

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**OUTILLAGE RAPIDE POUR LA PRODUCTION
DES PIÈCES PLASTIQUES PAR INJECTION**

**MANH HA NGUYEN
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
DÉCEMBRE 2000**

© Manh Ha Nguyen, 2000.



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-60909-X

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

**OUTILLAGE RAPIDE POUR LA PRODUCTION
DES PIÈCES PLASTIQUES PAR INJECTION**

présenté par : **NGUYEN Manh Ha**

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

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

M. **FISA Bohuslav**, Ph. D., président

M. **FORTIN Clément**, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. **SANSCHAGRIN Bernard**, D. Ing., membre et codirecteur de recherche

M. **PEGNA Soseph**, Ph. D., membre

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord exprimer toute ma reconnaissance à M. Clément Fortin, professeur, directeur de recherche et M. Bernard Sanschagrin, professeur, co-directeur de recherche pour avoir su m'encadrer et me diriger tout au long de cette maîtrise, ainsi que pour leur support financier et scientifique à toutes les étapes de recherche.

Je tiens à remercier le Centre de développement rapide de produits et de procédés (Centre prototech) pour les services rendus dans la préparation des inserts.

Je voudrais aussi témoigner ma reconnaissance à M. Marek Balazinski pour son aide dans l'utilisation de l'appareil à mesurer l'état de surface "TALISURF".

Je souhaite exprimer ma gratitude particulière à M. Jacques Beausoleil, technicien au département de génie mécanique pour son aide très appréciable et sans qui je n'aurais pu terminer mes expériences.

Un gros merci à mes amis Hue et Lan qui m'ont aidé dans la correction préliminaire du français de mon mémoire.

La réalisation de cette recherche a été rendue possible grâce à l'obtention d'une bourse du Programme canadien de bourses de la francophonie. Merci à ce programme pour son aide précieuse!

Je garde ma dernière pensée pour ma famille. Je veux dédier cet ouvrage à ma mère qui m'a transmis son esprit de persévérance et d'espoir. Je veux le dédier également à mon épouse et mes fils Dung Ha et Viet Ha, qui ont supporté ma trop longue absence et qui m'ont permis, par leurs encouragements et leur amour, de mener à bien ce travail.

RÉSUMÉ

Actuellement, les technologies du prototypage rapide subissent un développement très prononcé. Ces techniques sont de plus en plus utilisées comme les nouvelles méthodes d'outillage, en particulier pour le processus de moulage à injection. Cette tendance provient de la nécessité de diminuer dans la mesure du possible le temps de lancement d'un produit sur le marché, non seulement dans la phase de conception mais aussi dans la phase d'industrialisation.

Les procédés de stéréolithographie et du frittage sélectif par laser sont présentés dans ce mémoire. On a également examiné deux méthodes d'outillage rapides telles que Direct-AIM, processus basé sur le procédé de stéréolithographie et le processus d'outillage utilisant un composite de cuivre-polyamide pour créer directement des inserts sur la machine de frittage sélectif par laser. Ce sont les techniques les plus utilisées dans la production des inserts de moules à injection pour les pièces plastiques. Les problèmes rencontrés pendant la préparation des inserts et les facteurs influençant la qualité et la durée de vie sont aussi examinés.

On a testé les matériaux utilisés sur les caractéristiques mécaniques telles que les résistances à la traction, à la flexion et à la compression. Ces caractéristiques sont ensuite comparées avec celles fournies par DTM Corporation et 3D Systems. Les résultats obtenus confirment l'utilisation de ces matériaux et des paramètres choisis de construction pour créer les inserts de moules à injection.

L'objectif de ce mémoire est de mener des recherches sur les paramètres technologiques des inserts et aussi sur les paramètres du processus tels que la précision dimensionnelle, le matériau et les méthodes de remplissage, la rugosité des surfaces et les techniques de finition ainsi que les effets de différentes méthodes de refroidissement. L'influence des types de seuils, de l'angle de dépouille, de la pression et de la rupture de moules est aussi examinée.

Bien qu'il existe quelques problèmes, par exemple le fait que le matériau utilisé, une fois recyclé, (le cas des inserts en cuivre-polyamide) a causé une distorsion et une porosité excessive ou le contrôleur de la machine à injection ne fonctionnant pas toujours de façon régulière, nous avons quand même obtenu des résultats prometteurs. Il est recommandé d'utiliser ces résultats pour les processus d'outillage rapides dans l'avenir. Il serait aussi intéressant de chercher à réaliser de futures études de plus grande envergure concernant les caractéristiques mécaniques des matériaux dépendant de la température, ainsi que l'influence de la pression d'injection couplée avec la température sur le comportement des inserts pendant le moulage.

ABSTRACT

Rapid prototyping technologies are now developing at a very fast pace. They are evolving toward rapid tooling, especially that being used in the process of injection molding. The needs to further reduce the time-to-market of the product by shortening both design and industrialization phases of the manufacturing process are the main reasons of this evolution.

The Stereolithography and Selective Laser Sintering processes are presented briefly. Two Rapid Tooling methods: Direct-AIM based on Stereolithography process and Tooling process using the Copper Polyamide material to create the mold inserts directly on Selective Laser Sintering machine are reviewed. They are maybe the most successful rapid prototype tooling for injection of plastic pieces. The problems met during preparation of these inserts and the factors influencing the quality and the mold life are considered.

Mechanical specification of materials such as tensile, flexural and compression properties were tested and compared to those delivered by DTM Corp. and 3D Systems. The results support the use of these materials and the construction parameters in creating the mold inserts for injection.

This study aims at investigating the technological parameters of the inserts and process parameters such as precision, material and methods of back-filling, surface roughness and finishing techniques, effect of different methods of mold cooling. The influence of type of gate, draft angle, injection pressures and tool failure is also investigated.

Despite some problems such as the use of recycled materials in preparing the inserts causes some distortion and excessive porosity, the control unit of injection molding machine is sometimes the reason for uncontrollable cycle limiting the life of mold inserts, but received results are quite promising. There are also some recommendations to conduct detail research into materials specification in relation to temperature and into the influence of injection pressure in combination with temperature on the behavior of the inserts.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I - REVUE DE LA LITTÉRATURE	7
1.1. Processus de base	7
1.1.1. Prototypage rapide	7
1.1.2. Moulage des pièces plastiques par injection	14
1.2. Outillage rapide	19
1.2.1. Introduction	19
1.2.2. Processus	20
1.2.3. Problèmes de l'outillage rapide	24
CHAPITRE II - ÉQUIPEMENTS ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES	36
2.1. Introduction	36
2.2. Choix du type de pièce	36
2.2.1. Pièce	36
2.2.2. Base du moule	37
2.3. Préparation des inserts	38
2.3.1. Dessins des inserts	38
2.3.2. Modèles 3D	41
2.3.3. Modèles STL	43

2.3.4. Construction des modèles physiques sur les machines SLA et SLS..	44
2.3.5. Post-processus.....	49
2.4. Installation sur la machine à injection.....	51
2.5. L'équipement de mesure de la température.....	54
2.6. Équipement et procédures de la caractérisation des matériaux.....	55
2.6.1. Éprouvettes.....	55
2.6.2. Méthodes de tests.....	55
2.7. Équipement et procédure de mesure de la rugosité des surfaces.....	57
2.8. Matériau utilisé pour l'injection.....	58
CHAPITRE III - RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	59
3.1. Caractérisation des matériaux.....	59
3.2. Précision dimensionnelle.....	68
3.3. Rugosité de surfaces.....	74
3.4. Usure des inserts.....	78
3.5. Description des expériences en moulage par l'injection.....	81
3.6. Refroidissement.....	87
3.7. Autres facteurs.....	92
3.7.1. Matériau initial.....	92
3.7.2. Pression.....	93
3.7.3. Types de seuil.....	93
3.7.4. Remplissage des coquilles d'inserts.....	94
3.7.5. Cycle de moulage.....	95
3.7.6. Angle de dépouille.....	95
3.7.7. Rupture et durée de vie des inserts.....	95
CONCLUSION.....	97
RÉFÉRENCES.....	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Matériaux utilisés pour l'injection sur les inserts en cuivre-polyamide	35
Tableau 3.1 : Les normes et les résultats des tests sur les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux en Cuivre-Polyamide	60
Tableau 3.2 : Les normes et les résultats des tests sur les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux en Époxy	60
Tableau 3.3 : Dimensions de construction des inserts en Cuivre-Polyamide	69
Tableau 3.4 : Dimensions de construction des inserts en Résine époxy.....	69
Tableau 3.5 : Distorsion des inserts (figure 3.7).....	72
Tableau 3.6 : Rugosité initiale des surfaces des inserts (après l'infiltration).....	74
Tableau 3.7 : Rugosité des surfaces des inserts après la finition, avant le moulage.....	74
Tableau 3.8 : Surépaisseur pour la finition des inserts en Cuivre-Polyamide	76
Tableau 3.9 : Surépaisseur pour la finition des inserts en Époxy	76
Tableau 3.10 : La rugosité de la surface des pièces injectées	76
Tableau 3.11 : Dimensions des cavités avant et après le moulage (Inserts en Cuivre-Polyamide)	79
Tableau 3.12 : Dimensions des cavités avant et après le moulage (Inserts en Époxy)	80
Tableau 3.13 : Résultats des expériences	81

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Représentation graphique d'une sphère à partir d'un fichier STL.....	8
Figure 1.2 : Format STL	9
Figure 1.3 : Erreur de flèche f.....	10
Figure 1.4 : Redondance des arêtes et de sommets dans le fichier STL par rapport au fichier de CAO.....	10
Figure 1.5 : Schéma du processus de stéréolithographie	12
Figure 1.6 : Schéma du processus de frittage sélectif au laser	13
Figure 1.7 : Cycle du moulage à injection	16
Figure 1.8 : Cycle de moulage représenté par le diagramme P-V-T	17
Figure 1.9 : Photo métallographique du cuivre-polyamide (x 250)	23
Figure 1.10 : Effet d'escalier.....	26
Figure 1.11 : Méthode de tranchage adaptée pour chaque forme d'un objet complexe	27
Figure 2.1 : Pièce nervurée	36
Figure 2.2 : Ensemble de l'insert	38
Figure 2.3 : Dessins de l'insert en cuivre-polyamide	39
Figure 2.4 : Dessins de l'insert en résine époxy	40
Figure 2.5 : Modèle de CAO de l'insert.....	41
Figure 2.6 : Modèle de CAO sur l'écran de l'ordinateur	42
Figure 2.7 : Fichier STL.....	43
Figure 2.8 : Machine de stéréolithographie SLA 3500.....	44
Figure 2.9 : Machine de frittage sélectif par laser SLS 2500	45
Figure 2.10 : Inserts en cuivre-polyamide	47
Figure 2.11 : Inserts en résine époxy	48
Figure 2.12 : Inserts remplis et usinés.....	51
Figure 2.13 : Insert installé dans la base du moule	52

Figure 2.14 : Installation du moule sur la presse	53
Figure 2.15 : Positions des thermocouples	54
Figure 2.16: Position de mesure de rugosité des surfaces.....	58
Figure 3.1 : Courbes typiques "charges-extension" en traction.....	61
Figure 3.2 : Sections des éprouvettes.....	62
Figure 3.3 : Courbes typiques "charge - déplacement" en flexion.	64
Figure 3.4 : Courbes typiques "charge - déplacement" en compression	66
Figure 3.5 : Dessin simplifié du modèle de CAO.....	68
Figure 3.6 : Méthodes de balayage du laser	71
Figure 3.7 : Distorsion de l'insert.....	72
Figure 3.8 : Types et dimensions des seuil	78
Figure 3.9 : Inserts et pièces injectées	82
Figure 3.10 : Le bris des inserts en résine époxy.....	86
Figure 3.11 : Évolution de la température pendant le moulage (insert CP3).	88
Figure 3.12 : Évolution de la température pendant le moulage (insert CP4).	89
Figure 3.13 : Évolution de la température pendant le moulage (insert CP1).	90
Figure 3.14 : Évolution de la température pendant le moulage (insert EP1)	91

INTRODUCTION

Actuellement, le marché des produits évolue très rapidement. Des études de marché montrent que le nombre de variantes et la complexité des produits ont tendance à augmenter tandis que leur durée de vie et leur temps de développement diminuent. Les entreprises doivent être capables de répondre aux exigences du marché et de satisfaire aux besoins de leurs clients. Pour qu'un nouveau produit soit lancé sur le marché dans un délai court, entre autres, la méthode de l'ingénierie concurrente est appliquée afin de développer simultanément le produit et ses moyens de production.

Durant le processus de conception du produit, on doit prendre en compte tous les aspects technologiques et économiques du cycle de vie du produit : prévoir les limites souvent rencontrées dans le processus de design traditionnel, estimer la géométrie et la fonction du produit, développer les moyens de le fabriquer et calculer le coût total de développement du produit. Dans ce sens, les technologies de prototypage rapide, qui produisent des modèles physiques permettant la validation de la conception de façon très rapide, peuvent apporter une contribution appréciable et efficace.

Prototypage rapide

Le prototypage rapide signifie les nouvelles technologies de construction des modèles de composants et de produits en utilisant les données numériques des modèles 3D construits par un logiciel de CAO. Ce sont des technologies qui

fabriquent des produits par l'ajout de couches successives de matériau plutôt que par l'enlèvement du matériau d'un bloc solide. L'application principale de technologies de prototypage rapide est la production des modèles-prototypes pour :

- l'évaluation de la conception;
- la vérification des fonctions du produit;
- les autres processus de la fabrication.

Les avantages des techniques de prototypage rapide pour plusieurs entreprises sont évidents : on peut diminuer considérablement le coût et le temps de développement du produit. Malheureusement, à cause de la limite des matériaux utilisés, les procédés de prototypage rapide ne peuvent pas fabriquer des modèles dans tous les matériaux fonctionnels.

Outillage rapide

L'outillage rapide devient aujourd'hui une tendance, ou autrement dit, une autre phase de développement des technologies de prototypage rapide. L'outillage rapide utilise les techniques de prototypage rapide afin de créer des moules pour la production des pièces en petite série, même en pré-production. Ces pièces sont construits en matériau réel par une procédure proche de celle qui sera utilisée dans la phase de l'industrialisation de produit. Grâce à cela, on peut estimer la performance des outillages conçus et éviter les erreurs pendant leur préparation. Parfois, quand il n'y a que quelques unités requises, les méthodes d'outillage rapide s'avèrent très efficaces. De plus, la production de ces moules peut être réalisée dans un délai très court avec des coûts de préparation assez faibles. Tout cela offre des possibilités d'application de ces technologies dans l'industrie afin de répondre rapidement aux exigences du marché.

Il existe plusieurs techniques d'outillage rapide, développées par différentes compagnies-producteurs. Mais on peut différencier ces techniques suivant les principaux types de préparation en deux catégories soient celles directes et indirectes. Il y a aussi d'autres critères qui classifient ces techniques comme celle de l'outillage léger et celle de l'outillage lourd ("soft tooling" et "hard tooling" (Jacobs, 1996)).

Le type indirect d'outillage rapide regroupe les technologies telles que le surmoulage silicone RTV (silicon RTV rubber molding), le procédé KeLTool, la projection thermique de métal, la fonderie en cire perdue... Ces procédés utilisent des modèles maîtres en époxy, cire ou papier construits par les techniques de prototypage rapide pour un processus secondaire de création de moules. Ces moules sont utilisés ensuite pour la production en matériau réel.

L'outillage rapide direct inclut les procédés tels que Direct AIM™ (ACES™ injection molds) développé par 3D Systems, RapidTool développé par DTM et d'autres méthodes qui créent directement des moules en utilisant différents matériaux. On applique ces technologies d'outillage rapide pour fabriquer des moules et des empreintes pour l'injection, des moules ou des noyaux pour la fonderie en sable ou des moules céramiques pour la fonderie des pièces métalliques.

Bien que les techniques d'outillage rapide soient développées pour une production de test et en petite série, les exigences sur les caractéristiques mécaniques et technologiques de ces outils doivent être respectées afin d'améliorer la conception des outils dans la phase d'industrialisation et d'améliorer la qualité des pièces fabriquées. En raison des phénomènes inhérents à la nature de la production par couche, il existe un certain nombre de

problèmes qui affectent l'efficacité de l'outillage rapide. On peut en citer quelques-uns : la surface rugueuse causée par l'effet d'escalier ou la nature des matériaux utilisés, la précision dimensionnelle influencée par l'approximation du modèle de CAO et du retrait, la basse conductivité thermique, la durée de vie assez courte à cause des faibles caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés, etc. Des recherches portent sur la résolution de ces problèmes, surtout dans la production des outillages pour l'injection des pièces plastiques où les techniques de l'outillage rapide sont le plus utilisées.

L'objectif du mémoire

L'objectif de ce mémoire est de mener la recherche sur l'application des processus d'outillage rapide dans la production d'inserts de moule à injection des pièces de type "plaque nervurée". Un processus de préparation des inserts ou des moules à injection par les techniques d'outillage rapide comporte plusieurs étapes. Quelques étapes (surtout pendant la construction des inserts sur les machines de stéréolithographie et de frittage sélectif par laser) demandent des recherches plus indépendantes et approfondies pour faire apparaître les facteurs influant la qualité de ces moules, ce qui est très coûteux et demande du temps. Dans le cadre de ce travail, nous nous proposons de rechercher, plus spécifiquement :

- la caractérisation des matériaux utilisés (cuivre-polyamide et résine époxy 5510) pour la construction d'inserts : trouver les caractéristiques mécaniques principales (résistance à la traction, à la flexion et en compression) de ces matériaux et comparer les résultats avec ceux des fournisseurs;

- la précision dimensionnelle : étudier les erreurs dimensionnelles et les facteurs du retrait dans les directions X, Y, Z , le phénomène de distorsion, ce qui influe sur la précision des inserts;
- la condition thermique des inserts : étudier la distribution de la température dans l'insert et les méthodes de refroidissement;
- l'influence des paramètres technologiques tels que le type de seuils, les états de surface et les procédures de finition des surfaces des inserts, l'angle de dépouille, la pression d'injection et les méthodes de remplissage (back-filling) sur la qualité des inserts et la durée de vie des inserts.

Approches méthodologiques

Les aspects théoriques et pratiques de la question ont été abordés dans le mémoire. Les procédés de base tels que prototypage rapide, outillage rapide, moulage par injection,... ont été présentés de façon concise. Une revue sur des recherches réalisées pendant les dernières années dans le domaine, notamment sur l'outillage rapide pour le moulage par injection est présentée.

Le projet de recherche s'est réalisé selon les étapes suivantes :

- choix d'une pièce-type;
- choix des matériaux;
- construction des modèles 3D sur CATIA;
- préparation des fichiers STL et leur transfert sur les machines SLA et SLS;
- construction des inserts sur les machines SLA et SLS;
- post-processus et finition;
- assemblage dans la base de moule;
- test sur la machine à injection;
- traitement des données et discussion.

Structure de mémoire

Ce mémoire comporte cinq chapitres.

Introduction

Chapitre I - Revue de la littérature

Ce chapitre est une revue courte des processus de base tels que prototypage rapide, outillage rapide et moulage par injection des pièces plastiques. On trouve aussi dans ce chapitre une revue sur les recherches réalisées par les autres centres de recherche du monde, les problèmes à résoudre et les inconvénients et les avantages de la méthode.

Chapitre II - Équipements et procédures expérimentales

Ce chapitre est consacré à la description des étapes de préparation des inserts, des équipements de construction et de mesure, de la machine à injection, etc.

Chapitre III - Résultats et discussions

Dans ce chapitre, il est question du traitement et de la discussion des données obtenues au cours des expériences et à partir de ces résultats, quelques hypothèses et propositions sur la méthode d'outillage appliquée sont avancées.

Conclusion

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre présente en bref quelques procédés du prototypage rapide ainsi que le moulage des pièces plastiques par injection. Les notions et les étapes principales de ces techniques ont été exposées. Une partie importante de ce chapitre porte sur l'outillage rapide. On a examiné l'application de ces techniques dans la préparation des moules, les matériaux utilisés et les problèmes à résoudre pour améliorer la qualité de ces moules en faisant une revue des travaux de recherche réalisés pendant les dernières années.

1.1. Processus de base

1.1.1. Prototypage rapide

Comme mentionné au-dessus, le prototypage rapide est une branche assez nouvelle des technologies avancées de fabrication qui utilisent les modèles 3D construits par un logiciel de conception assistée par ordinateur afin de préparer rapidement des modèles et des prototypes physiques tridimensionnels, sans outillage, dans un temps beaucoup plus court par rapport aux techniques conventionnelles. Ces techniques appartiennent à la catégorie de fabrication additive. Le prototypage rapide a pour but d'assister les ingénieurs dans la phase de conception. Avec des modèles rapides, on peut avoir une visualisation réelle des produits; en plus, on peut vérifier l'ajustement et la fonction de ces produits.

Depuis plus d'une décennie, plusieurs technologies de prototypage rapide sont développées, mais dans ce chapitre on n'aborde que deux procédés, qui sont parmi les procédés les plus utilisés: la stéréolithographie et le frittage sélectif au laser.

a. Fichiers STL (STéréoLithographie)

Une des caractéristiques principales des techniques de prototypage rapide est la production par couche. On coupe les modèles 3D par des plans horizontaux virtuels en tranches d'épaisseur limitée et on transfère ces informations pour la production. Pour que ces fichiers en couches soient acceptables par les machines de fabrication rapide par couches, avant d'être coupés, les modèles 3D de CAO doivent être transformés en un format plus exploitable pour ces machines. Un des formats les plus utilisés est le format STL, comme un standard *de facto* pour la plupart des systèmes de prototypage rapide (Kai, 1997).

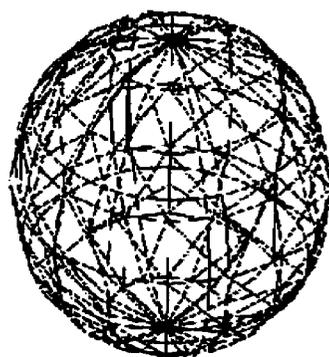
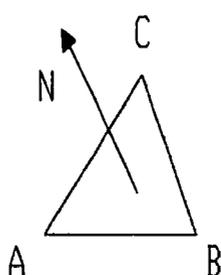


Figure 1.1: Représentation graphique d'une sphère à partir d'un fichier STL (dimension minimale des triangles = 100mm, flèche minimale = 0.1 mm)

Les fichiers STL représentent les surfaces extérieures des modèles de CAO sous forme de facettes triangulaires orientées vers l'extérieur de la matière et jointives bord à bord (Figure 1.1). Il y en a deux formes : forme binaire et forme ASCII.

Dans les fichiers STL, ces facettes triangulaires sont décrites par un ensemble de coordonnées de chacun de leurs trois sommets X, Y et Z et par un vecteur-normal unitaire indiquant l'intérieur et l'extérieur du modèle (Figure 1.2).



```

solid ascii triangle at origin
facet normal 0 1 0
  outer loop
    vertex 0 0 0
    vertex 1 0 0
    vertex 0 0 1
  endloop
endfacet
end solid

```

Figure 1.2 : Format STL (Tiré de Kai et Fai, [1997])

L'approximation des modèles de CAO par des modèles facettisés diminue la précision de ces modèles. Cette approximation est caractérisée par une flèche "f" maximum acceptable et la dimension maximale des triangles (Figure 1.3). On peut gagner de la précision en choisissant une flèche petite et un grand nombre de triangles (en diminuant la dimension maximale des triangles), mais dans ce cas-là, le fichier devient très volumineux et difficile à stocker, à

transmettre et à manipuler par le logiciel de tranchage (Fadel, 1995; Jacobs, 1996; Bernard, 1998).

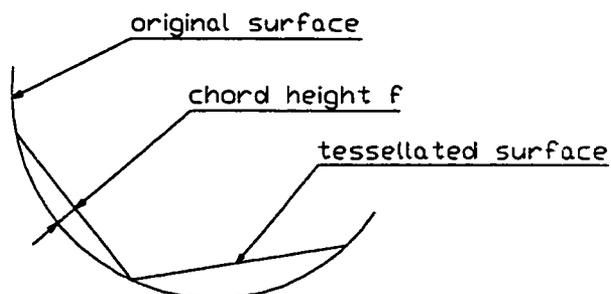


Figure 1.3 : Erreur de flèche f (Tiré de Lee, [1999])

C'est un inconvénient des fichiers STL. De plus, les fichiers STL sont normalement plusieurs fois plus large que ceux de CAO et contiennent des informations redondantes sur les sommets et les arêtes (voir la figure 1.4).

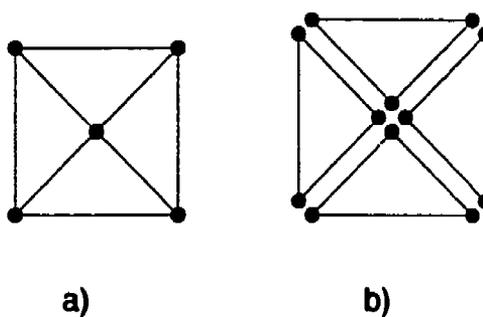


Figure 1.4 : Redondance des arêtes et de sommets dans le fichier STL par rapport au fichier de CAO; a - fichier de CAO, b - fichier STL (Tiré de Kai et Fai, [1997])

Pourtant, le standard STL a des avantages importants qui le rendent très utilisé pour les systèmes de prototypage rapide. Selon Bernard (1998), le format STL est mathématiquement beaucoup plus simple que le format IGES et facile à trancher : les intersections de triangles avec des plans parallèles virtuels sont facile à calculer; de plus, il est aussi facile de faire une approximation par des polygones à construire à chaque niveau horizontal (base des données exploitables par la machine).

b. Stéréolithographie

Le procédé de stéréolithographie crée des modèles physiques à partir d'une résine photosensible liquide. Cette résine est solidifiée quand elle est exposée à une source de lumière (ici on utilise le laser comme source de lumière grâce à ses avantages, qui sont : le laser dispose d'une puissance importante, il peut facilement être focalisé et positionné...), ce qui mène au processus de photopolymérisation.

Les modèles 3D construits par un logiciel sont convertis en fichiers STL. Ces fichiers STL sont bien vérifiés pour les erreurs avant d'être tranchés en couches ayant une épaisseur en général de 0.004 à 0.020 pouces. En conséquence, on reçoit les fichiers SLI (SLIce) qui représentent un ensemble de sections horizontales 2D des modèles 3D. Ces sections correspondent à différentes valeurs de Z. Finalement, ces fichiers SLI sont fusionnés en un fichier final pour la construction.

Le principe de fonctionnement du procédé de stéréolithographie est présenté dans la figure 1.5.

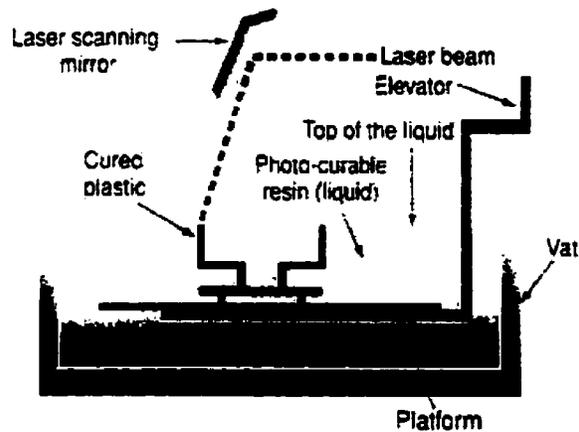


Figure 1.5 : Schéma du processus de stéréolithographie (Tiré de Lee, [1999])

Le fichier construit est transféré à la machine de production SLA (Stereolithographie Apparatus) pour préparer les objets physiques. La machine SLA utilise le laser UV qui est guidé par un système dynamique de miroirs pour balayer la couche en cours à la surface de la cuve de résine liquide photosensible. Le procédé de construction des modèles commence par la construction des supports qui fixent le modèle pendant le processus de construction et qui supportent certaines parties géométriques (comme une poutre en porte-à-faux) pouvant facilement subir une distorsion.

Au balayage du laser à la surface de la résine selon le profil géométrique de la section, la résine se durcit. Lorsqu'une couche est prête, le plateau élévateur baisse d'une hauteur égale à l'épaisseur de la couche suivante. Ainsi de suite, couche par couche, l'objet physique entier est créé. Quand la construction des modèles est terminée, on enlève les modèles de la cuve, on les nettoie de l'excès de la résine liquide et on les transfère à un four ultraviolet pour compléter le processus de solidification du polymère (Jacobs, 1996; Kai, 1997).

c. Frittage sélectif au laser

Le processus de frittage sélectif au laser est présenté dans la figure 1.6.

Comme le processus de stéréolithographie, la technologie de frittage sélectif au laser (SLS) est aussi un processus de construction par couches des objets physiques à partir de modèles 3D générés par un logiciel de CAO. Par contre, les matériaux utilisés ici sont sous forme de poudres. Le processus se base sur le frittage sélectif des particules de poudres par laser de haute puissance (50W CO₂). La machine Sinterstation reçoit le fichier STL, le vérifie, le tranche et génère une série de sections horizontales, qui se groupent dans un fichier final prêt pour la construction.

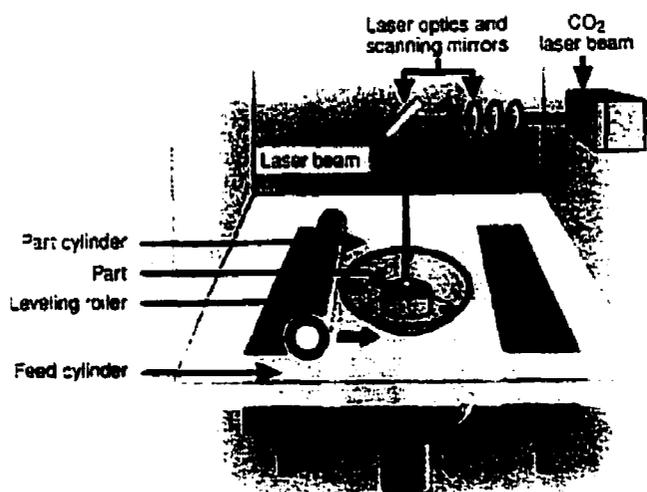


Figure 1.6 : Schéma du processus de frittage sélectif au laser (Tiré de Lee, [1999])

Une couche mince de poudre est répandue dans la zone de travail par un rouleau rotatif et chauffée jusqu'à une température légèrement inférieure à la température de fusion de la poudre. Le faisceau laser se déplace à la surface

de la poudre. Une partie de la puissance du laser est absorbée par les particules et transformée en chaleur qui cause la fusion de ces particules. Une section de l'objet physique est prête. L'élévateur baisse d'une épaisseur de couche et le rouleau en répand une autre. Le cycle continue jusqu'à ce que l'objet soit complété. La pièce est maintenue par la poudre non frittée et il n'est pas nécessaire de fabriquer des supports. Pour éviter l'effet d'oxydation, le processus doit être réalisé dans une chambre avec un contrôle de l'environnement sous gaz inerte (azote).

L'avantage du processus de frittage sélectif au laser est la possibilité de fusionner différents matériaux tels que PVC, polycarbonate, nylon, cire, ... et métaux.

Le processus SLS est caractérisé par le retrait volumique qui peut influencer la précision des produits. La densité des produits préparés par SLS est de 60% (poudre PVC) à 100% (nylon, cire). Une basse densité peut diminuer les propriétés mécaniques des pièces (Jacobs, 1996).

L'Université du Texas et DTM ont fait des recherches sur le frittage des poudres métalliques. Ici, le laser fait tout d'abord fondre le matériau liant et, de cette façon, crée la préforme (green part). Cette pièce est mise au four pour faire la pyrolyse du liant et fusionner les particules métalliques. Ensuite, elle est infiltrée avec du cuivre pour remplir les vides entre particules (Jacobs, 1996; Kai, 1997).

1.1.2. Moulage des pièces plastiques par injection

L'injection est un procédé de transformation cyclique qui se caractérise par le remplissage sous forte pression d'une empreinte quelconque par une matière

fondu susceptible de s'écouler. Ce processus peut s'appliquer à la majorité des matières plastiques (Fisa et Sanschagrin, 1994).

L'injection est réalisée sur les presses à injection et se caractérise par un cycle d'injection, qui comporte plusieurs phases : plastification de la matière, remplissage du moule, montée en pression et maintien de la pression, refroidissement et démoulage (Figure 1.7).

Phase de remplissage : La vis de plastification de la machine à injection pousse le polymère fondu vers la buse d'injection et celui-ci remplit les canaux d'alimentation, traverse le seuil du moule et remplit la cavité du moule. Cette étape correspond à la courbe 1-4 dans la figure 1.8.

Phase du maintien en pression : Dans cette phase, la pression est maintenue constante. On peut observer qu'une faible quantité de matière continue à s'écouler vers la cavité du moule. Celle-ci compense le changement de volume spécifique de la matière quand elle refroidit et diminue donc le retrait de la pièce après le refroidissement. Cette étape se termine quand le seuil du moule est figé. (Courbe 4-6, figure 1.8).

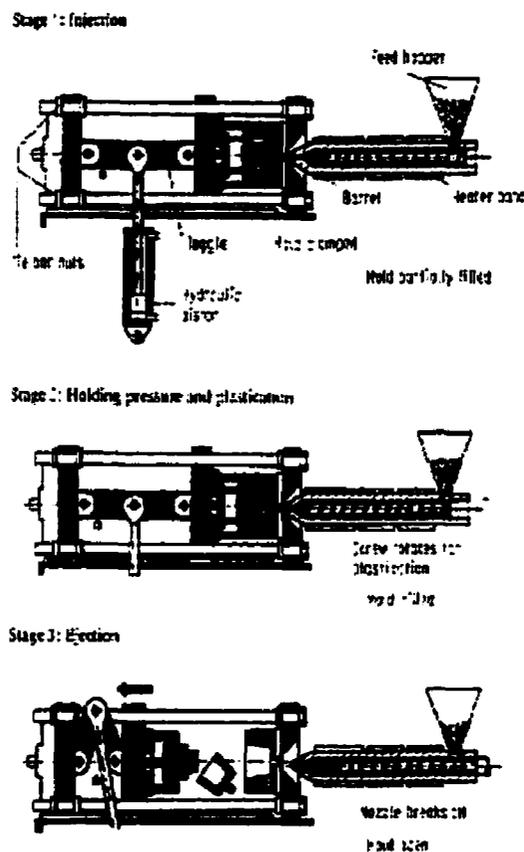


Figure 1.7 : Cycle du moulage à injection (Tiré de Menges/Mohren, « How to make Injection Molds », [1986])

Phase de refroidissement et de démoulage : La matière refroidit par conduction avec le moule; la pression diminue et quand elle atteint la valeur minimale, le volume spécifique diminue lui aussi (Courbe 6-7-9, figure 1.8). On démoule pour recommencer un autre cycle.

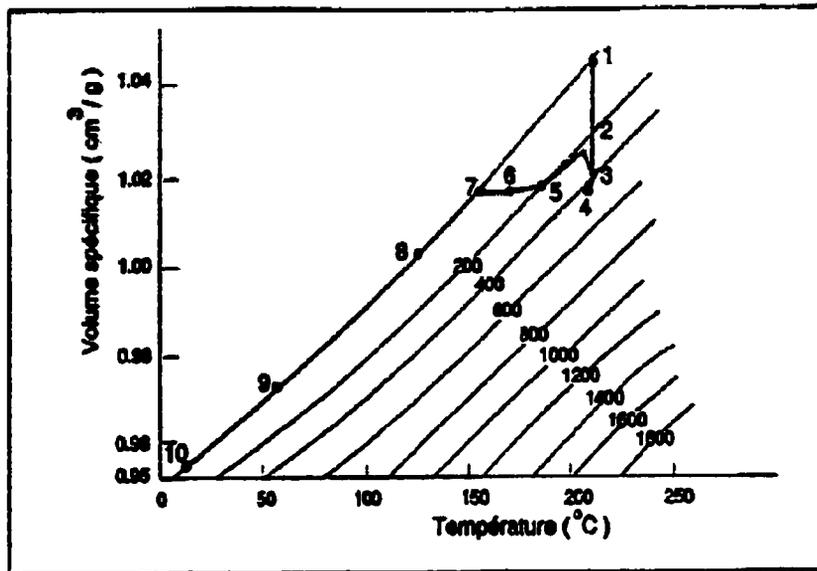


Figure 1.8 : Cycle de moulage représenté par le diagramme P-V-T (Tiré de Fisa et Sanschagrin, [1994])

- 1: Pression dans le moule près du seuil d'alimentation, 1-2: Remplissage du moule, 2: Le moule est rempli, 2-3: Compression de la matière, 3: La pression maximale dans le moule est atteinte, 4: Commutation injection-maintien, 4-5: Baisse de la pression due à la commutation; matière reflue vers la vis, 5: La pression de maintien est atteinte, 5-6: Baisse de pression; compensation du retrait de la matière par la décompression pendant le refroidissement. Le bourrage du moule se poursuit et on observe une diminution du volume spécifique, 6: Figeage du seuil d'alimentation; les échanges de matière entre le moule et le fourreau sont terminés, 6-7: Diminution de pression causée par le refroidissement seulement, 7: La pression atmosphérique est atteinte, les parois de la pièce se détachent de l'empreinte et le retrait commence, 7-10: Refroidissement à pression constante avec:
 8: La température de solidification est atteinte au point de mesure,
 9: Démoulage de la pièce
 10: Volume normale atteint après démoulage

Le moule est un élément très important du processus d'injection. Pendant le procédé d'injection, le moule subit de hautes pressions, des chocs et une haute température qui peuvent causer l'usure intensive et la faillite du moule. Le moule doit aussi assurer la résistance, la précision et la qualité de surface des pièces plastiques moulées. Il existe de nombreux facteurs affectant la qualité des pièces moulées et la vie du moule tels que le type de seuil, le système

d'alimentation, le système de refroidissement, le matériau de moule, la qualité de surface des inserts du moule, l'angle de dépouille et les éjecteurs, etc.

Les seuils : Le seuil qui connecte la cavité du moule et les canaux d'alimentation est un élément très important du moule à injection. Les dimensions des seuils permettent de mieux contrôler le remplissage de la cavité et le bourrage du surplus de matériau pour compenser le retrait de la pièce pendant le refroidissement. La position et le type de seuils peuvent influencer la qualité des pièces injectées.

Qualité de surface : La qualité de surface des inserts du moule (rugosité fine, précision dimensionnelle) donne une bonne qualité et facilite l'éjection des pièces injectées.

Refroidissement : Pendant le remplissage de la cavité du moule, il existe un échange de chaleur entre le plastique injecté chaud et le moule froid. Grâce à cet échange de chaleur, la température du matériau est diminuée jusqu'à la valeur à laquelle la pièce se solidifie complètement. Afin de maintenir un échange régulier de chaleur entre le moule et la pièce injectée, un fluide est souvent circulé dans les canaux faits à l'intérieur du moule. La vitesse de l'échange de chaleur est un facteur important affectant le cycle de moulage, c'est-à-dire la performance du processus.

1.2. Outillage rapide

1.2.1. Introduction

Comme mentionné au-dessus, dans le chapitre Introduction, les techniques d'outillage rapide sont une branche importante de développement du prototypage rapide. L'outillage rapide utilise les technologies du prototypage rapide pour produire de façon directe ou indirecte des moules (ou des outillages en général) qui peuvent être utilisés pour une production de test ou de petite série.

Le prototypage rapide crée des modèles physiques qu'on peut toucher, tenir et observer. Avec ces modèles, les ingénieurs-concepteurs peuvent vérifier la conception d'une pièce et apercevoir des erreurs dans la phase de conception avant la production en série de la pièce. Cela permet également aux gestionnaires et aux cadres de marketing de mieux comprendre le produit avant de prendre des décisions concernant sa production et sa promotion.

Les modèles créés par des techniques de prototypage rapide ne peuvent qu'être utilisés pour une estimation visuelle ou bien pour la vérification d'une fonction dans l'assemblage. Dans plusieurs cas, on doit vérifier aussi les caractéristiques mécaniques des produits. L'outillage rapide a pour but de produire de façon rapide, et en même temps économique, des pièces-prototypes proches des pièces finales, en matériau final. L'outillage rapide permet aussi de valider rapidement la conception des outillages pour une production en série.

1.2.2. Processus

Il existe dans la vie quotidienne plusieurs applications de techniques d'outillage rapide, directe ou indirecte. Dans le cadre de cette recherche, on a examiné quelques techniques directes utilisées dans la production des inserts de moules pour le moulage par injection.

Méthode utilisant la technologie de SLA

Une des méthodes qui utilise la technologie de la stéréolithographie pour préparer des outillages rapides est le Direct-AIM (ACES Injection Molding), proposé par 3D Systems Corporation. La méthode Direct-AIM contient des étapes suivantes:

- création des modèles de CAO et ensuite des fichiers STL des inserts (cavités et poinçons) sous forme de coquilles. Cela aide à économiser la résine photosensible, le temps de construction sur la machine SLA et le laser. Les trous pour les éjecteurs, les seuils et les angles de dépouille sont inclus dans les modèles de CAO;
- construction des inserts sur la machine SLA;
- remplissage des coquilles après l'installation des tubes en cuivre pour le refroidissement. Les matériaux pour le remplissage peuvent être l'époxy chargé d'aluminium ou les métaux à basse température de fusion;
- finition et installation dans la base du moule;
- moulage sur la machine à injection.

Méthode utilisant la technologie de SLS

Une autre méthode de construction directe des outillages rapides est proposée par la compagnie DTM. Les matériaux utilisés ici sont différents types de

poudres, des poudres en thermoplastiques aux poudres métalliques. Deux techniques sont présentées.

a. Technique utilisant des poudres plastiques:

Comme dans la méthode de Direct AIM, tout d'abord, les modèles 3D et les fichiers STL des inserts sont créés sur un logiciel de CAO sous forme de coquilles. Ces fichiers sont ensuite transférés sur la machine SLS pour préparer les inserts. Pour les matériaux comme le cuivre-polyamide, on peut inclure dans les fichiers de CAO les canaux de refroidissement ainsi que les seuils; les trous des éjecteurs et les angles de dépouille. Les inserts obtenus sont poreux et doivent être colmatés (sealing) par une colle spéciale en évitant les fuites d'eau des canaux de refroidissement. Après avoir collé les inserts, on les remplit comme dans le cas des inserts en époxy avec des alliages à basse température de fusion. Ensuite, les inserts subissent la finition et l'installation dans la base du moule.

b. Technique utilisant des poudres métalliques

L'utilisation des poudres métalliques permet de produire des moules rapides qui peuvent assurer la production d'un grand nombre de pièces injectées en matériaux réels. Ces processus sont mis en place par l'Université du Texas comme le processus Rapid Mold et par DTM Corporation, Austin, Texas comme le processus Rapid Tool.

Les deux processus cités ci-dessus utilisent les mêmes poudres métalliques revêtues d'un liant polymère. Dans les deux processus les préformes sont construites sur la machine SLS. Pendant cette phase, le liant polymère de la

poudre est fritté par une source de chaleur (le laser) et les particules de poudre métallique sont liées ensemble pour former la pièce.

Les phases suivantes sont différentes pour ces processus. Dans le processus Rapid Mold, le liant est enlevé dans un four, ce qui forme une pièce poreuse. Cette pièce "brune" est ensuite infiltrée par une résine époxy spéciale (Barlow J., 1996).

Les préformes dans le processus Rapid Tool passent le cycle de frittage (sintering furnace cycle) dans un four. Dans ce cycle, le liant est pyrolysé, les particules métalliques sont fusionnées et frittées ensemble et c'est ainsi que les pièces "brunes" sont formées. La dernière phase consiste à infiltrer les pièces "brunes" avec du cuivre. Le cuivre entre dans les espaces ou porosités par capillarité à l'intérieur des pièces et rend les pièces complètement denses (Guide to material: RapidSteel 2.0).

c. Matériaux

Résine époxy

La résine époxy est le matériau le plus utilisé dans le procédé de SLA, surtout pour produire des inserts de moule pour l'injection. Ce type de matériau est développé par 3D Systems en collaboration avec Ciba-Geigy Research Center, Marly, Suisse. La résine époxy présente de bonnes propriétés tel qu'un retrait linéaire effectif réduit, une faible distorsion, une planéité améliorée, un gonflement presque nul et une bonne résistance en flexion. Ces caractéristiques peuvent améliorer la précision et augmenter la durée de vie des inserts.

La résine époxy a une basse conduction thermique, par exemple l'époxy 5170 a une conduction thermique de 0.167 W/mK tandis que celle de l'acier 1020 est de 46.7 W/mK. La résine époxy déjà durcie après le procédé de SL a tendance à absorber de l'eau; cela cause le changement de dimension des inserts et assouplit ces derniers (Jacobs, 1996).

Cuivre-Polyamide

En 1993, DTM a introduit le premier matériau polyamide afin de créer des modèles physiques de test en fonctionnalité. En 1998, DTM a présenté un nouveau type de matériau : cuivre-polyamide. Ce matériau est un composite de cuivre et nylon ayant une meilleure conduction thermique (1.28 W/m-K à 40 °C) et une plus grande résistance à la chaleur que celles de la plupart des matériaux plastiques utilisés pour l'outillage rapide (Nelson, 1999). Il s'utilise afin de produire des outillages rapides pour une production en petite série de quelques douzaines à quelques centaines de pièces en matériaux finaux.

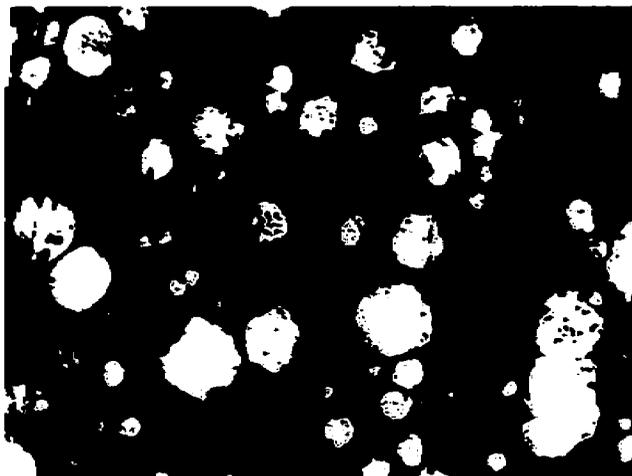


Figure 1.9 : Photo métallographique du cuivre-polyamide (x 250); zone blanche - particules du cuivre, zone noire - polyamide.

RapidSteel

Ce type de matériaux est développé par DTM Corporation. Ce sont des poudres métalliques (acier inoxydable) revêtues par un liant thermoplastique. Ce matériau est utilisé pour préparer des inserts de moules à injection qui assurent l'injection jusqu'à 100,000 pièces ou jusqu'à 400 pièces pour des moules de coule sous pression (Radstok, 1998).

1.2.3. Problèmes de l'outillage rapide

L'outillage rapide contribue pour une part importante dans le processus de lancement d'un nouveau produit sur le marché. Le coût et le temps de préparation des outillages rapides sont inférieurs à ceux des outillages conventionnels. Pourtant, l'outillage rapide a des inconvénients à cause des procédés et des matériaux utilisés. Il existe des problèmes qui peuvent influencer l'efficacité de l'outillage rapide parmi lesquels on peut relever les suivantes :

- la rugosité de la surface : l'approximation des modèles de CAO pendant la triangulation des surfaces influe sur la précision des objets physiques obtenus. Le procédé de construction par couche laisse sur les surfaces, surtout sur les surfaces inclinées des objets physiques, des traces de type « escalier ».
- le retrait : les objets préparés par les procédés de SLA et SLS subissent un retrait linéaire non uniforme pendant la polymérisation de la résine liquide ou la fusion des particules. Ce retrait cause une erreur géométrique; de plus, il génère la contrainte interne résiduelle lorsque une autre couche est préparée, ce qui cause une distorsion des produits et influence la précision des objets construits.

- **les propriétés thermiques** : les matériaux utilisés pour créer des moules rapides (résine époxy, polyamide...) ont une basse conductivité thermique par rapport aux matériaux conventionnels (acier, aluminium). Le faible transfert thermique inhérent aux matériaux utilisés pour créer l'outillage rapide mènera à l'augmentation du cycle de procédé et au dommage rapide. La basse température de transition vitreuse des matériaux est aussi un inconvénient pour ces matériaux.
- **la durée de vie du moule**: la durée de vie du moule est très limitée à cause des faibles propriétés mécaniques des matériaux.

Actuellement, il y a plusieurs travaux réalisés par différents centres de recherche sur ces problèmes. Le but de ces recherches est d'améliorer la performance des techniques d'outillage rapide, surtout dans le moulage des pièces par injection.

Précision dimensionnelle

Les possibilités qu'offre la méthode de construction des objets physiques par couche sont presque illimitées s'il s'agit de pièces prototypes ne servant qu'à un but visuel (exemple de la bouteille Klein [Jacobs, 1996]). Toutefois, les pièces créées pour des tests en fonctionnalités, notamment des inserts de moules à injection, demandent une grande précision dimensionnelle et de bonnes qualités de la surface. L'approximation des surfaces des modèles par triangulation, le mode de construction par couche (l'épaisseur de la couche) et le retrait ayant lieu au cours de la polymérisation ou du frittage des particules sont des facteurs qui affectent la précision et la qualité des inserts de moules rapides.

Comme on a déjà mentionné dans le paragraphe 1.1.1, l'objet physique facettisé s'éloigne de la forme initiale et fait perdre en précision.

L'effet d'«escalier» inhérent à toutes les techniques de prototypage rapide est le facteur principal de la rugosité de la surface, particulièrement pour les surfaces inclinées (Figure 1.10)

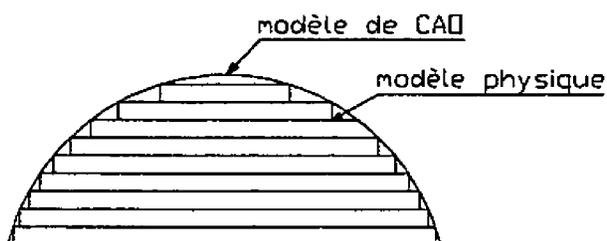


Figure 1.10 : Effet d'escalier

La diminution de l'épaisseur de couche peut améliorer la qualité de surface, mais augmente le temps-machine. Tata *et al.* (1998) ont proposé une méthode efficace de tranchage pour la production par couche qui peut diminuer en même temps l'effet d'«escalier» par un changement optimal de l'épaisseur de couche selon le profil vertical des objets physiques, et aussi le temps de construction (voir figure 1.11).

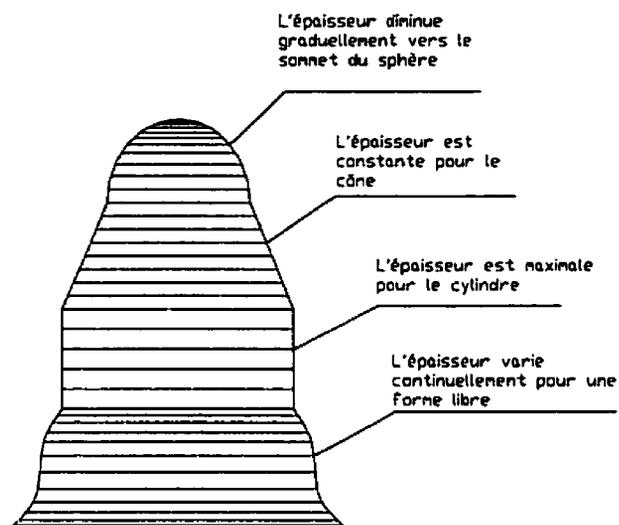


Figure 1.11 : Méthode de tranchage adaptée pour chaque forme d'un objet complexe (Tiré de Xu *et al.*, [1997])

Xu *et al.* (1997) ont réalisé des études sur le tranchage direct des modèles de CAO par des épaisseurs variables et sur l'application d'une orientation optimale des modèles pendant la construction. Selon eux, ces paramètres peuvent améliorer la précision dimensionnelle des modèles et diminuer le temps de construction.

Les surfaces rugueuses empêchent l'éjection des pièces et influencent la qualité des pièces injectées. Une surface lisse des inserts est très importante pour la production de pièces dans le processus d'injection. Blair et Colton (1999) ont fait des études sur le polissage (la taille des grains de sable, le temps et la force de polissage) dans le but d'atteindre la qualité de surface demandée des inserts des moules créés par le procédé de SLA. D'après eux,

une rugosité moyenne de $1.27 \mu\text{m}$ est nécessaire pour produire une surface lisse sur les pièces injectées et pour faciliter leur éjection. Cette rugosité est atteinte par une procédure de finition sur la machine RotoForce®/RotoPol® avec le disque abrasif ayant la taille des grains de sable égale $30 \mu\text{m}$ (équivalente à des papiers sablés No 500). Le temps de la finition est de 1 minute. Nelson *et al.* (1998) ont proposé d'utiliser tout d'abord le papier sablé No 220, en suite le papier sablé No 320 et enfin le papier sablé No 400 pour la finition des inserts en cuivre-polyamide. La rugosité des surfaces des inserts après la finition est de $2.5 \mu\text{m}$ à $5.2 \mu\text{m}$.

La distorsion est un des inconvénients principaux des techniques de prototypage rapide et d'outillage rapide. Pendant la construction des couches, les processus de transformation physique ou chimique ont lieu dans les matériaux : ce sont la réaction photochimique (pour le procédé de stéréolithographie) et le changement de la densité du matériau ayant lieu à cause du changement de la température pendant le frittage du matériau (pour le procédé de frittage sélectif par laser). Tous ces changements causent le retrait du matériau et engendrent les contraintes résiduelles qui mènent à la distorsion des pièces.

Des recherches (Jacobs, 1996) montrent que le retrait volumique des résines est de 6-7% et correspond à peu près à 2% du retrait linéaire pour tous les types de résines : les résines de la base acrylique ainsi que celles de la base d'époxy. Mais les résines époxy présentent une distorsion très faible pendant la construction par rapport aux résines acryliques. On observe aussi que la distorsion de fluage des préformes en résines époxy est extrêmement basse : elle est moins de 0.004 po. sur une longueur de 8 po. Cette bonne caractéristique favorise l'utilisation des résines époxy dans la construction des prototypes et des outillages rapides (Jacobs, 1996).

Le procédé de frittage sélectif par laser est un procédé anisotrope : le degré de frittage n'est pas le même par rapport à la direction de balayage du laser; et entre les couches, ce degré est le plus faible. C'est pourquoi le changement dimensionnel est aussi différent selon les directions des pièces. Plusieurs matériaux utilisés dans le processus de frittage sélectif par laser subissent un post-procédé dans un four, surtout pour les métaux, ce qui entraîne souvent un retrait et des déformations non contrôlables.

En général, jusqu'aujourd'hui, on ne trouve pas beaucoup de recherches réalisées sur le mécanisme de retrait volumique pour le processus de frittage sélectif par laser. Cependant, quelques propositions ont été faites pour compenser le retrait pendant la construction et empêcher la distorsion des pièces. Pour le matériau cuivre-polyamide, les échelles de compensation de retrait selon les axes X-Y et l'axe Z sont 1.021 et 1.01 respectivement (Guide to materials : Copper Polyamide, 1998). Nelson *et al.* (1998) ont proposé d'ajouter des couches qui couvrent la majorité de la région de construction, d'une épaisseur d'au moins 2 mm en bas et en haut du modèle afin de contrôler la vitesse de refroidissement. Ces couches fonctionnent comme une barrière empêchant le modèle de refroidir très vite (car le cuivre-polyamide a une bonne conduction thermique), ce qui peut causer la distorsion.

Condition thermique

Pendant le processus d'injection, le matériau plastique fondu est injecté dans la cavité de l'insert. La température de cette masse fondue est d'environ 230°C, soit plusieurs fois supérieure à la température de transition vitreuse du matériau des inserts (70°C). Afin de maintenir la rigidité de la surface des inserts en époxy ou en cuivre-polyamide, il faut les refroidir très vite et régulièrement.

Puisque l'époxy est une résine à une basse conduction thermique, on peut diminuer l'épaisseur de la coquille des inserts - un facteur important qui peut influencer le comportement du transfert thermique des inserts. Saurkar *et al.* (1999), dans leur recherche, ont montré que l'utilisation des coquilles des inserts ayant une épaisseur de 0.025 po en combinaison avec le remplissage par un époxy chargé de carbone peut améliorer la condition de refroidissement de ces inserts.

Le meilleur refroidissement peut être obtenu avec l'utilisation de systèmes de canaux de refroidissement en combinaison avec les méthodes mentionnées ci-dessus. Des canaux de refroidissement conformés augmentent l'uniformité de température des inserts et s'avèrent très efficaces (Saurkar *et al.*, 1999; Dickens, 1999).

En considérant des conditions concrètes d'expériences, les auteurs ont proposé différentes méthodes et temps de refroidissement pour les inserts en résine époxy et en cuivre-polyamide. Palmer et Colton (1999) ont mis le temps de refroidissement de 180 secondes pour les inserts en résine époxy et ont laissé les inserts de refroidir en air pendant 60 secondes entre les cycles. Rahmati et Dickens (1997), dans leurs expériences, ont réalisé des injections avec le temps de cycle de 4.3 minutes pour refroidir les inserts à la température de 45 °C; une autre méthode de refroidissement par l'air est aussi utilisé, qui diminue le temps de cycle à 2 minutes. Pour les inserts en cuivre-polyamide, Nelson *et al.* (1998) ont proposé un temps de cycle de 15 à 40 secondes.

Afin d'économiser en coût de résine époxy, de diminuer le temps de construction, d'augmenter la rigidité des inserts et d'améliorer le transfert thermique, on applique différents matériaux de remplissage (*back-filling*) des inserts. Le remplissage des inserts par l'époxy chargé d'aluminium est utilisé le

plus souvent. Des expériences ont indiqué que la conduction thermique des inserts remplis par l'époxy chargé d'aluminium a augmenté de 60% (Dell'Arciprete *et al.*, 1999). Une autre recherche a montré que l'addition de la poudre d'aluminium (39% en poids) n'augmente pas de façon remarquable la conduction thermique de ce matériau; par contre, l'addition de la poudre de carbone (12% en poids) peut l'améliorer (Saurkar *et al.*, 1999). L'utilisation des métaux à bas point de fusion tels que Étain-Bismuth a amélioré considérablement le transfert thermique des inserts. Cependant, leur température de fusion est assez haute (70 °C ou plus), c'est-à-dire proche de la température de transition vitreuse de la résine époxy. Cela peut mener à la déformation et la distorsion des inserts pendant le remplissage (Dell'Arciprete *et al.*, 1999; Gnegy et Ogale, 1998).

Facteurs influençant la résistance et la durée de vie des moules rapides

La résistance des moules rapides est jusqu'à maintenant un problème qui empêche leur application dans la production de série ou de produire des pièces en matériaux réels. Des recherches ont été réalisées pour améliorer la situation de ces très prometteuses techniques d'outillage rapides.

a. Matériaux

Dans les dernières années, de nouveaux types de matériaux avec de bonnes propriétés physiques et de bonnes caractéristiques mécaniques et thermiques sont apparues. On peut citer quelques-uns de ces matériaux :

- Résine époxy XB5170, développée par 3D Systems et Ciba Geigy Corporation avec un retrait volumique faible (2-3%) qui assure une construction des pièces stables et précises;

- Cuivre-polyamide qui est un composite de cuivre et nylon ayant une haute conductivité thermique;
- RapidSteel 2.0 qui a de bonnes caractéristiques mécaniques (correspondant à celles de l'acier P20) et une bonne conductivité thermique.

b. Paramètres de construction des inserts

La précision et les caractéristiques mécaniques des inserts construits par des techniques d'outillage rapide sont déterminées par les propriétés des matériaux utilisés et aussi par les paramètres de fabrication sur les machines de prototypage rapide.

Zhou *et al.* (1999) ont réalisé des recherches sur l'influence des paramètres de construction sur la qualité des pièces. En utilisant la méthode Taguchi, ils trouvent qu'entre 15 variables, il y en a 5 variables qui apparaissent comme les plus importants facteurs affectant la qualité des pièces construites par la technique de stéréolithographie. Ce sont les paramètres suivants : l'épaisseur de la couche, la distance entre deux lignes de balayage successives (hatch spacing), la profondeur de polymérisation qui dépasse l'épaisseur de la couche (overcure), la distance entre l'arête du racleur et la couche déjà durcie (blade gap) et la position du plan de construction. Rhamati et Dickens (1997) ont trouvé l'influence des paramètres tels que la viscosité de la résine, la vitesse de déplacement du racleur et l'épaisseur de la couche sur la qualité des pièces. Une haute viscosité de résine peut causer des bosses aux deux bouts de la pièce, ce qui cause, à son tour, la distorsion de la pièce et diminue sa précision. Mais augmenter la température pour diminuer la viscosité de la résine peut accélérer la dégradation de la résine et causer sa rupture prématurée.

Gibson et Shi (1997) et William et Deckard (1998) croient que la qualité (précision dimensionnelle, rugosité de surface et propriétés mécaniques) des pièces fabriquées dans le processus de frittage sélectif au laser est affectée par une combinaison optimale des caractéristiques du matériau et des paramètres de construction. Gibson et Shi ont réalisé des recherches sur interdépendance entre les propriétés des matériaux (la température de transition vitreuse, la conduction thermique, la taille des particules de poudres, la densité...) et les paramètres de construction tels que la température de la cuve (part bed temperature), la puissance du laser, la distance entre deux vecteurs de balayage parallèles, la grandeur de balayage (scan size) déterminant la vitesse de balayage, l'épaisseur de la couche. Leurs études montrent qu'une densité d'énergie élevée peut générer une haute contrainte à traction et une densité élevée des objets, au contraire une basse rugosité des surfaces est obtenue; et que l'orientation et la direction de construction influencent sur les caractéristiques mécaniques des objets. William et Deckard, quant à eux, ont concentré leur recherches sur la méthode de délivrance de l'énergie aux poudres. Leur recherches ont abordé les facteurs suivants : puissance du laser, vitesse de balayage du laser, dimension du rayon de laser (spot size) et distance entre deux lignes de balayage successives.

c. Paramètres technologiques des inserts et de moulage

La pression de moulage et la conduction thermique sont des points critiques affectant la durée de vie des inserts. Comme les inserts créés par les techniques de stéréolithographie et de frittage sélectif par laser ont une durée de vie courte, une condition de travail avec les paramètres technologiques optimaux sera nécessaire.

Palmer & Colton (1999) ont fait des études concernant l'influence des angles de dépouilles sur la qualité et la durée de vie des inserts. Les angles de 1° et 2° sont proposés. Le type et la position des seuils sont aussi des facteurs importants affectant la durée de vie des inserts. D'après eux, le seuil en éventail a une section plus large que le seuil latéral, ce qui diminue la vitesse d'injection et en conséquence diminue la pression dans la cavité de l'insert. Tout cela peut augmenter la durée de vie des inserts.

Dell'Arciprete *et al.* (1999) trouvent que le contrôle optimal et la diminution de la pression de moulage dans la cavité des inserts créés par le procédé de stéréolithographie augmentent leur durée de vie jusqu'à 32 %. Par contre, la diminution de la pression de moulage augmente la température des moules; c'est pourquoi il faut utiliser un système de refroidissement efficace pour ces moules en combinaison avec l'application des cycles optimaux de moulage. Le refroidissement par un jet d'air s'avère efficace (Rahmati & Dickens, 1997).

Comme dans le processus de la stéréolithographie, les inserts des outillages rapides en cuivre-polyamide sont construits sous forme de coquilles et remplis par différents matériaux de remplissage (époxy renforcé de métaux ou Metspec 217, la température de fusion duquel est de 103 °C) qui peuvent améliorer la condition de refroidissement de ces inserts. Quelques propositions sont faites pendant la construction des inserts en cuivre-polyamide (Arnold-Feret, 1999) :

- Le nombre d'éjecteurs est pris plus grand de 30 à 40% que celui dans le cas de moule en aluminium;
- Les seuils sont plus larges pour diminuer la pression dans la cavité. Pour les cavités qui ont une dimension dépassant 254 mm, on utilise l'alimentation en éventail (fan gate);

- Les inserts sont construits dans le plan incliné en tournant l'axe X d'un angle de 15° pour augmenter la résistance et la durabilité;
- Les surfaces des inserts sont étanchées par un époxy de basse viscosité ou du méthylacrylate thermique et polies par des papiers sablés.

Arnold-Feret (1999) croit que le matériau utilisé, la géométrie des pièces et la pression d'injection affectent la durée de vie des inserts en cuivre-polyamide et qu'il n'y a pas de garantie sur le nombre de pièces injectées, mais un nombre minimal de 20 pièces peut être atteint. Nelson *et al.* (1998) ont montré les nombres des pièces injectées sur les inserts en cuivre-polyamide (tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Matériaux utilisés pour l'injection sur les inserts en cuivre-polyamide

Matériau	Température de fusion, °C	Température d'injection, °C	Nombre des pièces injectées
Polyéthylène	Tm : 122 - 137	175 - 260 (350 - 500)	50 - 350
Polypropylène	Tm : 160 - 175	190 - 285 (375 - 550)	50 - 200
10-40% PP chargé de talc	Tm : 158 - 168	175- 285 (350 - 550)	50 - 350
40% GF Polypropylène	Tm : 168	230 - 285 (450 - 550)	30 - 150
ABS	Tg : 102 - 115	200 - 275 (390 - 525)	40 - 150

Chapitre II

ÉQUIPEMENTS ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

2.1. Introduction

Afin d'atteindre les objectifs de ce mémoire, on a réalisé les expériences sur des inserts préparés avec deux types de matériaux : le cuivre-polyamide et la résine époxy 5510. Tous les inserts ont servi à produire un seul type de pièce. Cela nous a aidé à comparer facilement les résultats obtenus pendant les expériences. Les inserts sont préparés avec deux types de seuil : un seuil latéral et un seuil en éventail. On a créé les inserts avec et sans canaux de refroidissement afin de comparer différentes techniques de refroidissement.

2.2. Choix du type de pièce

2.2.1. Pièce

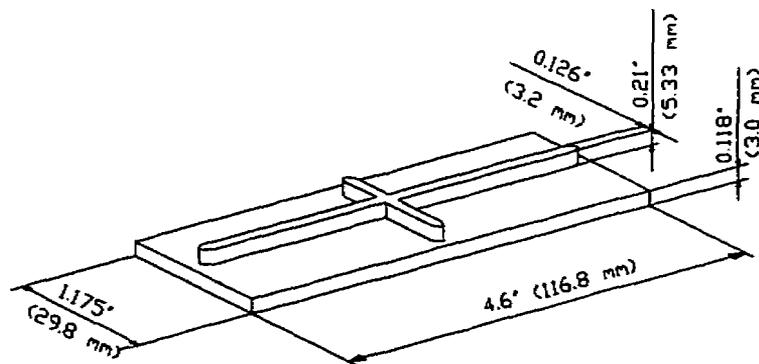


Figure 2.1 : Pièce nervurée

La pièce choisie est de type "plaque nervurée" (Figure 2.1). Ce type de pièce permet d'effectuer des mesures sur le refroidissement de différentes parties du moule et sur le refroidissement des pièces elles-mêmes, ainsi que sur l'éjection des pièces injectées. Il permet aussi de comprendre le comportement des inserts pendant le moulage sous l'influence des paramètres technologiques d'injection.

2.2.2. Base du moule

Une base de moule existante est utilisée. C'est la base du moule qui produit différentes éprouvettes pour les tests en traction et en flexion des matériaux plastiques; celles-ci sont, selon leur forme, similaires à notre pièce. Les inserts métalliques sont installés dans les cavités d'une plaque de la partie mobile de la base du moule au moyen de boulons de fixation. Nos inserts sont préparés en matériaux moins résistants comme le cuivre-polyamide et l'époxy, c'est pourquoi il est raisonnable de préparer deux composants : une base métallique qui joue le rôle d'une pièce de positionnement des inserts et les inserts eux-mêmes (Figure 2.2).

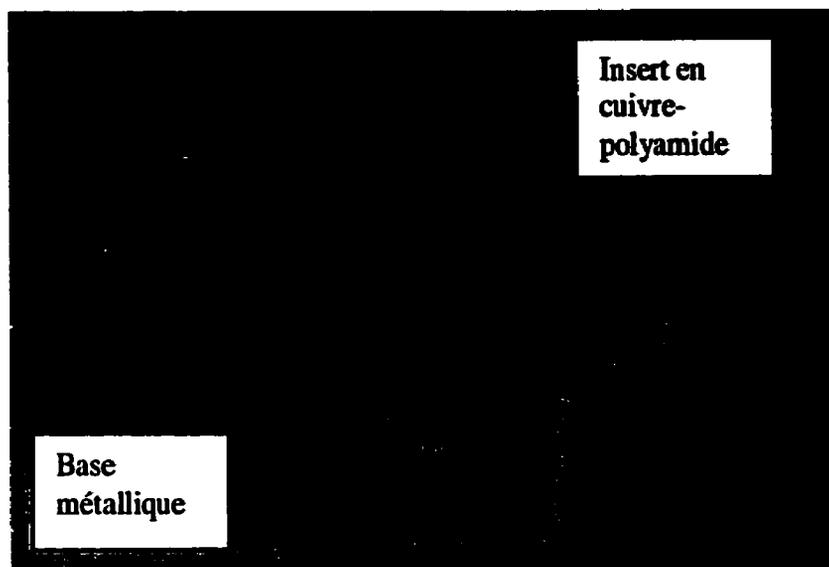


Figure 2.2 : Ensemble de l'insert (partie extérieure - base métallique; partie intérieure - insert en cuivre-polyamide)

2.3. Préparation des inserts

2.3.1. Dessins des inserts

Les dessins détaillés des inserts en cuivre-polyamide sont illustrés dans la figure 2.3 et ceux des inserts en résine époxy - dans la figure 2.4.

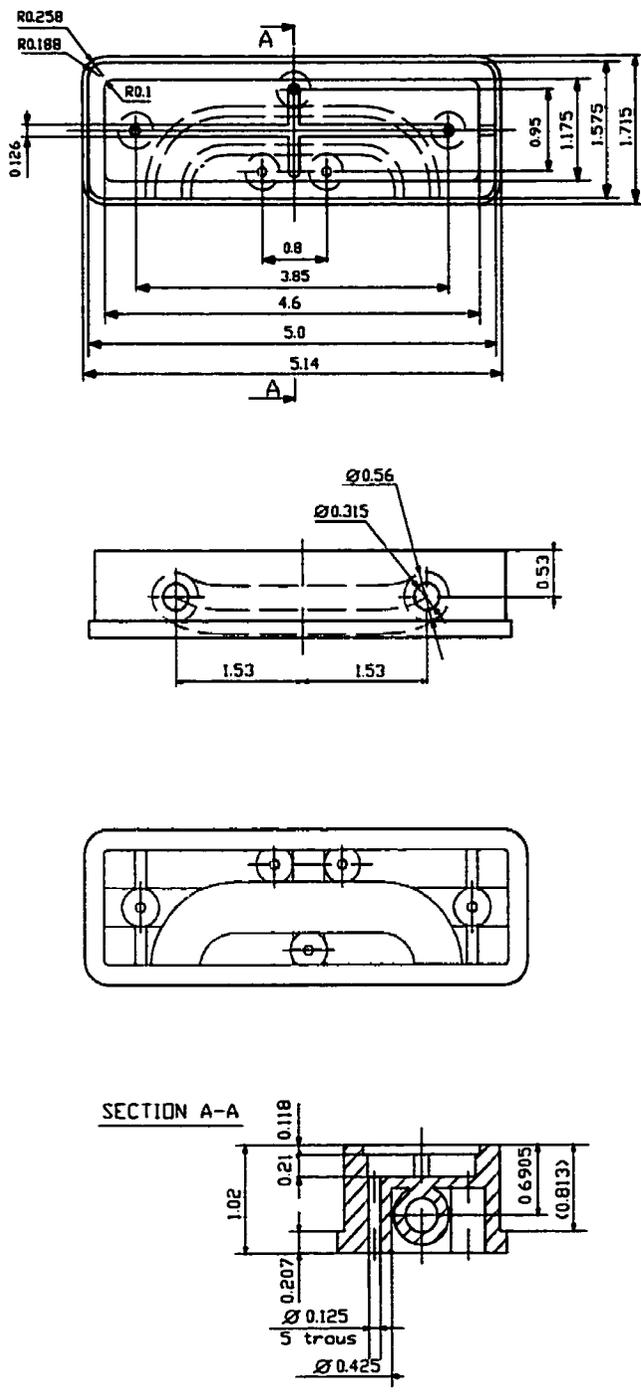


Figure 2.3 : Dessins de l'insert en cuivre-polyamide

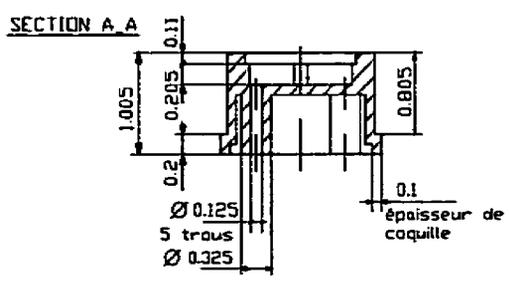
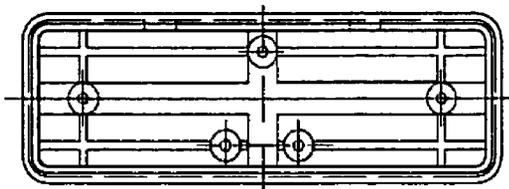
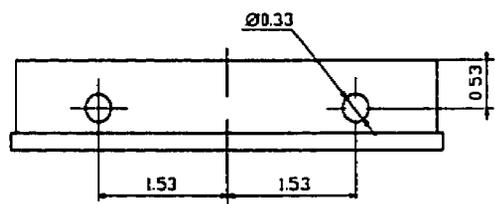
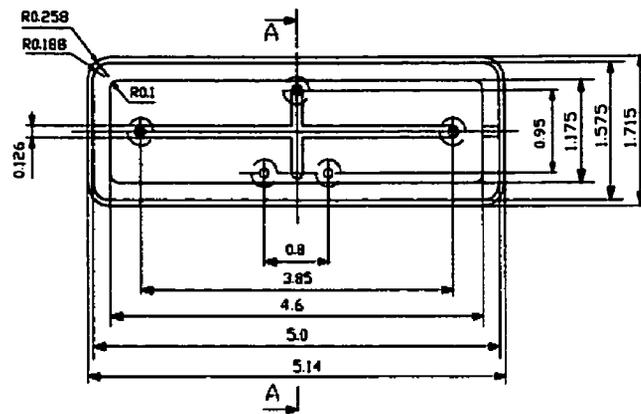


Figure 2.4 : Dessins de l'insert en résine époxy

2.3.2. Modèles 3D

Les modèles de CAO des inserts sont préparés avec le logiciel CATIA version 4.0. Dans ces modèles sont inclus les seuils, le canal de refroidissement (pour les inserts en cuivre-polyamide), les membrures de renforcement et de positionnement du matériau de remplissage (Figure 2.5).

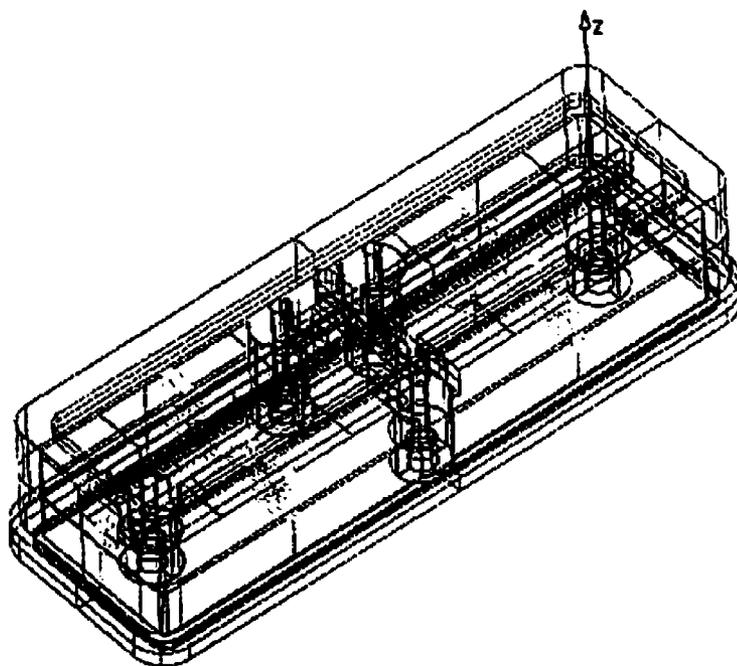


Figure 2.5 : Modèle de CAO de l'insert

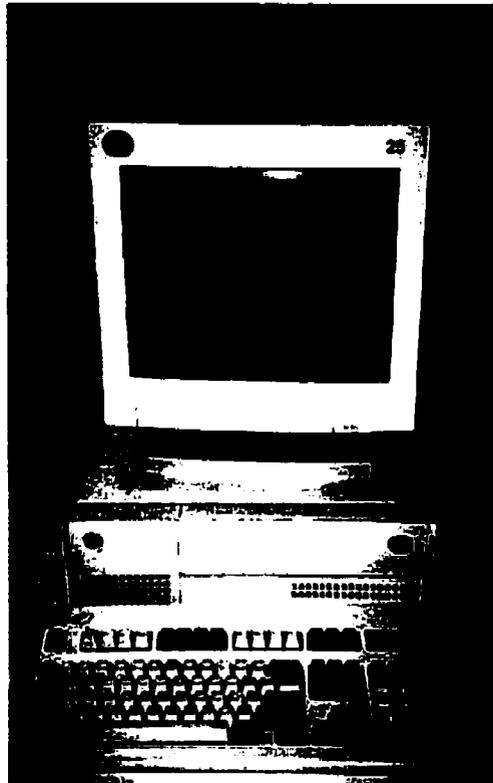


Figure 2.6 : Modèle de CAO sur l'écran de l'ordinateur

Les modèles de CAO pour les inserts en cuivre-polyamide sont préparés sous forme de coquilles ayant une épaisseur de 3.8 mm (0.15 po.) (recommandé par le Guide to Materials : Copper-Polyamide et par Nelson [1999]), pour les inserts en résine époxy - des coquilles d'une épaisseur de 2.54 mm (0.1 po.) (recommandé par Saurkar [1999]) sont réalisées. Le modèle de CAO pour les

inserts en époxy ne contient pas de canal de refroidissement. Les deux types de modèles incluent les trous pour les éjecteurs.

2.3.3. Modèles STL

Les modèles complets de CAO sont ensuite convertis en fichiers STL. Cette transformation est réalisée par le logiciel CATIA. On peut voir un de ces fichiers dans le figure 2.7.

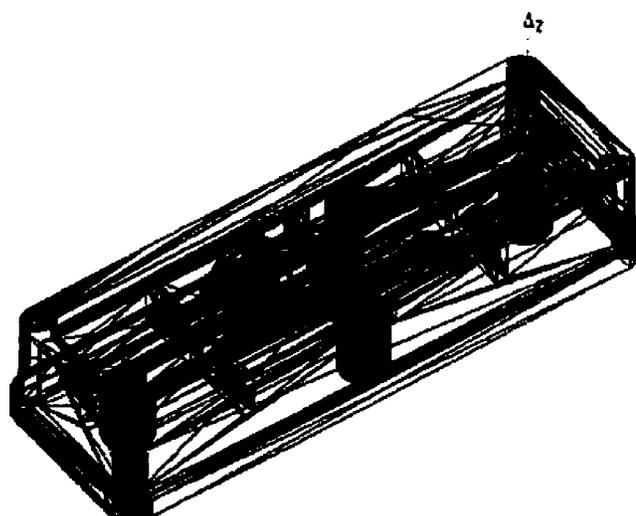


Figure 2.7 : Fichier STL

Les paramètres de fichiers STL pour tous les inserts sont :

- dimension maximale des triangles (longueur maximale des côtés de chaque triangle) est de 100 mm;

- dimension maximale de la flèche (erreur de flèche maximum par rapport à la forme théorique réelle) est de 0.0005 mm.

Le nombre de triangles pour les inserts sans canal de refroidissement varie de 6100 à 6500; pour les inserts avec le canal de refroidissement ce nombre est à peu près de 30000.

2.3.4. Construction des modèles physiques sur les machines SLA et SLS

Les fichiers sont transférés aux machines de stéréolithographie (SLA) et de frittage sélectif par laser (SLS) (Figures 2.8 et 2.9). Les fichiers STL sont vérifiés, tranchés et transférés sur la machine pour construire les modèles physiques.

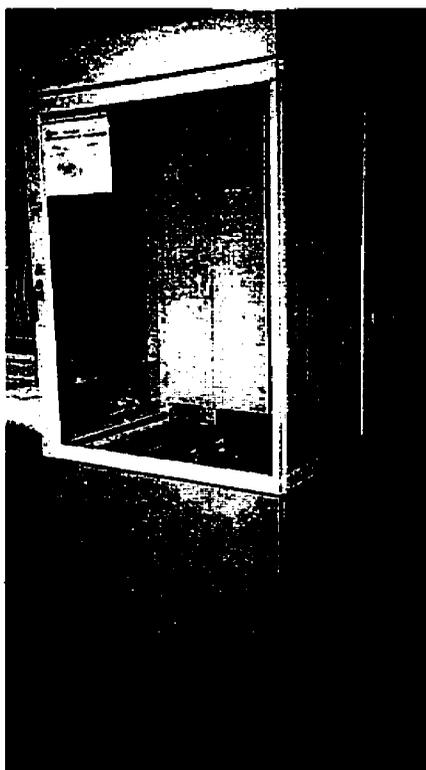


Figure 2.8 : Machine de stéréolithographie SLA 3500

Compensation du retrait : $X = 1.0244$

$Y = 1.0020$

$Z = 1.0000$

Inserts en résine époxy réalisés sur la machine SLA (Figure 2.11)

Épaisseur de couche : $0.004''$ (0.1016 mm)

Puissance du laser : 172 mW

Vitesse de balayage du laser : $B = 100$ po/s

$H = 150$ po/s

Compensation du faisceau de laser : 0.008 po.

Température de la résine : 29°C

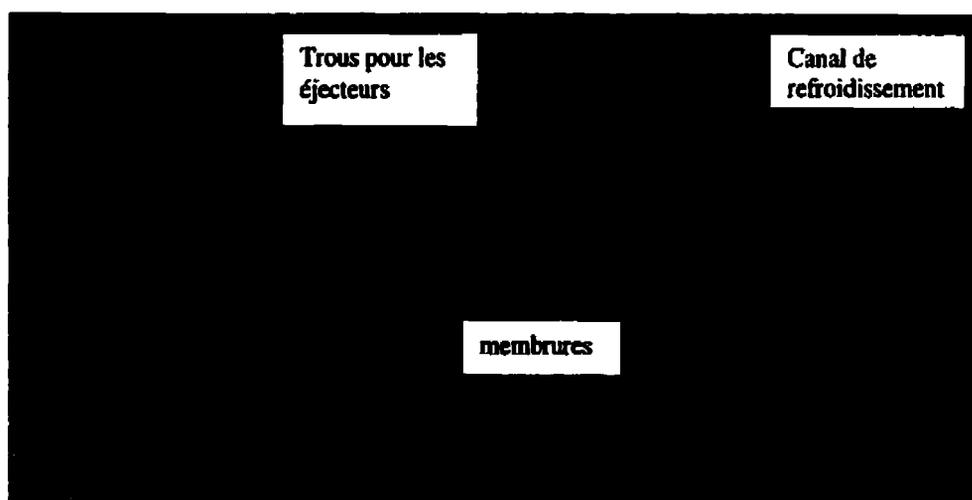
Compensation du retrait : $X = 1.0018$

$Y = 1.0018$

$Z = 1.0000$

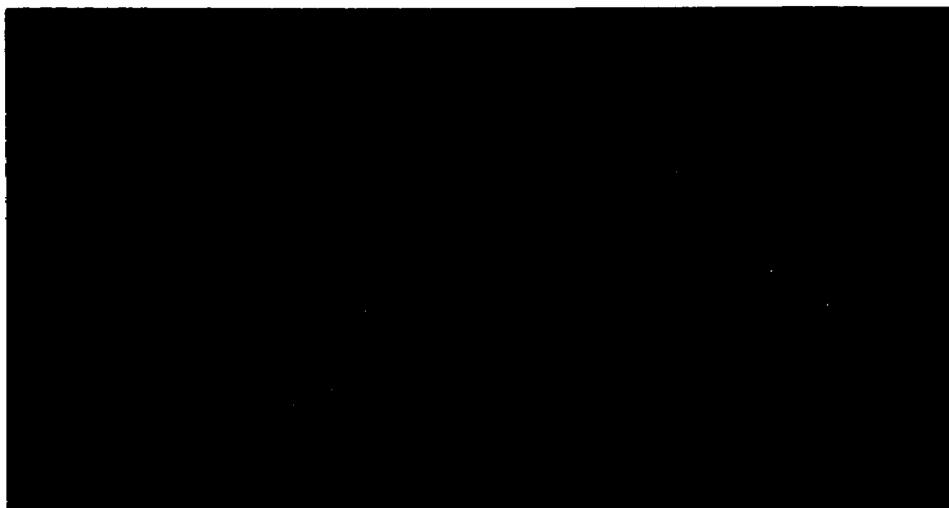


a)

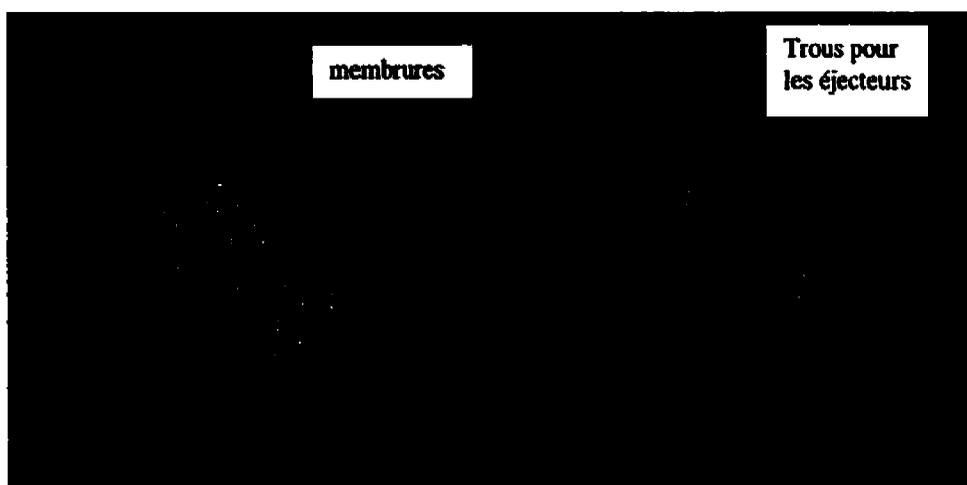


b)

Figure 2.10 : Inserts en cuivre-polyamide; a - vue de dessus, b - vue de dessous



a)



b)

Figure 2.11 : Inserts en résine époxy; a - vue de dessus, b - vue de dessous

2.3.5. Post-processus

Inserts en cuivre-polyamide

Après la construction, les inserts en cuivre-polyamide sont nettoyés de la poudre résiduelle qui demeure sur les inserts après l'enlèvement de la cuve de la machine. Ils ont ensuite subi l'infiltration par l'Imprex Superseal 95-1000A, qui est une résine thermodurcissable. Tout d'abord, les surfaces des inserts sont recouvertes par ce matériau pendant 5 à 10 minutes pour que les surfaces des inserts soient bien saturées. Ensuite, ils sont mis dans un four chauffé à la température de 75°C pendant une heure ou jusqu'à sec. Ce procédé peut être répété.

Afin d'améliorer la résistance et la conduction thermique des inserts, ces derniers sont remplis par un alliage ayant une basse température de fusion. Dans notre cas, l'alliage Metspec de MCP Group est utilisé. Le Metspec 281 (la température de fusion est de 281 °F) est utilisé pour remplir les inserts en cuivre-polyamide.

Les caractéristiques du Metspec 281 sont :

- Température de fusion : 138.5 °C (281 °F)
- Densité : 8.58 gr/cm³
- Chaleur spécifique (état liquide) : 0.048 cal/gm°C
- Conduction thermique (état solide) : 0.044 cal/s.cm.°C
- Résistance à la traction : 6.1 - 6.3 kg/mm²

Après le remplissage par le Metspec, les inserts sont usinés aux dimensions qui conviennent pour l'assemblage avec la base métallique.

Inserts en résine époxy

Les supports sont enlevés des inserts après la construction. La résine n'étant pas encore complètement durcie pendant la construction, les inserts sont mis dans un four de radiation UV pour compléter le procédé de polymérisation.

Ils sont, ensuite, comme dans le cas des inserts en cuivre-polyamide, remplis par un alliage Metspec. Le Metspec utilisé pour les inserts en résine époxy est le Metspec 158 (la température de fusion est de 158 °F).

Les caractéristiques du Metspec158 sont :

- Température de fusion : 70 °C (158 °F)
- Densité : 9.67 gr/cm³
- Chaleur spécifique (état liquide) : 0.044 cal/gm°C
- Conduction thermique (état solide) : 0.043 cal/s.cm.°C
- Résistance à la traction : 1.87-2.65 kg/mm²

Après le remplissage par le Metspec, les inserts sont usinés aux dimensions qui conviennent pour l'assemblage avec la base métallique.

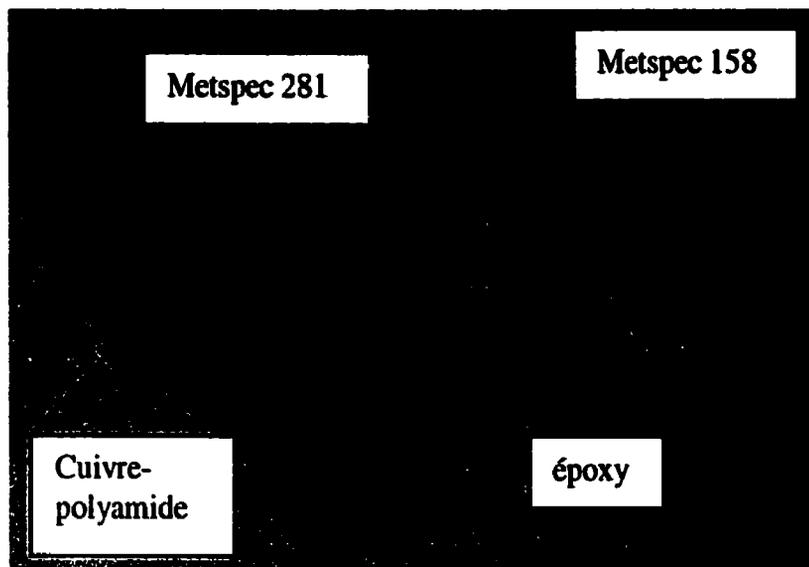


Figure 2.12 : Inserts remplis et usinés

Pour les deux types d'inserts, le procédé de remplissage est de chauffer le Metspec à une température juste supérieure à la température de fusion dans une cuve ayant le contrôle de température. Lorsque le Metspec se fusionne complètement et la température de la cuve est presque uniforme, on remplit immédiatement les coquilles des inserts avec le Metspec liquide et on laisse ce dernier de se refroidir pendant 20 min. Après le remplissage avec le Metspec, les inserts subissent l'usinage pour l'assemblage avec la base métallique.

2.4. Installation sur la machine à injection

Avant l'installation dans la base du moule, les inserts ont subi une opération de finition jusqu'à la rugosité désirée des surfaces.

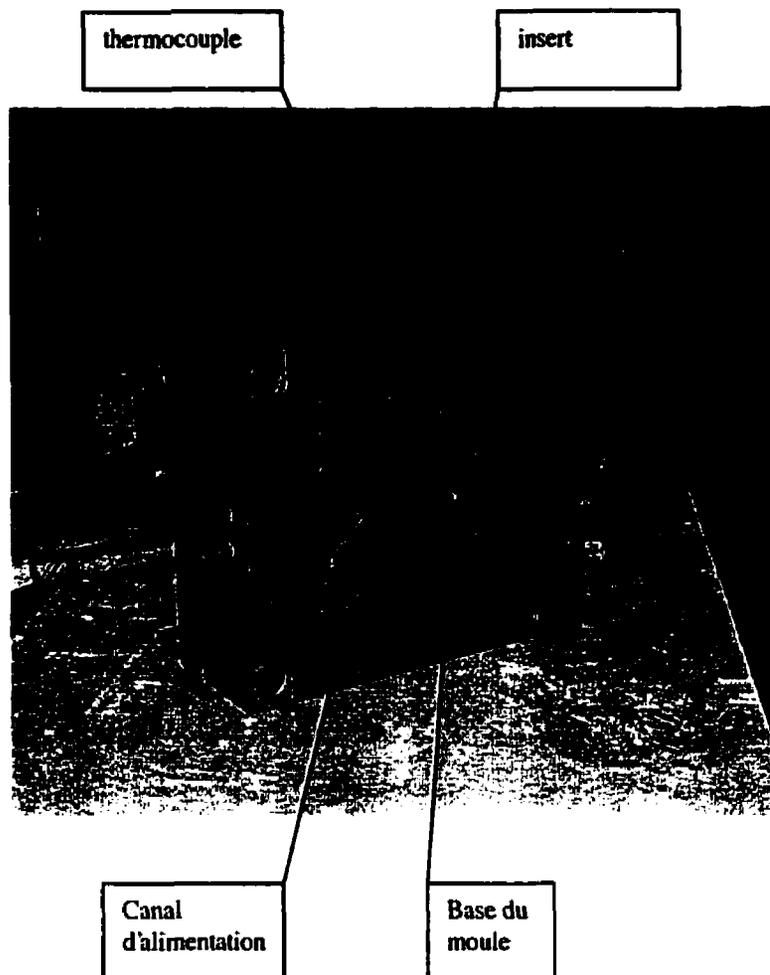


Figure 2.13 : Insert installé dans la base du moule

Le moule avec insert est installé sur la presse à injection de type Battenfeld BA-C 750/300. On peut voir dans la figure 2.14 le système d'acquisition de données de température devant la presse à injection (ordinateur et écran).

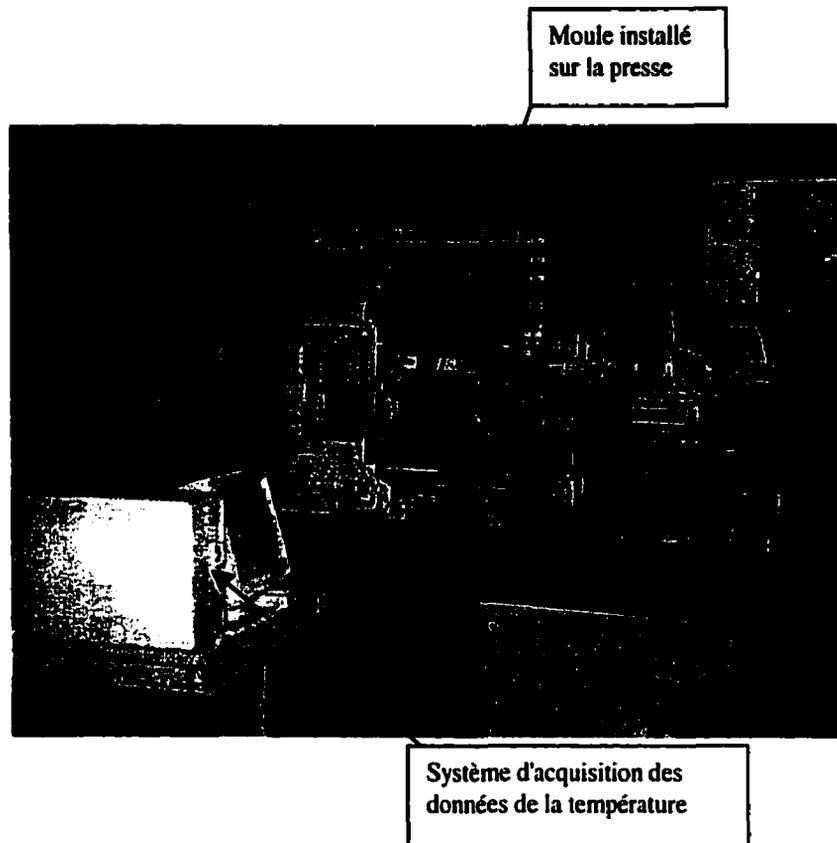


Figure 2.14 : Installation du moule sur la presse

Les caractéristiques de la presse BA-C 750/300 sont les suivants :

- Diamètre de la vis : 45 mm
- Pression d'injection (maximale) : 1500 bar (150 MPa)
- Volume d'injection calculé : 199 cm³
- Poids maximal injectable (polystyrène) : 181 g
- Capacité de plastification (polystyrène) : 14.3 g/sec
- Force de fermeture (maximale) : 750 kN
- Course d'ouverture pour hauteur de moule maximum : 325 mm

2.5. L'équipement de mesure de la température

Pour mesurer la température des inserts, le logiciel LABVIEW 4.0 est utilisé. Trois thermocouples de type J sont installés sur les inserts : un (numéro 1) est installé à mi-chemin entre le seuil et le milieu de la plaque, l'autre - au centre, près de la nervure (numéro 2) et le dernier (numéro 3) est installé symétriquement au premier thermocouple par rapport à l'axe centrale. Les trois thermocouples sont positionnés à peu près à 5 mm sous la surface horizontale de l'insert (Figure 2.15).

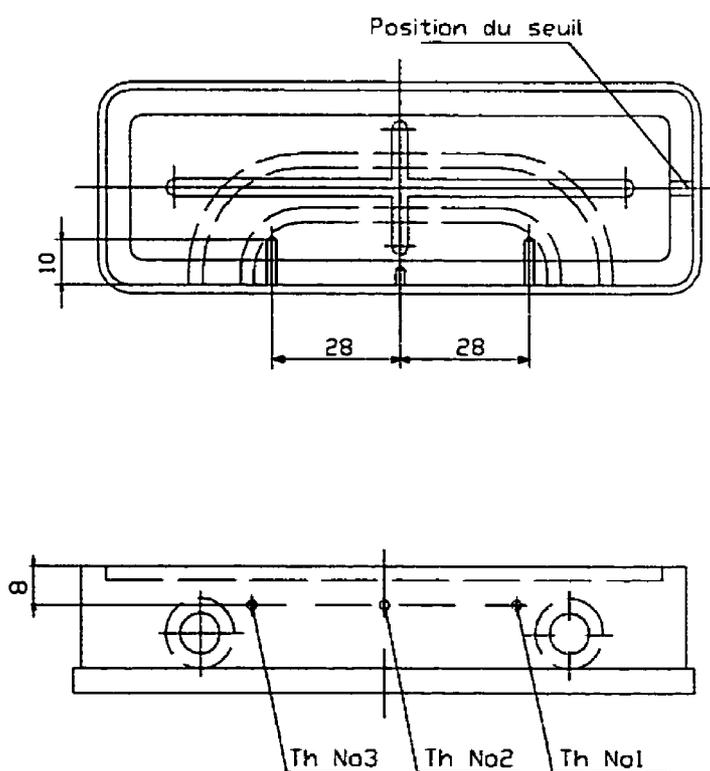


Figure 2.15 : Positions des thermocouples; Th No1 - thermocouple No 1,

Th No2 - thermocouple No 2, Th No3 - thermocouple No 3

2.6. Équipement et procédures de la caractérisation des matériaux

2.6.1. Éprouvettes

Les éprouvettes sont préparées en Cuivre-Polyamide et en Résine Époxy 5510 sur les machines SLA 3500 et SLS 2500. Les dimensions des éprouvettes sont prises d'après les normes ASTM pour des tests en traction, en flexion et en compression. Les éprouvettes sont construites horizontalement et verticalement.

2.6.2. Méthodes de tests

Les tests des éprouvettes en traction, flexion et compression sont réalisés selon les normes suivantes :

- Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics - ASTM D638;
- Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating materials - ASTM D790;
- Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics - D695-96.

Les tests en traction et en flexion sont réalisés sur la machine de test JJ M30K-Omnitronix (Expérience II) et la machine de test LLOYD-LR50K (Expérience I), les tests en compression - sur la machine de test MTS 100K. Le nombre d'éprouvettes pour chaque test était de 6.

Traction

a. Cuivre-polyamide

Équipement de test : LLOYD 50K (expérience I) et JJ M30K (expérience II)

Vitesse de test : 5 mm/min (expérience II) et 2mm/min (expérience I)

Cellule de traction choisie : 5 kN (expérience II) et 50 kN (expérience I)

Charge maximale établie pour l'acquisition : 5kN (expérience II)

Déplacement maximal pour l'acquisition : 10 mm (expérience II)

Extension maximale pour l'acquisition : 7.5% (expérience II)

b. Résine époxy 5510

Équipement de test : LLOYD 50K (expérience I) et JJ M30K (expérience II)

Vitesse de test : 2 mm/min (les deux expériences)

Cellule de traction choisie : 20 kN (expérience II) et 50 kN (expérience I)

Charge maximale établie pour l'acquisition : 15kN (expérience II)

Déplacement maximal pour l'acquisition : 10 mm (expérience II)

Extension maximale pour l'acquisition : 7.5% (expérience II)

Flexion

Équipement de test : LLOYD 50K (expérience I) et JJ M30K (expérience II)

Vitesse de test : 1.2 mm/min.

Cellule de traction choisie : 500 N

Charge maximale établie pour l'acquisition : 250 N

Déplacement maximal pour l'acquisition : 10 mm.

Déplacement correspondant à une déformation de la fibre extérieure

0.05mm/mm : 6mm

Compression

Équipement de test : LLOYD 50K (expérience I) et MTS 100 (expérience II)

Vitesse de test : 1.3 mm/min

Charge de cellule : 20 kN (expérience II) et 50 kN (expérience I)

2.7. Équipement et procédure de mesure de la rugosité des surfaces

La rugosité des surfaces est mesurée sur l'appareil à mesurer l'état de surface "TALYSURF" modèle 4 de RANK PRECISION INDUSTRIES LTD. Les données techniques de cet appareil sont les suivantes :

- Vitesse de balayage du Pick-up :
 - 15.2 - 76.2 mm/min (50 Hz d'alimentation)
 - 18.3 - 91.5 mm/min (60 Hz d'alimentation)
- Longueur maximum de balayage : 11 mm
- Pick-up :
 - Type : inductance différentielle
 - Stylet en diamant, dimension de la point : 0.0025 mm
 - Force appliquée par le stylet : 0.1 gramme
- Interrupteur d'agrandissement : 8 positions (0.05 μ m - 10.0 μ m)
- Puissance d'entrée : 50 W

On n'a pu mesurer que les surfaces horizontalement (voir figure 2.16). 5 mesures sont réalisées pour chaque valeur de la rugosité des surfaces.

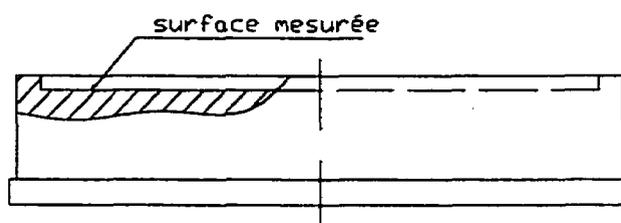


Figure 2.16 : Position de mesure de rugosité des surfaces

2.8. Matériau utilisé pour l'injection

Pour faciliter la comparaison des résultats, un seul matériau est utilisé pour tous les inserts. Le matériau est polypropylène RTP 100. Les caractéristiques de ce matériau sont les suivantes :

- Retrait , 1/8 po d'épaisseur : 0.015 po/po
- Retrait , 1/8 po d'épaisseur : 0.025 po/po
- Absorption de l'eau, en 24 h : 0.01 %
- Résistance à la traction : 34.5 MPa
- Extension à la traction : 150 %
- Pression d'injection : 68.9 MPa
- Température de fusion : 218 - 249 °C

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre porte sur les résultats, obtenus au cours des expériences et présentés sous forme de tableaux et de graphiques, ainsi que sur les discussions de ces résultats.

3.1. Caractérisation des matériaux

Les résultats des tests sont présentés dans les tableaux 3.1 et 3.2. On y trouve les caractéristiques mécaniques des matériaux fournies par les compagnies DTM Corp et 3D Systems, ainsi que les résultats de tests réalisés au laboratoire du Centre de Polymères de l'Université de technologie de Hanoi (Expérience I) et au laboratoire du CRASP du Département Mécanique de l'École Polytechnique de Montréal (Expérience II). Six courbes typiques "charge-extension" ou "charge-déplacement" de tests en traction, en flexion et en compression pour les types de matériaux sont aussi présentées dans les figures 3.1, 3.3 et 3.4.

Tableau 3.1 : Les normes et les résultats des tests sur les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux en Cuivre-Polyamide

Caractéristiques	Méthodes de test	Résultats		
		Fournisseur	Expérience I	Expérience II
Tension (MPa)	ASTM D638	33.6	24.02/25.56	41.83/37.03 ²
Module tangent (MPa)	ASTM D638	-	-	4157/8869
Extension à la rupture (%)	ASTM D638	-	-	2.39/0.66
Extension à la charge maximale (mm)	ASTM D638	-	3.226/3.640	4.30/3.23
Flexion (MPa) ¹	ASTM D790	53.5	52.21/42.64	54.12/48.23
Module d'élasticité (MPa)	ASTM D790	3068	1532/1506	3510/3099
Compression (Mpa)	ASTM D695	99	72.82	67

Note 1 : La valeur de la résistance en flexion fournie par le fournisseur est à la déformation de 5% de la fibre extérieure, celle reçue par l'expérience II est à la rupture.
 Note 2 : Les valeurs avant "/" sont pour éprouvettes construites horizontalement, celles après "/" sont pour les éprouvettes construites verticalement.

Tableau 3.2 : Les normes et les résultats des tests sur les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux en Époxy

Caractéristiques	Méthodes de test	Résultats		
		Fournisseur	Expérience I	Expérience II
Tension (MPa)	ASTM D638	77	63.31	(51.00)/77.51 ²
Module tangent (MPa)	ASTM D638	3296	-	6846/8044
Extension à la rupture (%)	ASTM D638	5.4	-	(0.73)/2.02
Extension à la charge maximale (mm)	ASTM D638	-	5.727/5.517	(3.757)/6.56
Flexion (MPa) ¹	ASTM D790	99	77.25/76.94	100.28/93.02
Module d'élasticité (MPa)	ASTM D790	3054	1672/1741	2324/2066
Compression (MPa)	ASTM D695		107.7	112.9

Note 1 : La valeur de la résistance en flexion fournie par l'expérience II est à la déformation de 5% de la fibre extérieure.
 Note 2 : Les valeurs avant "/" sont pour les éprouvettes construites horizontalement, celles après "/" sont pour les éprouvettes construites verticalement.

a. Traction

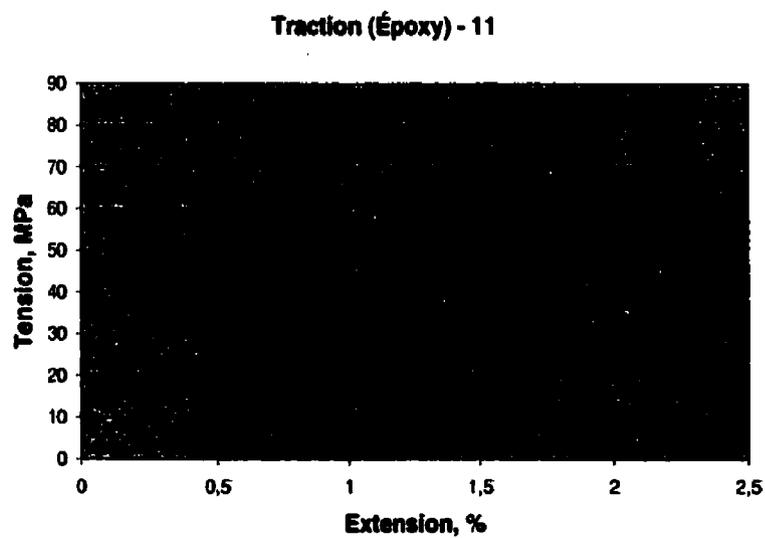
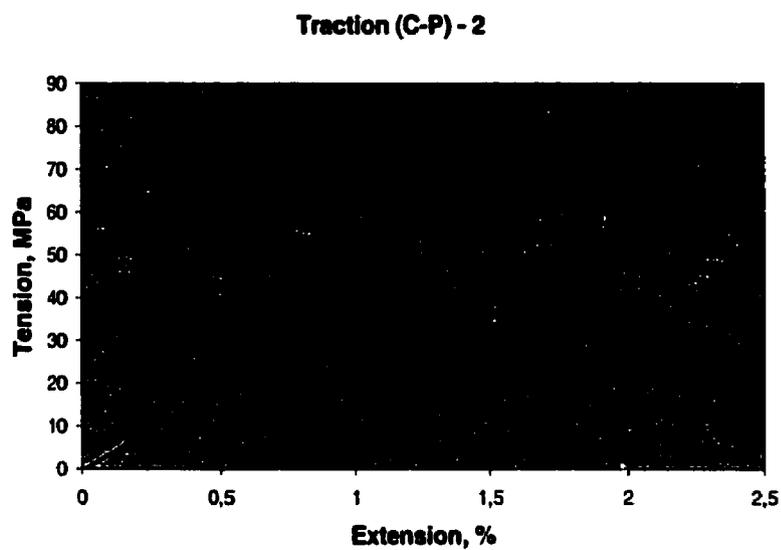


Figure 3.1 : Courbes typiques "charges-extension" en traction. a - éprouvette en cuivre-polyamide; b - éprouvette en résine époxy.

Culvre-Polyamide

La tension moyenne pour les éprouvettes horizontales et verticales est de 41.83 et 37.03 MPa respectivement ce qui est supérieure à la valeur de tension fournie par DTM (33.6 MPa). La valeur de la tension moyenne des éprouvettes horizontales est légèrement supérieure que celle des éprouvettes verticales. Le même résultat est obtenu dans les études de Gibson et Shi (1997) sur l'influence des paramètres de construction sur les propriétés des matériaux.

L'extension moyenne est de 2.39% et 0.66% respectivement pour les éprouvettes horizontales et verticales. On peut constater que l'extension à la rupture pour les éprouvettes horizontales est beaucoup plus grande que celle des éprouvettes verticales; au contraire, le module tangent des éprouvettes verticales est supérieur à celui des éprouvettes horizontales. Ce phénomène peut être expliqué par l'influence de la direction de construction des éprouvettes comme illustré dans la figure 3.2. Pour les éprouvettes verticales, le lien entre les couches est plus faible à cause d'une surface plus petite, c'est pourquoi les éprouvettes verticales sont plus fragiles que celles horizontales.

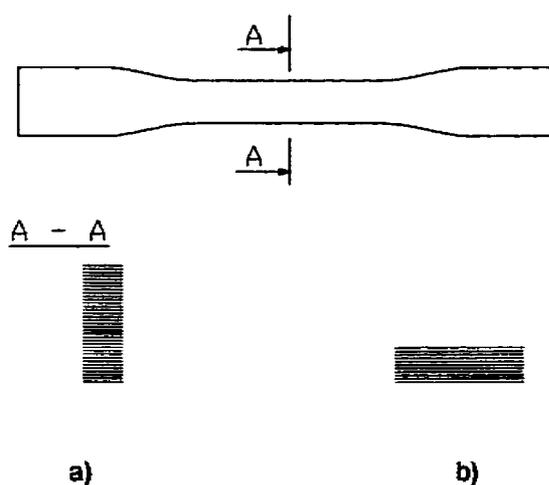


Figure 3.2 : Sections des éprouvettes, a - verticale, b - horizontale

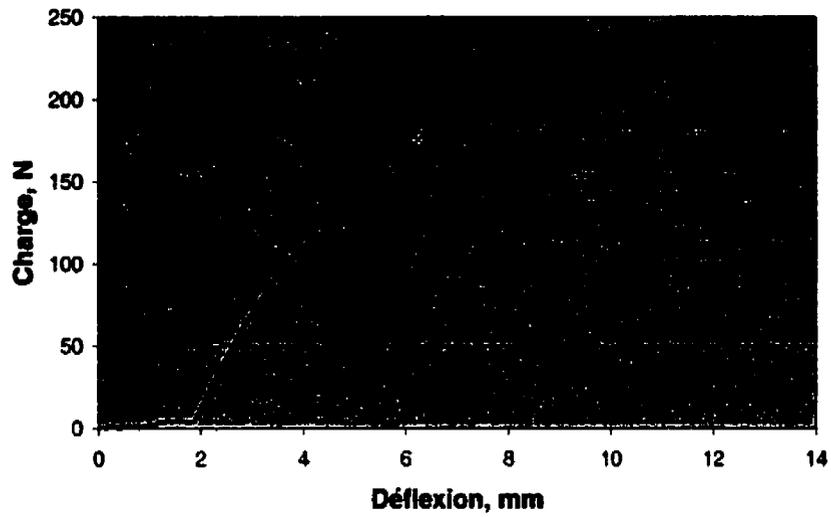
Résine époxy

Toutes les éprouvettes horizontales sont brisées à la place de serrage, c'est pourquoi les résultats ne reflètent pas les valeurs réelles des tests. Les valeurs du module tangent peuvent donner une image plus réelle.

Pour les éprouvettes verticales, les tests sont complétés de façon normale : toutes les éprouvettes sont brisées aux sections calibrées A-A (voir figure 3.2). La tension moyenne est de 77.51 MPa, la même valeur chez 3D Systems. Mais l'extension à la rupture moyenne est inférieure à celle de 3D Systems. Il est intéressant à remarquer que le module tangent est de deux fois plus élevé à celui fourni par 3D Systems. C'est encore difficile de conclure quelque chose parce que le nombre de tests est assez petit. De plus, les conditions de construction des éprouvettes et celles de tests peuvent être différentes d'une expérience à l'autre ce qui donne des résultats différents (Crawford, 1987).

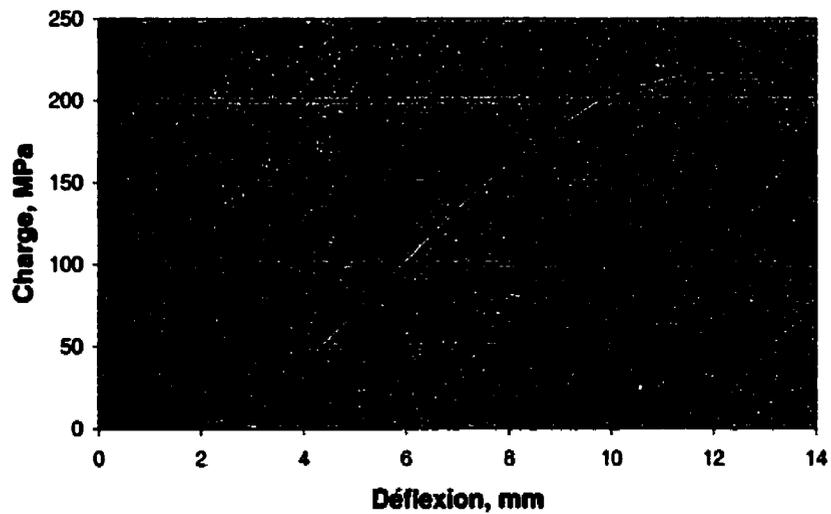
b. Flexion

Flexion (C-P) - 1



a)

Flexion (Époxy) - 3



b)

Figure 3.3 : Courbes typiques "charge - déplacement" en flexion. a - éprouvette en cuivre-polyamide; b - éprouvette en résine époxy.

Cuivre-Polyamide

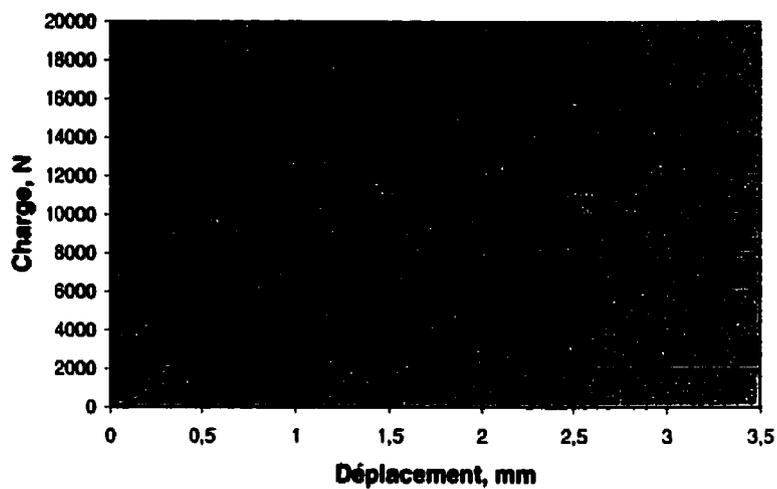
La contrainte de flexion moyenne est de 54.12 MPa et 48.23 MPa pour les éprouvettes horizontales et verticales respectivement. On obtient presque la même valeur que celle chez DTM. Le module d'élasticité pour les éprouvettes horizontales est de 3510 MPa, soit plus important que celui chez DTM (3068 MPa), tandis que pour les éprouvettes verticales, cette valeur est quasi la même chez DTM (3099 MPa).

Résine époxy

Les éprouvettes sont soit brisées à la flèche dépassant 6 mm (correspond à la déformation de 5% de la fibre extérieure) soit pas brisées du tout; c'est pourquoi les contraintes de flexion sont calculées pour la déformation de 5% (à la flèche de 6 mm) et à la charge maximale. Les valeurs moyennes de contrainte de flexion sont de 100.28 MPa et de 93.02 MPa respectivement pour les éprouvettes horizontales ainsi que verticales, à peu près les mêmes par rapport à celles chez 3D Systems (99 MPa) (tableau 3.2).

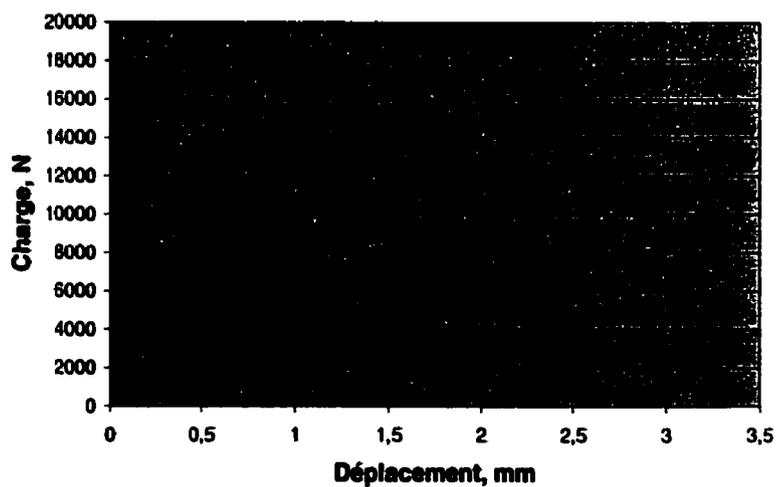
c. Compression

Compression (C-P) - 4



a)

Compression (Époxy) - 3



b)

Figure 3.4 : Courbes typiques "charge - déplacement" en compression. a - éprouvette en cuivre-polyamide; b - éprouvette en résine époxy.

Culvre-Polyamide

Les valeurs de contrainte de compression des expériences I et II sont de 72.82 MPa et de 67 MPa, soit inférieures à celle chez DTM (99 MPa). La différence peut être expliquée par la direction de construction. Malheureusement, on n'a construit les éprouvettes que verticalement (la direction Z est perpendiculaire à la direction de test). Des éprouvettes construites horizontalement auraient pu donner des résultats plus hauts, parce que dans ce cas-là, la direction de test est perpendiculaire à la texture des éprouvettes. Dans la source de DTM la direction de construction des éprouvettes n'est pas indiquée.

Résine époxy

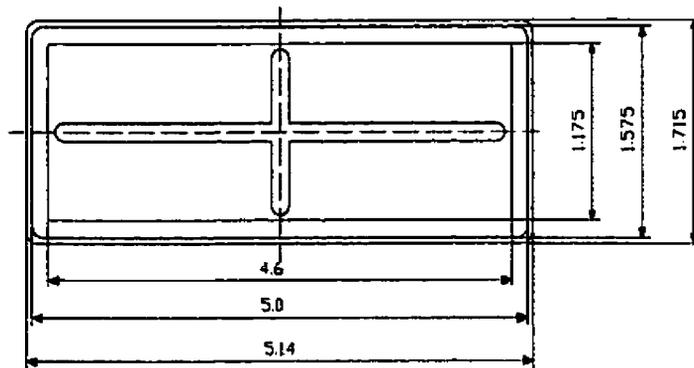
Les valeurs de contrainte de compression sont de 107.7 MPa et de 112.9 MPa pour les expériences I et II respectivement. L'information sur cette valeur chez 3D Systems n'est pas disponible.

Conclusions et propositions

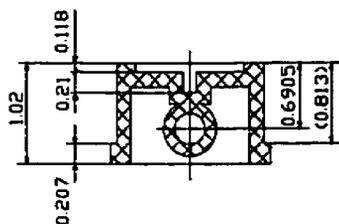
- Les résultats de tests correspondent à ceux fournis par DTM Corp et par 3D Systems. Les résultats un peu faibles de l'expérience I peuvent être expliquées par une dégradation des éprouvettes à cause des conditions environnementales très humides et chaudes au Vietnam.
- Les inserts travaillent sous des conditions de haute pression et température (dans le cas de moulage par injection), il est recommandé de réaliser les tests sur les caractéristiques mécaniques sous différentes températures jusqu'à la température de transition vitreuse.

3.2. Précision dimensionnelle

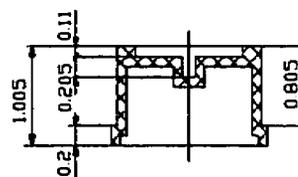
Les dimensions des modèles de CAO des inserts et leurs dimensions de construction sont présentées dans les tableaux 3.3 et 3.4. Les dimensions sont groupées selon les plans où elles étaient placées. Les dimensions de modèles de CAO sont présentées dans la figure 3.5.



a)



b)



c)

Figure 3.5 : Dessin simplifié du modèle de CAO; a - vue de dessus selon plan X-Y, b - section selon Z (insert en cuivre-polyamide), c - section selon Z (insert en résine époxy)

Tableau 3.3 : Dimensions de construction des inserts en Cuivre-Polyamide

	Dimensions du modèle CAO, en po.	Dimensions réelles des inserts, en po.							
		CP1		CP2		CP3		CP4	
		en po.	(%)	en po.	(%)	en po.	(%)	en po.	(%)
X	5.14	5.181	0.8	5.184	0.86	5.178	0.74	5.182	0.82
	5.00	5.044	0.86	5.043	0.86	5.042	0.84	5.045	0.9
	4.60	4.634	0.93	4.630	0.65	4.620	0.43	4.630	0.65
Y	1.715	1.734- 1.741	1.1-1.5	1.738- 1.745	1.34- 1.75	1.735- 1.755	1.17- 2.33	1.7335	1.08
	1.575	1.590	0.95	1.589- 1.592	(0.89- 1.08)	1.590- 1.592	0.95- 1.08	1.589- 1.590	(0.89- 0.95)
	1.175	1.187	1.0	1.187	1.0	1.189	1.2	1.188	1.1
Z	1.02	1.007- 1.017	-(0.29- 1.27)	1.008- 1.019	-(1.18- 0.1)	1.013	-0.69	1.008- 1.019	-(1.18- 0.1)
	0.207	0.211	1.9	0.211	1.9	0.209	0.97	0.211	1.9
	(0.813)	0.793- 0.804	-(2.5- 1.1)	0.796- 0.809	-(2.1- 0.49)	0.794- 0.808	-(2.3- 0.62)	0.792- 0.811	-(2.6- 0.25)
	0.118	0.115	-2.5	0.117	0.85	0.115	-2.5	0.115	-2.5
	0.21	0.212	0.95	0.211	0.48	0.209	-0.48	0.211	0.48

Tableau 3.4 : Dimensions de construction des inserts en Résine époxy

	Dimensions de modèle CAO, en po.	Dimensions réelles des inserts, en po.			
		EP1		EP2	
		en po.	%	en po.	%
X	5.14	5.143	0.06	5.148	0.16
	5.00	5.005	0.1	5.017	0.34
	4.60	4.6085	0.18	4.6135	0.29
Y	1.715	1.712	-0.17	1.717	0.12
	1.575	1.574	-0.06	1.585	0.63
	1.175	1.179	0.34	1.179	0.34
Z	1.005	1.0155	1.0	1.0075	0.25
	0.2	0.1995	-0.25	0.2	0
	(0.805)	0.8135	1.06	0.8065	0.19
	0.11	0.1055-0.1070	-(4.1-2.7)	0.0995-0.0975	-(9.5-11.4)
	0.205	0.2015	-1.7	0.2025	-1.2

En examinant les chiffres présentés dans ces tableaux, il est facile de remarquer que les erreurs dimensionnelles (en pourcentages par rapport aux dimensions du modèle de CAO) des inserts en époxy sont plusieurs fois plus faibles que celles des inserts en cuivre-polyamide. On peut constater aussi que les erreurs dans la direction Y (dimensions 1.715", 1.575", 1.175") sont plus grandes que celles dans la direction X (dimensions 5.14", 5.00", 4.6"), pour les deux types d'inserts. Les dimensions dans la direction Z sont moins précises, et les erreurs ont, en générale, des valeurs négatives; c'est, peut être, parce qu'on n'a pas pris en compte le facteur de retrait dans cette direction (la valeur de compensation du retrait est égale à 1.000), mais il y a eu un retrait quand même en réalité. Dans nos cas, les tolérances dimensionnelles sont plus grandes que les valeurs moyennes présentées dans la littérature, notamment : +/- 0.0254 mm (0.001") par 25.4 mm (1"), soit 0.1% dans les directions X-Y et +/- 0.1016 mm (0.004") , soit 0.4% dans la direction Z pour les pièces construites sur la machine SLA; pour les pièces construites sur la machine SLS, les chiffres sont 0.0508-0.1016 mm (0.002 - 0.004"), soit 0.2-0.4% dans les directions X-Y et 0.1524 mm (0.006"), soit 0.6% dans la direction Z (Arnold-Feret B.J., 2000).

Comme mentionné dans le chapitre II, la précision dimensionnelle des pièces construites par des techniques de prototypage rapide dépend de plusieurs facteurs tels que le matériau, la puissance et la vitesse du laser, l'épaisseur de couche, le facteur de compensation du retrait et du faisceau de laser... La précision dimensionnelle peut être améliorée par un calcul méticuleux pour le matériau utilisé ou bien par la méthode de balayage du laser comme illustré dans la figure 3.6. Le balayage avec chevauchement assure un retrait plus uniforme dans les directions X et Y (DTM Corp. a recommandé le même facteur de retrait pour les deux directions X et Y - 1.021).

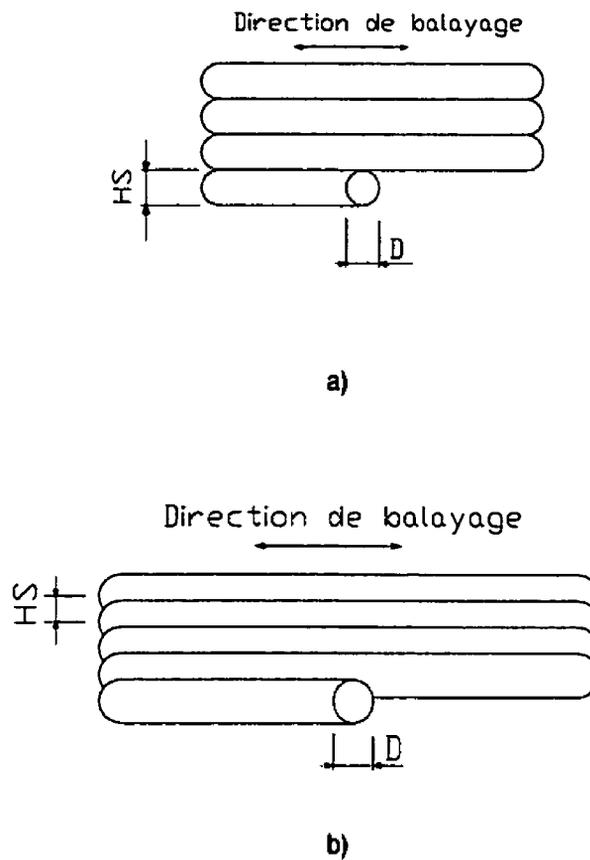


Figure 3.6 : Méthodes de balayage du laser;

a - sans chevauchement ($HS = D$)

b - avec chevauchement ($HS < D$)

Il nous faut aussi porter une attention particulière sur les tolérances pour les dimensions extérieures et intérieures pendant la conception des modèles de CAO et dans le calcul des facteurs de compensation pour ces deux types de dimensions.

Comme on a déjà mentionné dans le chapitre II, la facettisation des surfaces des modèles (création des fichiers STL) peut causer la perte en précision et

éloigner leur forme de la forme initiale, surtout pour les objets ayant une forme "libre". Nos inserts se comportent essentiellement des surfaces planes, c'est pourquoi les erreurs du processus de facettisation peuvent être négligées.

La distorsion au cours de la construction a causé des problèmes graves. En effet, la distorsion est négligeable pour les inserts en résine époxy, mais ce phénomène est très visible pour les inserts en cuivre-polyamide. La distorsion des inserts est illustrée dans la figure 3.7 et les données sont présentées dans le tableau 3.5.

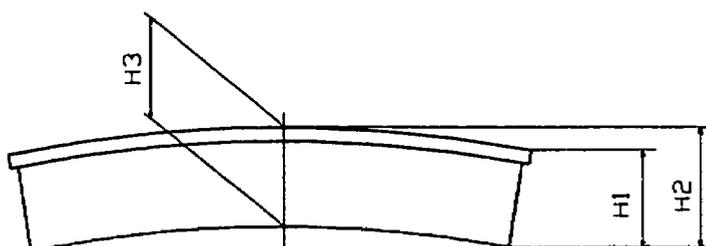


Figure 3.7 : Distorsion de l'insert

Tableau 3.5 : Distorsion des inserts (figure 3.7)

	Dimensions, en pouce				
	H1	H2	H3	(H2 - H3)	(H2 - H1)
CP1	1.0045	1.0325	1.0150	0.0175	0.0280
CP2	1.0050	1.0345	1.0115	0.0230	0.0295
CP3	1.0050	1.0300	1.0135	0.0165	0.0250
CP4	1.0035	1.0330	1.0145	0.0185	0.0295

Le problème est expliqué par le gradient de chaleur entre les couches et le retrait venant de la fusion des particules. Dans notre cas, en plus de ces raisons, l'état du matériau (neuf ou recyclé) joue un rôle important. L'expérience du Centre Prototech a montré que la distorsion est plus importante pour les inserts préparés avec un matériau recyclé (le cas du cuivre-polyamide).

Conclusions et propositions

- la précision dimensionnelle de construction des inserts en résine époxy est meilleure que celle des inserts en cuivre-polyamide;
- les tolérances dimensionnelles sont différentes selon les directions X, Y et Z et sont les plus grandes dans la direction Z. Il est recommandé d'appliquer le facteur de retrait pour la direction Z (DTM Corp. a recommandé une valeur de 1.01);
- il est recommandé d'appliquer la méthode de construction (balayage du laser) avec chevauchement pour que les particules de poudre soit bien fusionnées et le retrait soit plus uniforme (le cas du cuivre-polyamide) dans les directions X et Y;
- il est recommandé d'ajouter les couches qui couvre entièrement la région de construction d'une épaisseur d'à peu près 2 mm au bas et en haut des inserts. Ces couches se comportent comme des barrières qui diminuent le gradient thermique à l'intérieur des inserts et de même, diminuent la distorsion de ces derniers (Nelson C., 1999).

3.3. Rugosité de surfaces

Comme mentionné dans le Chapitre III, on n'a pu que mesurer la rugosité des surfaces horizontales (voir figure 2.16, chapitre II). Les résultats sont présentés dans le tableau 3.6. Pour les inserts en cuivre-polyamide, la mesure est réalisée après l'infiltration par Imprex Superseal.

Tableau 3.6 : Rugosité initiale des surfaces des inserts (après l'infiltration)

	Inserts	Rugosité des surfaces, en μm
Inserts en Cuivre-Polyamide	CP1	65-70
	CP2	50-78
	CP3	53-67
	CP4	49-58
Inserts en Époxy	EP1	3.6-5.6
	EP2	5.5-7.7

L'état de surfaces des inserts après la construction en résine époxy (3.6-7.7 μm) est plusieurs fois meilleur que celui des inserts en cuivre-polyamide (49-70 μm).

Tableau 3.7 : Rugosité des surfaces des inserts après la finition, avant le moulage

	Inserts	Rugosité des surfaces, en μm
Inserts en Cuivre-Polyamide	CP1	7.5-11
	CP2	6.25-10.5
	CP3	7.25-8.5
	CP4	4.5-7.5
Inserts en Époxy	EP1	0.50-0.75
	EP2	1.00-1.5

La finition des surfaces des inserts est réalisée à la main, avec des papiers sablés. Deux procédures différentes de finition sont appliquées pour les deux types d'inserts. Pour les inserts en cuivre-polyamide, le procédé de finition est commencé avec du papier sablé No 220, ensuite avec du papier No 400 et fini avec du papier No 600. En ce qui concerne les inserts en résine époxy, car l'état de surfaces initiales avait été bon, on utilise seulement les papiers No 400 et No 600 pour faire la finition. Les résultats sont portés dans le tableau 4.7. Il faut noter ici que le matériau utilisé pour la préparation des inserts est un matériau recyclé, ce qui empêche l'atteinte d'une rugosité de surfaces désirée. Dans les recherches de Nelson *et al.* (1998), la rugosité des surfaces des inserts en cuivre-polyamide après la finition est de 2.5 μm . Nos expériences ont montré aussi la même valeur pour des échantillons construits avec matériau neuf (voir tableau 3.8).

Afin de trouver une surépaisseur pour la finition, une expérience est réalisée sur les éprouvettes construites horizontalement et verticalement. Ces éprouvettes sont construites avec un matériau encore neuf. Ces éprouvettes ne sont pas infiltrées. Différentes procédures sont appliquées pour faire la finition :

- Éprouvettes en cuivre-polyamide, construites horizontalement : papiers sablés No 220, No 400 et No 600;
- Éprouvettes en cuivre-polyamide, construites verticalement : papiers sablés No 120, No 220, No 400 et No 600;
- Éprouvettes en résine époxy, construites horizontalement : papiers sablés No 400 et No 600;
- Éprouvettes en résine époxy, construites verticalement : papiers sablés No 220, No 400 et No 600.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 3.8 et 3.9.

Tableau 3.8 : Surépaisseur pour la finition des inserts en Cuivre-Polyamide

Direction de construction	No de l'échantillon	Dimension avant la finition, mm	Dimension après la finition, mm	Surépaisseur pour la finition, mm	Rugosité, μm
Horizontale	1	7.15	7.03	0.12	2.5
	2	7.13	7.03	0.10	3.5
	3	7.13	7.01	0.12	2.0
Verticale	4	6.90	6.76	0.14	5.25
	5	6.92	6.75	0.17	8.25
	6	6.93	6.77	0.16	7.5

Tableau 3.9 : Surépaisseur pour la finition des inserts en Époxy

Direction de construction	No de l'échantillon	Dimension avant la finition, mm	Dimension après la finition, mm	Surépaisseur pour la finition, mm	Rugosité, μm
Horizontale	1	6.97	6.94	0.03	1.25
	2	6.97	6.95	0.02	1.50
	3	6.99	6.97	0.02	1.50
Verticale	4	6.86	6.75	0.11	1.00
	5	7.01	6.91	0.10	0.50
	6	6.94	6.82	0.12	1.00

Tableau 3.10 : La rugosité de la surface des pièces injectées

Pièce	CP1-16	CP1-48
Rugosité, en μm	20	40
Pièce	CP2-2	-
Rugosité, en μm	32	-
Pièce	CP3-25	CP3-100
Rugosité, en μm	19	33
Pièce	CP4-9	CP4-56
Rugosité, en μm	26	42
Pièce	EP1-5	EP1-60
Rugosité, en μm	12.5	15
Pièce	EP2-9	EP2-23
Rugosité, en μm	6	13

CP - pièce injectée sur le moule en Cuivre-Polyamide

EP - pièce injectée sur le moule en Époxy

Le numéro qui suit est celui de la pièce injectée

Conclusions et propositions

- L'état du matériau utilisé (neuf ou recyclé) peut influencer la rugosité des surfaces des inserts. Pour les inserts en cuivre-polyamide, une surface de deux à trois fois plus fine peut être atteinte pour les inserts construits d'un matériau neuf (2.0-3.5 μm de tableau 3.8 contre 4.5-11 μm de tableau 3.7);
 - La rugosité des surfaces des inserts, surtout pour les inserts en cuivre-polyamide, peut être influencée par la direction de construction (voir tableau 3.8);
 - Les procédures suivantes de finition à la main des surfaces des inserts sont proposées:
 - cuivre-polyamide : les papiers sablés (No 120), No 220, No 400, No 600;
 - résine époxy : les papiers sablés (No 220), No 400, No 600.
- Note : chiffres dans les parenthèses sont appliqués pour les inserts construits verticalement*
- Il est recommandé de réaliser une finition préliminaire avant l'infiltration des inserts par Imprex Superseal, car après l'infiltration, les inserts deviennent très gluants et c'est difficile à faire la finition.
 - Après des surépaisseurs pour l'usinage (si cela nécessaire), une surépaisseur pour la finition de 0.10 - 0.15 mm dans la direction Z et de 0.15 - 0.20 mm dans les directions X,Y pour les inserts en cuivre-polyamide, et une surépaisseur de 0.02 - 0.04 mm dans la direction Z et de 0.10 - 0.12 mm dans les directions X,Y pour les inserts en résine époxy sont recommandée.

3.4. Usure des inserts

Les dimensions de cavités des inserts avant et après le moulage sont présentées dans les tableaux 3.11 et 3.12. Il est impossible de mesurer quelques dimensions à cause d'une déformation importante de la forme des cavités. Dans les tableaux, ces dimensions ne sont pas présentées.

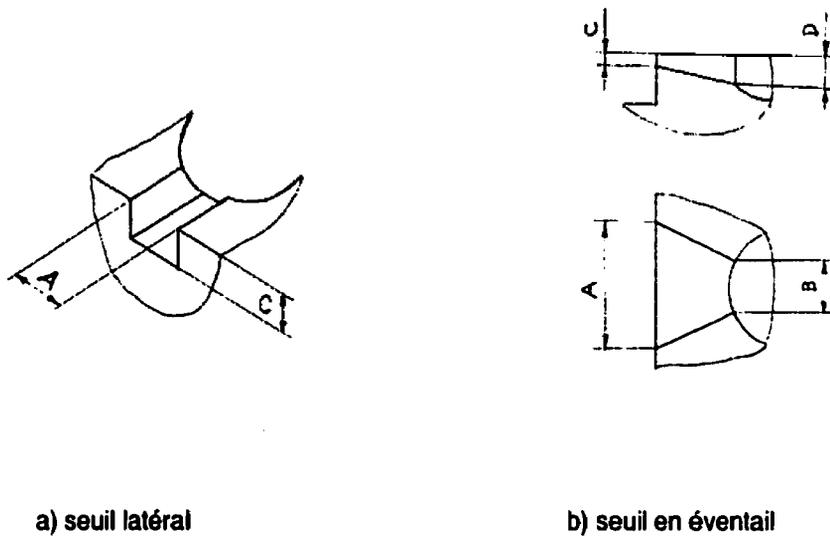


Figure 3.8 : Types et dimensions des seuil

Tableau 3.11 : Dimensions des cavités avant et après le moulage (Inserts en Cuivre-Polyamide)

	Dimensions du modèle de CAO, mm	Dimensions des inserts avant et après le moulage, mm							
		CP1		CP2		CP3		CP4	
		Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
	29.845 (1.175")	30.40	30.69	30.35	30.51	30.15	30.91	30.05	30.90
		0.95 %		0.53 %		2.52 %		2.83 %	
	116.84 (4.6")	118.12	118.17	117.98	118.01	117.50	117.76	117.85	118.56
		0.04 %		0.03 %		0.22 %		0.6 %	
Dimensions des seuils, mm	A	2.54	3.26	8.06	8.10	2.45	3.05-4.27	8.10	8.16
		28.3 %		0.5 %		24.5 - 74.3 %		0.74 %	
	B	-	-	4.10	4.28	-	-	4.10	4.43
		-		4.4 %		-		8.0 %	
	C	1.70	2.09	1.26	1.44	1.50	1.72	1.35	1.76
		22.9 %		14.3 %		14.7 %		30.4 %	
	D	-	-	1.55	1.80	-	-	1.55	1.92
		-		16.1 %		-		23.9 %	

Les seuils sont les places où l'usure se passe de façon plus forte, surtout pour les inserts en cuivre-polyamide. L'usure des seuils latéraux est de 14.7 à 74.3 %, plus importante que celle des seuils en éventail (0.5 - 30.4 %). L'usure des dimensions dans la direction X (2.52 - 2.83 %) est plus élevée que dans la direction Y (0.03 - 0.22 %), cela peut être expliqué par ce que la direction de l'injection est coïncidente avec la direction Y. Les nombres de pièces injectées sur les inserts CP3 et CP4 (130 et 66 respectivement) sont plus élevés que ceux sur les inserts CP1 et CP2 (57 et 5 respectivement), c'est pourquoi l'usure pour les inserts CP3 et CP4 est aussi plus importante. Les inserts en cuivre-polyamide sont plus usés que ceux en résine époxy. En comparant les deux inserts CP4 et EP1 qui ont presque les mêmes nombres de pièces injectées

(66 et 61 respectivement), on peut voir que l'usure est plus importante pour l'insert CP4 (0.6 - 2.83 %) que celle pour l'insert EP1 (0.03 - 0.17 %).

Tableau 3.12 : Dimensions des cavités avant et après le moulage (Inserts en Époxy)

	Dimensions du modèle de CAO, mm	Dimensions des inserts avant et après le moulage, mm			
		EP1		EP2	
		Avant	Après	Avant	Après
	29.845 (1.175")	29.95	30.00	30.02	30.04
		0.17 %		0.07 %	
	116.84 (4.6")	117.15	117.18	116.90	116.92
		0.03 %		0.02 %	
Dimensions des seuils, mm	A	2.43	2.44	8.12	8.14
		0.41 %		0.25 %	
	B	-	-	4.03	4.04
				0.25 %	
	C	1.75	1.80	1.34	1.35
		2.86 %		0.74 %	
	D	-	-	1.81	1.82
				0.55 %	

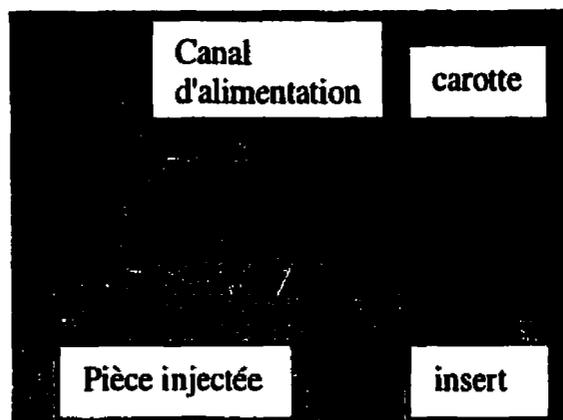
3.5. Description des expériences en moulage par l'injection

Comme mentionné ci-dessus, il existe 6 inserts (4 en cuivre-polyamide et 2 en résine époxy 5510) avec différents paramètres de construction et technologiques (voir tableau 3.13). On considérera chaque expérience en détail. Les pièces injectées et les inserts sont présentées dans la figure 3.9.

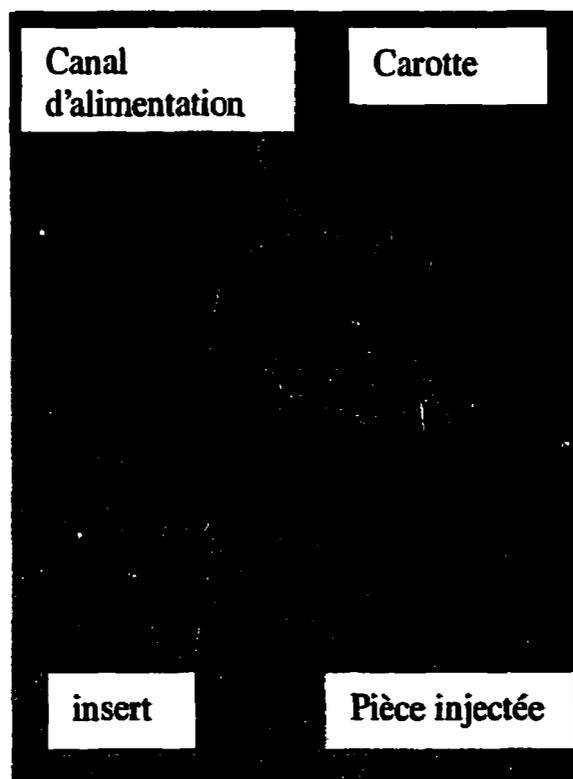
Tableau 3.13 : Résultats des expériences

Paramètres	CP1	CP2	CP3	CP4	EP1	EP2
Nombre de pièces injectées	57	5	130	66	61	25
Nombre de pièces injectées complètes	19	5	80	53	61	14
Pression d'injection, (MPa)	42-46	38-42	42-46	38-42	38-42	34-38
Pression de maintien, (MPa)	23	23	23	23	23	23
Température de matériau, (°C)	220	220	220	220	220	220
Temps de l'injection, (s)	15	15	15	15	15	15
Temps de refroidissement, (s)	25	25	25	25	25	25
Temps de refroidissement par l'air, (s)	-	-	-	40	30-40	-
Temps moyen d'un cycle de moulage, (s)	62	61	72	115	76/106-115 ¹	73

Note 1: Les valeurs avant "/" sont pour le cas sans refroidissement par l'air, les valeurs après "/" pour le cas avec refroidissement par l'air.



a) insert en cuivre-polyamide



b) insert en résine époxy

Figure 3.9 : Inserts et pièces injectées

Expérience avec insert CP3

L'insert CP3 est préparé en cuivre-polyamide, sans le canal de refroidissement. Le seuil est de type latéral. Le nombre total de pièces injectées sur cet insert est de 130, dont 80 sont complètes. C'était la première expérience et on a dû réaliser plusieurs réglages pour atteindre un régime optimal du processus. De plus, le contrôleur de la machine à injection ne fonctionne pas toujours de façon normale, cela peut se voir dans quelques expériences. Au début de l'expérience, le thermocouple No 3 n'a pas fonctionné; c'est pourquoi les paramètres donnés dans le tableau 4.13 sont retirés des périodes les plus stables.

Le seuil est la partie la plus usée de l'insert (voir tableau 3.11 et 3.12). La surface de l'insert a perdu très vite la rugosité initiale. Due à une trop forte pression, la paroi s'enfonce un peu au milieu. La hauteur est de 24.77 mm contre 25.28 mm de deux bouts (la hauteur initiale de l'insert est de 25.4 mm). Pour quelques pièces, on peut observer que les nervures sont rompues de la plaque (inserts numéros 83-92). La température maximale de l'insert à l'endroit du thermocouple No 1 a atteint la valeur 39.3°C à 40.5°C (Figure 3.11).

Le cycle moyen de moulage est de 72 secondes. Dans tous les expériences, on a utilisé un régime semi-automatique parce qu'on doit régler toujours les paramètres d'injection; en plus le système d'éjection de carotte ne fonctionne pas très bien : enlèvement de la pièce est réalisé à la main. Les composants de temps d'un cycle sont établis suivants :

- temps d'injection : 15 secondes
- temps de maintien : 25 secondes

- temps de passage du régime d'injection à régime de maintien : 0.5 - 5 secondes.

Au total, le temps de cycle est d'à peu près 55 - 60 s. On ajoute à ce temps, le temps pour enlever la pièce à la main, le temps de refroidissement par un jet d'air pour obtenir un cycle moyen de moulage des pièces.

Expérience avec insert CP4

Comme CP3, l'insert CP4 est préparé en cuivre-polyamide, sans le canal de refroidissement. Mais le seuil est de type en éventail. Le nombre total de pièces injectées est de 66, dont 53 sont complètes. À partir de la pièce numéro 18, la paroi de l'insert a commencé à s'enfoncer. L'enfoncement était bien plus fort que celui dans le cas de l'insert CP3. Cette situation a causé des bavures très remarquables sur les pièces. La hauteur de l'insert au milieu est de 24.06 mm, celles aux deux bouts sont de 24.53 mm et 24.72 mm.

À partir de la pièce numéro 18, les nervures sont rompues de la plaque parce qu'elles ne se sont pas encore complètement solidifiées. Pour améliorer la condition de refroidissement, on a utilisé un flux d'air sur la surface de l'insert pendant 30 à 40 secondes. Cette solution s'avère efficace. En effet, les résultats montrent qu'à partir du numéro 51, les pièces ont réussi à se solidifier complètement avant de se démouler.

Avec le seuil en éventail, le remplissage de la cavité de l'insert est meilleur par rapport au cas de l'insert CP3. Le cycle moyen de moulage est de 60-75 secondes pour le cas sans refroidissement par l'air et de 115 secondes avec le refroidissement par l'air. Le refroidissement est réalisé par un jet d'air directement sur les surfaces de l'insert, après le démoulage.

Expérience avec l'insert CP1 et l'insert CP2

Les inserts CP1 et CP2, préparés aussi en cuivre-polyamide, sont construits avec des canaux de refroidissement sur les machines SLS. L'insert CP1 a un seuil latéral tandis que pour l'insert CP2, le seuil est de type en éventail. Les deux inserts ont été déjà infiltrés avec Imprex Superseal (95-1000A) avant la finition pour empêcher les fuites d'eau au niveau des canaux de refroidissement. Malheureusement, l'eau a fui partout sur la surface de l'insert même après la deuxième infiltration. Ce phénomène montre que ces inserts étaient très poreux. En utilisant un vernis pour recouvrir l'intérieur des canaux, on a eu un résultat prometteur. Toutefois, l'étanchéité des inserts avec la base du moule a causé également des problèmes.

Le nombre total de pièces est de 57, dont 19 sont complètes pour l'insert CP1. Le cycle moyen de moulage est de 62 secondes. La paroi s'est enfoncée aussi au milieu (la hauteur de l'insert dans ce cas est de 24.75 mm contre 25.28 mm pour celle des deux bouts). Mais l'insert s'est enfoncé surtout le long du canal de refroidissement. C'était la position la plus faible de l'insert. Il n'y a pas de support, ce qui mène au fait que l'insert peut se déformer facilement sous une haute pression et une température élevée. Pour corriger le problème, il faut trouver une position rationnelle du canal de refroidissement en assurant un meilleur refroidissement de l'insert et en évitant l'affaiblissement de ce dernier. On peut aussi construire les membrures de renforcement et augmenter l'épaisseur de la paroi du canal. Dans notre cas, il est difficile de réaliser tout cela à cause d'un espace très limité.

Après le moulage des 5 premières pièces, l'insert CP2 s'est brisé au fond de la rainure qui se trouve sur le canal de refroidissement. Le matériau est entré dans le canal et a bouché ce dernier. Cela s'est passé à cause d'un

fonctionnement irrégulier du contrôleur de la machine à injection : au moulage de la 5ème pièce, le contrôleur a démontré une pression de 95 MPa. Cette pression a été beaucoup plus haute que les caractéristiques mécaniques de l'insert, c'est pourquoi elle a causé un dommage grave à l'insert.

Le seuil est toujours la partie la plus usée de l'insert.

Expérience avec l'insert EP1

L'insert EP1 est préparé en résine époxy 5510, sans canal de refroidissement et avec un seuil latéral. Il est rempli avec le Metspec 158. Le nombre total de pièces injectées est de 61, dont 61 sont complètes. Pour l'insert EP1, on a appliqué au début le refroidissement par l'air, sauf pour les pièces numéros 26-32. Pour ces pièces, on remarque que les nervures sont rompues de la plaque parce qu'elles n'ont pas réussi à se solidifier complètement. Quelques endroits sur le bord de rainure (des arrêtes vives) sont brisés (les débris sont collés aux pièces 21, 28, 30, 31), ce problème est illustré dans la figure 3.10. On a observé aussi des fissures, surtout au fond de la rainure.

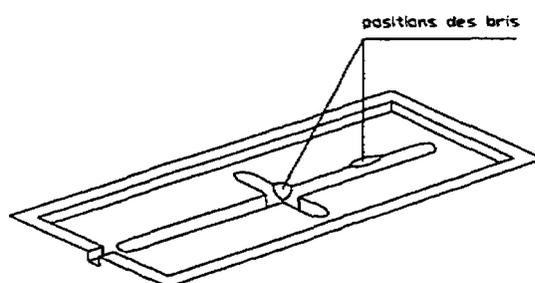


Figure 3.10 : Le bris des inserts en résine époxy

Le seuil est beaucoup moins usé que les inserts en cuivre-polyamide. On peut observer que la paroi s'est aussi enfoncée (la hauteur au milieu de paroi est de 25.10 mm, celle des deux bouts est de 25.36 mm). Le gonflement des pièces est plus remarquable en comparaison avec celui des pièces injectées sur les inserts en cuivre-polyamide.

Le cycle moyen de moulage avec le refroidissement par l'air est de 106 - 115 secondes; pour les pièces numéros 26 - 32 (sans refroidissement par l'air) il est de 76 secondes.

Expérience avec l'insert EP2

L'insert EP2 est préparé aussi en résine époxy 5510, avec un seuil de type en éventail. Il est équipé d'un canal de refroidissement en cuivre. Le canal est installé dans l'insert qui est rempli ensuite par le Metspec 158. Le nombre total de pièces injectées est de 25, dont 14 sont complètes.

Comme dans le cas de l'insert EP1, l'insert EP2 est beaucoup moins usé et déformé par rapport aux inserts en cuivre-polyamide, mais il est plus fragile. Le cycle moyen de moulage est de 73 secondes.

3.6. Refroidissement

Les inserts sont préparés sans et avec canaux de refroidissement. Le refroidissement par l'air est utilisé pendant certaines expériences. Trois thermocouples sont utilisés pour enregistrer la température des inserts pendant le moulage. Malheureusement, le thermocouple No 3 ne fonctionne pas toujours de façon normale, et dans la plupart des cas, dans les graphiques seulement les données de deux thermocouples No 1 et No 2 sont présentées.

Comme le programme LABVIEW enregistre 13 valeurs par seconde, les graphiques simplifiés sont présentés (Figure 3.11 - 3.14).

Inserts en cuivre-polyamide

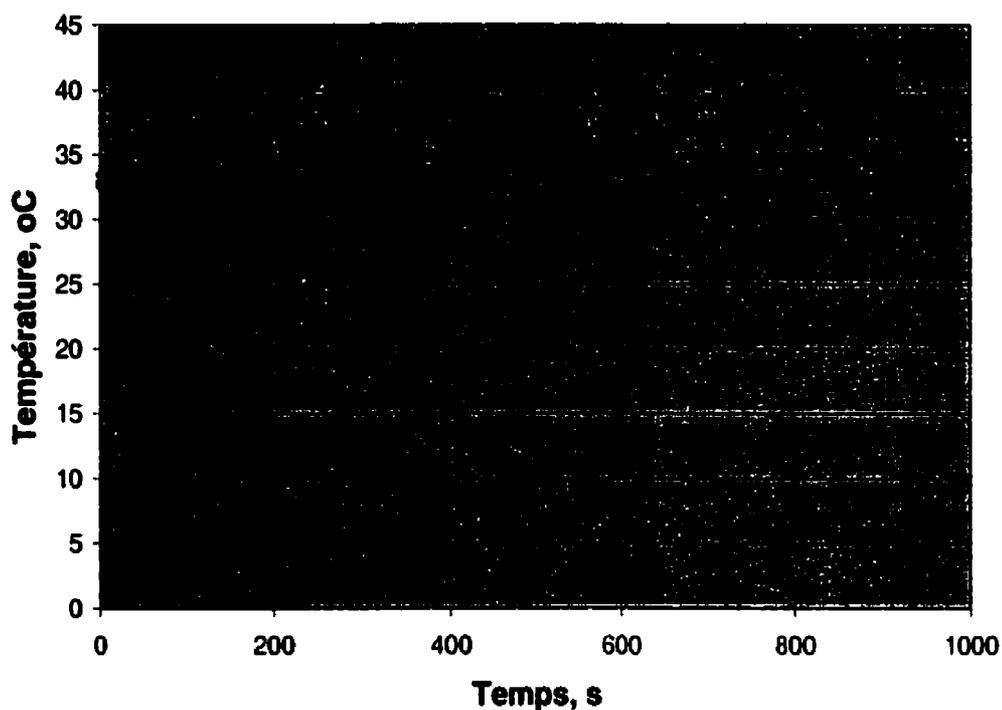
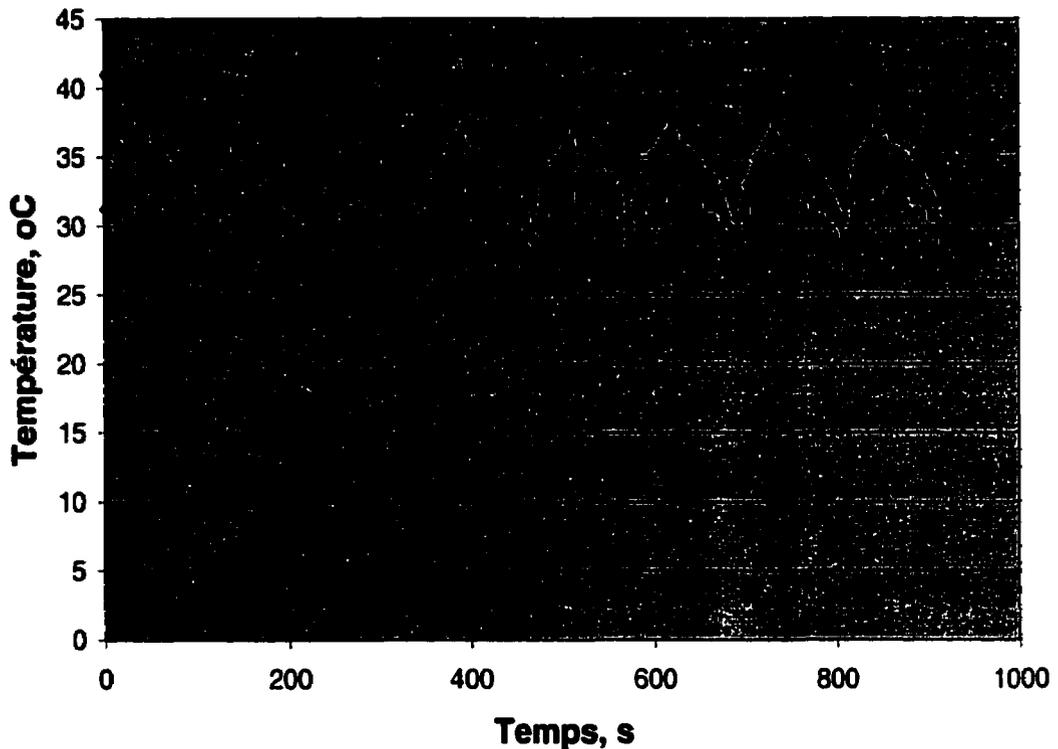


Figure 3.11 : Évolution de la température pendant le moulage (insert CP3, pièces No 83-92); ♦ - thermocouple No 1, ■ - thermocouple No 2.

Pendant le moulage sur l'insert CP3 (sans canal de refroidissement), aucun refroidissement par l'air n'est appliqué. Il y a peu de différence entre les lectures des deux thermocouples No 1 et No 2. La température maximale atteinte est de 40.77°C chez le thermocouple No 1 et 39.55°C chez le thermocouple No 2. Le cycle moyen de moulage pour cet insert est de 72 secondes (voir figure 3.11). Une mesure par un thermocouple extérieur montre que la température de

la surface de l'insert atteint 62°C. Pour l'insert CP4, après chaque cycle de moulage, on le refroidit par un jet d'air directement sur sa surface pendant à peu près de 30 à 40 secondes. Le cycle moyen de moulage a augmenté jusqu'à 115 secondes. La température maximale enregistrée par le



thermocouple No 1 est de 37.59°C et celle du thermocouple No 2 est de 31.98°C (voir figure 3.12).

Figure 3.12 : Évolution de la température pendant le moulage (insert CP4, pièces No 55-65); ♦ - thermocouple No 1, ■ - thermocouple No 2.

On refroidit les inserts CP1 et CP2 par l'eau. La température de l'eau est de 23°C. Afin de parvenir à l'étanchéité des inserts, on utilise des rondelles métalliques ayant le trou intérieur assez petit, ce qui diminue le débit de l'eau.

Certainement, cela diminue aussi la capacité de refroidissement. Pourtant, le refroidissement par l'eau contribue à la diminution de la température maximale enregistrée par les thermocouples. Pour l'insert CP1, ces valeurs maintenant sont de 35.65°C et 28.81°C respectivement pour les thermocouples No 1, No 2. Son cycle moyen de moulage est de 62 secondes (voir figure 3.13). L'insert CP2, quant à lui, a brisé accidentellement très vite, c'est pour cette raison qu'on ne peut rien dire de son comportement.

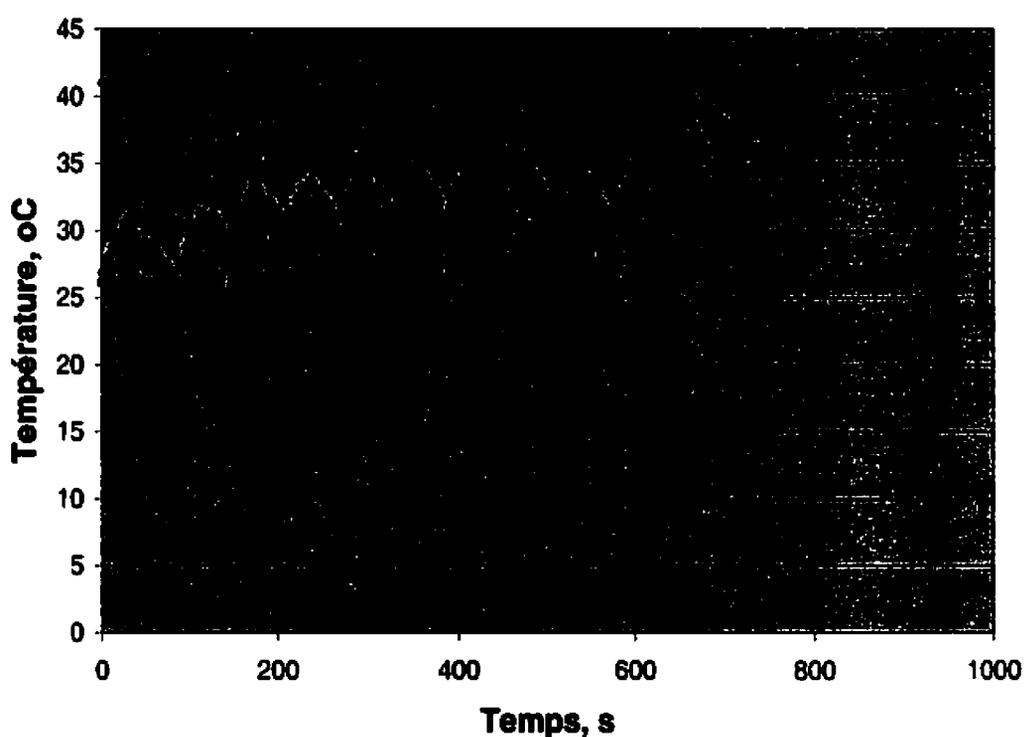


Figure 3.13 : Évolution de la température pendant le moulage (insert CP1, pièces No 19-27); ♦ - thermocouple No1, ■ - thermocouple No 2.

Inserts en résine époxy

L'insert EP1 est préparé sans canal de refroidissement. Le refroidissement par un jet d'air sur la surface de l'insert est appliqué au début du moulage. Les

températures maximales enregistrées par les thermocouples No 1, 2 et 3 sont de 35.65°C, 34.91°C et 35.16°C respectivement. On peut voir que la différence entre elles n'est pas très grande. Lorsqu'on cesse le refroidissement par l'air (pendant le moulage des pièces 26-33), la température augmente jusqu'aux valeurs de 38.09°C pour les thermocouples No 1 et No 2, et 38.55°C pour le thermocouple No 3 (voir figure 3.14).

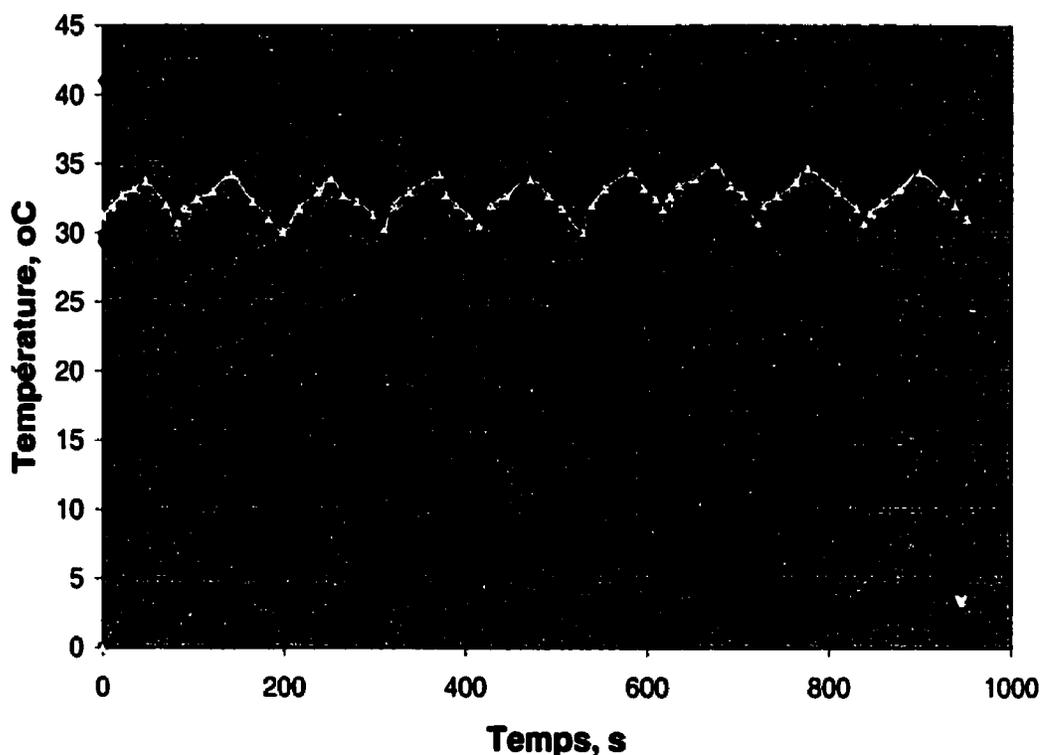


Figure 3.14 : Évolution de la température pendant le moulage (insert EP1, pièces No 5-13); ♦ - thermocouple No 1, ■ - thermocouple No 2, ▲ - thermocouple No 3

L'insert EP2 est refroidi par l'eau. Pour les 12 premières pièces moulées, les températures maximales enregistrées par les thermocouples No 1, 2 et 3 sont de 28.56°C, 26.61°C et 29.30°C. À partir de la pièce 13, les températures ont augmenté à cause du bris de l'insert et du tube de refroidissement; en conséquence, la circulation de l'eau est arrêtée.

Conclusions et propositions

- Refroidir des moules rapides est une tâche très importante. Il est recommandé de trouver la température critique sous laquelle les inserts gardent leurs caractéristiques mécaniques pour résister à la pression d'injection. Cela demande des recherches plus approfondies.
- Deux façons de refroidir sont proposées. Premièrement, c'est le refroidissement direct par un jet d'air sur la surface des inserts pendant 30 - 40 secondes. On peut prolonger ce temps pour un meilleur refroidissement. La méthode est aussi recommandée par les autres auteurs (Palmer et Colton [1999], Rahmati et Dickens [1997]). Deuxièmement, on peut refroidir les inserts par l'eau via les canaux de refroidissement. Cette technique diminue le cycle de moulage, par contre, elle est assez compliquée parce qu'il y a toujours des problèmes avec l'étanchéité.

3.7. Autres facteurs

3.7.1. Matériau initial

Comme mentionné ci-dessus, en plus des autres facteurs, l'état du matériau initial (neuf ou recyclé) peut influencer la qualité des inserts (le cas du cuivre-polyamide). La construction des inserts d'un matériau recyclé peut causer une distorsion plus forte par rapport à celle des inserts en matériau neuf. De plus, la construction en matériau recyclé peut rendre les inserts plus poreux; en conséquence, il est difficile de réaliser l'étanchéité des inserts pour l'application du refroidissement par l'eau. Ce n'est pas facile non plus à atteindre une bonne rugosité de surface des inserts construits en matériau recyclé.

3.7.2. Pression

Les expériences réalisées ont montré que la pression de moulage, avec la température du matériau injecté et le type de seuil, affecte la qualité des pièces injectées et la durée de vie des inserts. Par les résultats obtenus pendant les expériences, il est recommandé d'appliquer les valeurs suivantes de pression pour les deux types d'inserts :

- inserts en cuivre-polyamide : 38-46 MPa pour la pression de remplissage, 23 MPa pour la pression de maintien;
- inserts en résine époxy : 34-38 MPa pour la pression de remplissage, 23 MPa pour la pression de maintien.

Malheureusement, pendant les expériences, la pression d'injection parfois augmente brusquement, ce qui cause une rupture des inserts.

3.7.3. Types de seuil

Deux types de seuils sont appliqués dans les inserts : latéral et en éventail. Ils sont construits avec les inserts sur les machines de prototypage rapide SLA et SLS. Les dimensions de ces seuils sont calculées et comparées avec les dimensions des seuils des inserts métalliques d'une pièce de dimensions similaires. Les expériences ne donnent pas des résultats très claires entre ces deux types d'inserts, mais quelques remarques peuvent être faites : pour les inserts avec un seuil en éventail, un meilleur remplissage est observé et la pression d'injection appliquée est plus basse (tableau 3.13). Il est donc recommandé d'utiliser le seuil en éventail. Cette recommandation est proposée aussi par les autres auteurs (Palmer [1999]; Nelson [1999]).

3.7.4. Remplissage des coquilles d'inserts

Les inserts sont construits sous forme de coquilles et remplis avec un alliage à basse température de fusion. Le remplissage a pour but d'économiser le matériau, renforcer les inserts, et surtout, d'augmenter la conduction thermique des inserts. Les matériaux de remplissage utilisés ici sont les Metspec de MCP Group. Les inserts en époxy sont remplis par le Metspec 158; la température de fusion duquel est de 70°C. Les inserts en cuivre-polyamide sont remplis par le Metspec 281 qui a une bonne conduction thermique, par contre, la température de fusion de ce matériau est assez haute (138.5°C), plus haute que celle de transition vitreuse du polyamide. DTM Corp. a recommandé d'utiliser le Metspec 217 ayant la température de fusion de 103 °C (217 °F) pour remplir les inserts (Guide to Materials: Copper polyamide, [1998]).

La haute température de fusion du matériau de remplissage peut apporter une distorsion supplémentaire, ce qui s'est passé avec les inserts en cuivre-polyamide. On a rempli immédiatement toute la cavité arrière de la coquille des inserts par le Metspec chaud; il s'ensuit que les inserts subissent la distorsion. Afin d'éviter ce phénomène et de s'assurer que la qualité de remplissage sera bonne, on peut suivre la technique de remplissage recommandée par DTM Corporation (Guide to Materials: Copper polyamide, [1998]). Il faut chauffer le Metspec dans une cuve, où la température peut être réglée rigoureusement, jusqu'à la température juste au dessus de sa température de fusion (de 1 à 2°C). Le remplissage est réalisé par couche d'une épaisseur de 1.59 mm pour la moitié de la première profondeur de l'insert; on laisse chaque couche se refroidir avant de couler la couche suivante. Enfin, on peut remplir toute la cavité qui reste en même temps. Il est recommandé aussi d'écartier la scorie du Metspec liquide avant de le couler dans les inserts parce qu'elle peut former

des vides à l'intérieur du bloc de Metspec après la cristallisation, ce qui baisse la capacité du transfert de chaleur et la rigidité des inserts.

3.7.5. Cycle de moulage

Comme la conduction thermique des inserts est très basse par rapport à celle des inserts métalliques, le cycle de moulage est plus long. Le cycle moyen de moulage de chaque insert est présenté dans le tableau 4.13. Ces cycles sont beaucoup plus longs que ceux de production en série.

3.7.6. Angle de dépouille

À cause du phénomène d'escalier et d'une basse qualité de surfaces par rapport aux moules métalliques, il est recommandé d'appliquer un angle de dépouille de 1.5° à 2° . Pour les inserts en résine époxy, on peut prendre des valeurs plus basses de cet intervalle.

3.7.7. Rupture et durée de vie des inserts

En général, la pression et la température d'injection sont deux facteurs essentiels affectant la vie des inserts en cuivre-polyamide et en résine époxy. Rahmati S. et Dickens P.M. (1997) supposent que les contraintes de cisaillement et de flexion qui causent des fractures dans les inserts, sont les raisons principales de leur rupture. Quand la température de l'insert augmente pendant le cycle d'injection, la résistance de l'insert diminue. C'est pourquoi, comme mentionné ci-dessus, il est important de maintenir la température des inserts inférieure à une valeur où ils peuvent résister à ces contraintes.

Les inserts en résine époxy étaient plus fragiles que les inserts en cuivre-polyamide. Ils se sont vus souvent brisés aux endroits vifs comme les bords de rainure. Les fractures, surtout au fond de la rainure, sont observées sur les deux inserts en époxy. Par contre, l'enfoncement se voit clairement sur les inserts en cuivre-polyamide. La paroi et la place où se situe le canal de refroidissement sont les plus déformées.

CONCLUSION

L'outillage rapide est, actuellement, largement développé en utilisant différentes techniques et différents matériaux. Les processus d'outillage rapide comme ACES Injection Molding et "RapidTool" Short Run Tooling process sont parmi les procédés les plus utilisés pour produire directement les moules pour le moulage par injection sur les machines de stéréolithographie et de frittage sélectif du laser.

L'objectif de ce mémoire était de réaliser des recherches sur la caractérisation des matériaux utilisés, notamment la résine époxy 5510 et le cuivre-polyamide, et sur les paramètres technologiques des inserts et du processus de moulage tels que la précision dimensionnelle, l'état des surfaces, le refroidissement, la pression, le type de seuils, l'angle de dépouille... Les résultats sont ensuite comparés avec les recherches déjà menés par d'autres chercheurs afin de tirer des conclusions utiles pour faire une contribution au développement de ces techniques.

Les tests sur les caractéristiques mécaniques des matériaux ont laissé voir les valeurs essentiellement similaires à celles provenant des fournisseurs de ces matériaux. La différence observée pour quelques caractéristiques peut être expliquée par les conditions de construction des éprouvettes, ainsi que les conditions environnementales des tests. Comme les moules ont dû fonctionner dans les conditions de haute température et de haute pression, il est recommandé de faire des tests spéciaux sur les caractéristiques mécaniques

de ces matériaux en changeant la température pour refléter une température près de celles utilisées lors de l'injection où les moules gardent encore suffisamment ses spécifications pour résister à la pression de moulage .

La précision dimensionnelle des inserts est inférieure à la valeur moyenne publiée dans les articles. Les paramètres de construction utilisés sur les machines SLA et SLS sont des facteurs influençant la précision des inserts, dont les plus importants sont le facteur de retrait et de compensation du faisceau laser et l'état du matériau initial (neuf ou recyclé). Dans nos cas, il est recommandé d'appliquer la méthode de construction avec chevauchement pour que le retrait soit plus uniforme dans les directions X-Y et d'appliquer un facteur de retrait dans la direction Z (qui est plus que 1.0). Pour les matériaux recyclés, il vaut mieux recalculer les facteurs de retrait d'après la méthode recommandée par DTM Corp. (Guide to Materials: Copper polyamide, [1998]). La distorsion des inserts peut causer des problèmes graves. Tout cela peut demander un usinage supplémentaire, ce qui augmente le temps et le coût de préparation des moules rapides. Afin de diminuer la distorsion, il est recommandé d'ajouter des couches qui couvrent entièrement la région de construction d'une épaisseur d'au moins 2 mm en bas et en haut des inserts.

L'état des matériaux initiaux (neufs ou recyclés) - il s'agit ici du matériau cuivre-polyamide - affecte aussi la porosité et la rugosité des surfaces des inserts. Les inserts très poreux (c'est notre cas) sont difficile à colmater par l'infiltration par l'Imprex Superseal. En général, l'étanchéité des inserts cause toujours des problèmes qui exigent une attention spéciale à partir de l'étape de conception. Avec un matériau recyclé, il est difficile d'atteindre la rugosité souhaitée des surfaces.

Pour obtenir la rugosité de surface de 2 à 8 μm pour les inserts en cuivre-polyamide, il est recommandé de réaliser la finition à la main avec des papiers sablés No 120, No 220, No 400 et No 600. La rugosité de 0.5 à 1.5 μm pour les inserts en résine époxy sera atteinte grâce à une finition à la main par les papiers sablés (No 220, No 400 et No 600). Des surépaisseurs de 0.1 à 0.17 mm pour les inserts en cuivre-polyamide et de 0.02 à 0.12 pour les inserts en époxy sont à prévoir. Il est recommandé aussi de faire une finition préliminaire avant l'infiltration des inserts en cuivre-polyamide par l'Imprex Superseal.

Les inserts sont préparés sous forme de coquilles qui seront ensuite remplies par le Metspec, un alliage à basse température de fusion. Il est recommandé de remplir les inserts en cuivre-polyamide par du Metspec 281 ou Metspec 217 et les inserts en époxy par du Metspec 158. Il vaut mieux suivre le procédé de remplissage proposé par DTM Corporation et par 3D Systems afin d'éviter la distorsion des inserts.

Les inserts des deux types de matériaux sont préparés sans et avec un canal de refroidissement. Deux techniques de refroidissement sont appliquées : par un jet d'air direct sur les surfaces des inserts et par circulation d'eau à travers un canal de refroidissement. Le temps de refroidissement par l'air est de 30 - 40 secondes et dans ce cas, le temps moyen d'un cycle de moulage est de 115 secondes. Le cycle pour les inserts refroidis à l'eau est de 61 à 73 secondes. Dans les deux cas, si on peut maintenir les températures des inserts aux endroits où se trouvent les thermocouples, inférieures à 35°C, les pièces injectées seront capables de se solidifier complètement.

Les expériences ont montré aussi qu'en utilisant un seuil en éventail, on peut diminuer la pression d'injection et améliorer le remplissage de la cavité de

l'insert. Un angle de dépouille de 1.5° à 2° assurera facilement l'éjection des pièces.

En général, les inserts en résine époxy démontrent une meilleure résistance à l'usure pendant le moulage. Les inserts en résine époxy ne se sont pas enfoncés nettement comme dans le cas des inserts en cuivre-polyamide, par contre, ils tendent à être ébréchés et fracturés, ce qui s'est vu dans les deux inserts en résine époxy. Établir une pression d'injection optimale et trouver des mécanismes de la rupture sous l'influence de condition "pression-température" pour ces inserts demande des recherches plus approfondies dans l'avenir.

Bien qu'il existe des problèmes tels que la qualité de préparation des inserts (distorsion, porosité...) et le fonctionnement irrégulier du contrôleur de la machine à injection (pression), les expériences réalisées permettent de conclure que les résultats obtenus sont très prometteurs. Notre recherche a été faite dans la perspective d'être utile à l'application des inserts préparés par des techniques de l'outillage rapide dans la phase de conception de produit ou des outils ainsi que dans la production en petite série .

RÉFÉRENCES

- ARNOLD-FERET B. J., (1999). «Laser sintering short run tooling for injection molding», Annual Technical Conference – ANTEC. Proceedings of the 1999, 57th Annual Technical Conference, ANTEC, pp.1111-1117.
- ARNOLD-FERET B. J., (2000). «Simple and concise design rules for rapid prototyping», Annual Technical Conference – ANTEC. Proceedings of the 2000, 58th Annual Technical Conference, ANTEC (CDRom)
- BERNARD A., TAILLANDIER G., (1998). «Le prototypage rapide», Edition HERMES, Paris.
- BLAIR B. et COLTON J., (1998). «Polishing of stereolithography injection molds», Annual Technical Conference – ANTEC. Proceedings of the 1999, 56th Annual Technical Conference, ANTEC.
- BLAIR B. et COLTON J., (1999). «Post build cure of stereolithography polymers for injection molds», Annual Technical Conference – ANTEC. Proceedings of the 1999, 56th Annual Technical Conference, ANTEC.
- BRIAN K. P. et BASKARAN S., (1996). «A review of particulate materials processing in additive freeform fabrication», Review in Particulate materials, 1996, Vol 4, pp. 105-120.

FORTIN C. (1999). *Intégration de la conception et de la fabrication*, Note de cours MEC 6508.

CRAWFORD R. J. (1987). *Plastics Engineering*, Pergamon Press, 2nd Edition.

DELL'ARCIPRETE J. *et al.*, (1999). «Cavity pressure studies for stereolithography produced tooling», Annual Technical Conference – ANTEC. Proceedings of the 1999, 57th Annual Technical Conference, ANTEC, pp.467-471.

DICKENS P., (1999). «Rapid tooling research», Papers of Merit, Proc. TCT'98.

FADEL GEORGES M., KIRSCHMAN C. (1996). «Accuracy Issues in CAD to RP Translation», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 2, No 2, 1996, pp. 4-17.

FISA B. et SANSCHGRIN B., (1994). *Matériaux plastiques*, Note de cours 2.338, École Polytechnique de Montréal.

GIBSON I. et SHI D., (1997). «Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, No 4, 1997, pp. 129-136.

GNEGY R. et OGALE A., (1999). «Enhanced thermal performance of stereo lithography produced rapid injection molding dies», Annual Technical Conference - ANTEC. Proceedings of the 1999, 56th Annual Technical Conference, ANTEC.

«DTMTM - The Sinterstation[®] System - Guide to materials: Copper Polyamide» (1998). DTM Corporation, Austin Texas.

- JACOBS P. F., (1996). *Stereolithography and other RP&M Technologies : from Rapid Prototyping to Rapid Tooling*, New York, American Society of Mechanical Engineers Press.
- JANCZYK M. *et al.*, (1997). «Rapid stereolithography tooling for injection molding : the effect of cooling channel geometry», *Journal of Injection Molding Technology*, March 1997, Vol.1, No 1, pp. 72-78.
- KAI C. C. et FAI L. K., (1997). *Rapid prototyping : principles & applications in manufacturing*, John Wiley & Sons, Inc.
- KARAPATIS N. P. *et al.*, (1998). «Direct rapid tooling : a review of current research», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4, No 2, 1998, pp. 77-89.
- LEE K., (1999). *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*, United States of America, Addison Wesley.
- MARION L. et WALTER M., (1997). «Temperature distribution in rapid tooling cavities – How close are injection molded prototypes to series parts ?», Annual Technical Conference – ANTEC. Proceedings of the 1997, 55th Annual Technical Conference, ANTEC, Vol. 1, pp. 939-945.
- NARAHARA H. *et al.*, (1999). «Reaction heat effects on initial linear shrinkage and deformation in stereolithography», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 5, No 3, 1999, pp. 120-128.
- NELSON C. *et al.* (1998). «Direct injection molding tooling inserts from the SLS process with Copper Polyamide», Annual Technical Conference –

ANTEC. Proceedings of the 1998, 56th Annual Technical Conference, ANTEC, pp.451-459.

NELSON C., (1999). «Creation of plastic prototypes and molded plastic parts via selective laser sintering», Annual Technical Conference – ANTEC. Proceedings of the 1999, 57th Annual Technical Conference, ANTEC, pp.1109-1113.

PALMER A. et COLTON J., (1999). «Design rules for stereolithography injection molding inserts», Annual Technical Conference – ANTEC. Proceedings of the 1999, 57th Annual Technical Conference, ANTEC, pp. 4002-4006.

POLOSKY F. Q. et al., (1998). «A mechanical property performance comparison for plastic parts produced in a rapid epoxy tool and conventional steel tooling», Annual Technical Conference – ANTEC. Proceedings of the 1998, 56th Annual Technical Conference, ANTEC, pp. 2972-2976.

RADSTOCK E., (1999). «Rapid tooling», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 5, No 4, 1997, pp. 164-168.

RAHMATI S. et DICKENS P., (1997). «Stereolithography for injection mould tooling», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, No 2, 1997, pp. 53-60.

SAURKAR S. et al., (1999). «Rapid tooling : a study of different cooling techniques for mold inserts used in the Direct AIM (ACES injection molding) process», Annual Technical Conference – ANTEC. Proceedings of the 1999, 56th Annual Technical Conference, ANTEC, pp. 1105-1108.

- TATA K. *et al.*, (1998). «Efficient slicing for layered manufacturing», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4, No 4, 1998, pp. 151-167.
- WANG XIANGWEI, (1999). «Calibration of shrinkage and beam offset in SLS process», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 5, No 3, 1999, pp. 129-133.
- WILLIAMS J. D. *et DECKARD C.* (1998). «Advances in the modeling the effects of selected parameters on the SLS process», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4, No 2, 1998, pp. 90-100.
- XU F. *et al.*, (1997). «Optimal orientation with variable slicing in stereolithography», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, No 3, 1997, pp.76-88.
- XU F. *et al.*, (1999). «Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 5, No 2, 1999, pp.54-60.
- ZHOU J. G. *et al*, (1999). «Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts», *International Journal of machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, No 3, 1999, pp. 363-379.