

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Moulage par injection des poudres	3
1.2 Étapes du procédé LPIM.....	5
1.2.1 Préparation d'un mélange	6
1.2.2 Injection	10
1.2.3 Déliantage	12
1.2.4 Frittage	14
1.3 Revue des machines LPIM existantes.....	14
1.3.1 Fonctionnement général d'une presse LPIM	14
1.3.2 Description détaillée des machines existantes	16
1.3.3 Difficultés et limites des presses LPIM existantes	21
1.4 Problématique et objectifs.....	24
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	25
2.1 Méthodologie de conception et de fabrication de la presse	25
2.1.1 Analyse du besoin	25
2.1.2 Développement du concept final et essais préliminaires	26
2.1.3 Conception et fonctionnement du concept de presse à injection basse pression.....	28
2.1.4 Innovation du concept de presse LPIM	35
2.2 Méthodologie de validation de la presse.....	36
2.2.1 Choix des ingrédients du mélange	36
2.2.2 Définition des paramètres d'utilisation de la machine.....	37
2.2.3 Essais thermogravimétriques	40
2.2.4 Essais d'injection	40
CHAPITRE 3 RÉSULTATS	43
3.1 Présentation des résultats des essais préliminaires de validation.....	43
3.1.1 Température du mélange.....	43
3.1.2 Lecture de la pression	44
3.2 Présentation des résultats expérimentaux (article de journal).....	45
3.2.1 Introduction.....	47
3.2.2 Experimental procedures	50
3.2.2.1 Design of an innovative LPIM injection press system	50
3.2.2.2 Materials	52
3.2.2.3 Specimens processing and measurements	54
3.2.3 Results.....	57
3.2.3.1 Minimum vacuum time.....	57
3.2.3.2 Minimum idle time for low-viscosity feedstocks	59

	3.2.3.3	Viscosity profiles of feedstocks	61
	3.2.3.4	Injection pressure and injected length.....	63
3.2.4		Discussion	65
3.2.5		Conclusions.....	67
CONCLUSION.....			69
ANNEXE I	CAHIER DES CHARGES		71
ANNEXE II	A LOW-PRESSURE POWDER INJECTION MOLDING MACHINE AND METHOD		93
ANNEXE III	DESSINS D'ASSEMBLAGE ET LISTE DE PIÈCES		139
ANNEXE IV	SCHÉMA ÉLECTRIQUE		159
ANNEXE V	ARTICLE DE CONFÉRENCE MONTREAL'2016 AES-ATEMA		165
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....			179

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Comparatif des caractéristiques de chacun des procédés de moulage par injection de poudres4
Tableau 1.2	Résumé des inventeurs de presses à injection et les techniques utilisées par chacun20
Tableau 3.1	Physical properties of the constituents used for feedstock formulation ...53
Tableau 3.2	Volume fractions of powder and polymers used for feedstock formulations53

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Diagramme des variantes du procédé de moulage par injection de poudres4
Figure 1.2	Étapes du procédé PIM6
Figure 1.3	Images d'un lot de poudre d'acier inoxydable prise avec un microscope électrique à balayage montrant des particules rondes (flèches pleines) et des particules irrégulières (flèches hachurées)7
Figure 1.4	Exemple de distribution de la taille des particules d'un lot de poudre fournie par Epson Atmix Corp.....7
Figure 1.5	La variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement pour les liquides Newtoniens et non-Newtoniens Adapté de Çengel et Cimbala (2006)8
Figure 1.6	Schématisation du phénomène de détente rapide11
Figure 1.7	Schématisation des deux types de détentes. a) Détente en phase solide b) Détente conventionnelle.....12
Figure 1.8	Graphique de la température en fonction du temps pour une séquence de déliantage type.....13
Figure 1.9	Évolution de la densification du matériau pendant le frittage14
Figure 1.10	Schéma d'une machine à injection basse pression15
Figure 1.11	Schématisation du mouvement de l'outil de mélange dans un (a) mélangeur simple et dans un (b) mélangeur double planétaire.....16
Figure 1.12	Machine LPIM commerciale Tirée de Peltsman et Peltsman (1983)17
Figure 1.13	Schématisation de la forme concave obtenue lors de l'application de la pression Tirée de Yamada et Saito (1998).....18
Figure 1.14	Schéma d'une presse à injection de type pompe foulante Tirée de Nishio et Kawashima (1989)19
Figure 1.15	Schéma d'une presse à injection de type pompe proportionnelle et piston Tirée de Yamada et Saito (1998).....20

Figure 1.16	Exemple d'infiltration de mélange dans un mécanisme d'une presse à injection qui doit être nettoyé.....	22
Figure 1.17	Exemple de séparation des phases d'une pièce fortement ségrégée	23
Figure 1.18	Schématisation de la longueur d'injection pour trois mélanges différents	23
Figure 2.1	Principe de fonctionnement du concept presse (a) Insertion d'une seringue dans un réservoir, (b) ponction d'un volume prédéfini et (c) injection dans une cavité.....	27
Figure 2.2	(a) Seringue fixée à une table qui puise un volume du réservoir et (b) qui coulisse pour boucher l'ouverture.....	27
Figure 2.3	Schéma de montage et résultats de l'essai préliminaire de glissement pour un cylindre (a) sans joint torique et (b) avec joint torique.....	28
Figure 2.4	Vue générale du concept de presse à injection LPIM.....	29
Figure 2.5	Vue isométrique de la presse à injection et identification des composantes.....	30
Figure 2.6	Interface LabVIEW développée	31
Figure 2.7	(a) Diagramme et (b-c) vues de coupe partielles de la presse à injection qui décrivent la phase de brassage du mélange	33
Figure 2.8	Séquences de la phase d'injection.....	35
Figure 2.9	Démontage du cylindre d'injection.....	36
Figure 2.10	Vue de coupe du réservoir montrant la position du thermocouple de lecture de température du réservoir.....	38
Figure 2.11	Aspect du mélange dans le réservoir (vue de dessus) pour un vacuum de (a) 1 minute et (b) 40 minutes	39
Figure 2.12	Vue de coupe du cylindre d'injection montrant l'endroit où l'échantillon de mélange ségrégé est prélevé.....	40
Figure 3.1	Température du mélange en fonction de la consigne de température.....	43
Figure 3.2	Équation d'ajustement de la consigne de température du réservoir	44
Figure 3.3	Variation de la lecture de la pression résultante du frottement du joint torique sur la paroi du cylindre d'injection.....	45

Figure 3.4	General view of the injection system in a mold alignment position, and (b-g) partial section views of the injection system describing the method for injecting a feedstock.....	52
Figure 3.5	SEM micrograph of 316L powder	54
Figure 3.6	Mold design and injected specimen: (a) Rectangular dogbone shape, (b) spiral shape (dimensions in millimeters).....	55
Figure 3.7	Typical TGA curves.....	57
Figure 3.8	X-ray scan and CT scan radiographies: (a) X-ray scan images of the injected specimens for vacuum time period of 1, 15, 30, and 45 minutes; (b) CT scan images in a zone containing several air bubbles; (c) CT scan images in a zone containing no air bubbles	59
Figure 3.9	Evolution of solid loading according to time spent in molten state (feedstock 30PW-10SA)	61
Figure 3.10	Viscosity profiles of feedstocks at 90°C	62
Figure 3.11	Evolution of the pressure during the stroke-controlled injection of (a) rectangular specimens, and (b) spiral specimens	64
Figure 3.12	Injected length of (a) rectangular specimens, and (b) spiral specimens	65
Figure 3.13	Comparison of the injected length, piston position, injection pressure, and viscosity.....	67

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

HPIM	Moulage par injection de poudre haute pression (<i>High-pressure powder injection molding</i>)
LPIM	Moulage par injection de poudre basse pression (<i>Low-pressure powder injection molding</i>)
CIM	Moulage par injection de poudre céramique (<i>Ceramic injection molding</i>)
MIM	Moulage par injection de poudre métallique (<i>Metal injection molding</i>)
PIM	Moulage par injection de poudre (<i>Powder injection molding</i>)
PW	Cire de paraffine (<i>Paraffin wax</i>)
SA	Acide stéarique (<i>Stearic acid</i>)
EVA	Éthylène vinyle acétate (<i>Ethylene vinyl acetate</i>)
DSC	Analyse de calorimétrie différentielle à balayage (<i>Differential scanning calorimetry</i>)
TGA	Analyse thermogravimétrique (<i>Thermogravimetric analysis</i>)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

mm	millimètre (unité de distance)
μm	micromètre (unité de distance)
l	litre (unité de volume)
ml	millilitre (unité de volume)
mm ³	millimètre cube (unité de volume)
s	seconde (unité de temps)
min	minute (unité de temps)
kg	kilogramme (unité de masse)
°	degré (unité d'angle)
MPa	méga Pascal (unité de pression)
mm de Hg	millimètre de mercure (unité de pression)
Pa·s	Pascal seconde (unité de la viscosité)
s ⁻¹	seconde moins un (unité du taux de cisaillement)
°C	degré Celsius (unité de température)
N	Newton (unité de force)
mm/s	millimètre par seconde (unité de vitesse)
rpm	rotation par minute (unité de vitesse de rotation)
kV	kilovolt (unité de tension électrique)
μA	microampère (unité du courant électrique)

INTRODUCTION

Le moulage par injection de poudres métalliques (PIM) est un procédé de mise en forme convenant aux petites pièces de formes complexes. Un mélange de poudres métalliques en phase solide et de liant chaud en phase liquide est injecté dans la cavité d'un moule. La pièce moulée est ensuite déliantée pour retirer le liant et est frittée pour être densifiée. Ce procédé permet de fabriquer des pièces dont la forme est quasi-finale et qui est bien adapté à la mise en forme des matériaux difficiles à usiner par des méthodes conventionnelles. Le moulage par injection basse pression de poudres métalliques (LPIM) gagne en popularité par rapport au moulage par injection haute pression de poudres métalliques (HPIM) en raison de son équipement léger, moins coûteux et de la demande pour la mise en forme de pièces de formes complexes à faible coût.

Afin de réaliser l'injection à faible pression, les mélanges typiques LPIM sont composés de liants à basse viscosité. Cette propriété rend toutefois les mélanges propices à la ségrégation, soit la séparation des phases solide et liquide. La ségrégation est responsable de la densité non uniforme des pièces moulées. Un compromis doit donc être fait en augmentant la viscosité, afin d'assurer un moulage complet de densité uniforme. Des courbes de rhéologie, qui tracent l'évolution de la viscosité en fonction du taux de cisaillement induit au mélange, servent à caractériser l'aptitude au moulage des différents mélanges.

Le développement et la production de nouveaux mélanges font face à un dilemme. La viscosité des mélanges est diminuée pour augmenter l'aptitude au moulage, alors que la viscosité doit être augmentée pour diminuer la ségrégation. Le développement d'une corrélation entre la phase d'injection et les mesures de rhéologie s'avère donc difficile à définir avec les machines existantes en raison du phénomène de ségrégation. En effet, le mélange est propice à la ségrégation dans le canal d'injection des machines existantes entre deux séquences d'injection, ce qui peut modifier le comportement des mélanges.

L'objectif de ce projet est de concevoir, fabriquer et valider une machine à injection basse pression de poudres métalliques pour une utilisation en laboratoire qui élimine le phénomène de ségrégation dans le canal d'injection. Un cahier des charges permettra de définir en détail les besoins et les requis pour la génération de concepts préliminaires ainsi que pour la conception détaillée. La machine conçue sera fabriquée et assemblée dans les locaux de l'ÉTS. La validation de la machine se fera par des essais d'injection de différents mélanges pour montrer que des mesures de rhéologie (viscosité) peuvent servir à caractériser l'aptitude au moulage d'un mélange.

Les essais réalisés dans le cadre de cette recherche sont limités aux mélanges de poudres métalliques et de liant à base de cire de paraffine, d'acide stéarique et d'éthylène vinyle acétate. Des études subséquentes pourront être réalisées pour étendre les capacités de la machine aux autres types de mélange, entre autres à base de poudres de céramiques.

Ce mémoire propose une revue de littérature générale du procédé de moulage par injection, avec un accent sur les particularités de l'injection à basse pression. Ensuite, le fonctionnement d'une machine typique LPIM est décrit ainsi que plusieurs de ses variantes. La méthodologie et la presse à injection basse pression développée sont présentées. Ensuite, les résultats d'injection sont comparés à des mesures de rhéologie afin de valider le fonctionnement de la presse dans le but d'étudier l'aptitude au moulage des mélanges de très faible viscosité. Des essais seront aussi réalisés pour montrer la capacité de la machine à minimiser la ségrégation des mélanges peu visqueux. Ces éléments sont entre autres présentés dans un article de journal soumis ainsi que dans un article de conférence présenté et une demande de brevet provisoire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Moulage par injection des poudres

L'intérêt envers les poudres de céramiques a connu un essor important dans les années 1970 pour répondre aux demandes grandissantes quant à la résistance des matériaux, notamment par l'industrie aéronautique (Mangels, 1994). Les procédés de mise en forme offerts à l'époque comme la coulée en barbotine (*slip casting*) et le pressage isostatique nécessitent des opérations secondaires de finition, qui engendrent des coûts supplémentaires (Medvedovski et Peltzman, 2012). Parallèlement, le procédé de moulage par injection de plastique s'est développé rapidement où du plastique fondu est injecté à haute pression dans la cavité d'un moule pour former des pièces de forme complexe proches de leurs dimensions finales. Cette technique a été ajustée pour un mélange composé de poudres de céramique (CIM) et de polymères, qui sert de liant. Éventuellement, les mélanges à base de poudres métalliques (MIM) ont aussi été utilisés.

Les avantages du procédé PIM sont nombreux, soit :

- l'absence ou le peu d'opérations secondaires de finition;
- la grande variété de matériaux offerts, tant pour les poudres de céramique que pour les poudres métalliques;
- la capacité pour des volumes de production élevés;
- les propriétés mécaniques élevées (généralement supérieures au procédé de fonderie, mais inférieures au procédé de corroyage (Heaney, 2012a)).

Toutefois, les poudres de céramiques sont très abrasives. La haute pression atteinte durant l'injection endommage rapidement l'outillage. Peltzman (1986) a alors développé un procédé de moulage par injection à basse pression (LPIM), qui est distinct du procédé de moulage par

injection à haute pression (HPIM). La Figure 1.1 montre un diagramme regroupant les variantes du procédé.

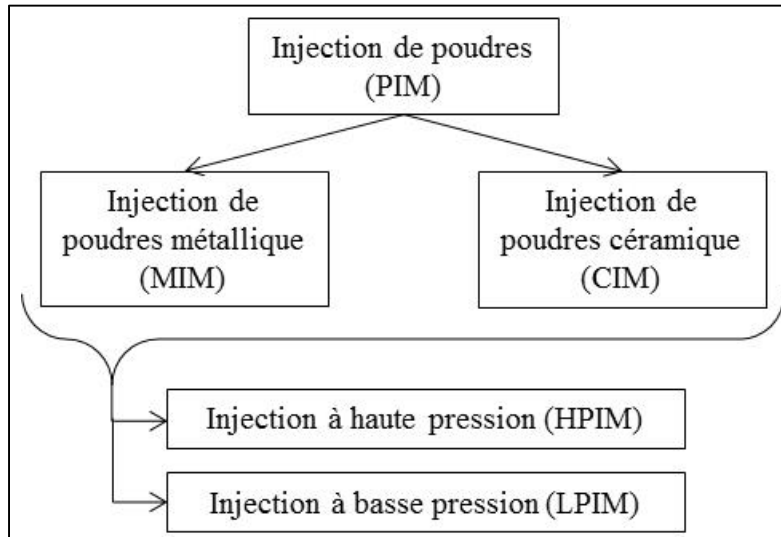


Figure 1.1 Diagramme des variantes du procédé de moulage par injection de poudres

La composition de mélanges avec notamment les liants de type cire, diminue la viscosité et rend possible l'utilisation de la basse pression en raison de la résistance à l'écoulement plus faible. Le tableau suivant présente les caractéristiques propres à chacun des deux procédés.

Tableau 1.1 Comparatif des caractéristiques de chacun des procédés de moulage par injection de poudres

	HPIM	LPIM
Pression d'injection (MPa)	200	< 1
Coût de l'outillage	Élevé	Faible
Volume de production	Élevé seulement	Faible et élevé
Viscosité des mélanges (Pa·s)	< 1000	< 10
Ségrégation	Non	Oui

Le marché des pièces produites selon le procédé d'injection de poudres (HPIM) est assez étendu, notamment aux domaines de l'électronique, de l'aéronautique et de l'automobile. Les composantes comme des dissipateurs de chaleur et des turbines de turbocompresseur peuvent être produites selon le procédé HPIM (Lee, Seong Jin et German, 2011). La mise en forme d'outils de coupe a recours au procédé HPIM. Puisque ces outils servent à usiner d'autres matériaux, ils doivent avoir une dureté et une résistance à l'usure importante. Ces outils de coupe sont alors difficiles à mettre en forme par des méthodes conventionnelles.

La conception des pièces produites par PIM suit certaines recommandations :

- les sections très volumineuses sont à éviter, tandis que les sections de mur constantes sont recommandées afin d'éviter le rétrécissement non uniforme de la pièce (Heaney, 2012a);
- l'épaisseur des pièces typiques se situe entre 2 et 50 mm (Kryachek, 2004);
- les angles de démoulage de 2° sont suggérés pour faciliter l'expulsion du moule;
- la pièce devrait inclure une surface plane afin d'asseoir la pièce correctement lors des étapes suivant le démoulage (Heaney, 2012a);
- les valeurs typiques de tolérances obtenues entre chaque pièce sont de l'ordre de $\pm 0,3 \%$ de la dimension mesurée (Vervoort, Vetter et Duszczuk, 1996);
- le fini de surface obtenu est de $2,5$ à $5 \mu\text{m}$.

La suite de ce mémoire fera référence au procédé de moulage par injection à basse pression de poudres métalliques (LPIM), bien que certaines notions soient valables pour le CIM et le HPIM.

1.2 Étapes du procédé LPIM

Le procédé LPIM se compose de quatre grandes étapes, soit la préparation du mélange, l'injection, le déliantage et le frittage (González-Gutiérrez, Stringari et Emri, 2012), tel que schématisé par la Figure 1.2. L'emphasis de ce projet est mise sur la préparation du mélange et l'injection. Les étapes de déliantage et de frittage seront abordées que brièvement puisqu'elles ne font pas partie spécifiquement de cette étude.

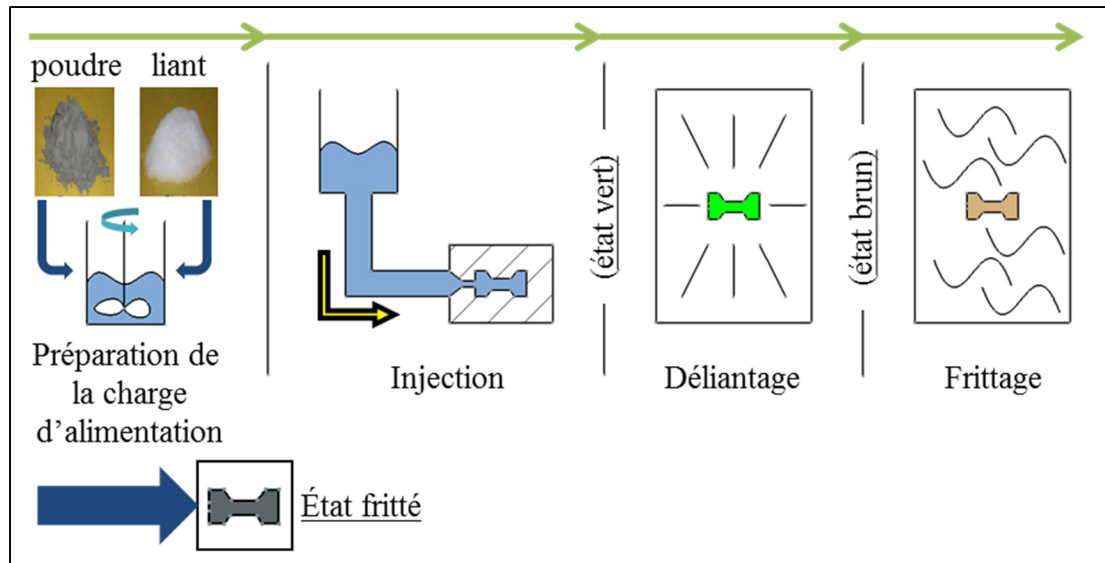


Figure 1.2 Étapes du procédé PIM

1.2.1 Préparation d'un mélange

La préparation d'un mélange consiste à brasser des quantités précises de poudres métalliques et de liant. La poudre métallique se caractérise par sa forme et sa taille. La forme sphérique et la forme irrégulière, produites par le procédé d'atomisation, sont les plus répandues. La Figure 1.3 montre un lot de poudre d'acier inoxydable présentant des particules sphériques (flèches pleines) et des particules irrégulières (flèches hachurées). Les particules de forme sphérique améliorent la densité apparente et diminuent la viscosité des mélanges, mais produisent des pièces plus fragiles après le déliantage. Inversement, la forme irrégulière augmente la résistance après le déliantage, mais est plus difficile à injecter (Goncalves, 2001).

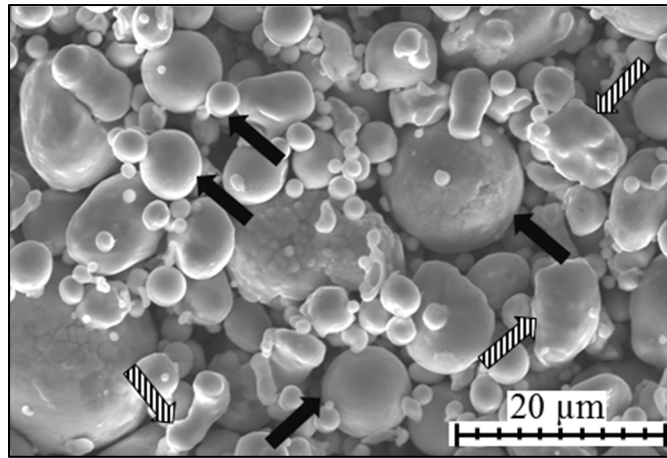


Figure 1.3 Images d'un lot de poudre d'acier inoxydable prise avec un microscope électrique à balayage montrant des particules rondes (flèches pleines) et des particules irrégulières (flèches hachurées)

En général, la taille des particules de poudres métalliques varie entre 5 et 20 μm et est généralement caractérisée par une distribution de taille de particules plutôt qu'une valeur unique. À partir d'une courbe de distribution de la taille des particules, il est possible de déduire trois points qui sont D_{10} , D_{50} et D_{90} . Deux lots de poudre qui ont une valeur D_{50} identique, mais des valeurs D_{10} et D_{90} différentes ne se comporteront pas de la même façon (Heaney, 2012b). La Figure 1.4 montre un exemple de distribution de taille d'un lot.

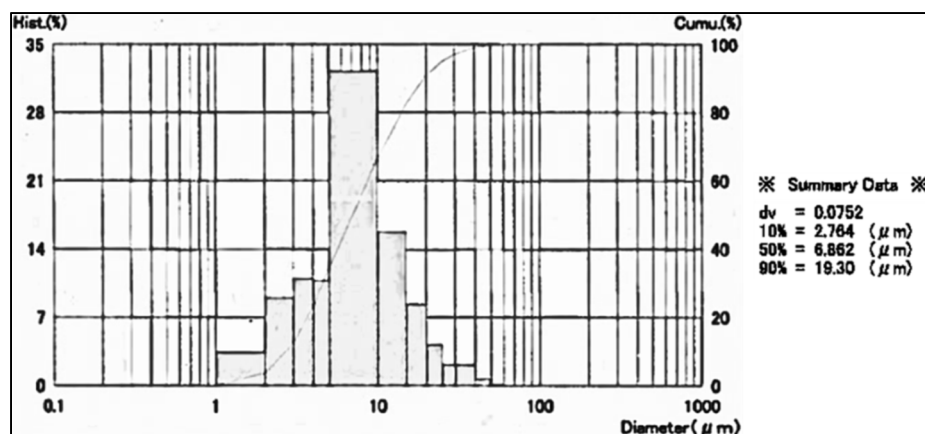


Figure 1.4 Exemple de distribution de la taille des particules d'un lot de poudre fournie par Epson Atmix Corp.

Le liant a deux fonctions dans le procédé d'injection LPIM, selon son état. Lorsqu'il est en phase liquide, il sert de médium de transport en facilitant le déplacement de la poudre dans la cavité d'injection. Lorsqu'il est en phase solide, il sert à lier les particules de poudre les unes aux autres afin de maintenir la forme donnée par le moule jusqu'à l'étape de déliantage (Vervoort, Vetter et Duszczek, 1996). La caractéristique clé du liant est sa viscosité. Plus la viscosité est basse, moins de force doit être appliquée pour cisailier le liant, ce qui facilite l'injection. Les liants utilisés comme matériau primaire pour le LPIM sont de la famille des thermoplastiques comme la cire de paraffine, la cire d'abeille et la cire de Carnauba. Les cires ont une viscosité très faible ($< 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) et ont un bon effet mouillant et lubrifiant. De plus, elles ont un comportement rhéofluidifiant lorsqu'elles sont soumises à une déformation, c'est-à-dire que la viscosité diminue en fonction de l'augmentation du taux de cisaillement, comme montré sur la Figure 1.5 (Çengel et Cimbala, 2006). Ce comportement est due à une orientation des chaînes moléculaires dans la direction d'écoulement. Les polymères comme l'éthylène vinyle acétate, le polyéthylène, le polypropylène et le polystyrène peuvent être ajoutés pour leur effet épaississant, qui donnent de la résistance à la pièce après le moulage, mais qui augmentent la viscosité (Kryachek, 2004). Les comportements rhéoépaississant et Newtonien sont à éviter puisque la viscosité augmente lors de l'injection.

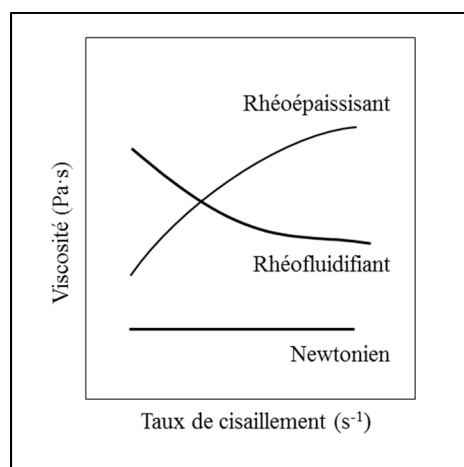


Figure 1.5 La variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement pour les liquides Newtoniens et non-Newtoniens
Adapté de Çengel et Cimbala (2006)

La mouillabilité des particules de poudre est un facteur important et l'ajout de surfactants comme l'acide stéarique (SA) permet de réduire la tension de surface et de faciliter l'incorporation du liant entre les particules de poudres. Par contre, cette propriété rend le mélange propice à la ségrégation qui peut être généralement contrôlé par l'ajout d'agents épaississants (Ahn et al., 2009). La viscosité est aussi affectée par la distribution de taille de la poudre. Une distribution de taille plus étendue diminue la viscosité, puisque les particules plus fines comblent l'espace entre les particules plus grossière. De plus, les particules plus grossières diminuent la surface à recouvrir, ce qui rend disponible plus de liant aux autres particules.

La viscosité et l'homogénéité du mélange de poudre et de liant sont définies par la fraction volumique, la température et le temps et la vitesse de brassage. La fraction volumique représente la proportion de poudres métalliques et la proportion de liant, mesurées en pourcentage volumique des constituants. Selon German et Bose (1997), la proportion volumique de poudre se situe généralement entre 50 % et 70 % du volume total du mélange. Une proportion inférieure à 50 % nuit au déliantage dû à la faible densité de la pièce (peu de contact entre les particules de poudres), tandis qu'une proportion trop élevée rend difficile (voire impossible) l'injection due à la viscosité trop élevée. Aussi, Kryachek (2004) recommande d'utiliser un minimum de liant afin de diminuer le temps de déliantage et de minimiser le rétrécissement. Bien qu'une grande quantité de liant facilite l'injection, les forces appliquées au mélange pour le déplacer peuvent générer de la ségrégation dynamique (Medvedovski et Peltsman, 2012). Ce type de ségrégation est associé à des vitesses d'injection rapide. La ségrégation statique est la plus évidente pour les mélanges très peu visqueux. Elle correspond en fait à une séparation des phases solides et liquides au repos. Cette séparation est due à la gravité. Les particules métalliques étant plus lourdes, elles s'accumulent vers le bas.

Selon González-Gutiérrez, Stringari et Emri (2012), la ségrégation mène à des défauts comme de la porosité, du gauchissement et des fissures. Ces défauts sont dus à un rétrécissement non isotrope de la pièce.

La température du mélange a une influence sur la viscosité (Hausnerova et al., 2005). La viscosité des liquides diminue à température élevée, car les molécules de liant ont plus d'énergie, ce qui leur permet de bouger librement (Çengel et Cimbala, 2006). Le temps et la vitesse de brassage contrôlent l'homogénéité du mélange. Le mélangeur brise les amas de poudres pour que le liant englobe bien les particules de poudres. Les zones à forte concentration de liant causent des vides lors du frittage tandis que les amas de poudres peuvent s'effondrer entre la sortie du moule et l'opération de frittage. Aussi, une vitesse de brassage trop élevée introduit des bulles d'air dans le mélange, qui causeront par la suite des vides dans la pièce frittée. Elle peut aussi causer de la ségrégation due à l'inertie.

Le contrôle de la température du mélange permet d'obtenir et de maintenir une certaine viscosité sans détériorer le liant. Le brassage se fait sous vide pour retirer les bulles d'air dans le mélange. Les bulles d'air laissent des vides internes qui affaiblissent la pièce frittée. La qualité d'un mélange, soit la validation de la fraction volumique, est mesurée par l'analyse thermogravimétrique (TGA) (Sack et Lietzmann, 1990). Cette mesure permet de déterminer la proportion massique de chaque constituant présent dans l'échantillon.

1.2.2 Injection

L'injection consiste à remplir la cavité d'un moule avec un mélange de poudre et de liant fondu. Cette opération se fait en contrôlant certains paramètres, dont la pression, la température, la vitesse du mélange et le temps d'injection. Une pression est appliquée au mélange pour le déplacer. Cette pression qu'il faut appliquer sur le mélange est le résultat de la résistance interne à l'écoulement, qui est causée par les forces de cohésion entre les particules dans le mélange (Çengel et Cimbala, 2006). La viscosité est la mesure de cette résistance à l'écoulement. La pression est le résultat des forces de frottement sur les parois de la machine et aux pertes de charge. Celles-ci sont entre autres dues aux changements de direction dans les canaux d'injection, à la forme du moule et à la présence de capteurs dans l'écoulement.

Comme montrée à la section précédente, la température du mélange a une influence sur la viscosité. Elle doit être constante en tout temps dans chaque section de la machine afin d'assurer une constance dans le processus d'injection. La température du moule est inférieure à la température du mélange et permet donc de refroidir et solidifier les pièces moulées. Un moule trop froid peut causer des lignes de joints ou un moulage incomplet, puisque le mélange se solidifie trop rapidement dans le moule (Schlieper, 2012).

La vitesse d'injection permet de contrôler le phénomène de détente rapide (ou *jetting*) du mélange dans la cavité du moule (Dvorak, Barriere et Gelin, 2005). Ce phénomène a pour effet de disperser en éclat le mélange sur les parois du moule, qui va refroidir rapidement et affecter le fini de surface, comme montrée sur la Figure 1.6.

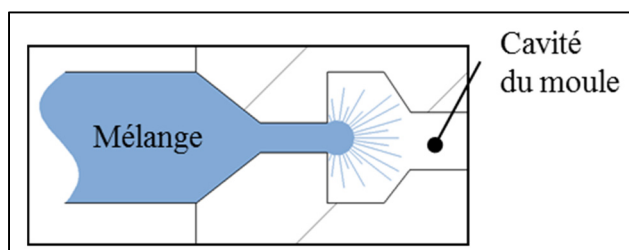


Figure 1.6 Schématisation du phénomène de détente rapide

Le remplissage de la cavité du moule suit deux tendances nommées phase solide ou phase conventionnelle, phénomènes associés au HPIM. Sous phase solide, le mélange se tortille sur lui-même à mesure que le moule se remplit (Figure 1.7a). Ce type de remplissage provoque des joints visibles, puisque le mélange se solidifie avant que le moule soit complètement rempli. Dans le cas de la détente conventionnelle (Figure 1.7b), le mélange est propulsé dans le moule et frappe le côté opposé. Le moule se remplit donc à l'envers. La façon dont le moule se remplit dépend de la viscosité du mélange, la vitesse d'injection et la dimension du canal d'injection. En plus de ce phénomène, une vitesse d'injection trop grande applique des forces importantes sur les particules du mélange. La grande inertie ainsi acquise et la

différence de masse entre les particules de poudre et de liant tendent à créer de la ségrégation pendant l'injection (Schlieper, 2012).

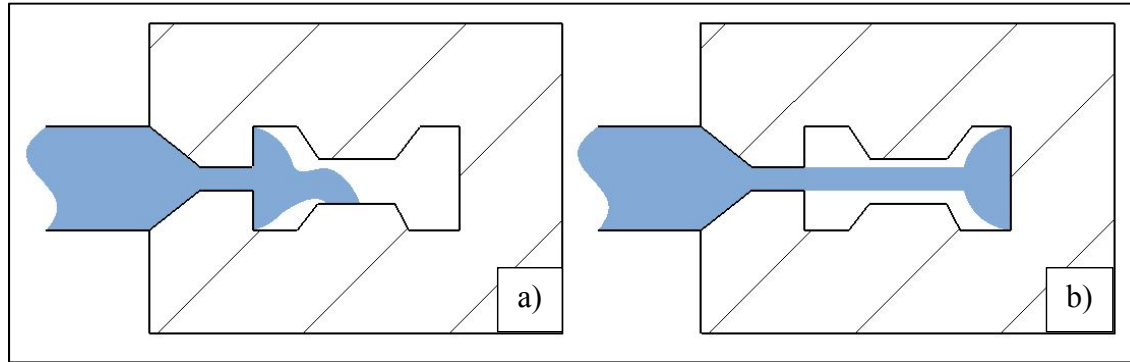


Figure 1.7 Schématisation des deux types de détentes. a) Détente en phase solide
b) Détente conventionnelle

1.2.3 Déliantage

Suite à la solidification du liant, la pièce sortie du moule, dite à l'état «vert», est assez ferme pour être manipulée, tout en étant très fragile. Cette fermeté est temporaire et est attribuable au liant entourant chaque particule de poudre. Le procédé de déliantage est une ouverture progressive des canaux d'écoulement, par lesquels les vapeurs de liant vont s'échapper (González-Gutiérrez, Stringari et Emri, 2012). Cette étape est nécessaire avant le frittage pour éviter certains défauts. Par exemple, lorsqu'une ouverture des canaux d'écoulement n'est pas adéquate, des gonflements, des boursouflures, des fissures et même des vides internes peuvent apparaître puisque l'évaporation du liant augmente la pression interne de la pièce.

Le procédé de déliantage est choisi en fonction du type de liant. Il y a trois principales méthodes de déliantage, soit thermique, par solvant et catalytique. Dans le cas du LPIM, la méthode thermique est utilisée puisqu'elle convient aux liants organiques comme la cire de paraffine (PW), l'éthylène vinyle acétate (EVA) et l'acide stéarique (SA). Le déliantage thermique est une méthode simple et peu dispendieuse en équipement, mais coûteuse en

temps, qui se base sur la dissociation des molécules de polymère en molécules plus simples qui seront ensuite évaporées. Les pièces sont placées dans un four dont l'augmentation de température est contrôlée. Par exemple, la Figure 1.8 montre un graphique de l'évolution de la température en fonction du temps, suggéré par González-Gutiérrez, Stringari et Emri (2012), qui définit une séquence de déliantage (taux de chauffage et temps de maintien). Le four est muni d'une pompe à vide ou d'une atmosphère protectrice afin de retirer de l'environnement les vapeurs de liant sans provoquer de réaction d'oxydation avec la poudre métallique.

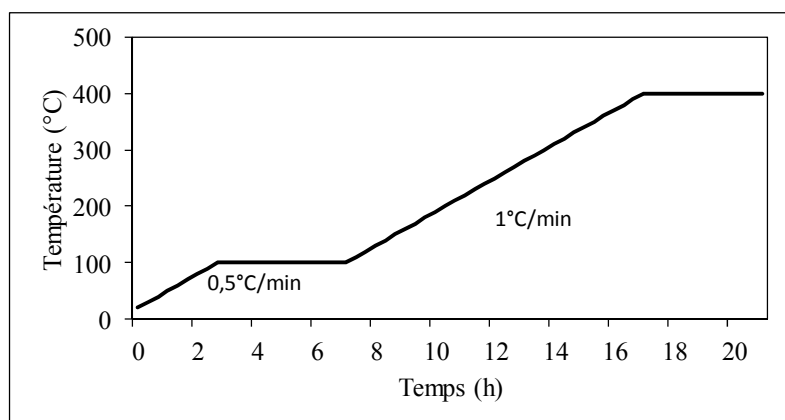


Figure 1.8 Graphique de la température en fonction du temps pour une séquence de déliantage type

Le temps de déliantage dépend de la quantité de liant à retirer, du taux de chauffage et de refroidissement et de l'épaisseur de la pièce (Kryachek, 2004). Pour diminuer le temps de cette opération, il est possible d'envelopper la pièce dans un matériau poreux et inerte comme l'alumine afin de créer un effet de drainage par effet capillaire où le liant fondu est attiré dans le lit de poudre d'alumine (German et Bose, 1997). De plus, la poudre d'alumine sert de support à la pièce durant le déliantage.

1.2.4 Frittage

La densification finale de la pièce a lieu lors du frittage. Les pièces déliées, à l'état «brun», sont placées dans un four sous atmosphère contrôlée pour subir une densification (German et Bose, 1997). Elle se produit par l'élimination des pores (espaces entre les particules) qui est due au mouvement de masse. Il y a quatre mécanismes de mouvement de la masse, soit la diffusion de surface, la diffusion aux joints de particule, la diffusion de volume et l'évaporation et la condensation dans les pores. C'est la diffusion aux joints de particule qui est responsable de la densification en éliminant les vides. Le respect des taux de chauffage est primordial afin de ne pas obtenir uniquement de la diffusion de surface ni pour obtenir uniquement de la diffusion aux joints de particule, qui tend à faire grossir les grains. La Figure 1.9 montre l'évolution de la solidification dans le temps, de l'état initial non fritté à l'état fritté avec peu de pores internes. La température de frittage se situe entre 70 et 90 % de la température de fusion du matériau utilisé (González-Gutiérrez, Stringari et Emri, 2012).

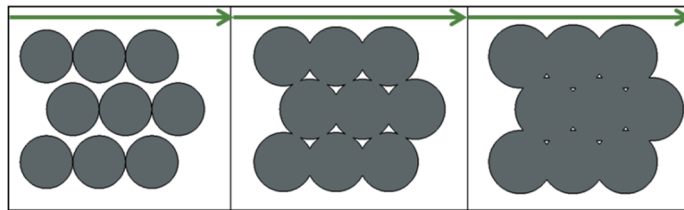


Figure 1.9 Évolution de la densification du matériau pendant le frittage

1.3 Revue des machines LPIM existantes

1.3.1 Fonctionnement général d'une presse LPIM

La machine à injection basse pression se divise en trois sections, soit le mélangeur, le canal d'injection et le moule, comme montré sur la Figure 1.10.

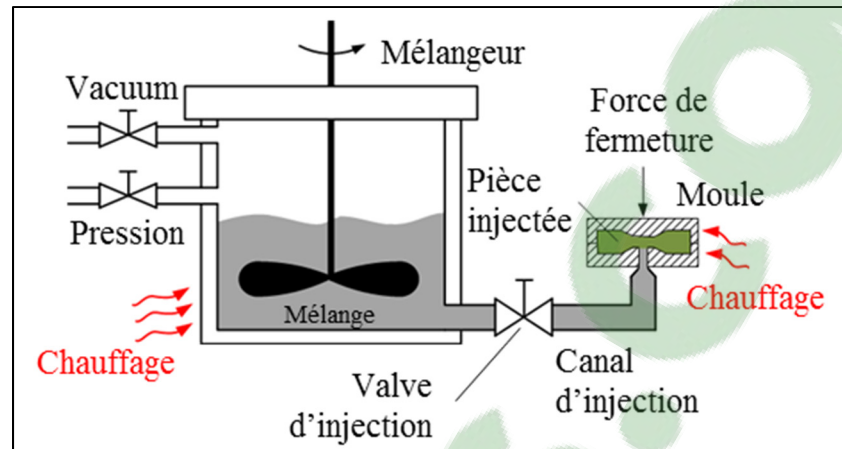


Figure 1.10 Schéma d'une machine à injection basse pression

La section mélangeur brasse les constituants du mélange. La poudre et le liant sont d'abord introduits dans un réservoir. Celui-ci est chauffé à une température pouvant atteindre 250°C par des systèmes à l'huile (Goncalves, 2001) ou à l'électricité (Medvedovski et Peltsman, 2012). Le système de chauffage doit être assez puissant afin d'atteindre la température de fusion du liant. Un mécanisme d'agitation brasse ensuite les constituants pour que le liant mouille chaque particule de poudre. Divers mécanismes d'agitation sont utilisés, selon le constructeur. Le brevet de Peltsman et Peltsman (1983) montre un agitateur simple tandis que Goncalves (2001) utilise un agitateur double planétaire. Ce dernier suggère des vitesses de mélange de l'ordre de 30 rpm sur l'axe central et de 120 rpm sur les axes secondaires. Le mécanisme de brassage idéal n'obtient pas de consensus dans la littérature, ce qui laisse de la place à la recherche. À titre indicatif, la Figure 1.11 compare le mouvement d'un mélangeur simple avec un mélangeur planétaire. Le mécanisme d'un mélangeur planétaire est plus complexe, mais une plus grande surface de mélange est en contact avec l'outil de mélange lors d'une révolution. Un couvercle hermétique isole le contenu du réservoir pour permettre à une pression négative (vacuum) d'éliminer les bulles d'air présentes dans le mélange. La capacité du réservoir varie de 0,5 l à 22 l pour les machines de Peltsman.

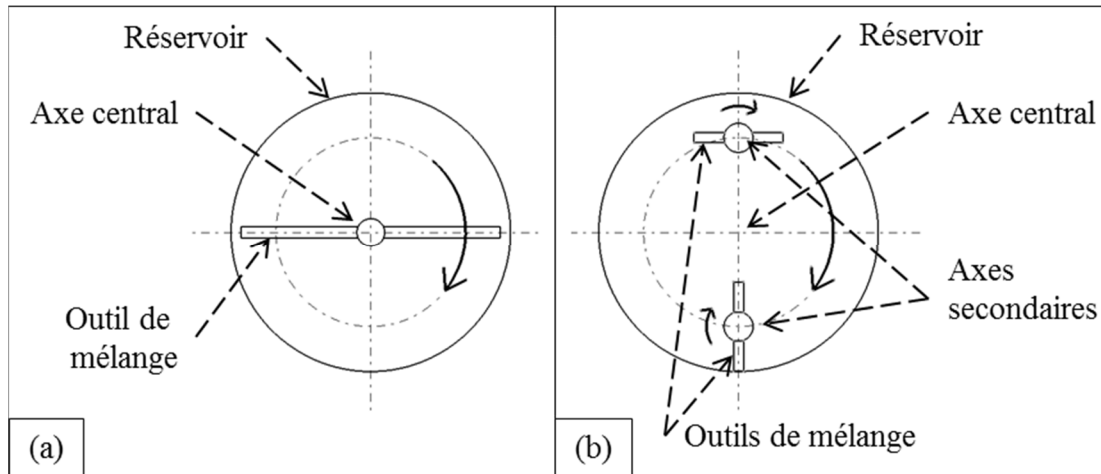


Figure 1.11 Schématisation du mouvement de l'outil de mélange dans un (a) mélangeur simple et dans un (b) mélangeur double planétaire

Lors de l'injection, le mélange est déplacé du mélangeur vers le moule par un canal d'injection situé dans le bas du réservoir. Une pression d'air positive dans le réservoir pousse le mélange dans le canal d'injection. Une valve contrôle l'ouverture ou la fermeture du canal pour le remplissage. Certaines machines ont un réservoir et un canal amovibles (Mangels, 1994) pour faciliter le nettoyage et donc minimiser la contamination avec d'autres matériaux. Le canal d'injection est aussi chauffé pour maintenir les caractéristiques rhéologiques du mélange lors de son passage.

Le moule est rempli par le dessous et il est maintenu en place par un piston pneumatique. Des systèmes de chauffage et de refroidissement sont utilisés principalement pour les hauts volumes de production pour maintenir la température du moule en tout temps. Des systèmes d'ouverture de moule et d'éjection de pièces peuvent être ajoutés en fonction du niveau d'automatisation voulu.

1.3.2 Description détaillée des machines existantes

La compagnie Peltsman Corporation (Minneapolis, États-Unis) est le principal constructeur de machines LPIM commerciales. Elle offre sur le marché une gamme étendue de machines qui proposent différents volumes de réservoir de mélange ainsi que différents niveaux

d'automatisation (Peltsman et Peltsman, 1983). La capacité à mouler des géométries complexes avec ce type de machine (Figure 1.12) est limitée par la pression d'air disponible. Pour améliorer l'aptitude au moulage, la viscosité du mélange doit être faible, sans toutefois causer de la ségrégation. Dans cette configuration, l'arbre du mélangeur est situé à la base du réservoir et est constamment en contact avec le mélange. Une attention particulière doit alors être portée au nettoyage de cette section pour éviter la contamination. Certaines machines de Peltsman sont équipées d'un mélangeur double planétaire dont le mécanisme est situé au-dessus du réservoir. Goncalves (2001) propose aussi une machine LPIM similaire à Peltsman conçue pour étudier les mélanges LPIM.

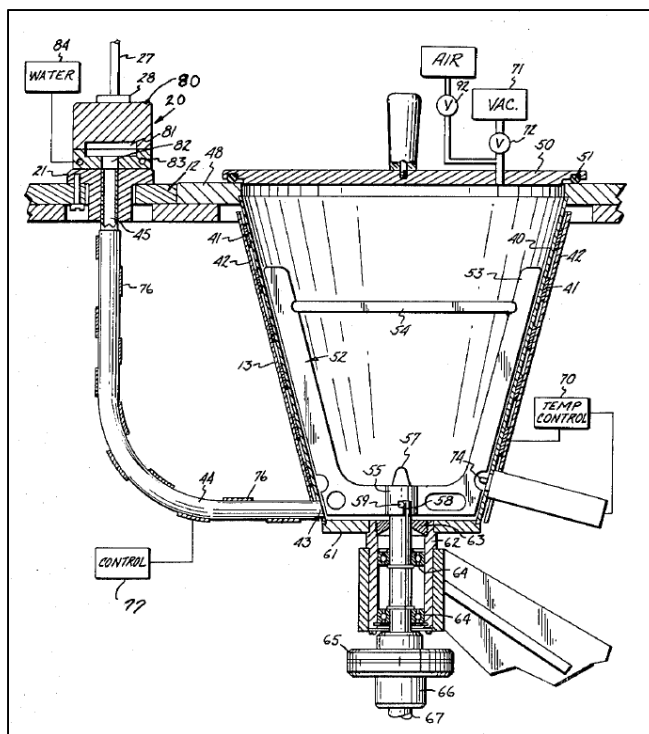


Figure 1.12 Machine LPIM commerciale
Tirée de Peltsman et Peltsman (1983)

Le brevet de Nishio et Kawashima (1989) propose d'améliorer certains aspects du concept de Peltsman. Il montre que la densité des pièces injectées par ce procédé est de 2 à 5 % plus faible que la densité théorique, à cause de l'incorporation de bulle d'air lors de l'injection. La

pression d'air appliquée sur la surface libre du mélange, combinée à la résistance à l'écoulement sur les parois du réservoir, a tendance à former une concavité dans le mélange. Ce mécanisme de formation de bulle d'air est montré sur la Figure 1.13 et est aussi présenté par Yamada et Saito (1998).

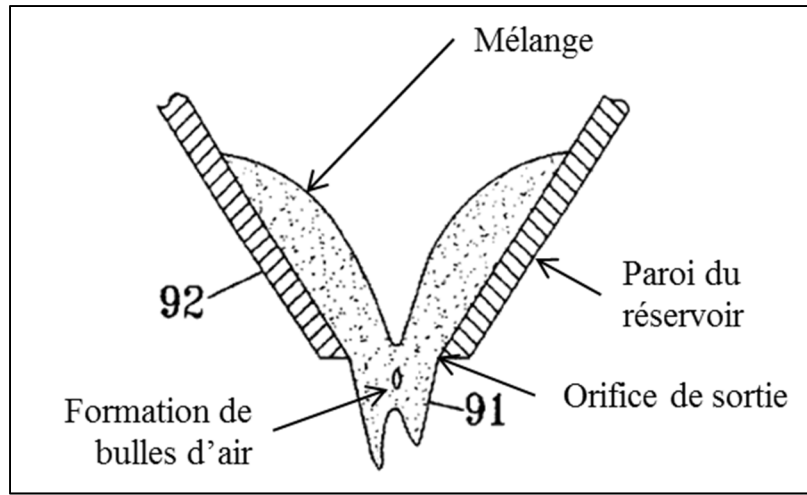


Figure 1.13 Schématisation de la forme concave obtenue lors de l'application de la pression
Tirée de Yamada et Saito (1998)

Pour éliminer ce phénomène, une pompe foulante (*forced pump*) située à la sortie du réservoir peut remplacer la pression d'air pour déplacer le mélange vers le moule, comme montré sur la Figure 1.14. Le vacuum peut donc être maintenu en permanence dans le réservoir. Un canal de retour muni d'une valve de régulation de pression est aussi ajouté. Ce canal permet de faire circuler en permanence le mélange dans les conduits.

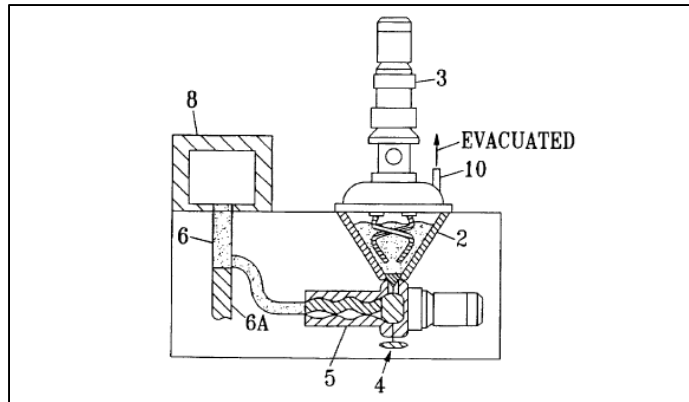


Figure 1.15 Schéma d'une presse à injection
de type pompe proportionnelle et piston
Tirée de Yamada et Saito (1998)

Le tableau suivant résume les caractéristiques des presses à injection basse pression conventionnelles décrites dans cette section. Toutes ces solutions proposent une machine munie d'un canal d'injection dans lequel le mélange peut demeurer stagnant entre les injections et donc ségréger pour des mélanges à très basse viscosité.

Tableau 1.2 Résumé des inventeurs de presses à injection et les techniques utilisées par chacun

Inventeur[Ref]	Réservoir	Canal d'injection	Valve d'injection	Méthode d'injection
Peltsman et Peltsman (1983)	X	X	X	Pression d'air
Goncalves (2001)	X	X	X	Pression d'air
Nishio et Kawashima (1989)	X	X	X	Pompe
Yamada et Saito (1998)	X	X	X	Pompe proportionnelle + piston
Ivzhenko, Popov et Sarnavskaya (2012)	X	X		Pompe à vis + piston
Keizo (1989)	X	X		Pression d'air + piston
Goceram (Pompe et Brandt, 2001)	X	X		Piston

1.3.3 Difficultés et limites des presses LPIM existantes

Une difficulté majeure du procédé LPIM, bien identifiée par les auteurs précédemment cités, est l'incorporation de bulles d'air dans le mélange lors de l'injection. La plupart des auteurs tendent vers l'abandon de l'injection par pression d'air afin de résoudre ce problème. Toutefois, certains désavantages découlent de ces nouvelles techniques d'injection. Premièrement, le nettoyage est nécessaire, particulièrement lorsque des matériaux différents sont utilisés d'une série à l'autre. La contamination est problématique puisque des matériaux de nature différente ne fritteront pas de la même manière et causeront des défauts dans les pièces. Les besoins en nettoyage augmentent forcément lorsque les procédés font appel à des systèmes additionnels. Les valves de contrôle, les pompes, les vis sans fin et les capteurs qui sont en contact avec le mélange doivent être démontés entièrement. Les mélanges peu visqueux ont la capacité de s'introduire facilement dans les mécanismes, comme le montre l'exemple de la Figure 1.16. De plus, le risque de contamination par l'usure (frottement) augmente pour les systèmes mécaniques (Hidalgo et al., 2013). Dans une perspective de production industrielle, cet inconvénient peut-être viable considérant que le même matériau est constamment utilisé. Cependant, dans un cadre de recherche, où plusieurs matériaux sont susceptibles d'être étudiés, le temps et la qualité de nettoyage sont des facteurs à considérer.



Figure 1.16 Exemple d'infiltration de mélange
dans un mécanisme d'une presse à injection
qui doit être nettoyé

Deuxièmement, les mélanges de très faible viscosité sont utilisés pour mouler les pièces de formes complexes et pour compenser la faible pression d'injection. Cependant, une faible viscosité entraîne plus rapidement la séparation des phases lorsque le mélange n'est pas brassé. Chacun des concepts présentés à la section 1.3 est équipé d'un canal d'injection dans lequel le mélange est stationnaire entre deux séquences d'injection. La machine de Nishio et Kawashima (1989) semble contourner le problème puisque le canal de recirculation permet au mélange d'être constamment en mouvement et de retourner dans le réservoir pour être mélangé. Toutefois, une petite quantité de mélange peut rester immobile à l'intérieur et à la sortie de la valve d'injection. La Figure 1.17 montre une pièce injectée avec du mélange fortement ségrégué. La séparation des phases est clairement visible. Cet exemple est extrême et le problème est facilement détectable. Toutefois, une légère ségrégation peut ne pas être visible après l'injection. Les distorsions apparaîtront après le frittage.

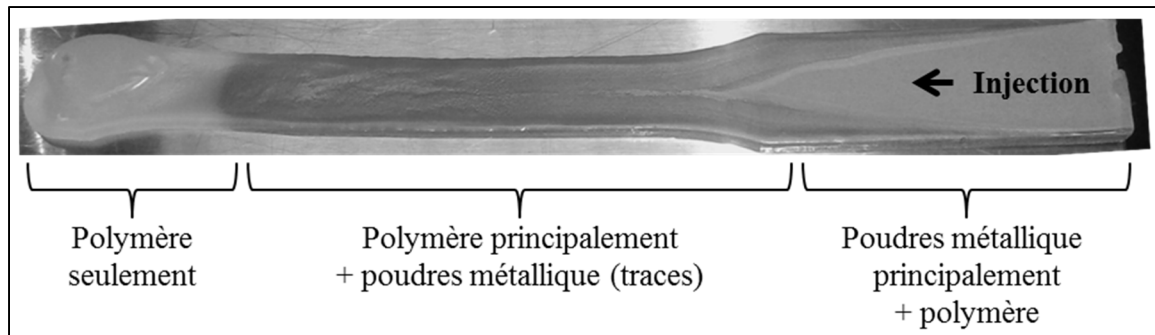


Figure 1.17 Exemple de séparation des phases d'une pièce fortement ségrégée

Troisièmement, l'aptitude au moulage d'un mélange est la capacité de celui-ci à mouler des pièces sans défaut, comme un moulage incomplet. Jenni et al. (2008) définissent l'aptitude au moulage comme étant la comparaison des longueurs d'injection maximales avant solidification, pour les mêmes conditions d'injection, comme montrée sur la Figure 1.18. Puisque le moule est froid, le mélange se solidifie sur les parois. L'espace central entre les parois diminue peu à peu jusqu'à ce qu'il soit complètement fermé. L'élément qui englobe toutes des variables liées à la composition des mélanges (types de liant, proportion poudre-liant, taille et forme de la poudre) est la viscosité, puisque la température et la vitesse d'injection d'un essai d'aptitude au moulage sont constantes.

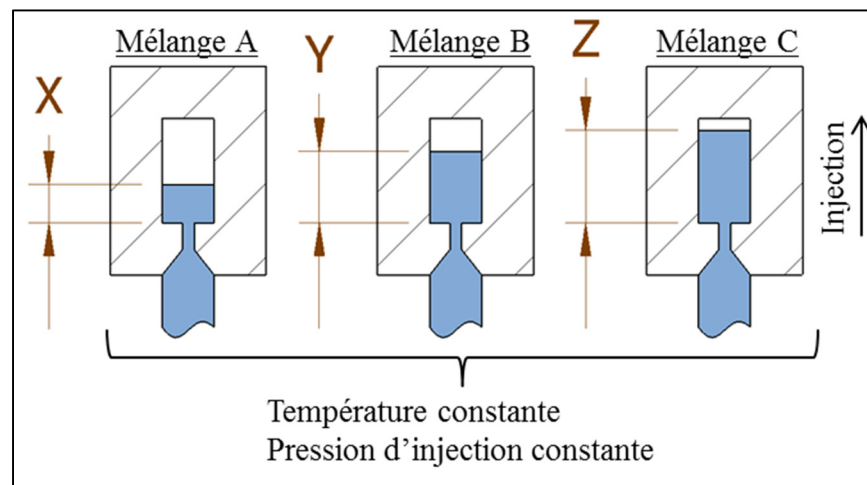


Figure 1.18 Schématisation de la longueur d'injection pour trois mélanges différents

Plusieurs auteurs utilisent donc la viscosité des mélanges pour caractériser l'aptitude au moulage d'un mélange. Karatas et al. (2008) ont réalisé des essais d'injection pour comparer les mesures de rhéologie. Ces essais ont cependant été réalisés avec des machines HPIM. Les caractéristiques propres au LPIM comme la faible pression d'injection, la ségrégation des mélanges et l'incorporation de bulles d'air ne sont pas considérées pour les mélanges HPIM.

1.4 Problématique et objectifs

L'objectif principal du projet est de concevoir et fabriquer une machine à injection basse pression qui corrige les problèmes des machines existantes dans une perspective d'utilisation en laboratoire, soit :

- minimiser (voire éliminer) la ségrégation dans le canal d'injection, dans les valves de contrôle et dans tout autre mécanisme, phénomène qui est amplifié par l'injection de mélange à très basse viscosité;
- minimiser l'incorporation de bulles d'air;
- faciliter le nettoyage.

Pour ce faire, des mesures de thermogravimétrie, de tomographies, et d'aptitude au moulage ont été mises en œuvre pour établir les paramètres de fonctionnement et de valider que l'injection des mélanges à très basse viscosité est possible sans générer de ségrégation à travers la presse pendant les temps morts du procédé.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre est un aperçu des détails techniques de la presse à injection basse pression et de la méthodologie proposée pour valider cet appareil. Le développement du concept est présenté dans le cahier des charges de l'ANNEXE I. La demande de brevet provisoire « *A low-pressure powder injection molding machine and method* » à l'ANNEXE II fait état de la conception détaillée de la presse ainsi que de son fonctionnement. Le dessin d'assemblage, la liste de pièces et le schéma électrique sont quant à eux présentés à l'ANNEXE III et à l'ANNEXE IV.

2.1 Méthodologie de conception et de fabrication de la presse

2.1.1 Analyse du besoin

Comme montré à la Figure 1.2, la machine LPIM exécute la préparation du mélange et l'injection. Le besoin essentiel est de mettre en forme des pièces à partir de poudres métalliques pour obtenir des données permettant d'étudier le procédé. Il en découle deux besoins, soit :

- l'homogénéisation des constituants du mélange;
- l'injection du mélange dans la cavité d'un moule.

Les éléments suivants sont des cibles et des requis qui sont nécessaires afin que la machine soit fonctionnelle et adaptée à l'échelle laboratoire (voir l'ANNEXE I pour plus de détails) :

- la préparation du mélange doit se faire pour une petite quantité, soit 1 kg maximum pour diminuer le coût des essais;
- le brassage doit se faire sous vide à température maximale de 130 °C, qui correspond à une température supérieure à la température de fusion des liants de type cire généralement utilisés (l'effet de l'évaporation du liant dans le temps devra être évalué dans un prochain travail);

- le mélange ne doit pas subir de ségrégation (la fraction volumique de poudre doit être constante $\pm 0,5$ vol. %);
- le contrôle de la température doit être de maximum ± 2 °C (qui correspond à la précision d'un thermocouple type K) dans toute la machine (du mélangeur jusqu'à l'entrée du moule) pour éviter la variation des propriétés rhéologique du mélange;
- la pression d'injection doit être de maximum 1,0 MPa, ou 0,7 MPa si la pression d'air est utilisée;
- l'augmentation de la pression doit être progressive (taux d'augmentation de la pression à déterminer);
- les dimensions de la base du moule doivent être de 150 mm sur 300 mm pour mettre en forme des échantillons de traction plats suivant la norme ASTM E8M (ASTM, 2013) (les moules futurs pourront cependant être plus petits, en fonction de la pièce à mouler);
- la température du mélange doit être mesurée dans chaque section de la machine (la mesure indirecte de la température du mélange par l'entremise des parois du réservoir, du conduit d'alimentation et du moule est acceptable, mais devra être quantifié pour valider les gradients de température et le temps d'équilibre);
- la pression dans le mélangeur et la pression d'injection doivent être mesurées;
- la vitesse de rotation du mélangeur doit être contrôlée;
- le nettoyage de la machine doit être facile et rapide pour les mélanges à base de polymères typiques au MIM.

2.1.2 Développement du concept final et essais préliminaires

Lors de la génération des concepts, l'accent a été mis sur l'élimination de la ségrégation. Pour l'éviter, le mélange doit être continuellement mélangé. Il doit passer le moins de temps possible dans le canal d'injection. Le concept associé à cet état est le fonctionnement d'une seringue, qui s'introduit dans un réservoir (Figure 2.1a), puise un volume désiré (Figure 2.1b) et l'injecte ensuite dans une cavité (Figure 2.1c). Cela permet de vider complètement le canal d'injection et d'éviter la ségrégation.

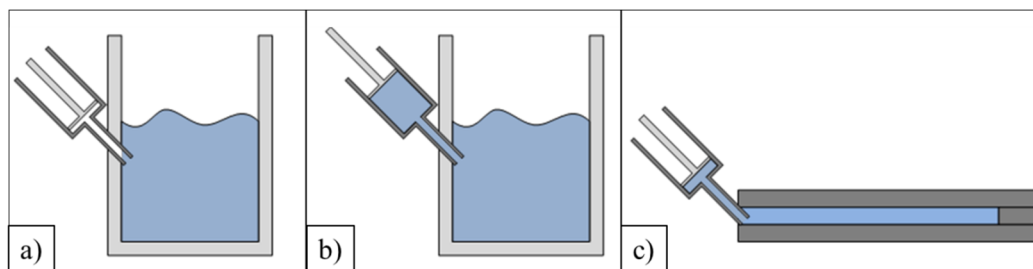


Figure 2.1 Principe de fonctionnement du concept presse
 (a) Insertion d'une seringue dans un réservoir, (b) ponction d'un volume prédéfini et (c) injection dans une cavité

Pour garder le mélange continuellement en mouvement, le mélangeur doit être constamment en marche. Pour éviter que le mécanisme soit en contact avec le mélange, celui-ci doit être au-dessus du réservoir. De plus, une ouverture doit être faite dans le réservoir pour permettre à la seringue de puiser le volume désiré. Une valve ne peut pas être envisagée, car le mélange peut rester pris dans le mécanisme. Le concept associé à cette problématique est un mécanisme de cisaillement du mélange. Une ouverture est faite dans le bas du réservoir. La seringue est placée sur une table qui se déplace de gauche à droite qui bouche l'ouverture du réservoir. D'abord, le piston de la seringue puise le volume désiré du réservoir (Figure 2.2a). Ensuite, la table et la seringue coulisent, ce qui cisaille le mélange présent dans l'orifice de sortie du réservoir et bouche l'ouverture (Figure 2.2b).

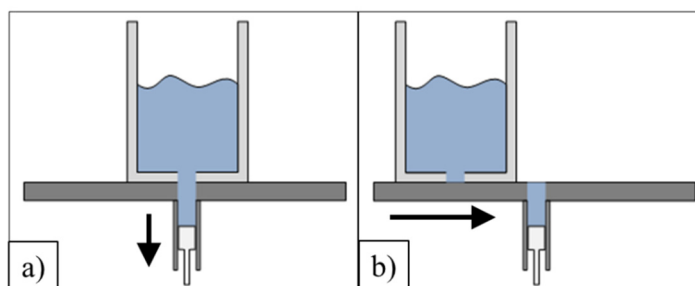


Figure 2.2 (a) Seringue fixée à une table qui puise un volume du réservoir et (b) qui coulisce pour boucher l'ouverture

Un montage expérimental a été fait pour confirmer l'étanchéité du réservoir d'un concept de déplacement de table (Figure 2.3). Un cylindre est placé entre deux plaques. La plaque du bas est chauffée pour maintenir le mélange à l'état liquide. Le mélange est placé à l'intérieur du cylindre. Dans un premier temps, une série de déplacement gauche-droite avec un cylindre sans joint d'étanchéité (Figure 2.3a) a montré une mince couche de mélange sur la plaque. Dans un deuxième temps, un joint d'étanchéité a été placé à la base du cylindre (Figure 2.3b). La série de déplacement n'a montré qu'un très léger résidu de mélange sur la table, ce qui confirme la faisabilité d'un tel concept.

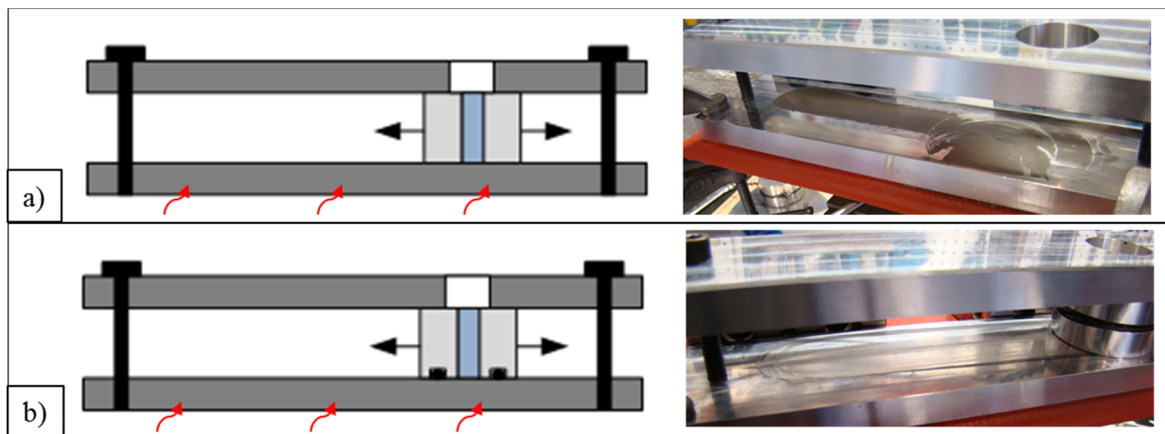


Figure 2.3 Schéma de montage et résultats de l'essai préliminaire de glissement pour un cylindre (a) sans joint torique et (b) avec joint torique

2.1.3 Conception et fonctionnement du concept de presse à injection basse pression

La Figure 2.4 présente une vue générale du concept de presse de moulage par injection basse pression, présentée en détail dans la demande de brevet de l'ANNEXE II et dans les dessins de l'ANNEXE III et de l'ANNEXE IV. La presse peut être divisée en deux sous-systèmes : le système d'injection, qui inclut la presse à injection et la pompe à vacuum; et le système de contrôle et d'acquisition, qui inclut un ordinateur et une unité de contrôle. Une table de travail unit les deux sous-systèmes pour permettre à l'utilisateur de contrôler la machine.

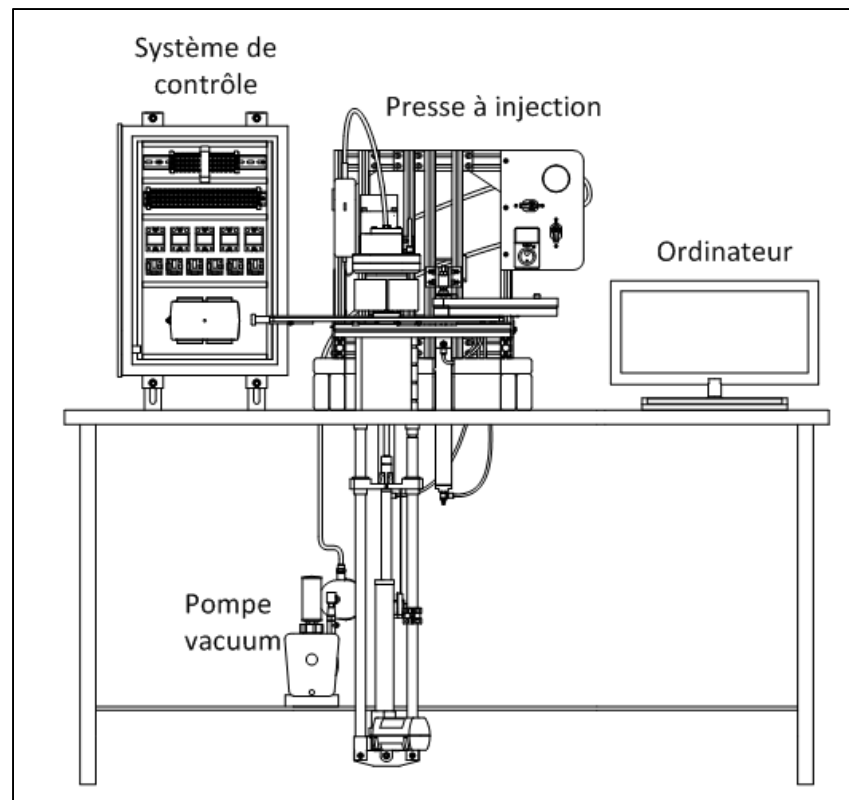


Figure 2.4 Vue générale du concept de presse à injection LPIM

Système d'injection

Un dispositif d'injection est monté sous une table d'injection qui sert de plan de travail pour le réservoir et pour le moule, comme montré sur la Figure 2.5. Un mélangeur est placé au-dessus du réservoir. Un système de pompe à vacuum est utilisé pour faire le vide dans le réservoir (la pompe n'est pas montrée sur la figure). Une structure sert à lier tous les éléments entre eux. La Figure 2.5a montre la machine en position réservoir. Cette position permet de remplir le cylindre d'injection. La Figure 2.5b montre la machine en position moule. Cette position permet au système d'injection de remplir le moule. Les capacités de la machine sont :

- volume du réservoir de mélange de 80 ml à 280 ml;
- vitesse de rotation du mélangeur de 2,5 à 200 rpm sur l'axe central;
- vacuum maximal de 762 mm de Hg;
- température de 30 °C à 150 °C;

- volume des pièces injectées de 4 ml à 50 ml;
- force d'injection de 6000 N maximum;
- vitesse d'injection constante de 5,8 mm/s.

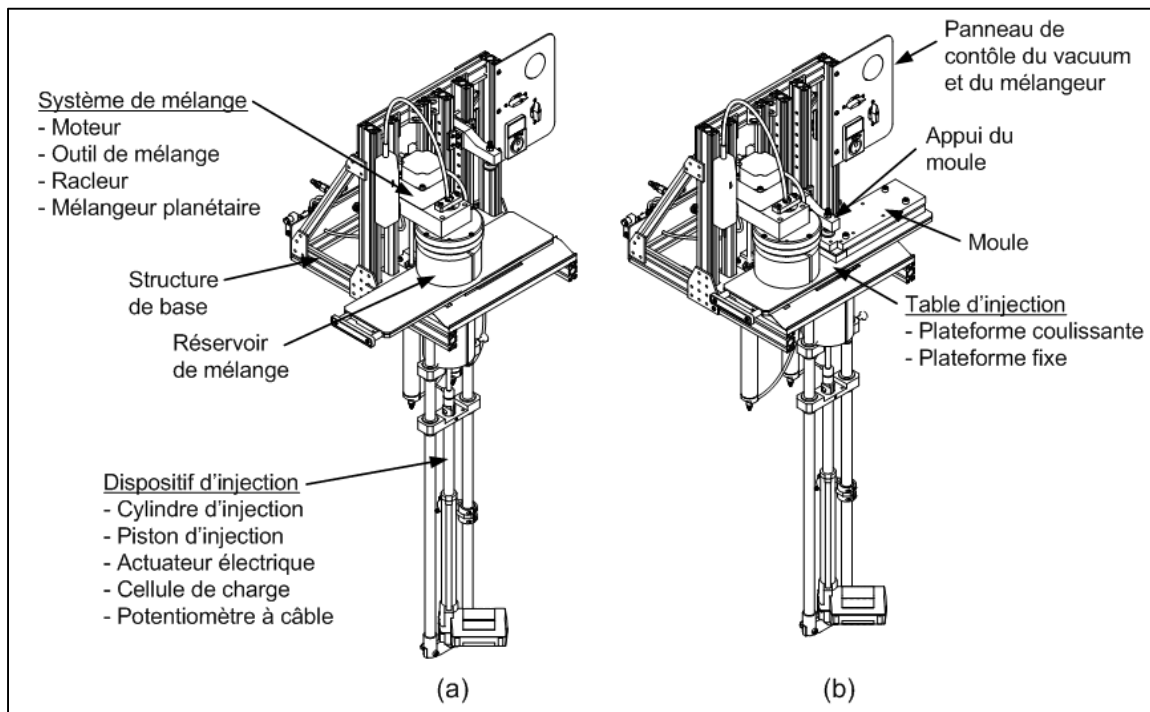


Figure 2.5 Vue isométrique de la presse à injection et identification des composantes

Système de contrôle et d'acquisition

Une application LabVIEW (LabVIEW 13.0, National Instrument Corp., Austin, États-Unis) contrôle et enregistre les paramètres d'injection avec une carte d'acquisition NI USB-6212 (National Instrument Corp.). L'interface (Figure 2.6) permet de contrôler les commandes suivantes :

- les bandes chauffantes (mode automatique);
- les deux cylindres pneumatiques (mode manuel);
- l'actuateur électrique du piston d'injection (mode manuel ou automatique);
- la pompe à vacuum (mode manuel);
- la séquence d'injection.

L'interface acquiert les signaux suivants :

- la température du réservoir, de la plateforme mobile, du cylindre d'injection et d'une zone auxiliaire (thermocouple);
- la force appliquée par l'actuateur électrique sur le piston d'injection (cellule de charge);
- la position de l'actuateur électrique (potentiomètre à câble)
- la position de la table glissante (loquet électrique);
- le mode arrêt d'urgence (relais dans le bouton d'arrêt d'urgence);
- l'image de la caméra d'inspection (USB).

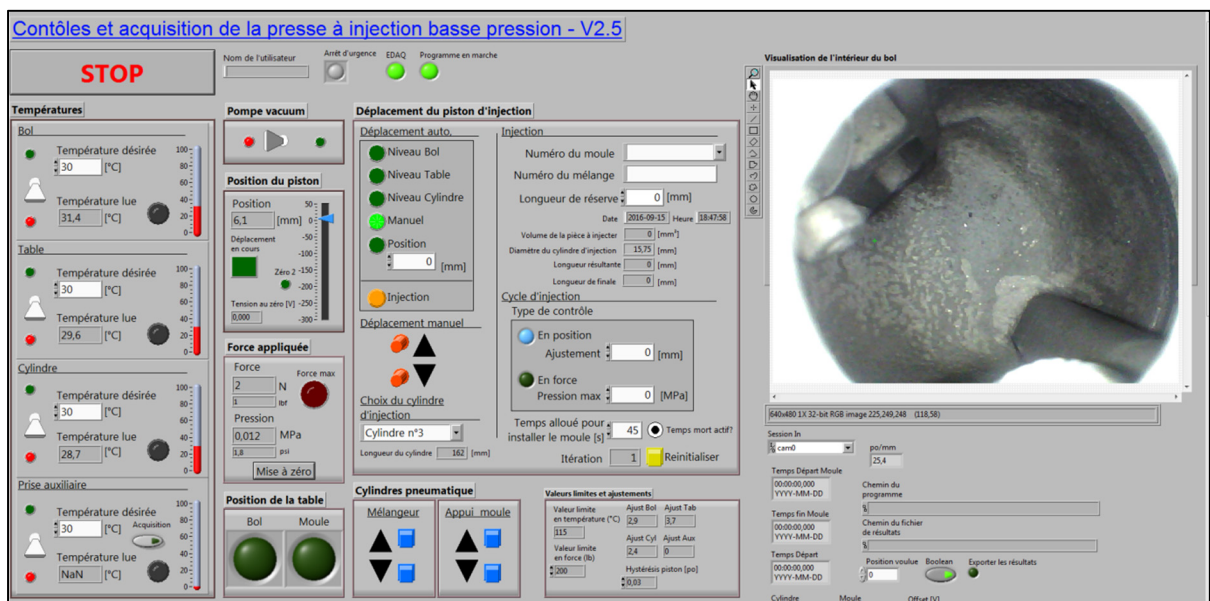


Figure 2.6 Interface LabVIEW développée

Phase de brassage

La Figure 2.7 présente le diagramme ainsi que des vues de coupe du système qui décrivent la phase de brassage du mélange. La phase de brassage d'un mélange basse viscosité de ce concept est similaire à celle présentée plus haut pour les machines LPIM conventionnelles, à l'exception du piston d'injection qui est aussi utilisé pour boucher l'orifice de sortie du réservoir dans ce concept de presse LPIM (voir l'encadré gris de la Figure 2.7a).

La première série d'opérations de cette phase (Figure 2.7b) consiste à aligner le cylindre d'injection avec l'orifice de sortie du réservoir, c'est-à-dire de coulisser la plateforme mobile à la position réservoir. Le piston est relevé pour boucher l'orifice de sortie, de façon à ce que la tête de celui-ci soit au même niveau que la paroi interne du réservoir. Cette position assure que tout le mélange soit en mouvement dans le mélangeur et donc d'éviter la ségrégation. Le système de mélange est dégagé du réservoir (Figure 2.7 b).

La deuxième série d'opérations de cette phase (Figure 2.7c) consiste à remplir de mélange le réservoir, de le chauffer à une température égale ou supérieure à la température de fusion du liant et d'engager le mélangeur dans le réservoir pour brasser le contenu. Durant le brassage, un vacuum est appliqué dans le réservoir pour retirer l'air du mélange et pour prévenir la formation de bulles. Après un certain temps d'homogénéisation et de désaération, la phase d'injection peut démarrer ou le mélange peut être retiré pour une utilisation ultérieure.

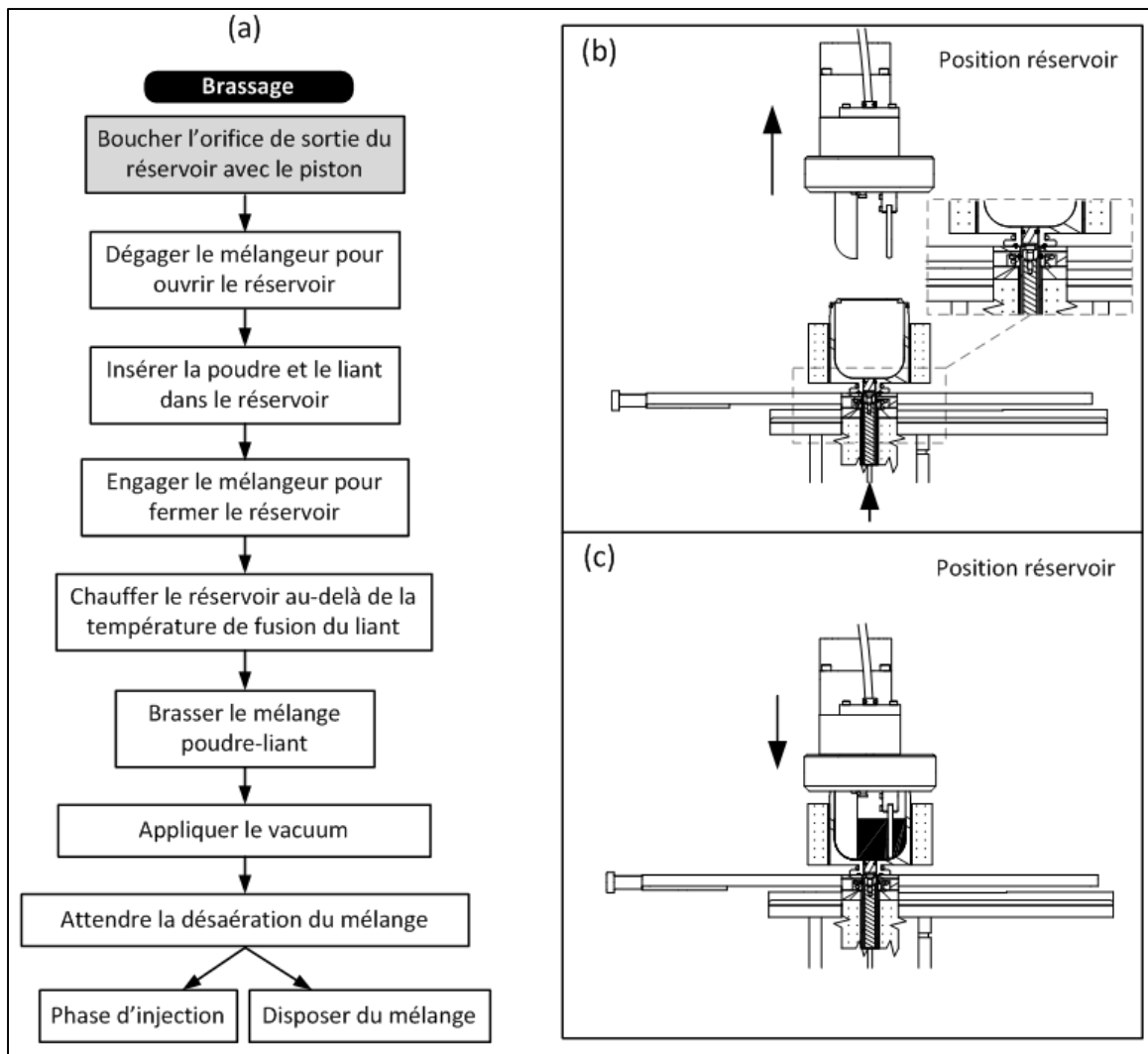


Figure 2.7 (a) Diagramme et (b-c) vues de coupe partielles de la presse à injection qui décrivent la phase de brassage du mélange

Phase d'injection

La Figure 2.8 présente le diagramme ainsi que des vues de coupe du système d'injection qui décrivent la phase d'injection du mélange. La phase s'amorce par le retrait du vacuum du réservoir. Le piston peut ensuite se dégager de l'orifice de sortie du réservoir pour pomper le volume désiré de mélange Figure 2.8 b). Le remplissage du cylindre d'injection résulte de la force de succion du piston sur le mélange.

Le cylindre d'injection est coulissé vers la position moule (Figure 2.8c). Dans cette position, la plateforme mobile joue le rôle de valve du réservoir, puisque la table couvre l'orifice de sortie du réservoir. Ce système permet d'empêcher le mélange de sortir du réservoir ou d'empêcher les contaminants d'entrer, sans utiliser un système de valve complexe. Le vacuum peut être remis dans le réservoir. Le moule, préalablement chauffé sur une table chauffante annexée à la machine, est posé sur la plateforme mobile, en ligne avec le cylindre d'injection. La pression du vérin pneumatique de l'appui du moule est exercée pour maintenir le moule contre la table. Le piston peut ensuite amorcer sa montée pour remplir la cavité du moule (Figure 2.8d).

Lorsque le mélange a durci dans la cavité du moule (moins de 30 secondes), la pression de l'appui du moule est relâchée et le moule est retiré de la plateforme. Le moule est désassemblé et la pièce moulée est retirée du moule (Figure 2.8e). Suite à l'injection, le vacuum est retiré du réservoir et le cylindre d'injection est coulissé vers la position réservoir (Figure 2.8f). Le piston est replacé à la position bouchon, dans l'orifice de sortie du réservoir. Le mélange résiduel, qui n'a pas été injecté, est alors retourné dans le réservoir et homogénéisé avec le restant du mélange (Figure 2.8g). Le mélangeur peut alors être mis en marche et le vacuum est appliqué pour éviter la ségrégation et la formation de bulles d'air.

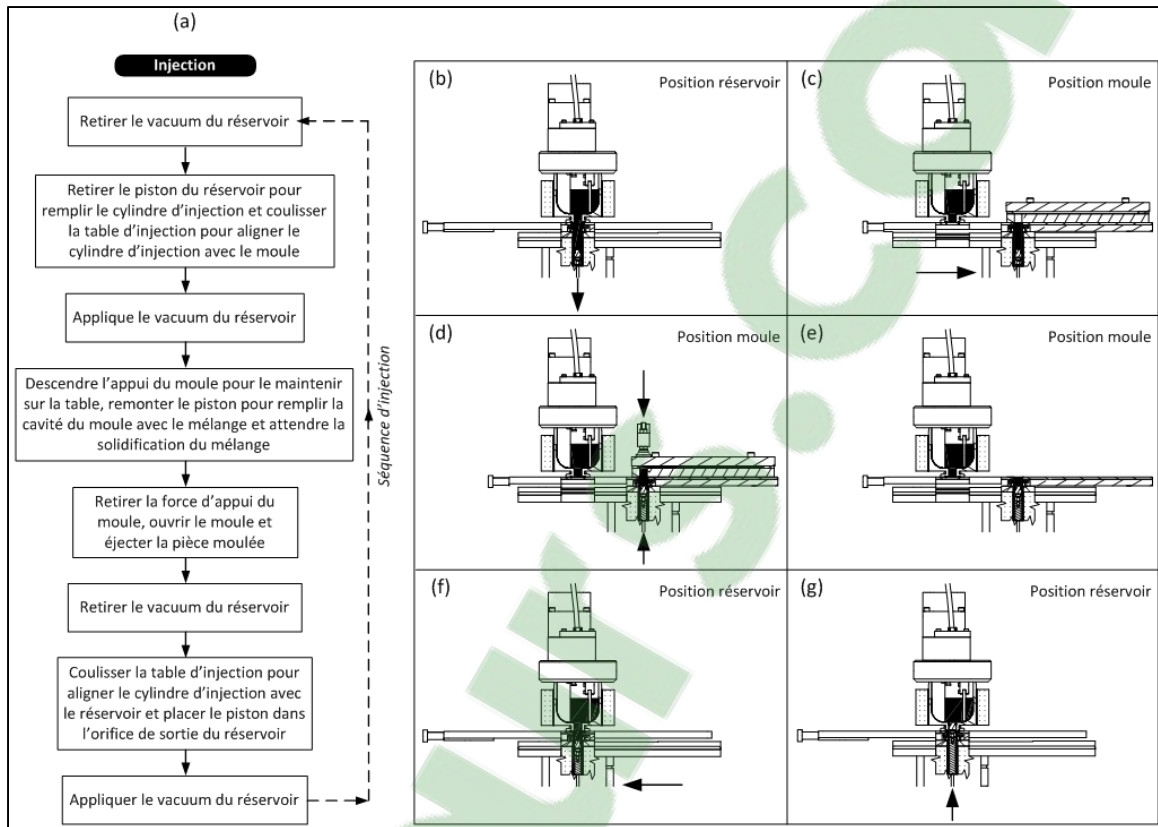


Figure 2.8 Séquences de la phase d'injection

2.1.4 Innovation du concept de presse LPIM

L'innovation réside dans le système de plaque coulissante qui permet de fermer l'orifice de sortie du réservoir tout en positionnant le piston pour l'injection. Ainsi, cette innovation permet d'éliminer à la fois le canal d'injection et la valve de contrôle. Ce système est donc adapté aux mélanges à faible viscosité et permet d'augmenter le potentiel d'aptitude au moulage sans ségrégation durant les temps morts du procédé. De plus, le vacuum est appliqué en tout temps, excepté lors de l'opération de ponction du mélange et le mélangeur homogénéise constamment le mélange dans le réservoir.

Le nettoyage du système est simplifié puisqu'il ne possède pas de système de valve ou de pompe complexes à démonter. Comme montré sur la Figure 2.9, le cylindre d'injection (1, Figure 2.9), qui est un tube simple, peut être démonté rapidement. La longueur du cylindre

est adaptable. Il y a cinq niveaux d'ajustement (2, Figure 2.9) en fonction du volume de la pièce à mouler. Pour un volume plus faible, il est possible d'utiliser un cylindre plus court, ce qui facilite son nettoyage.

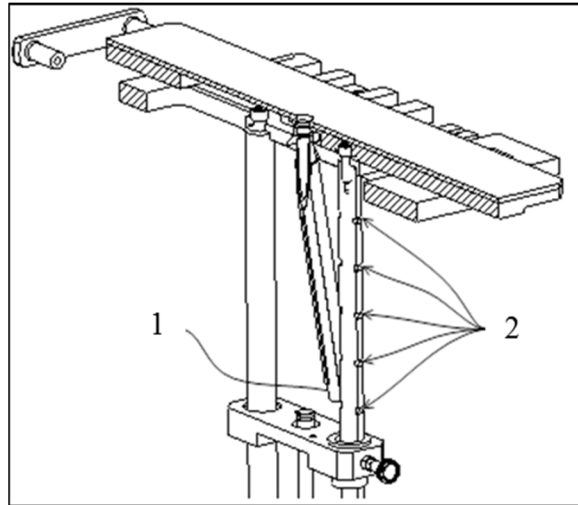


Figure 2.9 Démontage du cylindre d'injection

2.2 Méthodologie de validation de la presse

Le but des essais de validation est de vérifier si le concept satisfait les critères de performance définis dans le cahier des charges de l'ANNEXE I, notamment au niveau du chauffage du réservoir, du vacuum dans le réservoir et de la lecture de la pression d'injection. Aussi, plusieurs injections ont été réalisées dans différentes conditions pour montrer que la machine permet l'étude des mélanges basse viscosité. Ces essais d'injection ont été complétés par des essais de thermogravimétrie pour l'évaluation de la ségrégation ainsi que des essais de rhéologie pour l'évaluation de l'aptitude au moulage.

2.2.1 Choix des ingrédients du mélange

Les essais ont été faits avec trois mélanges, tous dans une même proportion de poudre d'acier inoxydable 316L, fabriquée par Epson Atmix Corporation (Japon). Ce matériau est

représentatif des poudres métalliques utilisées pour le moulage LPIM tant au niveau de sa forme (principalement sphérique) et de sa taille moyenne de 6.7 μm . La poudre d'acier inoxydable 316L est bien connue et elle a retenu l'attention de plusieurs auteurs (Dvorak, Barriere et Gelin, 2005; Ibrahim, Muhamad et Sulong, 2011; Sotomayor, Varez et Levenfeld, 2010). De plus, elle est peu dispendieuse comparativement à de la poudre d'Inconel, par exemple.

Les liants sont tous composés à la base de cire de paraffine. Le premier liant est uniquement composé de cire de paraffine (PW) (Sigma-Aldrich, États-Unis). Ce mélange a servi de référence. De l'acide stéarique (SA) est ajouté dans le second liant pour diminuer la viscosité. Ce mélange a servi notamment à l'évaluation de la ségrégation, puisque sa très basse viscosité favorise ce phénomène. Le troisième liant est composé de cire de paraffine, d'acide stéarique et d'éthylène vinyle acétate (EVA). L'ajout d'EVA permet d'épaissir le liant tout en profitant de l'effet mouillage du SA. Les détails de la composition des mélanges sont disponibles dans le Tableau 3.2.

Pour trouver la température d'injection minimale, la température de fusion des trois mélanges de liant a été déterminée par une analyse de calorimétrie différentielle à balayage (DSC). Les résultats de cette analyse sont disponibles à l'ANNEXE V.

2.2.2 Définition des paramètres d'utilisation de la machine

Température du mélange

Le chauffage du mélange dans le réservoir se fait par conduction des parois. Le thermocouple de lecture est situé entre la bande chauffante électrique et la paroi extérieure du réservoir, comme montré sur la Figure 2.10. La température réelle du mélange n'est donc pas mesurée. Le thermocouple a été placé à cet endroit pour éviter que la bande chauffante surchauffe. De plus, le thermocouple n'est pas en contact avec le mélange et n'a pas besoin d'être nettoyé.

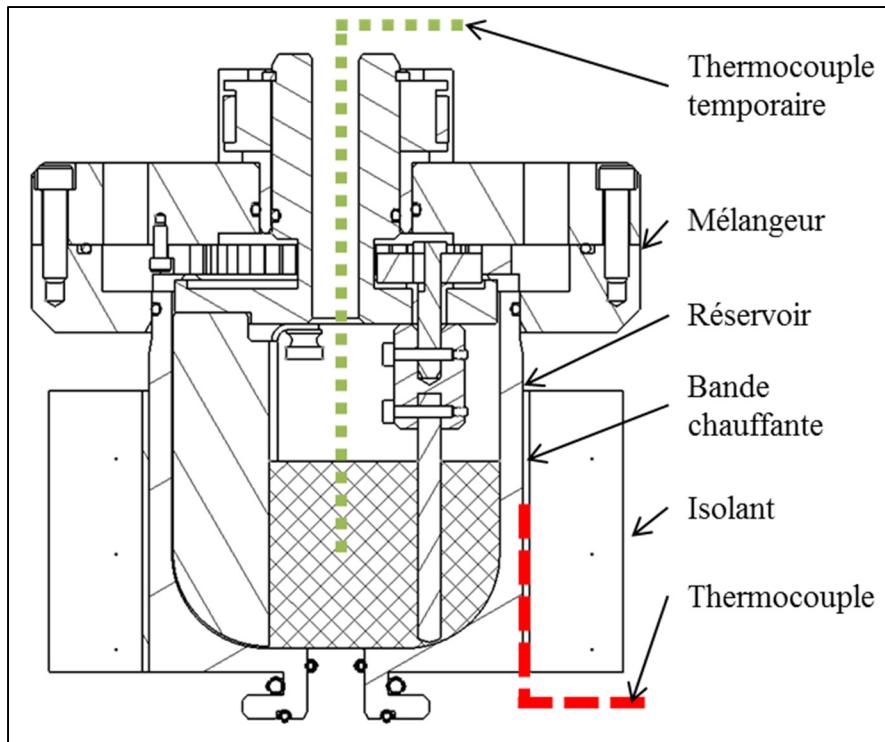


Figure 2.10 Vue de coupe du réservoir montrant la position du thermocouple de lecture de température du réservoir

Un essai de mesure de la température du mélange dans le réservoir a été fait avec un mélange 30PW-10SA (voir Tableau 3.2 pour les détails de composition). Un thermocouple est inséré dans l'ouverture de la caméra pour mesurer la température réelle du mélange avec le mélangeur en fonction. L'essai commence à une température de mélange de 50 °C. Pour chaque essai, la commande de température est de $50\text{ °C} + 10 \cdot i\text{ °C}$, jusqu'à 110 °C. La température est notée en fonction du temps, jusqu'à l'atteinte d'un plateau. Ce résultat permet de déterminer l'écart entre la température commandée et la température réelle sur toute la plage d'utilisation. Les résultats sont présentés à la section 3.1.1.

Temps minimum du vacuum

Pour enlever complètement l'air dans le mélange, le vacuum doit être maintenu un certain temps. Un essai préliminaire (Figure 2.11) montre l'effet du vacuum sur un nouveau mélange qui n'a jamais été désaéré. Au départ du vacuum, une grande quantité de bulles s'échappe du

mélange (Figure 2.11a). Après 40 minutes de vacuum, le mélange devient lisse sans présence visuelle de bulles (Figure 2.11b).

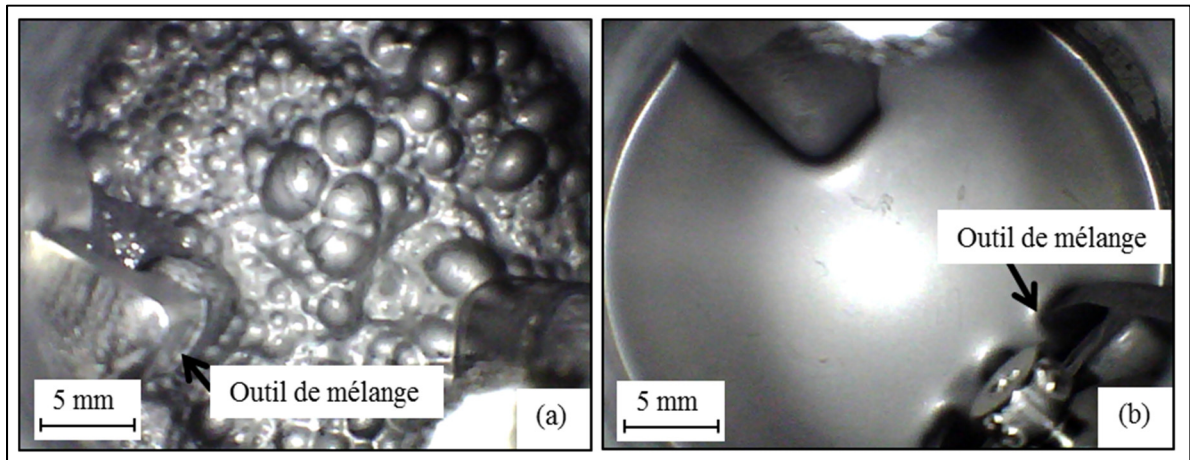


Figure 2.11 Aspect du mélange dans le réservoir (vue de dessus) pour un vacuum de (a) 1 minute et (b) 40 minutes

Toutefois, pour confirmer qu'aucune bulle n'est présente dans le mélange lorsqu'il apparaît lisse, quatre pièces, soumises à quatre temps de vacuum (0 min, 15 min, 30 min et 45 min), ont été injectées et analysées par tomographie. Une nouvelle préparation du mélange 30PW-10SA a été utilisée. Les résultats sont présentés à la section 3.2.

Lecture de la pression

Comparativement aux machines LPIM conventionnelles qui utilisent la pression d'air pour déplacer le mélange, la machine conçue dans ce projet utilise un piston muni d'un joint torique pour assurer l'étanchéité dans le cylindre d'injection. Le joint torique s'oppose au déplacement du piston en raison de la force de frottement avec la paroi du cylindre d'injection. Cette force est mesurée par la cellule de charge. La force est convertie en pression à partir de la section du cylindre.

Un essai d'injection à vide, donc sans mélange, a été fait pour mesurer dans un premier temps l'effet du frottement du joint torique. La répétition de l'essai permet dans un deuxième temps d'évaluer la répétabilité des résultats. L'essai a été réalisé à 90 °C pour retrouver les

conditions d'injection normales. L'essai a été fait à quatre reprises. Les résultats sont présentés dans la section 3.1.2.

2.2.3 Essais thermogravimétriques

La principale revendication de ce concept de presse LPIM est que la ségrégation dans la presse est éliminée. Pour vérifier cette affirmation, un essai de ségrégation provoqué a été réalisé avec un mélange 30PW10SA, qui est très peu visqueux. Un volume de mélange est retiré du réservoir par le cylindre d'injection. Un échantillon de mélange est ensuite prélevé à la surface libre du cylindre (dessus) à quatre intervalles (0 min, 1 min, 5 min, 10 min), comme montré sur la Figure 2.12. La température du piston est maintenue à 90 °C. Les échantillons ont ensuite subi une analyse thermogravimétrique (TGA) pour déterminer la proportion de chaque constituant du mélange. Les résultats sont présentés dans la section 3.2.

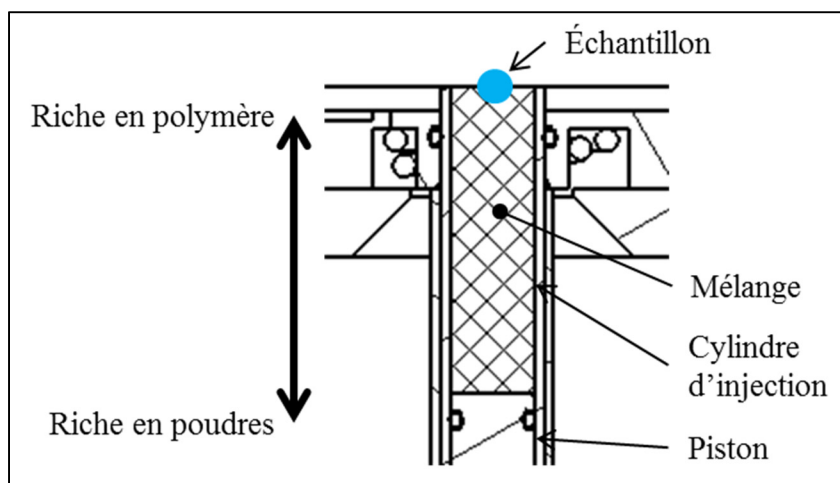


Figure 2.12 Vue de coupe du cylindre d'injection montrant l'endroit où l'échantillon de mélange ségrégué est prélevé

2.2.4 Essais d'injection

Dans un premier temps, les trois mélanges énoncés à la section 2.2.1 ont subi un essai de rhéologie pour mesurer la viscosité en fonction du taux de cisaillement. Ensuite, chaque mélange a été injecté pour former des barres de traction. Cette injection permet de déterminer

la pression maximale d'injection. Ces mêmes mélanges ont aussi été injectés dans un moule de forme spirale. Cette géométrie permet de mesurer la longueur injectée. Les résultats de rhéologie et d'injection sont présentés et comparés à la section 3.2.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Ce chapitre se divise en deux sections. D'abord, les essais préliminaires de fonctionnements sont présentés. Ensuite, les résultats d'expérimentation sur l'aptitude au moulage de trois différents mélanges sont présentés sous forme d'un article scientifique.

3.1 Présentation des résultats des essais préliminaires de validation

3.1.1 Température du mélange

La Figure 3.1 montre la température réelle du mélange mesurée en fonction d'une consigne variant de 60 °C à 110 °C. Les résultats montrent que la température mesurée se stabilise après environ 35 minutes. Cette valeur fixe donc le temps de mélange minimum avant l'injection. De plus, les résultats montrent que la température de la consigne n'est pas atteinte et que l'écart est plus grand pour une consigne plus élevée.

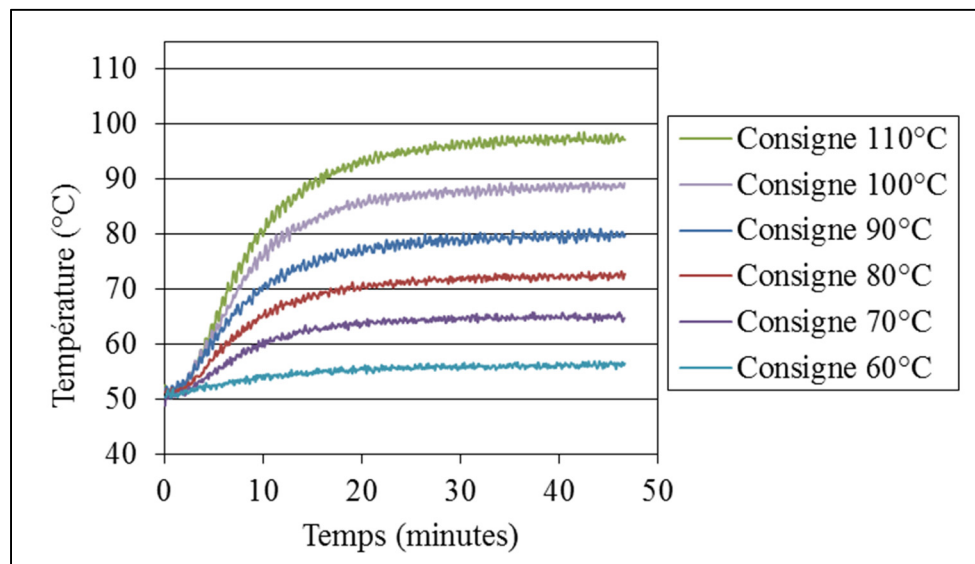


Figure 3.1 Température du mélange en fonction de la consigne de température

La valeur de la consigne doit être ajustée vers le haut pour obtenir la température de mélange désirée. La Figure 3.2 montre que la différence entre la consigne et la température lue est proportionnelle selon la consigne. Il est donc possible de déterminer une équation de tendance de type $y = ax + b$. Cette équation pourra être ajoutée au programme de contrôle de la presse pour ajuster automatiquement la consigne de température.

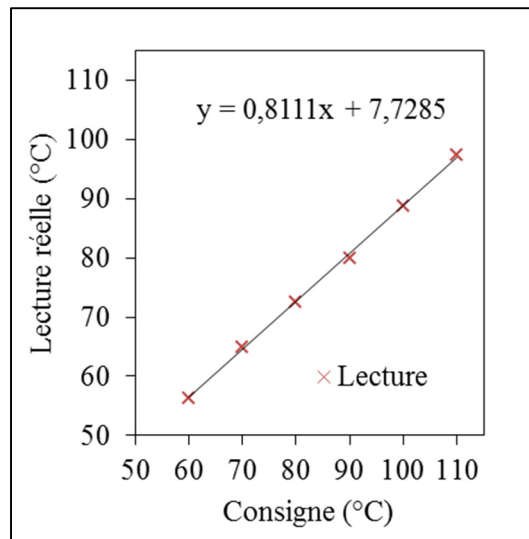


Figure 3.2 Équation d'ajustement de la consigne de température du réservoir

3.1.2 Lecture de la pression

La Figure 3.3 montre la variation de la pression mesurée en fonction de la position du piston dans le cylindre pour un déplacement de 150 mm. La position 0 mm correspond au point mort bas (position basse) du cylindre, c'est-à-dire que le cylindre est rempli au maximum.

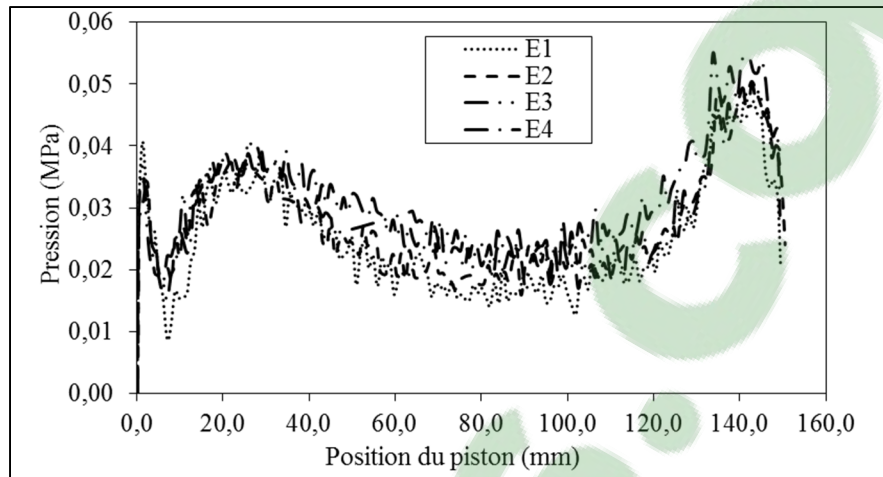


Figure 3.3 Variation de la lecture de la pression résultante du frottement du joint torique sur la paroi du cylindre d'injection

Les résultats montrent pour chaque essai une lecture non constante de la pression. Puisque la variation se répète similairement pour chaque essai, celle-ci pourrait s'expliquer par une variation du diamètre intérieur du cylindre d'injection. En effet, un diamètre plus petit compresse davantage le joint torique du piston d'injection et oppose un frottement plus important. Pour confirmer cette hypothèse, le diamètre intérieur du cylindre d'injection devra être mesuré à plusieurs endroits. La variation des quatre essais se situe à environ $\pm 0,0075$ MPa. Considérant une mesure de pression moyenne de 0,5 MPa, cette variation représente $\pm 1,5\%$ de la lecture de la pression.

3.2 Présentation des résultats expérimentaux (article de journal)

Cette section présente un article soumis à un journal scientifique décrivant le fonctionnement et l'innovation de la presse à injection développée. Cet article montre également les résultats obtenus pour les essais de ségrégation, d'aptitude au moulage et de vacuum présentés au chapitre précédent. Cet article a été soumis à *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

DEVELOPMENT OF AN INJECTION CONCEPT USED IN LOW-PRESSURE POWDER INJECTION MOLDING

S. G. Lamarre ¹, V. Demers ^{1*}, J. F. Chatelain ¹

¹École de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame West, Montreal, QC H3C 1K3, Canada

e-mail: Simon G. Lamarre (simon.g-lamarre.1@ens.etsmtl.ca); Jean-François Chatelain
(jean-francois.chatelain@etsmtl.ca)

*Corresponding author: Vincent Demers; Tel: 1 514 396-8590; Fax: 514 396-8530; E-mail:
vincent.demers@etsmtl.ca

Cette section de chapitre a été soumise comme article pour publication dans The
International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Soumis le 13 octobre 2016.

Abstract:

In low-pressure powder injection molding, the injection presses are equipped with an interconnecting pipe in which the segregation of feedstocks may occur during the dead time of the process. This segregation phenomenon limits the use of low-viscosity feedstocks leading to a decrease in the capacity to produce more complex-shaped components. The full moldability potential of the process is still limited by the injection method proposed in the commercial machines. A new injection concept was developed to increase the moldability of powder-binder mixtures, while avoiding segregation within the injection press. This innovative injection system consists in eliminating the interconnecting pipe and injection valve by using a sliding platform concept which was adapted for transportation of the feedstock from the container to the mold cavity. Validation of the injection system was performed using three wax-based feedstocks. Injection profiles obtained with two different molds were correlated with the rheological behavior of the feedstocks, and thermogravimetric analyses were used to quantify the segregation within the system. An experimental simulation of segregation within the machine confirmed that the injection

method avoids segregation for a feedstock exhibiting a viscosity as low as 0.1 Pa·s. The best moldability properties were obtained with feedstock containing paraffin wax and stearic acid.

Keywords:

Powder injection molding (PIM); injection press; viscosity; segregation; moldability; feedstock.

3.2.1 Introduction

The cost-effective and small series fabrication (customization) of complex shape metallic parts with the proper dimensional and geometric tolerances is one of the main goals in advanced manufacturing industry. As a manufacturing technology, low-pressure powder injection molding (LPIM) encompasses all these requirements simultaneously. This rapid manufacturing process consists in mixing metallic or ceramic powder with molten polymeric binder to obtain a feedstock which is injected into a mold cavity to generate a complex shape. As presented by Heaney (2012c), the binder is completely removed during debinding and sintering treatments to obtain a near-net shape dense metallic component. Over the past 20 years, Mangels (1994) showed that the conventional high-pressure powder injection molding (HPIM) process (injection pressure of up to 200 MPa) has transitioned to LPIM by taking advantage of low-viscosity feedstocks (e.g., < 10 Pa·s) to achieve high moldability during injection at a pressure lower than 0.7 MPa. As used by Zorzi, Perottoni et al. (2003) in ceramics forming, the LPIM technology has quickly become attractive for the development of high value-added metallic parts. Ibrahim et al. (2014) investigated the potential of superalloys for aerospace applications, while Aslam et al. (2016) developed stainless steel feedstocks.

A key to the successful injection of feedstock at low pressure lies in the low-viscosity properties of the wax-based binder. As demonstrated by Schlechtriemen et al. (2013), the paraffin waxes can be used as the main constituents in LPIM powder-binder mixtures. Li et al. (2007) investigated the effect of surfactant agents and demonstrated that this constituent

can act as a bridge between metallic powder and other constituents to enhance the homogeneity and the injection properties of the feedstock. A thickening agent is generally used to increase the viscosity of the mixture in order to prevent powder-binder separation. Stearic acid, ethylene vinyl acetate, and low-density polyethylene are extensively used as the secondary constituents in LPIM feedstocks.

The advantages and the limitations of the LPIM technology are directly related to the rheological properties of low-viscosity feedstocks. As demonstrated by Arifin et al. (2015) in conventional HPIM process as well as by Loebbecke, Knitter et Haußelt (2009) in LPIM process, the rheological properties correspond to pseudoplastic behavior. Also, several feedstock parameters may affect the viscosity of the mixture. Mannschatz, Muller et Moritz (2011) observed that an increase in powder sphericity produces a decrease in the viscosity of feedstock. Sotomayor, Varez et Levenfeld (2010) measured that a decrease in particle size leads to an increase in viscosity. Li, LiuJun et Khalil (2007) demonstrated that an increase in the volume fraction of binder generates a decrease in viscosity, but may lead to debinding and sintering defects. As summarized by Ibrahim, Muhamad et Sulong (2011), it is well accepted that an increase in feedstock temperature produces a decrease in the viscosity of feedstock. A decrease in viscosity of the powder-binder mixture results in higher moldability at a lower pressure. A lower injection pressure directly minimizes the deformations of the mold and favors a calm mold filling, resulting in the fabrication of defect-free parts (cavities, weld line, internal stresses, etc.), while reducing the cost of the tooling and the injection machine. However, the use of low-viscosity feedstocks may lead to segregation of the constituents. Jenni, Zauner et Stampfl (2009) shown that the segregation is generated mainly by gravity, an improper mixing method, and a high-pressure gradient during the molding process. This parameter must be minimized in order to prevent distortions, cracks, voids, warping and the heterogeneous shrinkage of sintered parts. Moldability and segregation are linked to the rheological behavior of the feedstock. Using feedstock viscosity that is too low should easily fill the mold cavity, but this would also lead to the segregation of trapped feedstock that remains idle within the injection machine during the process dead times.

Several concepts for the conventional low-pressure injection molding machine for metallic or ceramic powder were presented. Over 30 years ago, the invention presented by Peltsman et Peltsman (1983) proposed a complete system having a conical container with an interior agitator and heating means for keeping the material inside the container in a slurry form. Their manufacturing experience in low-pressure injection molding of ceramic was recently reviewed by Medvedovski et Peltsman (2012). Goncalves (2001) has proposed a similar concept of injection machine: following homogenization and deaeration of the feedstock, the container is pressurized in order to flow out the feedstock from the container to the mold cavity through an interconnecting pipe and an injection valve. Nishio et Kawashima (1989) presented a concept for feedstock transportation without the use of air pressure. A slurry pump is connected to the outlet of a feedstock container, supplying the mold with feedstock through a pipe. Several valves (including an injection valve) are used to control the flow of the feedstock through the slurry pump, the inlet of the container, and the gate of the mold. Yamada et Saito (1998) proposed another concept of the LPIM machine having a system to prevent air from being entrapped in the feedstock during injection. There, a proportional pump is connected to a discharge port of a feedstock container, supplying the mold at a constant rate via a feeder pipe and a cylinder. More recently, Ivzhenko, Popov et Sarnavskaya (2012) proposed a similar concept of an injection machine adapted for micro/nanosized powder injection molding. A screw pump is used for the transportation of the feedstock from the container to the injection piston, in which the powder-binder mixture is injected into the mold cavity using an injection pressure up to 20 MPa. Keizo (1989) proposed a machine combining a conventional system with a second pressure stage piston. Goceram AB Corporation (Mölnä, Sweden) developed a medium pressure powder injection molding technology using a similar piston system, as presented by Pompe et Brandt (2001). In its system, the powder-binder mixture flows from the container to the injection cylinder through an interconnecting pipe. The piston of the injection cylinder is then used to transport the feedstock to the mold cavity.

All the injection molding machines presented above are equipped with an interconnecting pipe for transportation of the feedstock between the container and the mold. Since is not

possible to mix the feedstock in the interconnecting pipe, trapped feedstock in the interconnecting pipe remains idle between injections or during other process dead times. For low-viscosity powder-binder mixtures, the segregation of the trapped feedstock may occur within the injection pipe, producing a feedstock that could be inappropriate for further injections. Conventional low-pressure injection molding machines require the use of more viscous feedstocks to prevent segregation. Therefore, realizing the full moldability potential of the LPIM process is still limited by the injection method proposed in the commercial LPIM machines. The aim of this paper is to present and validate an innovative injection concept used for the injection of low-viscosity feedstock without producing segregation within the injection machine during the process dead time.

3.2.2 Experimental procedures

3.2.2.1 Design of an innovative LPIM injection press system

A new injection system was designed to eliminate the interconnecting pipe, the injection valve or all other components placed in the interconnecting pipe. Figure 3.4a presents a general view of the new injection system in the mold alignment position while Figure 3.4b-g show partial section views of the injection system describing the method for injecting a feedstock. The feedstock container is removably placed onto the sliding platform, and is immobilized by the mixing system. The feedstock container is equipped with a heating system and an insulator surrounding the container in order to maintain an adequate temperature within the injection cylinder and maintain adequate rheological properties for the feedstock. A vacuum system (not shown in Figure 3.4) is connected to the feedstock container in order to remove air from the feedstock container during a mixing operation. The injection table has a sliding platform for moving the injection cylinder laterally. The sliding platform is movable on rails for displacing the injection cylinder and also for covering an outlet of the container as the injection device is being displaced from a container alignment position (Figure 3.4b) to a mold alignment position (Figure 3.4c).

During an injection sequence, the injection device withdraws the desired volume of feedstock from the container (Figure 3.4b). The injection cylinder is then aligned with the gate of the mold by displacing the sliding table to move the injection cylinder from a container alignment position to a mold alignment position (Figure 3.4c). The sliding platform is slid with respect to the feedstock container, which is maintained in position by the pressure exerted by the mixing system towards the sliding platform. As the sliding platform is moved, the outlet of the container is covered by a surface of the sliding platform. Since the container outlet can be closed off without the need for an injection valve, the segregation of feedstock inside the valve is avoided, maintenance of the closing mechanism is limited, cleaning is simplified, and contamination of the feedstock is minimized. Following the alignment of the injection cylinder with the mold inlet, the pressure of the mold holder is exerted on the mold to hold it in place, while the injection piston is displaced towards the mold inlet in order to inject feedstock into it (Figure 3.4d). Once the feedstock is solidified within the mold, the pressure of the mold holder is released, the mold is removed from the injection table (Figure 3.4e), and the resulting part is retrieved from the mold. After the injection, the injection cylinder is aligned with the container outlet by displacing the sliding table from the mold alignment position (Figure 3.4e) to the container alignment position (Figure 3.4f). The piston is then moved to the original container plugging position in order to return the residual feedstock (i.e., feedstock that was not injected during the previous injection) into the container (Figure 3.4g). Since the sliding platform allows the injection device to move from the feedstock container to the mold, and vice versa, an interconnecting pipe or an injection channel connecting the feedstock container to the gate of the mold is not required. Therefore, feedstock is not trapped between injections and never remains idle in any component of the machine for a long time period, thus resulting in the elimination of segregation. The only feedstock that remains idle is the feedstock located within the injection device when it is filled with a limited amount of feedstock, which is rapidly injected into the mold. After the mold injection, any remaining feedstock within the injection device is returned into the container for further mixing. Therefore, this new LPIM machine is well adapted for the injection of low-viscosity feedstock, directly resulting in a significant increase in moldability

potential without producing segregation within the injection machine during the process dead time.

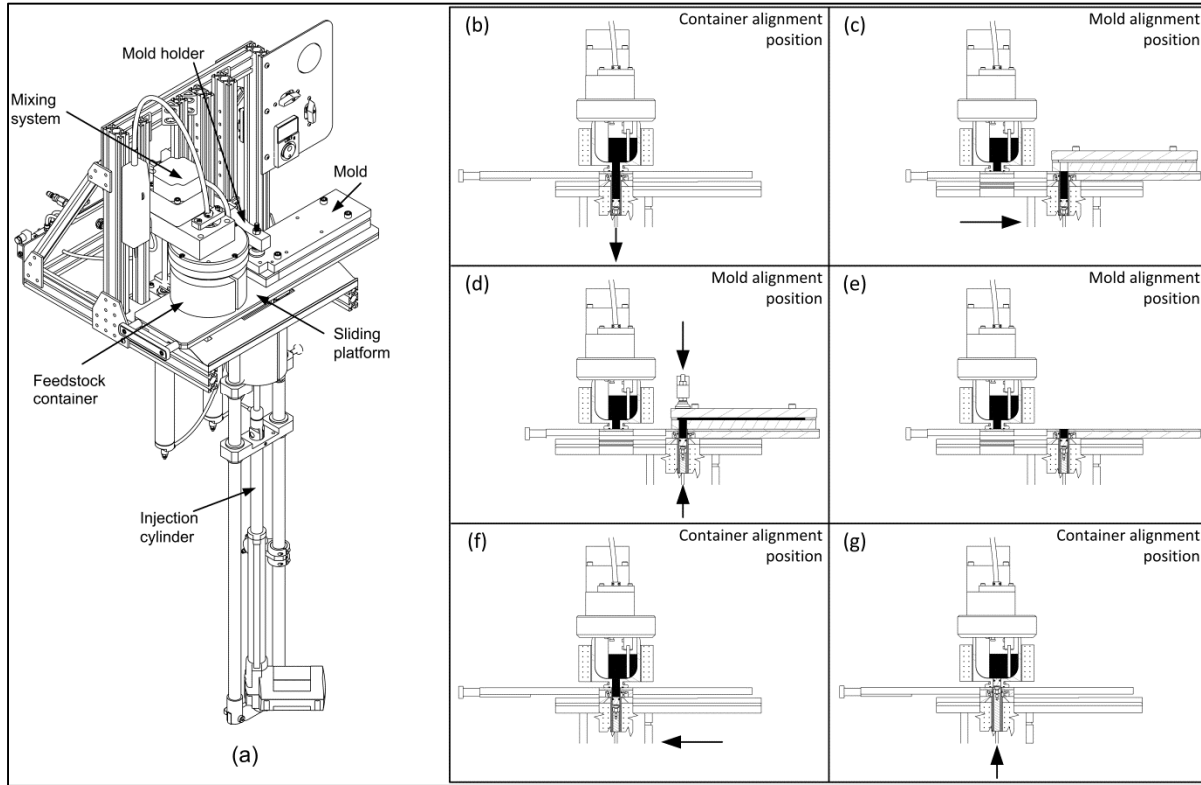


Figure 3.4 General view of the injection system in a mold alignment position, and (b-g) partial section views of the injection system describing the method for injecting a feedstock.

3.2.2.2 Materials

Gas-atomized stainless steel 316L powder (Epson Atmix Corporation, Japan) with a typical spherical shape and an average particle size of $6.7 \mu\text{m}$ was used (Figure 3.5). Due to their extensive use in LPIM, paraffin wax (PW) was selected as the major constituent, while stearic acid (SA) and ethylene vinyl acetate (EVA) were selected as surfactant and thickening agents, respectively (Tableau 3.1). These polymer constituents were mixed with the metallic powder to form homogeneous feedstocks according to the powder-binder formulations given in Tableau 3.2. The solid loading of all feedstocks (value determined at room temperature)

was kept constant at 60 vol. % of powder, with the identification of the feedstocks referenced by their volume fraction of polymer. For example, the feedstock 30PW-10SA is a mixture containing 60 vol. % of powder with 30 vol. % of paraffin wax and 10 vol. % of stearic acid. The mutual interactions between the binder constituents was not discussed in this study.

Tableau 3.1 Physical properties of the constituents used for feedstock formulation

Constituent	Melting point (°C)	Density (g/cm ³)	Source
Metallic powder (MP)	> 1370	8.00	Epson Atmix Co.
Paraffin wax (PW)	56.2	0.90	Sigma-Aldrich
Stearic acid (SA)	73.8	1.00	Sigma-Aldrich
Ethylene vinyl acetate (EVA)	54.6	0.94	Sigma-Aldrich

Tableau 3.2 Volume fractions of powder and polymers used for feedstock formulations

Feedstock identification	Vol. %				Melting point (°C)	Mixing and injection temperature (°C)
	Metallic powder (MP)	Paraffin wax (PW)	Stearic acid (SA)	Ethylene vinyl acetate (EVA)		
40PW	60	40	-	-	56.2	90
30PW-5SA-5EVA	60	30	5	5	54.2	90
30PW-10SA	60	30	10	-	57.2	90

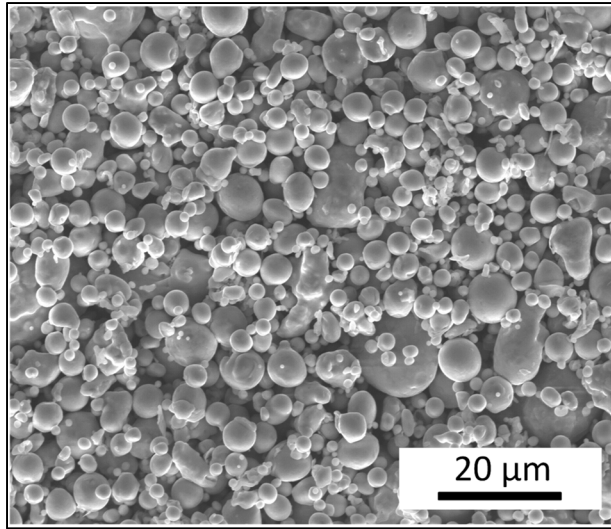


Figure 3.5 SEM micrograph of 316L powder

3.2.2.3 Specimens processing and measurements

Each feedstock was heated up to 90°C, and blended using the planetary mixer at 10 rpm for 45 minutes, while different vacuum times were used. Each feedstock was then injected into two different mold cavities to obtain rectangular dogbone shape and spiral shape specimens (Figure 3.6). Between two injections, the feedstock remaining in the injection cylinder was returned into the container to be re-blended. The injection was performed using a controlled constant stroke (5.8 mm/s), while the value of the pressure was recorded according to the piston position. The temperature of the molds was maintained at 35°C. The moldability of the feedstock was correlated with the injected length and the pressure profiles.

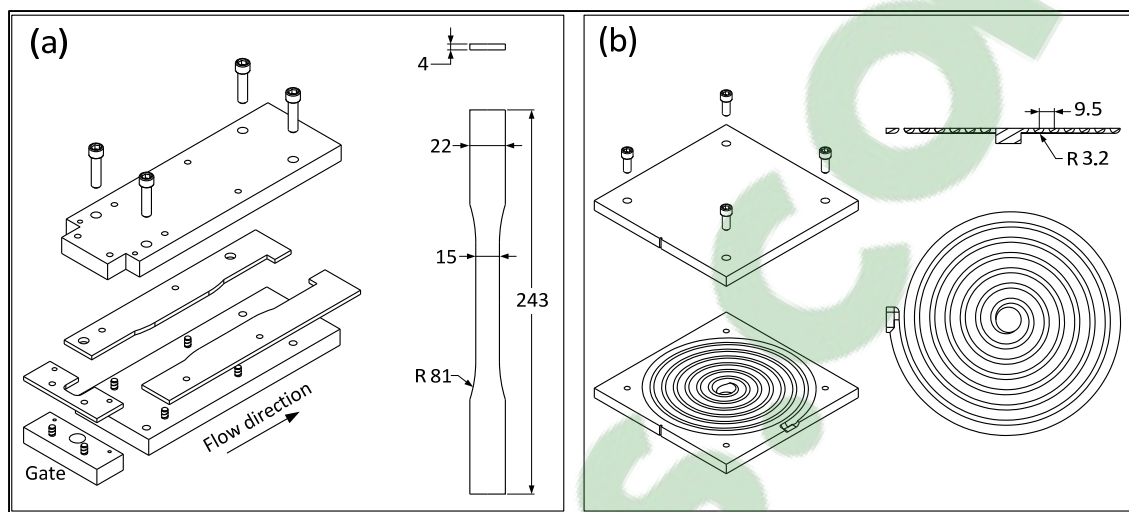


Figure 3.6 Mold design and injected specimen: (a) Rectangular dogbone shape, (b) spiral shape (dimensions in millimeters)

Viscosity measurements were used to determine the rheological behavior at different shear rates. The viscosity of the feedstocks was measured with an Anton Paar MCR 502 rotational rheometer using the concentric-cylinder C-PTD200 with a Peltier temperature-controlled measuring system. The molten feedstocks were filled into the barrel, pre-sheared at 50 s^{-1} to reach thermal equilibrium, and then tested at a constant temperature of 90°C at shear rates ranging from 0.5 to 2000 s^{-1} .

Radiographic measurements were used to detect the internal defects caused by the presence of air bubbles in the injected specimens. X-ray scans and CT scans (X-ray computed tomography) were performed with a Nikon XT H 225 industrial CT scanner using a voltage of 210 kV and a $400 \mu\text{A}$ electric current. X-ray scan images were obtained from the injected specimens in a static position (i.e., one X-ray exposure), while CT scan images were obtained from the injected specimens rotating at 360° (i.e., several X-ray exposures). 3D reconstructions of the CT scan images were performed with VGStudio Max 2.2 software. The total acquisition and post-processing time for the X-ray and CT scans was 2 and 120 minutes, respectively.

Thermogravimetric analysis (TGA) was used to measure the weight fraction of the remaining powder (wt. %) after binder burnout. TGA tests were performed using a Perkin Elmer Diamond TG/DTA. For this segregation study, the feedstock 30PW-10SA was used due to its high segregation potential, as identified by Fareh et al. (2016). The TGA specimens (~ 10 mg) were extracted from the injection cylinder before injection, and were placed in standard platinum pans and heated from 20 to 800°C (heating rate of 20°C/min) under high purity nitrogen purge gas (flow rate of 60 ml/min). Figure 3.7 presents typical TGA profiles obtained with a low-viscosity feedstock (30PW-10SA). For these profiles, weight loss starts around 150°C, and the binder is completely burned above temperatures of about 325°C. The remaining mass after binder burnout was divided by the total mass before binder burnout to obtain the weight fraction of powder, which was then converted in terms of volume fraction of powder, using equation (3.1).

$$SL = \left[1 + \left(\frac{\rho_{powder}}{\rho_{binder}} \right) \left(\frac{1}{wt.\% powder} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (3.1)$$

where SL is the solid loading (in vol. % of powder), $wt.\% powder$ is the weight fraction of powder, and ρ is the density of the powder or the binder available in Tableau 3.1.

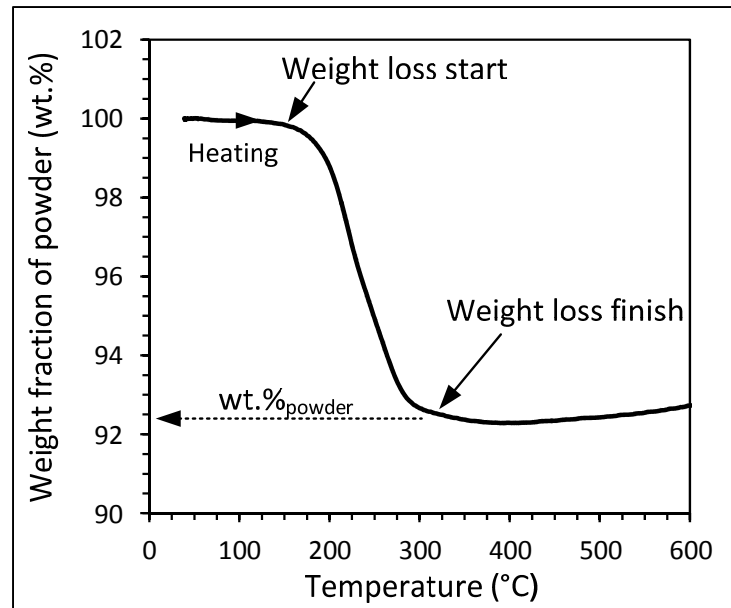


Figure 3.7 Typical TGA curves

3.2.3 Results

3.2.3.1 Minimum vacuum time

During feedstock preparation, it is not uncommon for air bubbles to form in the mixtures. Since the low-pressures used in the LPIM process are not sufficient to compress the bubbles inside the mold during injection, a vacuum system is generally required to deaerate the powder-binder mixtures before the injection stage. The feedstock 30PW-10SA was injected into the rectangular dogbone shape (Figure 3.6a), and then radiographed in order to estimate the minimum vacuum time required before the first injection.

Figure 3.8a shows X-ray scan radiographs for the specimens injected with feedstock subjected to different vacuum times. As expected, a low vacuum time ranging from 1 to 15 minutes is not sufficient to eliminate air bubbles (indicated by black arrows in Figure 3.8a). After a 30-minute vacuum time, the injected specimen is defect-free, and any extension of the vacuum time is useless. A specific zone of two injected bars was CT-scanned to improve the resolution of the radiograph, and thus, to increase the possibility of detecting smaller

defects that were not detected with a standard X-ray scan image. Figure 3.8b-c show these CT scan radiographs, representing a slice of about 20 μm of the specimen taken at half of the sample thickness. As seen in Figure 3.8b, the large air bubble defect of about 1 mm, previously detected with the X-ray scan, was clearly revealed in the CT scan image (black arrow). In addition, several defects smaller than 100 μm , probably small air bubbles, were also detected in this specific zone of the specimen injected with non-deaerated feedstock (marked by white arrows in Figure 3.8b). As seen in Figure 3.8c, no large or small air bubble appears within the specimen injected with deaerated feedstock (30 minutes). Therefore, the recommended minimum vacuum time after a container filling is confirmed at 30 minutes. The recommended time can help industrials to minimise the mixing time. This preliminary X-ray inspection has demonstrated that X-ray scanning is a fast method (2 min) suitable for detecting large defects within LPIM green parts, while CT scanning provides a higher detection resolution, but requires a much longer acquisition time (120 min). From a practical perspective, the X-ray scan could thus be used systematically to detect large injection defects, while the CT scan could be appropriate for detecting small injection defects during the development phases or during production sampling. The detection limit of very small air bubbles in LPIM parts and their impact on the material properties will be studied in future work.

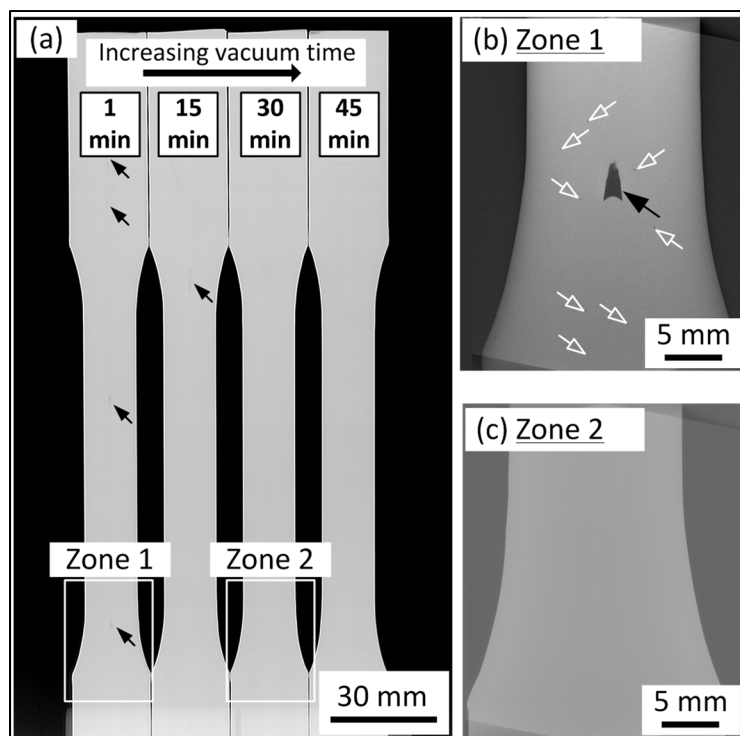


Figure 3.8 X-ray scan and CT scan radiographies:
 (a) X-ray scan images of the injected specimens for vacuum time period of 1, 15, 30, and 45 minutes;
 (b) CT scan images in a zone containing several air bubbles;
 (c) CT scan images in a zone containing no air bubbles

3.2.3.2 Minimum idle time for low-viscosity feedstocks

The time during which the feedstock remains idle represents the time between the cylinder filling and the injection of the feedstock into the mold. In other words, this corresponds to the time in which the segregation of the unmixed feedstock may occur within the injection cylinder just before its injection. From a practical perspective, the minimum idle time for feedstocks represents the minimum process dead time for a low-viscosity feedstock. As stated above, feedstock containing stearic acid (30PW-10SA) was used due to its high segregation potential. Following the injection cylinder filling, an experimental simulation of segregation was performed by maintaining the feedstock in the cylinder in molten state. Segregated specimens (i.e., with a few milligrams of molten feedstock) were extracted directly from the top region of the injection cylinder after 0, 1, 5, and 10 minutes spent in

molten state. The evolution of solid loading for these different simulated process dead times was measured by TGA and reported in Figure 3.9. Demers, Turenne et Scalzo (2015) demonstrated that the variation in solid loading can be measured with a sensitivity of at least ± 0.5 vol. % of powder using the TGA. As seen in Figure 3.9, the solid loading of the feedstock extracted from the top region of the injection cylinder tends to decrease according to the time spent in molten state. All values outside the range illustrated by dashed lines (i.e., 60.0 ± 0.50 vol. %) indicate a segregation of feedstock. A solid loading variation of up to 3.4 percentage points was detected in this powder-binder mixture. That means that the top area of the injection cylinder became richer in binder, while the bottom area became richer in powder (the latter region was not measured in the framework of this study) if feedstock remains trapped in the injection press over a long time period (10 minutes).

During the first minute spent in molten state, a slight segregation of about 1.2 percentage points was observed, while segregation was clearly measured after 5 and 10 minutes spent in the molten state. Therefore, TGA results demonstrate that the entire injection process must be performed in less than 1 minute in order to avoid segregation of very low-viscosity feedstock. Considering that the injection sequence performed by the injection system for the molding of the dogbone shape specimen presented in Figure 3.6 takes only a few seconds, segregation will be avoided. Because the feedstock is returned into the container after the injection with this injection press concept, no feedstock remains trapped during the process dead time. A study must be done to evaluate the maximum part volume that can be injected without segregation, considering that a larger volume with required more time to be injected. Also, a speed-controlled actuator may lower the entire process time.

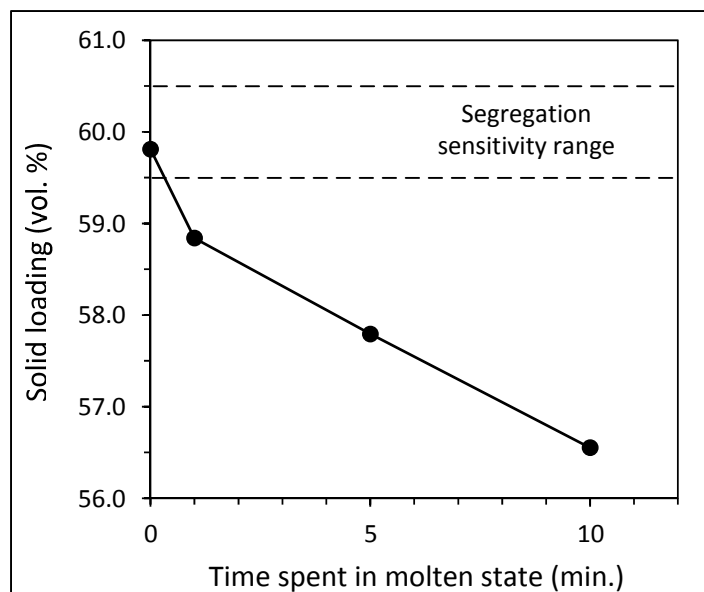


Figure 3.9 Evolution of solid loading according to time spent in molten state (feedstock 30PW-10SA)

3.2.3.3 Viscosity profiles of feedstocks

Figure 3.10 presents the viscosity profiles obtained with the wax-based feedstocks. The viscosity of feedstock containing only paraffin wax (40PW) decreases with the shear rate, corresponding to pseudoplastic behavior. This pseudoplastic behavior, generally required for LPIM feedstock, is explained by a particle or binder molecule orientation and ordering with flow. The de-agglomeration of the particles and the formation of preferential flow layers promote the decrease in viscosity observed with an increase in the shear rate. Stearic acid and ethylene vinyl acetate were blended with paraffin wax to evaluate the influence of the surfactants and thickening agents on viscosity profiles. Figure 3.10 also shows that a mixture of paraffin wax, a surfactant agent and a thickening agent (30PW-5SA-5EVA) is characterized by a pseudoplastic behavior up to a Newtonian-like plateau visible from a shear rate of 100 s^{-1} , while exhibiting a relatively high viscosity value over the rest of the high shear rate range. Figure 3.10 shows that adding 10 vol. % of stearic acid in paraffin wax (30PW-10SA) generated a significant decrease in the viscosity values as well as a change in the shape of the viscosity profile, compared to the feedstocks formulated only from paraffin wax (40PW). The viscosity profile of feedstock 30PW-10SA is characterized by a viscosity

plateau at low shear rates, followed by a pseudoplastic behavior, and finally, a dilatant behavior, at high shear rates ($> 900 \text{ s}^{-1}$). As observed by Hausnerova et al. (2011), the change from pseudoplastic to dilatant behavior for feedstocks containing stearic acid can be explained by the disruption or the elimination of the preferential layers formed during the pseudoplastic regime due to turbulence induced in these low-viscosity mixtures.

It was reported by Hidalgo et al. (2013) that a viscosity value lower than $10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (typically measured at a shear rate of 100 s^{-1}) was suitable for complete mold filling using the LPIM powder-binder mixture. The viscosity of feedstocks 30PW-10SA and 30PW-5SA-5EVA is lower than this threshold value almost over the entire shear rate range, while the feedstock 40PW exhibits a viscosity lower than $10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ for a shear rate higher than 10 s^{-1} . The minimum viscosities were achieved at high shear rates for the three feedstocks, and a viscosity value as low as $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ was obtained for the feedstock 30PW-10SA. This low-viscosity feedstock has the potential to increase the moldability, leading to the fabrication of components with higher shape factors.

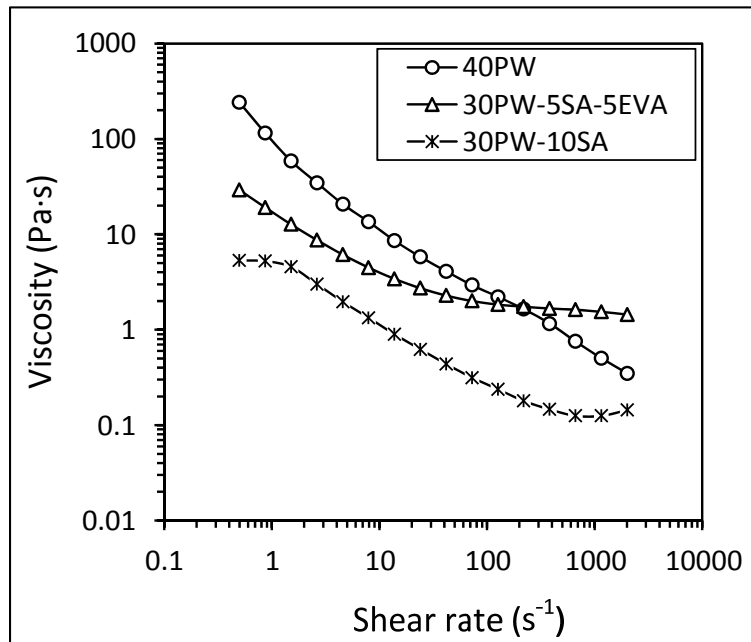


Figure 3.10 Viscosity profiles of feedstocks at 90°C

3.2.3.4 Injection pressure and injected length

Figure 3.11 presents the evolution of injection pressure measured in the axis of the piston representing the pressure at the entrance of the gate of the mold during injection of rectangular dogbone and spiral shapes. The injection pressure profiles clearly show that the pressure level during an injection is influenced by the feedstock formulation and the shape of the mold cavity. During the injection of the rectangular specimens (Figure 3.11a), the injection sequence includes gate filling over a piston position of 22 mm, mold filling at a relatively constant pressure (from 22 to 130 or 145 mm), and a sudden increase in pressure consistent with the completion of the mold filling. This maximum pressure, occurring at the same piston position of 150 mm, corresponds to complete mold filling or indicates that the mixture has reached the opposite wall of the mold. During the injection of the spiral specimens (Figure 3.11b), the injection sequence includes gate filling over a piston position of 12 mm, mold filling with a pressure increasing proportionally with the piston stroke (from 12 to 24, 30 or 56 mm) up to a maximum pressure value. The maximum pressure values occur at different piston strokes corresponding to the impediment of the flow of the feedstock due to its friction with the mold or its solidification. In this respect, the piston position can thus be used to evaluate the molding potential of different feedstocks. After completion of mold filling or impediment of the flow, a decrease in injection pressure, seen for the two mold shapes, is attributable to a feedstock leakage occurring between the injection table and the mold.

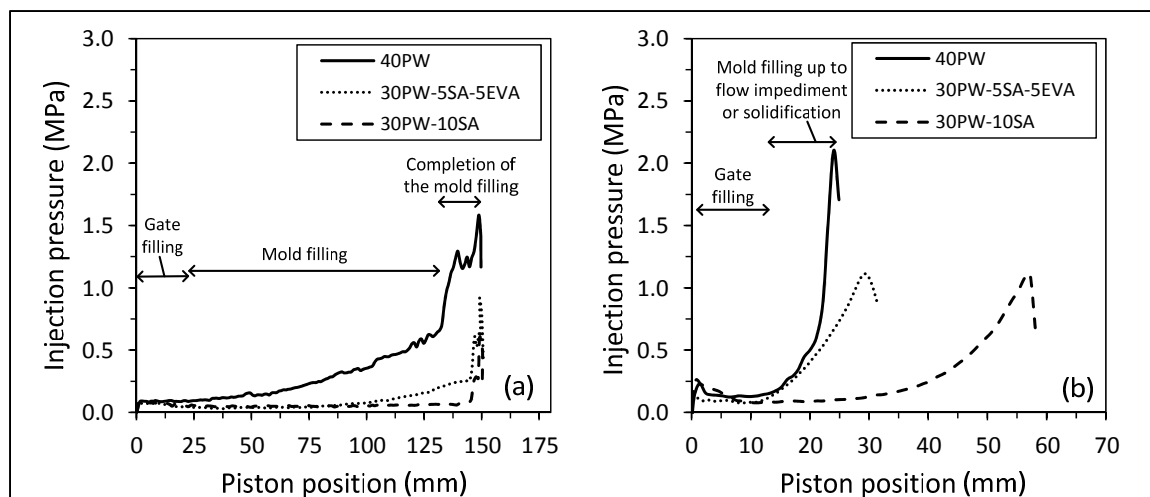


Figure 3.11 Evolution of the pressure during the stroke-controlled injection of (a) rectangular specimens, and (b) spiral specimens

A visual examination of the injected rectangular specimens (Figure 3.12a) shows incomplete mold filling for feedstock 40PW and complete mold filling for the two other feedstocks. This mold geometry is thus not well-adapted to quantify the relative molding potential of feedstocks. Therefore, the feedstocks were injected into a spiral mold to measure the injected length. A visual examination of the injected spiral specimens (Figure 3.12b) clearly shows that the injected length is smaller for feedstock containing only paraffin wax (85 mm for feedstock 40PW), compared to those containing paraffin wax, stearic acid, and EVA (295 mm for feedstock 30PW-5SA-5EVA) or paraffin wax and stearic acid (625 mm for feedstock 30PW-10SA). As predicted by the pressure profiles obtained above (seen by the piston position in Figure 3.11b), the injection length in a spiral mold is influenced by the feedstock formulation.

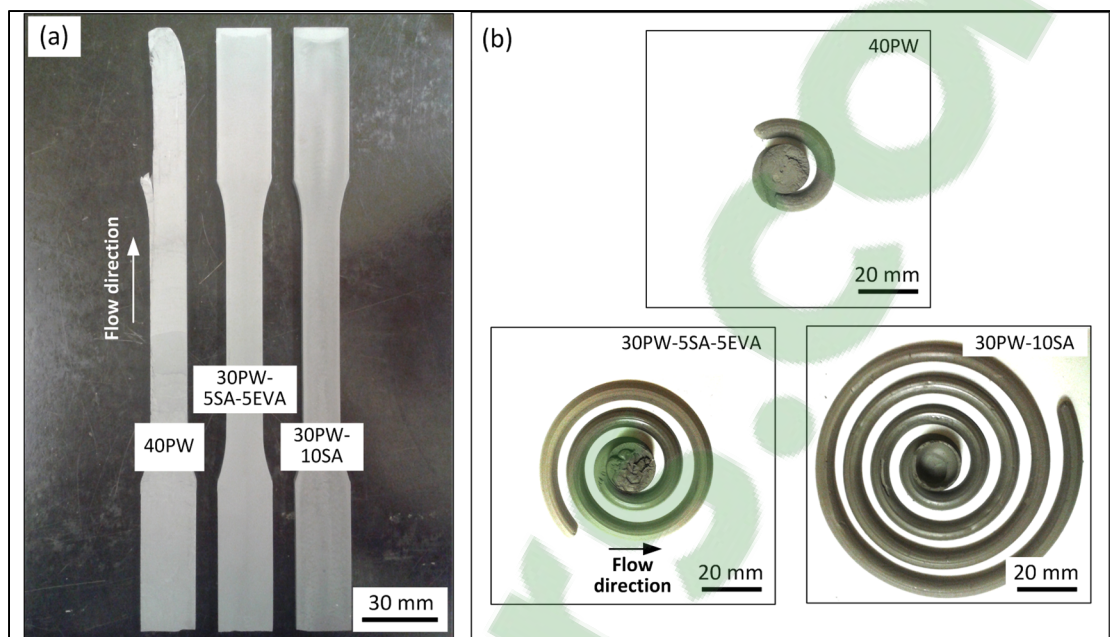


Figure 3.12 Injected length of (a) rectangular specimens, and (b) spiral specimens

3.2.4 Discussion

During injection, an ideal feedstock should be easy to mold, while avoiding the separation of powder and binder constituents. As described above, moldability and segregation are linked to the rheological behavior of the feedstock. In general, an increase in feedstock moldability occurs with a decrease in viscosity, and segregation is minimized with an increase in the viscosity of the mixture. Realizing the full moldability potential of the LPIM process is thus limited by the segregation that may occur in the commercial LPIM injection machine. So far, injection concepts proposed in literature have required injection valves and an interconnecting pipe in which trapped feedstock may segregate during the process dead time. For this reason, the feedstocks currently used in LPIM require thickening agents to limit segregation within the injection press. The injection concept developed in this study eliminates the segregation possibilities within the machine without the use of thickening agents. Therefore, this equipment is suitable for the injection of very low-viscosity feedstocks, leading to an increase in the moldability of the feedstock, and consequently an increase in the capacity to produce more complex-shaped components.

Figure 3.13 summarizes the impact of binder constituents on the length injected into the spiral mold, the piston position during the injection of the spiral shape, the injection pressure measured during the injection of the spiral shape, and the viscosity of feedstocks obtained at different shear rates. In this study, the moldability of feedstocks is quantified by the combination of the injected length and the injection pressure. As expected during the mold filling of the spiral shape, the values of the piston position are correlated with those of the injected length. However, a slight discrepancy between these two parameters for feedstock 40PW was probably caused by an empty space in the injection cylinder producing an increase in the apparent stroke of the injection piston. This result thus confirms that the values of the injected length are more suitable for quantifying the moldability of feedstocks. The evolution of the maximum pressure is reciprocally related to the injected length. In this respect, feedstock 30PW-10SA exhibits the higher injected length which is obtained with the lower injection pressure, and thus the best moldability properties. Since the maximum pressure values were limited by the mold detachment from the table due to a feedstock leakage, this relation between the pressure and the injected length will be confirmed in future work.

On the other hand, the relation between the injected length and viscosity is more intricate. The injected length values are correlated with the viscosity measured at low and moderate shear rates for a fixed feedstock temperature of 90°C. However, this correlation becomes weak for the viscosity obtained at high shear rates. Although that this viscosity is often used in the literature to predict the moldability potential of feedstock, this result suggests that the LPIM feedstocks were more subjected to a shear rate range of 10 to 100 s⁻¹. The viscosity values obtained over this specific shear rate range are in the same order as those for 1.5 to 9 Pa·s proposed by Hidalgo et al. (2013) and Loebbecke, Knitter et Haußelt (2009) for conventional LPIM process using air pressure. Therefore, the injection press concept developed in this study is suitable for the optimization of very low-viscosity (e.g., < 1 Pa·s) feedstocks, leading to fabrication of components with higher shape complexity. Finally, this injection system is well adapted for the validation of simulation models adapted to the LPIM

process similarly to the methodology proposed by Bilovol et al. (2006) for the conventional HPIM process.

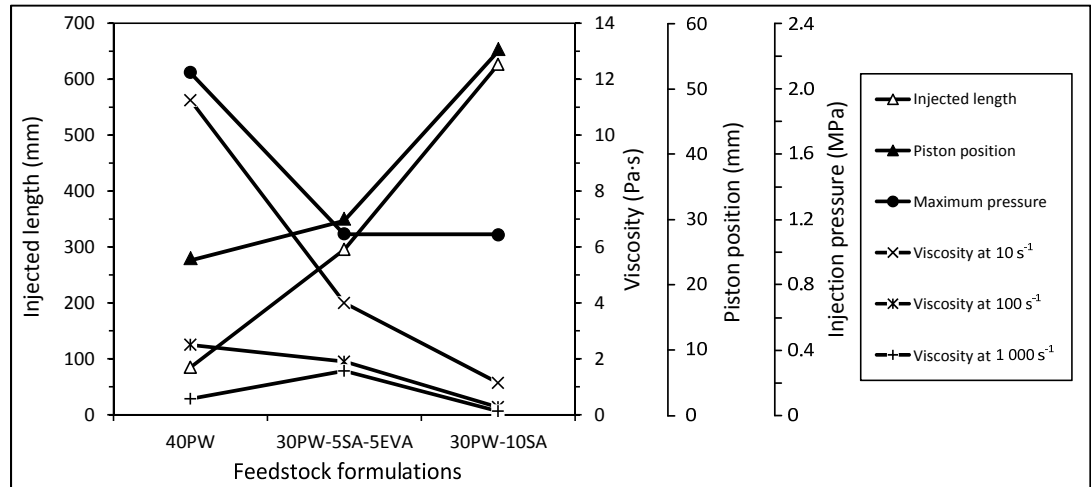


Figure 3.13 Comparison of the injected length, piston position, injection pressure, and viscosity

3.2.5 Conclusions

An injection concept was developed for injecting low-viscosity feedstocks. The following conclusion can be drawn.

- A sliding platform system has been introduced in a LPIM injection press to eliminate the interconnecting pipe and the injection valve to prevent segregation of low-viscosity feedstocks.
- A feedstock exhibiting a viscosity as low as 0.1 Pa·s was molded without producing segregation within the injection machine.
- Radiographic analysis confirmed that a minimum vacuum time of about 30 minutes was required to produce a bubble-free feedstock.
- The best moldability properties were obtained with the feedstock containing paraffin wax and stearic acid.

Acknowledgements:

This work was carried out with the financial support of the Natural Science and Engineering Research Council (NSERC) of Canada and the financial support of École de technologie supérieure internal funds (PSIRE-R fund and Lab equipment fund). The authors wish to thank Mr. F. Fareh and Mr. A. Trad for their collaboration in TGA testing.

CONCLUSION

L'étude de l'aptitude au moulage des mélanges de très faible viscosité (0.1 Pa.s) lors de l'injection est difficile à réaliser avec les machines commerciales, en raison du fort potentiel de ségrégation dans les conduits d'injection lors des temps morts du procédé. Pour éviter ce problème, une machine innovante a été développée et validée dans le cadre de ce projet. Au départ, un piston d'injection puise un volume désiré de mélange d'un réservoir. Ensuite, un mouvement latéral cisaille le mélange à l'intersection entre le réservoir et le cylindre et bouche l'orifice de sortie du réservoir. Le cylindre est alors dégagé et peut recevoir le moule. Suivant l'injection, le piston retourne à la position du réservoir et entre dans l'orifice de sortie du réservoir. Le mélange résiduel est retourné dans le réservoir, mélangé et désaéré à nouveau. Des essais de validation ont montré que la machine permet d'effectuer des injections avec des mélanges à faible viscosité sans produire de ségrégation dans l'appareil pendant les temps morts du procédé. Des essais d'injection ont montré que le mélange 30PW-10SA a parcouru la plus grande distance dans un moule de forme spirale, suivi du mélange 30PW-5SA-5EVA et du mélange 40PW. Des essais de rhéologie ont corrélé ces résultats pour une viscosité associée à un faible taux de cisaillement. Un essai de ségrégation a montré qu'un temps d'attente de moins d'une minute devait être respecté avant de mesurer une ségrégation significative sur un mélange à très faible viscosité. De plus, le fonctionnement du système de vacuum a été validé par des analyses radiographiques. Un temps de mélange sous vacuum de 30 minutes est suffisant pour éliminer complètement la présence de bulles d'air dans la pièce injectée. Ces résultats montrent que cette machine rend possible l'injection de mélanges peu visqueux augmentant l'aptitude au moulage de pièces de forme complexe.

Quelques améliorations pourraient être effectuées sur la machine afin d'évaluer l'effet des divers paramètres lors de l'injection. En ce moment, l'injection se fait à vitesse constante, limitée par l'actuateur électrique actuellement utilisé. Celui-ci pourrait être remplacé par un actuateur plus performant, pour évaluer l'effet de la vitesse d'injection ou pour injecter à pression constante, c'est-à-dire faire varier la vitesse d'injection pour maintenir la pression.

ANNEXE I

CAHIER DES CHARGES

INTRODUCTION

Le moulage par injection est une technique très employée pour mettre en forme des pièces en plastique. Ce procédé a l'avantage de mettre en forme des pièces complexes à faible coût, pour de grandes productions. Le procédé de moulage par injection des poudres bénéficie donc des mêmes avantages. La grande viscosité des mélanges de poudre et de liant oblige l'utilisation de la haute pression d'injection. Toutefois, certains mélanges à basse viscosité peuvent être injectés à basse pression.

L'injection à basse pression de poudre métallique a l'avantage par rapport à la haute pression au niveau des coûts plus bas de la machine et de l'outillage. Cependant, le moulage est plus difficile à réaliser, puisque moins de force est appliquée pour remplir le moule.

Ce cahier des charges décrit en détail les éléments nécessaires à la conception d'une machine à injection basse pression de poudre métallique. La machine doit être adaptée particulièrement aux besoins de la recherche pour valider des hypothèses et pour valider des modèles d'injection qui tiennent en compte tous les paramètres d'injection.

Le cahier comprend la description d'une machine à injection basse pression de poudre métallique, l'objectif corporatif, la définition du marché des machines d'injection et de production de pièces et les clients. Ces éléments permettent ensuite l'analyse fonctionnelle du besoin, qui découpe en détail les fonctions que doit remplir la machine.

1 DESCRIPTION DU PRODUIT

1.1 Objectifs

L'objectif est de concevoir, fabriquer et valider une presse à injection basse pression de poudre métallique (LPIM). Cet équipement servira de banc d'essai en laboratoire. Il sera utilisé par des étudiants chercheurs dans le but de valider des hypothèses et de valider des modèles d'injection LPIM qui tiennent en compte tous les paramètres d'injection. L'équipement doit être adaptable aux fins de recherches. Il doit être équipé de tous les capteurs nécessaires à l'étude du procédé. Par exemple, il doit être muni de capteurs de température et de pression. Le délai pour l'ensemble du projet est de 20 mois. Le budget alloué à la fabrication de l'équipement n'est pas établi.

La machine doit être une amélioration des quelques machines existantes, présentées à la section 3.1. Les améliorations à apporter sont :

- adapter la machine aux besoins de la recherche, tels que des capteurs multiples et un volume de mélange faible;
- minimiser les zones où le mélange n'est pas en mouvement, notamment les conduits d'alimentation, afin d'éviter la ségrégation;
- avoir un contrôle de la pression d'injection progressif;
- être nettoyable facilement et rapidement;
- être moins dispendieuse que les machines offertes sur le marché;
- atteindre une pression d'injection minimale de 0,7 MPa.

1.2 Livrables

Le livrable principal est une machine à injection basse pression de poudre métallique. Il doit être démontré que la machine est fonctionnelle. Il y a trois éléments à valider, soit la réponse des contrôles, la justesse de capteurs et les résultats de l'injection.

1.2.1 Validation des contrôles

Cette validation doit assurer que chaque contrôle de la machine est fonctionnel. Par exemple, vérifier si les arrêts d'urgence sont fonctionnels peu importe la séquence.

1.2.2 Validation des capteurs

Cette validation doit vérifier que les capteurs sont bien étalonnés et sinon ajustés en conséquence. Par exemple, vérifier que les capteurs de température indiquent la température ambiante lorsque la machine est inactive.

1.2.3 Validation de l'injection

Pour la validation de l'injection, la norme ASTM B883-10 (ASTM, 2010) propose des méthodes d'évaluation des pièces moulées :

- Production d'échantillons pour des essais de traction à température ambiante selon la norme ASTM E8 (ASTM, 2013b). Les données qui peuvent être déduites de ces essais sont :
 - Limite d'élasticité, la résistance à la traction, l'allongement et la striction.

La littérature propose d'autres méthodes de validation :

- Selon Mangels (1994), les pièces produites peuvent être évaluées par des inspections non destructives. Chaque état est inspecté (l'état vert, l'état brun et l'état fritté) par des :
 - Mesures de la masse et de la densité (par exemple, principe d'Archimède) selon la norme ASTM B311-13 (ASTM, 2013a). Si la masse de l'échantillon augmente dans l'eau, la norme ASTM B962-14 devient applicable (ASTM, 2014);
 - Inspections au microscope pour déceler la présence de fissures de surface. Inspection aux rayons X pour déceler des vides internes (nombre de défauts par pièce);
 - Mesures dimensionnelles.
- Ikegami et Purquerio (2001) mesurent la dureté de leurs échantillons;
- Medvedovski et Peltzman (2012) évaluent l'effet de la pression d'injection, de la vitesse d'injection, de la température du mélange et du gradient de température (entre la température du moule et la température du mélange) sur la densité de la pièce moulée.

2.2.3 Coûts des essais

Des coûts sont à prévoir pour la validation et les essais. De la poudre et du liant devront être achetés. Les détails sur les matériaux à utiliser seront déterminés en temps et lieu.

2.3 Degré d'innovation

Cette machine n'est pas conçue comme une machine industrielle. Il s'agit d'un prototype et d'un article de démonstration de concept qui sera amélioré en cours d'utilisation. La machine répond à un besoin universitaire tout en apportant des variantes aux machines existantes (voir section 1.1).

2.4 Confidentialité

L'équipement livré n'est soumis à aucune politique de confidentialité ni aucune entente contractuelle. Le développement est fait dans le cadre d'un projet de recherche étudiant qui est libre d'être divulgué en accord avec les droits d'auteurs. Il n'est pas prévu à ce stade de déposer un brevet concernant cette machine. L'équipement ne fait pas partie de la liste du Programme des Marchandises Contrôlées du Canada.

3 DÉFINITION DU MARCHÉ

3.1 Primaire

Le marché des machines à injection pour le procédé des poudres est principalement représenté par la technologie d'injection à haute pression. Ce type de machine est issu des machines d'injection de plastique.

Les machines fonctionnant à basse pression sont moins présentes sur le marché. C'est le créneau visé par ce projet. Le principal fabricant de machines LPIM est Peltsman. La différence majeure entre les machines HPIM et LPIM est la méthode de transport de le mélange vers le moule. Les machines HPIM utilisent une vise piston, tandis que les machines LPIM utilisent simplement la pression d'air.

3.2 Secondaire

Le marché secondaire est celui des compagnies de production. Le marché des pièces produites selon le procédé de moulage par injection de poudre (PIM) est assez étendu. La technologie se prête bien à toutes les industries qui produisent des pièces complexes à moyen et haut volume.

D'abord, le marché des technologies de l'information connaît un essor important avec la multitude d'appareils électroniques offerts sur le marché. Les nombreuses composantes des circuits électroniques comme les dissipateurs de chaleur peuvent être produites selon le procédé PIM. Les matériaux piézoélectriques peuvent être mis en forme à partir de poudre (Lee, Seong Jin et German, 2011).

L'industrie automobile quant à elle est un gros client du PIM en Amérique du Nord. Des pièces mécaniques pour le moteur ou la direction peuvent être produites à partir de poudre. Par exemple, une turbine de turbocompresseur, qui doit résister à de hautes températures, peut être mise en forme à partir de poudre d'Inconel.

La mise en forme des outils de coupe a aussi recours au procédé PIM. Puisque ces outils servent à usiner d'autres matériaux, ils doivent avoir une dureté et une résistance à l'usure importante. Il devient alors difficile de mettre en forme ces outils de coupe. L'utilisation du procédé PIM est donc un candidat idéal pour mettre en forme ces outils, qui ont souvent une forme complexe.

Les industries médicale, de consommation courante et aéronautique sont aussi des clients de ce procédé.

4 CLIENTS

4.1 Internes

Les clients internes sont les étudiants et les chercheurs de l'École de technologie supérieure (ÉTS) qui utiliseront cet équipement afin de valider leurs théories en lien avec le procédé LPIM. L'ÉTS est l'investisseur dans ce projet.

4.2 Externes

Les clients externes sont d'abord représentés par l'industrie en général. L'équipement offrira aux compagnies une méthode de fabrication alternative pour la production de pièces complexes de moyenne à haute production à des coûts avantageux. Les coûts avantageux sont dus à la simplicité du fonctionnement de la machine et à la taille relativement faible du moule d'injection, comparativement au procédé d'injection à haute pression (HPIM). Les clubs étudiants de l'ÉTS sont des clients potentiels au même titre que l'industrie.

5 PROCESSUS D'ANALYSE DU BESOIN

Ce processus suit la méthode suggérée par Bernard Bouissières (2008) énoncée dans son livre « Expression du besoin et cahier des charges fonctionnel ».

5.1 Définition du besoin

5.1.1 Système englobant

Une machine LP-MIM est utilisée dans un contexte de production de pièces dont la forme est très complexe (Goncalves, 2001). La production se divise en 4 étapes montrées à la Figure-A I-1, soit la préparation du mélange, l'injection, le déliantage et le frittage. La machine LPIM est une constituante dans le processus de mise en forme. Elle est responsable des deux premières étapes.

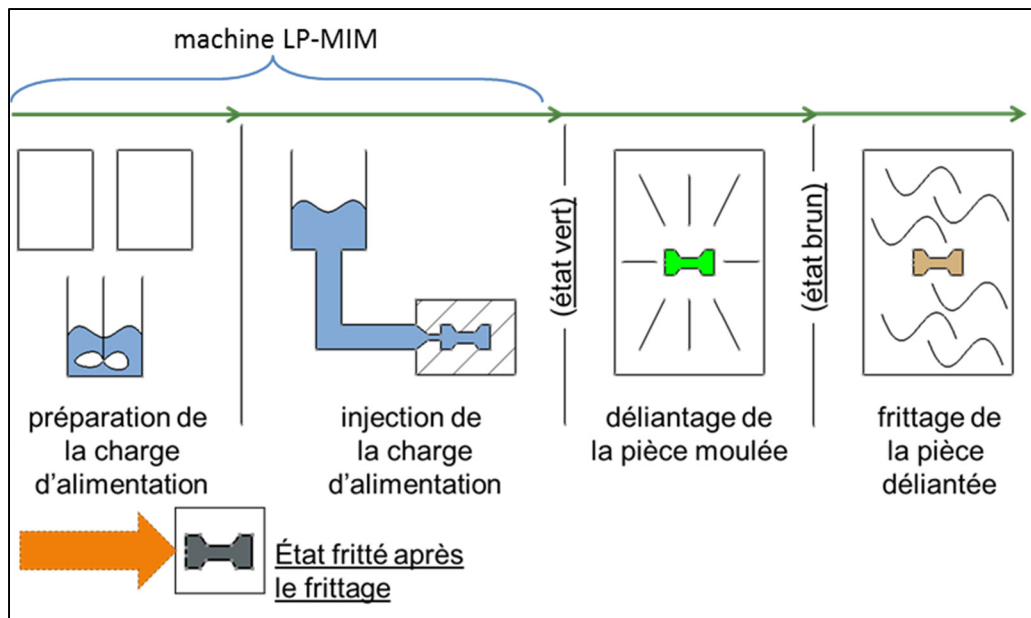


Figure-A I-1 Étapes du procédé MIM

5.1.2 Besoin essentiel

Le besoin essentiel de l'utilisateur est de mettre en forme des pièces à partir de poudre métallique dans l'intention d'obtenir des données permettant d'étudier le procédé. Il en découle deux besoins, soit :

- le mélange des constituants;
- l'injection du mélange dans la cavité d'un moule.

5.1.3 Concept associé

Le demandeur impose la réponse au besoin essentiel énoncé ci-haut. La mise en forme doit se faire par l'injection d'un mélange de poudre métallique et de liant dans un moule en utilisant de la basse pression (LPIM). La basse pression est définie par Goncalves (2001) entre 0 et 0,7 MPa.

Le principal avantage du procédé PIM est qu'il combine la facilité de mise en forme de pièces complexes du procédé d'injection de plastique à la haute résistance thermique et mécanique des métaux. Les coûts de mise en forme sont donc relativement faibles dans le cas de production à moyen et haut volume. De plus, il est possible de réutiliser les résidus dans

les canaux d'injection, ce qui est notamment avantageux pour les matériaux dispendieux (Vervoort, Vetter et Duszczek, 1996). Pour un même matériau, les propriétés mécaniques sont supérieures aux procédés de moulage de fonderie, mais inférieures à une pièce corroyée (Heaney, 2012).

L'injection à basse pression est avantageuse puisque les moules sont moins massifs, le déplacement du mélange fondu est laminaire et les fissures de surfaces sont moindres en raison de la faible contrainte appliquée (Mangels, 1994).

5.1.4 Analyse et validation du besoin

Les questions posées ci-après sont tirées du livre de Bernard Bouissières (2008).

Qui précisément est le porteur de ce besoin et que recherche-t-il?

Le porteur du besoin est représenté par les clients internes et externes, présentés au chapitre 4.

Dans quelles circonstances ressent-il ce besoin?

Les clients internes utiliseront cet équipement afin de valider leurs théories en lien avec le procédé LPIM. Pour les clients externes, l'équipement leur offrira une méthode de fabrication alternative pour la production de pièces complexes de moyenne à haute production à des coûts avantageux. Ces coûts sont dus à la simplicité du fonctionnement de la machine et à la taille relativement faible du moule d'injection, comparativement au procédé d'injection à haute pression (HPIM).

Quelles sont les raisons de ce besoin, dans quel but est-il à satisfaire?

La raison de ce besoin est de mettre en forme des pièces moulées sans défauts. Les défauts sont :

- Mauvaises dimensions dues à un rétrécissement après frittage non constant d'une pièce à l'autre. Ce rétrécissement non uniforme est le résultat d'un mélange ayant

subi de la ségrégation ou ayant des différences dans la distribution de la taille des particules d'un lot de poudre à l'autre (D10, D50 et D90);

- Gauchissements dus au refroidissement non uniforme de la pièce dans le moule (Ahn et al., 2008);
- Remplissages incomplets dus à un contrôle de la température non adéquat (températures du mélange, du conduit d'alimentation et/ou du moule) ou l'emprisonnement de poches d'air dans une partie du moule;
- Imperfections de surface dues au phénomène de détente rapide dans le moule (Dvorak, Barriere et Gelin, 2005);
- Vides internes dus à la présence de bulles d'air dans le mélange ou à l'accumulation de liant à certains endroits.

Aussi, ce besoin s'exprime par le désir d'optimiser les paramètres tout en évitant les défauts énoncés ci-haut. Par exemple :

- minimiser la quantité de liant;
- minimiser le temps de préparation du mélange;
- minimiser le temps de cycle;
- minimiser les pertes.

Quelles sont les causes de ce besoin?

Le moulage par injection basse pression n'est pas un procédé parfait. La variation des paramètres du procédé, comme la proportion de liant dans le mélange ou la pression d'injection ont des effets sur la réussite ou non de la mise en forme.

Quelle est la nécessité de ce besoin, son importance, la valeur attachée par le ou les porteurs à sa satisfaction?

Pour économiser du temps de montage par essai-erreur, les clients internes veulent pouvoir prévoir l'effet de la variation des paramètres du procédé par des modèles. La machine va servir à valider ces modèles.

Quelle est la solvabilité des porteurs de ce besoin?

Cette demande des clients internes est solvable puisqu'elle se base sur des comparables. Par exemple, Gelin, Barriere et Dutilly (1999) ont produit un modèle par éléments finis qu'ils ont ensuite comparés à des essais sur une machine HPIM. Ahn et al. (2008) ont développé un modèle d'injection et de refroidissement qu'ils ont aussi comparés à des essais sur une machine HPIM

Un principe de fonctionnement, une voie technique ont-ils été choisis a priori?

Un principe de fonctionnement est imposé par les clients internes, tel que présenté à la section 5.1.4.

Quelles sont les possibilités de disparition ou d'évolution du besoin à satisfaire?

L'industrie est toujours en quête des moyens de fabrications les plus rentables. La mise en forme de matériaux de plus en plus exotique va augmenter afin de satisfaire les besoins précis de l'industrie. Puisque ces matériaux sont dispendieux, il faut éviter les pertes.

La conception de machine LPIM commence avec Peltsman (1986). Ensuite, Sack et Lietzmann (1990) proposent une étude sur l'essai du moulage par injection basse pression de poudre métallique. Mangels (1994) présente quant à lui une étude sur l'effet des différents paramètres pour le moulage de poudre de céramique avec une machine Peltsman. Goncalves (2001) présente la conception d'une machine à injection basse pression fonctionnant selon le même principe que Peltsman. Ikegami et Purquerio (2001) utilisent la machine de Gonçalves pour produire des pièces d'essai de traction. Rei et al. (2002), Medvedovski et Peltsman (2012), Gerl et al. (2009) et Liu (1999) utilisent tous la machine Peltsman pour le moulage lors de leurs essais. Donc, la littérature présente deux machines LPIM, soit la machine Peltsman et la machine de Gonçalves, qui n'est pas commercialisée.

La concurrence au niveau des machines LPIM est faible, le seul joueur étant la compagnie Peltsman. Le descriptif de ces machines est présenté à la section 3.1.

Une technique de remplacement au procédé LPIM est la fabrication additive. Ce procédé est encore jeune et il est plus adapté à la production de petites et moyennes séries (Atzeni et Salmi, 2012).

Diagnostic :

Le besoin est validé. Cependant, il faut s'assurer qu'elle possède tous les instruments de mesure adéquats pour l'étude du procédé.

5.1.5 Caractérisation du besoin

L'équipement (une machine) doit être livré au client pour août 2016. Cela comprend :

- la conception détaillée :
 - dessins d'assemblage et de détail;
 - analyse de contraintes;
 - analyse de risques;
 - guide d'utilisation;
 - programme d'acquisition des données.
- la fabrication;
- l'installation;
- la validation et la production d'un article scientifique.

La machine doit comprendre une section mélangeur, une section injection et une section moule. La préparation du mélange doit se faire pour de petites quantités, soit maximum 1 kg pour diminuer le coût des essais. Le mélange doit se faire sous vide à température maximale de 130 °C. Il doit y avoir un contrôle de la température à maximum ± 2 °C, du mélangeur jusqu'au moule. La pression d'injection doit être de maximum 1,0 MPa. Si la pression d'air est utilisée, une pression maximale de 0,7 MPa est acceptable. L'application de la pression doit se faire de manière progressive. La machine doit mettre en forme des échantillons de traction plats et cylindriques. Les dimensions de la base de moule doivent être de 6 po par 12 po. Les moules pourront cependant être plus petits, en fonction de la pièce à mouler. La machine doit faire l'acquisition de la température du mélange dans le mélangeur, du bol, du

conduit d'alimentation et du moule. La pression dans le mélangeur et la pression dans le moule doivent être mesurées. Les paramètres du mélangeur, tels que les vitesses de rotation, doivent être contrôlables. Le nettoyage de la machine doit être facile et rapide. Aucun résidu ne doit demeurer en place. Le nettoyage se fait généralement en démontant la machine et en raclant les surfaces. La machine sera utilisée dans un environnement de laboratoire. Elle doit donc côtoyer respectueusement les autres machines et les individus qui les utilisent. De plus, elle doit passer dans une porte de dimension standard.

5.2 Cycle de vie du produit

Le cycle de vie est composé de trois étapes.

5.2.1 Phase avant exploitation

Cette phase consiste d'abord par l'installation de la machine sur place.

5.2.2 Phase exploitation

La première phase d'exploitation est la validation de la machine. Elle se fera telle qu'énoncée à la section 1.2. Ensuite, la phase d'utilisation de la machine se fera avec différents moules, selon les besoins de l'utilisateur. Cette phase se caractérise par le fonctionnement, mais aussi par de longues périodes d'inactivités. La phase de maintenance est en fait liée à la phase d'utilisation. La machine sera nettoyée pour éliminer les résidus après l'utilisation. Au niveau du fonctionnement mécanique, la maintenance doit être minimum. Une phase d'amélioration est à prévoir, puisque la machine sera adaptée aux besoins du moment. Dans ce cas, une nouvelle phase de validation est nécessaire. Pour les situations exceptionnelles, la machine doit être munie des éléments d'arrêts selon les normes en vigueur.

5.2.3 Phase après exploitation

Le retrait de la machine se fera lorsque les besoins des utilisateurs ne pourront plus être comblés ni par la machine ni par des modifications apportées à celle-ci. Les composantes de la machine pourront être recyclées. Le tableau suivant montre chaque situation durant le cycle de vie de l'équipement.

Tableau A I-2 Situations du cycle de vie d'une machine LP-MIM

Cycle de vie du produit	
Produit : Machine LP-MIM	
n°	Situations
<i>Avant exploitation</i>	
SIT 1	Installation de la machine dans le local attitré. Ce local n'est pas défini pour le moment
<i>Exploitation</i>	
SIT 2	Validation de la machine
SIT 3	Utilisation avec différents moules, selon les besoins de l'utilisateur
SIT 4	Périodes d'inactivité
SIT 5	Nettoyage pour éliminer les résidus après l'utilisation
SIT 6	Améliorations pour adapter la machine aux besoins du moment. Doit être suivi d'une nouvelle phase de validation
SIT 7	Arrêt d'urgence en fonction des normes en vigueur
<i>Après exploitation</i>	
SIT 8	Retrait lorsque les besoins des utilisateurs ne pourront plus être comblés ni par la machine ni par des modifications apportées à celle-ci
SIT 9	Recyclage des composantes de la machine

5.3 Interacteurs

Les interacteurs sont d'abord les clients internes, mais aussi tous les éléments qui côtoient la machine. Ils sont :

- les étudiants et les chercheurs de l'ÉTS (utilisateurs);
- les personnes présentes dans le laboratoire;
- le responsable de la mise en œuvre et l'entretien;
- la poudre utilisée;
- le liant utilisé;
- l'environnement du laboratoire (atmosphère, température, rayonnement, son, vibration).

5.4 Fonctions de service

Les fonctions de service sont déduites des besoins énoncés ci-haut. Ils se divisent en deux catégories, soit les fonctions principales et les fonctions d'adaptation. Voici un tableau qui présente ces fonctions.

Tableau A I-3 Fonctions de services de la machine LP-MIM

Regroupement des fonctions de service		
n°	Énoncé des fonctions de service	Indice de priorité
<i>Fonctions principales</i>		
FS 1	Mélanger la poudre et le liant	0
FS 2	Faire le vide durant le mélange	1
FS 3	Contrôler le temps de mélange de la poudre et du liant	0
FS 4	Chauffer le mélange	0
FS 5	Mettre en forme un mélange de poudre et de liant	0
FS 6	Appliquer la pression d'injection graduellement par l'utilisateur	1
FS 7	Indiquer les températures à l'utilisateur	0
FS 8	Indiquer les pressions à l'utilisateur	0
FS 9	Indiquer la (les) vitesse(s) du mélangeur à l'utilisateur	1
FS 10	Contrôler le cycle de mise en forme du mélange	1
FS 11	Permettre le nettoyage complet des sections en contact avec le mélange par l'utilisateur	1
<i>Fonctions d'adaptation</i>		
FS 12	Assurer la sécurité des utilisateurs selon les normes en vigueur	0
FS 13	Limiter le rayonnement émis dans l'environnement du laboratoire	3
FS 14	Limiter les bruits émis dans l'environnement du laboratoire	3
FS 15	Limiter les vibrations émises dans l'environnement du laboratoire	3
FS 16	Limiter les émissions de particules dans l'atmosphère du laboratoire	0
FS 17	Résister aux contraintes thermiques et mécaniques appliquées	0
FS 18	Permettre la modification de la machine par le maître d'œuvre	1
FS 19	Permettre le passage par la porte du laboratoire	2

Indices de priorité

primordial	0
très important	1
important et utile	2
intéressant	3

De plus, chaque fonction de service est liée aux différentes situations du cycle de vie de la machine, telle que montrée par le tableau suivant. Cela permet de mettre en évidence les situations afin d'identifier les besoins spécifiques qui découlent de celles-ci.

Tableau A I-4 Liens entre le cycle de vie et les fonctions de service d'une machine LPIM

Liens entre cycle de vie et fonction de service									
Fonctions de service	Situations								
	SIT 1 : Installation	SIT 2 : Validation	SIT 3 : Utilisation	SIT 4 : Inactivité	SIT 5 : Nettoyage	SIT 6 : Amélioration	SIT 7 : Arrêt d'urgence	SIT 8 : Retrait	SIT 9 : Recyclage
S 1 : Mélanger la poudre et le liant		x	x		x		x		
S 2 : Faire le vide durant le mélange		x	x						
S 3 : Contrôler le temps de mélange de la poudre et du liant		x	x						
S 4 : Chauffer le mélange		x	x		x	x	x		
S 5 : Mettre en forme un mélange de poudre et de liant		x	x		x		x		
S 6 : Appliquer la pression d'injection graduellement par l'utilisateur		x	x				x		
S 7 : Indiquer les températures à l'utilisateur		x	x						
S 8 : Indiquer les pressions à l'utilisateur		x	x						
S 9 : Indiquer la (les) vitesse(s) du mélangeur à l'utilisateur		x	x						
S 10 : Contrôler le cycle de mise en forme du mélange		x	x				x		
S 11 : Permettre le nettoyage complet des sections en contact avec le mélange par l'utilisateur		x	x		x		(a)		
S 12 : Assurer la sécurité des utilisateurs selon les normes en vigueur	x	x	x	x	x		x		
S 13 : Limiter le rayonnement émis dans l'environnement du laboratoire		x	x	x					
S 14 : Limiter les bruits émis dans l'environnement du laboratoire		x	x	x					
S 15 : Limiter les vibrations émises dans l'environnement du laboratoire		x	x	x					
S 16 : Limiter les émissions de particules dans l'atmosphère du laboratoire		x	x		x				
S 17 : Résister aux contraintes thermiques et mécaniques appliquées		x	x						
S 18 : Permettre la modification de la machine par le maître œuvre	x					x			
S 19 : Permettre le passage par la porte du laboratoire	x					x		x	x

Notes:

a) la machine ne doit pas pouvoir fonctionner lors du nettoyage

5.5 Contraintes

Voici une liste des normes qui pourront être utilisées à titre de référence afin de satisfaire les fonctions de services.

Tableau A I-5 Présentation des normes applicables

FS	Description	Normes associées	Description de la norme
5	Ouverture minimum du moule	EN 349 + A1 2008	Sécurité des machines : écartements minimaux pour prévenir les risques d'écrasement de parties du corps humain
		EN 547-2 + A1 2008	Sécurité des machines : mesures du corps humain. Partie 2, principes de détermination des dimensions requises pour les orifices d'accès
10	Automatisation	CSA Z432-04	Protection des machines
		ISO 13850	Sécurité des machines : arrêt d'urgence : principes de conception.
		ISO 14118	Sécurité des machines : prévention de la mise en marche intempestive
13	Sécurité générale	CSA Z431-02	Principes fondamentaux et de sécurité pour l'interface personne-machine, le marquage et l'identification : principes de codage pour les indicateurs et les organes de commande
		EN 1005 P2	Manutention manuelle de machines et d'éléments de machines
		EN 1005 P3	Limites des forces recommandées pour l'utilisation de machines
14	Rayonnement	EN 12198-1,2&3 + A1 2008	Sécurité des machines : estimation et réduction des risques engendrés par les rayonnements émis par les machines
15 et 16	Bruit et vibration	CSA Z107.56-13	Mesure de l'exposition au bruit
		ANSI/ASA S12.16	Guidelines for the specification of noise of new machinery

5.6 Limites et exclusions

- Le contrôle de la masse ne fait pas partie de l'équipement. La préparation des constituants du mélange se fait séparément afin d'avoir une grande précision.
- La mesure du débit dans le conduit (si un conduit est nécessaire) n'est pas requise. La présence d'un tel capteur pourrait nuire à l'écoulement.
- La valeur de la force résultante pour maintenir le moule fermé n'a pas à être mesurée.
- La consommation d'énergie n'est pas un critère important.
- Aucun mécanisme d'éjection n'est prévu.
- Le refroidissement du moule n'est pas inclus dans ce projet. Cependant, cet équipement pourrait être ajouté dans le futur.

6 MAISON DE LA QUALITÉ

Cette maison de la qualité sert à déterminer l'importance relative de chaque critère (colonnes). Il faut aussi considérer l'impact de chaque critère entre eux. On veut que la pression d'injection soit la plus élevée, donc une augmentation des coûts. Il faut donc trouver un compromis entre pression d'injection et coûts. La pression du vide doit être le maximum possible, mais elle doit s'adapter à différents volumes tout en gardant la même efficacité. De plus, une attention particulière doit être posée en lien avec le nettoyage, il faut éviter que la pompe à vide aspire du mélange par exemple. La flexibilité du mélange est en lien avec la dimension de la cavité du moule. De plus, la flexibilité peut engendrer des coûts supplémentaires lors de l'acquisition de l'équipement. Cela sera toutefois compensé par des coûts moindres lors des essais. Une température plus élevée risque de faire augmenter les coûts, puisque les matériaux doivent résister à la chaleur. L'équipement pour atteindre des températures plus élevées est aussi plus dispendieux. La maison de la qualité permet donc de bâtir un barème d'évaluation pour juger les concepts qui seront générés.

7 BARÈME D'ÉVALUATION

Tableau A I-6 Barème d'évaluation du concept

	Caractéristiques	Cible	Cote	Barème
1	Pression d'injection (↑)	1 MPa	3	$0,7 \leq P_i \leq 1,0$
			2	$0,5 \leq P_i < 0,7$
			1	$0,3 < P_i < 0,5$
			0	$P_i \leq 0,3$
2	Pression de vide (↑)	762 mm de Hg	3	$500 < P_v \leq 762$
			2	$250 < P_v \leq 500$
			1	$0 < P_v < 250$
			0	$P_v \leq 0$
3	Flexibilité du mélangeur (↑)	1,2 l	3	$0,15 < V \leq 1,2$
			2	$1,2 < V \leq 1,5$
			1	$1,5 < V \leq 3$
			0	$3 \leq V$
4	Température (↑)	130 °C	3	$100 < T \leq 150$
			2	$80 < T \leq 100$
			1	$50 < T \leq 80$
			0	$T \leq 50$
5	Dimension hors tout du moule (↑)	150 x 300 mm	3	$100 \times 250 < d \leq 150 \times 300$
			2	$75 \times 200 < d \leq 100 \times 250$
			1	$50 \times 125 < d \leq 75 \times 200$
			0	$d \leq 50 \times 125$
6	Longueur du canal d'injection (↓)	0 mm	3	$0 < L \leq 25$
			2	$25 < L \leq 75$
			1	$75 < L \leq 150$
			0	$150 \leq L$
7	Coût (↓)	min. \$	3	$C \leq 5000$
			2	$5000 < C \leq 10000$
			1	$10000 < C \leq 20000$
			0	$20000 \leq C$
8	Résistance thermique (↑)	max. °C	3	$200 < RT$
			2	$150 < RT \leq 200$
			1	$100 < RT \leq 150$
			0	$RT \leq 100$
9	Simplicité d'utilisation (↑)	min manip.	3	$M \leq 10$
			2	$10 < M \leq 20$
			1	$20 < M \leq 30$
			0	$30 < M$
10	Nombre d'éléments difficiles à nettoyer (↓)	min.	3	$0 < t \leq 5$
			2	$5 < t \leq 10$
			1	$10 < t \leq 20$
			0	$20 \leq t$

CONCLUSION

Ce cahier des charges présente l'analyse complète des besoins du client, pour la conception, la fabrication et la validation d'une presse pour le procédé d'injection à basse pression de poudres métallique.

Les besoins sont définis afin de déterminer les spécifications techniques. Une maison de la qualité est ensuite construite afin de définir le poids de chaque spécification. Finalement, un barème d'évaluation des spécifications est bâti afin d'évaluer les concepts à venir.

ANNEXE II

A LOW-PRESSURE POWDER INJECTION MOLDING MACHINE AND METHOD

Cette annexe présente les pages préliminaires ainsi que les revendications de la demande de brevet provisoire aux États-Unis déposée le 29 avril 2016 portant le numéro de dépôt 62/329,419.

Inventeurs : Vincent Demers, Simon G. Lamarre et Jean-François Châtelain

Cessionnaire : École de technologie supérieure

CROSS-REFERENCE TO RELATED APPLICATIONS

[0001] This is the first application filed for the present invention.

TECHNICAL FIELD

[0002] The present invention relates to the field of low-pressure powder injection molding, and more specifically to low-pressure powder injection molding machines and methods.

BACKGROUND

[0003] High-pressure powder injection molding (HPIM) is a manufacturing process consisting in mixing metallic or ceramic powder with a molten polymeric binder to obtain a feedstock which is injected at high pressure into a mold cavity to generate a complex shape. Reciprocating screw molding machine is generally used to reach the high pressure required in conventional power injection molding (PIM). During debinding and sintering treatments, the binder is completely removed to obtain a near-net shape dense metallic component. Key features of HPIM process are low production costs, shape complexity, tight tolerances, applicability to several materials, and high final properties.

[0004] Low-pressure powder injection molding (LPIM) is a variant of the conventional HPIM process in which recent progress in feedstock formulations has generated new opportunities for producing shapes of higher complexity that is yet cost-effective, either in

high or in low production volumes. A pneumatic molding machine is generally used to fill a mold cavity with a powder-binder mixture. Initially used in ceramics forming, the LPIM technology has quickly become attractive for the development of high value-added metallic parts. A key to the successful injection of feedstock at low-pressure lies in the low-viscosity properties of the wax-based binder. However, the relatively low feedstock viscosity may promote segregation of powder-binder mixture. Segregation refers to the inhomogeneous distribution of powder particles in feedstocks. Such segregation is mainly generated by gravity, an improper mixing method, or a high-pressure gradient, before or during the molding process. The latter must be minimized in order to prevent distortions, cracks, voids, warping and heterogeneous shrinkage of the sintered parts.

[0005] Molding machines 10 for LPIM generally have a mold 12, a feedstock tank 14 or container and an interconnecting injection pipe 16 or injection channel, as presented in the prior art Figure 1. As feedstock or feedstock ingredients are introduced in the tank 14, a mixer 18 of the tank constantly mixes the molten feedstock 20 in order to prevent segregation in the feedstock. Moreover, heat is applied to the tank as well as to the injection pipe in order to maintain a desired feedstock viscosity. When air pressure is introduced into the tank, the molten feedstock is forced out of the tank through the interconnecting injection pipe 16 and into a cavity 22 of the mold 12.

[0006] For instance, US Patent No. 4,416,603 to Peltsman et al. shows such a conventional low-pressure injection molding machine for metallic or ceramic powder. However, with the conventional low-pressure injection molding machine, trapped feedstock in the injection pipe 16 remains idle, between injections, since mixing of the feedstock in the injection pipe is not possible, as presented in the prior art Figure 1. The idle feedstock within the injection pipe can deteriorate, for instance, segregation of the feedstock in the injection pipe can occur particularly with feedstock having low viscosity and produce a feedstock that is inappropriate for injecting into the mold.

[0007] US Patent No. 5,795,601 to Yamada et al. shows a LPIM machine having a system to prevent air from being entrapped in the feedstock during injection. A proportional pump is connected to a discharge port of a feedstock tank for supplying the feedstock at a constant rate to a mold via a feeder pipe and a cylinder. The cylinder opens into the mold and is connected to the proportional pump through the feeder pipe for being supplied with the feedstock. Injection in the mold cavity is performed by a plunger of the cylinder. However cleaning of this system can be problematic, considering that powder can be trapped in joints and contaminate following feedstocks. Also, problems can occur when used with low viscosity feedstock, because dead time between each injection can cause segregation of the feedstock in the interconnecting feeder pipe.

[0008] Therefore, there is a need for a LPIM that avoids contamination and segregation of feedstocks between injections while still preventing air from being entrapped in the feedstock during the mixing and the injection.

SUMMARY

[0009] According to one aspect there is a low-pressure powder injection molding machine having a base structure, an injection device, a mold, a container, a mixer and a control system. The base structure has a sliding platform that is displaceable along a platform displacement path. The injection device is mounted on the sliding platform and has an injection cylinder that is adapted to fill up, at least in part, with a feedstock when in a container alignment position and that is adapted to inject the feedstock when in a mold alignment position according to a piston movement within the injection cylinder. The mold is placeable on the sliding platform and immobilized with respect to the base structure along the platform displacement path when the injection device is in a mold alignment position, the mold has an inlet and a cavity, the inlet is in communication with the cavity for transmitting the feedstock from the injection cylinder to the cavity, the inlet being positioned to align with the injection cylinder when in the mold alignment position. The container is placeable on the sliding platform and immobilized with respect to the base structure along the platform displacement path. The container defines a chamber and an outlet that is in communication

with the chamber. The outlet is positioned to align with the injection cylinder when in the container alignment position. The chamber is adapted to receive and contain at least one material to produce the feedstock and is further adapted to receive a mixing tool of a mixer for mixing the feedstock. The mixer is displaceably mounted on the base structure so as to engage the container with the mixing tool. The control system has an injection device displacement controller, an injection cylinder controller, a mixer controller, a mixing tool controller and a mold controller. The injection device displacement controller is adapted to control a displacement of the sliding platform along the platform displacement path. The injection cylinder controller is adapted to control a displacement of the piston for filling the injection cylinder with feedstock and for injecting feedstock. The mixer controller is adapted to control a displacement of the mixer from a container withdrawn position to a container engaging position. The mixing tool controller is adapted to control the mixing tool when the mixer is in the container engaging position. The mold controller is adapted to immobilize the mold on the sliding platform and to release the mold from the sliding platform.

[0010] According to another aspect, there is a low-pressure powder injection molding machine kit having a base structure, a moveable platform and an injection device. The moveable platform is mountable on the base. The platform defines a first side and an opposite second side and further defines a cylinder passage from the first side to the second side. The platform is moveable from a container alignment position to a mold alignment position in order to align the cylinder passage with an outlet of a container when the container is placed on the second side and with an inlet of a mold when the mold is placed on the second side, respectively. The injection device is mountable on the moveable platform at the first side. The injection device has a cylinder adapted to engage the cylinder passage and adapted to hold feedstock therein. The cylinder has a piston therein that is displaceable away from the moveable platform for admitting at least part of the feedstock from the container into the cylinder when the cylinder is in the container alignment position and displaceable toward the moveable platform for ejecting at least part of the feedstock from the cylinder when the cylinder is in the mold alignment position.

[0011] According to yet another aspect, there is a method of producing a molded part, the method consists of mixing a feedstock within a container, aligning an injection cylinder with an outlet of the container, filling the injection cylinder with the feedstock by displacing a piston of the cylinder away from the outlet, aligning the injection cylinder with an inlet of a mold and injecting the feedstock into the inlet by displacing the piston towards the inlet for transferring the feedstock within a mold cavity. Following a hardening of the feedstock in the mold, the molded part is retrieved for the mold.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

[0012] Further features and advantages of the present invention will become apparent from the following detailed description, taken in combination with the appended drawings, in which:

[0013] Figure 1, schematically illustrates a low-pressure powder injection molding machine as found in the prior art;

[0014] Figure 2, illustrates an assembly of a low-pressure powder injection molding machine, according to one embodiment;

[0015] Figures 3a, illustrates an injection device of the molding machine of Figure 2, according to one embodiment;

[0016] Figure 3b, illustrates a vacuum system and a vacuum controller connectable to a feedstock container of the injection device of Figure 3a, according to one embodiment;

[0017] Figure 4a, illustrates a partial section view of an injection cylinder of the injection device of Figure 3a, according to one embodiment;

[0018] Figure 4b, illustrates a partial section view of the injection device of Figure 3a, with a removable injection cylinder, the injection device being configurable according to a length of the removable injection cylinder, according to one embodiment.

[0019] Figure 5, illustrates a front sectional view of a table of the injection device of Figure 3a, according to one embodiment;

[0020] Figure 6, illustrates a top view of the table of Figure 5 where a sliding platform is represented by a center line for clarity, according to one embodiment;

[0021] Figure 7, illustrates a base structure of the injection device of Figure 3a, according to one embodiment;

[0022] Figure 8, illustrates a section view of a feedstock container of the injection device of Figure 3a, according to one embodiment;

[0023] Figure 9a, illustrates a front sectional view of a mixer of the injection device of Figure 3a, according to one embodiment;

[0024] Figure 9b, illustrates a side sectional view of a mixer of the injection device of Figure 3a, according to one embodiment;

[0025] Figure 10, illustrates a controller for controlling a motor of the mixer of Figures 9a and 9b, according to one embodiment;

[0026] Figure 11, illustrates an exploded view of a mold of the injection device of Figure 3a, according to one embodiment;

[0027] Figure 12, illustrates a pneumatic system for feeding pneumatic cylinders of the table of Figure 5 according to one embodiment;

[0028] Figure 13, illustrates a support table adapted to operatively support the injection device of Figure 3a, according to one embodiment;

[0029] Figure 14, illustrates a snapshot of a user interface displayed by a monitor of the low-pressure molding machine of Figure 2, the user interface being adapted to allow an operator to monitor and input control commands for controlling the injection device of Figure 3a, according to one embodiment;

[0030] Figure 15a to Figure 15h, illustrates a partial section view of the injection device of Figure 3a, with the mixer of Figures 9a and 9b, a piston of the injection cylinder of Figure 4a and the mold of Figure 11 in various operative positions;

[0031] Figure 16, illustrates a block diagram describing a method for producing a molded piece, according to one embodiment;

[0032] Figure 17, illustrates a block diagram describing a method of mixing a feedstock for producing a molded piece, according to one embodiment;

[0033] Figure 18, illustrates a block diagram describing a method of filing an injection cylinder for producing a molded piece, according to one embodiment;

[0034] Figure 19, illustrates a block diagram describing a method of injecting a feedstock into a mold for producing a molded piece, according to one embodiment; and

[0035] Figure 20, illustrates a block diagram describing a method of emptying an injection cylinder, according to one embodiment.

[0036] It will be noted that throughout the appended drawings, like features are identified by like reference numerals.

DETAILED DESCRIPTION

[0037] Figure 2 presents an assembly of a low-pressure powder injection molding machine 100, according to one embodiment. The molding machine 100 is adapted to produce parts by injecting into an adapted mold a molten viscous mixture of a suitable powder and a suitable binder. Depending on the area of application and the requirements for the part, the powder is a ceramic powder or metallic powder and the binder is a polymeric binder such as a wax, a thermoplastic or a thermosetting resin with other additives such as surfactants, thickening agents, etc..

[0038] As further presented in Figure 2 according to one embodiment, the molding machine 100 has a support table 106 adapted to support an injection system 102, various electronic components 104 and a monitor/input interface 108 (hereinafter: monitor 108) associated to a computer in order to allow a user to monitor and input control commands for controlling the injection system 102.

[0039] A skilled reader would understand that the injection system 102, the electronic components 104 and the monitor 108 could very well be positioned differently on the support table 106 or by a plurality of dedicated support tables 106 depending on the available space and preferences of the user. Moreover, the skilled reader will also understand that the electronic components 104 and the monitor 108 could further be remotely located and that the support table 106 is only adapted to support the injection system 102.

[0040] Presented in Figure 3a is a detailed view of the injection system 102. According to one embodiment, the injection system 102 has a base structure 208 adapted to operatively support a table 206, a mixer 212 and a mold holder 215. The table 206 is fixedly mounted on the base structure 208 and has a fixed platform 502 and an opposite sliding platform 504. In this embodiment the sliding platform 504 is slidable from one position to another however other suitable movements of the sliding platform 504 are possible, such as being rotatable about a suitable axis from one position to another, without departing from the scope of the present injection system 102.

[0041] Further presented in Figure 3a, the mixer 212 is slidably mounted on the base structure 208 in order to engage the feedstock container 210 and also to withdraw from the feedstock container 210. In Figure 3a, the mixer 212 is mounted on the base structure 208 and is vertically displaceable from an engaged position to a retracted position with respect to the feedstock container 210. A skilled person will understand that any other suitable mechanism or structure for displacing the mixer 212 from the engaged position to the retracted position with respect to the feedstock container 210 is possible without departing from the spirit of the present injection system 102.

[0042] Further presented in Figure 3a, the mold holder 215 is an arm that is slidably mounted on the base structure 208 and is vertically movable from a holding position to a releasing position. When the arm 215 is in the holding position, in cooperation with the sliding platform 504 of the table 206, pressure of the arm 215 is exerted on the mold in order to hold it in place for injecting the feedstock therein. When the arm 215 is in the releasing position, the mold can be removed and opened for retrieving the formed part therefrom. Note that any other suitable way of removably placing, mounting or holding the mold 214 in place for injecting the feedstock therein is possible. In an alternate embodiment, the mold 214 is mounted on the table 206 and is displaceable from a mold filling position to a part releasing position. In yet another embodiment, the mold 214 is mounted on the mold holder 215 and is displaceable from a mold filling position to a part releasing position.

[0043] Note that the feedstock container 210 shall be interpreted as being any type of suitable receptacle such as a tank or a chamber system that is adapted in material, shape and size to receive and mix therein any suitable feedstock for producing a feedstock that is suitable for injecting into the mold 214. For certainty, the container 210 is adapted to receive either a pre-mixed feedstock or feedstock ingredients that when mixed and heated produce the desired feedstock.

[0044] Further presented in Figure 3a the injection device 204 is mounted on the sliding platform 504 such as to allow the injection device 204 to be displaced from the feedstock

container 210 to the mold 214. The sliding platform 504 is slidably displaceable for displacing the injection device 204 and also for covering an outlet of the container 210 as the injection device 204 is being displaced from a container 210 alignment position to a mold 214 alignment position. The injection device 204 is displaced from the container 210 alignment position for filling the injection device 204 with feedstock to a mold alignment position for injecting the feedstock into the mold 214 and vice versa. The sliding platform 504 is slidably displaced with respect to the container that is maintained in position by the pressure exerted by the mixer 212 towards the sliding platform 504. As the sliding platform 504 is slidably displaced, the outlet of the container 210 is obstructed or covered by a surface of the sliding platform 504.

[0045] The sliding platform 504 not only acts a means for displacing the injection device but also acts as a container outlet cover when the injection device 204 is moved from the feedstock container 210 to the mold 214 and also when the injection device 204 is in a mold alignment position. The sliding platform 504 is adapted to prevent any feedstock to flow out of the container 210, without necessitating a valve. Advantageously, since the container can be closed off or capped without necessitating a valve, maintenance of the closing mechanism is limited, cleanliness is simplified, and contamination of the feedstock within the container is minimized. In conventional machines where a valve is used for closing a container, feedstock often manages to enter the valve mechanism and the valve must frequently be cleaned to function properly. Also, as feedstock often manages to enter the valve mechanism, the valve mechanism exposes the content of the container to solidified feedstock, segregated feedstock, or feedstock made from other ingredients thereby promoting contamination of the feedstock within the container.

[0046] Moreover, since the sliding platform 504 allows the injection device 204 to move from the feedstock container 210 to the mold 214 and vice versa, a pipe or channel connecting the container to the mold is not required. Therefore, idle feedstock between injections is limited and feedstock segregation is limited as well. The only feedstock that remains idle is the feedstock located within the injection device 204 when filled with a

limited amount of feedstock, which is rapidly injected into the mold. After the mold injection, any remaining feedstock within the injection device 204 is rapidly returned into the container 210 for further mixing.

[0047] Further presented in Figure 3a and concurrently presented in Figure 3b, is a vacuum system 202 connected to a control panel 218 via hose 300 and to the feedstock container 210 via connectable hose 301, in order to remove air from the feedstock container 210 during a mixing operation and reduce the amount of air bubbles within the mixture. As presented in Figure 3b, the control panel has two control valves 302 for controlling a vacuum pressure and a monometer 304 for indicating the pressure within the vacuum system 202.

[0048] Moreover, in this embodiment, the valve 302 is user operated and a user can directly control a vacuum pressure of the container 210, however it shall be understood that the valve 302 can also be at least in part controlled by a computer according to a user input or a predefined program.

[0049] It shall be understood that any other suitable means for controlling the vacuum pressure other than with the control valves 302 is possible. For instance the vacuum pressure can be controlled electronically by a computer.

[0050] Moreover, a skilled person will understand that in some instances the vacuum system 202 is not required when a certain amount of air bubbles within the mixture is acceptable or when the mixing chamber 210 has an adapted shape that provides evacuation of surplus air with ease.

[0051] Presented in Figure 4a is a sectioned view of the injection device 204, according to one embodiment. The injection device 204 has a cylinder 404 adapted to receive a piston 402 for charging and discharging, as with a syringe, the feedstock respectively from the feedstock container 210 to the mold 214. The piston 402 is activated by the electrical cylinder 416 that is maintained in place by rods 408, as concurrently presented in Figure 3a. A movement of the piston 402 within the cylinder 404 is monitored and controlled based on measurements provided by a cable potentiometer 418 and a load cell 414.

[0052] A skilled person will recognize that other methods of monitoring and controlling the movement of the piston 402 within the cylinder 404 are possible such as using measurements provided by a Linear Variable Differential Transformer (LVDT), a rotary or a linear encoder, etc., without departing from the scope of the injection device 204.

[0053] Further presented in Figure 4a according to one embodiment, the injection device 204 has a heating element 412 surrounding the cylinder 404 in order to maintain an adequate temperature within the cylinder 404 and maintain adequate rheological properties of the feedstock for preventing solidification of the feedstock inside the cylinder 404. Moreover, in order to provide a better control of the temperature within the cylinder 404, and also to maintain adequate rheological properties of the feedstock, an insulator 410 can additionally be required. The insulator 410 is adapted to surround the heating element 412 or the cylinder 404 in order to prevent heat dissipation from the mixture.

[0054] In an alternate embodiment, when the feedstock has slow solidification rate or when the mold injection process is sufficiently rapid, the cylinder 404 may not require a heating element to maintain adequate rheological properties of the feedstock and may only require the insulator 410, if necessary.

[0055] Presented in Figure 4b according to one embodiment, is the table 206 with the injection device 204 attached thereto. The cylinder 404 of the injection device 204 is removeable. In one instance, the cylinder 404 is removeable to facilitate a cleaning thereof. In another instance, the injection cylinder 404 is removeable and interchangeable for selecting the cylinder 404 having an adapted dimension depending on a required amount of feedstock to be injected into the mold 214 or according to a volume of the mold 214. In this embodiment, a support 422 of the injection device 204 clips on notches 424 located on rod 408 for providing five levels of cylinder length adjustments.

[0056] Figure 5 presents a detailed sectioned view of the table 206, according to one embodiment. The table 206 has a fixed platform 502 and a sliding platform 504, as

concurrently presented in Figure 4b. The sliding platform 504 is adapted to displaceably support the injection device 204 from a feedstock loading position that is aligned with the feedstock container 210 to a feedstock injection position that is aligned with an inlet of the mold 214. The fixed platform 502 is adapted to support a first pneumatic cylinder 506 that is for actuating the vertical displacement of the mixer 212, as concurrently presented in Figure 3a. The fixed platform 502 is further adapted to support a second pneumatic cylinder 508 that is for actuating the vertical displacement of the mold holder 215, as concurrently presented in Figure 3a. Note that other means for actuating either one of the mixer 212 displacement or the mold holder 215 displacement are possible, such as a manual displacement or a displacement provided by an electric cylinder without departing from the present injection system 102.

[0057] A skilled person will understand that the fixed platform 502 could be integral or at least part of the base structure 208 without departing from the present injection system 102.

[0058] From a top view of the table 206 as presented in Figure 6, the fixed platform 502 further has two latches 602 and 604 for positioning the sliding platform 504 - herein represented by a center line - in either a feedstock container alignment position via latch 602 or in a mold alignment position via latch 604. The fixed platform 502 further has rails 606 that are adapted to guide the sliding platform 504 movement with respect to the fixed platform 502.

[0059] Moreover, in case of feedstock residue leakage or buildup on the sliding platform 504, additional heat can be required for maintaining an adequate temperature at the sliding platform 504 to maintain the mixture residue in a molten state. This way cleaning or wiping off the mixture residue from the sliding platform 504 can be accomplished with ease. According to one embodiment and as presented in Figure 5, the sliding platform 504 has a heated band 514 and a heated cable 510 for dissipating heat to the sliding platform 504 at a surface and also at a junction of the cylinder 404 with the sliding platform 504, respectively. A skilled person will recognize that any other means for heating the sliding platform 504 are

possible without departing from the scope of the present table 206. It shall further be recognized that such additional heating may not be required if the ambient room conditions are suitable for maintaining a molten mixture.

[0060] According to one embodiment and as presented in Figures 2 and 7, the base structure 208 is adapted for attaching the table 206 thereon. The table 206 is positioned such as to allow the first pneumatic cylinder 506 to align with a mixer displacement slider 702 and to allow the second pneumatic cylinder 508 to align with a mold displacement slider 704 in order to activate the sliders (702 and 704). Note, that some variations in the alignment of the displacement sliders (702 and 704) with the respective pneumatic cylinders (506 and 508) are possible depending on the configuration of the base structure 208. Moreover in this embodiment, the mixer displacement sliders 702 and 704 are double sliders that are adapted to slide along two vertical members of the base structure 208. However, any other type of suitable sliders (702 or 704) can be used with the base structure 208, without departing from the present injection system 102.

[0061] According to one embodiment and as further presented in Figure 7, a mold holder 215 is mounted on the displacement slider 704. In operation, when the second pneumatic cylinder 508 activates the displacement slider 704, the mold holder 215 is displaced accordingly, thereby providing enough space for placing and removing the mold 214 from the sliding platform 504. According to one embodiment, a rod 708 is positioned on the base structure 208 in order to limit the displacement movement of the slider 704 and prevent the mold holder 215 from being displaced too far away from the table 206.

[0062] It shall be understood that any other suitable means of removeably immobilising or placing the mold 214 on the sliding platform 504 are possible without departing from the scope of the present injection system 102.

[0063] The base structure 208 presented in Figure 7 is made from extruded aluminum however the base 208 can be made from any other suitable material that is strong enough to

support the various components of the injection system 102. Moreover the base structure 208 can have any other suitable shape or configuration that is adapted for operatively supporting with adequate stability, be it in combination or individually, the various components of the injection system 102.

[0064] Presented in Figure 8 is a sectional view of the container 210, according to one embodiment. As can be seen in Figure 3a, the container 210 is removeably placed onto the sliding platform 504 of the table 206 and is immobilized by the engaged mixer 212. The container 210 has a chamber 800 that defines an inlet 801 and an outlet 803. The inlet 801 is adapted for inserting the various powder and binder elements required for creating a desired feedstock. Also the inlet 801 is adapted for introducing a mixing tool of the mixer 212 into the chamber 800. The outlet 803 is adapted for allowing passage of the feedstock from the container 210 to the cylinder 404 and vice versa. Moreover, the outlet 803 is also adapted for allowing passage of the piston 402 up to an internal wall 812 of the chamber 800. The container 210 also has joints (802 and 810) respectively positioned near the inlet 801 and outlet 803 in order to prevent air infiltration into the chamber 800. According to an alternate embodiment, the joints (802 and 810) prevent unwanted feedstock leakage from the chamber 800.

[0065] For certainty, it shall be understood that the feedstock is produced from the mixing of feedstock ingredients within the chamber 800 or with any other mixing system. Any reference to the term “feedstock” shall be interpreted as any mixture of ingredients having the suitable properties for being injected into the mold and form a desired part and shall also be interpreted as being ingredients that are yet to be mixed or further mixed in order to produce a suitable mixture for injecting into the mold.

[0066] Moreover, as further presented in Figure 8, the container 210 has heating elements (804 and 808) strategically positioned to provide heat to the chamber 800 and also to the outlet 803. Heat provided to the chamber 800 and to the outlet 803 prevents the solidification of the feedstock within the chamber 800 and the outlet 803. A skilled person will understand

that depending on the feedstock composition, heating elements (804 or 808) may not be required if the setting time of the feedstock is prolonged or if the injection system 102 is adapted to produce molded parts rapidly enough and prevent the feedstock from solidifying within the chamber 800 or outlet 803.

[0067] Also according to one embodiment, the container 210 has an insulation material 806 adapted to surround the chamber 800 for preventing heat dissipation from the chamber and maintaining a suitable feedstock fluidity or viscosity.

[0068] In an alternate embodiment (not shown), the container 210 has an additional insulation material adapted to surround the outlet 803 for preventing, at least in part, heat dissipation from the outlet and maintaining a suitable feedstock fluidity or viscosity.

[0069] A skilled person will recognize that the container 210 can have any suitable dimension, shape or form and the location and number of heating elements such as heating elements 804 and 808 can differs from on embodiment to another. Moreover the skilled person will recognize that the location or number of any suitable insulation materials or combination thereof for, at least in part, preventing heat dissipation from the chamber 800 can differ from one embodiment to another. It shall further be recognized that such additional heating or insulation may not be required if, for instance, the ambient conditions are suitable for maintaining the feedstock in molten state.

[0070] Presented in Figure 9a is a front sectional view of the mixer 212 and presented in Figure 9b is a side sectional view of the mixer 212, according to one embodiment. The mixer 212 is a planetary mixer, the mixer 212 has a removeable mixing tool 902 for engaging the container 210 and is adapted to mix a content thereof with a rotating motion around a mixing tool axis 906 and also around a common axis 914. As can be noticed, the mixing tool axis 906 is decentralized with respect to the common axis 914. Moreover, a removeable scrapper tool 904 is adapted to rotate around the common axis 914, as well. The scrapper tool 904 is adapted to scrappingly contact or at least sweep in proximity , at least in part, the interior

wall 812 of the container 210 in order to prevent feedstock from settling onto the interior wall 812, as concurrently presented in Figure 8. In this embodiment, the mixing tool 902 and the scrapper tool 904 are rotatably activated around the mixing tool axis 906 and the common axis 914 by a single motor 910, such as a brushless motor.

[0071] A skilled person will however understand that the mixing and scrapping tools (902 and 904) could be independently activated by dedicated motors, without departing from the scope of the present mixer 212. Moreover, depending of the feedstock to be mixed or the shape of the chamber 800, the scrapping tool may not be required and only the mixing tool 902 may suffice. Also, the mixing tool 902 may have a shape adapted to provide a dual function: a mixing function and a scrapping function, in this case the scrapping tool may not be necessary. For certainty, it shall be recognized that the mixing tool 902 or the scrapping tool 904 can be replaced by any other suitable tool or plurality of tools.

[0072] A skilled person will further understand that the planetary mixer 212 can be replaced altogether by any other suitable type of mixer for mixing the content of the container 210 without departing from the scope of the present machine 100.

[0073] According to one embodiment, as presented in Figures 2, 9a and 9b, the motor 910 is decentralized with respect to the common axis 914 in order to provide space for an inspection shaft 920 that is aligned with a center portion of the feedstock container 210 and consequently also aligned with the common axis 914. The inspection shaft 914 is adapted for inserting a camera, a probe, a microphone or any other suitable inspection tool that might be useful for monitoring, inspecting or even sampling the content of the mixing chamber 210. Since the mixing chamber 210 is maintained under vacuum to prevent the formation of air bubbles within the feedstock, a cap 908 is adapted to plug the inspection shaft 920 in order to prevent as much as possible air from entering into the mixing chamber 210 or hermetically seal the inspection shaft 920. A skilled person, will understand that the cap 908 can further be adapted to prevent dust or debris from entering the mixing chamber 210.

[0074] In an alternate embodiment, the inspection shaft 920 defines a sealed opening for positioning a desired inspection device into the chamber 800. The sealed opening being adapted to suitably prevent air from entering into the chamber 800 or hermetically seal the inspection shaft 920.

[0075] As presented in Figures 2 and 10, a command panel 1000 has a controller 1002 for adjusting the direction and speed of the motor 910. According to one embodiment, the controller 1002 is user operated. In an alternate embodiment, the controller 1002 is preprogrammed or is connected to a programming module and is adapted to execute instructions according to a user defined program. In Figure 3a, the command panel 1000 is attached to the injection system 102. However, it shall be understood that the command panel 1000 can be located in any suitable location for controlling the motor 910 and that the command panel 1000 can have any suitable shape or form. For example, the command panel 1000 can be replaced by a software command module that is adapted to send instructions to a command interface of the motor 910.

[0076] Presented in Figure 11, is an exploded view of an embodiment of the mold 214. In this embodiment, the mold parts are detachably connected with screws in order to easily remove a resulting molded piece therefrom. The mold 214 has an entry part 1102 defining an injection inlet 1103 configured to receive the feedstock from the injection device 204. The mold 214 further has base plates 1106 and 1112 to which are attached interchangeable form plates such as form plates 1104, 1108 and 1110 that define a cavity according to a desired part shape to be molded. Notice that the cavity defined by the base plates and form plates are in communication with the injection inlet 1103 to allow free passage of the feedstock from the injection inlet 1103 to the cavity.

[0077] The illustrated mold 214 embodiment of Figure 11 is formed with plates adapted to produce a desired molded shape when attached with screws. However, a skilled person will recognize that the mold 214 can have any other suitable form or configuration and that the mold plates or the mold screws can be replaced by any other suitable type of plates or

attachment that are adapted to define a cavity for producing a desired shape. Moreover, it shall further be recognized that the mold 214 can be made from a single piece without requiring plates or attachment screws.

[0078] Presented in Figure 12 is the pneumatic system 216 according to one embodiment and as concurrently presented in Figure 3a. The pneumatic system 216 has a mounting plate 1202 that is attachable to the base structure 208 of the injection system 102, as shown in Figure 3a. Attached to the mounting plate are pneumatic valves 1204a and 1204b respectively adapted to control the first and second pneumatic cylinders 506 and 508 of Figure 5 for actuating the mixer displacement and the mold holder displacement.

[0079] A skilled person will understand that the mounting plate 1202 can be replaced by any other suitable means of providing the various valves for activating the pneumatic cylinders 506 and 508. In this embodiment, the valves 1204a, 1204b are controlled by a computer according to a predefined program, however it shall be understood that those valves could also be at least in part user operated or controlled by a computer according to a user input.

[0080] Presented in Figure 13 according to one embodiment, the support table 106, as concurrently presented in Figure 3a has an elevation member 1302 adapted to elevate the injection system 102 off from the ground. Notice that if the support table 106 is high enough or if the injection system 102 is short enough, the elevation member 1302 may not be required.

[0081] According to another aspect, presented in Figure 14 is a user interface 1400 provided by the monitor 108, according to one embodiment. The user interface 1400, allows a user to control the various components of the injection system 102 and also to monitor the various states of the injection system 102. For example, according to one embodiment, the user interface 1400 has a vacuum pump control switch 1402 adapted to allow a user to activate and deactivate the vacuum system 202 of the injection system 102. The user interface 1400 has temperature setting fields 1404a each adapted to set a heating temperature of an associated component of the injection system 102 such as for setting the temperature of the

cylinder 404, the container 210, the table 206 or an auxiliary thermocouple socket for cleaning purposes. The auxiliary thermocouple socket can be used by the container 210 or the cylinder 404 when unmounted or by a replacement container or a replacement cylinder when cleaning of such components is required without interrupting an injection cycle. Moreover, the user interface 1400 has temperature monitoring windows 1404b each adapted to present to the operator a temperature reading of an associated component of the injection system 102 such as a temperature reading of the cylinder 404, the container 210, the table 206 or the auxiliary thermocouple socket for cleaning purposes. Moreover the user interface 1400 has a table position indicator 1412 such as to indicate to the operator if the table is aligned with the feedstock container or if the table is aligned with the mold.

[0082] Also the user interface 1400 has a cylinder position controlling interface 1406 for an operator to control a position of the first pneumatic cylinder 506 and a position of the second pneumatic cylinder 508. The user interface 1400 further has a piston position controlling interface 1416 and a piston position monitoring interface 1410 for an operator to control and monitor a position of the piston 402 within cylinder 404. In addition, the user interface 1400 has a pressure indicator 1414 for indicating to the operator a pressure or force applied by the piston 402 within the cylinder 404 during injection into the mold.

[0083] When a camera is used as an inspection tool to monitor the content of the feedstock container 210, the user interface 1400 has a display region 1408 for presenting to the operator an image acquired by the camera.

[0084] A skilled person will understand that the user interface 1400 can be presented differently to the operator and yet provide similar information for monitoring and controlling the various components of the injection system 102. Moreover additional monitoring and controlling information can be provided via the interface 1400 such as a mixing speed of the mixer 212 or any other information that can be considered beneficial for producing a molded part with accuracy.

[0085] In order to better understand the operations of the injection system 102, Figures 15a to 15h visually present the various states of the injection system 102 according to a method for producing a molded part 1600, as concurrently presented in Figure 16. The method 1600 requires mixing a feedstock 1602, filing an injection cylinder 1604 and injecting feedstock into a mold 1606. Once filed 1604, the complete content of the injection cylinder is fully injected into the mold 1606 or if not fully injected into the mold 1606, the remaining content of the injection cylinder is returned and emptied 1608 into the container for further mixing. This way, there is no residual mixture or feedstock that remains idle within the injection cylinder and thereby contamination or segregation of feedstock between injection cycles is avoided.

[0086] In more detail, Figure 17 presents according to one embodiment, the method of mixing a feedstock 1602. The method 1602 consists of retracting the mixer 1702 away from the container in order to provide enough space for inserting the feedstock or the feedstock ingredients (i.e. powder and binder) into the container, aligning the injection cylinder with the container outlet 1704 and positioning the piston of the injection cylinder in order to plug the container outlet 1706, as concurrently presented in Figure 15a. Once the container is accessible and plugged at its outlet, feedstock or the feedstock ingredients are inserted into the container 1708, heat is then applied to the container at least up to or above a melting point of the binder 1710 and the mixer is then engaged into the container 1712 for mixing the content of the container 1714, as concurrently presented in Figure 15b. During the mixing 1714, a vacuum is applied to the container 1716, at least for a certain period in order to remove excess air from the container and prevent air bubble formation within the feedstock.

[0087] It shall be recognized that in the method of mixing a feedstock 1602, various steps can take place simultaneously without departing from the scope of the method 1602. For instance, the retracting mixer 1702, the aligning injection cylinder 1704 and the positioning piston in container plug position 1706 can take place simultaneously. Also, the heating container 1710, the mixing content 1714 and the applying vacuum 1716 can take place simultaneously.

[0088] Figure 18 presents according to one embodiment, the method of filling the injection cylinder 1604. The method 1604 consists of first removing the vacuum from the container 1802 and stopping the mixing of the content of the container 1804 before retracting the piston from the container plug position 1806 in order to fill the injection cylinder 1808 with some feedstock up to a desired or predetermined level, as concurrently presented in Figure 15c. The vacuum is removed from the container 1802 before filling the injection cylinder 1808 to allow filling of the injection cylinder with greater ease since the injection cylinder is filled with a suction force that is applied by a displacement or retraction of the piston within the injection cylinder away from the container outlet, in this case, a lowering of the piston within the injection cylinder 1806.

[0089] It shall be recognized that in the method of filling the injection cylinder 1604, various steps can take place simultaneously without departing from the scope of the method 1604. For instance, the removing vacuum 1802 and the stopping mixing 1804 can take place simultaneously. Also, the retracting piston 1806 and filling injection cylinder 1808 can take place simultaneously.

[0090] Figure 19 presents according to one embodiment, the method of injecting the feedstock into a mold 1606. The method 1606 consists of aligning the injection cylinder with an inlet of the mold 1902 by displacing the injection cylinder from a container alignment position to a mold alignment position as concurrently presented in Figures 15c, 15d and 15e. During the aligning with an inlet of the mold 1902 and as the injection cylinder is displaced away from the container alignment position, as illustrated in Figure 15e, the sliding platform of the table is conjunctly displaced such as to cover the container outlet 1904. Covering the container outlet 1904 prevents any remaining content of the container from flowing out of the container or contaminants from entering the container, without necessitating a valve at the outlet. Once the container outlet is covered, mixing of the content container 1906 is restarted to prevent feedstock deterioration or segregation. During the mixing 1906, the vacuum to the container is applied 1908. Following the alignment of the injection cylinder with the mold inlet 1902, the piston of the injection cylinder is displaced towards the mold inlet 1910 in

order to inject feedstock therein. Once the feedstock is solidified within the mold, the resulting part is retrieved from the mold 1914.

[0091] It shall be recognized that in the method of injecting the feedstock into a mold 1606, various steps can take place simultaneously without departing from the scope of the method 1606. For instance, the aligning 1902 and the covering 1904 can take place simultaneously. Also, the mixing 1906 and applying vacuum 1908 can take place simultaneously. Moreover, the mixing 1906 and the displacing piston 1910 can also take place simultaneously. Moreover, the displacing piston 1910 and the injecting feedstock 1912 can also take place simultaneously.

[0092] Figure 20 presents a method for emptying the injection cylinder of residual feedstock 1608. The method 1608 consists of removing the vacuum from the container 2002 and stopping the mixing of the content of the container 2004. The method 1608 further consists of aligning the cylinder with the container 2006, from a mold alignment position to a container alignment position, as concurrently presented in Figure 15f. Then injecting the residual feedstock into the container 2008 by returning the piston of the injection cylinder into the original container plugging position 2010, as concurrently presented in Figures 15g and 15h. This way, any residual feedstock within the injection cylinder can be mixed again and used at a later time or in a next injection cycle. For a next injection cycle, the method 1608 further consists of restarting mixing of the content of the container 2012 and applying the vacuum to the container 2014.

[0093] It shall be recognized that in the method for emptying the injection cylinder of residual feedstock 1608, various steps can take place simultaneously without departing from the scope of the method 1608. For instance, the removing vacuum 2002 and the stopping mixing 2004 can take place simultaneously. Also, the stopping mixing 2004 and the aligning cylinder 2006 can take place simultaneously. Moreover, the injecting residual feedstock 2008 and the returning piston 2010 can take place simultaneously. Moreover, the restarting mixing 2012 and the applying vacuum 2014 can take place simultaneously.

[0094] It shall further be understood that in the methods of mixing feedstock 1602, filling the injection cylinder 1604, injecting feedstock into the mold 1606 and emptying the injection cylinder 1608, the application or removal of the vacuum at steps 1716, 1802, 1908, 2002 and 2014 is optional depending at least in part on the type or quantity of feedstock, the shape and size of the container 210, the shape and size of the mixing tool 902 or the level of air bubble acceptance threshold.

[0095] It shall also be understood that in the methods of filling the injection cylinder 1604, injecting feedstock into the mold 1606 and emptying the injection cylinder 1608, the mixing of the content of the container or the stopping thereof at steps 1804, 2004 or 2012 is optional depending at least in part on the type or quantity of feedstock, the shape and size of the container 210, the shape and size of the mixing tool 902 or the level of air bubble acceptance threshold.

[0096] In this embodiment, as can be noticed with Figures 15d and 15f, it is the injection cylinder that is displaced from a container alignment position to a mold alignment position and vice versa. However it is very well possible in an alternate embodiment, that the injection cylinder remains fixed and that the container and mold are displaced accordingly in an injection cylinder alignment position for respectively filling the injection cylinder 1812, injecting the feedstock into the mold 1906 and injecting the feedstock back into the container 2004.

[0097] Moreover as can be noticed in Figures 15a and 15b, in this embodiment, it is the piston of the injection cylinder that serves as a plug to the container during the mixing 1714. However it shall be understood that in an alternate embodiment, the sliding platform serves as a plug as shown in Figure 15d and 15f, for instance. Indeed, during mixing 1714 the injection cylinder need not be aligned with the container and the piston need not be in a container plugging position. In fact, the mixing 1714 can continue to take place even while the injection cylinder is being displaced as in Figures 15d and 15f.

[0098] Moreover as can be noticed in Figures 15a, the mixer is retracted 1702 for allowing insertion of powder and binder into the container. However it shall be understood that the powder and binder can be inserted by any other suitable means, without requiring the retraction of the mixer. For instance, the container can be filled with powder and binder from the outlet or by a dedicated channel that can be plugged or removed during the mixing 1714.

[0099] The above description embodiments are meant to be exemplary only, and the skilled person in the art will recognize that changes may be made to the embodiments described without departing from the scope of the invention disclosed. For instance, the above described embodiments may be operative disregarding the dimension, shape and orientation of the various components in the molding machine 100.

CLAIMS:

1. A low-pressure powder injection molding machine comprising:

- a base structure having a sliding platform mounted thereon, the sliding platform being displaceable with respect to the base structure, along a platform displacement path;
- an injection device adapted to be mounted on the sliding platform the injection device having an injection cylinder that is adapted to fill up, at least in part, with a feedstock when in a container alignment position and that is adapted to inject the feedstock when in a mold alignment position according to a piston movement within the injection cylinder;
- a mold adapted to be placed on the sliding platform and immobilized with respect to the base structure along the platform displacement path when the injection device is in a mold alignment position, the mold defining a cavity and an inlet, the cavity being for receiving the feedstock and forming a part according to a desired shape, the inlet being in communication with the cavity for transmitting the feedstock from the injection cylinder to the cavity, the inlet being positioned to align with the injection cylinder when in the mold alignment position;
- a container adapted to be placed on the sliding platform and immobilized with respect to the base structure along the platform displacement path, the container defining a

chamber and an outlet that is in communication with the chamber, the chamber being adapted to receive at least one material to produce the feedstock, the chamber being further adapted to receive a mixing tool and also adapted to contain a feedstock therein, the outlet being positioned to align with the injection cylinder when in the container alignment position;

a mixer having the mixing tool, the mixer being adapted to be displaceably mounted on the base structure so as to engage the container with the mixing tool; and

a control system comprising:

an injection device displacement controller adapted to control a displacement of the sliding platform along the platform displacement path;

an injection cylinder controller adapted to control a displacement of the piston for filling the injection cylinder with feedstock and for injecting feedstock;

a mixer controller adapted to control a displacement of the mixer from a container withdrawn position to a container engaging position;

a mixing tool controller adapted to control the mixing tool when the mixer is in the container engaging position; and

a mold controller adapted to immobilize the mold on the sliding platform and to release the mold from the sliding platform.

2. A low-pressure powder injection molding machine kit comprising:

a base structure;

a moveable platform mountable on the base, the platform defining a first side and an opposite second side, the platform further defining a cylinder passage from the first side to the second side, the platform being moveable from a container alignment position to a mold alignment position in order to align the cylinder passage with an outlet of a container when the container is placed on the second side and with an inlet of a mold when the mold is placed on the second side, respectively; and

an injection device mountable on the moveable platform at the first side, the injection device having a cylinder adapted to engage the cylinder passage and adapted to hold feedstock therein, the cylinder having a piston therein that is displaceable away from

the moveable platform for admitting at least part of the feedstock from the container into the cylinder when the cylinder is in the container alignment position and displaceable toward the moveable platform for ejecting at least part of the feedstock from the cylinder when the cylinder is in the mold alignment position.

3. A method of producing a molded part, the method comprising:

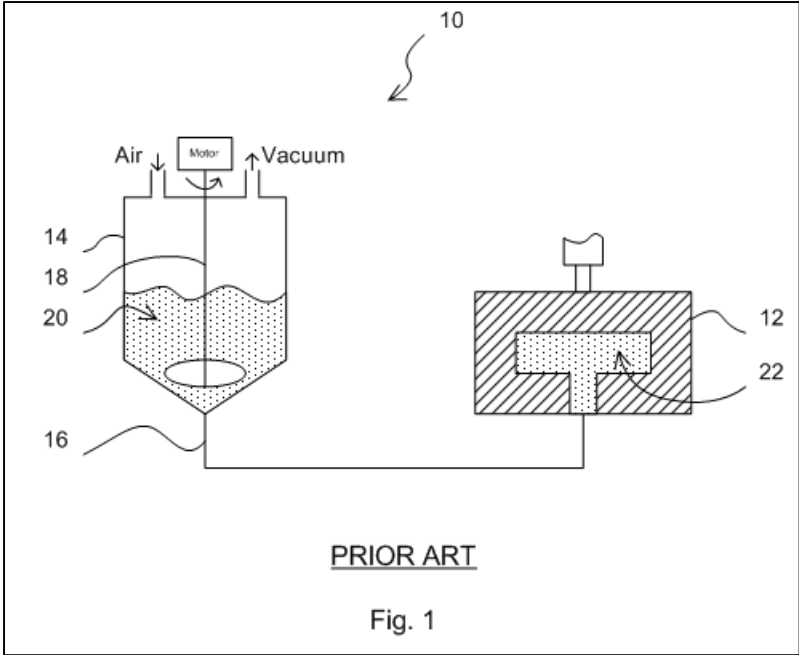
- mixing a feedstock within a container;
- aligning an injection cylinder with an outlet of the container;
- filing the injection cylinder with the feedstock by displacing a piston of the cylinder away from the outlet;
- aligning the injection cylinder with an inlet of a mold; and
- injecting the feedstock into the inlet by displacing the piston towards the inlet for transferring the feedstock within a mold cavity;
- hardening of the feedstock within the mold cavity; and
- retrieving the hardened feedstock from the mold.

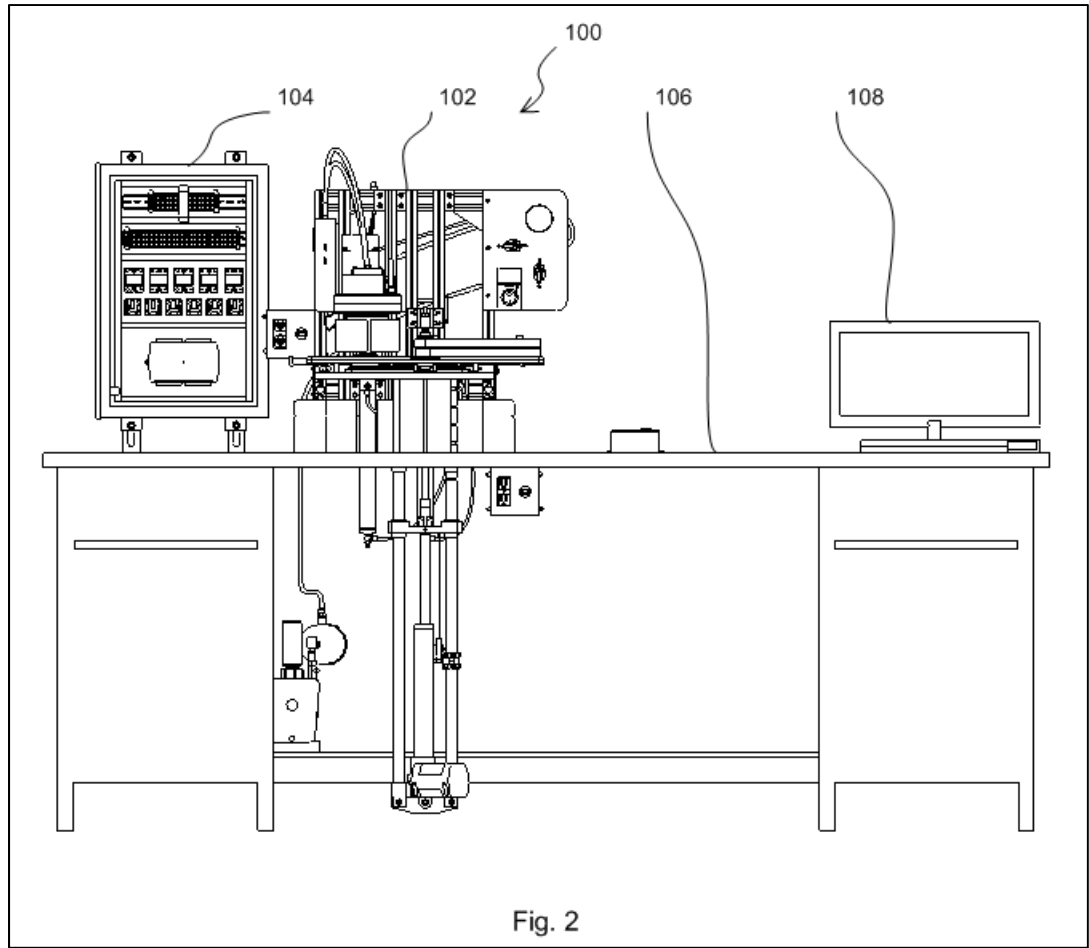
ABSTRACT

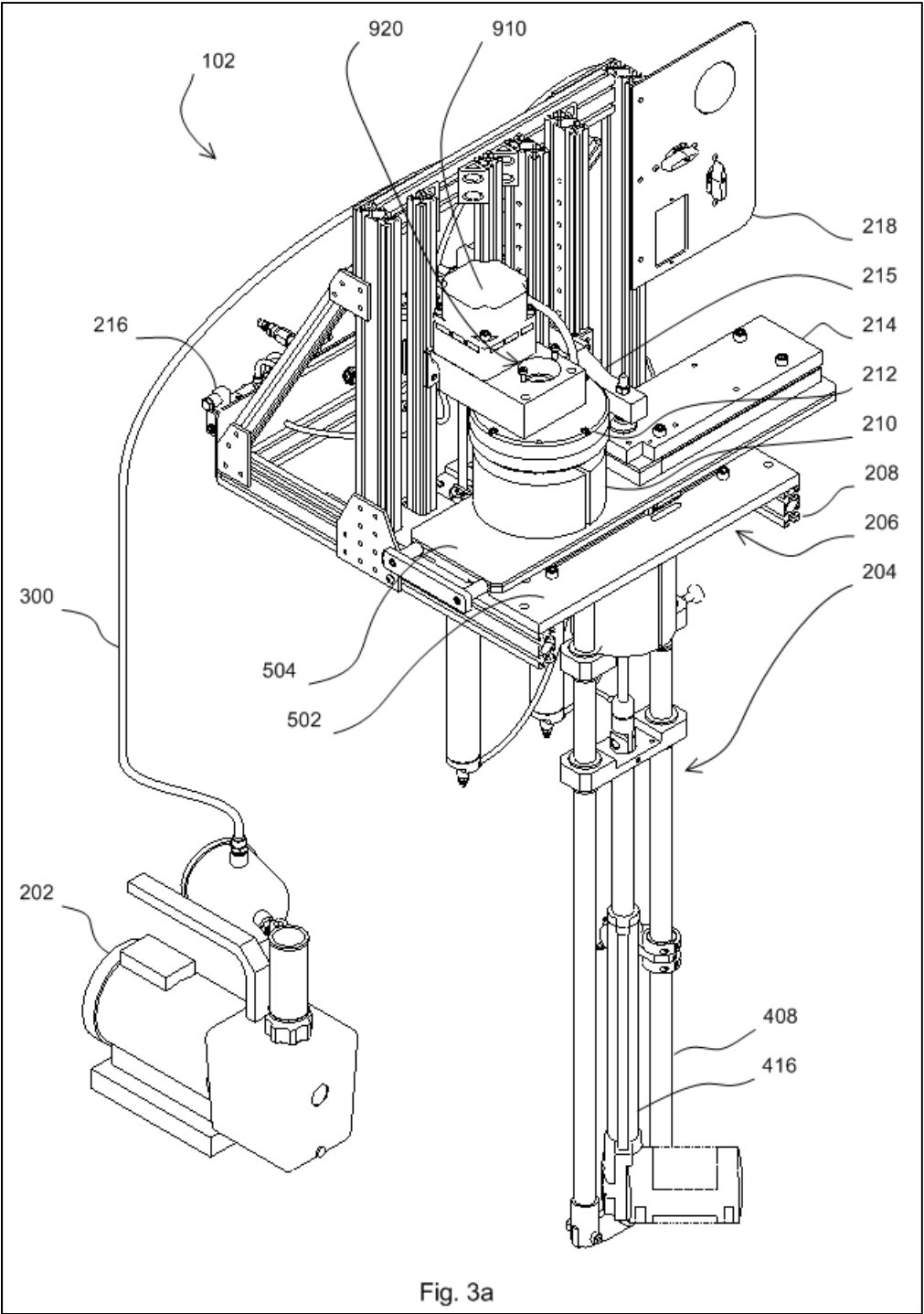
A low-pressure powder injection molding machine, a kit thereof kit and a method thereof. The machine has a base structure, a moveable platform and an injection device. The moveable platform is mountable on the base. The platform defines a first side and an opposite second side and further defines a cylinder passage from the first side to the second side. The platform is moveable from a container alignment position to a mold alignment position in order to align the cylinder passage with an outlet of a container when the container is placed on the second side and with an inlet of a mold when the mold is placed on the second side, respectively. The injection device is mountable on the moveable platform at the first side. The injection device has a cylinder adapted to engage the cylinder passage and adapted to hold feedstock therein. The cylinder has a piston therein that is displaceable away from the moveable platform for admitting at least part of the feedstock from the container into the cylinder when the cylinder is in the container alignment position and displaceable

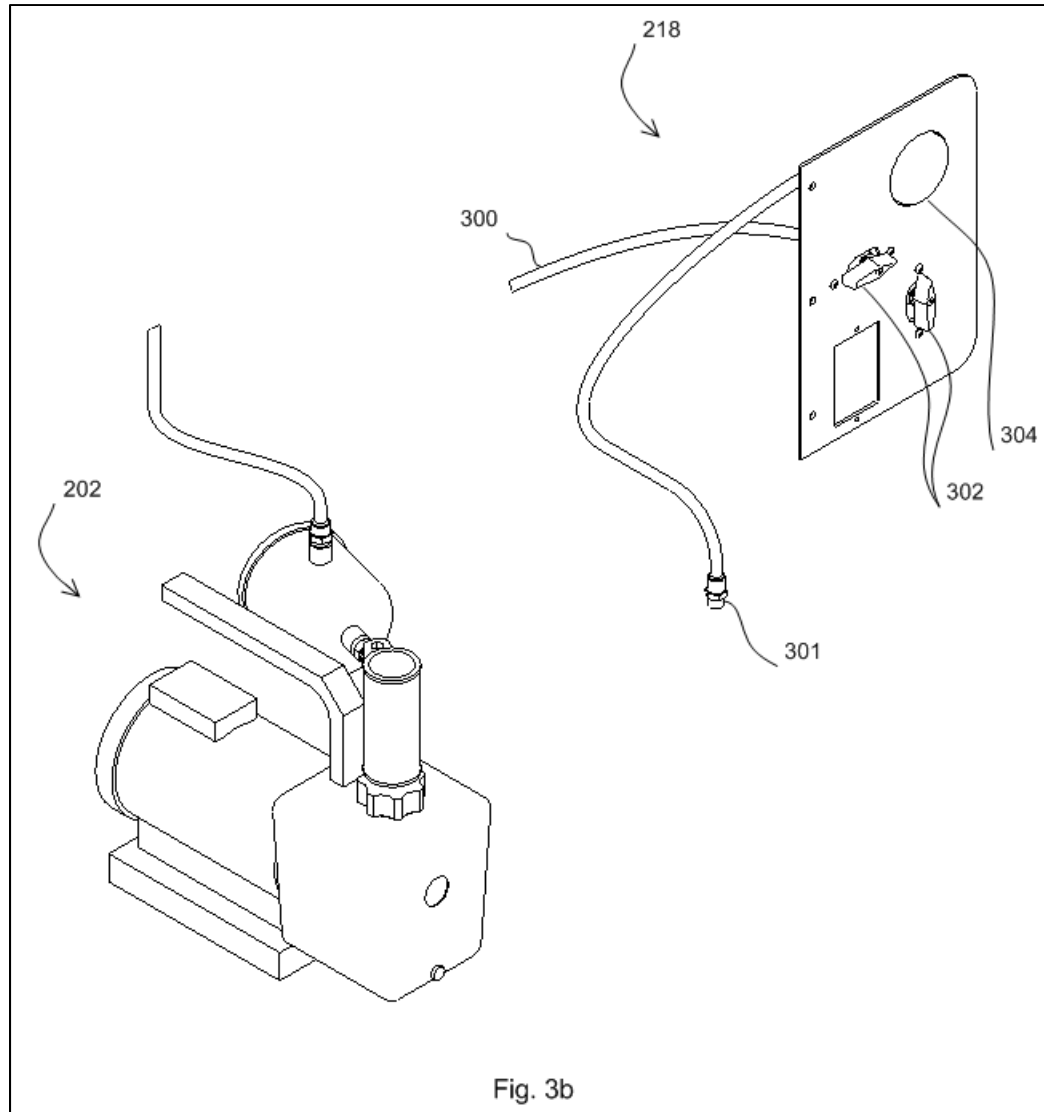
toward the moveable platform for ejecting at least part of the feedstock from the cylinder when the cylinder is in the mold alignment position.

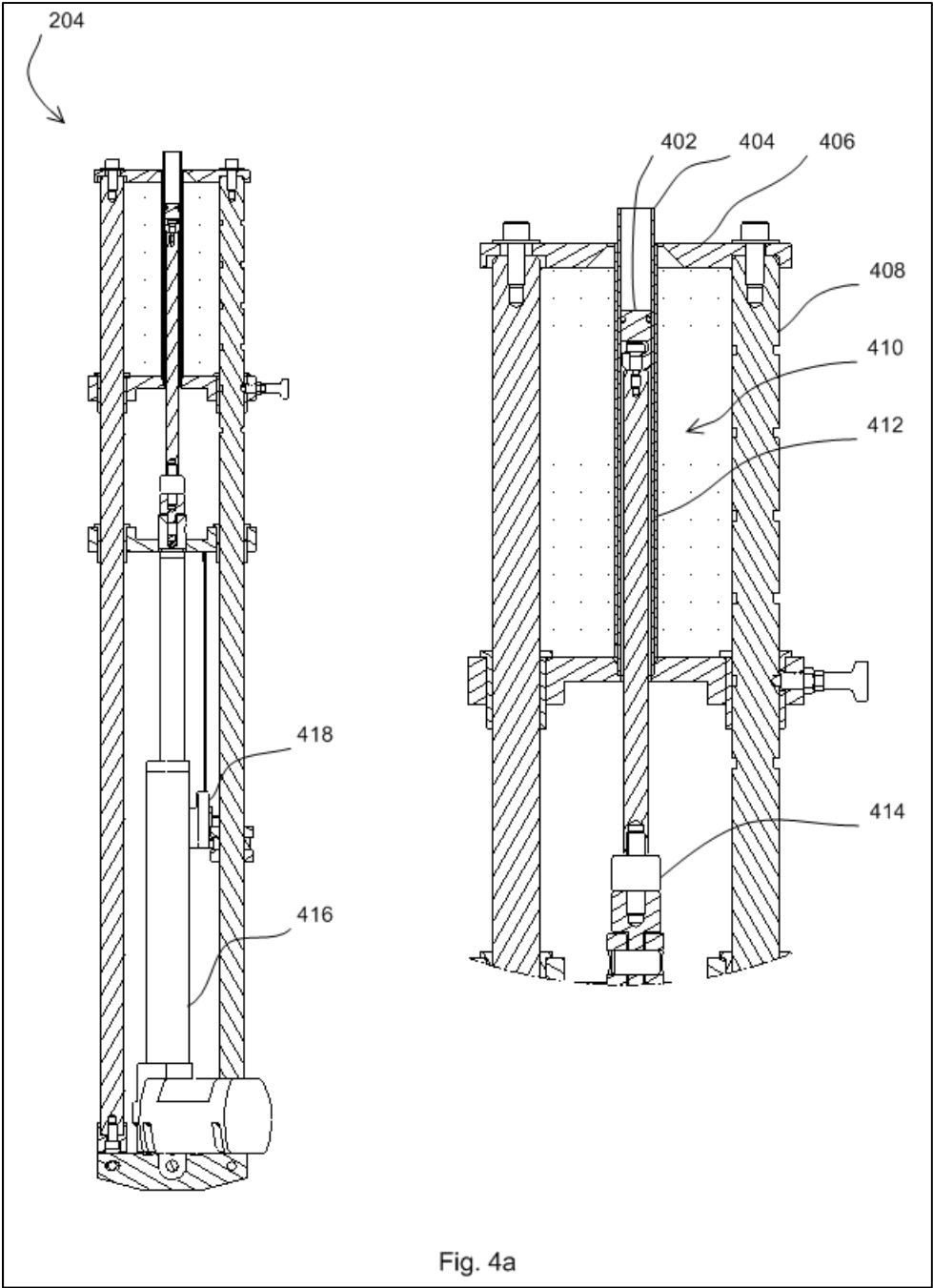
FIGURES

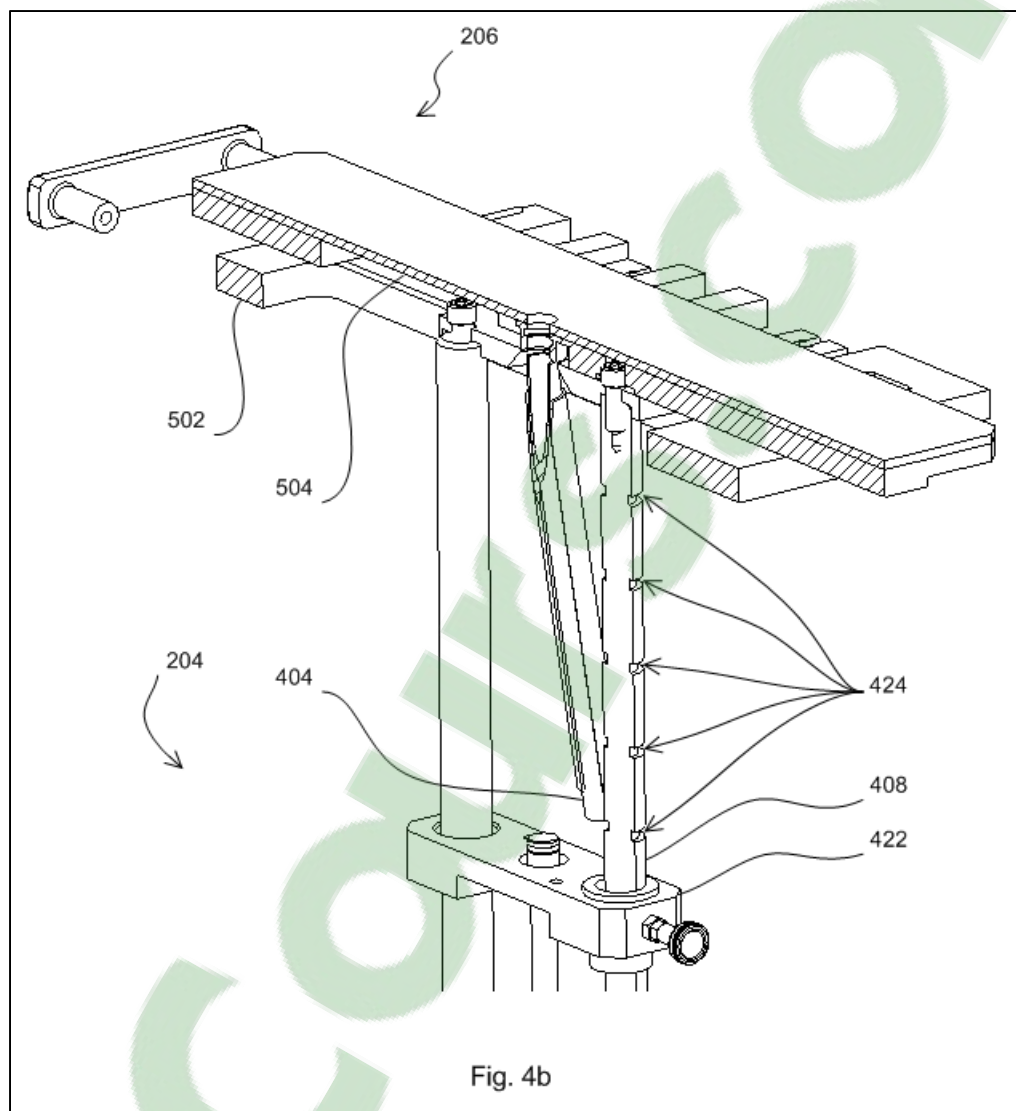


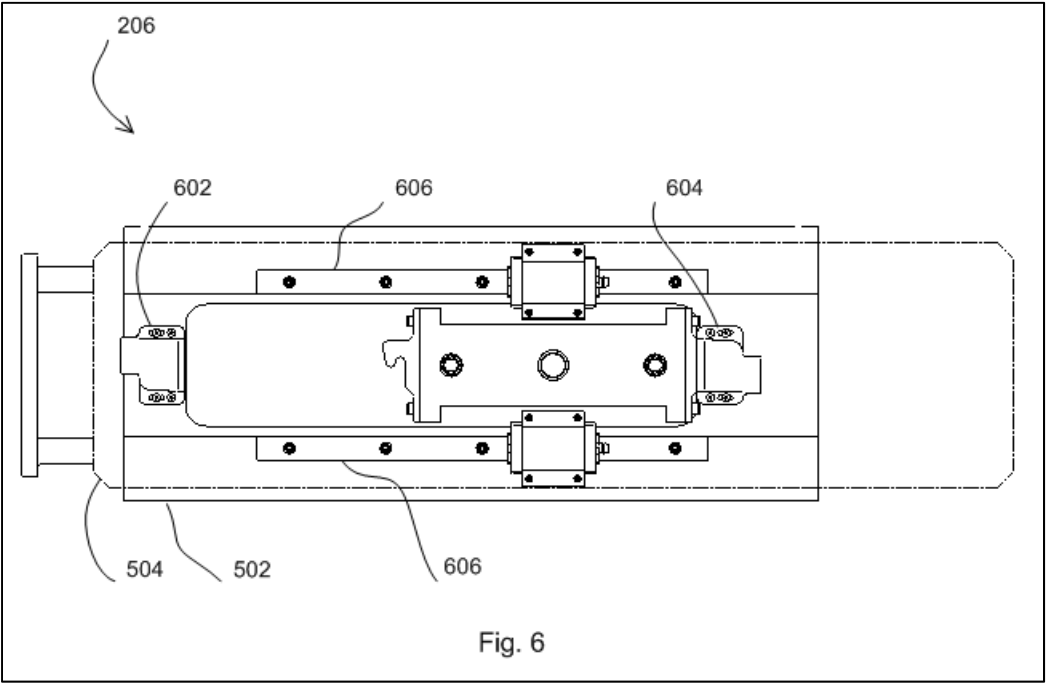
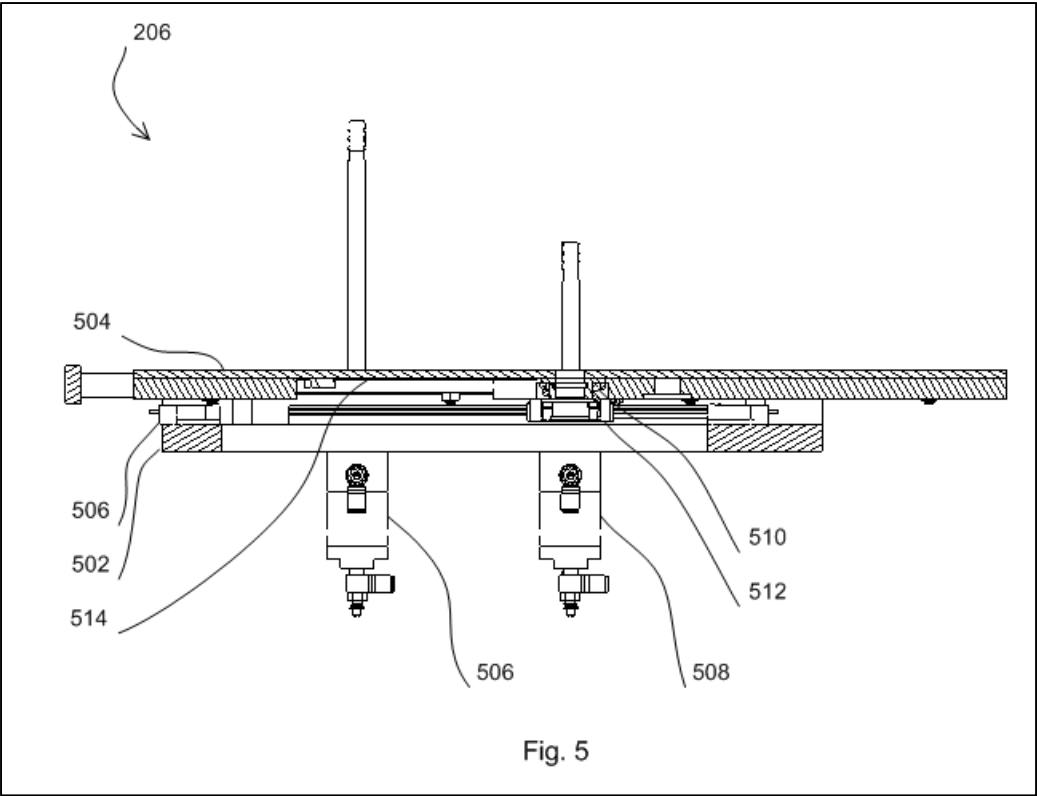


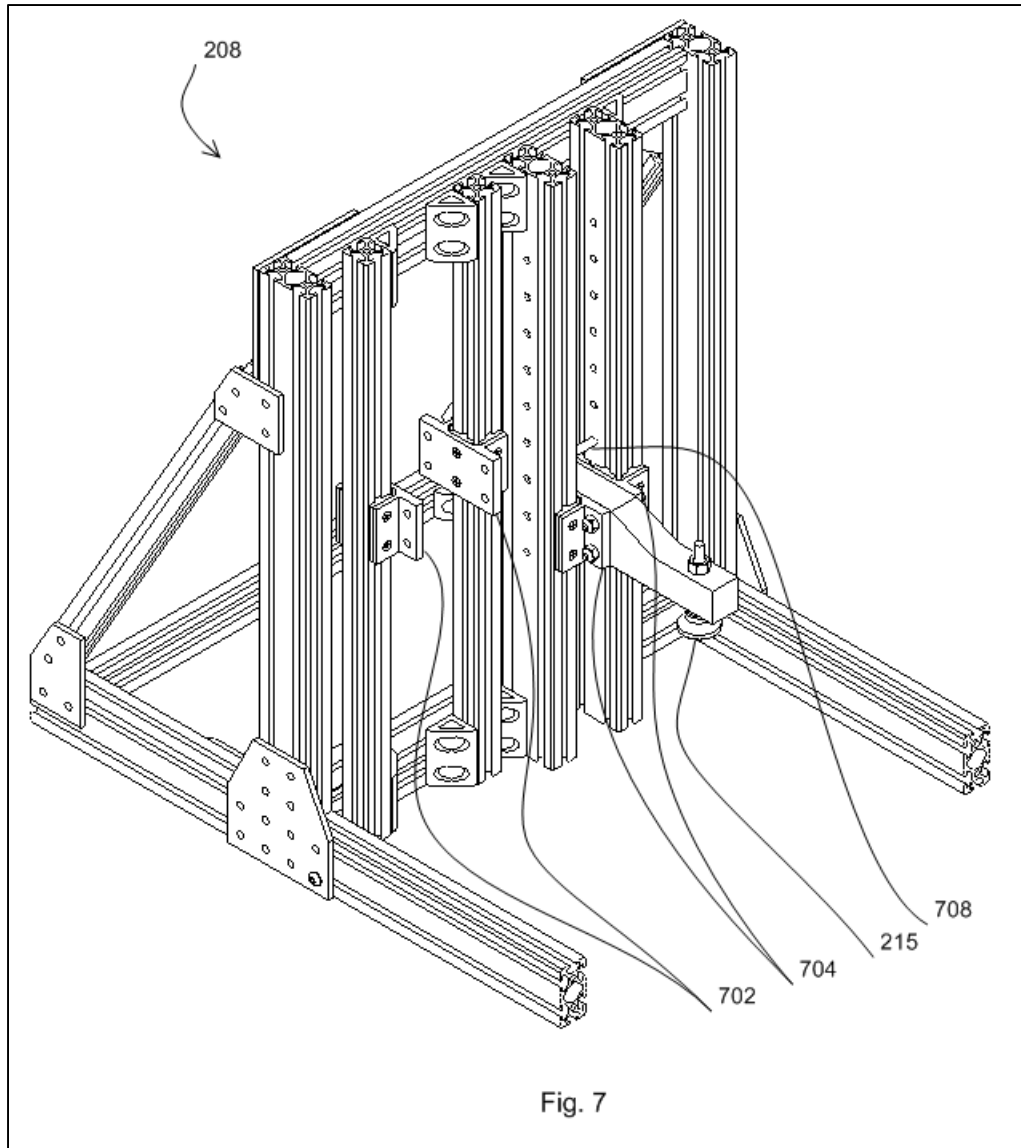


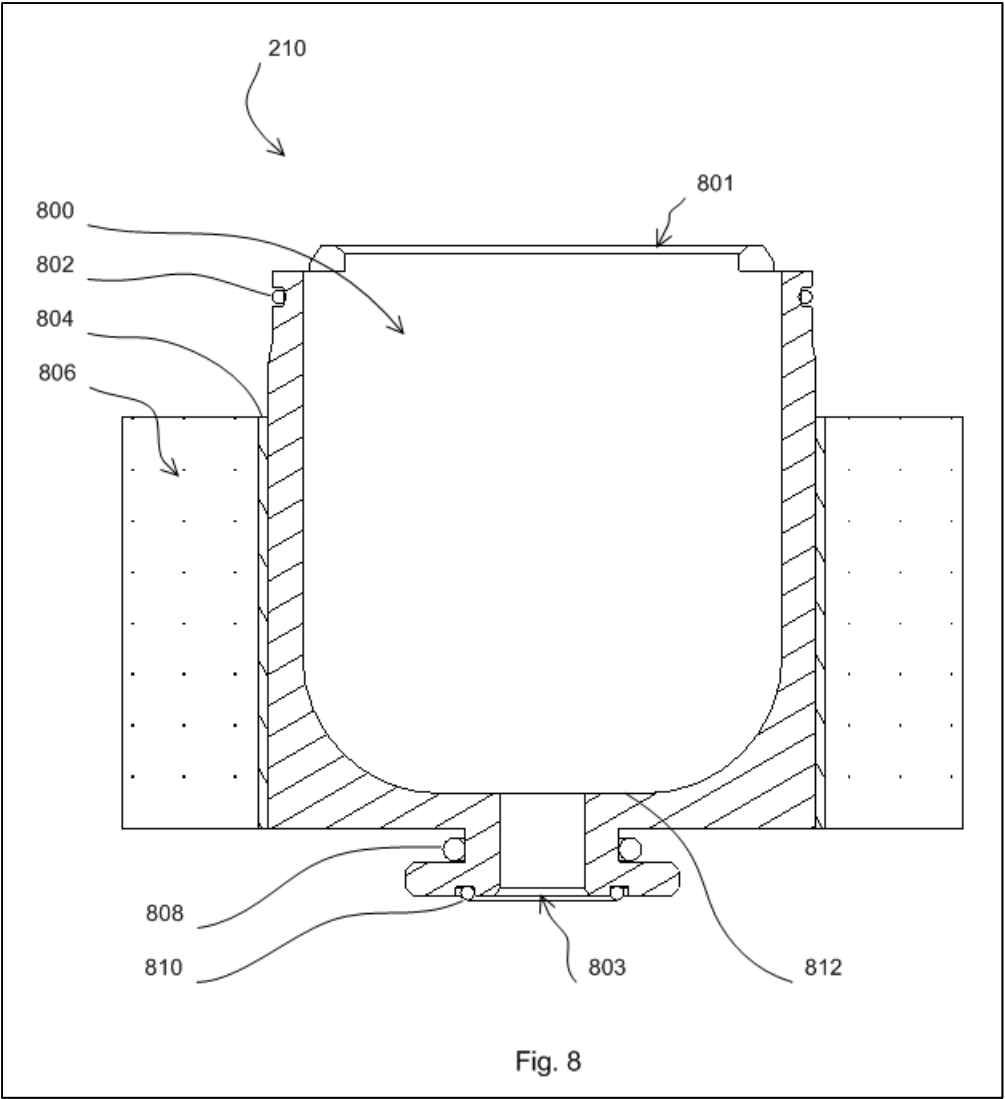


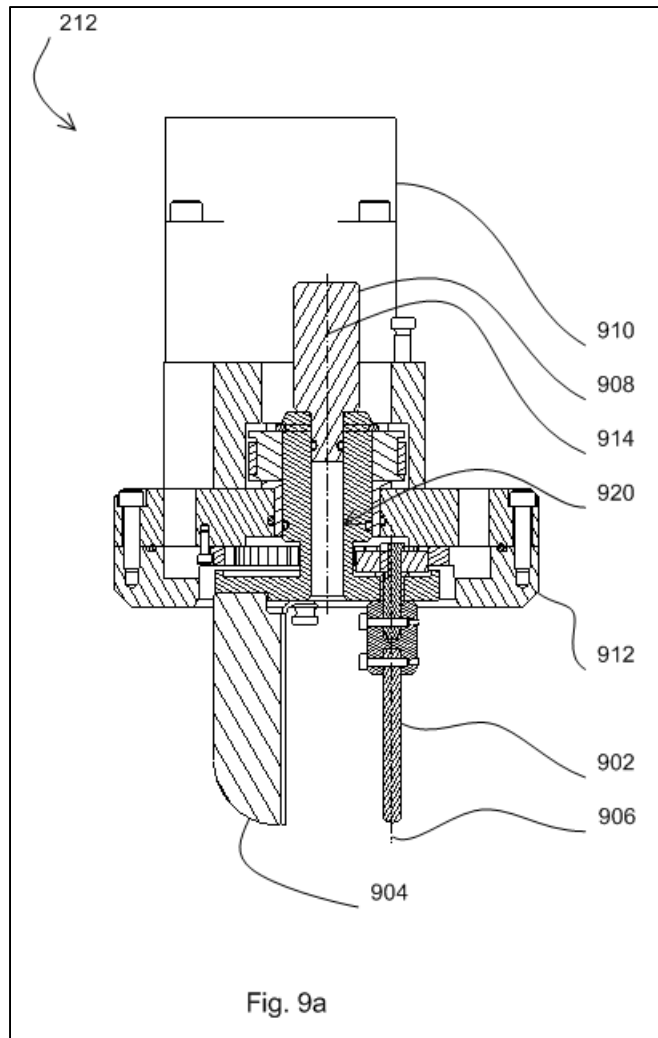


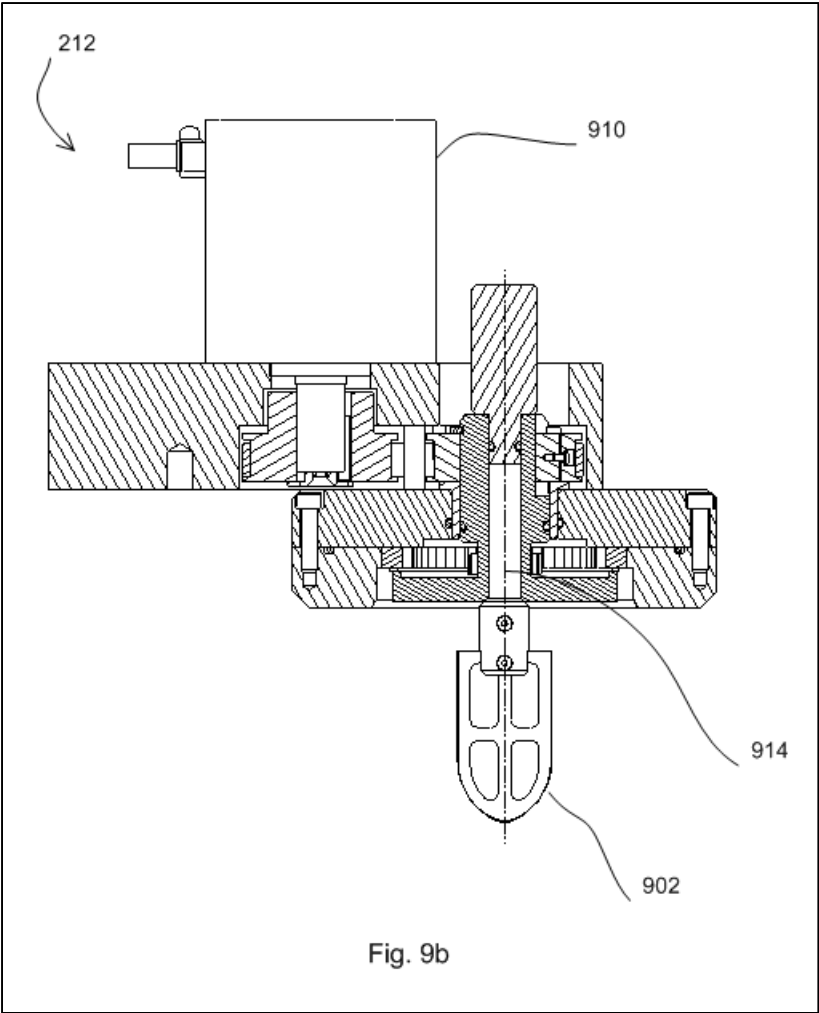


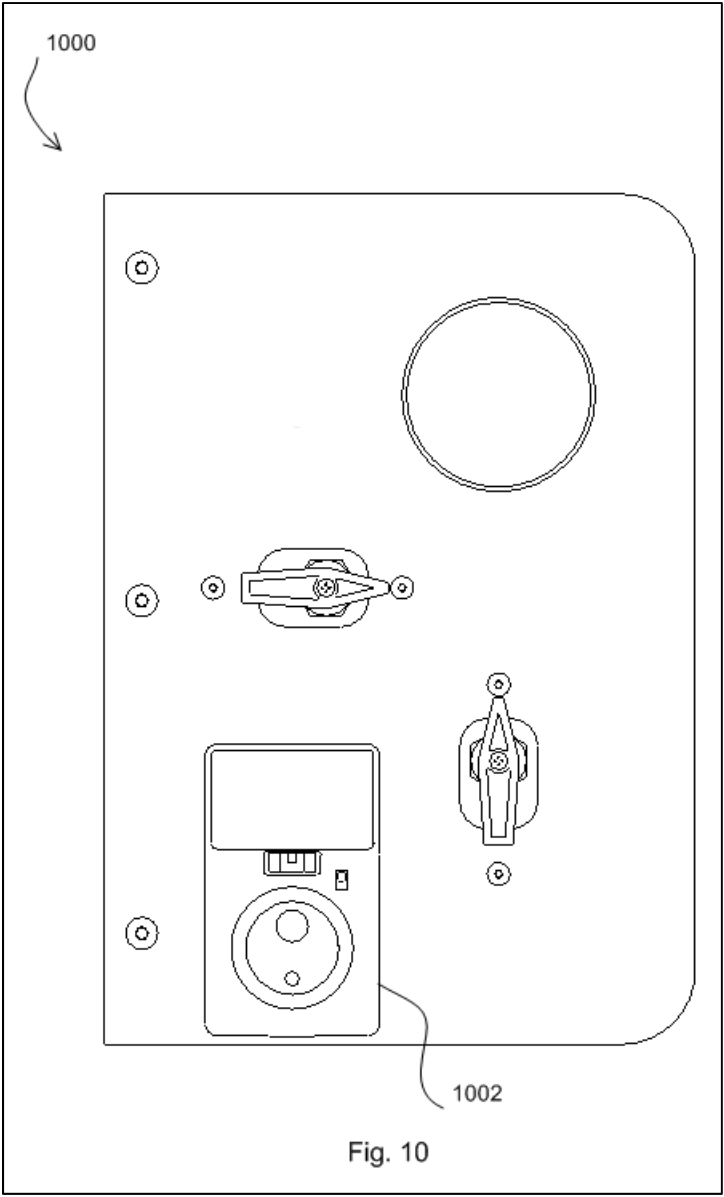


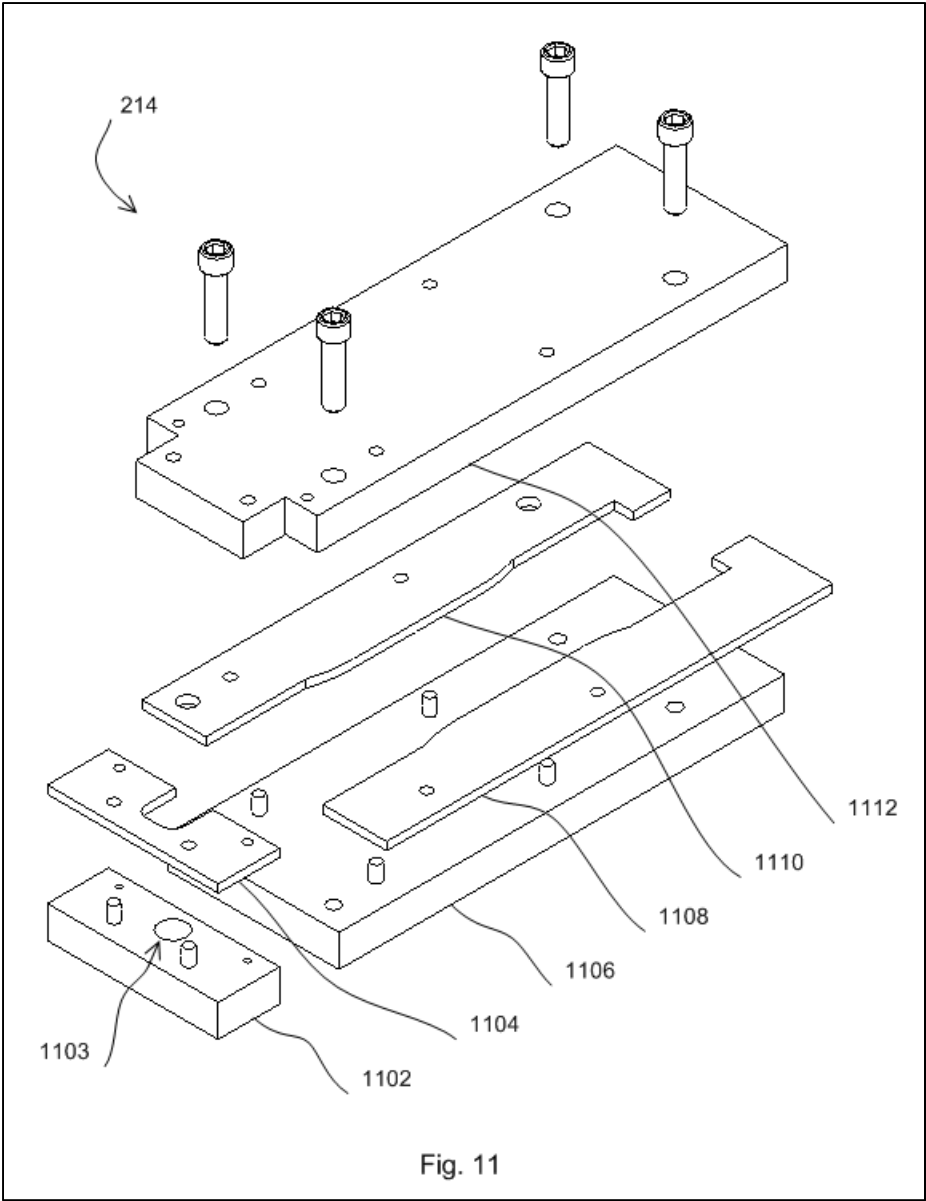


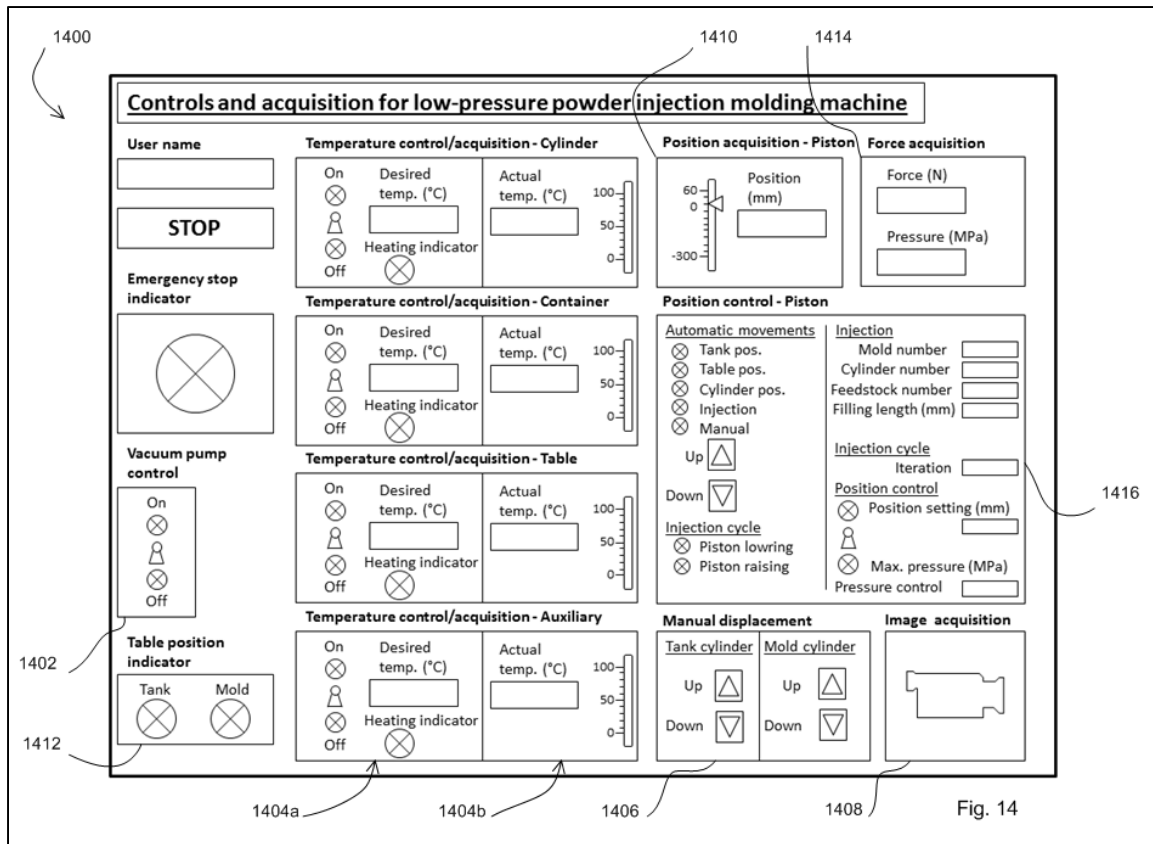


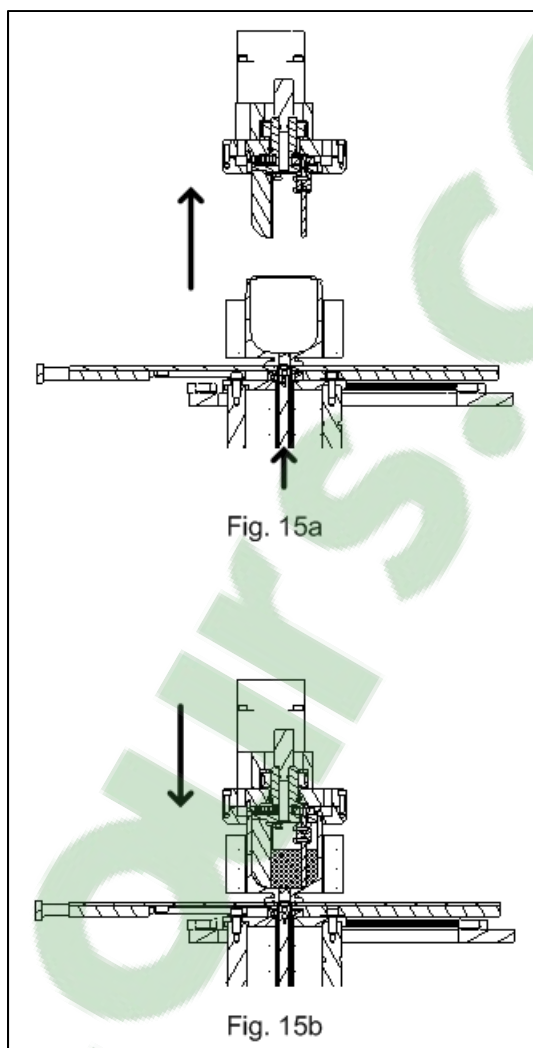


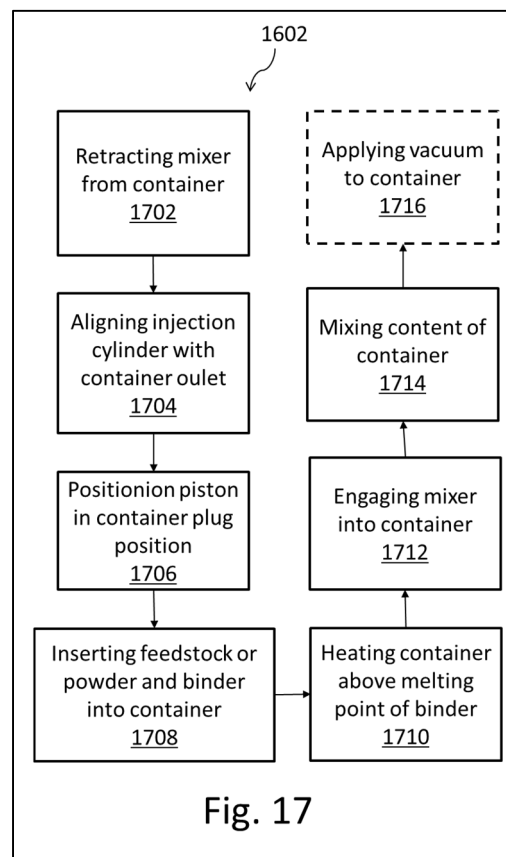
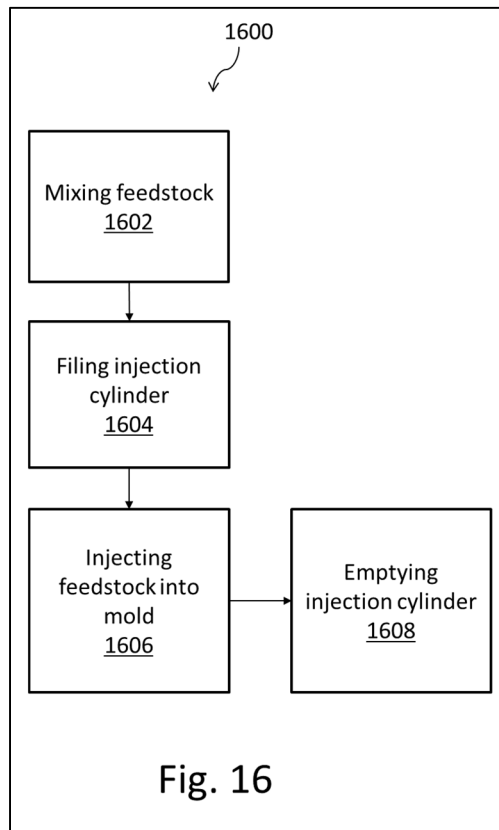
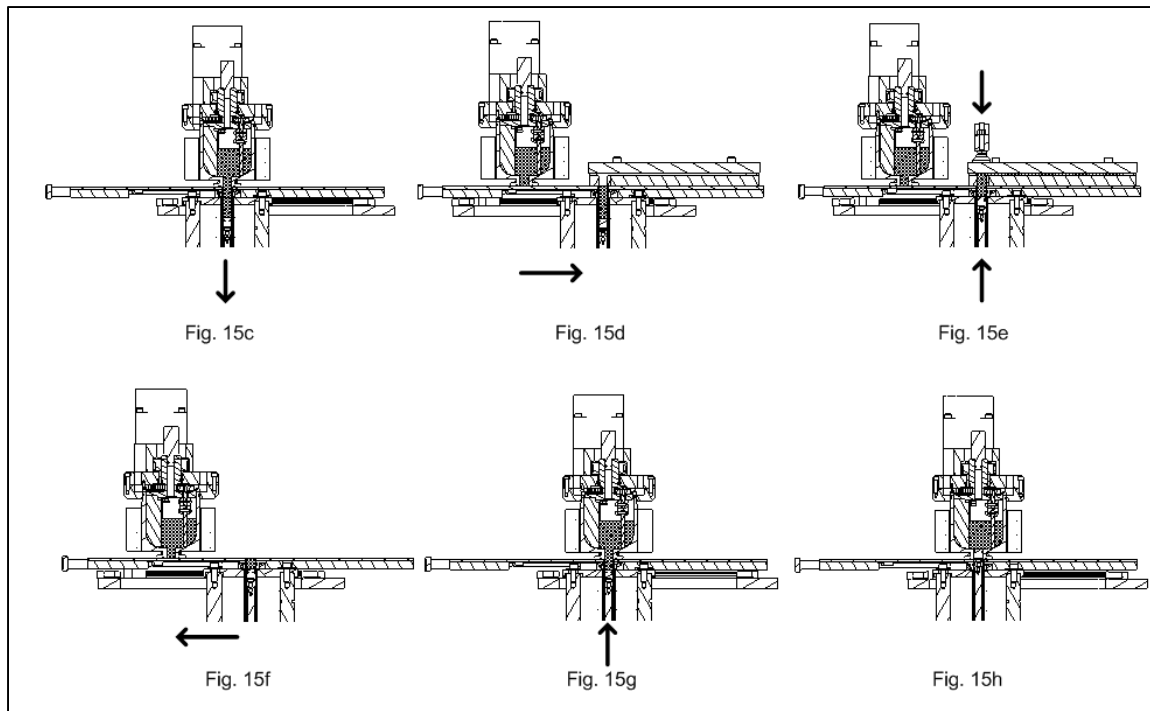


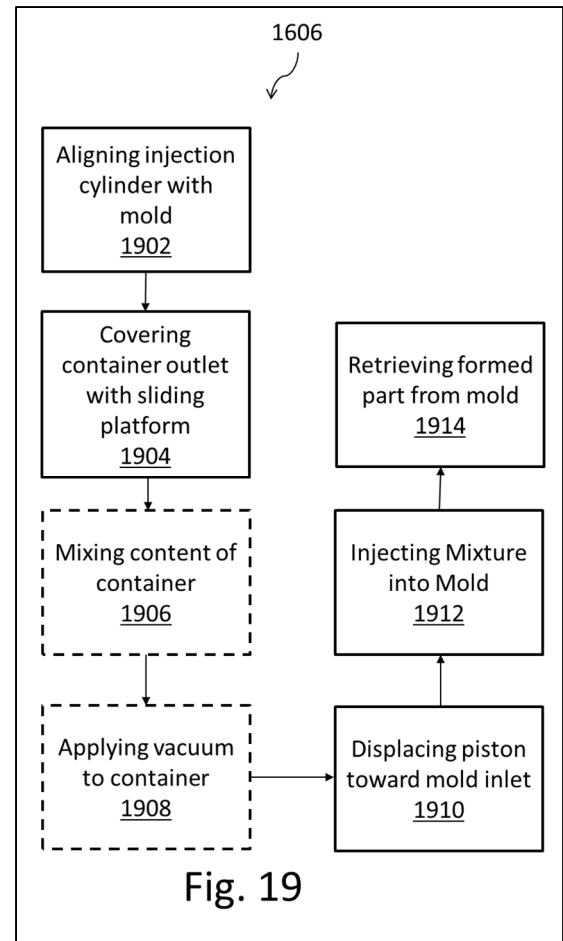
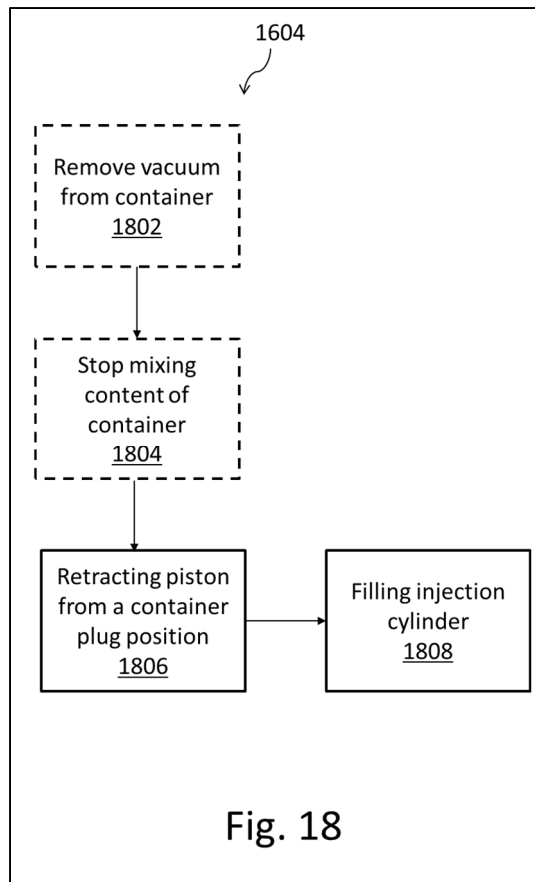


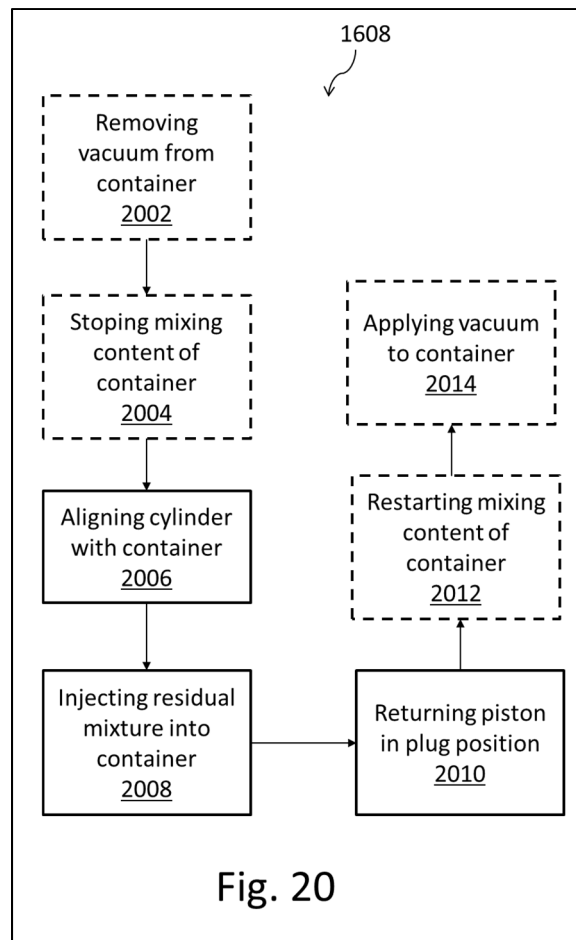






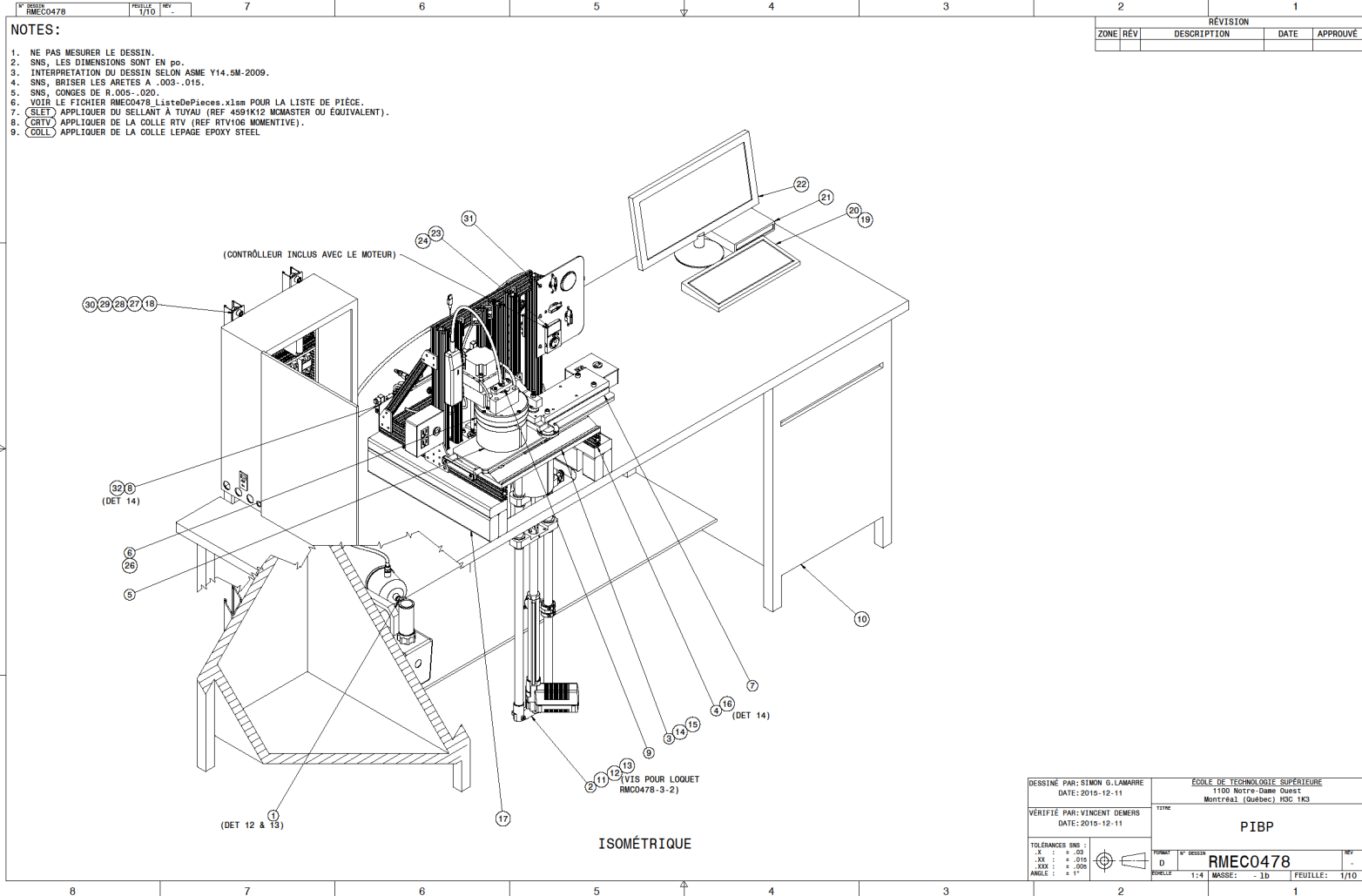


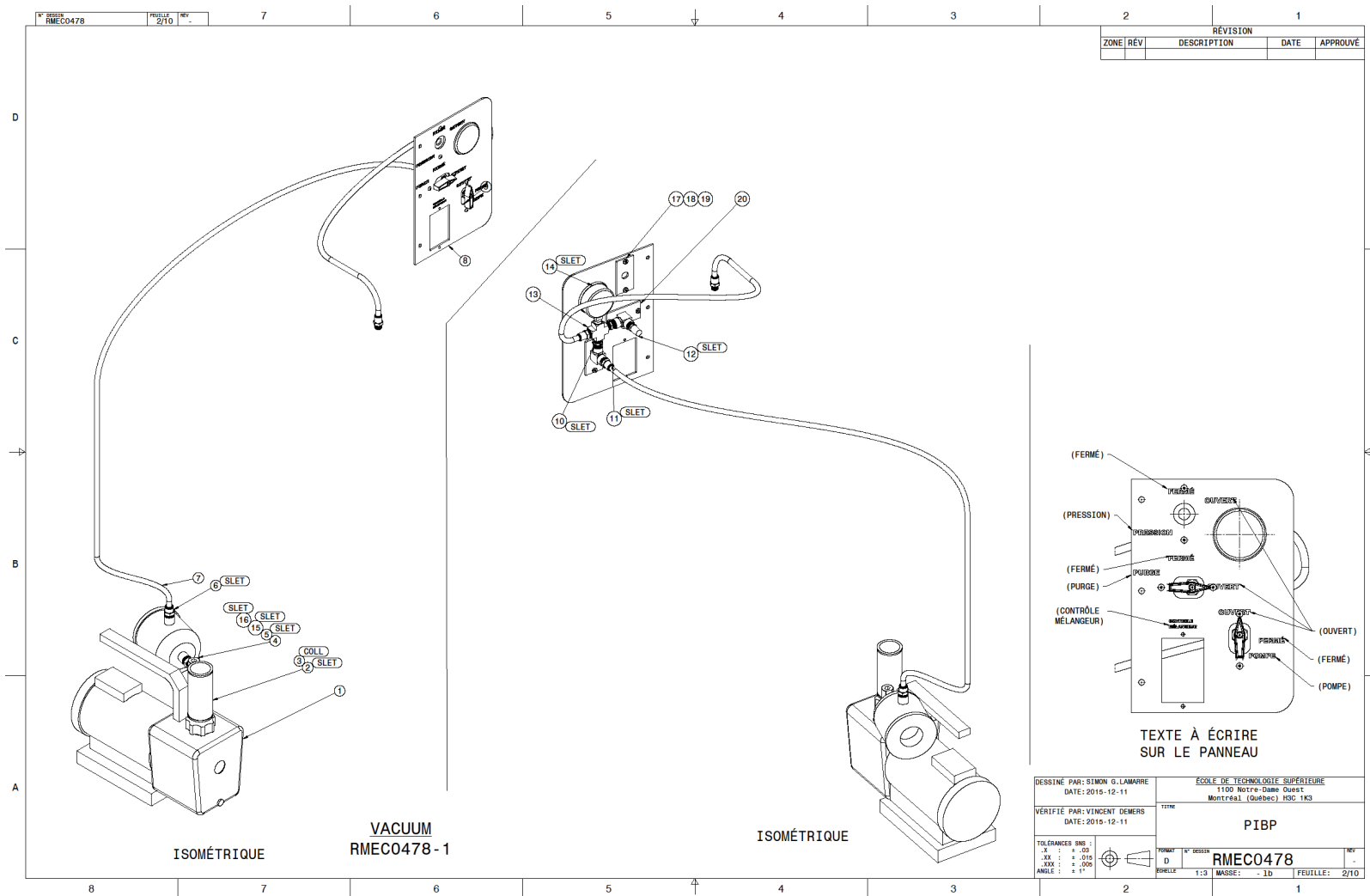


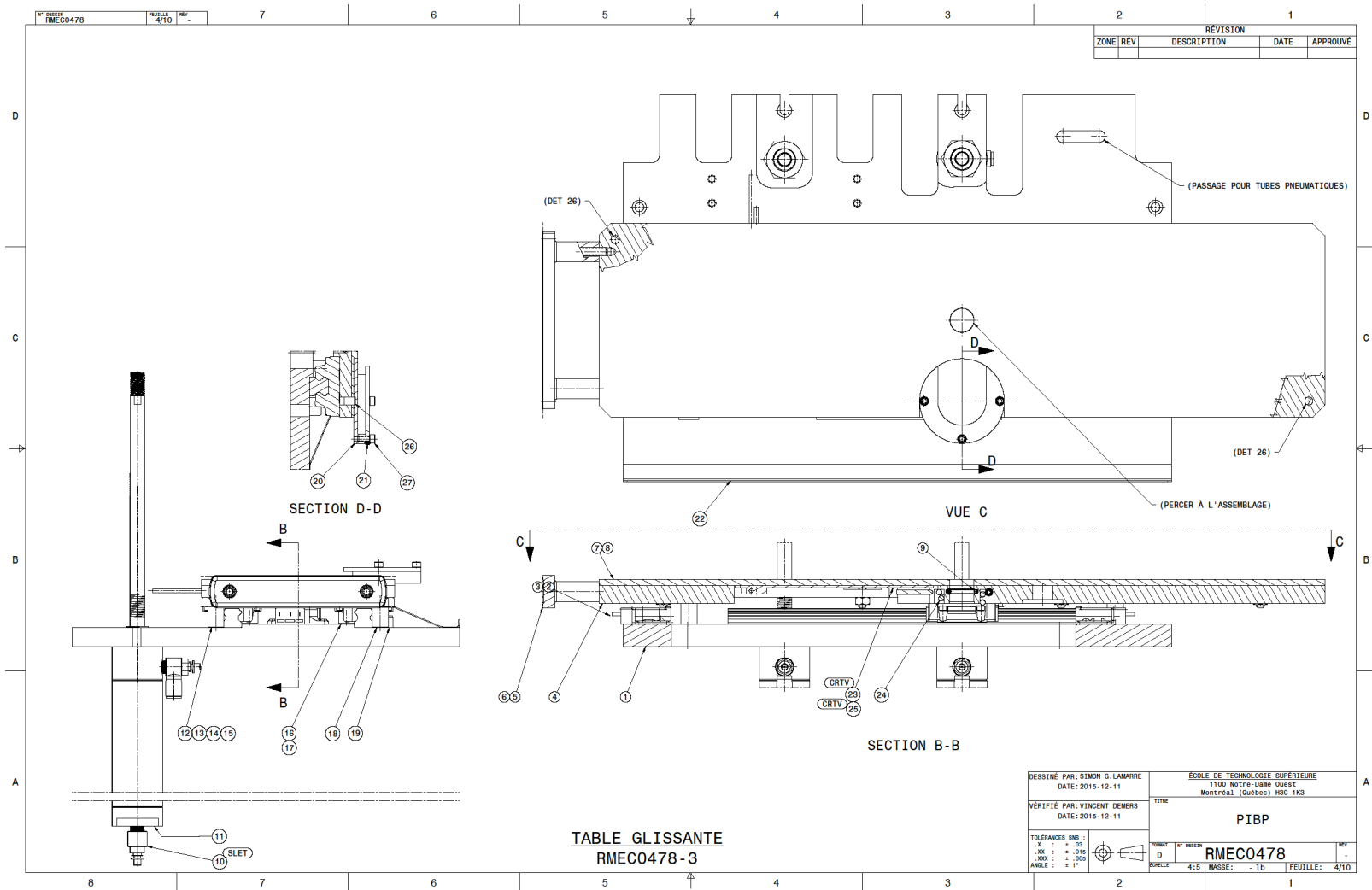


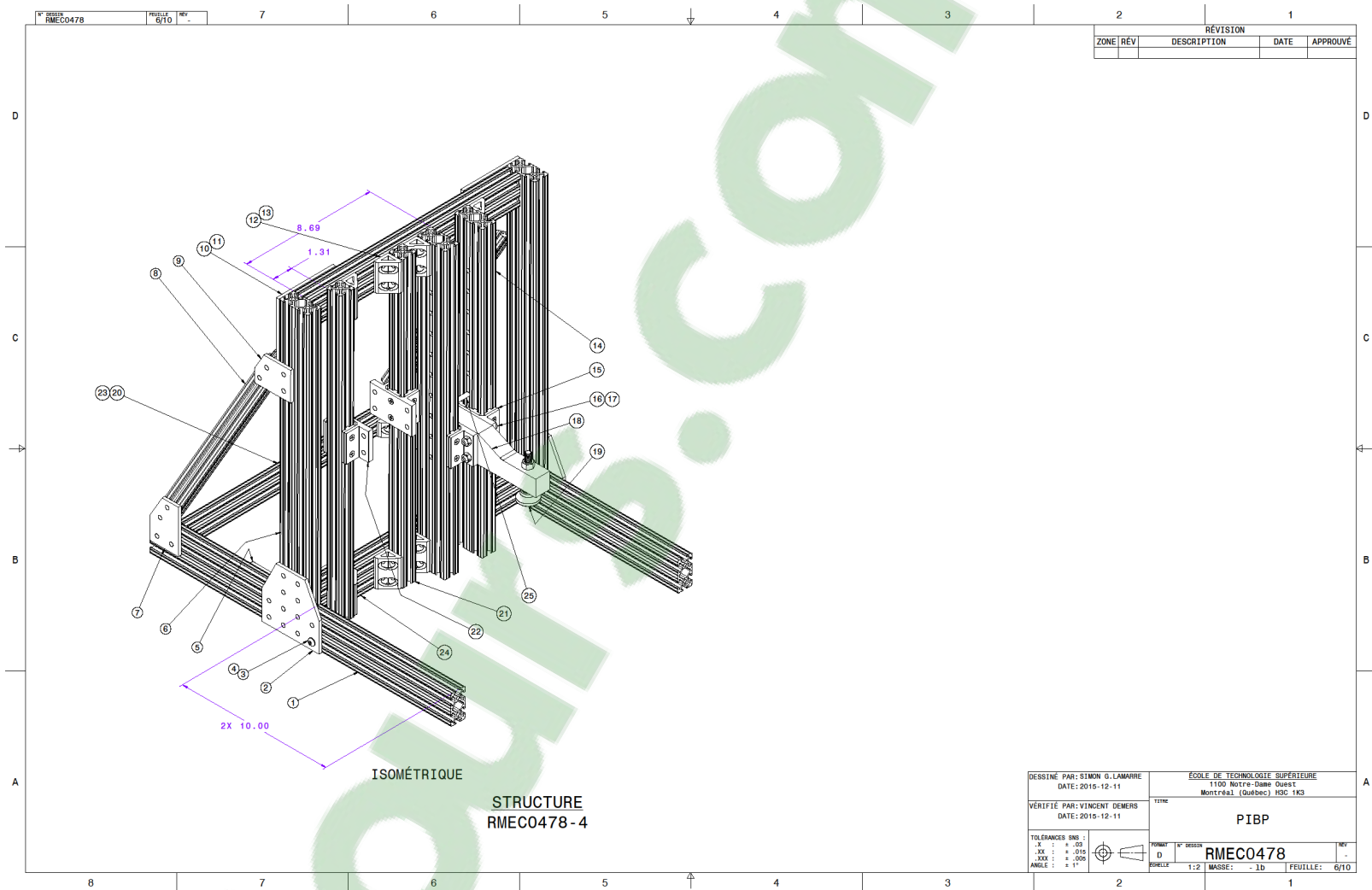
ANNEXE III

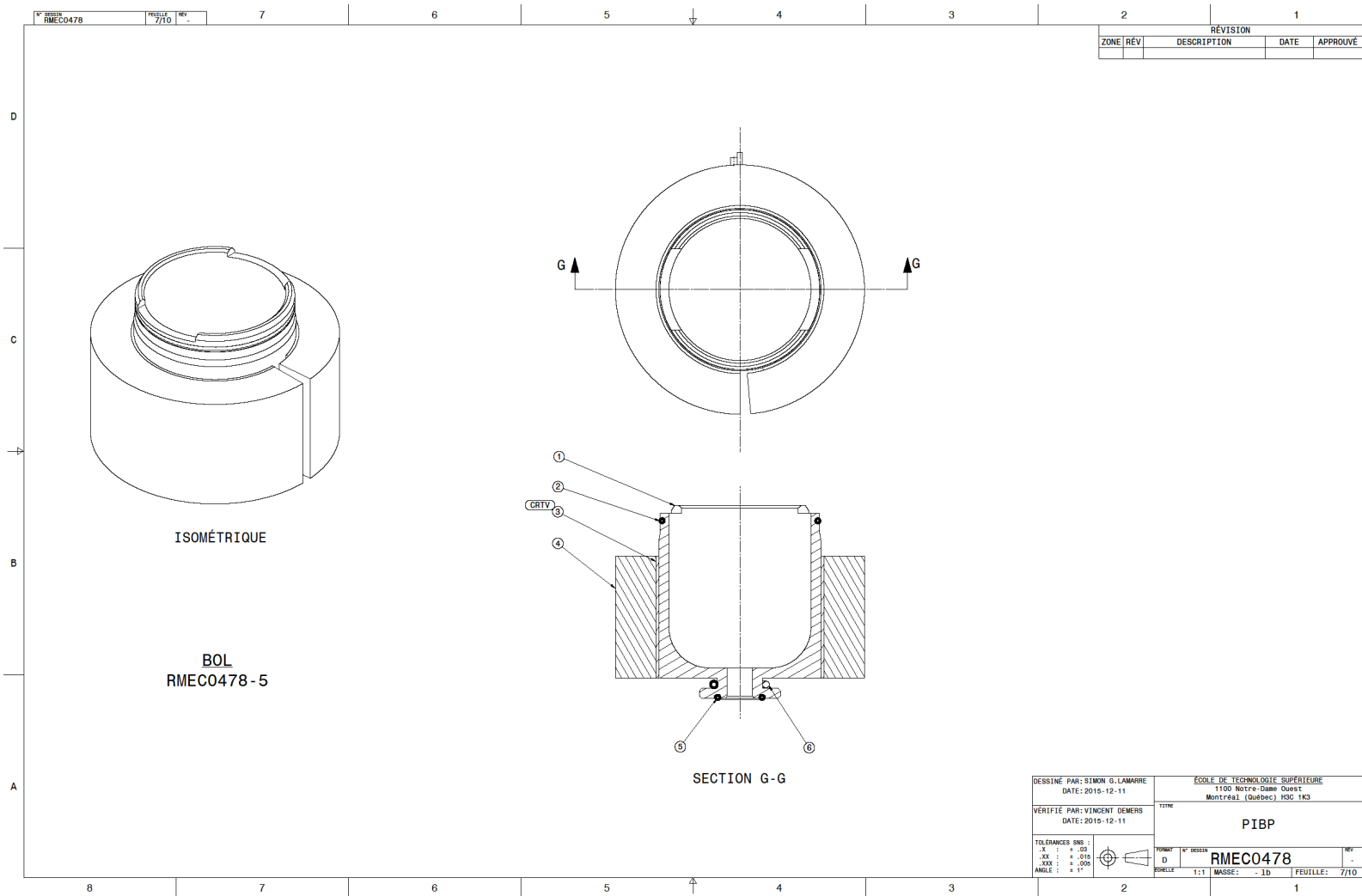
DESSINS D'ASSEMBLAGE ET LISTE DE PIÈCES

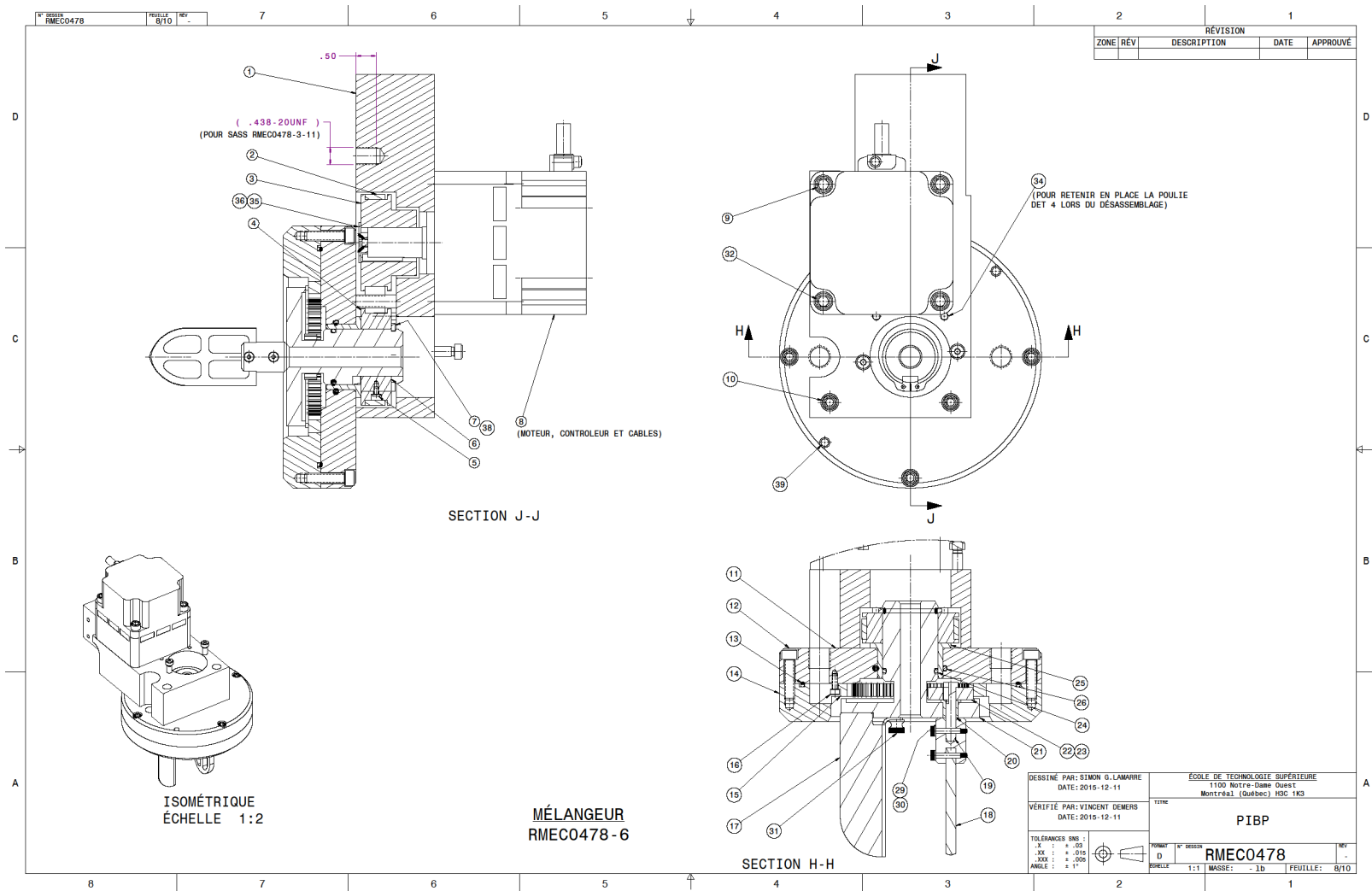


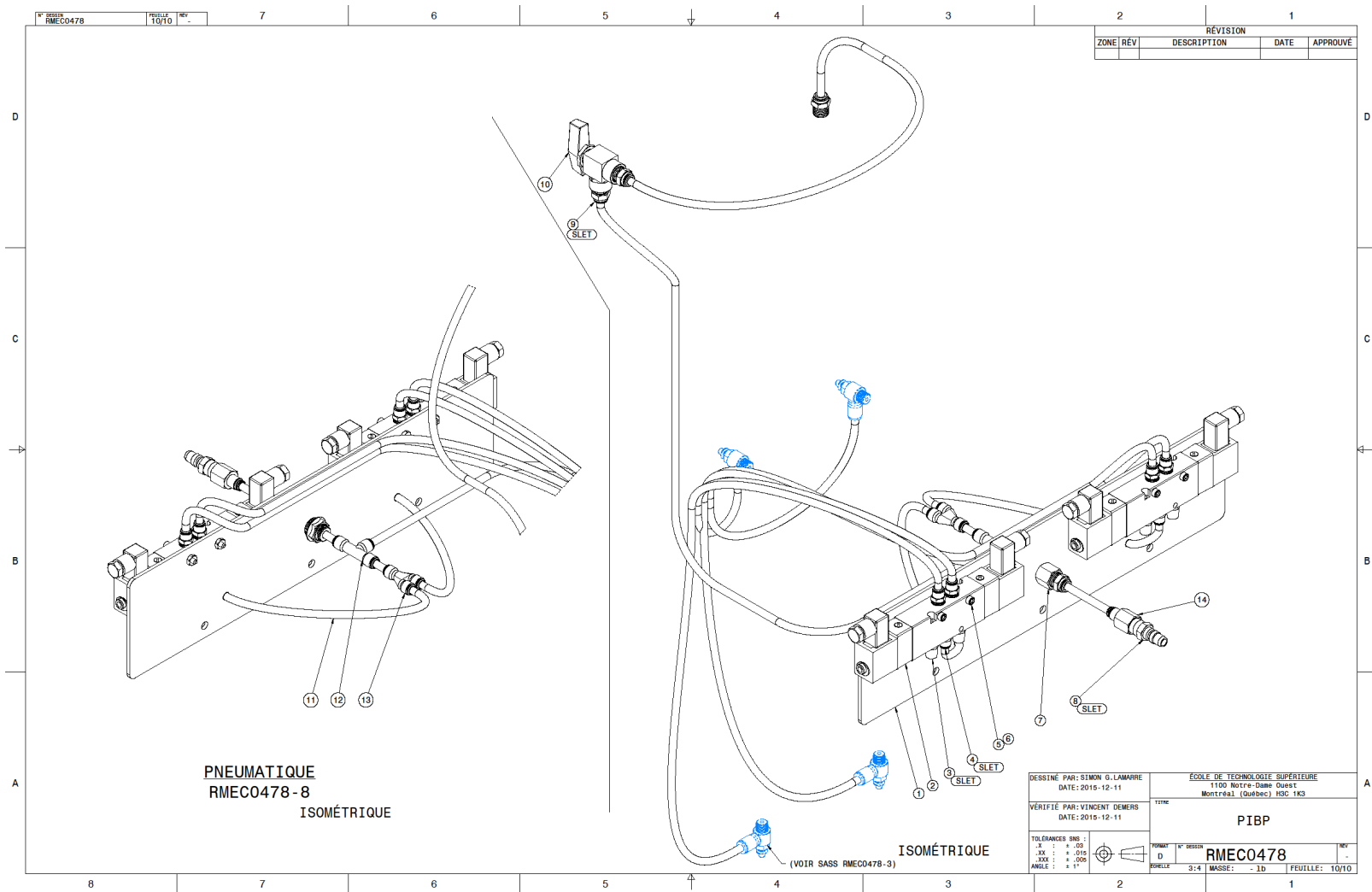












RMEC0478						
Numéro	Quantité	Référence	Matériau	Source	Numéro de pièce	Fournisseur
1	1	RMEC0478-1 (SASS VACUUM)		ASSEMBLÉ		
2	1	RMEC0478-2 (SASS CYLINDRE)		ASSEMBLÉ		
3	1	RMEC0478-3 (SASS TABLE GLISSANTE)		ASSEMBLÉ		
4	1	RMEC0478-4 (SASS STRUCTURE)		ASSEMBLÉ		
5	1	RMEC0478-5 (SASS BOL)		ASSEMBLÉ		
6	1	RMEC0478-6 (SASS MELANGEUR)		ASSEMBLÉ		
7	1	RMEC0478-7 (SASS MOULE)		ASSEMBLÉ		
8	1	RMEC0478-8 (SASS PNEUMATIQUE)		ASSEMBLÉ		
9	1	RMEC0478-9 (SASS CAMERA)		ASSEMBLÉ		
10	1	TABLE 60X30	ACIER ET BOIS	ACHETÉ		
11	4	SHCS 0250X0625	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
12	2	SVP 0250X0750	ACIER	ACHETÉ	97352A110	MCMaster
13	4	SHCS No8X0375	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
14	30	T NUT 1X1 0250	ACIER	ACHETÉ	3382	8020
15	6	SHCS 0250X0500	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
16	1	SHCS 0250X1750	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
17	1	ELEVATION	BOIS	FABRIQUÉ		
18	1	RMEC0478-E (SASS ELECTRIQUE)		ASSEMBLÉ		
19	1	SOURIS	PLASTIQUE	ACHETÉ		
20	1	CLAVIER	ACIER	ACHETÉ		
21	1	ORDINATEUR	ACIER	ACHETÉ		
22	1	ECRAN	ACIER	ACHETÉ		
23	2	SHCS No8X0500	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
24	2	MSN No8	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.6.3	
25		NON UTILISÉ				
26	8	SHCS 0250X0875	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
27	1	STRUT CHANNEL 1625X1625	ACIER	ACHETÉ	3310T4	MCMaster
28	4	SHCS 0500X1000	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
29	4	WASHER 0500	ACIER	ACHETÉ		
30	4	HN 0500	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.2.2	
31	3	BHCS 0250X0375	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
32	3	SHCS 0250X0375	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	

	1	RTV106 10.1oz	COLLE	ACHETÉ	74975A56	MCMaster
	1	COLLE LEPAGE EPOXY STEEL	COLLE	ACHETÉ		

RMEC0478-01						
Numéro	Quantité	Référence	Matériau	Source	Numéro de pièce	Fournisseur
1	1	POMPE VACUUM	ACIER	ACHETÉ	VP2D	CPS
2	1	OIL MIST MUFFLER	ACIER INOXYDABLE	ACHETÉ	9850K52	MCMaster
3	1	RMEC0478-1-3 (ADAPTEUR MUFFLER)	6061-T6	FABRIQUÉ		
4	1	FILTRE	ACIER	ACHETÉ	5169K71	MCMaster
5	1	LONG NUT FLARE 0375	LAITON	ACHETÉ	50635K554	MCMaster
6	1	ADAPTEUR DROIT T-M 0375NPT	LAITON	ACHETÉ	5779K117	MCMaster
7	1	TUBING	PLASTIQUE	ACHETÉ	52315K17 NOIR	MCMaster
8	1	RMEC0478-1-8 (PANNEAU)	6061-T6	FABRIQUÉ		
9	2	BALL VALVE PANEL ELBOW F 0250NPT	LAITON	ACHETÉ	4118T64	MCMaster
10	2	HEX NIPPLE M-M 0250NPT	LAITON	ACHETÉ	5485K22	MCMaster
11	3	ADAPTEUR DROIT T-M 0250NPT	LAITON	ACHETÉ	5779K116	MCMaster
12	1	MUFFLER	LAITON	ACHETÉ	4450K2	MCMaster
13	1	CROSSE F 0250NPT	LAITON	ACHETÉ	50785K233	MCMaster
14	1	MANOMETRE	ACIER	ACHETÉ	3941K5330-0a15	MCMaster
15	1	COMPACT 90 ELBOW 0250NPT M-F	LAITON	ACHETÉ	5021T54	MCMaster
16	1	HEX NIPPLE REDUCING 0250NPT 0375NPT	LAITON	ACHETÉ	5485K32	MCMaster
17	1	RMEC0478-1-17 (PLAQUE VALVE 2)	6061-T6	FABRIQUÉ		
18	6	BHCS No8X0375	ACIER	ACHETÉ	ASMEB18.3	
19	6	MSN No8	ACIER	ACHETÉ	ASMEB18.6.3	
20	2	RMEC0478-1-20 (PLAQUE VALVE)	6060-T6	FABRIQUÉ		

RMEC0478-02						
Numéro	Quantité	Référence	Matériau	Source	Numéro de pièce	Fournisseur

1	1	RMEC0478-2-1 (ATTACHE SUPERIEURE)	CSA G40.21-44W	FABRIQUÉ		
2	2	SHCS 0375X1000	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
3	1	TIGE ACTUATEUR SR	ACIER	ACHETÉ	6061K656	MCMaster
4	1	TIGE ACTUATEUR AR	ACIER	ACHETÉ	6061K656	MCMaster
5	1	BUSHING 1.0 ID AT	ACIER	ACHETÉ	6338K439	MCMaster
6	3	BUSHING 1.0 ID ST	ACIER	ACHETÉ	6338K439	MCMaster
7	1	RMEC0478-2-7 (LIEN CYLINDRE)	CSA G40.21-44W	FABRIQUÉ		
8	1	RMEC0478-2-8 (ADAPTEUR ACTUATEUR)	CSA G40.21-44W	FABRIQUÉ		
9	2	SHLD 0375X1250	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
10	2	HN 0313	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.2.2	
11	1	RMEC0478-2-11 (SUPPORT CABLE)	CSA G40.21-44W	FABRIQUÉ		
12	2	SPACER	ACIER	ACHETÉ	90309A014-No8	MCMaster
13	2	SHCS No8X1250	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
14	1	SSS FP No8X0375	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
15	1	CABLE LINEAR POSITION TRANSDUCER	ACIER	ACHETÉ	6440K2	MCMaster
16	1	ACTUATEUR	ACIER	ACHETÉ	2236K13 & 2236K14 & 2236K15	MCMaster
17	1	RMEC0478-2-17 (LIEN ACTUATEUR)	CSA G40.21-44W	FABRIQUÉ		
18	1	SP 0250X2000	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.8.2	
19	1	BHCS No10X0250FP	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
20	1	SHLD 0500X1250	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
21	1	HN 0375	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.2.2	
22	1	RMEC0478-2-22 (COUPLING ACTUATEUR EXTENSION)	AISI 4140 21-29 HRC	FABRIQUÉ		
23	1	CELLULE CHARGE OMEGA LC202-2K	ACIER INOXYDABLE	ACHETÉ	LC202-2K	OMEGA
24	1	RMEC0478-2-24 (TIGE PISTON)	AISI 4140 21-29 HRC	FABRIQUÉ		
25	1	RETRACTABLE SPRING PLUNGER LN	ACIER	ACHETÉ	8480A1	MCMaster
26	1	TUBE PISTON	ACIER INOXYDABLE	ACHETÉ	3334K94-1FT	MCMaster
27	1	BANDE CHAUFFANTE CYLINDRE	RUBBER	ACHETÉ	35765K236	MCMaster

28	1	ISOLANT TUBE	PLASTIQUE	ACHETÉ	5556K71 & 76755A67	MCMaster
29	1	SHLD 0250X0375	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
30	1	RMEC0478-2-30 (PISTON)	316	FABRIQUÉ		
31	1	O-RING AS568-111	RUBBER	ACHETÉ	9464K24	MCMaster
32	2	RMEC0478-2-32 (EMBOUT)	AISI 4140 21-29 HRC	FABRIQUÉ		
33	2	SHCS 0375X0750	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
34	2	SHAFT COLLAR 1.000 ID	ACIER	ACHETÉ	6435K18	MCMaster
35	1	DP 0500X1000	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.8.2	
36	2	WASHER 0375	ACIER	ACHETÉ		

RMEC0478-03						
Numéro	Quantité	Référence	Matériau	Source	Numéro de pièce	Fournisseur
1	1	RMEC0478-3-1 (TABLE FIXE)	6061-T6	FABRIQUÉ		
2	2	LOQUET	PLASTIQUE	ACHETÉ	12855A63	MCMaster
3	8	BHCS No4X0188	ACIER	ACHETÉ	97763A319	MCMaster
4	1	RMEC0478-3-4 (TABLE MOBILE)	CSA G40.21-44W	FABRIQUÉ		
5	1	POIGNEE	PLASTIQUE	ACHETÉ	10995A19	MCMaster
6	2	SHCS 0250X1750	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
7	1	RMEC0478-3-07 (SASS PLAQUE)	COLLAGE	FABRIQUÉ		
8	8	HN 0250	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.2.2	
9	1	O-RING AS568-116	RUBBER	ACHETÉ	9464K29	MCMaster
10	4	AIR FLOW CONTROL	PLASTIQUE	ACHETÉ	62005K124	MCMaster
11	2	CYLINDRE PNEUMATIQUE	ACIER INOXYDABLE	ACHETÉ	6498K232	MCMaster
12	2	RAIL	ACIER	ACHETÉ	6709K33-280	MCMaster
13	2	BALL BEARING CARRIAG 15mm	ACIER	ACHETÉ	6709K11	MCMaster
14	8	SHCS No6X0500	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
15	10	SHCS No6X0625	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
16	2	RMEC0478-3-16 (APPUI COURT)	PLASTIQUE	FABRIQUÉ		
17	4	SSS FP 0250X0750	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
18	2	RMEC0478-3-18 (APPUI LONG)	PLASTIQUE	FABRIQUÉ		
19	2	SHCS 0375X0375	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
20	1	RMEC0478-3-20 (BOUCHON BOL 2)	6061-T6	FABRIQUÉ		

21	1	RMEC0478-3-21 (BOUCHON BOL)	6061-T6	FABRIQUÉ		
22	1	GOUTIÈRE	6061-T6	FABRIQUÉ		
23	1	BANDE CHAUFFANT TABLE	RUBBER	ACHETÉ	35765K47	MCMaster
24	1	CABLE CHAUFFANT	RUBBER	ACHETÉ	3641K22	MCMaster
25	2	BANDE CHAUFFANT TABLE 2	RUBBER	ACHETÉ	35765K43	MCMaster
26	3	DP 0250X0375	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.8.2	
27	3	SHCS No8X0375	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	

RMEC0478-03-07						
Numéro	Quantité	Référence	Matériau	Source	Numéro de pièce	Fournisseur
1	1	PLAQUE	ACIER INOXYDABLE	ACHETÉ	9085K46	MCMaster
2	8	BASE STUD	ACIER	ACHETÉ	97590A330	MCMaster

RMEC0478-04						
Numéro	Quantité	Référence	Matériau	Source	Numéro de pièce	Fournisseur
1	2	EXTRUSION 1	ALUMINIUM	ACHETÉ	1020-21	8020
2	2	PLAQUE	ALUMINIUM	ACHETÉ	4125	8020
3	120	BHCS 0250X0500	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
4	24	T NUT 1X2 0250	ACIER	ACHETÉ	3280	8020
5	2	ANGLE	ALUMINIUM	ACHETÉ	4014	8020
6	2	EXTRUSION 6	ALUMINIUM	ACHETÉ	1020-18	8020
7	2	PLAQUE JOINT 60	ALUMINIUM	ACHETÉ	4164	8020
8	2	EXTRUSION 8	ALUMINIUM	ACHETÉ	1010-15,5	8020
9	2	PLAQUE JOINT 30	ALUMINIUM	ACHETÉ	4143	8020
10	2	PLAQUE	ALUMINIUM	ACHETÉ	4127	8020
11	12	T NUT 1X3 0250	ACIER	ACHETÉ	3287	8020
12	8	COIN	ALUMINIUM	ACHETÉ	4134	8020
13	36	T NUT 1X1 0250	ACIER	ACHETÉ	3382	8020
14	2	EXTRUSION 14	ALUMINIUM	ACHETÉ	1020-20	8020
15	2	FLANGE BEARING DOUBLE	ALUMINIUM	ACHETÉ	6723	8020
16	4	SHCS 0250X2000	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
17	4	HN 0250	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.2.2	
18	1	RMEC0478-4-18 (LIEN MOULE)	6061-T6	FABRIQUÉ		
19	1	PAD	ACIER	ACHETÉ	6111K41	MCMaster
20	1	EXTRUSION 20	ALUMINIUM	ACHETÉ	1010-15	

21	2	EXTRUSION 21	ALUMINIUM	ACHETÉ	1010-20	8020
22	2	FLANGE BEARING SIMPLE	ALUMINIUM	ACHETÉ	6725	8020
23	2	COIN	ALUMINIUM	ACHETÉ	4132	8020
24	2	EXTRUSION 24	ALUMINIUM	ACHETÉ	1020-15	8020
25	1	L PIN 0250X3000	ACIER	ACHETÉ	98021A315	MCMaster

RMEC0478-05

Numéro	Quantité	Référence	Matériau	Source	Numéro de pièce	Fournisseur
1	1	RMEC0478-5-1 (BOL)	316	FABRIQUÉ		
2	1	O-RING AS568-154	RUBBER	ACHETÉ	9464K517	MCMaster
3	1	BANDE CHAUFFANTE BOL	RUBBER	ACHETÉ	35765K62	MCMaster
4	1	ISOLANT BOL	PLASTIQUE	ACHETÉ	5556K39	MCMaster
5	1	O-RING AS568-120	RUBBER	ACHETÉ	9464K84	MCMaster
6	1	CABLE CHAUFFANT	RUBBER	ACHETÉ	3641K21	MCMaster

RMEC0478-06

Numéro	Quantité	Référence	Matériau	Source	Numéro de pièce	Fournisseur
1	1	RMEC0478-6-1 (COUVERCLE)	6061-T6	FABRIQUÉ		
2	1	COURROIE	ACIER	ACHETÉ	6484K144	MCMaster
3	1	POULIE	ACIER	ACHETÉ	6495K16	MCMaster
4	1	POULIE	ACIER	ACHETÉ	6495K211	MCMaster
5	1	CLE CARRE 0375x0375x0,75in	ACIER	ACHETÉ	98535A170	MCMaster
6	1	BHCS No4X0188	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
7	1	HD RETAINING RING 1375 OD	ACIER	ACHETÉ	98585A130	MCMaster
8	1	MOTEUR	ACIER	ACHETÉ	BMU5120A-20A-3	ORIENTAL MOTOR
9	2	SHCS 0313X2500	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
10	2	SHCS 0250X1750	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
11	1	RMEC0478-6-11 (PLAQUE ENGRENAGE)	6061-T6	FABRIQUÉ		
12	4	SHCS 0250X1000	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
13	1	O-RING AS568-160	RUBBER	ACHETÉ	9464K522	MCMaster
14	1	RMEC0478-6-14 (PLAQUE LOC)	6061-T6	FABRIQUÉ		
15	1	ENGRENAGE INTERNE	LAITON	ACHETÉ	G691	BOSTON GEAR
16	3	SHCS No6X0375	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
17	1	RMEC0478-6-17 (RACLEUR)	316	FABRIQUÉ		

18	1	RMEC0478-6-18 (OUTIL MELANGE)	304	FABRIQUÉ		
19	1	RMEC0478-6-19 (TIGE PLANETAIRE)	304	FABRIQUÉ		
20	1	BUSHING PLANETAIRE	ACIER	ACHETÉ	6338K412	MCMaster
21	1	RMEC0478-6-21 (AXE)	304	FABRIQUÉ		
22	1	ENGRENAGE EXTERNE	LAITON	ACHETÉ	G231	BOSTON GEAR
23	1	CLE CARRE 0125x0125x0,5in	ACIER	ACHETÉ	98535A130	MCMaster
24	1	O-RING AS568-123	RUBBER	ACHETÉ	9464K87	MCMaster
25	1	BUSHING CENTRAL	ACIER	ACHETÉ	6338K314	MCMaster
26	1	O-RING AS568-130	RUBBER	ACHETÉ	9464K95	MCMaster
27		NON UTILISÉE				
28		NON UTILISÉE				
29	1	RMEC0478-6-29 (ARBRE OUTIL MELANGE)	304	FABRIQUÉ		
30	2	SHLD 0125X0625	ACIER INOXYDABLE	ACHETÉ	97345A104	MCMaster
31	1	THUMB SCREW No6X0250	ACIER INOXYDABLE	ACHETÉ	99607A112	MCMaster
32	2	SHCS 0313X4500	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
33	1	NON UTILISÉE				
34	2	DP 0187X1500	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.8.2	
35	1	RMEC0478-6-35 (ARRET MOTEUR)	6061-T6	FABRIQUÉ		
36	1	FHCS No10X0750	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
37	1	NON UTILISÉE				
38	1	PINCE RETAINING RING	ACIER	ACHETÉ	5415A63-STRAIGHT	MCMaster
39	2	DP 0250X1000	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.8.2	

RMEC0478-07						
Numéro	Quantité	Référence	Matériau	Source	Numéro de pièce	Fournisseur
1	1	PLAQUE SUPERIEURE	ACIER	ACHETÉ	8892K83-1FT	MCMaster
2	4	SHCS 0375X1500	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
3	6	SVP 0250X0750	ACIER	ACHETÉ	97352A110	MCMaster
4	1	PLAQUE GATE	ACIER	ACHETÉ	8892K83-1FT	MCMaster
5	1	PLAQUE INFERIEURE	ACIER	ACHETÉ	8892K83	MCMaster
9	6	SHCS No8X0375	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	

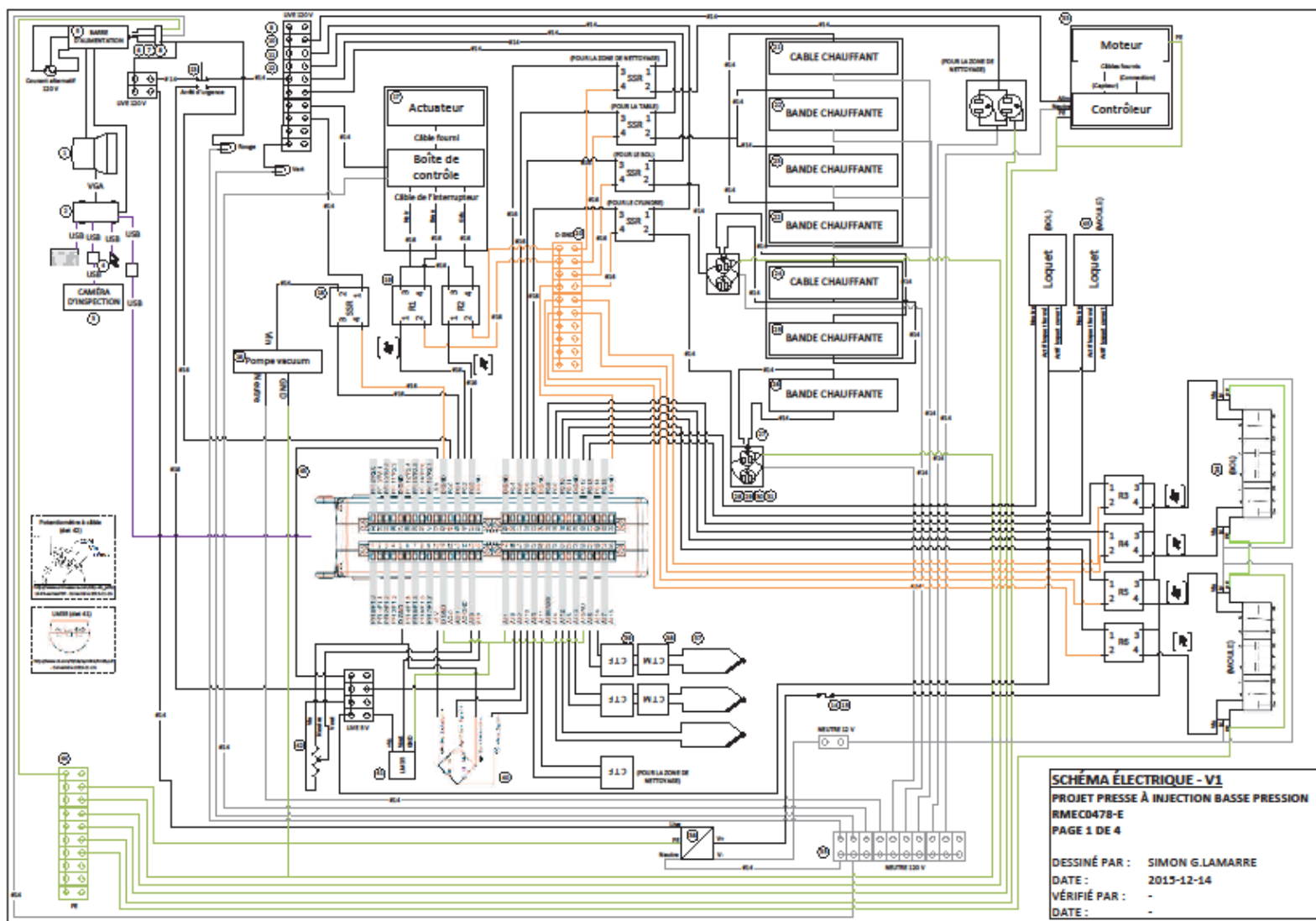
7	1	GATE MOULE	ACIER	ACHETÉ	8892K32-1FT	MCMaster
8	1	MOULE PARTIE 1 DE 2	ACIER	ACHETÉ	8892K32	MCMaster
9	1	MOULE PARTIE 2 DE 2	ACIER	ACHETÉ	8892K32	MCMaster

RMEC0478-08						
Numéro	Quantité	Référence	Matériau	Source	Numéro de pièce	Fournisseur
1	1	RMEC0478-8-1 (PLAQUE PNEUMATIQUE)	6061-T6	FABRIQUÉ		
2	2	VALVE 5-3	ACIER	ACHETÉ	6124K2-12V	MCMaster
3	4	MUFFLER M 0125NPT	LAITON	ACHETÉ	4450K1	MCMaster
4	6	ADAPTEUR DROIT 0250T-0125NPT M	ACIER	ACHETÉ	5779K108	MCMaster
5	4	SHCS No8X1250	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.3	
6	4	MSN No8	ACIER	ACHETÉ	ASME B18.6.3	
7	1	ADAPTEUR MP 0250TX0250NPT M	ACIER	ACHETÉ	5779K272	MCMaster
8	1	QUICK DISCONNECT	ACIER	ACHETÉ	5602K11	MCMaster
9	4	ADAPTEUR DROIT 0250T 0250NPT M	ACIER	ACHETÉ	5779K109	MCMaster
10	1	BALL VALVE PANEL ELBOW F 0250NPT	LAITON	ACHETÉ	4118T64	MCMaster
11	1	TUBE 0250	PLASTIQUE	ACHETÉ	52315K18-15-NOIR	MCMaster
12	1	TEE 0250T	ACIER	ACHETÉ	5779K34	MCMaster
13	1	WEY T-T 0250	PLASTIQUE	ACHETÉ	5779K44	MCMaster
14	1	ADAPTEUR DROIT 0250T-0250NPT F	ACIER	ACHETÉ	5779K131	MCMaster
	1	TEFLON POUR FILET	TEFLON	ACHETÉ		

RMEC0478-09						
Numéro	Quantité	Référence	Matériau	Source	Numéro de pièce	Fournisseur
1	1	APPUI HAUT	AISI 4140 21-29HRC	FABRIQUÉ		
2	2	SHAFT COLLAR .313 ID	ACIER	ACHETÉ	6436K51	MCMaster
3	1	PLUG	6061-T6	FABRIQUÉ		
4	1	O-RING AS568-109	RUBBER	ACHETÉ	9464K44	MCMaster
5	1	CAMERA	PLASTIQUE	ACHETÉ	DSC050	GENERAL TOOLS

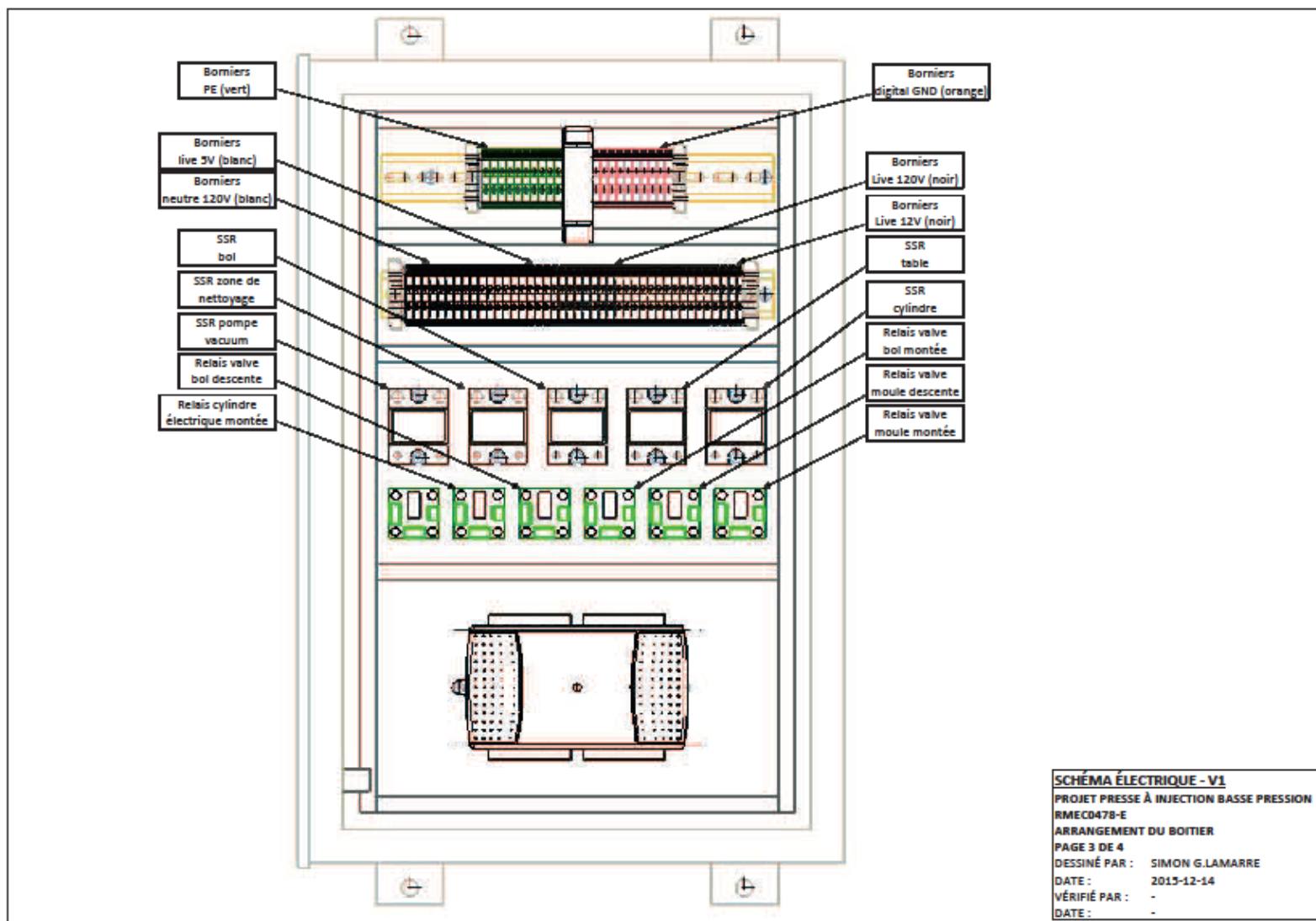
ANNEXE IV

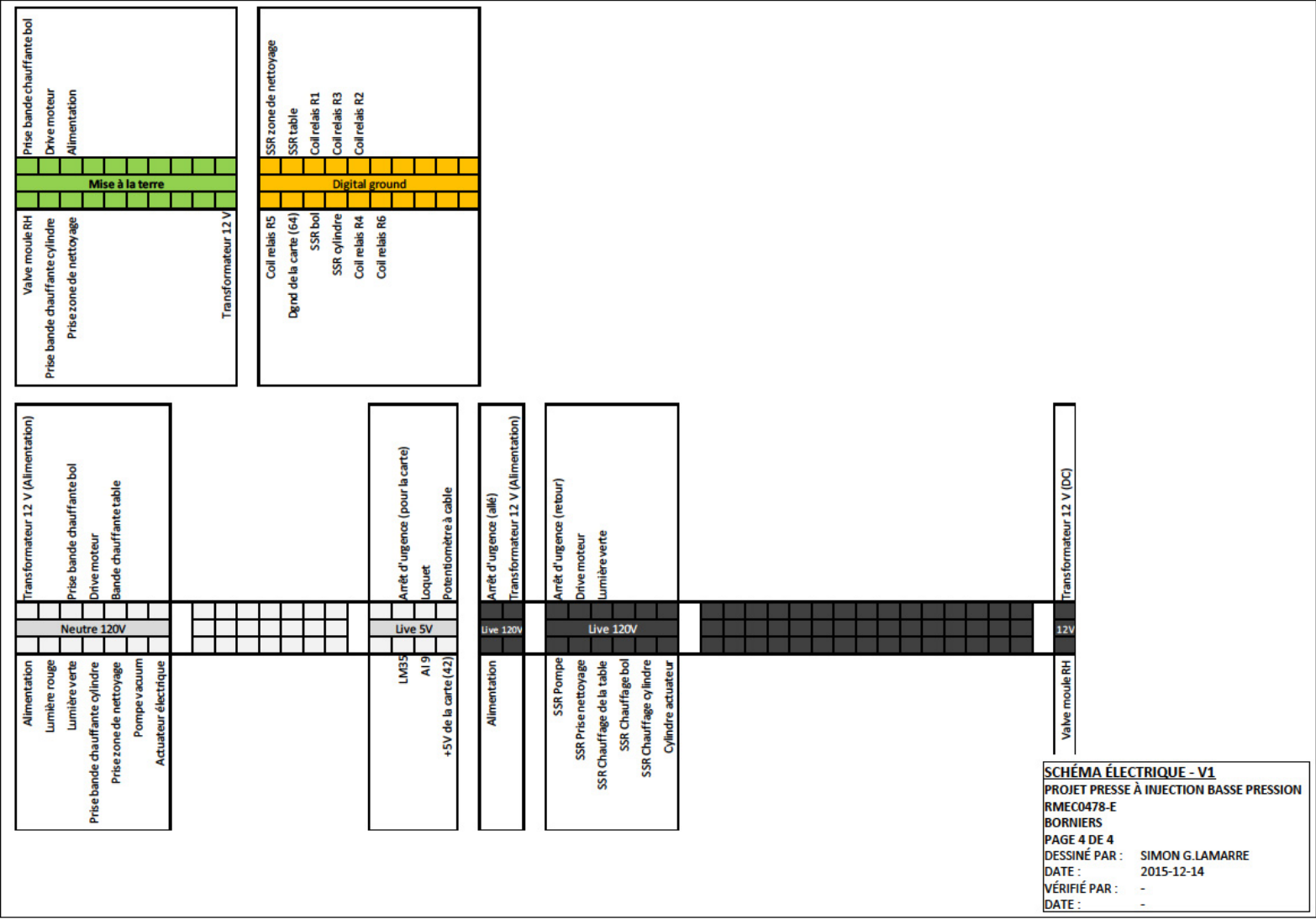
SCHÉMA ÉLECTRIQUE



NUMÉRO	QUANTITÉ	RÉFÉRENCE	MATÉRIAU	SOURCE	NUMÉRO DE PIÈCE	FOURNISSEUR	ALTERNATION	PRIX UNITAIRE	PRIX TOTAL	FABRICATION?	COMMANDE?	NOTES
1	1	ORDINATEUR			VOIR RMEC0478-21			- \$	- \$		oui	
2	1	ÉCRAN			VOIR RMEC0478-22			- \$	- \$		oui	
3	1	CAMÉRA INSPECTION			VOIR RMEC0478-25			- \$	- \$		oui	
4	2	EXTENSION USB 12 PI	PLASTIQUE	ACHETÉ	52-7188-8	8094954 LA SOURCE		11,99 \$	23,98 \$			
5	1	BARRE ALIMENTATION	PLASTIQUE	ACHETÉ	71535K51	CANADIAN TIRE		19,99 \$	19,99 \$			
6	1	CORDON ALIMENTATION EQUIP. ELECTRO 6 PI	PLASTIQUE	ACHETÉ	P50505000	MCMaster		5,04 \$	5,04 \$		OUI	Don Michel
7	1	MODULE_ENTREE_ALIMENTATION	PLASTIQUE	ACHETÉ	7641K51-BLACK	CORCOM		- \$	- \$		OUI	Don Michel
8	1	FUSIBLE 0250K1250 10 A	VERRE	ACHETÉ	7641K33-GRAY			- \$	- \$			
9	25	BORNIER LIVE (NOIR)	PLASTIQUE	ACHETÉ	7641K35	MCMaster		1,00 \$	25,00 \$			
10	2	PLAQUE BOUT	PLASTIQUE	ACHETÉ	7641K15	MCMaster		0,42 \$	0,84 \$			
11	4	STOPPER	PLASTIQUE	ACHETÉ	A22E-M02 & E222	MCMaster	OUI	1,00 \$	4,00 \$			
12	6	JUMPER (10 PAR UNITÉ)	ACIER	ACHETÉ	HFA 20 A 250 V	MCMaster		7,21 \$	43,26 \$			
13	1	ARRÊT URGENCE 2 CIRCUITS + BOÎTIER	PLASTIQUE	ACHETÉ	VOIR RMEC0478-1-1	OMRON & CUTLER HAMMER		- \$	- \$		oui	
14	2	PORTE FUSIBLE	PLASTIQUE	ACHETÉ	VOIR RMEC0478-2-16	BUSSMANN		- \$	- \$		oui	Don Michel
15	1	FUSIBLE 0250K1250 10 A SLOW	VERRE					- \$	- \$			
16	1	POMPE À VACUUM						- \$	- \$		oui	
17	1	ACTUATEUR						- \$	- \$		oui	
18	5	RELAIS SSR	PLASTIQUE	ACHETÉ	D1210	CRYDOM		- \$	- \$		oui	Don Michel
19	6	RELAIS	PLASTIQUE	ACHETÉ	GSV-DPDT	ETS		- \$	- \$		oui	Don Michel
20	10	BORNIER D GND (ORANGE)		ACHETÉ	7641K51-ORANGE	MCMaster		1,19 \$	11,90 \$			
21	1	CABLE CHAUFFANT TABLE			VOIR RMEC0478-3-24			- \$	- \$		oui	
22	2	BANDE CHAUFFANTE TABLE			VOIR RMEC0478-3-23			- \$	- \$		oui	
23	1	BANDE CHAUFFANTE TABLE			VOIR RMEC0478-3-25			- \$	- \$		oui	
24	1	CABLE CHAUFFANT BOL			VOIR RMEC0478-5-6			- \$	- \$		oui	
25	1	BANDE CHAUFFANTE BOL			VOIR RMEC0478-5-3			- \$	- \$		oui	
26	1	BANDE CHAUFFANTE CYLINDRE			VOIR RMEC0478-2-27			- \$	- \$		oui	
27	2	PRISE 2 BROCHES M	PLASTIQUE	ACHETÉ	52-1509-2	CANADIAN TIRE		3,99 \$	7,98 \$			
28	3	BOÎTIER DOUBLE	PVC	ACHETÉ	52-1219-2	CANADIAN TIRE		9,99 \$	29,97 \$			
29	3	COUVERCLE PRISE-INTERRUPTEUR	PVC	ACHETÉ	52-7565-0	CANADIAN TIRE		1,99 \$	5,97 \$			
30	3	PASSE FIL	PVC	ACHETÉ	52-1850-6	CANADIAN TIRE		5,19 \$	15,57 \$			
31	3	PRISE 3 BROCHES F MURALE ROND	PLASTIQUE	ACHETÉ	52-7232-2	CANADIAN TIRE		1,39 \$	4,17 \$			
32	1	NON UTILISÉ						- \$	- \$			
33	1	MOTEUR			VOIR RMEC0478-06-8			- \$	- \$		oui	
34	2	SOLENOID VALVE			VOIR RMEC0478-9-2			- \$	- \$		oui	
35	18	BORNIER NEUTRE (BLANC)	PLASTIQUE	ACHETÉ	7641K51-WHITE	MCMaster		1,19 \$	21,42 \$			
36	1	BLOC ALIMENTATION AC À 12V DC	PLASTIQUE	ACHETÉ	DNR18U512	XP POWER		40,96 \$	40,96 \$		Acheter par	
37	3	THERMOCOUPLE TYPE K		ACHETÉ				- \$	- \$			
38	2	CONNECTEUR THERMO M TYPE K	PLASTIQUE	ACHETÉ	3869K35	MCMaster		- \$	- \$		oui	Don Michel
39	3	CONNECTEUR THERMO F PANNEAU TYPE K	PLASTIQUE	ACHETÉ	3869K48	MCMaster		- \$	- \$		oui	Don Michel
40	1	CELLULE DE CHARGE			VOIR RMEC047-2-23			- \$	- \$		oui	
41	1	RTD		ACHETÉ	LM35			- \$	- \$		oui	Don Michel
42	1	POTENTIOMÈTRE			VOIR RMEC0478-15			- \$	- \$		oui	
43	1	CARTE D'ACQUISITION			VOIR RMEC0478-18			- \$	- \$		oui	
44	10	BORNIER PE (VERT)	PLASTIQUE	ACHETÉ	7641K51-GREEN	MCMaster		1,19 \$	11,90 \$			
45	2	LOQUET			VOIR RMEC0478-3-2			- \$	- \$		oui	
46	1	BOÎTIER ÉLECTRIQUE						- \$	- \$			
47	1	RAIL DIN 35mm	ACIER	ACHETÉ	8961K15	MCMaster		5,07 \$	5,07 \$			
48	1	WIRE DUCT	PLASTIQUE	ACHETÉ	7578K12-616"	MCMaster		20,44 \$	20,44 \$			
								TOTAL	297,46 \$			

SCHEMA ÉLECTRIQUE - V1
PROJET PRESSE À INJECTION BASSE PRESSION
RMEC0478-E
LISTE DE PIÈCES
PAGE 2 DE 4
 DESSINÉ PAR : SIMON G.LAMARRE
 DATE : 2013-12-14
 VÉRIFIÉ PAR : -
 DATE : -





Alimentation

Live 120V

Arrêt d'urgence (allé)

Transformateur 12 V (Alimentation)

SSR Pompe

SSR Prise nettoyage

SSR Chauffage de la table

SSR Chauffage bol

SSR Chauffage cylindre

Cylindre actuateur

Live 120V

Valve moule RH

12V

Transformateur 12 V (DC)

Coil relais R5

Dégrad de la carte (64)

SSR bol

SSR cylindre

Coil relais R4

Coil relais R6

SSR zone de nettoyage

SSR table

Coil relais R1

Coil relais R3

Coil relais R2

Digital ground

SCHÉMA ÉLECTRIQUE - V1

PROJET PRESSE À INJECTION BASSE PRESSION

RMEC0478-E

BORNIERS

PAGE 4 DE 4

DESSINÉ PAR : SIMON G.LAMARRE

DATE : 2015-12-14

VÉRIFIÉ PAR : -

DATE : -

ANNEXE V

ARTICLE DE CONFÉRENCE MONTREAL'2016 AES-ATEMA

EXPERIMENTAL STUDY OF THE RHEOLOGICAL PROPERTIES AND MOLDABILITY OF WAX-BASED FEEDSTOCKS USED IN LOW-PRESSURE POWDER INJECTION MOLDING

S. G. Lamarre ¹, V. Demers ^{1*}, J. F. Chatelain ¹

¹École de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame West, Montreal, QC H3C 1K3, Canada

e-mail: Simon G. Lamarre (simon.g-lamarre.1@ens.etsmtl.ca); Jean-François Chatelain
(jean-francois.chatelain@etsmtl.ca)

*Corresponding author: Vincent Demers; Tel: 1 514 396-8590; Fax: 514 396-8530; E-mail:
vincent.demers@etsmtl.ca

Cette annexe a été présentée et publiée comme article lors de la conférence Montreal'2016
AES-ATEMA « Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications ».

Présentée à Montréal le 22 juin 2016.

Abstract:

Low-pressure powder injection molding (LPIM) is an advanced manufacturing technology used for the cost-effective and small series fabrication of complex net-shape components with the proper dimensional tolerances. This technology takes advantage of low-viscosity feedstocks to achieve high moldability during the injection step. Metallic powder is mixed with molten low molecular weight polymeric binder to obtain a feedstock which can be injected in a complex shape cavity using a pressure generally lower than 1 MPa. The objective of this study is to correlate the rheological properties of LPIM feedstocks with the moldability, i.e., the capacity of the feedstocks to be injected into the mold cavity with few defects, using real scale injections. In the framework of this study, a new injection concept was introduced in a laboratory injection press to avoid the segregation problem that may be encountered with the commercial LPIM press.

Keywords:

Powder Injection Molding, Injection Machine, Moldability, Viscosity, Wax-based Feedstock.

1 Introduction

Low-pressure powder injection molding (LPIM) is a cost-effective emerging technology for producing small and complex parts, either in high or in low production volumes [1]. A key to the successful injection of feedstock at low-pressure lies in the low-viscosity properties of the powder-binder mixture. The low pressure required during injection is an opportunity to reduce the capacity of the injection press as well as the size of the tooling, therefore generating significant cost reductions compared to conventional high pressure injection molding [2]. Using feedstock viscosity that is too low should make easy to fill the mold cavity, but would also promote segregation (i.e., phase separation) [3]. Such powder-binder demixing must be minimized in order to prevent distortions, cracks, voids, warping and the heterogeneous shrinkage of the sintered parts [4]. Moldability and segregation are thus linked to the rheological behavior of the feedstock.

Paraffin waxes are widely used as the main constituents in commercial and development feedstocks [5, 6]. Surfactant and thickening agents are generally used to enhance the homogeneity of the feedstock as well as to prevent powder-binder separation: surfactant agents act as a bridge between the metallic powder and the other constituents to enhance the homogeneity and the mixing properties of the feedstock, while thickening agents are generally used to increase the viscosity of the mixture in order to prevent powder-binder separation. Stearic acid and ethylene vinyl acetate are extensively used as the secondary constituents in LPIM feedstocks [7, 8].

It is well accepted that the rheological properties of feedstocks (and thus, their behavior during an injection) depend significantly on the binder composition. However, the evaluation of the viscosity for LPIM processes [9] and its correlation with real-scale injection have received very little attention in the literature. The aim of this study is to correlate the viscosity measurements with real-scale moldability results.

2 Material and Methods

2.1 Injection molding machine

Figure-A V-1 shows a schematic representation of a typical injection molding machine, as reported in the literature for LPIM [10, 11].

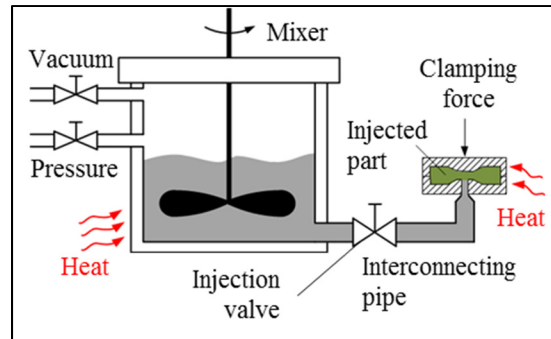


Figure-A V-1 Schematic representation of a commercial LPIM machine

A heated mixing tank is used to homogenize the powder and binder under vacuum to deaerate the mixture. Figure-A V-2 shows bubbles emerging from the feedstock after 1 and 40 minutes under vacuum. Following the deaeration step, the injection valve is opened, and air pressure (typically below 1 MPa) is applied on the feedstock to move the molten mixture from the tank to the mold. Following the mold filling operation, the injection valve is closed, and the mold is cooled down in order to extract the solidified part.

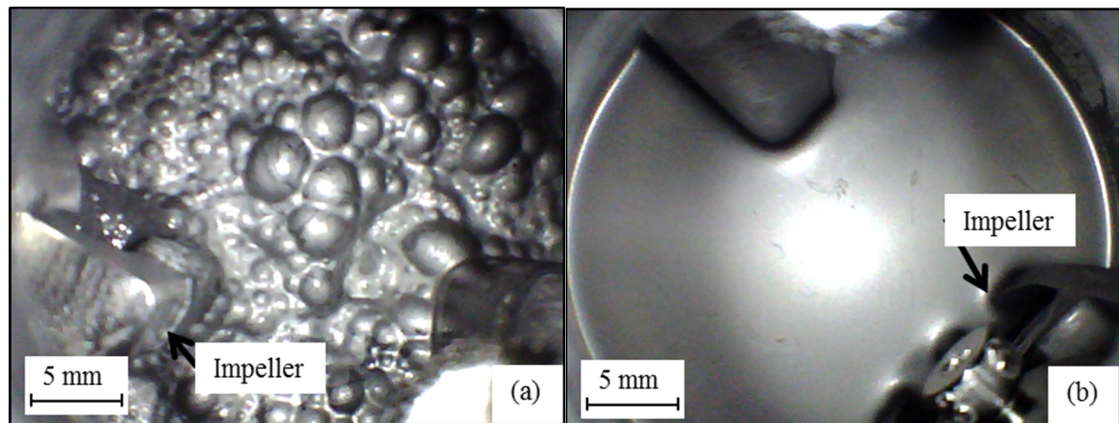


Figure-A V-2 Aspect of the feedstock inside the tank (top view) following a vacuum of (a) 1 minute, and (b) 40 minutes

During this process dead time, the feedstock remains stationary in the interconnecting pipe, which may generate phase segregation. To eliminate the effect of segregation occurring in the interconnecting pipe, a new injection concept was developed (Figure-A V-3). The feed channel, the main feature of this machine, acts like a syringe. For each injection cycle, the desired quantity of feedstock is pumped from the tank and injected into the mold cavity. After the injection, the feedstock is pumped back into the tank in order to avoid stationary feedstock during the process dead time related to the conventional LPIM machine. This new machine can be divided into three sub-assemblies:

1. Mixer tank (including a planetary mixer, a tank, and heating strips);
2. Injection piston (including a cylinder, a piston, and a heating strip);
3. Mold cavity.

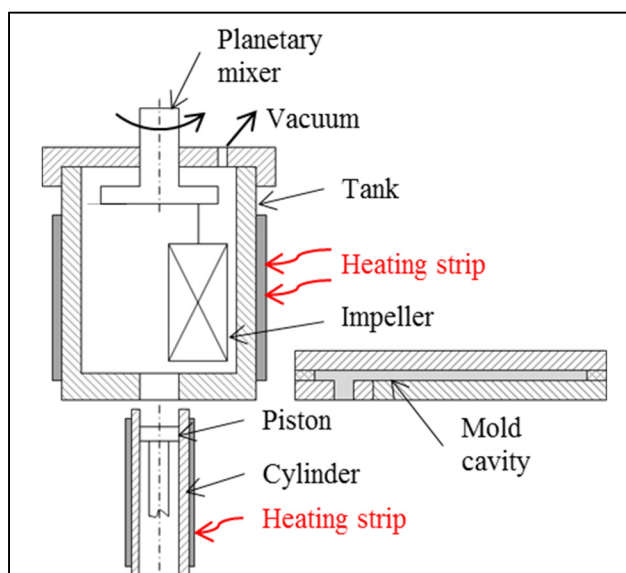


Figure-A V-3 Schematic representation of the novel LPIM machine (patent pending)

The piston ($\varnothing 15.7$ mm) is actuated by an electric cylinder with a maximum push capacity of 6000 N. The temperature, the piston stroke, and the injection force are measured respectively with thermocouples (Omega), a linear position transducer (UniMeasure LX-PA Series), and a Compact LC202 load cell (Omega). The control and the measurement of these parameters are

performed using a National Instrument 6212 data acquisition system (DAQ) via a computer equipped with a LabVIEW program. Table-A V-1 presents the operating range of this new LPIM machine.

Table-A V-1 Operating range of the new injection molding machine

	Min	Max
Temperature of the tank and cylinder (°C)	30	150
Vacuum in the tank (mm of Hg)	0	762
Injection pressure (MPa)	0	6
Mixer rotation speed (rpm)	2.5	200
Volume of the tank (ml)	80	280
Injection volume (ml)	4	50
Injection rate (mm/s)	5.8	

2.2 Materials

Gas-atomized stainless steel 316L powder (Epson Atmix Corporation, Japan) with a typical spherical shape and an average particle size of 6.7 μm was used (Figure-A V-4). Paraffin wax (PW) was used as the main binder in a different volume fraction, while stearic acid (SA) and ethylene vinyl acetate (EVA) were used respectively as a surfactant and a thickening agent.

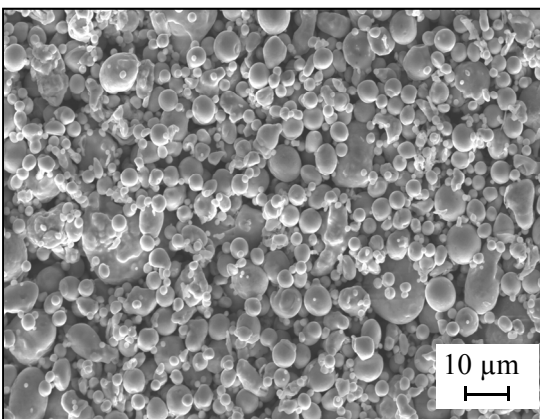


Figure-A V-4 SEM micrograph of 316L powder

Table-A V-2 presents the volume fraction of each constituent. The solid loading of all feedstocks was kept constant at 60 vol.% of powder, and the mixtures referenced by their volume fraction of polymer. For example, the feedstock 30PW-10SA is a mixture containing 60 vol.% of powder with 30 vol.% of paraffin wax and 10 vol.% of stearic acid. The mutual interaction between binders was not discussed in this study.

Table-A V-2 Volume fraction of powder and polymers used for feedstock formulations

Feedstock	vol.%				Melting point (°C)	Mixing temperature (°C)	Source
	Metallic powder	Paraffin wax (PW)	Stearic acid (SA)	Ethylene vinyl acetate (EVA)			
40PW	60	40	-	-	56.2	90	Aldrich
30PW-10SA	60	30	10	-	57.2	90	Aldrich
30PW-5SA-5EVA	60	30	5	5	54.6	90	Aldrich

2.3 Injection tests

Each feedstock was heated up to 90°C, and blended using the planetary mixer at 10 rpm for 40 minutes under vacuum to obtain a homogeneous and air bubble-free mixture. A volume was pumped from the tank and then injected into the mold cavity to fabricate one specimen (Figure-A V-5), molded horizontally. The feedstock remaining in the injection cylinder was returned into the tank and re-blended.

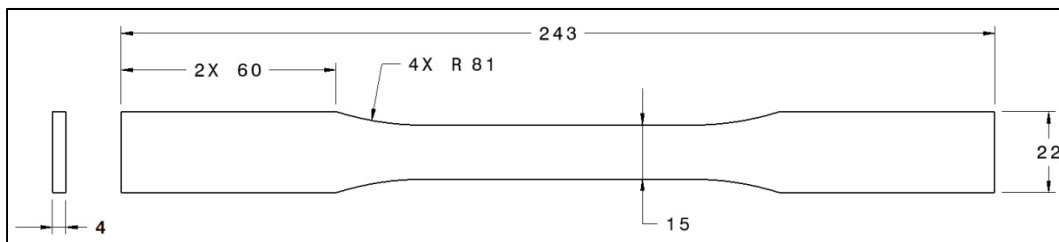


Figure-A V-5 Rectangular dogbone shape tensile test specimen (dimensions in millimeter)

Each feedstock was injected into a mold cavity (Figure-A V-6) to obtain a dogbone shape specimen, as presented in Figure-A V-5. The moldability of the feedstock was correlated with the measurement of the corresponding maximum pressure required to completely fill the mold.

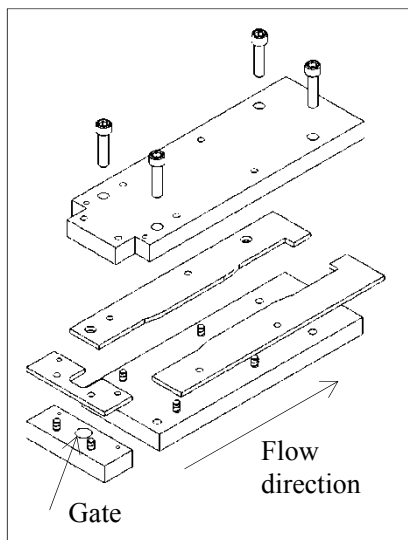


Figure-A V-6 Mold design

The injection was performed using a controlled constant stroke (5.8 mm/s), while the corresponding pressure was recorded. The temperature of the mold was maintained constant at 35°C. During the injection, as well as during the dead time phases between each injection, the feedstock was continuously mixed in the tank under vacuum in order to minimize segregation and air bubble incorporation.

2.4 Melting point and viscosity

Differential scanning calorimetry (DSC) was conducted with a PerkinElmer Pyris 1 to obtain the melting point of each binder formulation. These values correspond to the minimum temperature required for the injection and melt rheology tests. The DSC tests were performed over a 20 to 100°C temperature range (10°C/min heating rate and a 50 ml/min nitrogen gas flow rate). Specimens with a mass ranging from 8 to 12 mg were encapsulated in standard aluminum hermetic pans. The viscosity of feedstocks was measured by an Anton Paar MCR

501 rotational rheometer using the concentric-cylinder C-PTD200 with a Peltier temperature-controlled measuring system. The feedstocks were filled into the barrel, pre-sheared at 50 s⁻¹ (to reach thermal equilibrium), and then tested at a shear rate ranging from 0.5 to 2000 s⁻¹ at a constant temperature of 90°C.

3 Results

3.1 Differential Scanning Calorimeter

Figure-A V-7 presents DSC results for the binder constituents. Tests were performed to validate the melting point provided by manufacturers for each constituent. Tests were also performed with a combination of PW with SA and EVA. The results demonstrate that the melting points change slightly compared to the primary constituent (PW) melting point. The miscibility of each constituent affects the blended binder properties as the melting point. The degree of miscibility plays a role in the resulting properties. With an addition of SA, the melting point was 57.2°C, while the addition of SA and EVA decreased the melting point at 54.6 °C. These values were then used to confirm the minimum mixing and injecting temperatures.

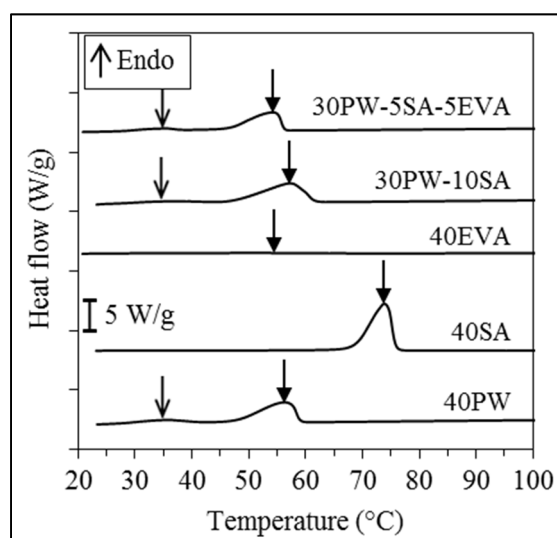


Figure-A V-7 DSC results for binder constituents

3.2 Rheological testing

Figure-A V-8 presents viscosity profiles for each feedstock at 90°C. The 40PW feedstock shows a continuous pseudoplastic behavior, which means that viscosity decreases with an increase in shear rate. This behaviour is explained by an alignment of molecules chain in the flow direction. This behavior is suitable for the injection process, considering that a high shear rate is applied on feedstock during injection.

The viscosity profile of 30PW-5SA-5EVA feedstock indicates a pseudoplastic behavior followed by a near-Newtonian plateau for shear rates higher than 100 s⁻¹. The viscosity profile of 30PW-10SA feedstock also exhibits a pseudoplastic behavior from low to high shear rates, while a dilatant behavior is clearly seen for shear rates higher than 1000 s⁻¹. This dilatant effect can be explained by the disruption or the elimination of the preferential layers formed during the pseudoplastic regime which occurred at high shear rates [12].

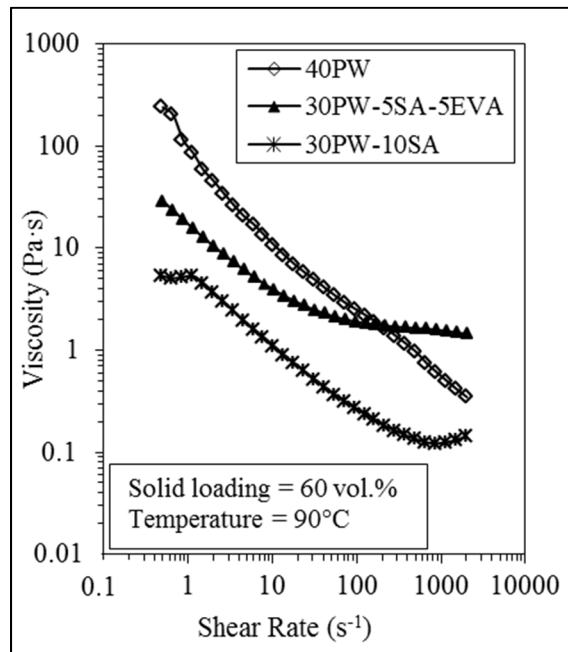


Figure-A V-8 Viscosity profiles of feedstocks

3.2 Injection

Figure-A V-9 presents the variation of pressure applied on the injection piston during the injection cycles. The pressure for the injection of feedstock 40PW was higher than that of the feedstocks 30PW-10SA and 30PW-5SA-5EVA. A visual examination of the injected specimen showed incomplete mold filling for feedstock 40PW and complete mold filling for the two other feedstocks. Feedstocks 30PW-5SA-5EVA and 30PW-10SA demonstrate the same pressure evolution according to the piston position for the first 90 mm stroke, while the peaks around 150 mm correspond to complete mold filling.

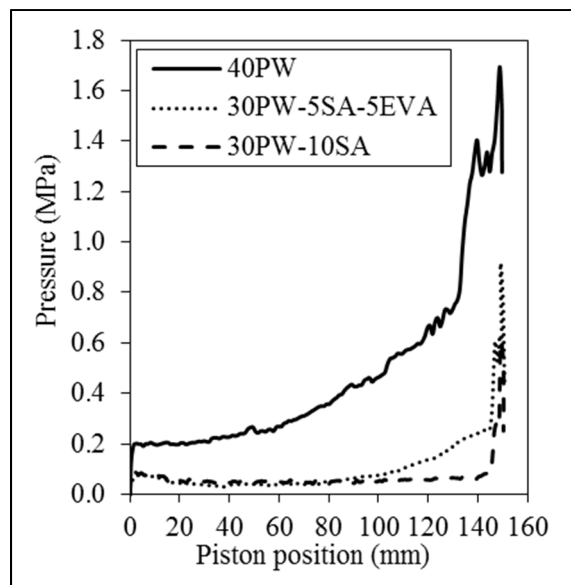


Figure-A V-9 Evolution of the pressure during the stroke-controlled injection

4 Discussion

A conventional PIM process suggests that a shear rate of 1000 s^{-1} is applied on feedstock during injection [13]. Figure 10 presents a comparison of the maximum injection pressure and the viscosity at three specific shear rates. At a high shear rate (1000 s^{-1}), the more viscous feedstock is 30PW-5SA-5EVA and the injection pressure is not correlated with the viscosity. This unexpected result suggests that the shear rate values reported in the literature

could be overestimated for the LPIM process. At moderate, but especially at low, shear rates the maximum pressure required for an injection is correlated with the viscosity of the three feedstocks. For example, at low shear rates, the more viscous feedstock (40PW) requires higher pressure, and conversely, the less viscous feedstock (30PW-10SA) can be injected with lower pressure.

This important result shows that the viscosity at high shear rates is not enough to predict the moldability of low-viscosity feedstocks used in the LPIM process. A qualitative evaluation of the shear rate range reached during an LPIM injection must be performed in future works.

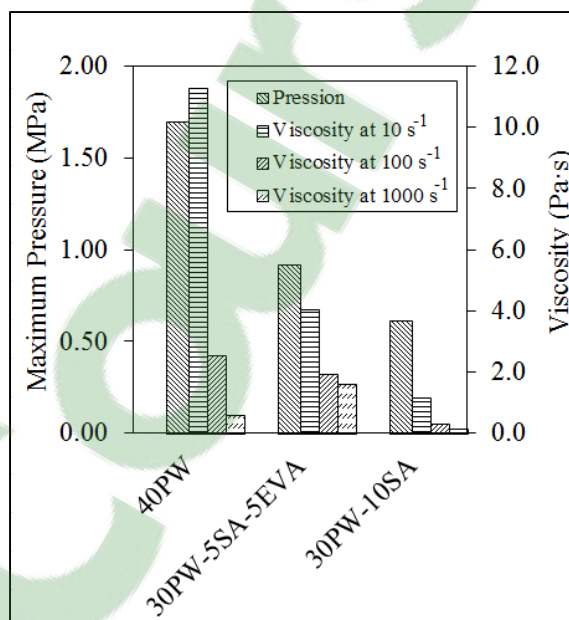


Figure-A V-10 Comparison of the maximum injection pressure and the viscosity at shear rate 10, 100, and 1000 s^{-1}

5 Conclusion

The viscosity of feedstocks is a useful rheological property for evaluating the ability of powder-binder mixtures to be injected into a mold cavity. In this work, the correlation between the rheological behavior and moldability of different feedstocks was experimentally

investigated. Rotational rheometer and a new injection press concept were used to measure the viscosity and injection pressure on 316L stainless steel feedstocks.

The pressure required for the injection of feedstock containing only paraffin wax (40PW) was higher than that of the feedstocks containing paraffin wax, surfactant and thickening agents (30PW-10SA or 30PW-5SA-5EVA). In that respect, a visual examination of the injected specimen showed incomplete mold filling for feedstock 40PW and complete mold filling for the two other feedstocks. It was also seen that the injection pressure values were unexpectedly correlated with the viscosity obtained at low shear rates instead of high shear rates. This result suggests that the shear rate values reported for a conventional PIM process may not be used directly in the LPIM process.

Acknowledgments

This work was carried out with the financial support of the École de technologie supérieure.

References

- [1] Medvedovski, E., Peltsman, M. (2012) Low pressure injection moulding mass production technology of complex shape advanced ceramic components, *Advances in Applied Ceramics*, 111 (5-6), 333-344.
- [2] Krindges, I., Andreola, R., Perottoni, C. A., Zorzi, J. E. (2008) Low-pressure injection molding of ceramic springs, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 5 (3), 243-248.
- [3] Demers, V., Turenne, S., Scalzo, O. (2015) Segregation measurement of powder injection molding feedstock using thermogravimetric analysis, pycnometer density and differential scanning calorimetry techniques, *Advanced Powder Technology*, 26 (3), 997-1004.
- [4] Barriere, T., Liu, B., Gelin, J. C. (2002) Analyses of powder segregation in MIM, *Metal Powder Report*, 57 (5), 30-33.
- [5] Ikegami, R. A., Purquerio, B. D. M. (2001) Low pressure injection moulding of stainless steel powder, *Key Engineering Materials*, 189-191, 467-472.
- [6] Hidalgo, J., Abajo, C., Jiménez-Morales, A., Torralba, J. M. (2013) Effect of a binder system on the low-pressure powder injection moulding of water-soluble zircon feedstocks, *Journal of the European Ceramic Society*, 33 (15-16), 3185-3194.

- [7] Rei, M., Milke, E. C., Gomes, R. M., Schaeffer, L., Souza, J. P. (2002) Low-pressure injection molding processing of a 316-L stainless steel feedstock, *Materials Letters*, 52 (4–5), 360-365.
- [8] Li, Y.-m., Liu, X.-q., Luo, F.-h., Yue, J.-l. (2007) Effects of surfactant on properties of MIM feedstock, *Transactions of the Nonferrous Metals Society of China*, 17 (1), 1-8.
- [9] Demers, V., Turenne, S., Scalzo, O. (2015) Impact of binders on viscosity of low-pressure powder injection molded Inconel 718 superalloy, *Journal of Materials Science*, 50 (7), 2893-2902.
- [10] Peltsman, M. I., Peltsman, I. D. November 22, 1983. Low pressure hot molding machine. US Pat. 4,416,603. In PatFT. USPTO.
- [11] Goncalves, A. C. (2001) Metallic powder injection molding using low pressure, *Journal of Materials Processing Technology*, 118, 193-198.
- [12] Hausnerova, B., Marcanikova, L., Filip, P., Saha, P. (2011) Optimization of powder injection molding of feedstock based on aluminum oxide and multicomponent water-soluble polymer binder, *Polymer Engineering and Science*, 51 (7), 1376-1382.
- [13] González-Gutiérrez, J., Stringari, G. B., Emri, I. (2012) Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts, *Some Critical Issues for Injection Molding*, Dr. Jian Wang (Ed.), 978-953.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahn, Seokyoung, Seong Jin Park, Shiwoo Lee, Sundar V. Atre et Randall M. German. 2009. « Effect of powders and binders on material properties and molding parameters in iron and stainless steel powder injection molding process ». *Powder Technology*, vol. 193, n° 2, p. 162-169.
- Arifin, Amir, Abu Bakar Sulong, Norhamidi Muhamad, Junaidi Syarif et Mohd Ikram Ramli. 2015. « Powder injection molding of HA/Ti6Al4V composite using palm stearin as based binder for implant material ». *Materials and Design*, vol. 65, p. 1028-34.
- Aslam, Muhammad, Faiz Ahmad, Puteri Sri Melor Binti Megat Yusoff, Khurram Altaf, Mohd Afian Omar, H. P. S. Abdul Khalil et M. Rafi Raza. 2016. « Investigation of Rheological Behavior of Low Pressure Injection Molded Stainless Steel Feedstocks ». *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016.
- ASTM. 2013. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. E8/E8M-13a: ASTM International, 28 p.
- Bilovol, V. V., L. Kowalski, J. Duszczyk et L. Katgerman. 2006. « The effect of constitutive description of PIM feedstock viscosity in numerical analysis of the powder injection moulding process ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 178, n° 1-3, p. 194-9.
- Çengel, Y.A., et J.M. Cimbala. 2006. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Higher Education, 994 p.
- Demers, Vincent, Sylvain Turenne et Orlando Scalzo. 2015. « Segregation measurement of powder injection molding feedstock using thermogravimetric analysis, pycnometer density and differential scanning calorimetry techniques ». *Advanced Powder Technology*, vol. 26, n° 3, p. 997-1004.
- Dvorak, P., T. Barriere et Jean-Claude Gelin. 2005. « Jetting in metal injection moulding of 316L stainless steel ». *Powder Metallurgy*, vol. 48, n° 3, p. 254-260.
- Fareh, F., V. Demers, S. Turenne et O. Scalzo. 2016. « Segregation measurement of inconel 718 feedstocks used in low-pressure metal injection molding ». In *International Conference on Advanced Materials Engineering and Technology, ICAMET 2015, December 4, 2015 - December 5, 2015*. (Kaohsiung, Taiwan) Vol. 857, p. 286-290. Coll. « Materials Science Forum »: Trans Tech Publications Ltd.
- German, R.M., et A. Bose (413). 1997. *Injection Molding of Metals and Ceramics*. Metal Powder Industries Federation.

- Goncalves, Aparecido Carlos. 2001. « Metallic powder injection molding using low pressure ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 118, p. 193-198.
- González-Gutiérrez, Joamín, Gustavo Beulke Stringari et Igor Emri. 2012. « Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts ». *Some Critical Issues for Injection Molding*, Dr. Jian Wang (Ed.), p. 978-953.
- Hausnerova, Berenika, Lucie Marcanikova, Petr Filip et Petr Saha. 2011. « Optimization of powder injection molding of feedstock based on aluminum oxide and multicomponent water-soluble polymer binder ». *Polymer Engineering and Science*, vol. 51, n° 7, p. 1376-1382.
- Hausnerova, Berenika, Tomas Sedlacek, Radek Slezak et Petr Saha. 2005. « Pressure-dependent viscosity of powder injection moulding compounds ». *Rheologica Acta*, vol. 45, n° 3, p. 290-296.
- Heaney, D. F. 2012a. « 2 - Designing for metal injection molding (MIM) ». In *Handbook of Metal Injection Molding*, sous la dir. de Heaney, Donald F., p. 29-49. Woodhead Publishing.
- Heaney, D. F. 2012b. « 3 - Powders for metal injection molding (MIM) ». In *Handbook of Metal Injection Molding*, sous la dir. de Heaney, Donald F., p. 50-63. Woodhead Publishing.
- Heaney, D. F. 2012c. *Handbook of Metal Injection Molding*, 1st ed. Woodhead Publishing, 604 p.
- Hidalgo, J., C. Abajo, A. Jiménez-Morales et J. M. Torralba. 2013. « Effect of a binder system on the low-pressure powder injection moulding of water-soluble zircon feedstocks ». *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 33, n° 15-16, p. 3185-3194.
- Ibrahim, M. H. I., N. Muhamad et A. B. Sulong. 2011. « Rheological Characterization of Water Atomised Stainless Steel SS316L for Micro MIM ». *Advanced Materials Research*, vol. 264-265, n° 1, p. 129-34.
- Ibrahim, R., M. Azmiruddin, M. Jabir, N. Johari, M. Muhamad et A. R. A. Talib. 2014. « Effect of solid loading on the physical properties of the sintered inconel 718 using metal injection moulding (MIM) ». In *Advanced Materials Conference, AMC 2012, December 12, 2012 - December 13, 2012*. (Langkawi, Malaysia) Vol. 879, p. 164-168. Coll. « Advanced Materials Research »: Trans Tech Publications Ltd.
- Ivzhenko, V. V., V. A. Popov et G. F. Sarnavskaya. 2012. « Powder metallurgy industry and managerial economics micro/nanosized refractory powder injection molding machine ». *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 51, n° 5-6, p. 368-371.

- Jenni, Martin, Rudolf Zauner, Juergen Stampfl et Jeff Morris. 2008. « Quantitative study of process and material parameters on flow behavior and powder binder separation of feedstocks: Experimental design 3d simulation model and balance model for separation in suspensions ». In *2008 World Congress on Powder Metallurgy and Particulate Materials, PowderMet 2008, June 8, 2008 - June 12, 2008*. (Washington, DC, United states), p. 1169-1178. Coll. « Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials - 2008, Proceedings of the 2008 World Congress on Powder Metallurgy and Particulate Materials, PowderMet 2008 »: Metal Powder Industries Federation.
- Jenni, Martin, Rudolf Zauner et Jurgén Stampfl. 2009. « Measurement methods for powder binder separation in PIM components ». In *European International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2009, October 12, 2009 - October 14, 2009*. (Copenhagen, Denmark) Vol. 2. Coll. « Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2009 »: European Powder Metallurgy Association (EPMA).
- Karatas, C., A. Sozen, E. Arcaklioglu et S. Erguney. 2008. « Investigation of mouldability for feedstocks used powder injection moulding ». *Materials and Design*, vol. 29, n° 9, p. 1713-24.
- Keizo, Y. 1989. *Injection molding method and injection molding device of ceramics*.
- Kryachek, Viktor M. 2004. « Injection Moulding (Review) ». *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 43, n° 7-8, p. 336-348.
- Lee, S. W., Park Seong Jin et R. M. German. 2011. « Issues and trends in powder injection molding research and applications ». In *International Conference on Advanced Manufacturing Technology 2011 (ATDM 2011), 3-5 Nov. 2011*. (Stevenage, UK), p. 56-61. Coll. « Proceedings of the International Conference on Advanced Manufacturing Technology 2011 (ATDM 2011) »: IET.
- Li, Y., Li Liujun et K. A. Khalil. 2007. « Effect of powder loading on metal injection molding stainless steels ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 183, n° 2-3, p. 432-9.
- Li, Yi-min, Xiang-quan Liu, Feng-hua Luo et Jian-ling Yue. 2007. « Effects of surfactant on properties of MIM feedstock ». *Transactions of the Nonferrous Metals Society of China*, vol. 17, n° 1, p. 1-8.
- Loebbecke, Birgit, Regina Knitter et Jürgen Haußelt. 2009. « Rheological properties of alumina feedstocks for the low-pressure injection moulding process ». *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 29, n° 9, p. 1595-1602.

- Mangels, John A. 1994. « Low-pressure injection molding ». *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 73, n° 5, p. 37-41.
- Mannschatz, A., A. Muller et T. Moritz. 2011. « Influence of powder morphology on properties of ceramic injection moulding feedstocks ». *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 31, n° 14, p. 2551-8.
- Medvedovski, E., et M. Peltzman. 2012. « Low pressure injection moulding mass production technology of complex shape advanced ceramic components ». *Advances in Applied Ceramics*, vol. 111, n° 5-6, p. 333-344.
- NKK Corporation. 1989. *Method for casting powder into a compact and apparatus therefor*. EP 0 316 541 A1. Office européen des brevets. < <http://www.google.com/patents/EP0316541A1?cl=en> >. Consulté le 5 juin 2016.
- Peltzman, M.I.
- Peltzman, I.D. 1983. *Low pressure hot molding machine*. US Pat. 4,416,603. In *PatFT*. Online. < <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=%2Fnetacgi/nph-Fsrchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=4,416,603.PN.&OS=PN/4,416,603&RS=PN/4,416,603> >. Consulté le 13 avril 2016.
- Peltzman, Michael. 1986. « Low pressure injection moulding and mould design ». *Metal Powder Report*, vol. 41, n° 5, p. 367-369.
- Pompe, R., et J. Brandt. 2001. « Goceram's MEDPIMOULD technology offers cost-effective PIM production ». *Metal Powder Report*, vol. 56, n° 6, p. 14-17.
- Sack, Rainer, et Klaus-Dieter Lietzmann. 1990. « Basic principles of low-pressure injection moulding and experience with the process ». *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 8, n° 2-4, p. 371-380.
- Schlechtriemen, N., R. Knitter, J. Haucelt et J. R. Binder. 2013. « Impact of powder morphology on quality of low-pressure injection moulded reaction-bonded net shape oxide ceramics ». *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 33, n° 4, p. 709-15.
- Schlieper, G. 2012. « 5 - Tooling for metal injection molding (MIM) ». In *Handbook of Metal Injection Molding*, sous la dir. de Heaney, Donald F., p. 93-109e. Woodhead Publishing. In *Google Patent*.
- Sotomayor, M. E., A. Varez et B. Levenfeld. 2010. « Influence of powder particle size distribution on rheological properties of 316 L powder injection moulding feedstocks ». *Powder Technology*, vol. 200, n° 1-2, p. 30-6.

- Vervoort, P. J., R. Vetter et J. Duszczyk. 1996. « Overview of powder injection molding ». *Advanced Performance Materials*, vol. 3, n° 2, p. 121-151.
- Honda Giken Kogyo Kabushiki Kaisha. 1998. *Apparatus for supplying inorganic slurry to an injection mold*. 5,795,601. In *Google Patent*. Google. < <https://www.google.ca/patents/US5795601> >. Consulté le 5 juin 2016.
- Zorzi, J. E., C. A. Perottoni et J. A. H. Da Jornada. 2003. « Wax-based binder for low-pressure injection molding and the robust production of ceramic parts ». *Industrial Ceramics*, vol. 23, n° 1, p. 47-49.