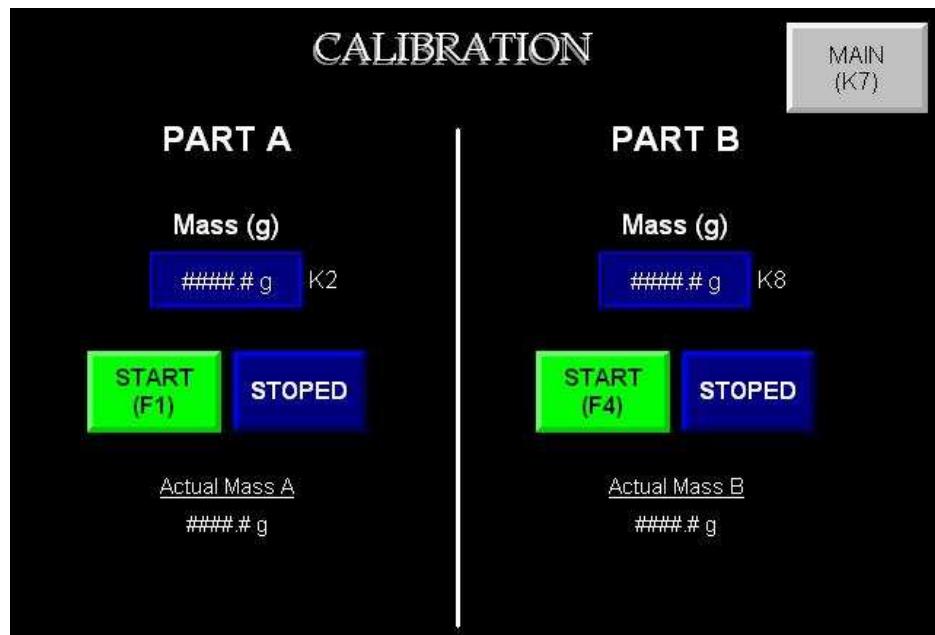


Figure 5.5 : Page de calibration de l'interface-usager.

La page de calibration de la Figure 5.5, quoi que très simple, fut essentielle lors de la mise en route du système d'injection. Elle permet d'effectuer l'injection d'un seul composant à la fois pour ajuster la calibration du débit-mètre et de la pompe de chaque circuit. L'opérateur doit fermer l'orifice, les valves et la pompe du circuit non utilisé avant l'injection d'un composant unique.

5.1.1.6 Données enregistrées

DATA LOGGING									RETURN (K7)	
Date	Time	Mode	Flow / Pres	Temp.	Pressure	Qte	AV912	AV915		
00 / 00 / 0000	00 : 00			0.0 °C	0.0 bar	0.0 g	0 ms	0 ms		
00 / 00 / 0000	00 : 00			0.0 °C	0.0 bar	0.0 g	0 ms	0 ms		
00 / 00 / 0000	00 : 00			0.0 °C	0.0 bar	0.0 g	0 ms	0 ms		
08 / 17 / 2009	10 : 48	FLOW	3000.0 g/min	39.5 °C	67.9 bar	200.1 g	469 ms	89 ms		
08 / 17 / 2009	10 : 04	FLOW	3000.0 g/min	29.5 °C	90.7 bar	100.4 g	552 ms	98 ms		
08 / 14 / 2009	12 : 00	FLOW	3000.0 g/min	31.8 °C	105.7 bar	100.4 g	523 ms	98 ms		
08 / 13 / 2009	17 : 13	PRES	73.0 bar	37.9 °C	72.5 bar	400.4 g	473 ms	91 ms		
08 / 13 / 2009	16 : 43	FLOW	4000.0 g/min	31.7 °C	108.8 bar	100.1 g	500 ms	93 ms		
08 / 13 / 2009	16 : 38	FLOW	2000.0 g/min	30.2 °C	75.5 bar	265.1 g	509 ms	90 ms		
08 / 13 / 2009	16 : 35	FLOW	3000.0 g/min	29.8 °C	105.0 bar	426.5 g	522 ms	96 ms		

Figure 5.6 : Page d'enregistrement des données de l'interface-usager.

La page d'enregistrement des données présente les résultats et paramètres des 10 dernières injections. On peut y voir les informations montrées sur la Figure 5.6. Cette page de l'interface-usager est très utile lorsque l'opérateur désire vérifier rapidement l'évolution du temps d'ouverture de chacun des pistons. On peut maintenant passer à l'étape finale du développement : la mise en route et la calibration de la machine d'injection.

5.2 Mise en route et calibration

La mise en route du système fut le moment de vérité du projet, pendant lequel le système a été utilisé pour la première fois. Cette étape a été divisée en plusieurs parties afin de démarrer séquentiellement certaines composantes du système et pouvoir ainsi détecter facilement toute anomalie. Les actions suivantes ont été effectuées :

- Mise sous tension de l'automate programmable, qui commande toutes les composantes.
- Vérification individuelle des tous les éléments électriques : capteurs, interrupteurs, valves et moteurs.
- Remplissage subséquent de chacun des fluides : l'air pressurisé, l'eau, l'huile et les résines, puis vérification des fuites.
- Vérification et ajustement de tous les paramètres de fonctionnement du système dans l'interface-usager.
- Mise en marche de la logique de chauffage et vérification de son fonctionnement.
- Ouverture subséquente de chacune des valves et pompage des résines dans les circuits en mode manuel.
- Circulation des composants chimiques pendant 5 jours et changement des filtres afin de retirer toute poussière résiduelle de la fabrication.
- Prélèvement d'une quantité de résine et de durcisseur, puis vérification de la présence d'huile de taraudage ou autre corps étranger.
- Mise en route du système en mode automatique à basse pression et vérification des différentes alarmes.

- Mise en fonction de chacun des contrôleurs PID et ajustement de leur paramètres d'asservissement.
- Multiples démarrages du système d'injection pendant plusieurs journées consécutives pour détecter une quelconque anomalie et ajuster tous les paramètres de fonctionnement.

Le démarrage s'est déroulé sans anicroches majeures. La pression de circulation maximale de 200 bars a été testée dans chacun des circuits et les quelques fuites détectées furent réparées. Ces étapes réalisées avec patience et minutie ont permis de démarrer avec succès le système d'injection et de commencer la phase de calibration de l'injection.

La calibration du système est faite en fonction des propriétés du polymère thermodurcissable et de la plage de débit désirée. Le système de résine utilisé est de la résine époxy de Lindow Chemicals. Le rapport de mélange est de 160 grammes de durcisseur LS-252V pour 100 grammes de résine Lindoxy 190. Le déplacement des pistons des pompes à haute pression à l'aide des roulettes montrées sur la Figure 5.7 a été le premier ajustement effectué. Pour la résine époxy, le déplacement volumétrique par rotation de la pompe du durcisseur a été réglé 160 % de celui de la résine.



Figure 5.7 : Roulette de l'ajustement volume déplacé par les pistons de la pompe à haute pression.

Les autres ajustements possibles du système d'injection sont ceux de la tête de mélange par jets convergents. Comme mentionné à la section 3.3.1, chaque résine polymère est pompée à travers un orifice qui concentre et oriente le débit vers la chambre de mélange. L'ouverture de chacun des orifices est réglée à l'aide d'une aiguille et affecte directement la pression des jets convergents. Le schéma de la Figure 5.8 montre les différents éléments de ce dispositif, qui gouverne la qualité du mélange par jets convergents. Le Tableau 5.3 décrit les éléments constitutifs du dispositif d'orifice.

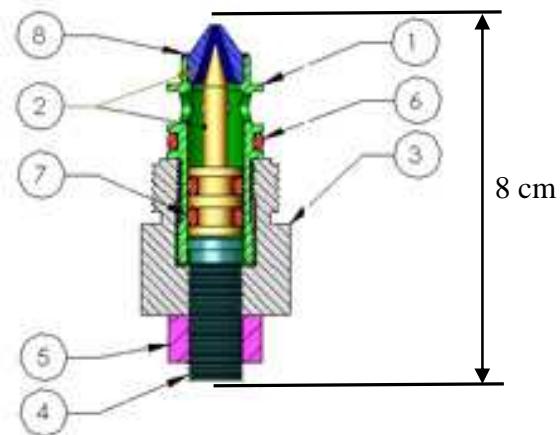


Figure 5.8 : Schéma d'un ensemble orifice et aiguille de la tête de mélange.

Tableau 5.3 : Description des éléments des deux orifices de la tête de mélange

Élément	Description
1	Boîtier de l'orifice.
2	Aiguille et son orifice, dirigeant la résine sous haute pression.
3	Écrou d'assemblage.
4	Boulon d'ajustement de l'aiguille.
5	Écrou de blocage du boulon d'ajustement.
6-7-8	Joints d'étanchéités.

Les dimensions des orifices présentement installés sont de 1.5 mm pour la résine époxy et 2 mm pour son durcisseur. Ces valeurs ont été proposées par le constructeur de la tête de mélange en tenant compte de la viscosité des polymères thermodurcissables

que nous utilisons. Les premières injections ont permis d'observer la qualité du mélange en fonction des ajustements. Elles sont décrites dans la section suivante.

5.3 Premières injections

Outre les multiples injections non documentées qui ont été effectuées lors du démarrage du système d'injection, une première série de quelques injections a permis d'ajuster les orifices de la tête de mélange. Cette section contient une analyse des résultats obtenus. Notez que ces injections sont effectuées dans des pots ouverts, et pas dans des moules fermés. Cette façon de procéder a permis de simplifier le travail, qui aurait été autrement plus complexe, car aucun moule n'était disponible au moment des essais. En outre, la qualité du mélange est plus facile à évaluer dans un pot qu'à l'intérieur d'un renfort fibreux. Observons d'abord l'échantillon mélangé à la main de la et polymérisé selon les mêmes étapes que tous les échantillons injectés.

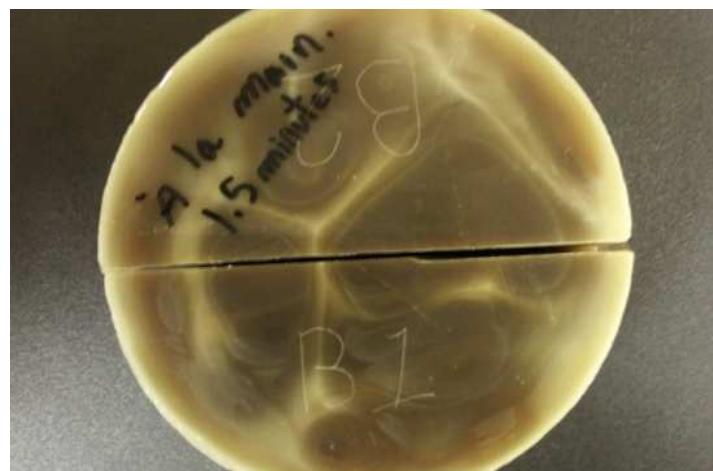


Figure 5.9 : Échantillon mélangé à la main.



Figure 5.10 : Premier échantillon de résine injecté.

Le résultat de la première injection effectuée est présenté sur la photographie de la Figure 5.10. Différentes zones de couleur sont présentes sur l'échantillon de la Figure 5.10. Le système de résine époxy utilisé ici polymérise à température ambiante pendant une semaine et prend une couleur uniforme blanchâtre. Les échantillons de 300 grammes ont été polymérisés à 80°C pendant 2 heures dans cette analyse. Cette polymérisation confère plus d'énergie à la résine et conduit à créer ces différentes zones de couleur dans les échantillons. En effet, une polymérisation est une réaction exothermique au cours de laquelle se produit la réticulation des chaînes polymères. La polymérisation d'une masse pure de résine, sans renfort, produit de l'énergie thermique qui reste à l'intérieur de la masse en augmentant la température et la vitesse de la réaction. Les premières zones à polymériser sont celles où l'équilibre chimique entre la résine et le durcisseur est respecté. Ces zones transmettent de l'énergie aux zones voisines, qui voient par le fait même leur température augmenter. Ainsi, ces régions réagissent plus rapidement, en libérant de l'énergie thermique dans un temps plus court. Lorsque la température est trop élevée à certains endroits, la résine noircie, car elle surchauffe. L'analyse de la dispersion et de la taille des zones foncées et pâles dans les échantillons devient donc un des premiers critères pour analyser la qualité du mélange.

Le premier échantillon répertorié a été injecté avec les paramètres d'injection suivants :

- Pression du jet convergent de la résine : 70 bars
- Pression du jet convergent du durcisseur : 70 bars
- Température des résines aux réservoirs : 55° C
- Débit de l'injection : 50 g/s
- Masse de résine injectée : 300.1 grammes

Il faut noter que la température de la résine n'est pas mesurée aux orifices. Quelques mesures ont permis d'estimer que la résine injectée est à environ 6 à 10°C sous la température des produits dans les réservoirs. Le paramètre de température n'étant pas primordial à cette étape, l'analyse n'a pas été poussée plus loin. Ensuite, à partir de notre hypothèse sur les couleurs, l'observation du premier échantillon de la Figure 5.10 permet de dire que le mélange possède les caractéristiques suivantes :

- La quantité de réactif et de réactant est suffisante, car toute la résine est polymérisée.
- Le mélange est plus ou moins uniforme, car des zones plus foncées sont présentes.
- L'échantillon vu du dessous, comme sur la Figure 5.10 montre clairement une zone différente au centre, qui laisse croire que la qualité des premiers grammes de résine injectée n'est pas appropriée.

Deux observations ont permis de cerner la source du problème. Dans un premier temps, les proportions du mélange sont de 100 grammes de résine pour 160 grammes de durcisseur et les densités des composants sont différentes. Or, les jets convergent à la même pression dans la tête de mélange, mais à des débits différents. Ceci a un effet certain sur l'équivalence des cônes de convergence des deux jets sous haute pression, c'est-à-dire qu'au point de convergence, l'un des cônes est plus gros que l'autre. De plus, l'énergie cinétique est différentes dû à la différence des densités ce qui affecte l'endroit de convergence. Le schéma de Figure 5.11 illustre le phénomène de la taille des cônes de convergence à l'intérieur de l'outil.

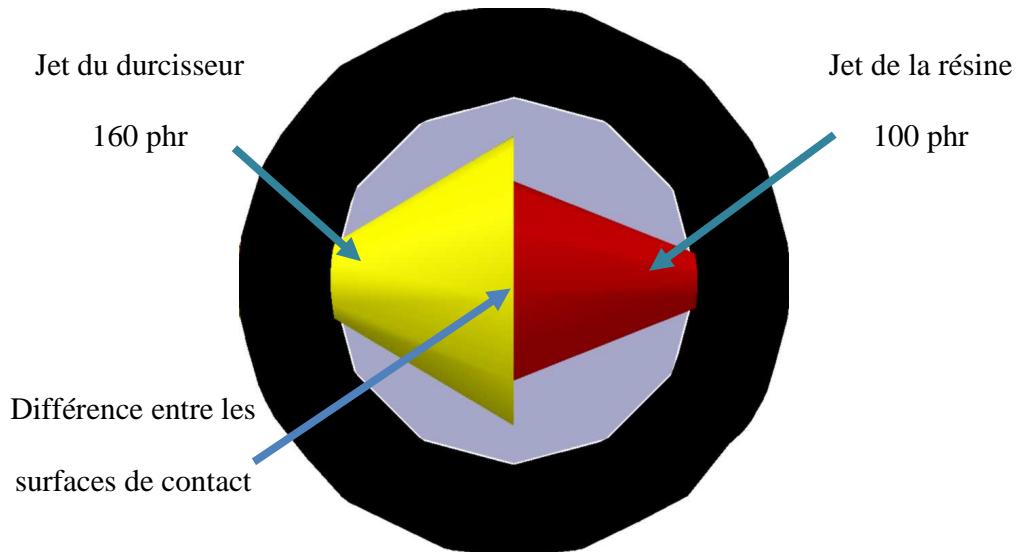


Figure 5.11 : Schématisation des cônes de convergence des jets.

La pression du composant dont l'orifice est le plus grand, le durcisseur dans ce cas-ci, a été augmentée de façon à diminuer l'angle de son cône de convergence. Pour accroître cette pression, l'aiguille de l'orifice du durcisseur, le circuit « B », a été resserrée en conséquent. Plusieurs injections ont permis de passer graduellement à une différence de pression entre les jets des deux composants allant de 5 à 20 bars.

L'ajustement de ces pressions à partir de la tête de mélange est facile. Il suffit d'observer directement sur l'affichage des valeurs des capteurs de pression suivant les pompes à haute pression comme montré sur la Figure 5.12.

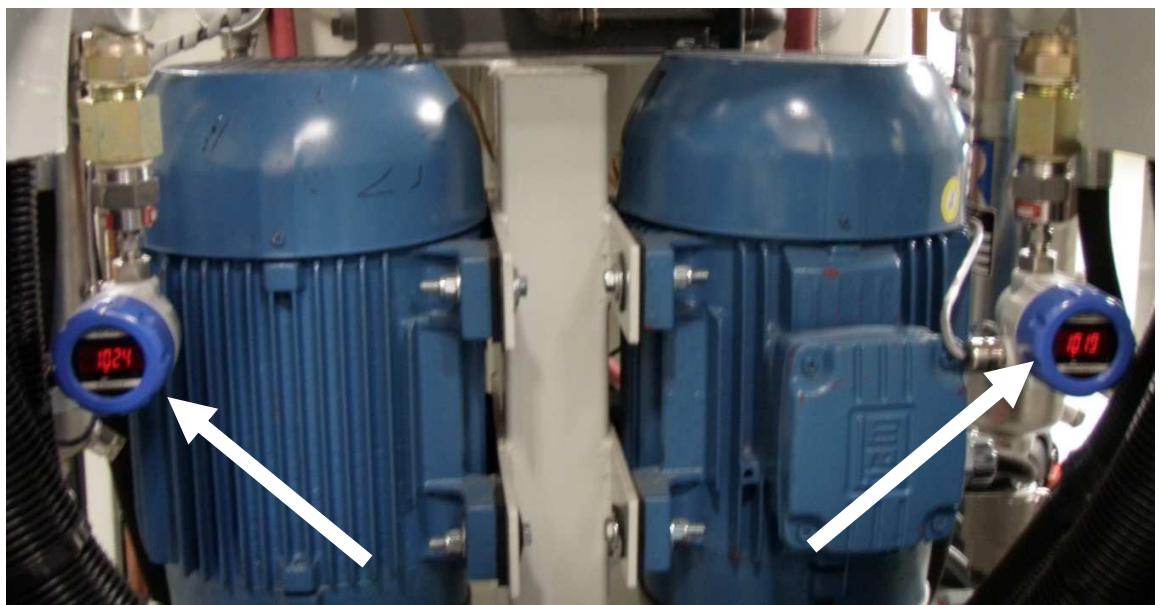


Figure 5.12 : Afficheurs de pression facilitant l'ajustement des orifices de la tête de mélange à haute pression.

L'origine du problème a pu être identifiée comme résultant d'un mélange imparfait d'une infime quantité de résine en début et en fin d'injection. En analysant les temps d'ouverture du piston qui fait passer la tête de mélange du mode de recirculation au mode d'injection, il a été observé qu'ils étaient trop longs. Le piston s'ouvre en 50 au lieu de 20 millisecondes. Il y a deux solutions pour résoudre ce problème : augmenter la pression hydraulique accumulée et / ou diminuer la perte de charge hydraulique entre l'unité de puissance hydraulique et le piston de la tête de mélange. Ces deux solutions sont réalisables en augmentant la taille de l'accumulateur hydraulique et le diamètre

interne des tuyaux à haute pression reliant la tête de mélange à l'unité hydraulique. Ces modifications font partie des travaux futurs.

Suite à ces analyses, différentes injections ont été effectuées, qui ont permis d'obtenir un mélange définitivement plus uniforme que le premier. L'échantillon de la dernière injection menée est illustré sur la Figure 5.13. Les paramètres suivants ont été utilisés pour réaliser cette injection :

- Pression du jet convergent de la résine : 70 bars
- Pression du jet convergent du durcisseur : 90 bars
- Température des résines aux réservoirs : 55° C
- Débit de l'injection : 50 g/s
- Masse de résine injectée : 300.2 grammes



Figure 5.13 : Dernier échantillon de résine époxy injectée avec le nouveau système.

Le dernier échantillon est plus uniforme que le premier, mais présente toujours quelques zones de variation de couleur. Entre autres, la Figure 5.14 met bien en évidence les lignes de couleur verticales dans l'échantillon.



Figure 5.14 : Vue des stries créées lors des injections.

Ces lignes verticales sont orientées dans le sens d'injection de la résine dans le pot à l'aide de la tête de mélange par jets convergents. Ainsi, il est possible que le mélange ne soit pas encore tout à fait au meilleur de sa qualité, quoi qu'il polymérise très bien. Une coupe transversale de l'échantillon n'a pas permise de cerner un autre problème quel qu'il soit. Plusieurs analyses, pourront être réalisées dans le but de mieux comprendre les paramètres qui régissent le mélange par jets convergents dans le cas des résines époxy. Ceci peut faire l'objet de travaux futurs.

CONCLUSION

Les matériaux composites connaissent présentement un essor grandissant. Que ce soit pour l'industrie aéronautique, automobile, les équipements de sport et de loisir ou pour le matériel militaire, ils offrent la possibilité de diminuer de façon significative le poids des équipements en maintenant des propriétés mécaniques équivalentes aux matériaux couramment utilisés. Les travaux de recherche de la Chaire sur les composites à haute performance visent à développer des outils et procédés de production qui diminuent le temps de cycle et augmentent la qualité des pièces composites fabriquées. L'objectif du projet était de développer un système d'injection innovateur pour une résine thermodurcissable époxy bi-composant adapté à la production en série des composites. Ce travail a commencé par une revue analytique de la littérature des systèmes d'injection existants et de leurs principales composantes. Ceci a démontré que les technologies à haute pression étaient indiquées pour relever le défi. La machine d'injection originale avec mélangeur à haute pression développée dans ce travail tient compte des exigences industrielles pour la fabrication des composites en série. Cette technologie d'injection unique à haute pression a été développée en s'inspirant des machines d'injection de polyuréthanes. Plusieurs mois de conception, de sélection d'équipement, de fabrication et d'assemblage ont été nécessaires pour mener à terme ce projet. La programmation sur mesure de l'automate de commande du système d'injection proposé a été validée et a permis de démontrer le bon fonctionnement de la machine. Les résultats des premières injections ont été analysés et ont conduit à des ajustements permettant d'assurer la qualité du mélange des deux composants de la résine.

Le système d'injection développé se démarque sur les points suivants :

- Concept de technologie d'injection de résines époxy innovateur avec mélangeurs à haute pression permettant les injections à grands débits dans le milieu industriel.
- Tête de mélange dynamique installée sur le moule de production évitant tout nettoyage après chaque utilisation.
- Conception très compacte avec les groupes pompes à la verticale minimisant les dimensions de la machine par rapport aux machines industrielles du marché.
- Élimination de tous les consommables ordinairement présents sur les systèmes d'injection de résine époxy comme les tubes et les mélangeurs statiques.
- Élimination de l'utilisation de solvants pour le nettoyage grâce au cylindre autonettoyant de la tête de mélange.
- Utilisation d'une tête de mélange par jets convergents haute pression avec recirculation permettant d'obtenir des débits d'injection de moins de 50 g/s et jusqu'à plus de 260 g/s.
- Utilisation d'équipements à haute pression, plus résistants et robustes que les composantes à basse pression.
- Utilisation d'un automate de commande de type industriel pouvant s'intégrer facilement au sein d'une chaîne de montage.
- Présence d'accouplements magnétiques sur les pompes éliminant les problèmes de fuites, de blessures et augmentant la tenue en température à 150° Celsius.
- Dégazage ponctuel de la résine et dégazage continu possible avec l'ajout de pompes de bourrage déjà prévu dans la conception.

Les essais et la calibration initiale du système d'injection étant terminés, certaines améliorations pourraient être considérées. L'idée initiale était un système modulaire permettant l'utilisation de 2 à 6 composants du mélange de résine, dans lequel un circuit indépendant serait dédié à un seul composant. Dans l'éventualité d'une commercialisation, ce concept devrait être réutilisé. De plus, l'ajout d'une pompe de bourrage précédent chaque pompe à haute pression assurerait un dégazage continu de la résine, améliorant par le fait même la qualité des pièces injectées. Finalement, l'intégration de pompes à vérin plutôt que les pompes à pistons permettrait d'injecter des résines avec haute teneur en charge.

Ce projet innovateur a ouvert l'utilisation des technologies à haute pression pour l'injection de résines thermodurcissables. Le système développé a été conçu pour permettre la production en série des matériaux composites. La conception du système est modulaire, puisque la recirculation de chaque composant s'effectue dans un circuit indépendant. Le système pourrait donc être facilement adapté pour plus de deux composants. Une autre avenue possible concerne la commande en température qui pourrait être adapté pour permettre l'injection de certains polymères thermoplastiques. Ce travail constitue sans nul doute une percée technologique importante, qui devrait avoir avec le temps des retombées commerciales.

RÉFÉRENCES

1. École polytechnique de Montréal. Département de génie mécanique and B. Croteau-Labouly, *Caractérisation combinée de la perméabilité et de la compaction des renforts fibreux dans les procédés de fabrication des composites par infusion*. Mémoire de maîtrise (Ecole polytechnique de Montréal). 2007. xix, 165 p. --.
2. Gutowski, T.G.P., *Advanced composites manufacturing*. 1997, New York ; Toronto: John Wiley & Sons. xii, 581 p.
3. Williams, C., J. Summerscales, and S. Grove, *Resin Infusion under Flexible Tooling (RIFT): A review*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1996. **27**(7): p. 517-524.
4. Rudd, C.D., *Liquid moulding technologies : resin transfer moulding, structural reaction injection moulding and related processing techniques*. 1997, Cambridge, England Warrendale, PA: Woodhead Publishing Limited ; Society of Automotive Engineers. xvii, 457 p.
5. Macosko, C.W., *RIM, fundamentals of reaction injection molding*. 1989, Munich: Hanser Publishers. 246 p.
6. Volk, M.W., *Pump characteristics and applications*. 2nd ed. 2005, Boca Raton, Fla.: Taylor & Francis. xxxi, 533 p.
7. (OICA), O.I.d.C.d.A. *World ranking of manufacturers*. 2007 [cited.
8. (PURRC), T.P.R.a.R.C., *The Socio-Economic Impact of Polyurethanes in the United States from the American Chemistry Council*, in *Center for the Polyurethanes Industry*, U.d.f. 2004, Editor. 2004. p. 3.

ANNEXES

Annexe 1 : Différents tableaux référencés au Chapitre 1.

Tableau A : Avantages et inconvénients de différents renforts

	Avantages	Inconvénients
Verre	Faible coût Haute résistance en tension Haute résistance chimique Excellentes propriétés isolantes Bonne adhérence fibre/résine	Faible module en tension Haute densité
Kevlar	Faible densité. Haute résistance en tension Haute résistance aux impacts Faible conductivité thermique Faible expansion thermique Amortissement des vibrations	Coût élevé Faible résistance en compression Découpe difficile Sensible aux rayons ultra-violets Pauvre adhérence fibre/matrice
Carbone	Excellent module en tension Excellente résistance en tension Très faible expansion thermique Haute résistance en fatigue	Coût élevé Faible résistance aux impacts Allongement à la rupture faible Haute conductivité électrique

Tableau B : Résumé comparatif des différents types de moules

Type de moule	Pression maximale	Durée de vie (# de pièces)	Conductibilité thermique	Coût
Composite	basse	200	basse	bas

Type de moule		Pression maximale	Durée de vie (# de pièces)	Conductibilité thermique	Coût
Aluminium	Moulé	élevée	10 000	excellente	moyen
	Usiné	élevée	20 000	excellente	élevé
Acier P20		élevée	100 000	bonne	très élevé
Nickel	Déposition	élevée	50 000	bonne	très élevé
	Électroformage	élevée	50 000	bonne	élevé

Annexe 2 : Précisions sur les systèmes de fermeture.

Moulage par transfert de résine (RTM)

Dans les domaines aéronautique et automobile, l'utilisation RTM est de plus en plus fréquente pour la fabrication des pièces composites. Le RTM consiste à injecter de la résine à haute pression à l'intérieur d'un moule rigide contenant le renfort. Le système de fermeture doit résister à la pression exercée par la résine. Typiquement, la pression d'injection maximale tourne autour de 10 bars avec une résine dont la viscosité est de 0.1 Pa.s. et une pression d'évent de 28 KPa absolu. Ceci donne les forces de fermeture du Tableau a2.1.

Tableau a2.1 : Force de fermeture nécessaire pour le RTM

Dimensions (m)	Aire (A, m ²)	Pression (P, Pa)	Force ($F = A \cdot P$, kN)	Tonnes (1000 kg)
0,6 x 0,6	0,36	985000	355	36
0,6 x 1,2	0,72	985000	709	72
1,2 x 1,2	1,44	985000	1418	145
3,0 x 3,0	9,00	985000	8865	904

Moulage par transfert de résine avec compression (CRTM)

Le procédé CRTM a été développé pour fabriquer des composites avec une fraction volumique de fibres plus élevée qu'avec le RTM. Ce procédé permet d'injecter la résine dans une cavité plus épaisse offrant une grande perméabilité et de comprimer ensuite la pièce pour atteindre la fraction volumique de fibres désirée. Les moules et systèmes de fermeture pour le CRTM sont complexes et dispendieux. La presse doit commander le parallélisme, exercer une pression de 1000 tonnes pour un moule de 1,5 x 1,5 mètres usiné en acier très lourd.

Moulage par transfert de résine avec compression articulée (ACRTM)

Dans un procédé classique de CRTM, le moule supérieur est constitué d'une seule pièce complètement rigide qui applique uniformément la pression lors de la compression. Lors de la compression, la presse doit effectuer un travail herculéen pour forcer l'écoulement de la résine dans un milieu poreux dont la perméabilité diminue. Si le moule supérieur comprend plusieurs parties articulées indépendamment les unes des autres, la force de fermeture nécessaire est diminuée significativement. Cette variante du procédé CRTM est nommée le ACRTM. Le défi de ce procédé est de concevoir un moule supérieur articulé et d'adapter un système de fermeture pour opérer indépendamment les différentes parties du moule.

Injection flexible

L'injection flexible s'apparente au procédé RTM. La différence provient de la pression exercée par le fluide de compaction avec l'injection flexible. Cette pression

peut atteindre 413,7 kPa (60 psi) ou plus. Le Tableau a2.2 suivant évalue la force de fermeture nécessaire pour un moule flexible.

Tableau a2.2 : Force de fermeture nécessaire pour l'injection flexible

Dimensions (m)	Aire (A, m ²)	Pression (P, Pa)	Force (F = A · P, kN)	Tonnes
0,6 x 0,6	0,36	413685	149	15
0,6 x 1,2	0,72	413685	298	30
1,2 x 1,2	1,44	413685	596	60
3,0 x 3,0	9,00	413685	3723	380

Les chiffres illustrent l'importance du travail accompli par le système de fermeture. Dans un procédé comme l'injection flexible, semblable en équipement au RTM, le moule doit être manipulé par une presse et celle-ci doit supporter une charge qui dépend de la taille de la pièce composite à injecter.

Annexe 3 : Revue détaillée des systèmes d'injection existants.

Pot de pression

L'équipement d'injection primaire par excellence est le pot de pression. Largement utilisé dans les centres de recherche, les institutions et la fabrication artisanale de composites, il offre flexibilité et efficacité à bas prix. La Figure a3.1 montre une photographie de ce modeste, mais efficace équipement.

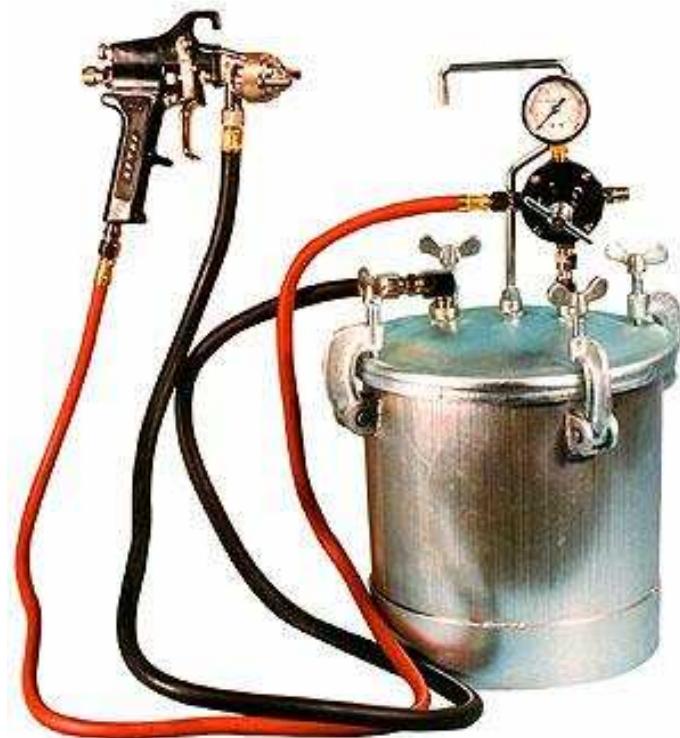


Figure a3.1 : Photographie d'un pot de pression.

Le Tableau a3.1 résume les caractéristiques des pots de pression, et cela malgré un maigre investissement. Cependant, son utilisation est restreinte aux productions ponctuelles due aux maintes manipulation requises pour le préparer à injecter et pour le nettoyer.

Tableau a3.1: Caractéristiques des pots de pression

Caractéristique	Pot de pression
Pression max. (bar)	8
Débit max. (L/min)	faible
Volume par injection (L)	10
Volume de production	faible
Température d'injection	élevé
Type de résine	toutes
Mélange de catalyseur	mélangé à la main
Coût (K\$ CAD)	0,1 - 1

Machines MVP (Magnum Venus Plastech Limited)

La fabrication des composites par transfert de résine au-delà de la production artisanale requiert un équipement d'injection qui diminue les manipulations de l'ouvrier. Le mélange automatique constitue souvent la première étape de mécanisation. Un des grands fabricants de machine d'injection est la compagnie MVP située à Clearwater, Floride, États-Unis. Deux différents modèles de ce constructeur sont détaillés ici-bas.

Tout d'abord, le système Patriot SSB de la Figure a3.2 représente un des systèmes de base pour l'injection de résine thermodurcissable. Les cylindres d'injection sont contrôlés par pression d'air et permettent d'injecter une résine polyester ou vinylester en la mélangeant avec son catalyseur selon les caractéristiques du Tableau a3.2.



Figure a3.2 : Pompe d'injection Patriot SSB de MVP.

Tableau a3.2: Caractéristiques du système Patriot SSB de MVP

Caractéristique	MVP Patriot SSB
Pression max. (bar)	8
Débit max. (L/min)	0.15 – 4.0

Caractéristique	MVP Patriot SSB
Volume par injection (L)	200 (prélevée directement au baril)
Volume de production	faible
Température d'injection	basse
Type de résine	polyester et vinylester
Mélange de catalyseur	ajustable de 0.5 à 3.0 %
Coût (K\$ CAD)	5 – 10

Ensuite, le système Megaject RTM Pro de MVP illustré par la Figure a3.3 est complètement automatisé et permet de commander facilement plusieurs paramètres. Les caractéristiques de ce système sont résumées dans le Tableau a3.3.



Figure a3.3 : Système d'injection Megaject RTM Pro de MVP.

Tableau a3.3 : Caractéristiques du système Megaject RTM de MVP

Caractéristique	MVP Megaject RTM
Pression max. (bar)	8
Débit max. (L/min)	0.15 – 12
Volume par injection (L)	35
Volume de production	faible - moyen
Température d'injection (°C)	80
Type de résine	polyester et vinylester
Mélange de catalyseur	Ajustable de 0.5 à 4.5 %
Coût (K\$ CAD)	60 – 70

Machines JHM Technologies Inc.

Un second fournisseur de systèmes d'injection adaptés à différentes applications est JHM Technologies Inc., qui utilise des mélangeurs statiques et des cylindres pneumatiques pour fournir une résine mélangée. Les systèmes d'injection sont plus ou moins automatisés, mais aucun système présenté dans le Tableau a3.4 n'offre l'injection à haute température.

Tableau a3.4 : Description et prix des systèmes de JHM Technologies

Machine	Photo	Description	Prix(\$USD)
Infuser Alpha		Résines : polyester, vinylester, méthacrylates Pompe : déplacement positif à double action Mélangeur : statique Automatisation : aucune	7685.00
Infuser Aviator		Résines : polyester, vinylester, méthacrylates Pompe : déplacement positif à double action Mélangeur : statique Automatisation : semi-automatique	12153.00
Infuser Aviator EPX		Résines : époxy Pompe : déplacement positif à double action Mélangeur : statique Automatisation : semi-automatique	13180.00
Infuser PRG		Résines : polyester, vinylester, méthacrylates Pompe : déplacement positif à double action Mélangeur : statique Automatisation : automatique	30521.00

Machine	Photo	Description	Prix(\$USD)
Infuser PRG EPX		Résines : époxy Pompe : déplacement positif à double action Mélangeur : statique Automatisation : automatique	43452.00

Machine GlasCraft

Située en Ohio, États-Unis, la compagnie Glascraft a été la première à commercialiser un fusil à résine en 1959 pour une utilisation industrielle. Depuis, elle développe des équipements pour l'industrie des thermodurcissables. Outre les accessoires de machines d'injection, Glascraft commercialise un système d'injection complet nommé Spartan. La Figure a3.4 représente un second modèle développé par la compagnie. Ce système offre d'intéressantes caractéristiques, résumées dans le Tableau a3.5, pour un prix initialement assez bas. Le fabricant utilise une technologie encore une fois à basse pression comme la valve pneumatique de la Figure a3.5.



Figure a3.4 : Système d'injection Spartan II de GlasCraft.



Figure a3.5 : Valve pneumatique utilisé par Glascraft.

Tableau a3.5: Caractéristiques du système Spartan II de GlasCraft

Caractéristique	GlasCraft Spartan II
Pression max. (bar)	8
Débit max. (L/min)	jusqu'à 9,5
Volume par injection (L)	25
Volume de production	faible - moyen
Température d'injection	basse
Type de résine	polyester et vinylester
Mélange de catalyseur	ajustable de 0.5 à 4.5 %
Coût (K\$ CAD)	7 - 15

Machine Radius Engineering Inc.

Une autre compagnie intéressante pour sa polyvalence est Radius Engineering de Salt Lake City en Utah, Etats-Unis. Établie depuis 1986, l'entreprise se spécialise dans les transferts technologie vers les consommateurs pour les procédés à moule fermé. Une gamme de systèmes d'injection de différentes tailles sont produites par Radius. Par exemple, la Figure a3.6 montre un injecteur de résine mono-composante. Cet engin demande une conception particulière en raison de sa large gamme de températures de fonctionnement. Les caractéristiques du système sont décrites dans le Tableau a3.6.



Figure a3.6 : Injecteur mono-composant de Radius Engineering Inc..

Tableau a3.6: Caractéristiques du système mono-composant de Radius Engineering

Caractéristique	Radius Engineering
Pression max. (bar)	28
Débit max. (L/min)	jusqu'à 0,5
Volume par injection (L)	10
Volume de production	bas - moyen
Température d'injection	jusqu'à 175
Type de résine	résine à un seul composant
Mélange de catalyseur	-
Coût (K\$ CAD)	100 - 150

Machine Cannon

Dans un tout autre ordre d'idées, le groupe multinational Cannon se spécialise dans les équipements pour la mise en forme des plastiques, la production d'énergie écologique et l'électronique industrielle. Les systèmes d'injection dédiés aux résines polyuréthanes de cette entreprise sont reconnus mondialement. Il est intéressant de connaître ce type de système qui utilise déjà depuis plusieurs années les technologies de mélange à haute pression. Généralement, ces machines utilisent un circuit de circulation pour chaque composante chimique qui sont reliés à une tête de mélange par jets convergents. La Figure a3.7 montre un système destiné à l'injection d'une résine polyuréthane bi-composante.



Figure a3.7 : Système d'injection de mousse polyuréthane de Cannon.

Les caractéristiques de ces machines, résumées dans le Tableau a3.7, sont adaptées aux besoins de l'industrie des mousses polyuréthanes. Les débits d'injection sont très élevés. Une injection dure typiquement quelques secondes. Cela a permis à cette industrie de produire 5444 millions de tonnes de polyuréthane en 2004 aux Etats-Unis [8]. Les équipements d'injection à haute pression de Cannon sont très fiables et durables. La garantie sur les têtes de mélange assure qu'aucun entretien ne sera nécessaire avant 100 000 injections. Il y a de quoi intimider la concurrence des systèmes à basse pression qui offrent des valves automatiques qu'il faut entretenir à chaque trentaine d'injection. Bien évidemment, ces équipements sont dispendieux et requièrent un espace important dans une usine. Seules les compagnies possédant un grand volume de production, plus de 100 000 pièces par an, sont en mesure de rentabiliser ce type de technologie.

Tableau a3.7 : Caractéristiques du système à haute pression A-Compact FC de Cannon

Caractéristique	Cannon A-Compact FC
Pression max. (bar)	10
Débit max. (L/min)	jusqu'à 312 (FPL32)
Volume par injection (L)	400
Volume de production	Élevé
Température d'injection	jusqu'à 80
Type de résine	Polyuréthane
Mélange de catalyseur	-
Coût (K\$ CAD)	150 – 200

Annexe 4 : Caractéristiques de la résine Lindoxy 190 et du durcisseur LS 252V.



LINDAU CHEMICALS INC.

COLUMBIA, SOUTH CAROLINA 29201
731 ROSEWOOD DRIVE

PHONE 803-799-6863
TELEFAX 803-256-3639
EMAIL LCI@LINDAU.NET

TECHNICAL DATA SHEET

EPOXY RESIN SYSTEM FOR PULTRUSION

**LINDOXY 190 Resin
LS -252V Anhydride Curing Agent**

LS 252V is a formulated anhydride curing agent designed to be used in conjunction with LINDOXY 190 for high temperature pultrusion applications requiring high glass transition temperatures and excellent physical properties. While this 100% epoxy resin system has excellent pot life characteristics with low initial viscosities, it still has rapid cure rates at elevated temperatures. These features coupled with excellent adhesion to several reinforcements including glass and carbon fiber make it an excellent choice for pultrusion applications.

The LS - 252V is also formulated with an internal mold release agent specially designed to work with an anhydride cured epoxy system. No additional mold release agent should be added.

FORMULATION

<u>Component</u>	<u>phR⁽¹⁾</u>
LINDOXY 190 ⁽²⁾ (EEW: 137 g/eq)	100
LS - 252V	160
Polyfil 8039 ⁽³⁾	15%-20% (total resin wt.) for glass fiber 5% (total resin wt.) for carbon fiber

NOTES:

- 1) parts per hundred parts of Resin.
- 2) or equivalent resin
- 3) Filler supplied by Huber Products or equivalent.

TYPICAL PROPERTIES

	LS - 252V	LINDOXY 190
Appearance	Dark amber liquid	Amber liquid
Brookfield Viscosity (cps) ⁽¹⁾	1500 - 2000 cps	350 - 450 cps
Epoxide Equivalent Weight (g/eq.)	131 - 143	
Anhydride Equivalent Weight	230 - 245	
Weight per Gallon @ 25°C (lbs)	9.6 - 9.8	9.8
Flash Point, °F (°C), minimum	260°F (126.5°C)	245°F (118°C)

1) Tested @ 25°C unless specified

TYPICAL PROCESSING CONDITIONS

The Lindoxy 190 / LS-252V resin system should be cured in a two stage process: a gelation stage (temperature of 150°C) followed by a cure stage (temperature of 200°C). A total residence time in the two stages of nine minutes is required for optimum thermal and physical properties. Under these conditions, Glass Transition Temperatures (DSC) of 215°C may be obtained with this resin system. The first stage cure must be completed in a closed die, but the second stage may be cured in an in-process post cure oven. Using this type of cure, rates of 12 - 15 inches per minute can be achieved.

Due to variations in part size, die length, cure temperature and reinforcement, specific process instructions can not be given. Contact Lindau Customer Service for assistance in the design of a time, temperature and rate profile.

TYPICAL MIXED RESIN PROPERTIES

(Formulation: Lindoxy 190 / LS-252V : 100 / 160)

Gel Time, seconds @ 320°F (160°C) 90

Pot Life @ 77°F (25°C)

a)	Initial Brookfield Viscosity (cps)	780 cps
b)	Time to 5,000 cps	24 hours
c)	Time for viscosity to double	8 hours

Glass Transition Temperature, °C⁽¹⁾ 220°C

Reactivity @ 338°F (170°C)

a)	Peak Exotherm Time (min.)	2.83
b)	Peak Exotherm Temp., °F (°C)	453°F (234°C)
c)	Gel Time (min.)	2.17
d)	Gel Temp., °F (°C)	333°F (167°C)

1) Cure: Gel @ 195°F (90°C) plus post cure of 2 hours @ 300°F (150°C) + 4 hours @ 392°F (200°C).

TYPICAL CURED RESIN PROPERTIES

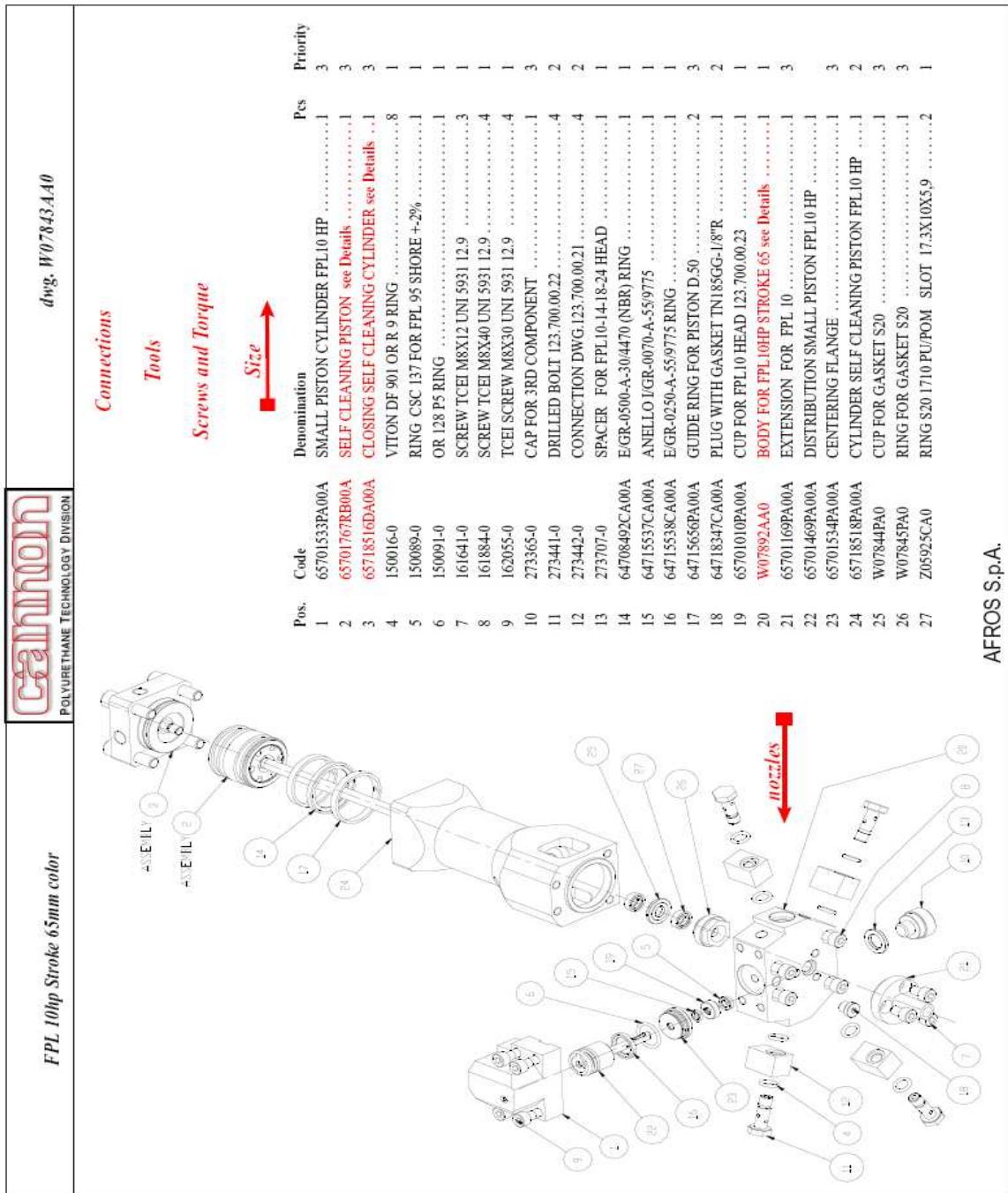
Formulation: Lindoxy 190 – 100 parts / LS-252V - 160 parts
Cure: Gel @ 195°F (90°C) plus post cure of 2 hours @ 300°F (150°C) + 4 hours @ 392°F (200°C).

<u>Property</u>	<u>Method</u>	<u>Result</u>
Tg (°C) by DSC	ASTM D-3418	222.5°C
Tensile Strength	ASTM D-638	5868 psi
Tensile Elongation	ASTM D-638	2.7 %
Tensile Modulus	ASTM D-638	215,000 psi
Shrinkage (% volume change)	ASTM D-792	-2.3%

Revised 8/28/05

We believe all information given is accurate. It is offered in good faith, but without guarantee. Since conditions of use are beyond our control. All risks of use are assumed by the user. Nothing herein shall be construed as a recommendation for uses which infringe valid patents or as extending a license under valid patents.

Annexe 5 : Vue de l'assemblage de la tête de mélange FPL 10 hp de Cannon.



Annexe 6 : Fiche technique des pompes à haute pression de Rotary Power.

TECHNICAL DATA						
S E E N O T E	PUMP RANGE	C - RANGE		(A - RANGE)		
		MODEL	C07 C20	P38	P56	P76
	Geometric displacement (cm ³ /rev)	11.5	33	62	92	125
①	Maximum speed rev/min	3000	3000	2000	2000	1500
②	Max outlet pressure TDI (bar)	210	210	210	210	210
②	Max outlet pressure MDI, polyol (bar)	250	250	250	250	250
③	Min outlet pressure (bar)	2	2	2	2	2
④	Max inlet pressure (bar)	20	20	20	20	20
	Min inlet pressure (bar)	Atmospheric Pressure				
	Max input power Kw	7	18	40	50	80
	Max viscosity	2000 cSt for higher viscosities consult ROTARY POWER				
	Min Viscosity	1 cSt				
⑤	Recommended fluid cleanliness	Polyol ISO code 18/13 Isocyanate code 13/10				
	Max temperature	80°C				
	Optimum Temperature	10 to 50°C				
	Approximate weight (Kg)	20	30	37	40	71

NOTES FOR TECHNICAL DATA TABLE

- ① Maximum allowable speed reduces for high viscosity fluids. For speeds above 1800 rev/min contact ROTARY POWER - see application section.
- ② Pressures shown are for fluids complying with cleanliness codes stated in this table.
- ③ Outlet pressure must never fall below inlet pressure this includes during stationary and start up conditions.
- ④ Inlet pressure should be kept to the minimum value possible, based on the characteristics of the fluid and other factors - see application section.
- ⑤ These recommendations for fluid cleanliness are made, based on the minimum conditions for optimum life. Like any mechanical component, normal wear will be accelerated either, by poor filtration and contaminated fluid or, by the use of abrasive substances such as "carbon black" etc.

Annexe 7 : Fiche technique (page 1) de la pompe de bourrage de Viking GV-1424.



TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
Informations spéciales	2
Entretien	2 à 3
Démontage de la pompe	3 à 6
Démontage d'accouplement	6 à 7
Démontage/assemblage de corps de palier	8
Mise en place des coussinets	8
Assemblage de la pompe	8
Rotation de la pompe	8
Assemblage d'accouplement	10 à 11
Réglage du jeu axial	12
Instructions relatives au clapet de décharge	12
Dépannage	14
Remarques	16
Garantie	18

TABLEAU DE NUMÉROS DE MODÈLE

POMPES NON MONTÉES	ENSEMBLES DE POMPE
GS-855U, GS-855M	Les ensembles de pompe sont désignés par les numéros de modèle de pompe non montée suivis de la dimension d'accouplement magnétique et d'une lettre indiquant le type d'entraînement. (Exemple : GG-855MA MD2 A9 M)
GG-855U, GG-855M	D = Entrainement direct M = Fixation sur le moteur B = Corps de palier R = Entrainement par réducteur Viking P = Entrainement par réducteur du commerce Voir page 4 une description complète du numéro de modèle.
HJ-855U, HJ-855M	
HL-855U, HL-855M	

TABLEAU 1

AVERTISSEMENT !

Les personnes portant des implants chirurgicaux de nature métallique ou électronique doivent éviter de travailler sur la pompe – en particulier sur l'ensemble d'aimants intérieurs.

INTRODUCTION

Les illustrations figurant dans ce manuel sont fournies uniquement à titre d'identification et ne peuvent pas être utilisées pour commander des pièces. Obtenir une nomenclature des pièces auprès de l'usine ou d'un représentant Viking®. Toujours donner le nom complet de la pièce, son numéro de référence et son matériau avec le numéro de modèle et le numéro de série de la pompe lors de la commande des pièces de rechange. Les numéros de série et de modèle de pompe non montée ou d'ensemble de pompe figurent sur la plaque signalétique fixée à la pompe.

Ce manuel se rapporte uniquement aux pompes à entraînement magnétique de la série 855. Consulter les figures 1 à 26 pour la configuration générale et la nomenclature figurant dans ce manuel. Les spécifications et recommandations de pompe sont répertoriées dans la section de catalogue 685.

Dans le système de numéro de modèle Viking, les lettres de dimension de base sont combinées au numéro de série (855) indiquant le matériau de base de fabrication de la pompe.



FIGURE 1
GS, GG SÉRIE 855MA MD2-A9 B
Pompe avec corps de palier



FIGURE 2
HJ-HL SÉRIE 855MB MD2-B M
Pompe avec moteur fixé directement au support

Annexe 8 : Fiche technique des débit-mètres VC0,4-F4-PS de Cannon.

General Characteristics

Design	gear motor	Flow direction	optional	
Connection type	plate mounting / pipe connection	Viscosity	1...1000 000 mm ² /s, according to series	
Mounting Position	optional	Max. pressure drop	$\Delta p_{max} = 16$ bar	
Sealing materials	TFE/P	FKM	EPDM	
Ambient temperature	-10 °C - +80 °C	-15 °C - +80 °C	-30 °C - +80 °C	-30 °C - +80 °C
Medium temperature for standard version	Series 1, 2, 6, 7, 8 -10 °C - +120 °C	-15 °C - +120 °C	-30 °C - +120 °C	-30 °C - +120 °C
Medium temperature for high temperature version	Series 3, 4, 5 -10 °C - +80 °C	-15 °C - +80 °C	-30 °C - +80 °C	-30 °C - +80 °C
for high temp. PLUS version	Series 1, 2, 6, 7, 8 -10 °C - +150 °C	-15 °C - +150 °C	-30 °C - +130 °C	-30 °C - +150 °C
Medium temperature for \oplus -version	Series 3, 4, 5 on request	on request	on request	on request
	Series 1, 2, 6, 7, 8 -	-15 °C - +160 °C	-	-30 °C - +220 °C
	Series 1, 2, 6, 7, 8 -10 °C - +80 °C	-15 °C - +80 °C	-30 °C - +80 °C	-30 °C - +80 °C
	Series 3, 4, 5 -10 °C - +80 °C	-15 °C - +80 °C	-30 °C - +80 °C	-30 °C - +80 °C

Series Selection / Summary of Variants

Series	1	2	3	4	5	6	7	8
Material housing	cast iron GGG 40 GGG 40 (/79 GGG 60)	cast iron GGG 40	cast iron GGG 40	cast iron GGG 40	stainless steel 1.4404	stainless steel 1.4404	cast iron GGG 40	stainless steel 1.4404
Material gears	steel 1.7139	steel 1.7139	steel 1.7139	steel 1.7139	stainless steel 1.4462	stainless steel 1.4462	steel 1.7139	stainless steel 1.4462
Bearing	ball bearings	ball bearings	bronze plain bearings	carbide plain bearings	carbide plain bearings	stainless steel ball bearings	hybrid ball bearings	hybrid ball bearings
Connection	P	P	P	P	P/R	P/R	P	P/R
Max. perm. foreign particle size in the medium (μm)	20	30	50	30	30	20	20	20
Accuracy (from measuring value)	$\pm 0.3\%$ at ≥ 20 mm ² /s	$\pm 0.5\%$ at ≥ 50 mm ² /s	$\pm 1\%$ at ≥ 100 mm ² /s	$\pm 0.5\%$ at ≥ 100 mm ² /s	$\pm 0.5\%$ at ≥ 100 mm ² /s	$\pm 0.3\%$ at ≥ 20 mm ² /s	$\pm 1\%$ at ≥ 20 mm ² /s	$\pm 1\%$ at ≥ 20 mm ² /s
Nominal size	Starting point at [l/min]	Measuring range [l/min]						
0.025	0.001	0.008-2	-	-	0.02-2 *	0.008-2	0.008-2	0.008-2
0.04	0.004	0.02-4	-	-	-	0.02-4	0.02-4	0.02-4
0.1	0.008	0.04-8	-	-	-	0.04-8	0.04-8	0.04-8
0.2	0.01	0.16-16	0.16-16	-	0.16-16	0.16-16	0.16-16	0.16-16
0.4	0.01	0.2-40	-	0.2-30	-	-	-	-
1	0.02	0.4-80	0.4-80	0.6-40	0.3-60	0.3-60	0.4-80	0.4-80
3	0.03	0.6-160	0.6-160	-	0.6-100	0.6-100	0.6-160	-
5	0.04	1-250	1-250	1.2-80	1-160	1-160	1-250	-
12	0.1	2-600	-	-	-	-	-	-
16	0.2	3-700	-	-	-	-	-	-

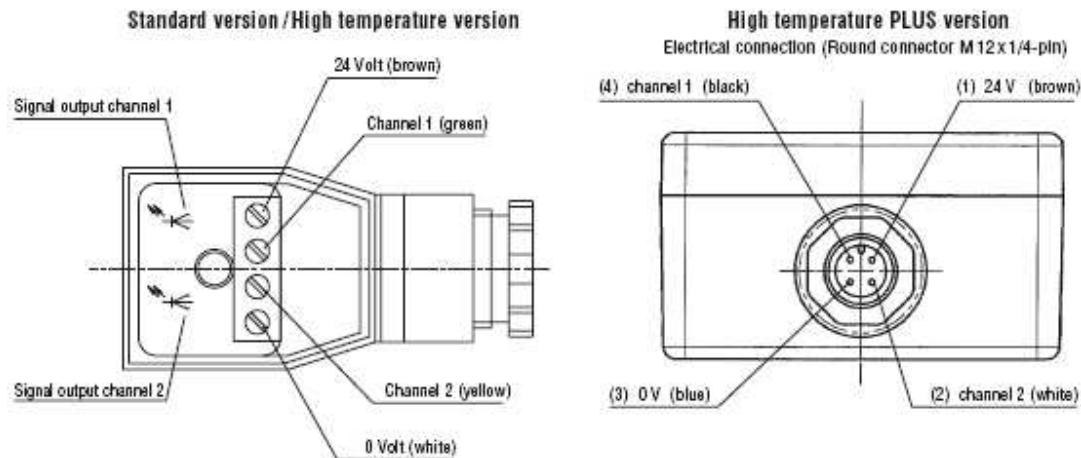
* Measuring accuracy $\pm 3\%$; Linearity $\pm 1.5\%$

Operating characteristics

Nominal size	geom. tooth-volume V_{gz} cm ³	max. operating pressure		Peak pressure Standard-version \hat{p} bar	Peak pressure High pressure version (/79) \hat{p} bar	Sound pressure level L_A dB (A)	Resolution Imp/l
		Standard-version P _{max} bar	High pressure version (/79) P _{max} bar				
0.025	0.025	400	-	480	-	< 60	40.000.00
0.04	0.04	400	-	480	-	< 60	25.000.00
0.1	0.1	400	-	480	-	< 60	10.000.00
0.2	0.245	400	-	480	-	< 60	4.081.63
0.4	0.4	400	-	480	-	< 70	2.500.00
1	1.036	400	-	480	-	< 70	965.25
3	3.000	315	400	350	480	< 70	333.33
5	5.222	315	400	350	480	< 72	191.50
12	12.000	400	-	480	-	< 80	83.33
16	16.000	400	-	480	-	< 80	62.50

KRACHT GmbH · Gewerbeastr. 20 · 58791 Werdohl, Germany · fon +49 (0)23 92/935-0 · fax +49 (0)23 92/935 209 · web www.kracht.eu · mail Info@kracht.eu

Electrical Connection



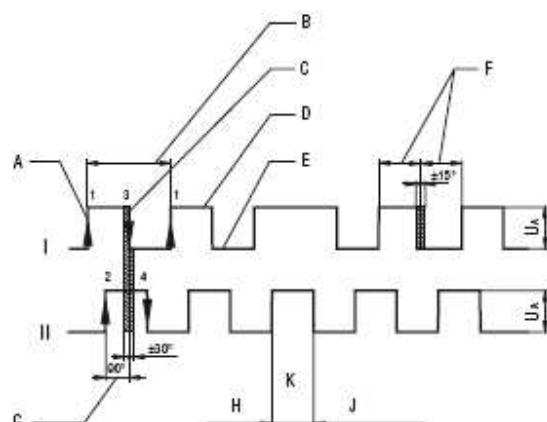
Electrical Characteristics

Number of measuring channels	2	Pulse offset between two channels	$90^\circ \pm 30^\circ$
Operating voltage	$U_{op} = 12 \dots 30$ VDC polarized	Power requirement	$P_{max} = 0.9$ W
Pulse amplitude	$U_{out} \geq 0.8 U_{op}$	Output power/channel	$P_{max} = 0.3$ W short-circuit-proof
Pulse shape with symm. output signal	square wave pulse duty factor/channel $1:1 \pm 15\%$	Degree of protection	IP 65 DIN 40050
Signal output	PNP (NPN on request)		

Signal Characteristics

Channel I

- A rising edge
- B one pulse
(corr. to flow rate of geom. tooth volume V_g)
- C falling edge
- D ON phase
- E OFF phase
- F pulse duty factor $1:1 \pm 15\%$



Channel II

- G channel offset
- H flow direction 1
- K reversal of flow direction
- J flow direction 2

Annexe 9 : Liste détaillée des entrées et sorties du PLC.

#	(I/O)	Accessoire	Description	Électrique
1	I Analogique	Pression P1a	Avant la pompe a Plage : 0-500kPa abs	Signal : 4-20mA 2 fils Alim. : 10-36Vdc
2	I Analogique	Pression P2a	Après la pompe a Plage : 0-345bars	Signal : 4-20mA 2 fils Alim. : 12-32Vdc
3	I Analogique	Pression P3a	Avant la tête Plage : 0-345bars	Signal : 4-20mA 2 fils Alim. : 10-36Vdc
4	I Analogique	Pression P4a	Après la tête Plage : 0-500kPa abs	Signal : 4-20mA 2 fils Alim. : 10-36Vdc
5	I Analogique	Pression P5a	Réservoir a Plage : 0-500kPa abs	Signal : 4-20mA 2 fils Alim. : 10-36Vdc
6	I Analogique	Pression P6	Moule Plage : 0-10bars	Signal : 4-20mA 2 fils Alim. : 10-36Vdc
7	I Analogique	Température T1a	Réservoir a Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 3 fils Alim. : 9-36Vdc
8	I Analogique	Température T2a	Avant la pompe a Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
9	I Analogique	Température T3a	Après la pompe a Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
10	I	Température	Avant la tête	Signal : 4-20mA

#	(I/O)	Accessoire	Description	Électrique
	Analogique	T4a	Plage : 0-150°C	2 fils
11	I Analogique	Température T5a	Après la tête Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
12	I Analogique	Température T6a	Avant l'échangeur a Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
13	I Analogique	Température T7a	Après l'échangeur a Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
14	I Analogique	Température T8a	Chambre d'eau a Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
15	I Analogique	Température T9	Unité hydraulique Plage : 0-80°C	Signal : 4-20mA 2 fils
16	I Analogique 2xDigitales	Débit-mètre Qa	Plage : 0.2 à 20 l/min Départ : 0.01 l/min Précision : $\pm 0.5\%$ $\text{à } \geq 100 \text{ m}^2/\text{s}$	
17	I Analogique	Pression P1b	Avant la pompe b Plage : 0-500kPa abs	Signal : 4-20mA 2 fils Alim. : 10-36Vdc
18	I Analogique	Pression P2b	Après la pompe b Plage : 0-345bars	Signal : 4-20mA 2 fils Alim. : 12-32Vdc
19	I Analogique	Pression P3b	Avant la tête Plage : 0-345bars	Signal : 4-20mA 2 fils Alim. : 10-36Vdc
20	I Analogique	Pression P4b	Après la tête Plage : 0-500kPa abs	Signal : 4-20mA 2 fils Alim. : 10-36Vdc

#	(I/O)	Accessoire	Description	Électrique
21	I Analogue	Pression P5b	Réservoir b Plage : 0-500kPa abs	Signal : 4-20mA 2 fils Alim. : 10-36Vdc
22	I Analogue	Température T1b	Réservoir b Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 3 fils Alim. : 9-36Vdc
23	I Analogue	Température T2b	Avant la pompe b Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
24	I Analogue	Température T3b	Après la pompe b Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
25	I Analogue	Température T4b	Avant la tête Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
26	I Analogue	Température T5b	Après la tête Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
27	I Analogue	Température T6b	Avant l'échangeur b Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
28	I Analogue	Température T7b	Après l'échangeur b Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
29	I Analogue	Température T8b	Chambre d'eau b Plage : 0-150°C	Signal : 4-20mA 2 fils
30	I Analogue 2xDigitales	Débit-mètre Qb	Plage : 0.2 à 20 l/min Départ : 0.01 l/min Précision : $\pm 0.5\%$ $\text{à } \geq 100 \text{ m}^2/\text{s}$	
31	I Digitale	Interrupteur a	Interrupteur de niveau a	
32	I Digitale	Proximité valve a	Signal valve chimique a	

#	(I/O)	Accessoire	Description	Électrique
33	I Digitale	Interrupteur b	Interrupteur de niveau b	
34	I Digitale	Proximité valve b	Signal valve chimique b	
36	I Digitale	Prox. Piston 1	Piston de la chambre de mélange	
37	I Digitale	Prox. Piston 2	Piston de recirculation/mélange	
38	I Digitale	Signal presses	Presse fermée	
39	O Analogique 2xDigital	Mélangeur a	Vitesse : 50-350rpm	Moteur 1/3hp 575/3/60
40	O Analogique 2xDigital	Pompe HP a	Vitesse : 0-1800rpm Débit : 0-345cm ³ /s	Moteur 5hp 575/3/60
41	O Digital	Élém. chauffant a	Chauffe l'eau du réservoir a	240 volts 1 phase Puissance : 1 kW
42	O Digital	Valve d'eau a	Vidange d'eau du réservoir a	
43	O Digital	Valve chimique a	Actuateur de la valve chimique a	Actionné à l'air pressurisé
44	O Analogique 2xDigital	Mélangeur b	Vitesse : 50-350rpm	Moteur 1/3hp 575/3/60
45	O Analogique 2xDigital	Pompe HP b	Vitesse : 0-1800rpm Débit : 0-345cm ³ /s	Moteur 5hp 575/3/60
46	O Digital	Élém.	Chauffe l'eau du	240 volts 1 phase

#	(I/O)	Accessoire	Description	Électrique
		chauffant b	réservoir a	Puissance : 1 kW
47	O Digital	Valve d'eau b	Vidange d'eau du réservoir b	
48	O Digital	Valve chimique b	Actuateur de la valve chimique b	Actionné à l'air pressurisé
49	O Digital	Valve d'eau hyd.	Valve d'eau de l'unité hydraulique	
50	O Digital	Valve piston 1	Valve hydraulique directionnelle	Alim. :120-240Vac
51	O Digital	Valve piston 2	Valve hydraulique directionnelle	Alim. :120-240Vac
52	I Digital	Bouton urgence		
53	O Digital	Témoin urgence		

Annexe 10 : Liste de matériel pour l'automate programmable.

Item	Product ID Description			Each	Extended Net		
	Device ID	Qty	Delivery				
Soumission par Item #							
1 800T-FXPH16RA1 30.5mm Type 4/13 2 Pos. PB-Illum., Push-Pull, Red, Mushrm Hd, LED, 120V AC 50/60 Hz, 1 NCLB-1 NO							
	1		N/A	\$ 110.02	\$ 110.02		
2 1321-3R8-C Line Reactor, Open Style (AC Drive Reactors), 8 Amps, 5.0 mh							
	4		N/A	\$ 137.64	\$ 550.56		
3 22B-B2P3N104 PowerFlex 40 AC Drive, 240 (208)VAC, 3PH, 2.3 Amps, 0.37 kW, 0.5 HP, Frame Size B, IP20 (Open), LED Display, Digital Keypad, No CE Compliant Filter, RS485							
	2		N/A	\$ 354.02	\$ 708.04		
4 22B-E9P9N104 PowerFlex 40 AC Drive, 600VAC, 3PH, 9.9 Amps, ,Frame Size C, IP20 (Open), LED Display, Digital Keypad, No CE Compliant Filter, RS485							
	2		N/A	\$ 1,057.72	\$ 2,115.44		
5 140M-C2E-B40 MPCB, Standard Magnetic Trip (Fixed at 13 x le), 2.5 - 4 A, Std. Performance, Frame Size C							
	2		0.29	\$ 85.05	\$ 170.10		
6 140M-C2E-B63 MPCB, Standard Magnetic Trip (Fixed at 13 x le), 4 - 6.3 A, Std. Performance, Frame Size C							
	1		0.29	\$ 85.05	\$ 85.05		
7 140M-C2E-C16 MPCB, Standard Magnetic Trip (Fixed at 13 x le), 10 - 16 A, Std. Performance, Frame Size C							
	2		0.29	\$ 96.39	\$ 192.78		
8 100-C12D400 MCS-C Contactor, IEC,12A, 110V 50Hz / 120V 60Hz, Single Pack							
	3		0	\$ 80.64	\$ 241.92		
9 ANNULÉ							
	1		N/A	\$ 0.00	\$ 0.00		
10 2711P-K7C4D1 PanelView Plus 700 Keypad, Standard Communications (Ethernet & RS-232), DC power, 64 MB Flash/ 64 MB RAM							
	1		N/A	\$ 1,493.39	\$ 1,493.39		
11 1769-L35E CompactLogix EtherNet Processor, 1.5Mbyte Memory							
	1		N/A	\$ 1,094.31	\$ 1,094.31		
12 1769-PA4 Pwr Supply 120/240 VAC Input 4A @ 5VDC, 2A @ 24VDC							
	1		N/A	\$ 138.24	\$ 138.24		
13 1769-IF8 8 Channel Analog Voltage/Current Input Module							
	2		N/A	\$ 239.76	\$ 479.52		

Item	Product ID Description			Each	Extended Net
Device ID	Qty	Delivery	Ship Wt		
14	1769-IR6 6 Channel RTD/Resistance Input Module	4	N/A	\$ 322.65	\$ 1,290.60
15	1769-OF8C 8 Channel Analog Current Output Module	1	N/A	\$ 448.74	\$ 448.74
16	1769-IQ32 32 Point 24VDC Input Module	1	N/A	\$ 129.87	\$ 129.87
17	1769-OB32 32 Point 24VDC Output Module	1	N/A	\$ 157.95	\$ 157.95
18	1769-HSC 2/4 Channel High Speed Counter/Encoder Module	2	N/A	\$ 274.59	\$ 549.18
19	ANNULÉ	1	N/A	\$ 0.00	\$ 0.00
20	1769-ECR Right End Cap/Terminator	1	N/A	\$ 9.99	\$ 9.99
21	700-HLT1Z24 700-HL Electromechanical Relay Output, SPDT (1 C/O), w/ Screw Terminals, 24V DC, Touch Safe Terminal Construction, Pkg. Qty. of 10	40	N/A	\$ 11.52	\$ 460.80
22	194R-NJ030P34R1 IEC Disconnect Kit, UL Class CC & J and CSA HRCI-J Fused, 30A, Black Handle and Standard Length Shaft	1	N/A	\$ 153.09	\$ 153.09
23	140M-C2E-B63 MPCB, Standard Magnetic Trip (Fixed at 13 x Ie), 4 - 6.3 A, Std. Performance, Frame Size C	1	0.29	\$ 85.05	\$ 85.05
24	140M-C-AFA20 Auxiliary Contact Block, Front Mounted, 2 N.O. 0 N.C.	1	0.01	\$ 10.08	\$ 10.08
25	140M-C-PEC23 ECO Connecting Module, 25A, for 140M-C to 100-C09...C23	1	0.02	\$ 15.12	\$ 15.12
26	140M-F-WTE Commoning Link Feeder Terminal for 140M-F	2	0.172	\$ 37.80	\$ 75.60
27	140M-C-W633 3-Phase Comm. Link for 140M-C,-D, 63mm Spacing, 3 Starters	1	0.092	\$ 17.64	\$ 17.64

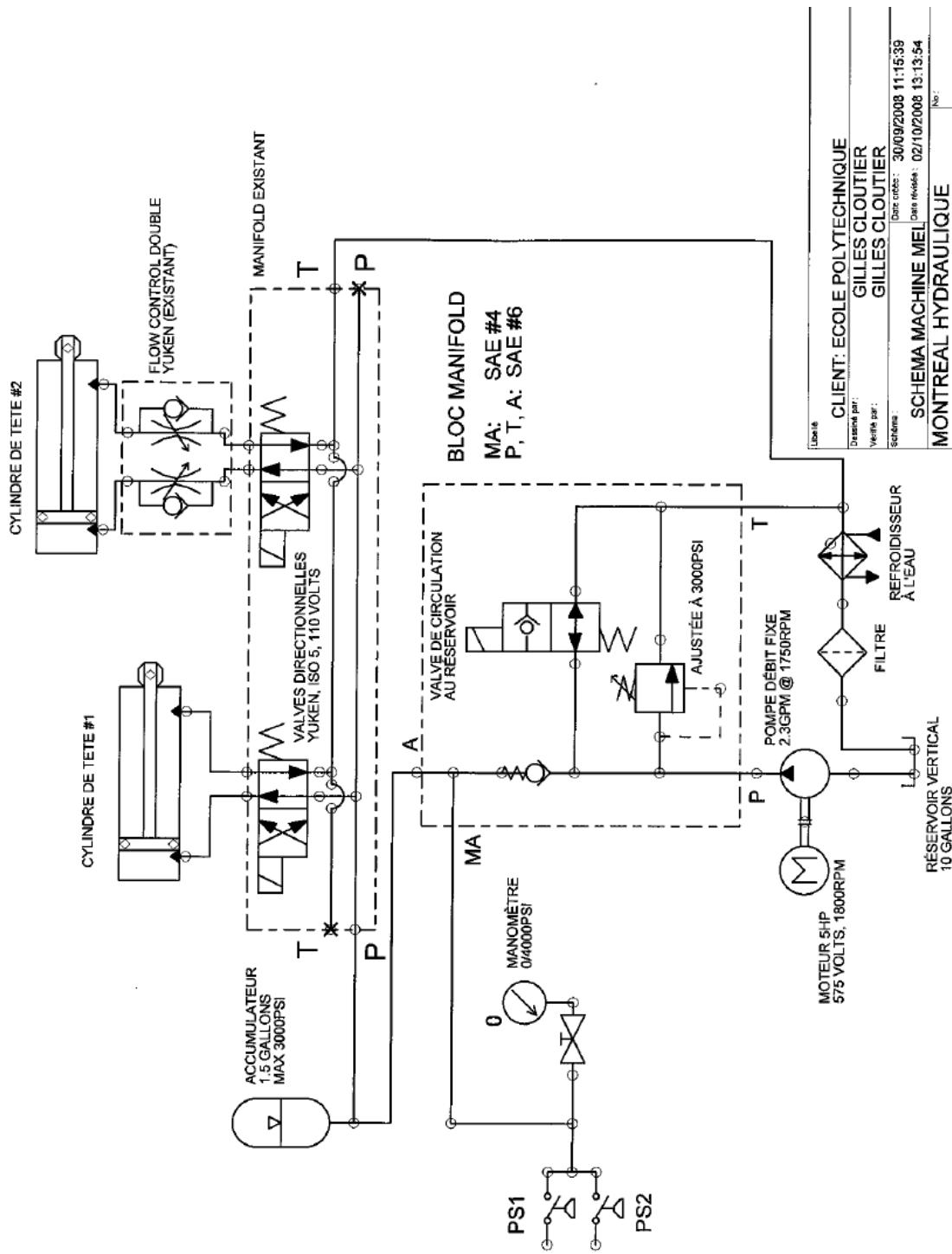
Equipment List (cont'd)

Item	Product ID		Description	Qty	Delivery	Ship Wt	Each	Extended Net
	Device ID							
28	140M-C-W632		3-Phase Comm. Link for 140M-C,-D, 63mm Spacing, 2 Starters	1		0.056	\$ 15.75	\$ 15.75

Total Weight: 2.262 kg Grand Total (Can.): \$ 10,798.83

(NOTE: Total weight excludes items marked N/A)

Annexe 11 : Schéma hydraulique



Annexe 12 : Liste des fichiers accessibles dans un répertoire électronique.

Fichier	Emplacement
Assemblage_Machine_RD (modèle CAO sur CATIAV5)	Z:\3_PROJETS\Systeme_Injection \2_Models_CAO\RD_Machine(2009_03_30)
Documentations techniques (pour chaque composante du système)	Z:\3_PROJETS\Systeme_Injection \1_Documentation
Photographies du projet	Z:\3_PROJETS\Systeme_Injection \3_Images
Programme RS Logix 5000 du PLC	Z:\3_PROJETS\Systeme_Injection \1_Documentation\2_Automate_programmable