

Titre: L'outillage rapide, mythe ou réalité mal définie? : une nouvelle
Title: alternative dans le cycle de développement de produit

Auteur: Sylvain Masounave
Author:

Date: 2000

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Masounave, S. (2000). L'outillage rapide, mythe ou réalité mal définie? : une
nouvelle alternative dans le cycle de développement de produit [Mémoire de
maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/8877/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8877/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Clément Fortin, & André Garon
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

L'OUTILLAGE RAPIDE, MYTHE OU RÉALITÉ MAL DÉFINIE ?
UNE NOUVELLE ALTERNATIVE DANS LE CYCLE DE DÉVELOPPEMENT DE
PRODUIT

SYLVAIN MASOUNAVE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
NOVEMBRE 2000



**National Library
of Canada**
**Acquisitions and
Bibliographic Services**
385 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

**Bibliothèque nationale
du Canada**
**Acquisitions et
services bibliographiques**
385, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Your 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.

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.

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 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.

0-612-60905-7

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

L'OUTILLAGE RAPIDE, MYTHE OU RÉALITÉ MAL DÉFINIE ?
UNE NOUVELLE ALTERNATIVE DANS LE CYCLE DE DÉVELOPPEMENT DE
PRODUIT

présenté par : MASOUNAVE Sylvain

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. SANSCHAGRIN Bernard, D.Eng., président

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

M. GARON André, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. PEGNA Joseph, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier Monsieur Clément Fortin pour son support tout au long de ce projet et pour m'avoir permis d'effectuer ma maîtrise dans le cadre d'un emploi au Centre Prototech.

Mes remerciements vont également à Monsieur André Garon pour avoir cru en mon potentiel dans les trois dernières années ainsi que pour son support financier au cours de la première année.

Je remercie Monsieur Bernard Sanschagrin pour son aide lors du design de la pièce type et des inserts de moule ainsi que pour ses nombreux conseils au moment de la phase d'injection plastique.

De plus, j'aimerais noter le travail de Monsieur Serge Lemire et particulièrement le travail de Monsieur Guy Gironne pour l'usinage de la base de moule ainsi que pour leur temps et leur patience lors de l'assemblage des inserts.

Je tiens aussi à souligner l'aide chaleureuse, le temps précieux et les connaissances fournis par Monsieur Jacques Beausoleil dans l'étape critique de l'injection plastique.

Finalement, je souhaiterais noter le précieux apport des employés du Centre Prototech et tout particulièrement de Monsieur Guy Létourneau et Monsieur Raymond Gauvin pour leur aide aussi bien matérielle que morale.

RÉSUMÉ

L'émergence de systèmes de conception assistée par ordinateur (CAO) représentant en trois dimensions les objets a permis le développement des systèmes de réalité virtuelle et du domaine du prototypage rapide. Par contre, une représentation tridimensionnelle sur l'écran d'un ordinateur n'utilise pas la participation de tous les sens lors de la validation du design d'un produit. La seconde réalisation issue des systèmes de CAO est l'obtention de modèles tridimensionnels physiques grâce à l'utilisation de technologies de pointe et ce, dans des temps très courts. Des facteurs d'efficacité, de qualité des produits, de flexibilité, de rapidité et de production innovatrice sont à l'origine d'une conjoncture favorable pour le développement du prototypage rapide. L'avantage premier des produits issus des technologies de prototypage rapide est sans aucun doute la réduction des coûts dus à une diminution des erreurs lors de la phase de design. C'est un outil indispensable de compréhension, de communication et de vérification qui accroît la performance des équipes d'ingénierie et des bureaux d'études. Les technologies de prototypage rapide bien que très jeunes évoluent rapidement vers d'autres idéologies. L'outillage rapide est sans aucun doute l'une des grandes avenues de cette évolution. Introduire rapidement un produit sur le marché est assurément de nos jours la plus grande préoccupation des entreprises. Cependant l'outillage rapide possède plusieurs années de retard sur les procédés conventionnels de fabrication. On peut donc se demander si cette nouvelle approche est fondée sur de solides bases qui vont lui permettre de devenir une alternative aux procédés conventionnels ou bien si elle ne représente qu'une idéologie qui s'estompera dans quelques années.

Plusieurs chercheurs scientifiques font miroiter un futur grandiose aux technologies d'outillage rapide allant même jusqu'à dire que les procédés par enlèvement de copeaux verront leur disparition bientôt. Le futur de ces technologies réside dans leur origine et leur passé. L'historique ainsi que l'origine de l'outillage rapide sont présentés en insistant particulièrement sur le rôle de ces technologies dans le cycle de développement de produits. Une classification de quelques technologies d'outillage rapide est faite de façon à pouvoir les évaluer en quelques mots clés.

Un historique des définitions de l'outillage rapide ainsi qu'une description de son état actuel et de son avenir forment la seconde partie de l'étude littéraire. Les pensées de plusieurs idéologistes et utilisateurs des procédés d'outillage rapide sont présentées afin de pouvoir comprendre les grands courants qui existent actuellement dans la caractérisation de ces procédés. Un jugement critique montre qu'il existe plusieurs voies très prometteuses pour les technologies d'outillage rapide.

Le peu de recul qui existe par rapport à ces technologies n'a pas permis d'obtenir d'étude précise sur leur domaine d'application. En effet, on ne connaît par exemple que très peu les restrictions qui s'appliquent au design des inserts de moule issus des technologies d'outillage rapide. La première partie de cette étude s'attarde au design d'une pièce type qui servira à la validation du domaine d'application de trois technologies d'outillage rapide, soient les procédés Direct AIM™, Cuivre Polyamide et RapidSteel® 2.0. Cette pièce comporte un certain nombre de paramètres géométriques qui permettent l'évaluation de plusieurs caractéristiques propres aux procédés. Par exemple, certains détails fins définissent la taille minimale qu'une entité géométrique peut avoir pour être présente le plus fidèlement possible sur la pièce plastique finale. Cette partie de

l'étude présente également les diverses étapes constitutantes du design d'un insert de moule à partir de la pièce type. Plusieurs difficultés ont été rencontrées lors de cette étape et devront être prises en compte lors de l'évaluation globale des procédés. Le design d'un moule n'est pas une mince tâche surtout lorsqu'une représentation tridimensionnelle des inserts est absolument nécessaire. Cette étape n'est pas obligatoire lors de l'élaboration d'un moule conventionnel et c'est pour cette raison qu'il est primordial de la présenter dans ce rapport.

La fabrication des inserts sur les technologies de prototypage rapide est une phase cruciale pour l'obtention d'une pièce plastique exacte. En effet, toutes les erreurs qui peuvent s'introduire à ce stade auront une répercussion directe sur la pièce plastique. Il est donc important de définir clairement et précisément les limites de cette étape. Il n'existe pas encore de nos jours de techniques simples et directes pour utiliser des inserts sans se munir d'une base de moule conventionnelle. Un usinage des inserts est donc requis afin d'effectuer cet assemblage résultant en des restrictions et des difficultés supplémentaires qu'il faut pouvoir évaluer lors de l'étape du design de l'insert.

Aucune grille des paramètres d'injection n'est fournie pour l'utilisation de ces moules à la fine pointe de la technologie amenant ainsi une réticence des mouleurs lors de leur utilisation. Une pression trop forte au moment de l'injection dans un moule issu de la technologie Direct AIM™ se conclura en une rupture instantanée de l'insert. Une évaluation des divers paramètres d'injection est présentée afin de pouvoir quantifier de façon précise le domaine de l'injection plastique appliquée à l'outillage rapide.

Les tolérances dimensionnelles appliquées à une pièce dépendent de la fonctionnalité du produit final. Or, ces tolérances doivent prendre en considération le procédé de fabrication qui doit être utilisé pour élaborer la pièce. Une tolérance de spécification ne peut pas être inférieure à la dispersion de fabrication minimale intrinsèque au procédé sans l'ajout d'un procédé supplémentaire pour atteindre cette tolérance. Par exemple, on ne peut pas spécifier une tolérance de 0,025 mm à une pièce issue d'un moule en sable sans être obligé d'effectuer un usinage. Dans le cas de l'outillage rapide, on ne connaît pas encore les dispersions de fabrication associées aux procédés et donc, il est impossible d'évaluer les tolérances minimales que l'on peut appliquer à une pièce fabriquée par ce procédé. On présente dans ce rapport une analyse de perpendicularité, de rectitude, de circularité et de positionnement. Ces dispersions de fabrication minimales pourront être agencées à des tolérances de spécification afin de préciser la fonctionnalité de la pièce. Cette étude est faite aussi bien pour l'insert de moule avant et après l'étape de finition manuelle que pour la pièce plastique finale afin de pouvoir également évaluer le transfert des erreurs d'une étape à l'autre.

Finalement une évaluation des coûts ainsi que des retombées environnementales est présentée en fin de rapport. Une étude des retombées environnementales est d'autant plus nécessaire que le procédé est jeune. En effet, le plus gros du développement des technologies d'outillage rapide est encore à venir. Il faut donc dès maintenant s'assurer de fonder ces technologies sur des bases qui respectent l'environnement aussi bien lors de leur utilisation que dans leur élaboration.

ABSTRACT

The emergence of computer aided design systems (CAD) representing a part in 3 dimensions has allowed the development of virtual reality and of rapid prototyping systems. However, the 3 dimensional representations on a computer screen or virtual environments systems do not allow the participation of all the senses to evaluate a design. The second realisation that stems from CAD systems involves the realisation of three-dimensional physical models using state-of-the-art technology with a very short leading time. Factors like efficiency, product quality, flexibility, speed and innovative manufacturing are the conjuncture origin of the development of the rapid prototyping domain. The main advantage for products manufactured by rapid prototyping technologies is without a doubt time and cost reduction due to a diminution of errors made in the design phase. It is a critical tool for the understanding, communication and verification that increases the performance of engineering and design teams. Rapid prototyping technologies even if very young evolve quickly towards ideologies. Rapid tooling is no doubt one of the most promising avenues of this evolution. However, rapid tooling possesses several years of lag compared to conventional manufacturing processes. One can wonder therefore if this new approach is well founded or if it only represents an ideology that will demise in a few years.

Several scientists think that rapid tooling technologies will have a great future and that they will even replace conventional milling processes soon. The history as well as the origin of rapid tooling are presented with a focus on the role of these technologies in the product development cycle. A classification of some rapid tooling technologies is made in order to be able to evaluate them using key words.

A history of definitions of rapid tooling as well as a description of its present state and future form the second step of the literature survey. Several ideologists and users thoughts about rapid tooling processes are presented in order to be able to understand principal tendencies that exist currently in the characterization of these processes. A critical judgement is made to show that there are several very promising ways of development for rapid tooling technologies.

There exist only a limited knowledge about those technologies, thus preventing a precise assessment on their current application domain. Indeed, one knows for example very little restrictions that apply to the design of inserts by rapid tooling technologies. The first step of this survey will focus on the design of a specific part that will serve to validate the domain of application of three rapid tooling technologies, Direct AIM™, Copper Polyamide and RapidSteel® 2.0 processes. This reference part includes a certain number of geometric parameters that permits the assessment of several features specific to the processes. For example, some thin details define the minimum size that a geometric entity can have to be represented faithfully on the final plastic part. This part of the study also presents the various steps of an insert design required for a typical part. Several difficulties have been met at this stage and should be taken into account when assessing the processes globally. The design of a mould is no easy task when it is necessary to absolutely get a three-dimensional representation of inserts. This step is not required when designing a conventional mould but is a required step for rapid tooling technologies when a direct process is used.

The manufacturing of inserts with rapid prototyping technologies is a critical phase to obtain precise plastic part. Indeed, all mistakes introduced at this stage

have a direct consequence on the plastic part. It is therefore important to clearly and precisely define the limits of this step. There are no simple and direct techniques for the use of inserts without a conventional mould base. The machining of inserts is required in order to assemble the inserts in the mould base, adding restrictions and additional difficulties that are necessary to be evaluated in the design stage.

Injection parameters for these types of mould are currently unavailable and thus moulders are reluctant to use them. An injection pressure too high in a Direct AIM™ mould will result in an instantaneous rupture of the insert. An assessment of the various injection parameters is presented in order to quantify specifically the injection plastic domain applied to rapid tooling.

Dimensional tolerances applied to a part depend on the functionality of the final product. However, these tolerances must take in consideration the manufacturing process that must be used to elaborate the part. A specification tolerance cannot be lower than the minimum manufacturing process dispersal without the use of another additional process in order to reach that tolerance. For example, a tolerance of 0,025 mm cannot be reached on a part issued from a sand mould without machining the final product. For rapid tooling parts, the manufacturing dispersal is not known yet, so it is impossible to evaluate the minimum tolerance that can be applied on a part issued from that process. This report presents an analysis of perpendicularity, straightness, circularity and position. These minimum manufacturing dispersal can be fit to the specification tolerances in order to specify the functionality of the part. This study is done for the mould insert before and after the manual finishing stage and for the final plastic part in order to evaluate the transfer of errors from a stage to the other.

Finally an assessment of costs as well as environmental issues are presented at the end of report. A study of environmental issues is all the more necessary than the process is new. Indeed, the biggest part of the rapid tooling development is still to come. It is important in the early stage of development of these technologies to assure that they respect the environment when they are in used and in their elaboration.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xvii
LISTE DES FIGURES	xix
LISTE DES ANNEXES	xxii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xxiii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : L'OUTILLAGE RAPIDE - DU PROTOTYPE À LA PRODUCTION	6
1.1 Historique et origine de l'outillage rapide	7
1.1.1 Le prototypage rapide.....	7
1.1.2 L'outillage rapide	10
1.1.2.1 Fabrication par approche indirecte des pièces plastiques.....	11
1.1.2.2 Fabrication par approche directe des pièces plastiques.....	13
1.1.2.3 Discussion.....	13
1.2 Définition de l'outillage rapide	16
1.3 État actuel et avenir de l'outillage rapide.....	17
1.4 Conclusion	20
CHAPITRE II : ÉTUDE DES TECHNOLOGIES D'OUTILLAGE RAPIDE - DIRECT AIM™, CUIVRE POLYAMIDE ET RAPIDSTEEL® 2.0	22
2.1 Introduction aux technologies	23

2.1.1	Stéréolithographie	24
2.1.2	Frittage sélectif au laser	25
2.1.3	Procédé Direct AIM™	26
2.1.4	Procédé Cuivre Polyamide	28
2.1.5	Procédé RapidSteel® 2.0	29
2.2	Choix d'une pièce d'étude	33
2.2.1	Forme générale	33
2.2.2	Nature des détails géométriques	35
2.2.3	Analyse de la pièce finie	37
2.3	Conception de l'insert de moule	39
2.3.1	Géométrie de base	40
2.3.1.1	Le plan de joint	40
2.3.1.2	La coquille	43
2.3.2	Habilage de l'insert	46
2.3.2.1	Tiges d'éjection	47
2.3.2.2	Canaux de refroidissement	48
2.3.2.3	Canal et seuil d'alimentation	48
2.3.2.4	Ergots de positionnement	49
2.3.2.5	Système de refroidissement	50
2.3.2.6	Nervures arrières de renfort	55
2.4	Élaboration des inserts en prototypage rapide	56
2.4.1	Préparation du fichier électronique	56
2.4.1.1	Le fichier STL	56
2.4.1.2	Le découpage en tranches	57
2.4.2	Fabrication par prototypage rapide	58
2.4.3	Post traitement des inserts	58
2.4.3.1	Direct AIM™	58
2.4.3.2	Cuivre Polyamide	59

2.4.3.3 RapidSteel® 2.0	59
2.5 Assemblage du moule.....	60
2.5.1 Usinage de la base de moule	60
2.5.2 Plan des inserts.....	61
2.5.3 Les usinages réalisés	61
2.5.4 Connexion des canaux de refroidissement.....	61
2.6 Positionnement des inserts	62
2.6.1 L'assemblage dans les cavités.....	62
2.6.2 Remplissage arrière	62
2.7 Essais d'injection	63
2.7.1 Le contrôle de l'injection	63
2.7.1.1 Les paramètres	63
2.7.1.2 Le cycle	64
2.8 Déroulement des essais.....	65
2.9 Conclusion	66
CHAPITRE III : ANALYSE DES RÉSULTATS.....	68
3.1 Analyse des pièces injectées pour les moules Direct AIM™ et Cuivre Polyamide.....	68
3.1.1 Analyse préliminaire	68
3.1.2 Analyse dimensionnelle.....	70
3.2 Analyse dimensionnelle de la technologie RapidSteel® 2.0	74
3.2.1 Analyse préliminaire	75
3.2.2 Analyse des inserts	76
3.2.2.1 Prise de mesures – machine à mesurer les coordonnées.....	76
3.2.2.2 Défaut de forme et analyse des surfaces planes	78
3.2.2.3 Analyse des cylindres de positionnement	86
3.2.3 Analyse de la pièce injectée	91
3.2.3.1 Défaut de forme et analyse des surfaces planes	92

3.2.3.2 Analyse des cylindres de positionnement	93
3.3 Conclusion	95
CHAPITRE IV : CONSIDÉRATIONS FUTURES	97
4.1 Évaluation des coûts	97
4.2 L'implantation des technologies de fabrication rapide	99
4.3 L'environnement et la fabrication rapide	100
4.3.1 Analyse des ressources utilisées	102
4.3.2 Consommation d'énergie	103
4.3.3 Retombées environnementales	104
4.4 Conclusion	106
CONCLUSION	107
RÉFÉRENCES	109
ANNEXES	112

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Fabrication par approche indirecte de pièces plastiques.....	12
Tableau 1.2 Fabrication par approche directe de pièces plastiques	13
Tableau 1.3 Paramètres techniques des technologies d'outillage rapide.....	15
Tableau 2.1 Paramètres dimensionnels formant la pièce finale	36
Tableau 2.2 Points de contrôle.....	37
Tableau 3.1 Pièces injectées en Direct AIM™ et Cuivre Polyamide	69
Tableau 3.2 Problèmes rencontrés lors des essais d'injection (procédé Direct AIM™ et Cuivre Polyamide)	69
Tableau 3.3 Échantillon de pièces analysées	70
Tableau 3.4 Masse des pièces analysées.....	71
Tableau 3.5 Mesures des pièces Direct AIM™	72
Tableau 3.6 Mesures des pièces Cuivre Polyamide.....	72
Tableau 3.7 Précision dimensionnelle.....	73
Tableau 3.8 Nombre de pièces injectées en RapidSteel® 2.0	76
Tableau 3.9 Analyse de la surface supérieure du poinçon avant la finition manuelle.....	82
Tableau 3.10 Analyse de la surface supérieure du poinçon après la finition manuelle.....	85
Tableau 3.11 Analyse des cylindres de positionnement avant la finition manuelle	88
Tableau 3.12 Résultats de l'analyse de dispersion avant la finition manuelle ...	89
Tableau 3.13 Analyse des cylindres de positionnement après la finition manuelle	90
Tableau 3.14 Résultats de l'analyse de dispersion après la finition manuelle ...	90
Tableau 3.15 Analyse d'une surface plane de la pièce finie	93
Tableau 3.16 Analyse des cylindres de positionnement de la pièce finie.....	94

Tableau 3.17 Résultats de l'analyse de dispersion de la pièce finie.....	94
Tableau 3.18 Analyse dimensionnelle du procédé RapidSteel® 2.0	96
Tableau 4.1 Coûts associés à la fabrication des inserts.....	99
Tableau 4.2 Taux d'utilisation de la matière	103

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Frais encourus dans les diverses étapes du cycle de développement de produits	8
Figure 1.2 Classement des technologies d'outillage rapide.....	14
Figure 2.1 Classification des technologies de prototypage rapide	23
Figure 2.2 Machine de stéréolithographie	24
Figure 2.3 Schéma de fonctionnement de la stéréolithographie	24
Figure 2.4 Machine de frittage sélectif au laser.....	25
Figure 2.5 Schéma de fonctionnement du frittage sélectif au laser.....	26
Figure 2.6 Schéma de fonctionnement du procédé Direct AIM™	27
Figure 2.7 Description du procédé Direct AIM™	27
Figure 2.8 Schéma de fonctionnement du procédé Cuivre Polyamide.....	29
Figure 2.9 Schéma de fonctionnement du procédé RapidSteel® 2.0.....	31
Figure 2.10 Description du procédé RapidSteel® 2.0	32
Figure 2.11 Représentation de la pièce finale	34
Figure 2.12 Méthodologie d'analyse.....	39
Figure 2.13 Plan de joint (1 ^{ère} version)	41
Figure 2.14 Plan de joint (2 ^{ème} version)	41
Figure 2.15 Usinage du plan de joint.....	41
Figure 2.16 Influence du plan de joint sur l'épaisseur de la paroi.....	43
Figure 2.17 Exemple de création d'une entité cylindrique dans un moule.....	45
Figure 2.18 Éléments d'habillage pour l'insert issu du procédé Cuivre Polyamide	46
Figure 2.19 Diagramme comparatif des procédés en fonction des paramètres d'habillage	47
Figure 2.20 Paramètres du seuil d'injection.....	49
Figure 2.21 Ergots de positionnement.....	50

Figure 2.22 Paramètres géométriques des ergots de positionnement	50
Figure 2.23 Évolution de la température en fonction du temps	51
Figure 2.24 Géométrie des canaux de refroidissement.....	55
Figure 2.25 Représentation du découpage en tranches.....	57
Figure 2.26 Processus d'infiltration par capillarité	60
Figure 2.27 Rallonge de connexion.....	62
Figure 2.28 Interdépendance des paramètres d'injection.....	64
Figure 2.29 Cycle de pression.....	65
Figure 3.1 Compensation du rayon du rubis	77
Figure 3.2 Procédure pour l'analyse du défaut de forme.....	79
Figure 3.3 Surface analysée	80
Figure 3.4 Vue 3D de la surface lissée.....	82
Figure 3.5 Vue 3D de la surface calculée.....	82
Figure 3.7 Vue planaire de la	82
Figure 3.6 Vue planaire de la	82
Figure 3.8 Vue 3D de la surface lissée.....	84
Figure 3.9 Vue 3D de la surface calculée.....	84
Figure 3.10 Vue planaire de la	84
Figure 3.11 Vue planaire de la	84
Figure 3.12 Méthode d'analyse dimensionnelle	87
Figure 3.13 Vue 3D de la surface lissée.....	92
Figure 3.14 Vue 3D de la surface calculée.....	92
Figure 3.15 Vue planaire de la	92
Figure 3.16 Vue planaire de la	92
Figure 3.17 Perpendicularité et rectitude.....	95
Figure 3.18 Circularité et positionnement.....	95
Figure 3.19 Représentation des inserts RapidSteel® 2.0.....	96
Figure 3.20 Pièce plastique injectée (polypropylène)	96

Figure 3.21 Pièce plastique injectée (polystyrène)	96
Figure 4.1 Procédé par ajout de matière	102
Figure 4.2 Place de l'environnement dans le cycle d'utilisation des matériaux	106

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I: ÉLABORATION DES CANAUX DE REFROIDISSEMENT	112
ANNEXE II: CALCULS DES DIAMÈTRES DES CANAUX DE REFROIDISSEMENT	115
ANNEXE III: DIMENSIONNEMENT DES INSERTS	117
ANNEXE IV: STRATÉGIE D'INJECTION	120

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
CAO	Conception assistée par ordinateur
CFAO	Conception et fabrication assistée par ordinateur
C_m, C_p	Chaleur spécifique du moule et de la pièce plastique
CMM	Machine à mesurer les coordonnées ("Coordinate Measuring Machine")
D	Diamètre du canal de refroidissement
FAO	Fabrication assistée par ordinateur
K_m	Conductivité thermique du moule
l_m	Distance entre les canaux et la surface du moule
l_p	Demie épaisseur de la pièce plastique
OR	Outilage rapide
PR	Prototypage rapide
SLA	Stéréolithographie ("Stereolithography Apparatus")
SLS	Frittage sélectif au laser ("Selective Laser Sintering")
t_{cycle}	Temps du cycle d'injection
$T_{eject.}$	Température d'éjection
$T_{inj.}$	Température d'injection
$T_{liq.}$	Température du liquide de refroidissement
$T_m(t)$	Température moyenne du moule en fonction du temps
ρ_m, ρ_p	Densité du moule et de la pièce plastique

INTRODUCTION

Les vingt dernières années ont été très fructueuses dans le domaine de la conception assistée par ordinateur (CAO). On a vu apparaître les premières stations de travail supportant tout d'abord les logiciels de dessins représentant les pièces par des plans en deux dimensions (2D), puis, rapidement apparaissent des logiciels plus sophistiqués permettant une représentation en trois dimensions (3D) des objets. De plus, les progrès faits dans le domaine de la rétro-ingénierie ont grandement influencé le développement des logiciels de CAO 3D. De nos jours, ces outils de modélisation ne nécessitent plus obligatoirement l'usage de stations de travail. Un simple ordinateur personnel muni d'un logiciel de conception 3D permet de créer en peu de temps des objets d'une grande complexité. La représentation tridimensionnelle sur des écrans est donc rendue un fait de la vie de tous les jours (jeux vidéo, télévision, cinéma, ordinateur personnel, etc.). Cette modélisation des objets possède de grands avantages par rapport à une représentation planaire, mais, reste incomplète. En effet, malgré les progrès grandissants des systèmes de réalité virtuelle et de simulation 3D, le besoin pour des modèles et des prototypes physiques est fondamental. À côté des propriétés techniques d'un produit, tel que sa puissance, ou l'équipement de sécurité, on retrouve un grand nombre de propriétés tels que le niveau de bruit ou l'aisance de manipulation qui sont des facteurs critiques dans une décision d'achat [1]. Or, ces propriétés ne peuvent être évaluées qu'avec des prototypes physiques. La participation de tous les sens est un facteur important de l'évaluation d'un prototype.

"Les compagnies qui veulent fabriquer des meilleurs produits doivent apprendre à fabriquer de meilleurs prototypes" [2]. Cette recrudescence pour la fabrication de prototypes a donné naissance à une nouvelle forme de technologie, le

prototypage rapide (PR). Plusieurs facteurs sont à l'origine d'une conjoncture favorable pour le développement du PR [3]:

- efficacité: la compétition mondiale grandissante des entreprises manufacturières a mené à la spécialisation et l'automatisation de la production afin d'en diminuer les coûts.
- qualité des produits: les marchés deviennent de plus en plus saturés et les consommateurs demandent des produits de plus en plus performants imposant ainsi une amélioration de la qualité de la production.
- flexibilité: la tendance et la demande des consommateurs mènent à la fabrication de produits flexibles et adaptables.
- rapidité: après les moyens traditionnels d'amélioration de la production comme les économies d'échelle ou la réduction des courbes d'apprentissage les entreprises doivent maintenant accroître leur compétitivité en diminuant les temps de production.
- production innovatrice: le besoin des consommateurs est toujours grandissant et par conséquent, les entreprises doivent fabriquer des produits innovateurs.

Ces facteurs pris dans leur ensemble ou individuellement forcent les industriels à disposer rapidement de prototypes plus nombreux, moins coûteux et plus rapidement.

Les décisions prises lors de la phase de conception d'un produit sont sans aucun doute celles qui engendrent la majeure partie des coûts. De façon à assurer une meilleure prise de décisions et ainsi limiter les dépenses ultérieures coûteuses et inutiles dues à des choix erronés, on remarque l'utilisation de prototypes très tôt dans le cycle de développement d'un produit. Ces prototypes sont utilisés lors de la phase de validation de la conception des pièces faisant

ainsi apparaître toutes les modifications nécessaires. De cette façon des coûts élevés dus à des modifications tardives sont éliminés.

Les données nécessaires à la fabrication au niveau du cycle de développement de produits sont générées par les logiciels de modélisation et de fabrication (CAO). Ces données peuvent être reprises par les systèmes de prototypage rapide pour réaliser directement des maquettes, modèles ou pièces en trois dimensions sans limite de forme ou de complexité et, directement ou non, des moules prototypes. On obtient ainsi une représentation tridimensionnelle du produit à chaque étape de la phase de conception. Ceci permet à tous les intervenants de disposer d'une vision concrète de la pièce finale. C'est un outil indispensable de compréhension, de communication et de vérification qui accroît la performance des équipes d'ingénierie et des bureaux d'études.

Pour optimiser l'usage des prototypes, il aura fallu créer un nouvel ensemble de machines qui permettront de représenter rapidement et avec précision un grand nombre de solides et tout particulièrement d'objets en matière plastique, le tout en quelques heures. Cette famille de machines est connue sous le nom de machines de prototypage rapide. Bien que leur principe soit simple, elles ne fonctionnent néanmoins qu'avec des technologies d'avant-garde hautement automatisées et totalement flexibles. Les divers procédés font appel aux lasers, à l'informatique, à la micromécanique, à l'optique de précision et à la chimie des polymères.

En matérialisant un objet qui n'a qu'une existence virtuelle, le prototypage rapide permet d'accéder rapidement à un objet réel. Avec cette démarche, il ne s'agit plus de créer une forme à partir d'une masse de matière comme en fraisage, mais de reconstituer un objet solide par stratification successive de

couches de matière à partir d'une résine liquide, d'une poudre, d'un filament de plastique, d'un jet de plastique ou d'un matériau en feuille. Une fois la géométrie de la pièce définie, l'opération de fabrication est entièrement automatisée. La rapidité et la précision sont leur objectif. Pour les moulistes, le prototypage devient un point de passage obligé car les pièces de préséries obtenues sont proches des pièces définitives et peuvent même servir à certains essais physiques en condition réelle. Il s'agit alors de choisir la technologie la plus appropriée à l'application à laquelle elle est destinée [4].

L'outillage rapide (OR) est sans aucun doute l'une des grandes avenues de développement du prototypage rapide. La qualité et la durée de vie d'un produit ne sont plus les seuls mots clé lors du design et de la fabrication. La prise du marché due à une arrivée première devant les compétiteurs est sans aucun doute un facteur prédominant lors de l'étude d'un nouveau produit. L'usinage conventionnel de moules nécessite en général un délai d'au moins 12-14 semaines avant de pouvoir injecter la première pièce. L'OR permet quant à lui de diminuer ce temps de façon à pouvoir obtenir la première pièce injectée en 3 à 5 semaines.

Les technologies d'outillage rapide issues du prototypage rapide évoluent très rapidement amenant ainsi une très forte compétition entre les diverses compagnies. La liste des technologies d'outillage rapide comporte de nos jours environ une vingtaine de procédés différents permettant d'obtenir dans des temps records un certain nombre de pièces « vraie matière ».

La définition exacte de l'outillage rapide est souvent remise en question et reste encore de nos jours imprécise. La tendance générale acceptée dans le domaine est d'affirmer que l'OR est directement issu du prototypage rapide.

La première partie de ce mémoire portera donc sur l'origine, la définition et les voies à venir de l'outillage rapide. Par la suite, une revue de la littérature technique existante dans le domaine sera présentée. Étant donné le grand nombre de technologies d'OR existantes, seules les technologies Cuivre Polyamide, Direct AIM™ et RapidSteel® 2.0 seront étudiées.

Toutes ces technologies sont très récentes et par conséquent les entreprises ne possèdent pas le recul suffisant pour évaluer leur impact. L'outillage rapide est-il un mythe, un gadget, ou une véritable technologie permettant de faire progresser le domaine de la fabrication dans son ensemble? L'absence de standards clairs et définitifs de l'outillage rapide est la principale restriction à l'explosion de l'utilisation de ces technologies.

De façon à délimiter le domaine d'application, la validité et le rendement de ces technologies, les objectifs suivants seront présentés:

- Analyser et valider globalement le processus de fabrication de trois technologies d'outillage rapide.
- Comparer globalement le champ d'application de ces technologies.
- Disposer de résultats directement applicables pour la conception des inserts de moule.
- Disposer de résultats expérimentaux des essais d'injection.
- Déterminer les tolérances dimensionnelles et géométriques optimales qui peuvent être appliquées à ces technologies.

Finalement, une discussion sur les coûts associés à ces technologies ainsi que leurs retombées environnementales conclura cette étude.

CHAPITRE I

L'OUTILLAGE RAPIDE - DU PROTOTYPE À LA PRODUCTION

Les technologies de prototypage rapide ont énormément progressé au cours des dernières années. Le premier système, fabriqué par la compagnie 3D Systems, a vu le jour vers la fin des années 80. On retrouve de nos jours plus de 20 procédés de PR regroupés en environ 7 catégories [5]. La plupart de ces technologies de PR ont donné naissance à des procédés d'outillage rapide par méthode directe ou indirecte. Chacune de ces techniques possèdent ses avantages ainsi que ses inconvénients mais surtout, possèdent son propre domaine d'application. Il est donc important de comprendre et maîtriser les caractéristiques de ces technologies afin d'en faire un usage approprié. L'origine et l'historique des technologies d'outillage rapide seront discutés dans la première partie de ce rapport.

Le concept de prototypage rapide est issu du terme anglais « *Rapid Prototyping* » et désigne la fabrication d'une pièce physique en trois dimensions, de forme arbitraire, directement à partir de données numériques (typiquement de modélisation solide par CAO) par un procédé rapide, hautement automatisé et totalement flexible (*Rapid Prototyping Report*, octobre 1992). Cette définition ainsi que celle de l'outillage sont de nos jours remises en question. La seconde partie de ce rapport discutera des diverses définitions qui entourent ces termes au travers d'une étude bibliographique.

Dans le marché économique actuel, la rapidité de développement d'un produit permet un avantage concurrentiel indéniable. En entrant le premier sur le marché, l'entreprise gagne non seulement les premières ventes mais acquiert aussi une position de référence qui rendra d'autant plus difficile l'implantation

des concurrents. L'état actuel et l'avenir de ces technologies tel que vu par les grands penseurs de ce domaine fera l'objet de la fin de ce chapitre.

1.1 Historique et origine de l'outillage rapide

Les chercheurs s'accordent pour dire que l'outillage rapide est issu directement des technologies de prototypage rapide. Il est donc important dans la première étape de cet historique de décrire les différentes étapes qui forment le passé du prototypage rapide.

1.1.1 Le prototypage rapide

On remarque que les dernières années ont été très profitables pour le développement des logiciels de conception assistée par ordinateur. L'utilisation de la représentation tridimensionnelle des objets est sans aucun doute une très grande révolution dans le domaine de la modélisation de pièces. L'utilisation de maquettes virtuelles a permis de sauver un temps précieux et par conséquent des coûts importants dans le cycle de développement d'un produit. Ces progrès technologiques d'une grande importance sont considérés comme une révolution dans le domaine.

La pression du temps, de la qualité et du coût ensemble avec la variété de produits et la compétition mondiale a permis au prototypage rapide de se tailler une place dans le cycle de développement de produits de plusieurs entreprises [6]. Les exigences du marché sont telles que les entreprises doivent instaurer une gestion plus rigoureuse des méthodes de développement de produits [7]. En effet, les termes diversité, adaptabilité, évolution des matériaux, innovation, variantes, versatilité, qualité et délai de mise sur le marché sont de plus en plus

utilisés dans les entreprises. La réduction des coûts et le délai de mise en marché sont probablement les valeurs les plus importantes de l'industrie manufacturière. Le temps de vie des produits étant toujours de plus en plus court, une entreprise ne peut plus se permettre les mêmes temps de développement au risque de voir le compétiteur sortir un second produit amélioré pendant qu'elle essaie de sortir le meilleur produit possible. Par contre, le consommateur est de plus en plus critique quant à la qualité du produit ainsi qu'à son coût. Un produit qui ne possède qu'une année de vie ne doit pas et ne peut pas coûter cher et ne doit pas nécessiter d'entretien ni de réparations. L'acheteur préfère obtenir un nouveau produit plutôt que de "recycler" son bien. Or, de façon à ne pas augmenter le coût d'un produit, il faut éviter toutes modifications faites dans les dernières étapes du cycle de développement. La Figure 1.1 (source: John Krouse, Krouse associates) présente l'impact d'une modification sur les coûts aux différentes étapes de développement d'un produit.

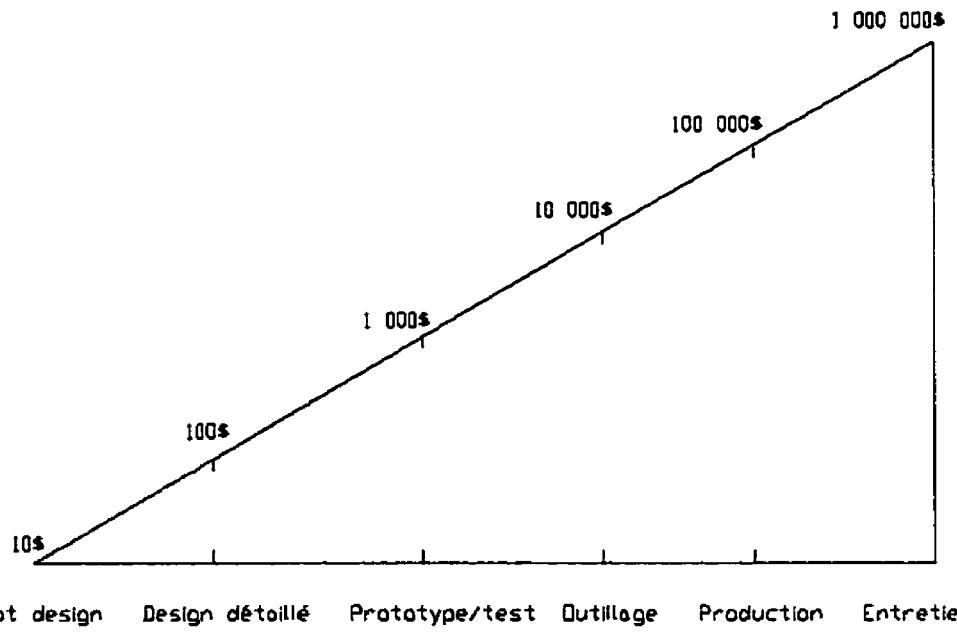


Figure 1.1 Frais encourus dans les diverses étapes du cycle de développement de produits

On conçoit que plus de 75% des coûts totaux de développement sont définis dès les premières étapes de conception [7].

D'un autre côté, le délai de mise en marché est le facteur le plus prédominant de cette fin de siècle. On considère que 6 mois de retard sur la première vente d'un produit fait perdre plus de 33% des coûts totaux de développement et de conception, alors qu'un dépassement de 50% des frais générés lors du développement du produit aura une répercussion d'environ 3,5% sur le coût global [5].

C'est pour répondre à ces deux critères de développement de produits que le prototypage rapide a fait ses premières apparitions. On peut donc dire que la naissance du prototypage rapide est due à une conjoncture favorable entre la diminution des coûts de développement et le délai de mise en marché ainsi que l'utilisation abondante des logiciels de CAO 3D.

La question est par conséquent la suivante: comment mettre en forme rapidement des prototypes directement à partir des modèles numériques ? Il faut pouvoir représenter les formes extérieures et intérieures en même temps, le plus rapidement possible, sans l'usage d'outillage.

Contrairement au mode de fabrication conventionnel où une pièce est fabriquée par enlèvement de matériel, le prototypage est basé sur un procédé additif, c'est à dire par apport de matière. Cette technique d'ajout successif de couches permet la fabrication de pièces sans se soucier de la complexité géométrique de celles-ci.

On retrouve majoritairement 2 types de prototypes correspondant à 2 caractéristiques qui doivent être validées: le modèle de visualisation et le prototype géométrique. Le premier doit permettre de vérifier le concept, l'esthétique et la faisabilité de la conception. Le second doit permettre de valider des aspects d'assemblage et de tests fonctionnels en respectant le plus précisément possible les cotes du prototype virtuel. Ces deux types de prototypes permettent de répondre aux besoins suivants [7]:

- Valider rapidement la conception
- Fabriquer des prototypes sans outillage industriel coûteux
- Optimiser la chaîne d'informations numériques
- Accroître le choix des formes géométriques
- Impliquer simultanément toute l'équipe du projet
- Réaliser des prototypes fonctionnels et outils rapides
- Tendre vers la photocopie 3D

La position du prototypage rapide défini, il est maintenant possible de décrire la naissance des technologies d'outillage rapide qui découlent directement du prototypage rapide.

1.1.2 L'outillage rapide

Les deux types de modèles précédemment expliqués permettent de fabriquer des prototypes possédants des caractéristiques géométriques proches de la pièce réelle. Par contre, malgré un aspect ressemblant, ces prototypes possèdent une lacune importante, l'absence de reproduction des propriétés mécaniques de la pièce vraie matière. En effet, la diversité des matériaux disponibles pour la fabrication des prototypes bien que grandissante reste encore insuffisante et incomplète pour représenter les plastiques commerciaux

que l'on retrouve actuellement sur le marché. Par exemple, il est très difficile de faire une corrélation entre les propriétés mécaniques d'une résine d'époxy et d'un polycarbonate. Il faut donc trouver un moyen de produire des prototypes vraie matière tout en maintenant le but principal des technologies de prototypage rapide, soit la diminution du temps de fabrication. De plus, le nombre de pièces qui peuvent être économiquement fabriquées reste faible, soit environ une centaine de petites pièces. La nécessité d'obtenir un plus grand nombre de pièces vraie matière forcera donc les entreprises fabriquant les technologies de prototypage rapide à développer des procédés d'outillage rapide.

On obtient ainsi des moules métalliques pour l'injection des plastiques, des moules ou des noyaux pour la fonderie au sable ou des moules céramiques pour la fonderie de pièces métalliques.

On retrouve deux grandes catégories d'outillage: l'approche indirecte et l'approche directe.

1.1.2.1 Fabrication par approche indirecte des pièces plastiques

Le procédé de fabrication par approche indirecte signifie qu'un modèle maître est produit par une technologie de prototypage rapide pour servir d'empreinte à la réalisation d'un moule. Cette méthode est également appelée méthode par transfert. On retrouve par exemple dans cette catégorie les moules en silicium (procédé RTV) obtenus depuis un prototype fabriqué par laminage (LOM).

Le tableau suivant (Tableau 1.1) présente les avantages et les inconvénients de plusieurs technologies de fabrication par approche indirecte. Étant donné le

grand nombre de procédés d'outillage rapide existants, seuls les plus importants seront présentés dans ce tableau. Les données de ce tableau ainsi que des explications supplémentaires sur les procédés peuvent être trouvées dans les livres de messieurs Jacobs (1996) et Bernard (1998). Par contre, ce dernier ne fait pas de distinctions entre la fabrication directe et indirecte des pièces plastiques.

Ces deux auteurs différencient la fabrication des pièces plastiques et celle des pièces métalliques. Dans ce rapport, seule l'étude de la fabrication de pièces plastiques sera discutée. Ce domaine est de loin prédominant dans l'utilisation des inserts de moule issus des technologies d'outillage rapide. Le moulage de métaux par pression est peu utilisé, mais en voie de développement.

Tableau 1.1 Fabrication par approche indirecte de pièces plastiques

Procédés	Avantages	Inconvénients
Moulage par transfert de résines (RTV)	<ul style="list-style-type: none"> • Rapidité • Précision (reproduction des détails, rendu très fin) • Démoulage très facile (complexité géométrique élevée des pièces – contre dépouille acceptée) • Aspect poids fonction souhaitée, grande diversité de présentation (couleur, dureté, aspect..) 	<ul style="list-style-type: none"> • Un seul type de matériaux (résine uniquement)
Projection de plasma	<ul style="list-style-type: none"> • Matériau projeté ayant un point de fusion élevé • Propriétés mécaniques du moule très élevées 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût • Installation nécessaire encombrante • Précision dimensionnelle moindre
Projection thermique de métal	<ul style="list-style-type: none"> • Vraie matière 	<ul style="list-style-type: none"> • Propriétés mécaniques et thermiques des moules limitées, précision moindre
3D Keltool	<ul style="list-style-type: none"> • Grand nombre de pièces injectées 	<ul style="list-style-type: none"> • Refroidissement conforme non disponible • Coût

1.1.2.2 Fabrication par approche directe des pièces plastiques

Le procédé de fabrication par approche directe implique que le moule est directement fabriqué par une technologie de prototypage rapide.

On retrouve dans cette catégorie les inserts de moule à injection produits par stéréolithographie (procédé Direct AIM™) ainsi que les inserts de moule métalliques produits par frittage sélectif au laser (procédé RapidSteel® 2.0).

De la même façon que pour la fabrication par approche indirecte, le tableau suivant (

Tableau 1.2) présente les avantages et les inconvénients d'un certain nombre de technologies de fabrication par approche directe.

Tableau 1.2 Fabrication par approche directe de pièces plastiques

Procédés	Avantages	Inconvénients
RapidSteel® 2.0	<ul style="list-style-type: none"> • Grand nombre de pièces injectées 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût • Maîtrise des aspects dimensionnels
Direct AIM™	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse de fabrication • Coût 	<ul style="list-style-type: none"> • Température d'injection des plastiques • Usure prématuée
ProMetal	<ul style="list-style-type: none"> • Rapidité • Diversité des matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Finition nécessaire • État de surface

1.1.2.3 Discussion

La figure suivante (Figure 1.2) présente les différents procédés d'outillage rapide regroupés selon qu'ils soient d'approche directe ou indirecte [8]. L'outillage rapide étant en pleine expansion, on conçoit que ce diagramme soit incomplet. De plus, plusieurs technologies d'outillage rapide possède une durée

de vie très courte ou, ne possède pas un potentiel suffisamment élevé pour être mentionné dans cette figure. Les catégories d'outillage rapide (concept, prototype ou production) seront expliquées plus loin dans ce rapport.

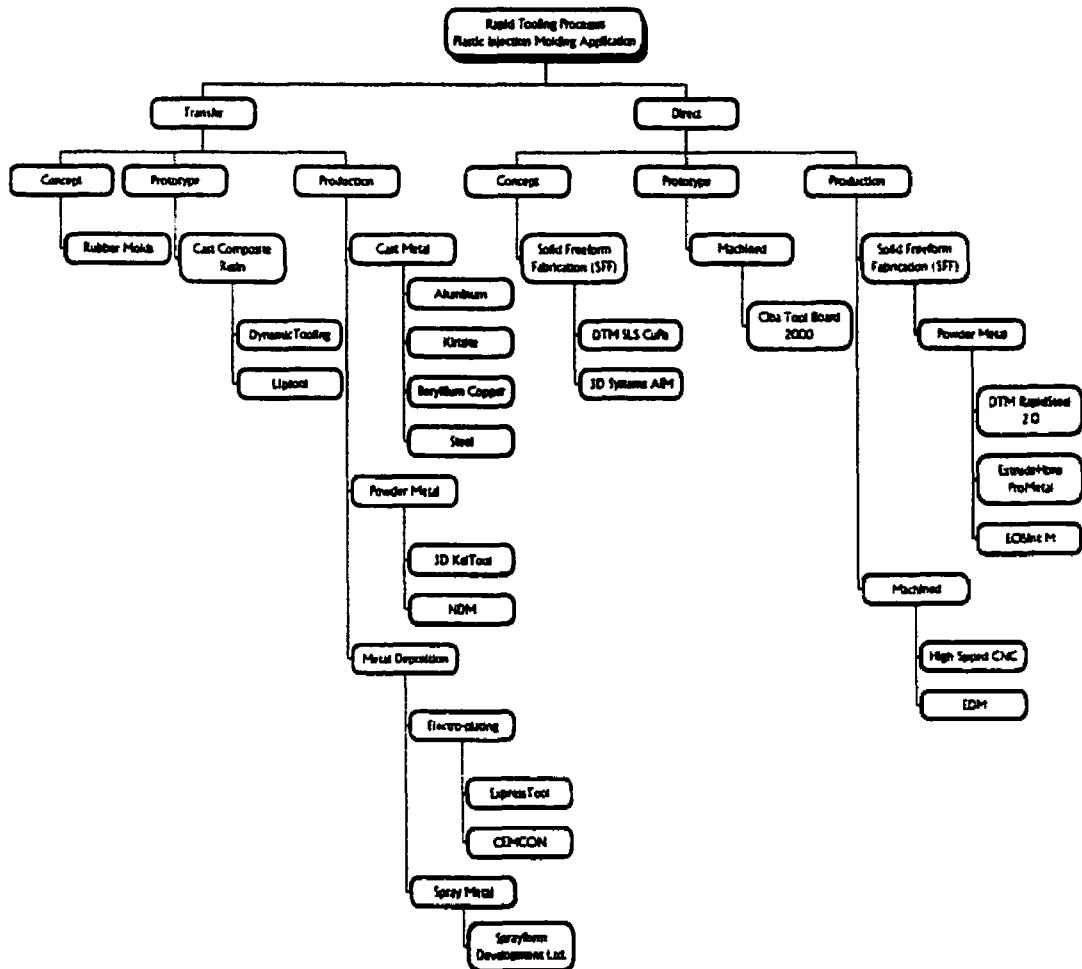


Figure 1.2 Classement des technologies d'outillage rapide

La plupart des technologies d'outillage rapide présentées jusqu'à présent ne possèdent pas un degré de qualité acceptable. L'état de surface, la précision dimensionnelle, la résistance mécanique ou la durée de vie restent insuffisants par rapport aux procédés de moulage par injection conventionnels. Des progrès

sont donc à faire dans ces directions. La notion de qualité acceptable sera décrite un peu plus loin dans le rapport. Le tableau suivant (Tableau 1.3) présente les caractéristiques de précision dimensionnelle, le nombre de pièces pouvant être injectées ainsi que le coût de plusieurs de ces technologies d'outillage rapide [5].

Tableau 1.3 Paramètres techniques des technologies d'outillage rapide

	Silicone rubber	Aluminum-filled epoxy	Direct AIM ²	Spray metal	Cast urethane	SLS RapidTool ²	3D Keltool ²	Machined aluminum ³
Lead time ¹ (weeks)	0.5 to 2	2 to 4	1.5 to 3	2 to 4	3 to 7	3 to 6	3 to 6	2 to 6
Cost ¹	\$1000 to \$5000	\$2500 to \$10,000 ⁴	\$2000 to \$5000	\$2000 to \$15,000	\$4000 to \$15,000	\$4000 to \$10,000	\$3500 to \$10,000	\$4000 to \$25,000
Typical part quantities	10 to 50	50 to 1000	10 to 50	50 to 1000	50 to 1000	50 to 10,000	50 to 1 million	50 to 100,000
Materials	Urethanes, epoxies, waxes	Thermo-plastics	Thermo-plastics ⁵	Thermo-plastics	Thermo-plastics	Thermo-plastics	Thermo-plastics	Thermo-plastics
Mold tolerance ⁶	0.05/25mm 0.002/inch	0.05/25mm 0.002/inch	0.05/25mm 0.002/inch	0.05/25mm 0.002/inch	0.08/25mm 0.003/inch	0.08/25mm 0.003/inch	0.05/25mm 0.002/inch	0.025/25mm 0.001/inch
Feature detail tolerance ⁶	0.05mm 0.003 inch	0.05mm 0.003 inch	0.05mm 0.003 inch	0.05mm 0.003 inch	0.127mm 0.005 inch	0.127mm 0.005 inch	0.127mm 0.005 inch	0.05mm 0.002 inch

Nous avons vu jusqu'à présent comment classer et regrouper les technologies d'outillage rapide. Les avantages et les inconvénients de plusieurs de ces technologies ont également été présentés mais ne sont pas suffisants pour effectuer un choix judicieux pour l'usage de ces technologies. Dans le prochain chapitre, les limites et champs d'application de trois de ces technologies seront présentés. Par contre, aucune définition précise de l'outillage rapide n'a été donnée, si ce n'est que ces procédés sont directement issus des technologies de prototypage rapide. La seconde partie du chapitre présentera donc les diverses définitions qui existent en ce moment dans le domaine, ainsi que l'impact qu'elles possèdent. Ce sont ces définitions qui guideront l'outillage

rapide dans le futur et par conséquent, il est important de les appuyer sur de solides bases.

1.2 Définition de l'outillage rapide

L'industrie du prototypage rapide est une industrie jeune mais évoluant très rapidement. Par conséquent, plusieurs termes définis il y a quelques années sont remis en question de nos jours. La première définition du prototypage rapide est la suivante: utilisation de données provenant de logiciels tridimensionnels de conception assistée par ordinateur afin de produire une représentation physique de ces données. Dans la littérature, on retrouve maintenant la définition suivante: production d'un nombre limité de pièces issues directement de logiciels CAO de façon à réduire le temps de fabrication [9]. Cette définition peut être appliquée directement à l'outillage rapide donnant ainsi: utilisation directe de données CAO pour la production d'un moule de fabrication de pièces. Malheureusement, cette définition ne prend pas en compte toutes les techniques de moulage (moulage par approche indirecte). Donc, de façon à obtenir une définition qui aurait un lien logique et évident entre les données CAO, le prototypage rapide et l'outillage rapide, la définition suivante a été donnée par Plunkett (1999): l'outillage rapide est la fabrication d'un moule utilisant les technologies de prototypage rapide de façon à minimiser le facteur temps.

Williams (1999) quant à lui considère que le problème réside plus dans l'absence de définitions claires entre la fabrication d'outils nécessaires à la fabrication de prototypes ou la fabrication d'outils ayant pour objectif la production. En effet, si le prototype fabriqué possède le même niveau de qualité acceptable pour la production, alors, on considère que l'on est dans le domaine

de la pré-production. Par conséquent, que l'on soit dans le domaine de l'outillage par transfert ou direct, il faut déterminer le niveau de qualité acceptable que l'on souhaite obtenir afin de faire un choix justifié dans l'usage des technologies d'outillage rapide. Trois catégories sont alors considérées: la fabrication de pièces concept, la fabrication de pièces prototypes, la fabrication de pièces de production. Il faut bien comprendre que ces trois catégories ne sont pas exclusives. Une pièce de production possèdera toutes les caractéristiques nécessaires à une pièce concept; l'inverse est faux. On retrouve les différentes technologies d'outillage rapide classées selon ces trois nouvelles catégories à la Figure 1.2.

Une nuance doit être apportée au classement de Williams. Celui-ci considère qu'une pièce de production possède un niveau de qualité acceptable pour être une pièce concept. Par contre, une des caractéristiques que ne possède pas entièrement cette catégorie, c'est la diminution du temps de fabrication. En effet, l'utilisation d'outillage rapide pour la fabrication de pièces de production n'est pas aussi rapide que pour la fabrication de pièces concept. De plus, les coûts engendrés par ce type d'outillage sont également supérieurs. On retrouve toujours le trio des inséparables, soit le coût versus la précision versus le temps de fabrication.

1.3 État actuel et avenir de l'outillage rapide

On retrouve de nos jours un grand nombre de publications portant sur des exemples de succès dans le domaine de l'outillage rapide laissant croire que les applications de ces technologies sont vastes, stables et bien établies. Hors, en regardant plus en détail, on se rend vite compte qu'en réalité, la majorité de ces applications proviennent du domaine de l'aérospatial et de l'automobile. Ces

deux domaines devant toujours être à la fine pointe de la technologie et en avance sur les autres entreprises [10]. L'impact de ces technologies sur les petites et moyennes entreprises est beaucoup moins clair. Plusieurs centres et universités tentent d'assister ces entreprises dans l'acquisition d'une première expérience dans le développement de produits et procédés afin d'obtenir de possibles bénéfices provenant des technologies de prototypage et d'outillage rapide.

Le prototypage rapide se retrouve dans un processus de questionnement. Après une explosion fulgurante dans les dernières années, il faut maintenant s'interroger sur la place que doivent prendre ces technologies ainsi que sur leur définition exacte. Le prototypage rapide possède plus de 10 ans de développement qui serviront comme données d'entrée pour son analyse. Il faut donc se poser des questions sur l'avenir de ce nouveau venu dans le domaine de la fabrication. Qu'il y ait un avenir est certain pour le moment, il faut déterminer la direction que l'on souhaite lui donner. Les quelques dernières années ont vu naître l'outillage rapide issu directement des technologies de prototypage rapide. Il ne faut cependant pas croire que ces technologies, qu'elles soient à base de poudre, de résines ou de toutes autres matières puissent un jour remplacer l'outillage conventionnel; elles sont un prolongement du prototypage rapide. Le monde de la fabrication de prototypes a subi de grandes et formidables modifications, celui de la production n'a pas encore été atteint. L'outillage conventionnel progressera dû à une évolution et non pas à une révolution [9].

Il faudra des percées technologiques importantes dans le domaine de la fabrication par couches afin de pouvoir égaler les technologies de production conventionnelle. Il faut donc se tourner vers un nouveau domaine, la fabrication

rapide ou autrement appelé le développement rapide de produits. Plusieurs universités et centres de recherche se penchent déjà sur ce sujet.

Williams (1999) quant à lui considère que la recherche pour la fabrication d'un outillage performant à coût peu élevé n'est pas nouvelle. Avant même les premiers pas de l'usinage à contrôle numérique, les manufacturiers tentaient déjà l'utilisation de technologies à base de résine, de frittage de métaux et de vaporisation de métaux. Par contre, l'essor des technologies de prototypage rapide a permis de fournir un nouvel apport financier pour l'amélioration des technologies d'outillage. C'est la prise de conscience des bénéfices que peut apporter l'usage des technologies de prototypage qui a poussé les entreprises dans l'amélioration de la qualité et de la performance du développement de produits.

Par contre, Williams ne prend aucune position quant au futur de l'outillage par approche directe et par approche indirecte. Il est encore trop tôt pour éliminer l'une ou l'autre des solutions. De plus, les progrès que font les logiciels de CAO dans l'aide à la modélisation des inserts de moules vient fausser les décisions prises trop rapidement. Certains de ces logiciels permettent la représentation d'inserts de moule en quelques minutes, réduisant ainsi les coûts associés à la modélisation de ces inserts. Par conséquent l'étape supplémentaire nécessaire à la prise d'empreinte de la pièce maître dans la fabrication d'outils par approche indirecte n'est plus justifiée. Auparavant, elle permettait entre autres de sauver l'étape de modélisation des inserts.

Scott Schermer [11] quant à lui se demande si l'outillage rapide est une technologie mature ou simplement en démarrage. Sa réponse est claire: les deux. En effet, il considère que nous sommes à la naissance d'une technologie

puissante et excitante. En regardant évoluer les technologies telles que l'usinage à commande numérique ainsi que les électrodes d'usinage, on peut présumer un futur prometteur aux technologies d'outillage rapide. Les difficultés rencontrées par ces technologies ressemblent étrangement à celles que l'on rencontre avec les technologies d'outillage rapide. Parmi celles-ci on retrouve une précision trop faible, un procédé trop lent, un manque de puissance, un coût élevé et un temps de fabrication trop grand. L'outillage rapide permet déjà de limiter certaines de ces difficultés et possède un potentiel plus prometteur que l'usinage à commande numérique à ses débuts. Scott Schermer considère que les limitations des technologies d'outillage rapide proviennent majoritairement d'un mauvais usage et d'une mauvaise connaissance de l'outillage et non pas de la technologie elle-même. L'usage d'une technologie d'outillage rapide dépend de la fonctionnalité de la pièce, de sa précision, de ses dimensions et de son état de surface. Il n'y a pas de critères fixes et universels qui permettent de faire la distinction entre l'usage des technologies conventionnelles versus les technologies d'outillage rapide.

1.4 Conclusion

Que les technologies d'outillage rapide soient directement issues des technologies de prototypage rapide n'est pas à remettre en question. Par contre, la direction que vont prendre ces procédés restent encore incertaine. Deux voies semblent se démarquer des autres. La première est la fabrication rapide qui considère que les technologies de prototypage vont permettre d'obtenir la production des pièces directement à partir de nouvelles machines fonctionnant par ajout de matière. L'autre voie tend plutôt vers la fabrication d'outils de production.

L'industrie quant à elle semble vouloir tendre vers un compromis à partir de toutes ces technologies, soit le développement rapide de produits. Il faut que la progression du développement de nouvelles machines diminue de façon à laisser à l'industrie le temps d'assimiler chacune des technologies ainsi que de pouvoir les combiner.

La suite de ce rapport portera précisément sur trois technologies d'outillage rapide, soient les procédés Direct AIM™, Cuivre Polyamide et RapidSteel® 2.0.

CHAPITRE II

ÉTUDE DES TECHNOLOGIES D'OUTILLAGE RAPIDE - DIRECT AIM™, CUIVRE POLYAMIDE ET RAPIDSTEEL® 2.0

La distinction majeure qui sépare les technologies de prototypage rapide par rapport aux technologies de fabrication conventionnelle provient du fait que l'élaboration de la pièce est effectuée par ajout de matière. Un abus populaire ira même jusqu'à dire que toutes les technologies de prototypage rapide utilisent un mode de fabrication couche par couche. Il faut bien se rendre compte qu'en réalité, plusieurs de ces technologies fonctionnent en utilisant un procédé point par point. Le prototypage rapide consiste en l'apposition successive de couches de matière brute formant ainsi un modèle solide en deux dimensions et demi. L'avantage incontesté de cette technique provient du fait que la complexité géométrique de la pièce n'a quasi aucune influence sur le procédé de fabrication, contrairement aux techniques de fabrication par enlèvement de matière. De plus, la plupart des systèmes de prototypage rapide commerciaux ne requièrent que très peu d'intervention humaine.

Le domaine du prototypage rapide a beaucoup évolué dans les dernières années donnant ainsi naissance à plus d'une vingtaine de technologies. Le développement des technologies présente un grand nombre de similarités. De ces technologies découlent plusieurs procédés d'outillage rapide. La maîtrise de ces procédés nécessitent donc une très bonne compréhension des systèmes de prototypage rapide. Les procédés d'outillage rapide étudiés dans ce document nous amènent donc à la description de deux technologies de prototypage rapide, soit la technologie de stéréolithographie ainsi que le procédé de frittage sélectif au laser.

2.1 Introduction aux technologies

La première condition pour la fabrication de pièces couche par couche est l'adhésion des couches successives. On retrouve par conséquent une classification des technologies de prototypage rapide selon le procédé physique d'adhésion des couches. Cette adhésion peut être effectuée au moyen d'une soudure chimique, en appliquant une colle entre les couches ou par frittage de poudres pour former les différents niveaux ainsi que l'interface entre ces couches. Le lien chimique peut provenir de la solidification d'une matière fondue ou par l'utilisation de photopolymères comme matière première. Ces derniers, lorsque soumis à une lumière induite réagiront, polymérisant ainsi le monomère. La figure ci-dessous présente une classification de certaines technologies de prototypage rapide en fonction du mode d'adhésion [12].

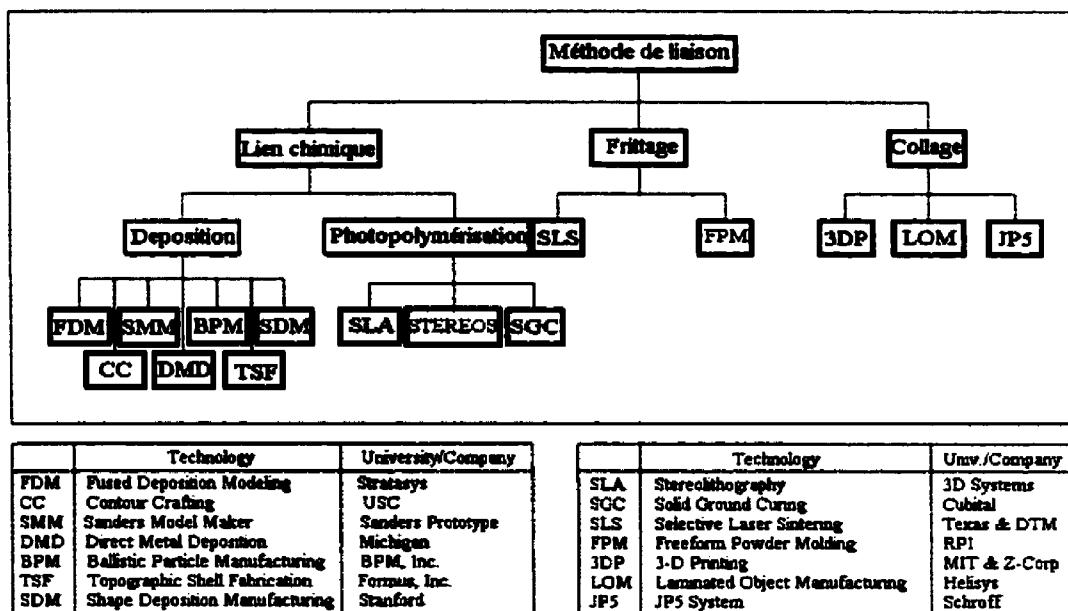


Figure 2.1 Classification des technologies de prototypage rapide

Les technologies d'outillage présentées dans ce rapport sont issues de deux technologies de prototypage rapide soit la stéréolithographie ainsi que le frittage sélectif au laser. La description de ces deux technologies se veut succincte. Pour obtenir plus d'information, le lecteur pourra se reporter au livre de T. Wohlers.

2.1.1 Stéréolithographie

Le procédé de stéréolithographie fut développé par Charles Hull en 1984 qui fonda deux années plus tard «3D Systems Inc.». La première machine date de 1987. Le fonctionnement de la machine repose sur la solidification par un faisceau laser à ultraviolets d'une résine liquide photosensible.

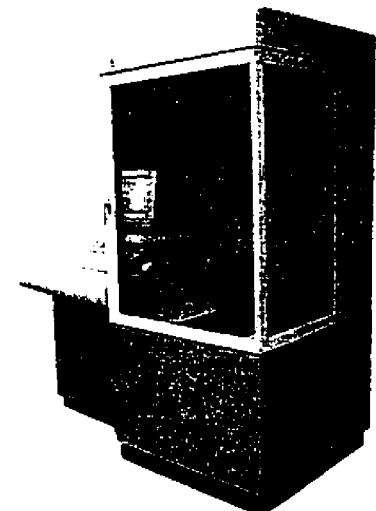


Figure 2.2 Machine de stéréolithographie

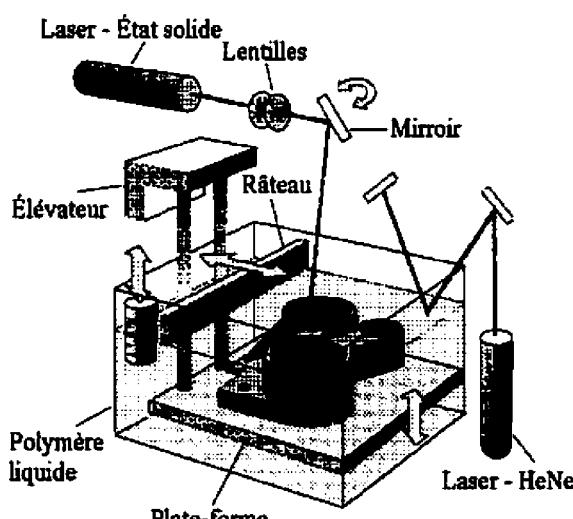


Figure 2.3 Schéma de fonctionnement de la stéréolithographie

La pièce qui repose sur une plate-forme, est élaborée par superposition successive de couches de résine. Pour chaque couche complétée, la plate-forme s'abaisse et le processus recommence de nouveau.

Notons que le temps de fabrication est de l'ordre d'une heure et demie par centimètre de hauteur de pièce. De plus, il est nécessaire d'ajouter des structures de support pour maintenir la pièce en position. Une fois la pièce terminée, une "cuisson" dans un four à ultraviolets est nécessaire pour compléter la solidification de la résine.

2.1.2 Frittage sélectif au laser

Le procédé de frittage sélectif au laser (SLS: Selective Laser Sintering) fut mis au point par Carl Deckard en 1986 qui fonda la compagnie Nova Automation, rachetée par BF Goodrich qui par la suite incorpora la compagnie DTM Corporation. La

première machine commerciale a vu le jour en

1992. Le procédé repose sur le frittage sélectif de poudre sensible à la chaleur à l'aide d'un laser infrarouge. La pièce qui est fabriquée par couches successives selon le balayage d'un faisceau laser, repose sur la plate-forme d'un piston. Après l'abaissement du piston central, un rouleau viendra étendre une nouvelle couche.

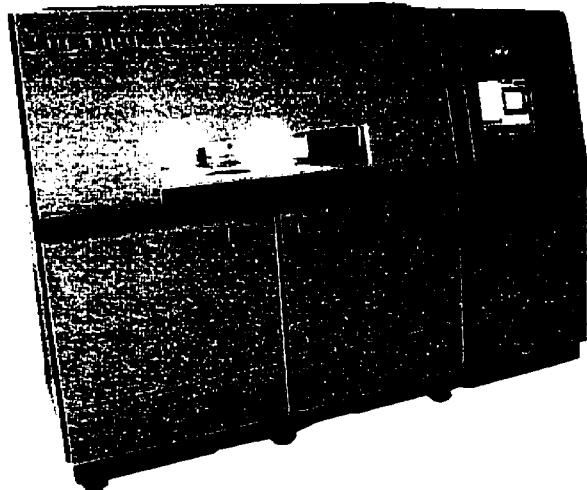
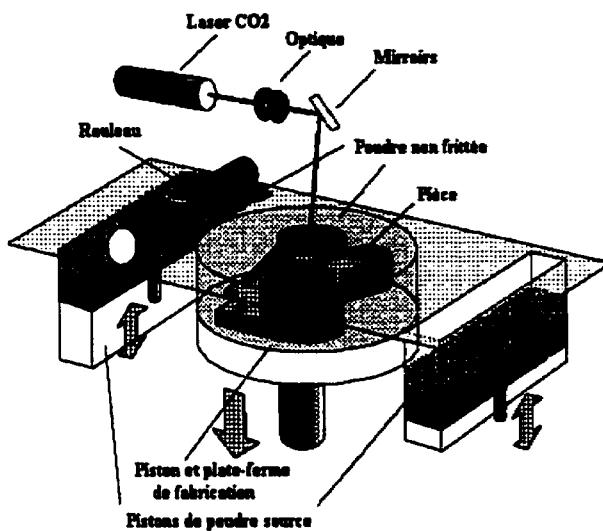


Figure 2.4 Machine de frittage sélectif au laser



Le temps de fabrication est comparable à celui du procédé de stéréolithographie. Notons toutefois que les structures de support ne sont pas nécessaires car la poudre maintient la pièce lors de la fabrication. Une fois la pièce terminée, une opération de dépoudrage est nécessaire.

Figure 2.5 Schéma de fonctionnement du frittage sélectif au laser

De ces deux technologies de prototypage rapide sont issues plusieurs procédés d'outillage rapide. On retrouve entre autres les procédés Keltool™, Direct AIM™, QuickCast™, RapidTool®, RapidSteel® 2.0, CastForm®, Cuivre-Polyamide, SandForm®, etc. L'étude comprise dans ce rapport ciblera l'analyse de trois procédés de fabrication de pièces injectées en plastique, soit les technologies Direct AIM™, Cuivre-Polyamide et RapidSteel® 2.0.

2.1.3 Procédé Direct AIM™

Ce procédé est issu directement de la technologie de stéréolithographie de la compagnie 3D Systems. À partir du modèle CAO de la pièce à injecter, les inserts de moule en forme de coquille sont modélisés. Ces inserts comporteront les canaux d'alimentation, le seuil d'injection, les guides de tiges d'éjection, les cylindres de positionnement et les nervures arrières. Ces inserts seront par la suite construits sur une machine de stéréolithographie.

Les deux figures suivantes (Figure 2.6 et Figure 2.7) représentent de façon simplifiée et imagée le processus complet Direct AIM™.

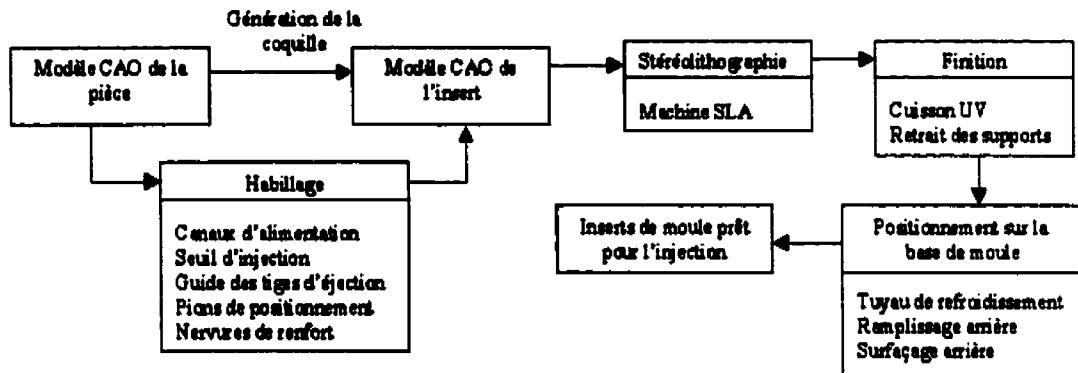


Figure 2.6 Schéma de fonctionnement du procédé Direct AIM™

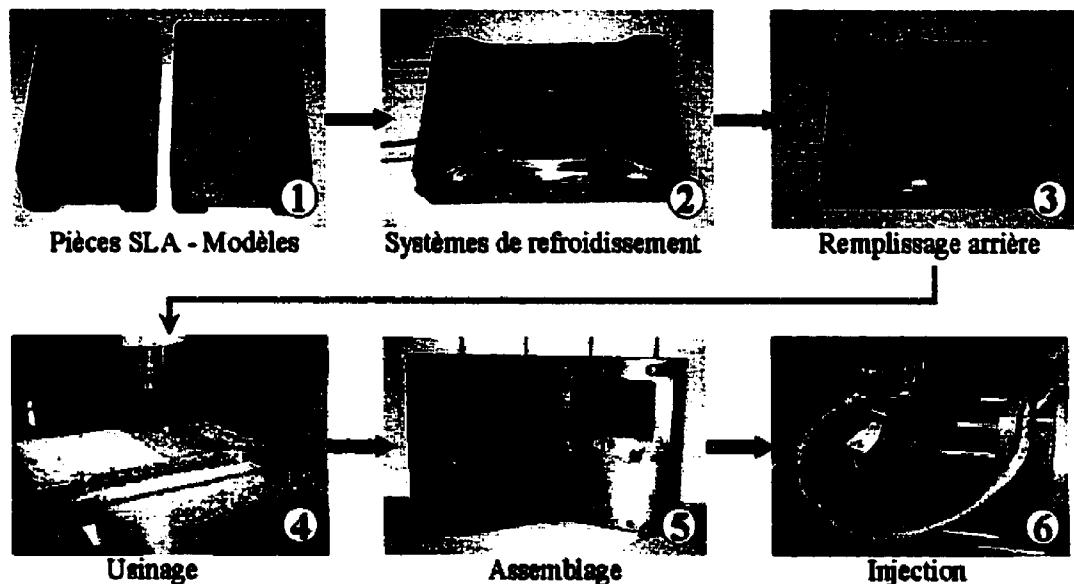


Figure 2.7 Description du procédé Direct AIM™

Après avoir retiré les supports et terminé la "cuisson" au four UV, un tuyau de cuivre sera introduit, servant ainsi au refroidissement de l'insert. L'insertion dans la base de moule sera suivie de la coulée d'un alliage étain-bismuth destiné à

fixer le canal de refroidissement et à renforcer l'arrière de l'insert pour qu'il supporte les efforts subis lors de l'injection. De plus, ce matériau métallique possède une bonne conductivité thermique permettant ainsi un bon transfert de chaleur utile au refroidissement de l'insert. Le surfaçage du plan à l'arrière de la coulée termine la fabrication de l'insert Direct AIM™. La base de moule sera par la suite assemblée et montée sur une presse à injection.

2.1.4 Procédé Cuivre Polyamide

Ce procédé est issu directement de la technologie de frittage sélectif au laser de la compagnie DTM Corporation. Le principe est semblable à la technologie Direct AIM™ mais, dans ce cas, le moule est réalisé par frittage sélectif des poudres sur la machine SLS. Le matériau utilisé est un mélange de poudre de cuivre et d'un polyamide. La suite du procédé conduit à l'obtention de l'insert de moule avec des étapes voisines de la technologie Direct AIM™. Notons cependant que les canaux de refroidissement sont générés directement dans le modèle CAO et que la finition nécessite le nettoyage (enlèvement de la poudre inutilisée) de ces canaux. Cet aspect est probablement le plus important en comparaison avec le procédé Direct AIM™. En effet, la possibilité d'obtenir un refroidissement conforme est sans aucun doute un aspect crucial lors de l'injection de pièces plastiques. De plus, le facteur "refroidissement" sera, comme démontré plus loin, le facteur le plus important des technologies d'outillage rapide. L'opération de remplissage arrière et de surfaçage de l'arrière de l'insert termine sa fabrication.

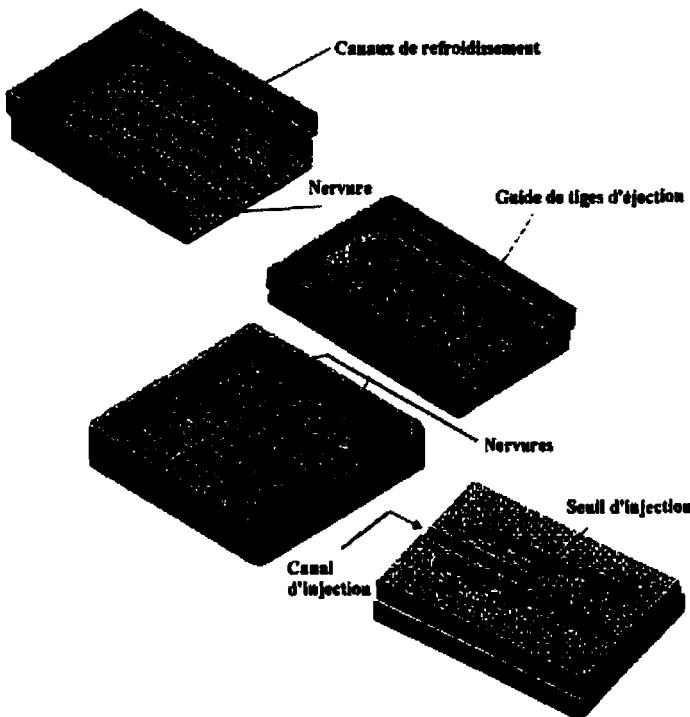


Figure 2.8 Schéma de fonctionnement du procédé Cuivre Polyamide

2.1.5 Procédé RapidSteel® 2.0

De la même façon que pour le procédé Cuivre Polyamide, le procédé RapidSteel® 2.0 est issu de la technologie de frittage sélectif au laser de la compagnie DTM Corporation. Contrairement aux deux autres technologies, l'insert ne subit pas d'opération de remplissage arrière car la géométrie n'a pas la forme d'une coquille. Le modèle CAO de l'insert est simplement celui d'un bloc auquel il faut soustraire la pièce. Le canal de refroidissement est inclus dans le modèle CAO ainsi que les canaux d'alimentation, le seuil d'injection et les cylindres de positionnement. La première distinction majeure entre les deux procédés est le matériau de base.

La figure à gauche (Figure 2.8) représente les diverses éléments ajoutés à la coquille formant la pièce à injecter afin d'obtenir un insert de moule fonctionnel.

Le procédé RapidSteel® 2.0 utilise une poudre d'acier inoxydable mélangée à une résine phénolique. Le laser permet de friter les particules de résine et non directement l'acier inoxydable. La seconde distinction provient du post-traitement nécessaire à la fabrication des inserts de moule en RapidSteel® 2.0 qui est beaucoup plus complexe que dans le cas du Cuivre Polyamide.

En effet, on retrouve deux cycles de fournaise lors de la préparation des inserts. Le premier cycle permet d'éliminer le polymère en montant la température au dessus de la température de vaporisation de celui-ci. Le second cycle est destiné à l'infiltration de bronze par capillarité. Une fois terminé, l'insert est alors composé d'un mélange d'acier inoxydable et de bronze. Dû à l'état de surface obtenu, un usinage des parois extérieures de l'insert et du plan de joint est nécessaire.

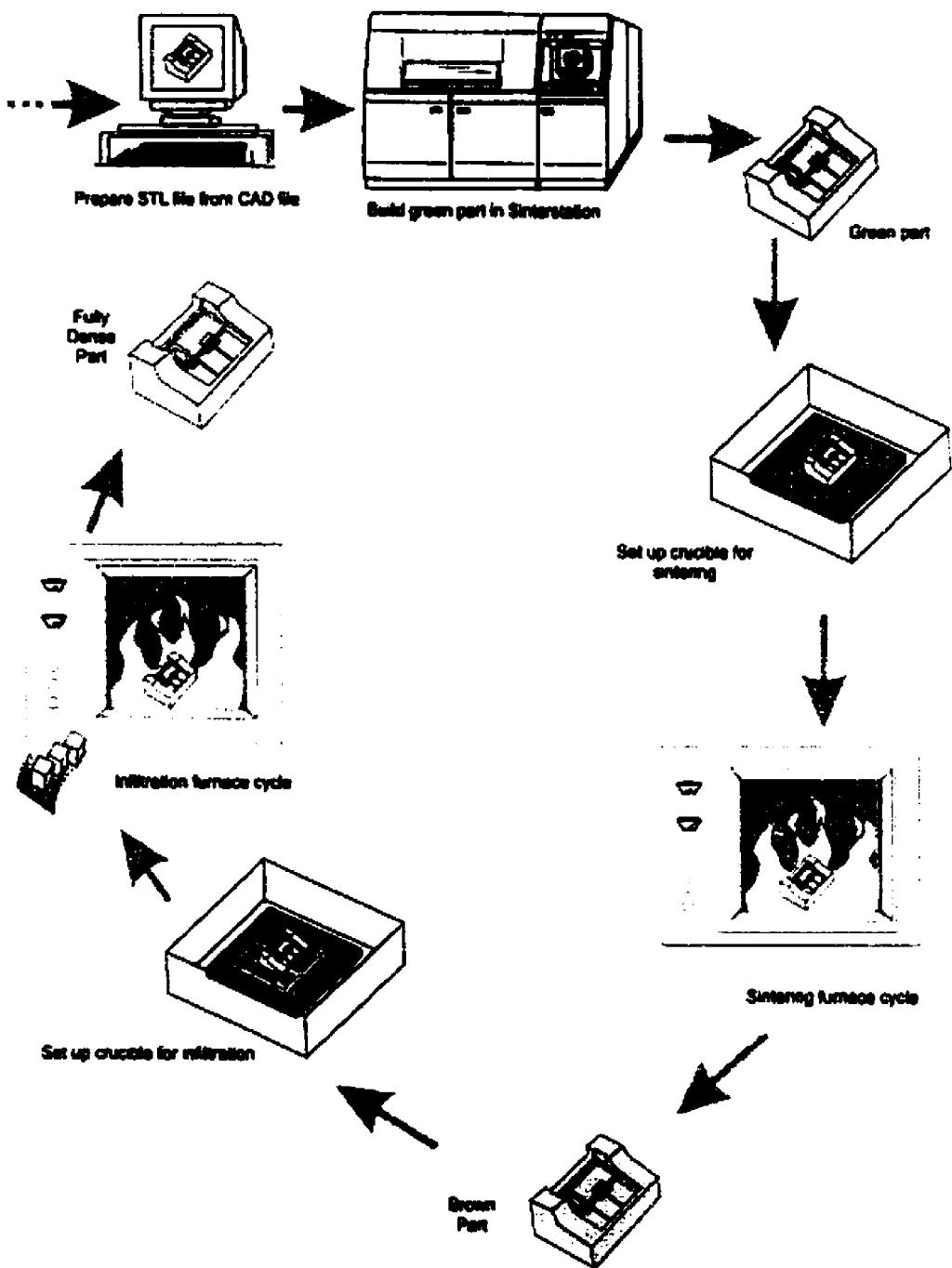


Figure 2.9 Schéma de fonctionnement du procédé RapidSteel® 2.0

La Figure 2.9 et la Figure 2.10 présentent le procédé RapidSteel® 2.0 dans son ensemble.

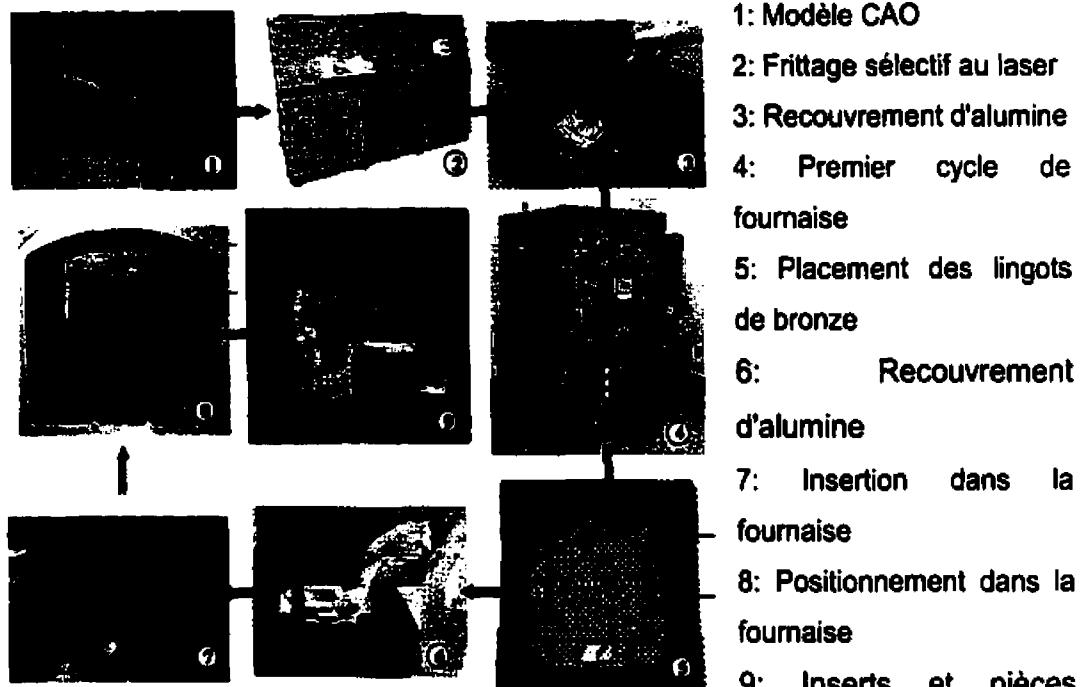


Figure 2.10 Description du procédé RapidSteel® 2.0

L'utilisation des technologies d'outillage rapide semble en théorie apporter plusieurs réponses aux problèmes que rencontre le domaine de l'injection plastique (complexité, rapidité, etc). La réalité apporte beaucoup de nuance qu'il faut pouvoir déterminer afin de comprendre le domaine d'application de ces technologies. Cette étude permettra d'évaluer l'utilisation de trois de ces technologies d'outillage rapide pour la fabrication d'une pièce plastique. La suite de ce rapport portera donc sur l'élaboration d'une pièce type qui servira à tester le domaine d'application des technologies d'outillage.

2.2 Choix d'une pièce d'étude

2.2.1 Forme générale

La forme générale de la pièce finie correspond à celle d'une coquille sur laquelle on ajoute des éléments spécifiques destinés à contrôler et évaluer le procédé de fabrication.

Les éléments spécifiques sont choisis pour tester des caractéristiques spécifiques tant au procédé d'injection qu'au procédé de fabrication de l'insert. En effet, il est tout aussi important de connaître les limites de ces technologies au moment de l'injection ainsi que lors de la fabrication des inserts par les technologies de prototypage rapide. Un détail géométrique qui ne ressort pas à l'intérieur d'une certaine précision du procédé de fabrication ne possèdera évidemment pas une meilleure précision lors de l'injection.

Trois séries de tests d'injection ont été effectuées afin d'améliorer le contrôle du procédé. Les résultats du premier test ont servi à améliorer le contrôle sur le procédé fournissant ainsi une information vitale pour la seconde série de tests. Le même raisonnement a été appliqué pour la seconde série de tests par rapport à la dernière série. Dans la suite de ce rapport, les résultats des trois essais seront présentés simultanément en expliquant à chaque fois la raison des modifications entre les essais.

La figure ci-dessous (Figure 2.11) représente la pièce finale qui sera injectée ainsi que la nature des principales entités géométriques qui la constituent.

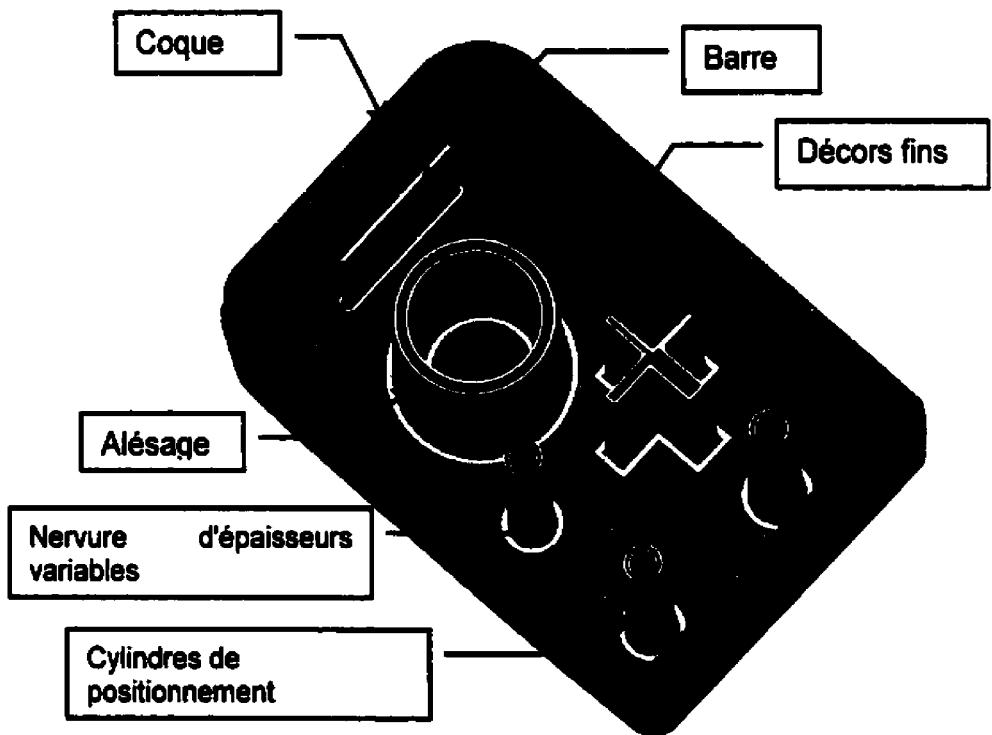


Figure 2.11 Représentation de la pièce finale

Chaque élément géométrique sera soumis à un maximum de deux contrôles dimensionnels, permettant ainsi d'éliminer les couplages de paramètres. Par exemple, l'alésage servira uniquement à l'analyse des erreurs de positionnement sans pour autant faire l'office d'une étude dimensionnelle complète.

Si des éléments géométriques servent à l'étude de plus d'un paramètre dimensionnel, il faudra être sûr que ceux-ci n'interfèrent pas entre eux ou du moins s'assurer de pouvoir évaluer l'influence de chacun d'entre eux sur l'erreur dimensionnelle finale. Par contre, dans le cas où le paramètre se rapporte à une

direction préférentielle (par exemple, l'axe x), il est possible de retrouver l'évaluation d'un second ou même d'un troisième paramètre sur la même entité lorsque ceux-ci portent sur des directions préférentielles non couplées avec la première (par exemple, l'axe des y ou z).

Il est donc possible de retrouver des entités géométriques qui sont, au sens de l'analyse dimensionnelle et géométrique, considérées incertaines, c'est-à-dire qu'elles n'ont pas été analysées complètement.

De plus, bien que la pièce finie n'ait pas de fonctionnalité particulière, il faut bien comprendre que les entités géométriques représentent des aspects réels de pièces industrielles. Par exemple, les quatre nervures d'épaisseurs variables représentent des nervures de renfort que l'on peut retrouver sur des pièces commerciales. Les décors fins pourraient également représenter des gravures de texte faîtes sur un boîtier (nom ou logo de la compagnie).

Voici les éléments spécifiques choisis :

- 3 cylindres de positionnement (CP)
- 8 décors fins d'épaisseurs variables (DF)
- 4 nervures d'épaisseurs variables (N)
- 1 alésage (A)
- 1 barre (B)

2.2.2 Nature et objectifs des détails géométriques

Le tableau suivant (Tableau 2.1) présente un certain nombre de paramètres dimensionnels formant la pièce. Ces dimensions sont regroupées par entités géométriques.

Tableau 2.1 Paramètres dimensionnels formant la pièce finale

Entités géométriques	Dimensions critiques	Objectifs
Coque	<ul style="list-style-type: none"> • Épaisseur: 2 mm • Hauteur: 22 mm • Angle de dépouille: 3° • Rayons de raccordement variables: R8, R4 et R2 	L'épaisseur de la pièce correspond à une épaisseur moyenne que l'on retrouve sur les pièces plastiques conventionnelles
Cylindres de positionnement	<ul style="list-style-type: none"> • Hauteur: 18 mm • Diamètre extérieur sup.: 5 mm • Profondeur de l'alésage: 15 mm • Diamètre de l'alésage: 3mm • Angles de dépouille variables: 1°, 2° et 3° 	Ces cylindres représentent des bossages de vissage que l'on retrouve sur la plupart des boîtiers électroniques.
Décors fins	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeurs ou hauteurs variables: 0,1, 0,2, 0,3 et 0,4 mm • Largeurs variables: 1, 0,5, 0,2 et 0,1 mm 	Ces décors servent à valider des petites dimensions qui peuvent représenter des gravures ou inscriptions dans une pièce plastique finie. Ils peuvent également permettent d'évaluer le meilleur choix pour des inscriptions (gravée ou en relief)
Nervures	<ul style="list-style-type: none"> • Angle de dépouille variable: 2° • Épaisseurs variables: 1, 1,5, 2 et 3 mm • Hauteur: 18 mm • Largeur: 7,5 mm 	Ces entités permettront de choisir les dimensions optimales pour la fabrication de nervures de renfort pour des pièces plastiques.
Alésage	<ul style="list-style-type: none"> • Hauteur: 15 mm • Diamètre extérieur sup.: 10 mm • Diamètre intérieur sup.: 8 mm • Angle de dépouille: 3° 	
Barre	<ul style="list-style-type: none"> • Hauteur: 15 mm • Longueur: 15 mm • Angle de dépouille: 2° • Épaisseur minimale: 1 mm 	La géométrie de cette barre va permettre de tester l'angle de dépouille limite, ainsi que l'épaisseur de paroi minimale.

2.2.3 Analyse de la pièce finie

Il est bon de rappeler que le but de cette étude est de caractériser et d'évaluer le procédé de fabrication de la pièce finie. Il va sans dire que chacune des étapes permettant l'élaboration de la pièce influe sur les caractéristiques finales de cette pièce.

- Les paramètres de prototypage rapide de l'insert de moule influent sur l'insert résultant ainsi en une variation de la pièce finie.
- Les paramètres du cycle d'injection influent sur l'écoulement du polymère et donc sur la qualité de la pièce finie ainsi que sur la durée de vie de l'insert de moule (densité de la pièce, écoulement partiel, usure de l'insert, etc.).
- Le choix des entités géométriques en CAO (angles de dépouille, rayons de raccordement, épaisseur des parois,...) est aussi déterminant pour la forme finie. Il est donc important d'essayer autant que possible de découpler les problématiques de manière à observer l'influence d'un paramètre de fabrication particulier.

Les différents points de contrôle de la pièce finie seront maintenant présentés.

Tableau 2.2 Points de contrôle

Coque	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Contrôle de l'état de surface bi-directionnel (en z et en x/y) ➤ Contrôle des rayons de raccordement (retassures, fissure de l'angle vif) ➤ Contrôle des plans à la CMM (planéité, angle entre les normales pour contrôler l'angle de dépouille) ➤ Au dos de la coque : observation des retassures dues aux éléments sur la face interne ➤ Dimensions externes : permet d'évaluer les dimensions moyennes
Cylindres de positionnement	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mesure des cônes extérieurs à la CMM (8 points de mesures) : mesure de l'angle de dépouille, direction des normales (permet une mesure du parallélisme) ➤ Contrôle de l'écoulement de la matière (la matière doit remonter, on vérifie la hauteur des cylindres) : influence de l'angle de dépouille ➤ Usure de l'insert : problème de démolage (angle trop faible =

	<p>adhérence), fragilité du noyau intérieur (nombre de pièces pour casser le noyau, influence de l'angle de dépouille)</p> <p>➤ Déplacement du noyau en fonction de la position du seuil d'injection</p>
Alésage	<p>➤ Validité de la pièce par gabarit (méthode «go/no-go») avec contact au fond de la pièce (étude des pièces bonnes en fonction de la série : usure du moule, paramètres d'injection)</p> <p>➤ Mesure à la CMM : Cône intérieur et extérieur (au moins 8 points de mesure), défauts de forme, angles de dépouille.</p>
Décors fins	<p>➤ Usure de l'insert : nombre de pièces avant dégradation, type d'usure, les décors intérieurs résistent-ils mieux que les décors extérieurs ?</p> <p>➤ Précision des pièces injectées : à la CMM mesure de la profondeur en z, mesure en x/y sur l'insert et sur la pièce, paramètres d'injection permettant la reproduction au mieux du décor (haute pression, polymères très visqueux = plus précis mais forte dégradation)</p>
Nervures	<p>➤ Étude de l'épaisseur des nervures à angle de dépouille constant : respect de la forme de la nervure, écoulement du polymère, usure du moule</p> <p>➤ Validation de l'épaisseur optimale pour les rainures en fonction de l'épaisseur de la pièce.</p>

Le but de l'analyse des paramètres de fabrication et de leur influence sur la pièce finie est d'élaborer dans un premier temps une description grossière sur le procédé en déterminant les limites de faisabilité, mais dans un second temps d'étudier l'influence relative des paramètres afin de proposer un critère de choix pour les paramètres du procédé de fabrication.

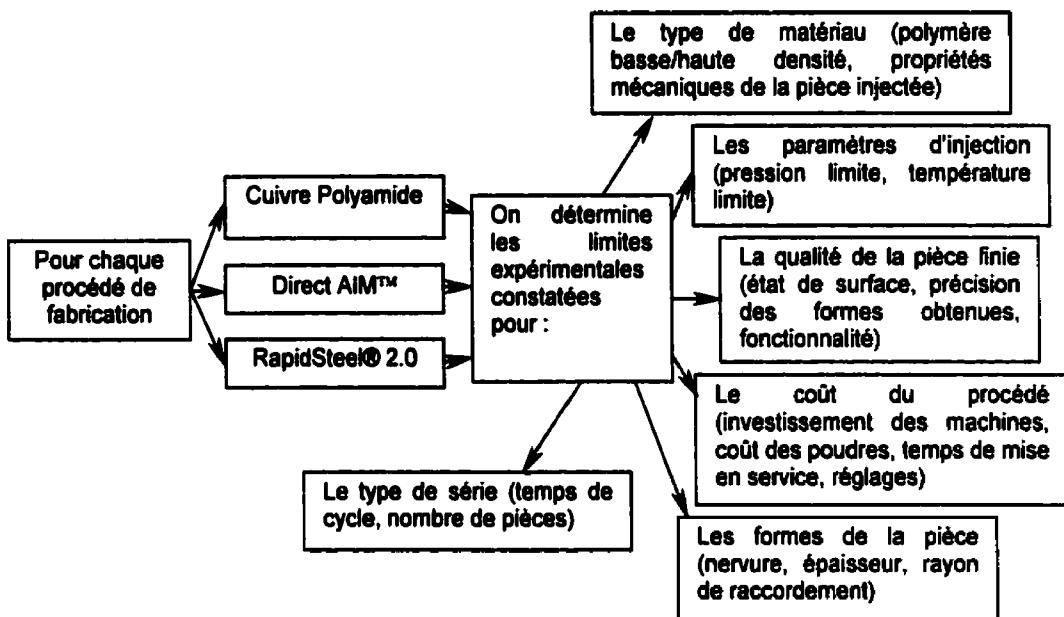


Figure 2.12 Méthodologie d'analyse

La prochaine étape nécessaire à l'élaboration des inserts de moules sur les technologies de prototypage rapide est la modélisation de la pièce sur un logiciel de CAO 3D. Dans le cadre de ce projet, le logiciel utilisé est CATIA v.4.1.9. Ce logiciel n'est pas un logiciel conçu expressément pour la création de pièces plastiques injectées ni pour la modélisation d'inserts. Par contre, ce logiciel de haut niveau possède toutes les fonctionnalités nécessaires pour l'obtention de la pièce type. C'est donc pour des raisons de disponibilité et d'accessibilité que ce logiciel a été utilisé.

2.3 Conception de l'insert de moule

La conception et la modélisation de l'insert de moule est une étape critique dans ce projet. En effet, les entités géométriques créées lors de cette étape serviront de référence nominale tout au long de l'analyse dimensionnelle du procédé. Il est donc important d'apporter une attention particulière à cette étape.

Cette modélisation comporte deux parties principales, soit la création de la géométrie de base, puis l'habillage de l'insert de moule. Ces deux étapes seront discutées dans la suite du rapport.

2.3.1 Géométrie de base

2.3.1.1 Le plan de joint

La première étape de la modélisation est de représenter en trois dimensions les entités géométriques décrites précédemment. Cette représentation mène à la création de la pièce finie. Par contre, cette pièce ne possède pas les éléments critiques nécessaires à l'injection plastique, en particulier les angles de dépouille (angle de démoulage) ainsi que la délimitation du plan de joint. Les deux premiers essais effectués ont permis de faire évoluer aussi bien le design du plan de joint que l'influence de l'angle de dépouille sur l'épaisseur de la pièce. La géométrie tri-planaire du plan de joint ne possède pas de raison d'être fonctionnelle. Une géométrie planaire avait déjà été validée lors de tests précédents. L'usage d'un plan de joint complexe, a permis d'en valider et d'en apprécier les limites. Sa nature a des répercussions autant sur le design de l'insert de moule, que sur la pièce finie. On retrouve également une influence non-négligeable sur l'usinage final avant l'insertion dans la base de moule. De plus, des aspects comme l'auto-centrage des inserts ainsi que l'échappement de plastique hors de la pièce sont étroitement liés à la géométrie du plan de joint. Les avantages ainsi que les inconvénients rencontrés par l'usage d'une telle géométrie seront discutés pour les deux designs de plan de joint qui ont été utilisés.

Les deux figures suivantes (Figure 2.13 et Figure 2.14) présentent la forme des deux plans de joint qui ont été utilisés au cours de l'étude.

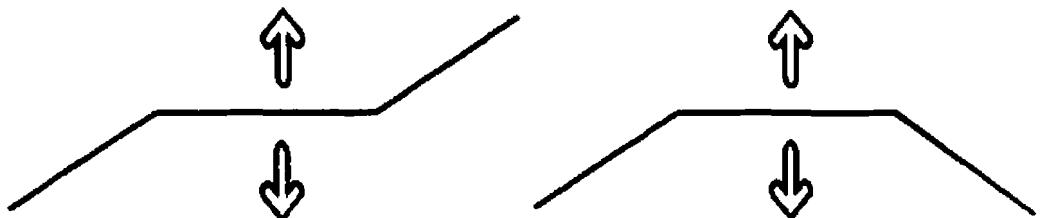


Figure 2.13 Plan de joint (1^{ère} version) Figure 2.14 Plan de joint (2^{ème} version)

Le premier design de plan de joint a permis de valider le procédé de fabrication et d'injection pour des plans de joint complexes. Par contre, plusieurs problèmes sont survenus suite à l'utilisation de cette géométrie.

La première difficulté provient de l'usinage nécessaire à un bon couplage des plans. Comme le présente la Figure 2.15, l'utilisation de deux outils est nécessaire pour l'usinage complet du plan de joint. Cette difficulté augmente le temps total d'installation de l'insert dans la base de moule.

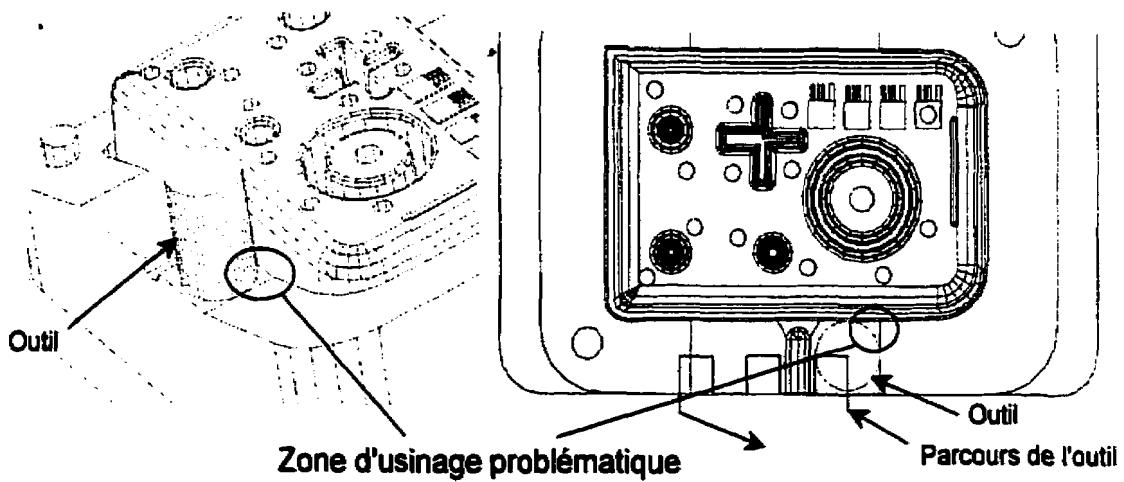


Figure 2.15 Usinage du plan de joint

De plus, cette configuration de plan de joint diminue le dégagement de la paroi d'un côté de l'insert augmentant ainsi la friction lors du démoulage. Cet aspect a été une contrainte importante lors du premier essai d'injection étant donné la faible qualité de l'état de surface.

La troisième difficulté résultante de cette forme de plan de joint est le centrage et le positionnement des inserts. Cette configuration ne permet pas de bloquer les inserts dans les directions tangentes au plan de joint. Il aura donc fallu s'assurer d'un très bon positionnement en se basant sur des références extérieures (base de moule) afin de s'assurer d'un placement précis des inserts.

La seconde géométrie utilisée permet de résoudre plusieurs des problèmes associés à la première géométrie de plan de joint. En particulier, cette configuration permet l'auto-centrage des inserts, facilitant ainsi leur positionnement dans la base de moule. L'étape d'usinage a considérablement été diminuée grâce à l'usage de cette géométrie de plan de joint.

La figure suivante (Figure 2.16) présente les deux géométries de pièces correspondant aux deux configurations de plan de joint. Hormis l'influence de ce dernier sur la géométrie finale de la pièce, une distinction majeure différencie les deux pièces. La référence de départ de l'angle de dépouille de la première pièce a été choisi comme étant le plan de joint amenant ainsi une variation de l'épaisseur de la paroi de la pièce aux extrémités. La surface de départ utilisée pour la seconde géométrie de pièce est l'extrémité de la pièce. L'épaisseur de la pièce est donc constante aux extrémités et plus grande au niveau du plan de joint. Cette représentation est conforme avec la géométrie des pièces plastiques conventionnelles.

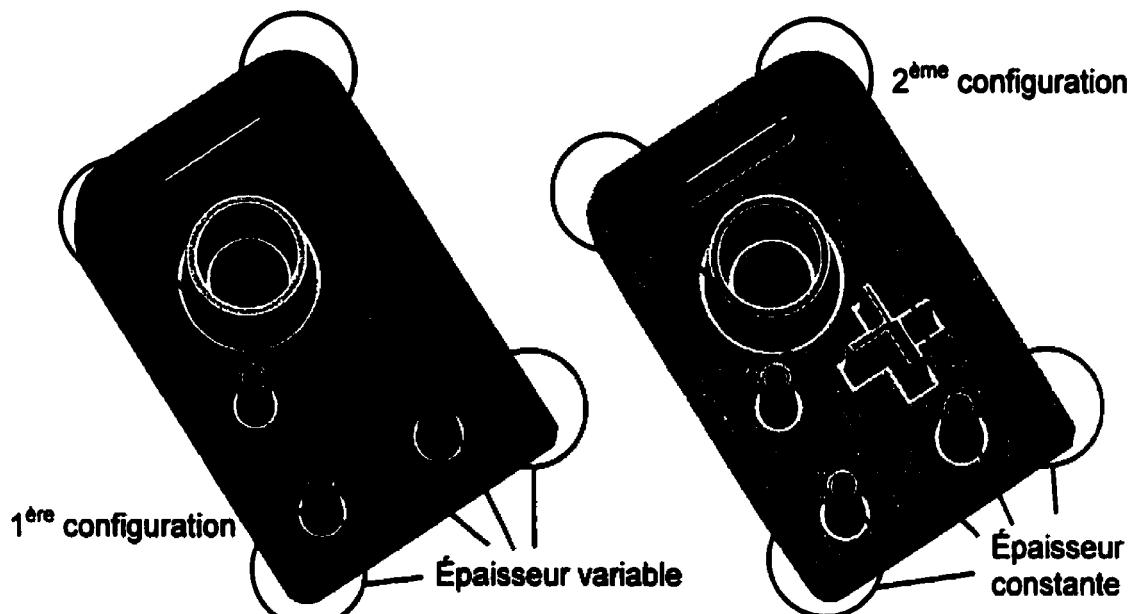


Figure 2.16 Influence du plan de joint sur l'épaisseur de la paroi

2.3.1.2 La coquille

À partir de la pièce finie, le processus de génération du moule n'est pas automatique. En effet, le moule doit avoir la forme d'une coquille de 1,3 mm ou 3,5 mm d'épaisseur suivant le procédé (Direct AIM™ ou Cuivre Polyamide). Il n'existe pas de fonctions simples sous CATIA qui permettent la génération d'une coquille lorsque certaines conditions géométriques ne sont pas remplies.

Il faut donc considérer les points suivants afin de répondre aux problèmes précédents :

- L'opération de «shell» vers l'intérieur (ex : -2 mm,0) nécessite une géométrie de pièce favorable, c'est à dire dont les rayons de courbures ne sont pas trop petits.
- L'opération de «shell» vers l'extérieur (ex : 0,3,5 mm) ne nécessite pas de géométrie particulière sauf dans le cas de cavité.

- Toutes les formes spécifiques peuvent subir une opération de «shell» vers l'extérieur avant d'être additionnées à la coque.

La démarche suivante a donc dû être adoptée :

1. Génération des formes de base de la pièce finie (éléments spécifiques : cylindres et parallélépipèdes) ajout des angles de dépouille.
2. Duplication de chaque forme et opération de «shell» extérieur matière de 3,5 mm.
3. Génération des formes de base de l'insert et de la coque de la pièce, ajout des angles de dépouille.
4. Opération de «shell» sur l'insert vers l'intérieur de la pièce de 3,5 mm.
5. Addition des «shell» de l'insert et des «shell» des éléments spécifiques.
6. Soustraction des éléments spécifiques.
7. Soustraction de la coquille extérieure.
8. Ajout des congés de raccordement sur les parties extérieures et intérieures de l'insert.

La figure suivante (Figure 2.17) présente un exemple de la démarche suivie pour la création d'un cylindre de positionnement

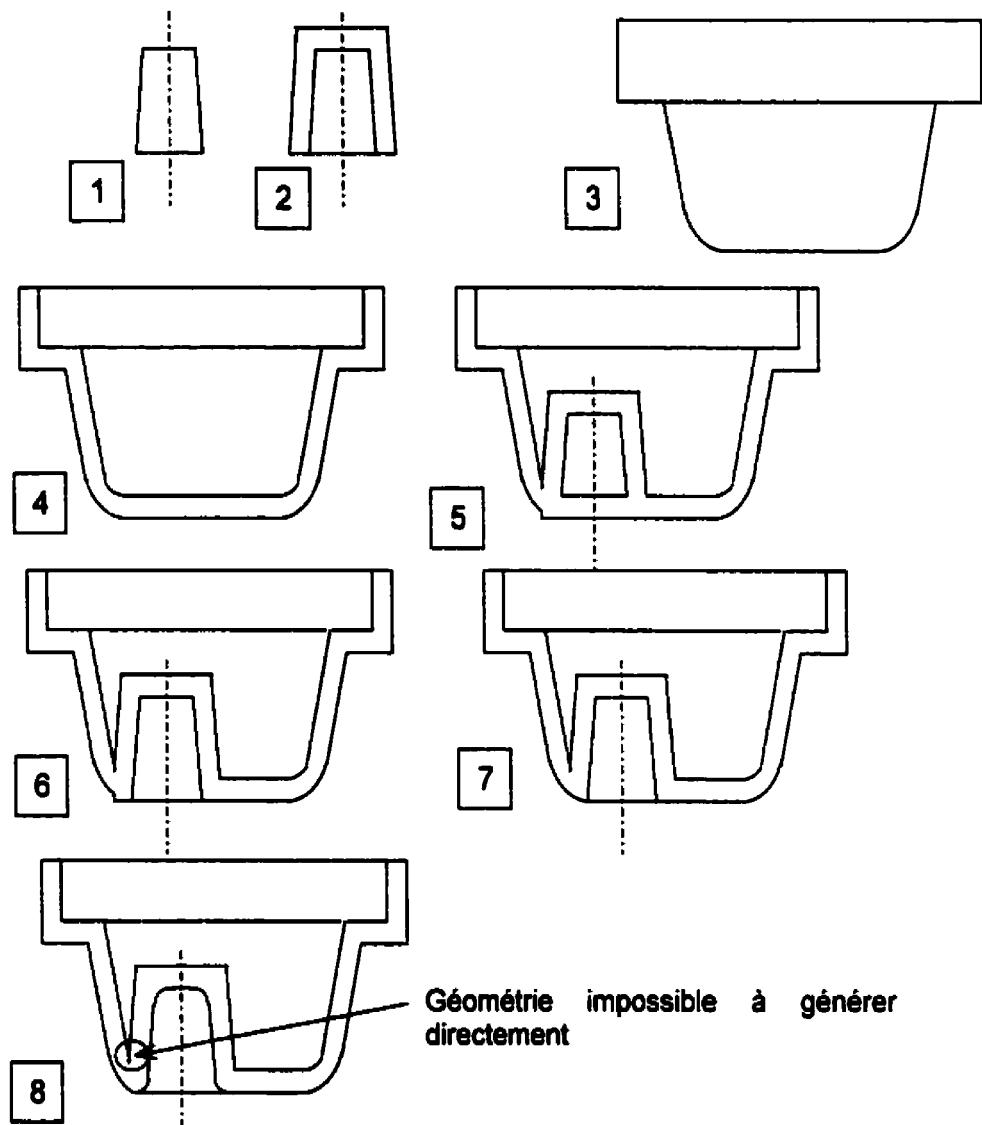


Figure 2.17 Exemple de création d'une entité cylindrique dans un moule

Cette démarche est longue et laborieuse. Rappelons qu'elle nous est imposée par la forme de coquille des inserts Direct AIM™ et Cuivre Polyamide. Pour le procédé RapidSteel® 2.0, en revanche, une géométrie pleine est nécessaire : la conception est alors beaucoup plus simple et rapide.

2.3.2 Habilage de l'insert

Les opérations d'habillage diffèrent suivant les technologies utilisées. Pour chacun des éléments, on indique les paramètres utilisés pour chacune des technologies. Une fois la géométrie principale de l'insert réalisée, il convient d'ajouter les éléments suivants :

- tiges d'éjection
- canal d'alimentation
- seuil d'injection
- ergots de positionnement des deux faces de l'insert
- système de refroidissement
- nervures arrières de renfort

Le schéma suivant (Figure 2.18) montre l'insert issu du procédé Cuivre Polyamide. On peut observer les différents éléments d'habillage.

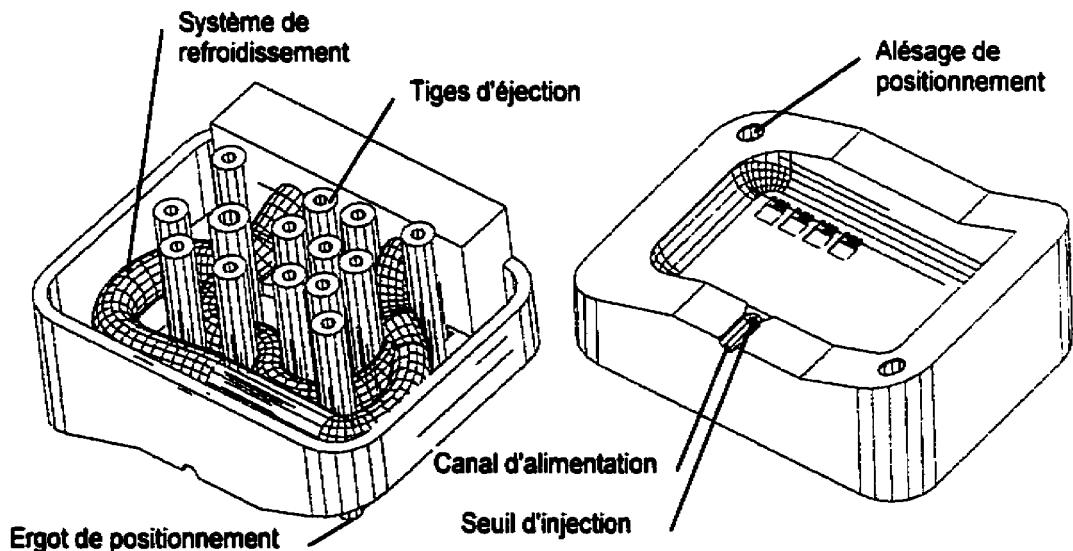


Figure 2.18 Éléments d'habillage pour l'insert issu du procédé Cuivre Polyamide

Le diagramme suivant (Figure 2.19) permet de comparer les trois procédés en fonction de leurs éléments d'habillage.

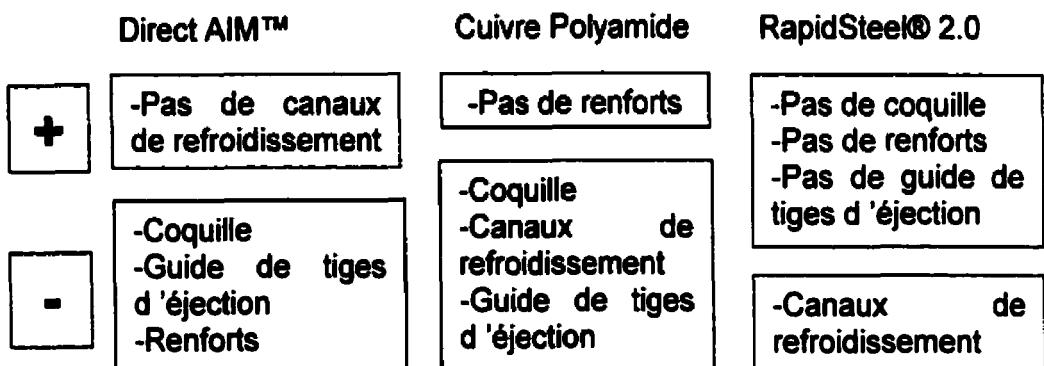


Figure 2.19 Diagramme comparatif des procédés en fonction des paramètres d'habillage

2.3.2.1 Tiges d'éjection

Dans le cas des inserts d'outillage rapide, le nombre de tiges d'éjection est 30 à 40% plus important que dans le cas d'un moule conventionnel en acier P20. L'insert est plus fragile et la pièce doit donc être poussée en plus de points pour éviter que dû au retrait elle ne compresse trop fortement l'insert et ne l'endommage. L'état de surface des inserts est souvent inférieur aux moules conventionnels, par conséquent, la matière plastique adhère beaucoup plus aux inserts de moule issus de l'outillage rapide.

Les diamètres choisis pour les tiges d'éjection sont les suivants:

- 3,175 mm (1/8") pour les 13 tiges principales, communes aux trois technologies.

- 7,763 mm (3/16") pour les tiges des cylindres principaux des inserts en Cuivre Polyamide et RapidSteel® 2.0.
- 7,144 mm (9/32") pour la tige du cylindre principal correspondant à l'insert Direct AIM™.

Le choix de ces dimensions correspond à un compromis entre l'encombrement de l'espace d'habillage des inserts et un diamètre minimum pour assurer une éjection aisée de la pièce.

2.3.2.2 Canaux de refroidissement

Le refroidissement des inserts de moule provenant des technologies d'outillage rapide est sans aucun doute un facteur prédominant lors de conception de la géométrie de base. Le temps de vie de ces inserts dépendra majoritairement de l'efficacité du refroidissement. Cet aspect est d'autant plus important pour les inserts Direct AIM™ et Cuivre Polyamide. Par contre, comme expliqué précédemment, dans le cas des inserts en époxy, les canaux sont simplement ajoutés sous forme de tuyaux de cuivre.

2.3.2.3 Canal et seuil d'alimentation

Le canal d'alimentation est cylindrique de diamètre 4,76 mm (3/32"). Le seuil d'alimentation est du type latéral. Ce type de seuil d'injection convient à tous les matériaux, est facile à usiner et à modifier. Par contre, il peut laisser des marques visibles sur la pièce [14].

$0,5mm \leq L \leq 0,75mm$ L doit être le plus court possible pour minimiser la perte de charge. Nous avons donc choisi $L = 0,5mm$

$h = nr$ avec r : épaisseur moyenne des parois de la pièce.

et $0,6 \leq n \leq 0,8$ pour des matériaux allant du polyéthylène au nylon.

Nous avons choisi $t = 2\text{mm}$ et $n = 0,7$ d'où $h = 1,4\text{mm}$

De plus, $W = \frac{0,7\sqrt{A}}{30}$ avec A : surface développée

$A = 9459\text{mm}^2$ d'où $W = 2.269\text{mm}$

Finalement, $h_2 = \frac{Wh_1}{D}$ où D : diamètre du canal d'injection

$$h_2 = 0,635\text{mm}$$

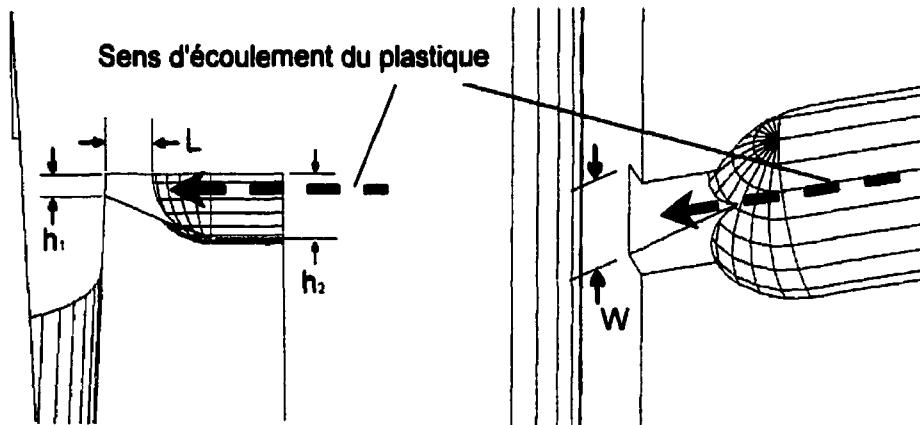


Figure 2.20 Paramètres du seuil d'injection

2.3.2.4 Ergots de positionnement

Pour ajuster le positionnement des faces de l'insert, il est nécessaire de créer des ergots de positionnement :

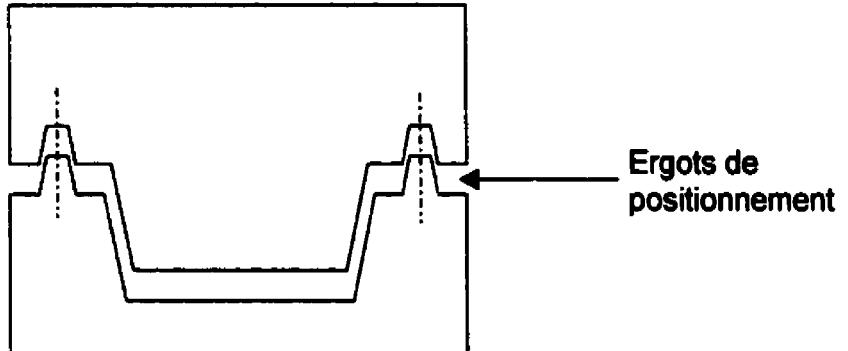


Figure 2.21 Ergots de positionnement

Voici les paramètres géométriques (Figure 2.22) des ergots de positionnement.

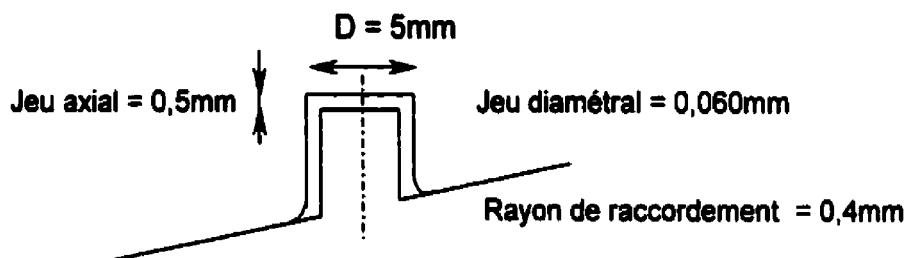


Figure 2.22 Paramètres géométriques des ergots de positionnement

2.3.2.5 Système de refroidissement

Grâce aux technologies de prototypage rapide, il est possible d'inclure le système de refroidissement directement lors de l'étape de CAO. Le principal avantage de cette méthode est de pouvoir rapprocher les canaux de refroidissement des parois en contact avec la pièce plastique ainsi que de pouvoir optimiser l'échange de chaleur entre la pièce et les canaux dû à un meilleur positionnement des canaux dans l'insert. On se rapproche ainsi d'un refroidissement conforme [15]. Les principales caractéristiques visées par le refroidissement conforme sont le contrôle des contraintes résiduelles, le retrait du plastique suite à l'injection et les déformations des entités géométriques. Le

refroidissement conforme signifie également que la température moyenne du cycle d'injection est atteinte dès la première injection. On conçoit que plus de 80% du temps de moulage est consommé par le refroidissement alors que seulement 20% de ce temps sert réellement à l'injection. Il est donc très important de consacrer un plus grand effort au refroidissement. Le refroidissement conforme doit permettre de diminuer le temps de cycle complet et par conséquent les coûts de la pièce finale.

Sur le graphique suivant (Figure 2.23), on peut voir deux profils de température à la surface d'un moule au cours de plusieurs injections [15]. On comprend bien que dans le cas d'une injection non conforme, la température varie au cours des premiers cycles pour n'atteindre une valeur stable qu'après plusieurs cycles ou un temps déterminé. L'évolution de la température au cours des diverses injections se répercute par des variations des propriétés mécaniques et dimensionnelles de la pièce plastique finale.

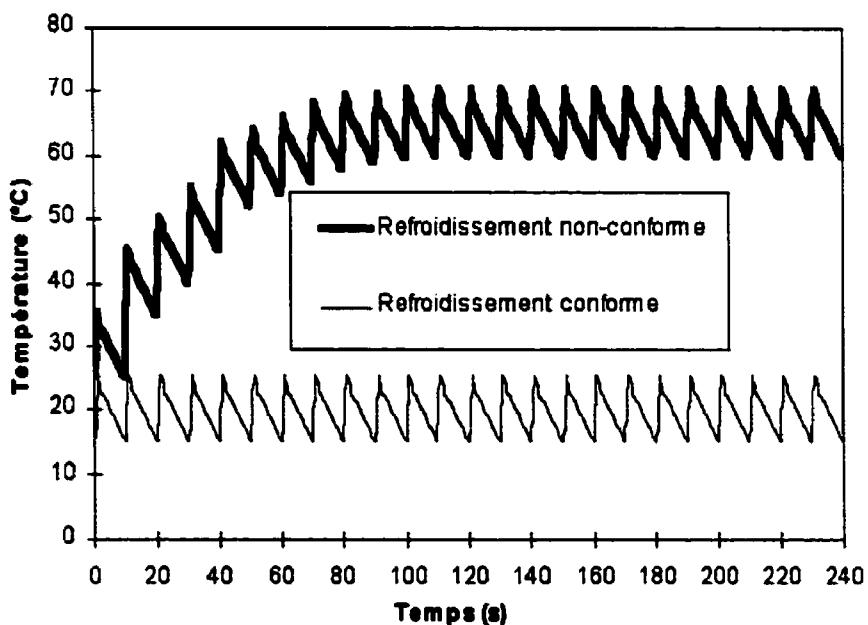


Figure 2.23 Évolution de la température en fonction du temps

La différence entre les deux courbes présentées provient du taux de transfert d'énergie au moule au cours des injections ainsi que de l'inertie thermique du moule. Lorsque le plastique chaud rentre en contact avec le moule au cours de la phase d'injection, il transfert de l'énergie à l'interface des deux qui réchauffera tranquillement le moule. Cette montée soudaine de la température au début de chaque injection sera évacuée partiellement par les canaux de refroidissement. Si les canaux de refroidissement se trouvent loin de la surface du moule, le sommet de ces montées en température feront augmenter la température global du moule jusqu'à ce qu'il y ait un équilibre entre la quantité d'énergie fournie par le plastique et l'énergie évacuée par les canaux de refroidissement. Si ceux-ci se trouvent proche de l'interface moule-plastique, la masse thermique effective de l'outil est confinée à la région comprise entre la surface extérieure et le canal de refroidissement. L'état de stabilité thermique est donc atteint plus rapidement et peut même être atteint dès le premier cycle d'injection.

Dans le cas des inserts en époxy, la flexibilité moyenne des tubes de cuivre et l'encombrement dans l'insert de moule ne permettent pas une optimisation de l'emplacement des canaux de refroidissement.

La longueur et le diamètre des canaux de refroidissement doivent permettre d'évacuer la chaleur apportée à l'insert de moule lors de l'injection.

Lors du premier et second essai d'injection, la position ainsi que le diamètre des canaux d'injection utilisés relevèrent d'une approximation. Notons que les diamètres des canaux de refroidissement sont limités pour des raisons d'encombrement. En effet, il est nécessaire de faire passer les canaux entre les guides de tiges d'éjection.

Les diamètres intérieurs pour les canaux de refroidissement ont donc été de:

- 3,7 mm pour le tuyau de cuivre utilisé pour l'insert Direct AIM™
- 4,1 mm pour l'insert Cuivre Polyamide (surépaisseur de 2,5 mm pour le diamètre extérieur)
- 6,1 mm pour l'insert en RapidSteel® 2.0.

Pour l'élaboration du canal de refroidissement utilisé lors du troisième essai d'injection un calcul d'échange de chaleur entre le moule et la pièce plastique a été effectué. Ce calcul du diamètre des canaux ainsi que du positionnement est basé sur la dissipation de la quantité de chaleur amenée par le plastique lors de l'injection au travers de l'insert ainsi que sur un calcul de perte de charge du liquide de refroidissement dans les canaux. Ce calcul n'a été effectué que pour les inserts en RapidSteel® 2.0 .

Le calcul de dissipation thermique est basé principalement sur l'équation suivante [15]:

$$(1) \rho_m C_m l_m \frac{dT_m}{dt} + \frac{h\pi D K_m}{2K_m W + h\pi D l_m} (T_m + T_{liq.}) = \frac{\rho_p C_p l_p (T_{inj.} - T_{eject.})}{t_{cycle}}$$

Le premier terme de l'équation (1) comprend la masse thermique de l'outil ainsi que le taux de variation de la température en fonction du temps. Le second terme considère le transfert de chaleur par conduction au travers du moule et par convection dans le liquide de refroidissement. Le membre de droite de l'équation présente la source de chaleur qui correspond au refroidissement du plastique.

Ces calculs ont permis de trouver les paramètres suivants:

$D_{calc.} = 5,8\text{mm}$: diamètre du canal

$l_{m,calc.} = 7,32\text{mm}$: distance entre les canaux et l'empreinte du moule

Pour des raisons de commodité d'usinage et de modélisation, les paramètres suivants ont été utilisés lors de la fabrication des moules:

$D_{real} = 6,35\text{mm}$

$l_{m,real} = 6,35\text{mm}$

L'annexe I présente le détail sur les calculs effectués.

Le calcul de perte de charge quant à lui se base sur les équations suivantes:

$$(2) \Delta P = \frac{8Q\eta L}{\pi R^4} \Rightarrow \Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_i \Rightarrow \frac{L_1}{R_1^4} = \frac{L_2}{R_2^4} = \frac{L_i}{R_i^4}$$

Loi d'écoulement d'un fluide newtonien dans un cylindre.

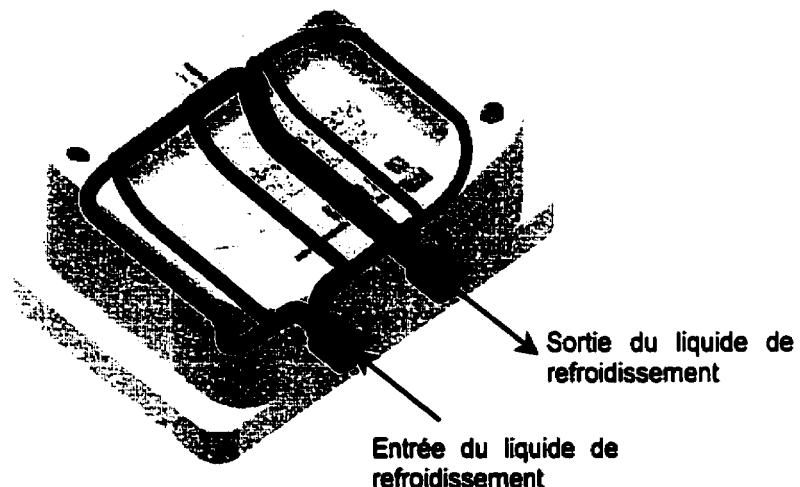
$$(3) S_{Total} = \sum S_i \Rightarrow R_{Total}^2 = \sum R_i^2$$

Loi de conservation du volume d'eau dans chacun des canaux.

Ces trois équations ont permis de déterminer les paramètres géométriques (diamètre et positionnement) des canaux de refroidissement dans la partie matrice des inserts. L'encombrement dû aux guides des tiges d'éjection ne permet pas d'optimiser le positionnement des canaux de refroidissement dans la partie poinçon. Seul le diamètre de ceux-ci sera optimal.

L'annexe II présente les calculs nécessaires à l'obtention des diamètres des canaux de refroidissement.

La figure ci-dessous (Figure 2.24) représente les canaux de refroidissement pour la partie matrice des inserts. On apprécie ainsi la complexité géométrique des canaux de refroidissement qui peuvent être fabriqués sur les technologies d'outillage rapide.



2.3.2.6 Nervures arrières de renfort

Les nervures de renforts sont construites pour l'insert Direct AIM™. L'épaisseur des nervures de renfort est de 2 mm, leur écartement moyen est de 20 mm. Elles sont disposées selon les axes X et Y. Leur rôle est d'empêcher la déformation de l'insert lors de l'opération d'injection ainsi que dans l'opération de remplissage arrière. Les renforts permettront également une meilleure adhérence de l'alliage étain-bismuth dans l'insert de moule.

2.4 Élaboration des inserts en prototypage rapide

Une préparation informatique est tout d'abord nécessaire avant de pouvoir débuter la fabrication des inserts sur les machines de prototypage rapide.

2.4.1 Préparation du fichier électronique

2.4.1.1 Le fichier STL

À l'aide du module STL du logiciel CAO CATIA, le modèle tridimensionnel virtuel peut être représenté par un maillage de triangles. Cette représentation permet d'obtenir un format d'échange standard qui sera interprété par n'importe quelle technologie de prototypage rapide. L'avantage incontesté de ce type de fichier est sa grande transportabilité, par contre, le modèle électronique ne possède plus de relations topologiques, mais uniquement un assemblage de triangles. Par conséquent, le modèle ne peut plus subir de modifications importantes.

Les paramètres de discrétisation choisis pour la création du fichier STL sont les suivants:

- dimension maximale des triangles: 10 mm
- erreur de corde: 0,001 mm

Les paramètres ci-dessus permettent une discrétisation numérique bien supérieure à la précision des machines de prototypage rapide.

2.4.1.2 Le découpage en tranches

Pour générer les trajectoires du laser dans un plan, les machines effectuent une opération de découpage informatique du fichier stl appelée «Slicing» (découpage en tranches).

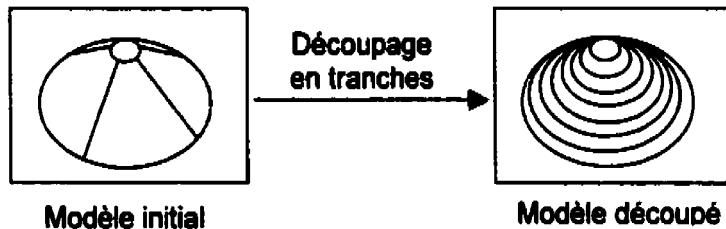


Figure 2.25 Représentation du découpage en tranches

Pour la machine SLA, ce découpage est effectué en pré-traitement sur une station Silicon Graphics. Les structures de supports ainsi que les paramètres inhérents au procédé sont ajoutés à cette étape (puissance laser, hauteur des couches, etc.) à l'aide du logiciel Maestro de 3D Systems. Le fichier de tranches est ensuite envoyé à l'unité de contrôle de la machine. Après avoir rentré les paramètres de fonctionnement (facteur d'échelle, nombre de pièces, etc.), la machine est prête à fonctionner.

Pour la machine SLS, seule une mise en position et une vérification du fichier est nécessaire : l'unité de contrôle de la SLS effectue l'opération de découpage en tranches en temps réel. Une fois le fichier transféré, les paramètres de réglage sont donnés au contrôleur qui est alors prêt à fonctionner.

2.4.2 Fabrication par prototypage rapide

L'élaboration des inserts est effectuée par les machines de prototypage rapide. L'insert Direct AIM™ est réalisé avec la SLA et les inserts de Cuivre Polyamide et RapidSteel® 2.0 avec la SLS. Aucune attention particulière n'est nécessaire pour l'obtention des inserts par rapport à la fabrication de pièces prototypes usuelles. Les technologies de prototypage rapide permettent donc de réaliser les inserts dans des temps variables en fonction du matériau utilisé ainsi que de la technologie correspondante. Les coûts ainsi que les temps de fabrication associés à la réalisation des inserts seront présentés plus loin au cours de ce rapport.

2.4.3 Post traitement des inserts

Le post traitement intervient à partir des pièces issues du prototypage rapide. Les divers stades constituant cette étape seront distingués en fonction de la technologie utilisée.

2.4.3.1 Direct AIM™

Cette technologie possède le post traitement le plus simple. La résine liquide doit être évacuée des cavités de la pièce. Ensuite la polymérisation de la résine est achevée dans un four à ultraviolets pendant une période d'environ 90 minutes. Les structures de support sont alors retirées à l'aide de petits outils. Contrairement aux pièces prototypes usuelles, le polissage des zones en contact avec les structures de support n'est pas nécessaire car la partie de l'insert en contact avec la pièce injectée est orientée vers le haut.

La durée de la finition est d'environ 1 à 2 heures.

2.4.3.2 Cuivre Polyamide

Le post traitement nécessite un nettoyage de la poudre libre dans la pièce en utilisant de l'air comprimé. Pour accéder aux parties difficiles de la pièce, un compresseur à air doté d'un embout flexible capable de pénétrer dans les guides de tiges d'éjection a été utilisé. Par ailleurs, la partie délicate du travail consiste à déboucher les canaux de refroidissement. L'adhérence de la poudre sur les parois internes des canaux empêche d'utiliser efficacement l'air comprimé. Plusieurs heures sont nécessaires au nettoyage de ces canaux. Le temps de nettoyage dépend de la complexité de la géométrie des canaux de refroidissement.

La durée de finition est d'environ une journée.

2.4.3.3 RapidSteel® 2.0

L'étape de post traitement des inserts en RapidSteel® 2.0 est certainement la plus longue des trois technologies étudiées.

La première étape consiste à départir la pièce de la poudre libre inutilisée. Cette opération est beaucoup plus délicate que pour la technologie Cuivre Polyamide car la pièce est très fragile. Cependant la poudre étant beaucoup plus fine, il est plus facile de déboucher les canaux de refroidissement.

Deux cycles de fournaise d'environ 24 heures sont nécessaires pour réaliser l'infiltration de bronze. Lors du premier cycle, le polymère sera évacué. Le second cycle permet d'infiltrer la pièce à l'aide de lingots de bronze.

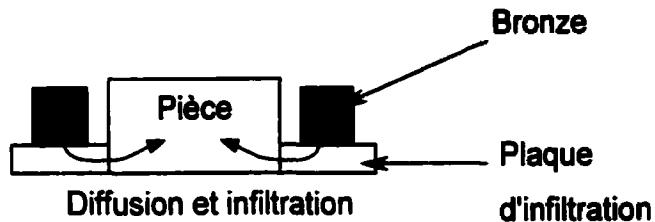


Figure 2.26 Processus d'infiltration par capillarité

L'infiltration s'effectue en mettant l'insert en contact avec des plaques sur lesquelles sont posés des lingots de bronze (Figure 2.26). Le dosage du bronze s'effectue en ajoutant 85% du poids total en bronze.

Composition de la pièce finale: massique: 46% bronze et 54% acier inoxydable
volumique: 50% bronze et 50% acier inoxydable

On retrouve moins de 1% de porosités dans la pièce.

Le délai complet pour ce traitement est de 2 à 3 jours.

2.5 Assemblage du moule

La base de moule est constituée de différentes plaques d'acier. Elle doit assurer la mise en position des inserts. Elle guide les tiges d'éjection et permet leur déplacement. Le moule contient aussi les canaux d'alimentation et doit permettre l'introduction des canalisations de refroidissement.

2.5.1 Usinage de la base de moule

La base de moule a été usinée à l'atelier central de l'École Polytechnique de Montréal sur la fraiseuse Matsuura 5 axes. Cette opération a été effectuée en parallèle (temps caché) avec le post traitement des inserts RapidSteel® 2.0.

2.5.2 Plan des inserts

Les plans des inserts doivent préciser la position de toutes les entités nécessaires pour l'usinage de la base de moule. Voici les éléments de référence :

- Les surfaces latérales des inserts
- Les canaux d'alimentation
- Les canaux de refroidissement
- La position et le diamètre des tiges d'éjection.

L'ensemble des plans nécessaires à l'usinage de la base de moule est disponible à l'annexe III.

2.5.3 Les usinages réalisés

- Cavités 76,2 mm x 101,6 mm x 25,4 mm (3" x 4" x 1")
- Canaux d'alimentation de diamètre 4,76 mm (3/16")
- Support des tiges d'éjection
- Évents
- Système d'obstruction des canaux d'alimentation non-utilisés
-

2.5.4 Connexion des canaux de refroidissement

Ces rallonges sont nécessaires pour permettre la connexion des canaux de refroidissement des inserts Cuivre Polyamide et RapidSteel®2.0 avec les tuyaux émanant du système propre à la presse à injection (Figure 2.27). Les rallonges se placent dans des alésages de la plaque principale du moule. Elles sont

réalisées en tournage. Le matériau est du laiton pour des questions de facilité d'usinage ainsi que de disponibilité.

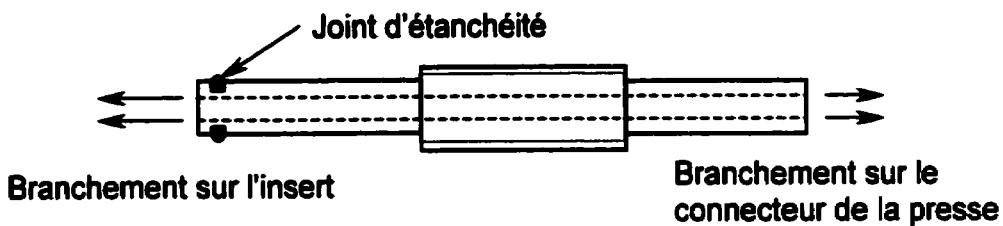


Figure 2.27 Rallonge de connexion

2.6 Positionnement des inserts

2.6.1 L'assemblage dans les cavités

De façon à obtenir une insertion très précise des inserts dans la base de moule, il est nécessaire d'usiner les parois latérales des inserts. Cet usinage permettra un positionnement très précis des inserts.

Pour l'insert Direct AIM™, il est nécessaire de positionner manuellement les tuyaux de refroidissement. Les tuyaux utilisés sont en cuivre, leur diamètre intérieur est de 3,7 mm et le diamètre extérieur de 6,3 mm.

2.6.2 Remplissage arrière

L'opération de remplissage arrière, appelé «Back-filling», permet de remplir l'arrière de la coquille des inserts Direct AIM™ et Cuivre Polyamide. Le matériau utilisé est un métal liquide composé de 58% d'étain et 42% de bismuth. Le matériau est commercialisé sous le nom MetSpec 281. (température de fusion = 281°F).

Les inserts sont mis en place dans la base de moule. On coule le matériau chauffé à une température de 160°C directement dans les inserts Cuivre Polyamide et Direct AIM™. Pour l'insert Direct AIM™, il est important de souligner l'importance de bien positionner le tuyau de refroidissement : il ne doit pas dépasser de la surface arrière.

Le surfaçage du plan arrière permet ensuite d'éliminer la surépaisseur de la coulée et d'obtenir ainsi un contact planaire avec la plaque arrière de la base de moule.

2.7 Essais d'injection

Les essais sont effectués à l'École Polytechnique de Montréal avec le matériel du CRASP (Centre de Recherche Appliquée Sur les Polymères). La presse à injection possède les caractéristiques suivantes :

Marque : Battenfeld

Modèle : 80 Tonnes

Surface frontale : 1000 cm².

Diamètre du verrin: 152,4 mm (6"). Diamètre de la vis: 304,8 mm (12").

Contrôleur : Allen Bradley

2.7.1 Le contrôle de l'injection

2.7.1.1 Les paramètres

Le contrôleur de la presse permet de fixer les paramètres du cycle d'injection :

- La pression d'injection
- La vitesse de la vis

- La température du polymère au sein de la vis
- La pression de maintien
- La durée du maintien
- La durée de refroidissement
- La vitesse et la force des tiges lors de l'éjection

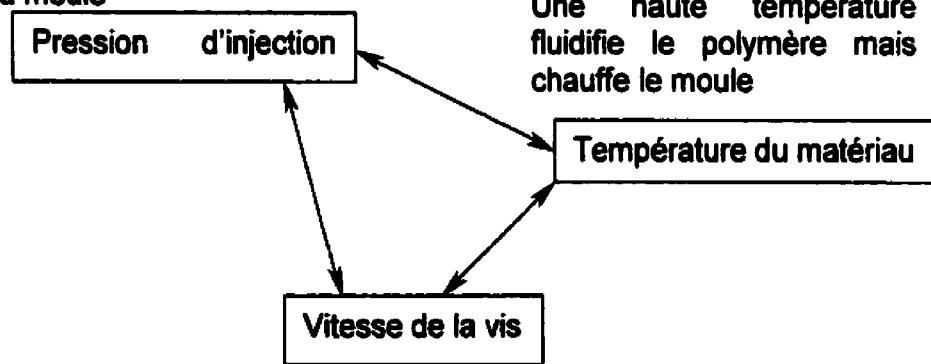
Il est important de noter que lors des essais, le contrôleur n'était pas parfaitement opérationnel, ce qui empêcha une maîtrise rigoureuse de ces paramètres.

2.7.1.2 Le cycle

Le cycle d'injection d'un polymère se compose de trois phases principales :

a. L'injection proprement dite au cours de laquelle la matière chaude pénètre dans le moule. Sa durée est d'environ 0,3 seconde. Cette phase est déterminée par la pression maximale, la vitesse de vis et la température du matériau. Le diagramme suivant (Figure 2.28) montre l'interdépendance de ces paramètres.

Une haute pression facilite l'écoulement du polymère mais augmente les efforts sur les parois du moule



Une haute température fluidifie le polymère mais chauffe le moule

Une faible vitesse d'écoulement peut permettre au polymère de se figer avant d'avoir rempli toute la pièce, d'où une injection partielle.

Figure 2.28 Interdépendance des paramètres d'injection

b. Le refroidissement qui permet au polymère de changer d'état et d'atteindre progressivement la température de démolage. On peut maintenir une certaine pression au début du refroidissement, cette pression est appelée pression de maintien (ou pression de compactage), elle permet de compléter l'injection lors du retrait de la matière (Figure 2.29). Communément la pression de maintien vaut 30% de la pression d'injection, et la durée de la phase de refroidissement varie de quelques secondes à plusieurs dizaines de secondes.

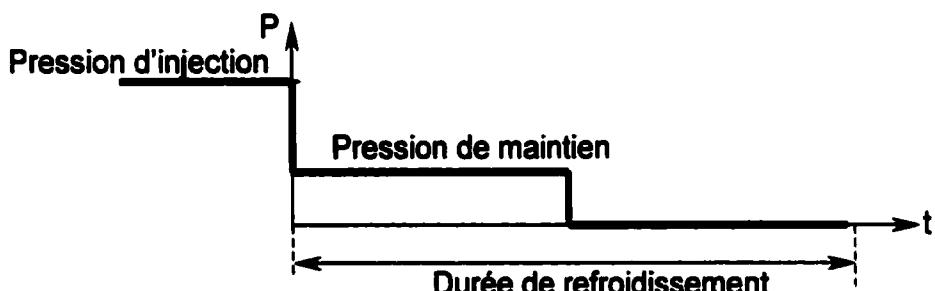


Figure 2.29 Cycle de pression

c. L'éjection qui permet de retirer la matière injectée. On retire la pièce et la carotte d'injection à l'aide des tiges d'éjection positionnées dans la partie mobile de la base de moule. Lors de cette phase, on contrôle la vitesse ainsi que la pression maximale des tiges d'éjection.

2.8 Déroulement des essais

Les matériaux utilisés sont divers. On retrouve un polypropylène, un polypropylène chargé de talc, un acétal, un polystyrène et un ABS. Le dosage initial du polymère s'effectue à partir du volume de matière à injecter. Nous avons choisi une valeur initiale de 30% du volume total de la pièce ($29,3 \text{ cm}^3$). Cette valeur correspond à une course de 10,16 mm (0.4") pour le piston qui contrôle le volume de matière.

Les températures d'injection varient entre 200°C et 230°C. Les pressions d'injection varient entre 1,37 MPa (200 psi) et 5,56 MPa (800 psi). Les débits d'injection varient entre 20 et 60 cm³/s. Les temps de cycle étaient inférieurs à une trentaine de secondes dépendamment de l'insert utilisé. Un agent démouleur à base de silicium a été utilisé pour faciliter l'éjection des pièces.

Toutes les pièces injectées ont été numérotées et la liste des paramètres choisis pour chaque pièce est disponible à l'annexe IV et ce, pour les trois séries de tests d'injection.

2.9 Conclusion

Dans cette partie du travail, les bases pour la création d'un insert fonctionnel issu des technologies de prototypage rapide ont été établies. Ces bases permettent de fixer les limites apparentes du domaine du design de l'outillage rapide. Il est maintenant possible d'évaluer l'ampleur du travail nécessaire, les différentes étapes ainsi que les difficultés que présentent ces nouveaux procédés. On conçoit que toutes les problématiques ne sont pas couvertes, mais qu'un premier dégrossissage a été effectué. On peut également apprécier une première grille d'évaluation des paramètres d'injection permettant ainsi l'utilisation de l'outillage rapide par les mouleurs sans crainte d'endommager le moule.

Deux technologies de prototypage rapide ont permis la création de trois procédés de fabrication rapide. Or, ces deux technologies permettent en réalité l'utilisation d'un beaucoup plus grand nombre de procédés. De plus, ces procédés peuvent être jumelés pour ainsi créer une très grande diversité de technologies permettant la création rapide d'outils.

Donner une forme à une matière n'est pas un travail compliqué. Donner la bonne forme est plus difficile et valider la conformité d'une pièce l'est davantage.

La suite du travail portera donc sur l'analyse dimensionnelle et géométrique des pièces plastiques issues des tests d'injection mais surtout sur les inserts qui ont servi d'outil.

CHAPITRE III

ANALYSE DES RÉSULTATS

Un des principaux buts de cette étude est de pouvoir déterminer le domaine d'application de trois technologies d'outillage rapide. Or, il est impossible de répondre à cette problématique sans pouvoir quantifier le domaine de dispersion dimensionnelle et géométrique des pièces plastiques finales. Les résultats obtenus suite à l'injection des pièces plastiques n'ont permis d'effectuer qu'une analyse sommaire pour les procédés Direct AIM™ et Cuivre Polyamide. La qualité des pièces obtenues par le procédé RapidSteel® 2.0 a permis quant à lui d'effectuer une étude plus approfondie. De plus ce procédé offre un potentiel plus élevé que les deux autres, les efforts ont donc été concentrés de façon à obtenir des résultats nouveaux dans ce domaine. Il n'existe à ce jour aucune étude publiée sur la dispersion dimensionnelle et géométrique du procédé RapidSteel® 2.0.

3.1 Analyse des pièces injectées pour les moules Direct AIM™ et Cuivre Polyamide

3.1.1 Analyse préliminaire

Les inserts réalisés ont permis l'injection de plusieurs pièces plastiques. Le tableau suivant (Tableau 3.1) présente le nombre de pièces qui ont été injectées dans chacun des moules ainsi que la pression maximale utilisée lors de l'injection.

Tableau 3.1 Pièces injectées en Direct AIM™ et Cuivre Polyamide

Technologie	Direct AIM™	Cuivre Polyamide
Nombre de pièces injectées	43	89
Pression maximale testée (PSI)	627	478
Pression de fissuration (PSI)	500	Non atteinte

La qualité des pièces obtenues par les procédés Direct AIM™ et Cuivre Polyamide n'a permis d'effectuer qu'une analyse sommaire. Il est tout de même possible de valider la méthode d'outillage rapide en constatant les principaux problèmes survenus lors de l'injection.

Voici les principaux problèmes rencontrés (Tableau 3.2) lors des essais d'injection pour les moules Direct AIM™ et Cuivre Polyamide.

Tableau 3.2 Problèmes rencontrés lors des essais d'injection (procédé Direct AIM™ et Cuivre Polyamide)

Problème	Description	Origine	Solutions proposées
Injection incomplète	• La matière ne se propage pas entièrement dans la cavité	• Pas assez de matière injectée	• Augmenter le dosage • Augmenter la pression de maintien • Augmenter la vitesse d'injection • Augmenter la température
Usure du moule	• L'usure se manifeste par bris, fissuration ou érosion du moule	• La matière chaude sous pression engendre des contraintes mécaniques ou thermiques importantes pour l'insert	• Diminuer la pression d'injection • Fluidifier le polymère en augmentant sa température • Changer le matériau d'injection

Problème	Description	Origine	Solutions proposées
Adhérence de la pièce aux parois du moule	<ul style="list-style-type: none"> Difficultés importantes pour éjecter la pièce Les tiges d'éjection transpercent la pièce 	<ul style="list-style-type: none"> Les angles de dépouille sont suffisants (3°), mais le mauvais état de surface de l'insert est la cause de cette adhérence 	<ul style="list-style-type: none"> Application d'un agent démolisseur à base de silicone Polissage de l'insert
CHAPITRE V : « FLASHING »	<ul style="list-style-type: none"> La matière injectée s'échappe par le plan de joint 	<ul style="list-style-type: none"> La pression d'injection permet à la matière de s'échapper par le jour du plan de joint 	<ul style="list-style-type: none"> Augmenter la pression de fermeture pour déformer l'insert et assurer une meilleure étanchéité Baisser la pression d'injection Améliorer la surface du plan de joint par usinage ou polissage
Fonctionnement de la presse	<ul style="list-style-type: none"> Problèmes d'injection inhérents à la machine se traduisant par un mauvais contrôle de l'injection 	<ul style="list-style-type: none"> La machine n'est pas au point à 100%. 	<ul style="list-style-type: none"> Appeler le technicien

3.1.2 Analyse dimensionnelle

Pour analyser les pièces, un lot des meilleures pièces de chaque technologie (meilleures au sens où l'injection est la plus complète) a été choisi.

Voici les échantillons choisis (Tableau 3.3):

Tableau 3.3 Échantillon de pièces analysées

Direct AIM™	5 pièces	Numéros	27,31,35,37,42
Cuivre Polyamide	8 pièces	Numéros	46,54,57,61,66,67,74,84

L'état de surface des moules fabriqués pour la première série de test d'injection n'était pas d'une qualité suffisante pour obtenir une éjection aisée des pièces résultant ainsi en une déformation de la pièce. Cette déformation rend difficile une analyse dimensionnelle complète et précise. De plus, la presse à injection ne possédait pas les réglages nécessaires à un bon contrôle du processus d'injection. Il aura donc fallu utiliser un critère d'évaluation non-conventionnel afin de pouvoir analyser la précision dimensionnelle des pièces. L'analyse présentée ci-dessous (Tableau 3.4) n'a été utilisée que pour les technologies Direct AIM™ et Cuivre Polyamide. La mesure de la masse des pièces permet de déterminer facilement le taux global d'injection. Si les pièces injectées avaient été complètes, la mesure de la masse aurait permis d'évaluer par exemple, l'influence de la pression de maintien (pression de compactage) sur la densité de la pièce injectée. Or, dans notre cas, la masse de la pièce nous renseigne uniquement sur la quantité de matière injectée.

Tableau 3.4 Masse des pièces analysées

Direct AIM™	Masse (g)	Cuivre Polyamide	Masse (g)
27	13,9	46	17,7
31	16,4	54	17,8
35	19,3	57	18,1
37	19,1	61	18,1
42	16,7	66	16,8
Moyenne	17,08	67	17,0
		74	18,5
		84	18,7
		Moyenne	17,84

On remarque que la masse maximale est obtenue pour la technologie Direct AIM™.

Il est difficile de trouver des dimensions représentatives de la pièce étant donné les importantes déformations de ses surfaces. La hauteur des parois de la coque et d'autre part la hauteur du cylindre principal ont été choisies pour l'analyse. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un pied à coulisse. Les valeurs nominales sont de 22 mm pour la hauteur de paroi et de 15 mm pour la hauteur du cylindre. La répétabilité des mesures est de 0,025 mm.

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants (Tableau 3.5 et Tableau 3.6).

Tableau 3.5 Mesures des pièces Direct AIM™

Pièces Direct AIM™	Hauteur parois (mm)	Hauteur cylindres (mm)	Masse des pièces (g)
27	21,91	14,61	13,9
31	21,97	14,79	16,4
35	22,30	14,83	19,3
37	22,32	14,90	19,1
42	22,29	-	16,7
Moyennes	22,16	14,78	17,08

Tableau 3.6 Mesures des pièces Cuivre Polyamide

Cuivre Polyamide	Hauteur parois (mm)	Hauteur cylindres (mm)	Masse des pièces (g)
46	21,66	14,64	17,7
54	21,36	14,74	17,8
57	21,64	14,84	18,1
61	21,80	14,80	18,1
66	21,26	14,64	16,8
67	21,32	14,61	17,0
74	21,71	14,72	18,5
84	21,81	14,67	18,7
Moyennes	21,57	14,71	17,8

On constate que dans le cas du Cuivre Polyamide, les dimensions sont inférieures aux dimensions nominales. Par contre dans le cas du procédé Direct AIM™, la hauteur des parois dépasse de 0,32 mm la valeur nominale. Ces valeurs sont probablement dues à une usure de l'insert de moule ou à une erreur lors de la fabrication de ce même insert. Pour confirmer cette hypothèse, une analyse plus poussée de l'insert devrait être effectuée. Il est possible de calculer la précision de chaque technologie en calculant la différence entre la dimension mesurée maximale, qui correspond donc aux maximum de matière injectée, et la dimension nominale (Tableau 3.7). On suppose que plus la masse de la pièce est élevée plus le plastique aura épousé les formes nominales du moule.

Tableau 3.7 Précision dimensionnelle

Précision	Direct AIM™	Cuivre Polyamide
Hauteur paroi maximale (mm)	22,32	21,81
Hauteur cylindre maximale (mm)	14,90	14,84
Précision paroi (mm)	0,32	0,19
Précision cylindre (mm)	0,16	0,17

La précision dimensionnelle des procédés est donc comparable : elle est de l'ordre de 0,2 mm.

Cette analyse sommaire permet dans les circonstances de pouvoir apprécier la précision dimensionnelle des technologies Direct AIM™ et Cuivre Polyamide. Une étude beaucoup plus poussée est effectuée pour la technologie RapidSteel® 2.0.

3.2 Analyse dimensionnelle de la technologie RapidSteel® 2.0

Le procédé de fabrication RapidSteel® 2.0 permet l'obtention d'inserts métalliques rigides d'une qualité telle qu'il mérite une analyse dimensionnelle beaucoup plus rigoureuse et plus précise que les deux autres procédés mentionnés dans ce rapport. Par contre, avant de s'attaquer à une analyse poussée des pièces de plastique injectées, il est important de caractériser les inserts qui ont servi lors de l'injection. En effet, on comprend bien que la qualité des pièces dépend directement de la précision des inserts. Le transfert de la qualité dimensionnelle lors de l'injection tient par la suite de l'expérience du concepteur de moule ainsi que du mouleur. Ce travail se veut être une étude des domaines d'application des technologies d'outillage rapide aussi bien au niveau des caractéristiques géométriques que des tolérances dimensionnelles qui peuvent être appliquées mais, en aucun cas ne se veut être un guide de remplacement aux règles de l'art qui régissent le domaine de l'injection plastique. Par exemple, aucune compensation pour le retrait du plastique n'est effectuée sur le design. Le plan de joint, quant à lui, bien que justifié pour l'appréciation des difficultés d'usinage, ne possède aucune valeur justificative pour l'obtention d'une pièce de haute qualité.

L'analyse dimensionnelle est faite de façon séquentielle. C'est à dire que chacune des étapes sera validée par l'étape précédente. Ainsi, la première prise de mesures sera effectuée sur la pièce en acier avant son infiltration de bronze. La prise de mesure sur la pièce infiltrée pourra alors permettre d'analyser l'influence de la pénétration de bronze sur la précision dimensionnelle. De cette façon l'influence dimensionnelle de chacune des opérations du procédé pourra être appréciée.

Il faut bien comprendre qu'une analyse complète de tous les facteurs influençant la précision dimensionnelle serait trop longue et nécessiterait une étude plus approfondie. En effet, il existe une multitude de paramètres qui peuvent détériorer ou améliorer l'état de la précision dimensionnelle. Ces paramètres reliés aussi bien au procédé lui-même (épaisseur des couches, fournaise, manipulation, etc.) qu'à des conditions extérieures (finition manuelle, paramètres d'injection, etc.) possèdent chacun une influence directe ou non sur la géométrie finale. De plus, ces paramètres peuvent résulter en divers écarts entre la pièce finale et les dimensions nominales qu'il faut pouvoir analyser (défaut de forme, rectitude, perpendicularité, etc). Il faut pouvoir évaluer le domaine de précision dimensionnelle de ce nouveau matériau appliquée à un procédé de fabrication qui lui est propre.

3.2.1 Analyse préliminaire

Les inserts métalliques issus du procédé RapidSteel® 2.0 ont permis l'obtention d'un grand nombre de pièces. Le tableau suivant (Tableau 3.8) présente le nombre de pièces injectées ainsi que la pression d'injection maximale atteinte lors des trois essais effectués. La littérature indique qu'il est possible d'injecter plus de 100 000 pièces plastiques et jusqu'à 1 000 000 dans des conditions idéales. On retrouve à l'annexe IV la description complète des données recueillies lors des tests d'injection.

Tableau 3.8 Nombre de pièces injectées en RapidSteel® 2.0

Technologie	Série de tests effectués	RapidSteel® 2.0
Nombre de pièces injectées	1 ^{ère} série	124
	2 ^{ème} série	192
	3 ^{ème} série	100
Pression maximale testée (PSI)	1 ^{ère} série	807
	2 ^{ème} série	800
	3 ^{ème} série	900
Pression de fissuration (PSI)	1 ^{ère} série	Non atteinte
	2 ^{ème} série	Non atteinte
	3 ^{ème} série	Non atteinte

3.2.2 Analyse des inserts

Les inserts ont été analysés lors de deux différentes étapes de leur élaboration, suite à l'infiltration ainsi qu'après l'étape de polissage. Pour chacune de ces étapes, une série de points a été prise à l'aide d'une machine à mesurer les coordonnées (CMM). Ces valeurs ont par la suite été traitées à l'aide du logiciel de CFAO CATIA pour en faire ressortir les critères d'évaluation dimensionnelle.

3.2.2.1 Prise de mesures – machine à mesurer les coordonnées

La première étape nécessaire à l'analyse dimensionnelle est la prise de mesure. Étant donnée la forte complexité géométrique de la pièce à analyser, une machine à mesurer les coordonnées a été utilisée. Cette étape, bien qu'à priori simple, nécessite une attention particulière. En effet, il est très facile de faire l'erreur d'effectuer une analyse de la prise de mesures et non pas de la pièce elle-même. Le but de cette étape n'est pas de valider ou d'invalider la mesure. Il faut donc s'assurer d'avoir une bonne compréhension et un bon contrôle de la prise de mesures ainsi que de pouvoir évaluer la précision que l'on obtient grâce

à l'utilisation de certains appareils de mesures et lors de l'analyse des données recueillies. Une des sources d'erreurs que l'on retrouve souvent lors de l'utilisation d'une machine à mesurer les coordonnées est une mauvaise compensation du rayon du rubis [16].

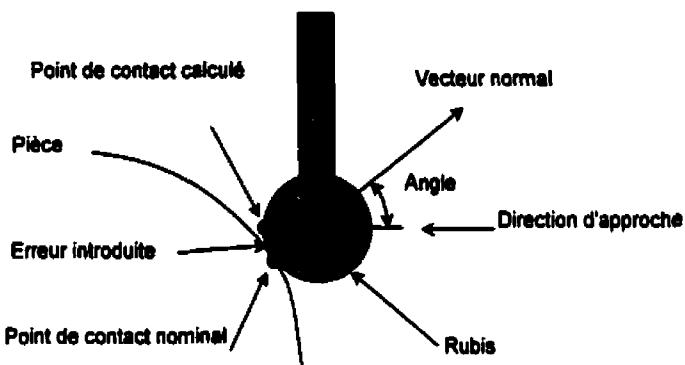


Figure 3.1 Compensation du rayon du rubis

Les algorithmes de compensation du diamètre du rubis vont, dans la plupart des cas, corriger la mesure dans l'axe le plus proche de la direction d'approche introduisant une erreur dont la norme varie en fonction de la géométrie de la pièce (Figure 3.1). Dans le cas de la pièce type que l'on souhaite analyser, la plupart des angles de dépouille varient entre 1° et 3° . L'erreur maximale engendrée par cette mauvaise compensation est de 0,0007 mm dans la direction d'approche et de 0,0262 mm dans la direction normale à la direction d'approche en utilisant un rubis de 1 mm de diamètre. La première de ces erreurs peut être considérée comme négligeable par rapport à l'erreur moyenne à laquelle on peut s'attendre avec le procédé RapidSteel® 2.0. La seconde erreur doit, quant à elle, être considérée tout au long de l'analyse. Hors, étant donné que les entités géométriques analysées au cours de ce travail sont des surfaces réglées, il est très facile de corriger cette erreur par une translation de

la surface dans la direction normale à la direction d'approche. Pour l'analyse des défauts de forme, cette translation n'est pas nécessaire.

3.2.2.2 Défaut de forme et analyse des surfaces planes

Une analyse complète et détaillée de toutes les formes d'imprécision dimensionnelle est longue et nécessiterait une analyse plus approfondie. Par conséquent, seul un certain nombre d'aspects dimensionnels seront étudiés. Le premier des aspects présenté est celui du défaut de forme. En effet, cette erreur est souvent oubliée dans les analyses conventionnelles ou simplement englobée dans d'autres types d'erreurs. De façon à pouvoir apprécier ce défaut, il aura fallu mettre en place la procédure suivante (Figure 3.2):

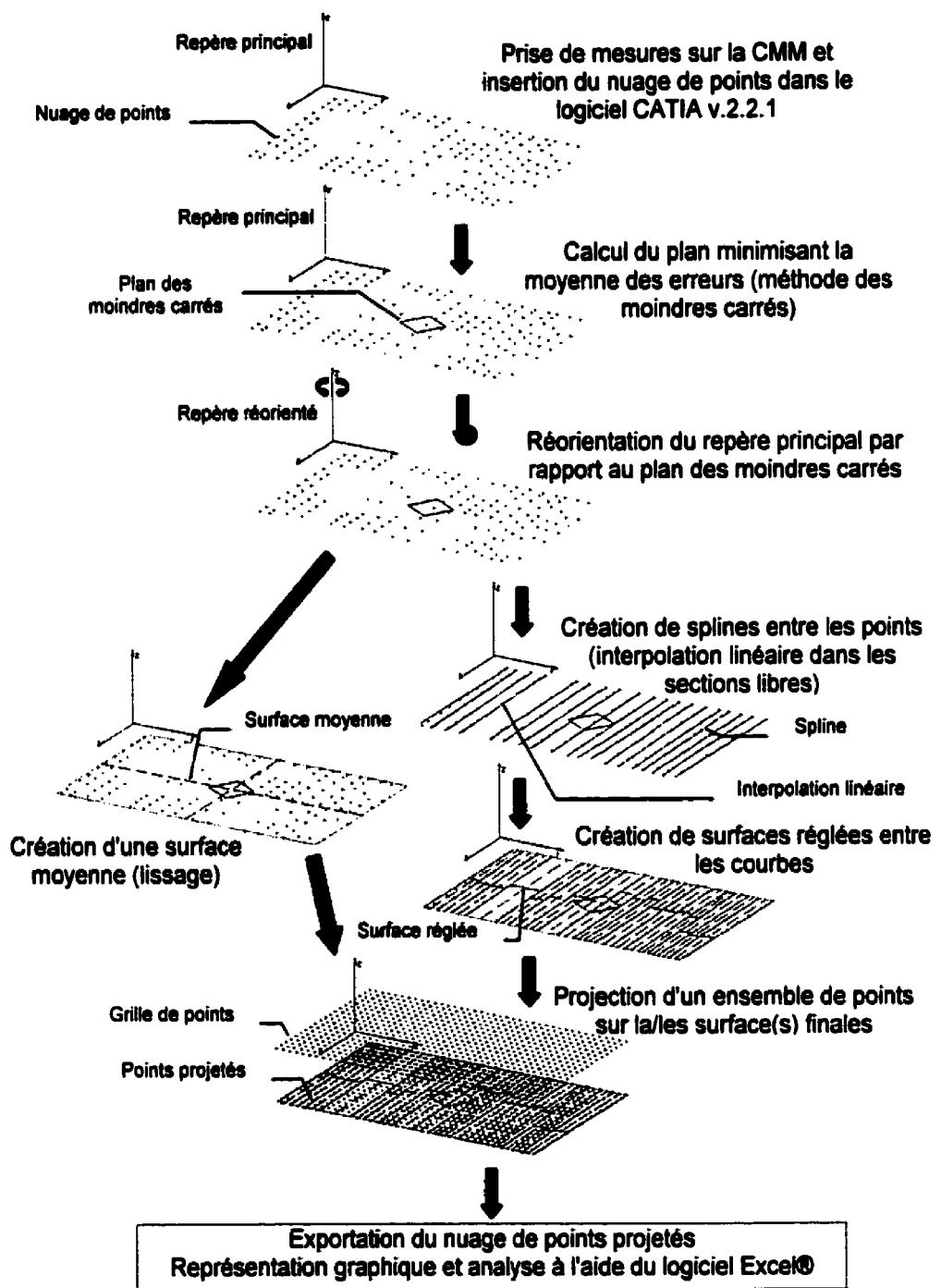


Figure 3.2 Procédure pour l'analyse du défaut de forme

Le but de cette analyse est de pouvoir estimer le défaut de forme d'une surface (Figure 3.3) à partir d'un nombre limité de points et ce, sans introduire une erreur supérieure à l'erreur provenant du défaut de forme. Une analyse issue de 800 points pourra être effectuée à partir d'environ une centaine de points, provenant d'une prise de données sur une CMM. Cette opération est faite de façon manuelle résultant ainsi en un nombre de points variables d'une analyse à l'autre. Afin d'évaluer si cette méthode est valable, il faut bien sûr comparer la forme de la surface finale à une surface moyenne issue des points de départ. De plus, une simple analyse statistique permettra également de confirmer la validité d'une telle analyse. Cette vérification sera présentée pour chacun des exemples qui suivent.

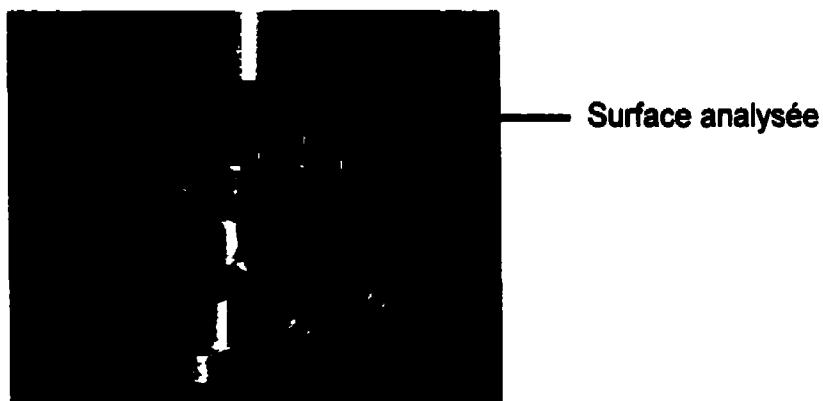


Figure 3.3 Surface analysée

Les figures suivantes (Figure 3.4 à Figure 3.6) présentent les résultats obtenus lors de l'analyse de la surface supérieure de la partie poinçon du moule avant et après l'étape de finition manuelle (Figure 3.3). Pour chacune des étapes montrées, on retrouve diverses représentations du défaut de forme. Les deux premières figures (Figure 3.4 et Figure 3.7) présentent une vue plane et tridimensionnelle d'une surface moyenne minimisant l'écart entre les valeurs extrêmes. Les deux autres graphiques (Figure 3.5 et Figure 3.6) montrent une représentation plus exacte de ce même défaut de forme en utilisant la méthode

explicitée ci-haut. En dessous des graphiques, la valeur maximale, minimale et l'écart-type sont inscrits (Tableau 3.9). Ces valeurs nous permettent d'évaluer de façon plus quantifiable le défaut de forme ainsi que de donner une valeur de planéité à cette surface.

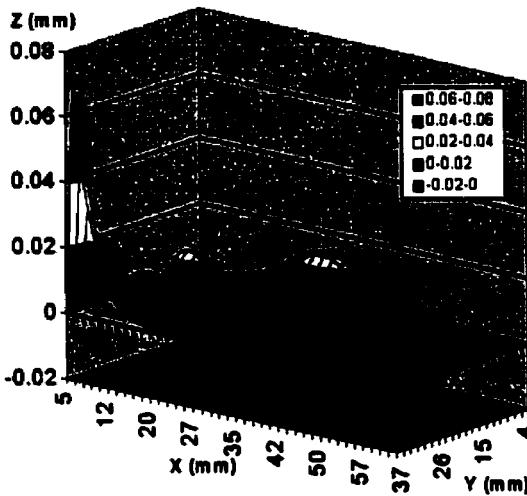


Figure 3.4 Vue 3D de la surface lissée

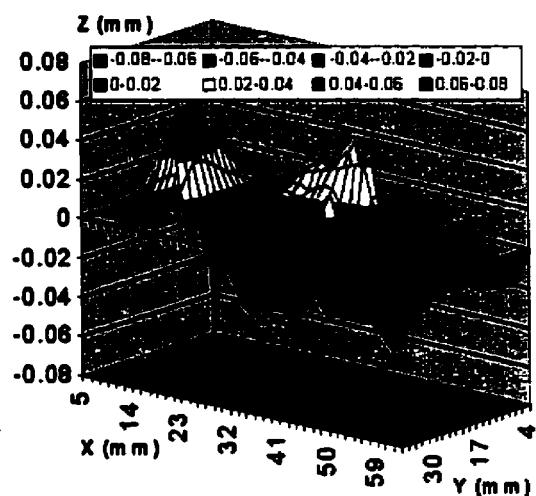


Figure 3.5 Vue 3D de la surface calculée

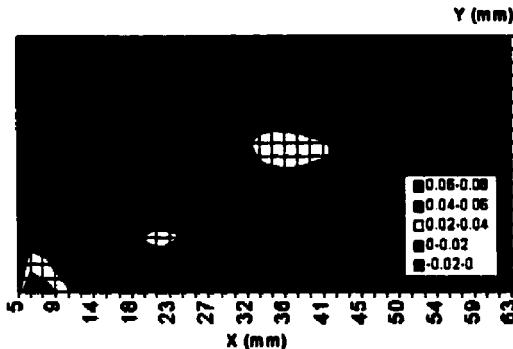


Figure 3.7 Vue planaire de la surface lissée

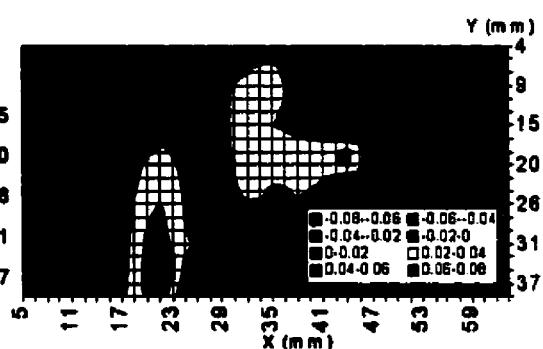


Figure 3.6 Vue planaire de la surface calculée

Tableau 3.9 Analyse de la surface supérieure du poinçon avant la finition manuelle

Surface moyenne (lissage)	NUAGE DE POINTS NOMINAL	Surface calculée
Min: -0,015 mm	Min: -0,061 mm	Min: -0,061 mm
Max: 0,068 mm	Max: 0,061 mm	Max: 0,065 mm
Moyenne: 0,005 mm	Moyenne: 0,00 mm	Moyenne: 0,005 mm
Écart-type: 0,008 mm	Écart-type: 0,018 mm	Écart-type: 0,016 mm
Nombre de points: 800	Nombre de points: 242	Nombre de points: 800

Les quatre graphiques précédents ainsi que les données présentées ci-dessus permettent d'évaluer le défaut de forme de la surface supérieure du poinçon. On peut apprécier grâce à cette méthode l'état de surface que l'on obtient sur une surface plane issue du procédé RapidSteel® 2.0. Toutes les données sont précises à $\pm 0,002$ mm qui est la précision de la CMM. On considère donc que le procédé permet l'obtention d'une bonne précision dans un plan horizontal à la direction de fabrication. On retrouve environ 2/3 des points dans une zone de $\pm 0,016$ mm à partir du plan horizontal nominal.

Comme expliqué précédemment, il est bon de valider les résultats obtenus par la méthode utilisée. Pour se faire, on peut simplement comparer la forme des deux graphiques planaires des figures ci-dessus pour s'apercevoir qu'il y a concordance dans les différentes zones teintées. Évidemment, les graphiques de droite présentent des formes beaucoup plus prononcées et moins lisses étant donné qu'ils s'appuient plus directement sur les points de références issus de la prise de données sur la CMM.

Un autre moyen de valider les résultats est d'utiliser l'étude statistique faite sur les données brutes ainsi que sur les 800 points issus de la méthode proposée. Pour se faire, il suffit de comparer les deux colonnes de droite du tableau présenté ci-dessus (Tableau 3.9) pour s'apercevoir que l'on a les mêmes résultats de l'analyse statistique pour 242 points et pour 800 points. Cette corrélation dans les résultats sera également validée pour l'analyse de l'insert après le polissage manuel.

L'injection des pièces plastiques sera faite à partir d'un insert de moule poli sur la partie poinçon. Comme expliqué précédemment, chaque étape du procédé de fabrication influence l'étape suivante. Il faut donc évaluer la qualité

dimensionnelle de l'insert suite à l'étape de finition de façon à comprendre son influence sur la pièce plastique injectée.

Les graphiques suivants (Figure 3.8 à Figure 3.11) présentent le défaut de forme de l'insert poli ainsi que l'analyse dimensionnelle statistique qui en découle.

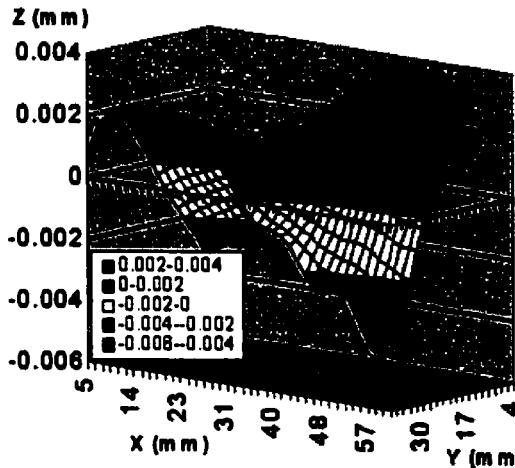


Figure 3.8 Vue 3D de la surface lissée

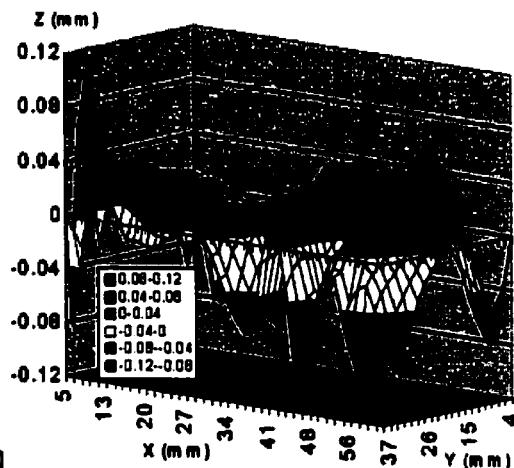


Figure 3.9 Vue 3D de la surface calculée

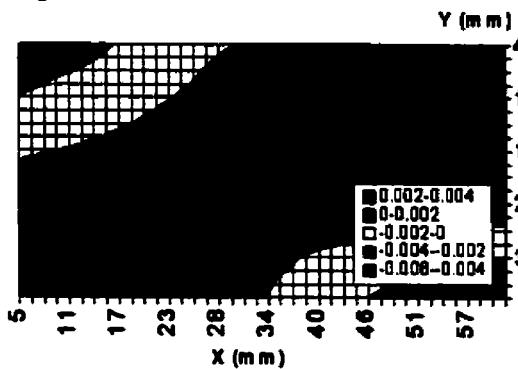


Figure 3.10 Vue planaire de la surface lissée

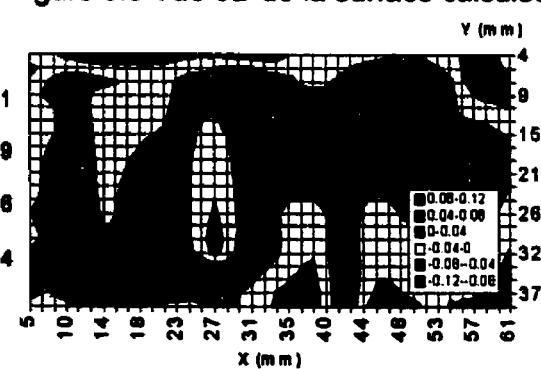


Figure 3.11 Vue planaire de la surface calculée

Tableau 3.10 Analyse de la surface supérieure du poinçon après la finition manuelle

Surface moyenne	Nuage de points nominal	Surface calculée
Min: -0,004 mm	Min: -0,115mm	Min: -0,109 mm
Max: 0,004 mm	Max: 0,047 mm	Max: 0,094 mm
Moyenne: 0,001 mm	Moyenne: 0,001 mm	Moyenne: 0,002 mm
Écart-type: 0,002 mm	Écart-type: 0,036 mm	Écart-type: 0,029 mm
Nombre de points: 800	Nombre de points: 151	Nombre de points: 800

De la même façon que l'analyse dimensionnelle effectuée sur l'insert suite à l'infiltration au bronze, la validité de la méthode employée peut être validée en comparant les graphiques ainsi qu'en comparant les valeurs du tableau ci-dessus (Tableau 3.10).

On remarque que le polissage manuel détériore la précision dimensionnelle des surfaces planes. Évidemment, la qualité du polissage dépend directement de la dextérité de l'opérateur. L'analyse effectuée dans le cadre de ce travail ne s'applique qu'à certaines opérations qui lui ont été appliquées et ne peut être généralisée sans une stricte validation. Par contre, la méthode utilisée peut être appliquée à tous les types de finition.

La finition manuelle est nécessaire pour l'amélioration du fini de surface de l'insert pour pouvoir ainsi faciliter l'éjection des pièces plastiques suite au moulage. La forme et l'erreur générale sont tout de même conservées suite au polissage. Les coins supérieur gauche et inférieur droit sont toujours rabaisés par rapport au plan horizontal moyen. Certains des éléments de l'analyse dimensionnelle de la pièce finale devront donc être comparés avec les paramètres dimensionnels de l'insert suite au polissage manuel.

L'étape de la finition est sans doute l'une des problématiques les plus importantes associée aux technologies d'outillage rapide de nos jours. Plusieurs chercheurs se penchent sur la question pour trouver un procédé hautement automatisé permettant d'améliorer de façon substantielle la qualité des surfaces obtenues par ces technologies[17]. L'effort se trouve beaucoup plus du côté du procédé de fabrication que d'un post-traitement appliqué au produit fini. Il est encore trop tôt pour pouvoir déterminer les grandes lignes de développement appliquées à l'amélioration de l'état de surface.

3.2.2.3 Analyse des cylindres de positionnement

Comme leur identification l'indique, les cylindres de positionnement permettront d'effectuer une analyse de position mais également de plusieurs caractéristiques dimensionnelles et géométriques. Habituellement, une tolérance dimensionnelle ou géométrique est appliquée à une entité et le contrôleur en qualité devra valider la conformité de la pièce suite à une prise de mesure et une analyse. Dans le cas de ce travail, l'exercice inverse est présenté. Le but de cette étude est de trouver la dispersion de fabrication qui pourra être agencée à une tolérance de spécification pour ce type de procédé.

Pour se faire, un certain nombre de paramètres de tolérancement géométrique seront étudiés. L'analyse de tous les paramètres pouvant influencer la précision dimensionnelle de la pièce nécessiterait l'utilisation de plusieurs géométries de pièces distinctes de façon à assurer qu'il n'y ait pas de couplage entre les paramètres. Pour arriver aux résultats présentés ci-dessous (Tableau 3.11), il aura fallu considérer que les paramètres sont découplés et que, par exemple, l'application d'une tolérance de perpendicularité n'a aucun effet sur la rectitude ou le positionnement des cylindres. Afin d'élargir l'échantillonnage des résultats

qui ont été obtenus, cinq cylindres ont été considérés soient: trois cylindres de positionnement et un alésage comportant deux diamètres (interne et externe) dont voici la nomenclature:

- CP_i ($i=1,2,3$): cylindres de positionnement
- A_i ($i=1,2$): alésages, diamètre externe et interne

La figure suivante présente la méthode utilisée pour effectuer la prise de mesures et l'analyse dimensionnelle présentée dans le tableau suivant (Tableau 3.11).

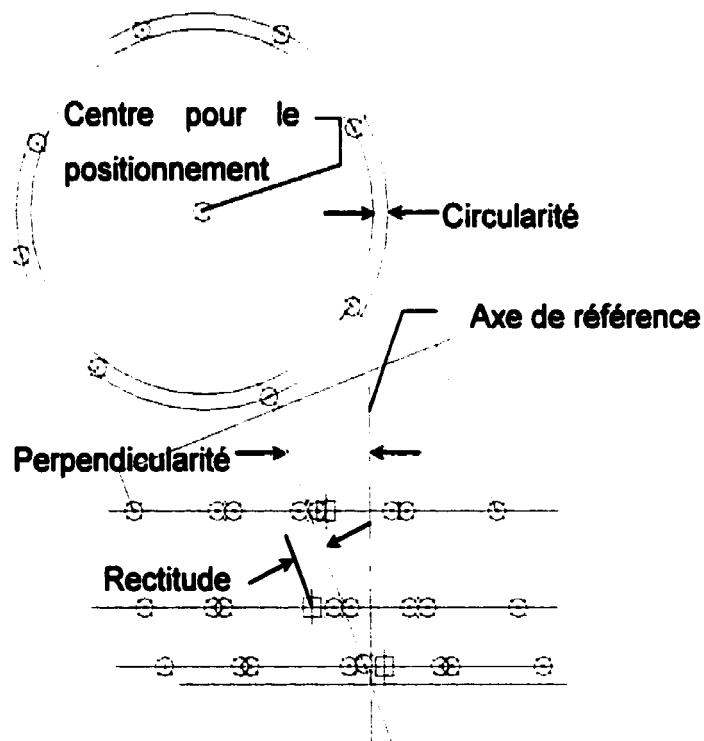
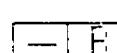


Figure 3.12 Méthode d'analyse dimensionnelle

La norme utilisée, lorsque applicable, est ANSI.

Tableau 3.11 Analyse des cylindres de positionnement avant la finition manuelle

	Perpendicularité  (mm)	Rectitude  (mm)	Circularité  (mm)	Positionnement		
				 (mm)	X	Y
CP ₁	0,025	0,012	0,523	-0,075	-0,205	0,218
			0,516			
			0,430			
CP ₂	0,021	0,007	0,559	0,026	-0,142	0,145
			0,517			
			0,495			
CP ₃	0,030	0,003	0,489	-0,004	-0,053	0,053
			0,187			
			0,261			
A ₁	0,005	0,018	0,577	-0,110	0,023	0,112
			0,502			
			0,495			
A ₂	0,028	0,014	0,707	-0,089	0,003	0,089
			0,543			
			0,532			

Les mesures de circularité ont été effectuées à trois hauteurs pour chaque cylindre. Malgré le faible nombre de données disponibles, les conclusions suivantes peuvent être tirées quant au tolérancement minimal à appliquer à un insert issu de la technologie RapidSteel® 2.0 (avant l'étape de finition).

Tableau 3.12 Résultats de l'analyse de dispersion avant la finition manuelle

	Moyenne	Maximum (tolérance minimale applicable)
Perpendicularité	0,022 mm	0,030 mm
Rectitude	0,011 mm	0,018 mm
Circularité	0,492 mm	0,707 mm
Positionnement (après correction)	0,097 mm	0,132 mm

Des tolérances plus précises que celles énoncées précédemment nécessiteront une attention particulière lors de la fabrication ainsi que l'application d'un post-traitement de façon à corriger les erreurs introduites.

La dispersion de circularité pourrait être améliorée par un meilleur calibrage de la machine SLS. Des paramètres de facteurs d'échelle et compensation du rayon du faisceau laser sont utilisés pour corriger cette erreur. Les cylindres obtenus ont la forme d'ellipses extrudées, d'où la valeur élevée de la dispersion de circularité.

Les résultats pour la dispersion de positionnement dépendent directement du référentiel choisi. Or, il est très difficile lors de l'analyse dimensionnelle de l'insert de positionner parfaitement un repère étant donné que toutes les surfaces sont brutes et qu'aucune d'entre elles ne possèdent une précision suffisante pour être utilisée comme repère. Pour corriger partiellement cette erreur, un décalage de 0,050 mm dans la direction préférentielle X et de 0,075 mm dans la direction Y ont été appliqués. Pour obtenir une correction plus précise, un angle de rotation aurait également pu être appliqué au repère. Dans le cadre de cette étude, la précision obtenue par une simple correction en translation est suffisante.

Ci-dessous, on retrouve les résultats de l'analyse de dispersion de fabrication pour l'insert ayant subi l'étape de finition manuelle.

Tableau 3.13 Analyse des cylindres de positionnement après la finition manuelle

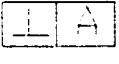
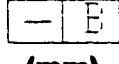
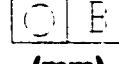
	Perpendicularité  (mm)	Rectitude  (mm)	Circularité  (mm)	Positionnement		
				 (mm)	X	Y
CP₁	0,022	0,007	0,196	-0,024	-0,141	0,143
			0,163			
			0,197			
CP₂	0,020	0,002	0,240	0,120	-0,089	0,149
			0,202			
			0,164			
CP₃	0,018	0,008	0,265	0,082	0,005	0,082
			0,140			
			0,226			
A₁	0,010	0,009	0,306	0,006	0,076	0,076
			0,196			
			0,161			

Tableau 3.14 Résultats de l'analyse de dispersion après la finition manuelle

	Moyenne	Maximum (tolérance minimale applicable)
Perpendicularité	0,014 mm	0,022 mm
Rectitude	0,007 mm	0,009 mm
Circularité	0,205 mm	0,306 mm
Positionnement (après correction)	0,098 mm	0,125 mm

Le polissage manuel n'a qu'une faible influence sur la dispersion de perpendicularité, de rectitude et de positionnement. Les outils utilisés pour ce type de finition n'auront pas tendance à dévier de la forme initiale ni à la déplacer. Par contre, la circularité des pièces est nettement améliorée. Ces résultats sont compréhensibles et justifiés par le type de traitement de finition apportée à l'insert. Si la finition avait été effectuée par un usinage à haute vitesse par exemple, les résultats auraient été très différents. Il faut donc considérer le type de finition appliquée à l'insert dès l'étape de design pour éviter un trop grand nombre de rejet d'inserts, sinon, il faut considérablement augmenter le tolérancement géométrique et dimensionnel appliqué au produit fini.

Tous les résultats présentés jusqu'à présent se rapportent à l'évaluation du domaine de conformité dimensionnelle des inserts de moules issus du procédé de fabrication RapidSteel® 2.0. Les répercussions sur la géométrie de la pièce plastique finale seront maintenant présentées.

3.2.3 Analyse de la pièce injectée

L'injection plastique étant un domaine bien défini en soit, nous ne ferons qu'un bref survol de l'analyse de la pièce finale. Par exemple, aucun facteur d'échelle n'a été appliqué sur les parois du moule de façon à compenser pour le retrait du plastique. Ce n'est pas la précision dimensionnelle de la pièce qui importe le plus, mais bien de pouvoir évaluer le transfert des erreurs entre l'insert et la pièce. C'est pour cette raison que les méthodes et analyses qui ont servies à l'étude des inserts de moules métalliques seront appliquées directement à la pièce plastique.

3.2.3.1 Défaut de forme et analyse des surfaces planes

Les graphiques suivants (Figure 3.13 à Figure 3.16) présentent la surface plane de la pièce finale correspondant à la surface supérieure de la partie poinçon du moule.

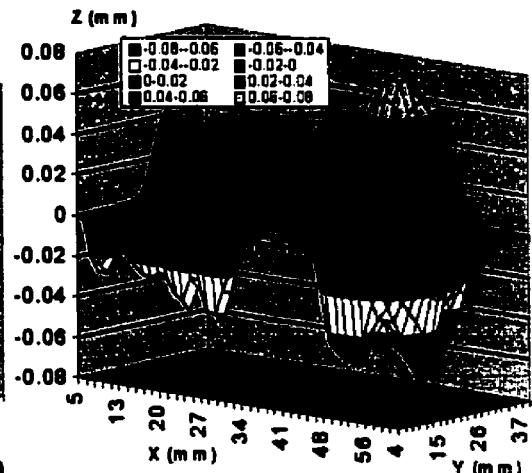
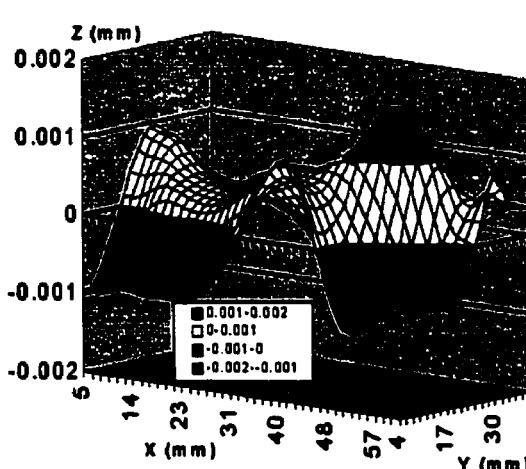


Figure 3.13 Vue 3D de la surface lissée Figure 3.14 Vue 3D de la surface calculée

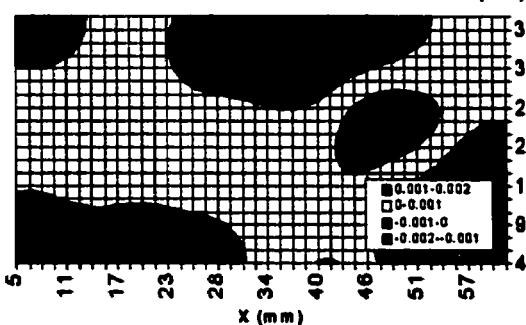


Figure 3.15 Vue planaire de la surface lissée

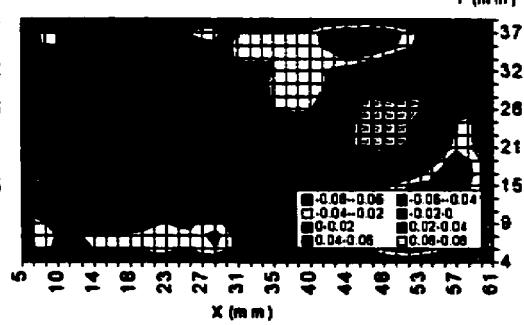


Figure 3.16 Vue planaire de la surface calculée

Tableau 3.15 Analyse d'une surface plane de la pièce finie

Surface moyenne	Nuage de points nominal	Surface calculée
Min: -0,001 mm	Min: -0,069 mm	Min: -0,068 mm
Max: 0,002 mm	Max: 0,082 mm	Max: 0,080 mm
Moyenne: 0,000 mm	Moyenne: 0,000 mm	Moyenne: 0,006 mm
Écart-type: 0,001 mm	Écart-type: 0,033 mm	Écart-type: 0,028 mm
Nombre de points: 800	Nombre de points: 176	Nombre de points: 800

Les résultats obtenus correspondent bien avec ceux obtenus lors de l'analyse de l'insert poli. Les données issues de la méthode d'analyse sont une fois de plus validées par les données prises à la CMM.

3.2.3.2 Analyse des cylindres de positionnement

En appliquant les mêmes principes que lors de l'analyse dimensionnelle des inserts, la pièce possède les tolérances suivantes (Tableau 3.16):

Tableau 3.16 Analyse des cylindres de positionnement de la pièce finie

	Perpendicularité (mm)	Rectitude (mm)	Circularité (mm)	Positionnement		
				 (mm)	X	Y
CP ₁	0,027	0,007	0,235	-0,009	0,759	0,759
			0,166			
			0,265			
CP ₂	0,019	0,014	0,169	-0,617	0,580	0,846
			0,164			
			0,221			
CP ₃	0,031	0,013	0,140	-0,394	0,419	0,575
			0,192			
			0,198			
A ₁	0,000	0,011	0,255	-0,144	0,384	0,410
			0,341			
			0,370			
A ₂	0,019	0,004	0,163	-0,140	0,391	0,415
			0,179			
			0,094			

Les résultats de dispersion dimensionnelle et géométrique sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 3.17) en récapitulant l'information présentée dans le tableau ci-dessus (Tableau 3.16), et en corrigeant la position du référentiel.

Tableau 3.17 Résultats de l'analyse de dispersion de la pièce finie

	Moyenne	Maximum (tolérance minimale applicable)
Perpendicularité	0,019 mm	0,031 mm
Rectitude	0,010 mm	0,014 mm
Circularité	0,210 mm	0,370 mm
Positionnement (après correction)	0,243 mm	0,364 mm

On remarque malgré tout une légère perte de précision dimensionnelle entre l'insert poli et la pièce plastique injectée et ce, principalement en positionnement. Le retrait du plastique lors du refroidissement est le principal responsable pour cette perte de précision. Il faudrait une analyse sur un plus grand échantillon afin de pouvoir apprécier et quantifier ce transfert de tolérances. Les deux figures suivantes (Figure 3.17 et Figure 3.18) permettent de comparer les résultats des analyses de dispersion de fabrication entre l'insert infiltré, l'insert poli et la pièce plastique injectée.

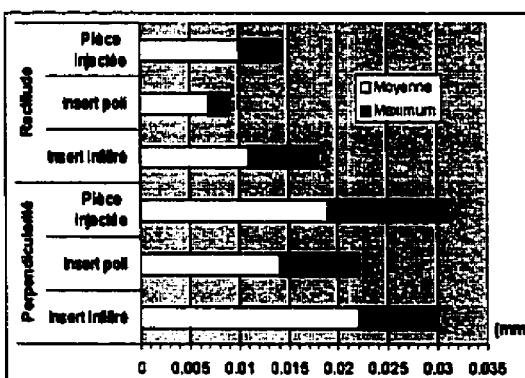


Figure 3.17 Perpendicularité et rectitude

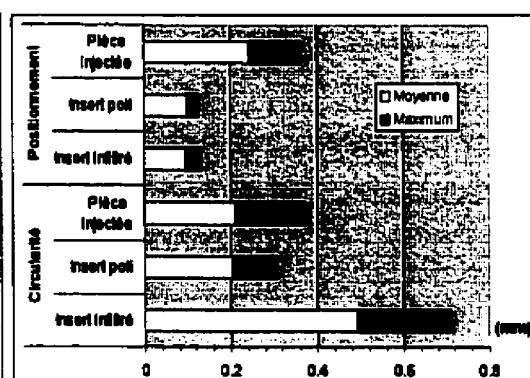


Figure 3.18 Circularité et positionnement

3.3 Conclusion

L'analyse dimensionnelle effectuée sur les inserts de moule issus de la technologie RapidSteel® 2.0 a permis de valider le domaine de dispersion de fabrication du procédé. Ces résultats peuvent être utilisés comme base à l'application de tolérances dimensionnelles et géométriques sur des pièces fabriquées par outillage rapide. Les trois figures suivantes (Figure 3.19 à Figure 3.21) montrent deux pièces injectées (polypropylène et polystyrène) ainsi que les inserts qui ont servi lors de l'injection.

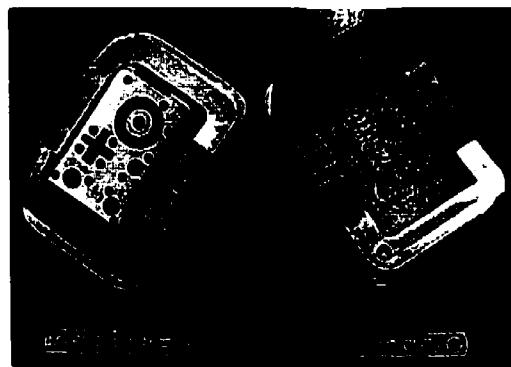


Figure 3.19 Représentation des inserts RapidSteel® 2.0

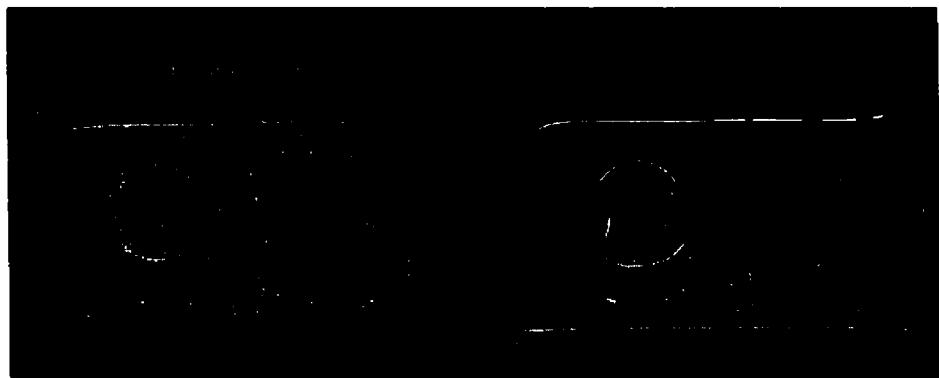


Figure 3.20 Pièce plastique injectée (polypropylène)

Figure 3.21 Pièce plastique injectée (polystyrène)

À titre informatif, l'étude de Shellabear [18], présente les résultats suivants suite à l'analyse d'une pièce type issue de la technologie RapidSteel® 2.0:

Tableau 3.18 Analyse dimensionnelle du procédé RapidSteel® 2.0

	Min	Max	Moyenne
État de surface Ra (micromètre)	10,5	27,6	18,3
Précision Déviation (%)	X -0,17	0,18	0,56
	Y -0,54	-0,27	
	Z -0,56	1,17	

CHAPITRE IV

CONSIDÉRATIONS FUTURES

Les technologies d'outillage rapide ont un impact important sur la culture des entreprises. Leurs implications et les bouleversements qu'elles engendrent nécessitent une réorganisation dans la philosophie de la conception d'un nouveau produit. Les entreprises doivent s'adapter à l'apparition de ces nouveaux outils afin de pouvoir en bénéficier au maximum. Par contre, l'impact ne se situe pas qu'au niveau organisationnel. En effet, les retombées économiques sont importantes en permettant une diminution des temps de développement et par conséquent en accélérant l'arrivée d'un produit sur le marché. Mais, ces retombées possèdent en contre partie le désavantage de créer une nouvelle forme de coûts. Les dépenses ne sont plus situées à la même étape du cycle de développement de produits. Il faut donc être en mesure de pouvoir évaluer les dépenses qu'engendrent l'utilisation des technologies d'outillage rapide.

De plus, l'impact que peuvent avoir ces technologies sur l'environnement aussi bien au niveau des ressources utilisées, de la consommation d'énergie que des retombées environnementales nécessite que l'on s'y attarde.

4.1 Évaluation des coûts

Il existe dans le monde de la fabrication trois paramètres inséparables, soient le temps, la précision et le coût. Un procédé de fabrication parfait aurait une précision excellente, un temps de fabrication très court et des coûts peu élevés. Mais, comme Lavoisier l'a dit dans sa loi de conservation: "Rien ne se gagne, rien ne se perd, tout se transforme". Ce principe s'applique également aux

procédés d'outillage rapide. Les aspects de précision ont été discutés lors du chapitre précédent. Cette précision bien que relativement bonne est malgré tout inférieure à beaucoup de procédés de fabrication conventionnelle. Les temps de fabrication, quant à eux, sont de loin inférieurs à ce que l'on peut retrouver sur le marché pour la fabrication d'une pièce de complexité moyenne à élevée. Par conséquent, on peut s'attendre à ce que les coûts ne soient pas un avantage majeur par rapport aux procédés conventionnels. Les dernières années de développement des technologies d'outillage rapide ont permis la comparaison des coûts de fabrication. Stucker (1999) montre qu'un cas type associé à la fabrication d'un outil de complexité moyenne en acier H13 coûte 10 750,00\$ alors que le même outil fabriqué par le procédé RapidSteel® 2.0 revient à 13 767,00\$, soit environ 25% de plus [19]. Ce pourcentage diminuera plus la complexité de la pièce augmentera.

Le tableau suivant (Tableau 4.1) présente les coûts associés à la fabrication des inserts pour les trois procédés d'outillage rapide étudiés. On peut apprécier la variation des coûts en fonction des procédés. Évidemment, si l'on regarde le rapport du coût total de fabrication versus le nombre de pièces injectées, on se rendrait bien compte que le procédé RapidSteel® 2.0 est le plus intéressant.

Par conséquent, il faut s'assurer de bien connaître les besoins avant d'opter pour une technologie ou pour une autre. Le choix de la technologie d'outillage rapide est justifié par la fonctionnalité du produit (précision, nombre de pièces, durée, coût, choix du plastique, ...)

Tableau 4.1 Coûts associés à la fabrication des inserts

Étapes d'élaboration	Direct AIM™	Cuivre Polyamide	RapidSteel® 2.0
Création du modèle CAO (3D) (60\$/h)	12h 720\$	15h 900\$	9h 540\$
Préparation des fichiers propre aux machines (50\$/h)	2h 100\$	1h 50\$	1h 50\$
Temps de fabrication - prototypage – (100\$/h)	8h 800\$	12h 1 200\$	20\$ 2 000\$
Temps post-processing - retrait machine – (50\$/h)	2h 100\$	1h 200\$	1.5h 75\$
Temps de finition - dépoutrage – (50\$/h)	0	3h 150\$	4h 200\$
Temps de post finition - agent scellant (50\$/h) - Fournaise (15\$/h)	0	2h 100\$	48h 720\$
Usinage base de moule - usinage plaque (4 050\$/3) - connexion de refroidissement - tiges d'éjection (50\$/h)	1 350\$ 0 100\$	1 350\$ 200\$ 100\$	1 350\$ 200\$ 100\$
Usinage des inserts et assemblage (50\$/h)	4h 200\$	7.5h 375\$	15h 750\$
Autres (scellant, metspec, tiges d'éjection, etc...)	1 260\$	1 290\$	1 110\$
Coût total	4 630\$	5 915\$	7 095\$

La variation des temps de modélisation CAO 3D entre les trois procédés d'outillage rapide provient du fait qu'il est beaucoup plus difficile de modéliser la coquille nécessaire aux procédés Direct AIM™ et Cuivre Polyamide que l'insert plein du procédé RapidSteel® 2.0. De plus, la modélisation des canaux de refroidissement augmente le temps total de modélisation ajoutant ainsi des coûts supplémentaires pour les procédés Cuivre Polyamide et RapidSteel® 2.0.

4.2 L'implantation des technologies de fabrication rapide

La plupart des études dans le domaine de la fabrication rapide porte sur l'utilisation de ces technologies, leurs applications, leur exécution ainsi que les résultats qui en découlent. Par contre, on ne retrouve que très peu d'intérêt sur l'implantation de ces technologies dans les entreprises. Pourtant, cet aspect est très important et demande un investissement ayant des effets non négligeables sur l'entreprise qui décidera de se lancer dans une telle installation. Quelques

études[3] proposent des grilles d'évaluation pour déterminer les critères décisionnels quant à l'implantation des technologies de fabrication rapide au sein des entreprises. Ces critères peuvent se résumer en quatre grands points de vue, soit le point de vue technique, le point de vue des employés, le point de vue de la compagnie dans une situation de compétition et finalement le point de vue de la société et de son environnement. Ces quatre grandes catégories comportent une série de critères ayant chacun leur propre définition, leur question ainsi que leur barème d'évaluation. De cette façon, il est possible de déterminer la technologie qui répond le mieux aux besoins d'une entreprise en regardant aussi bien les besoins et restrictions internes que les influences externes. Par contre ces méthodes de prises de décisions ne sont pas reconnues par tous les chercheurs du domaine qui considèrent que les paramètres décisionnels sont inter-reliés et que par conséquent il est presque impossible d'élaborer une grille d'évaluation simple et fonctionnelle. Malgré tout, ces critères sont une bonne base et souvent suffisants pour effectuer un choix sensé et judicieux s'ils sont adaptés à la situation qu'ils servent à analyser. De plus, l'utilisation de ces grilles d'évaluation permet à l'entreprise de faire une étude poussée de ses besoins ce qui est le point le plus important avant de faire des modifications à la chaîne de production.

4.3 L'environnement et la fabrication rapide

On considère qu'il existe trois grandes classes de mise en forme des matériaux: fabrication par enlèvement de matière, fabrication par ajout de matière et finalement la fabrication par déformation [13]. Dans la première catégorie, on retrouve des procédés d'usinage tel que le tournage, le fraisage, la rectification, etc. La matière superflue est retirée de la masse initiale de façon à former la pièce à l'image des plans de détails. La fabrication par déformation impose à la

pièce une énergie nécessaire à son changement de forme imposant ainsi des contraintes qui la mèneront à sa géométrie finale. Cette technique se retrouve dans des procédés tels que le forgeage et l'emboutissage. Dans la seconde catégorie, la pièce est formée par découpage informatique et ajout de couches de matière. On retrouve environ une dizaine de technologies de fabrication rapide dont les quatre plus importantes sont: la stéréolithographie (SLA), le frittage sélectif au laser (SLS), la déposition de matériau fondu (FDM) et l'apposition successive de couches de papier (LOM).

La figure suivante (Figure 4.1) présente de façon simplifiée le procédé par ajout de matière. Cette figure complète la description du procédé de fabrication rapide fait au premier chapitre.

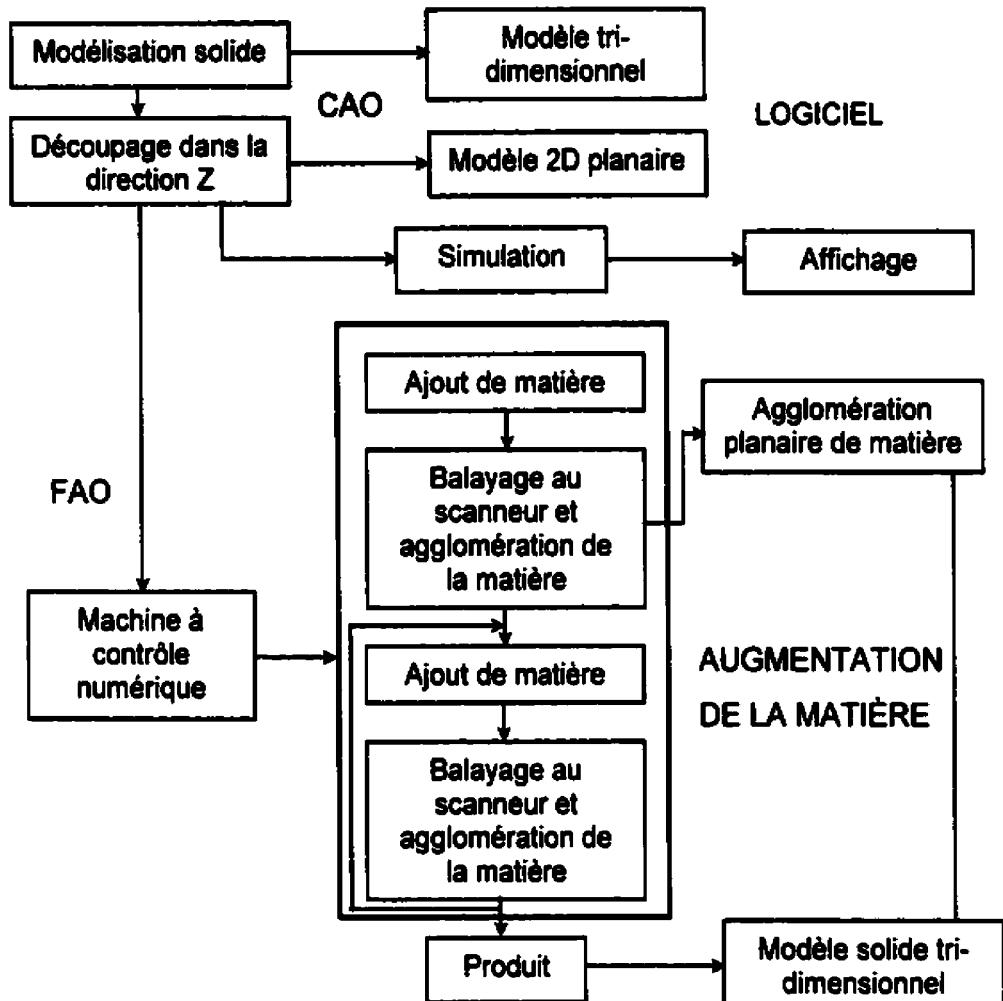


Figure 4.1 Procédé par ajout de matière

4.3.1 Analyse des ressources utilisées

Le tableau suivant (Tableau 4.2) présente le taux d'utilisation de la matière par rapport aux rebus dans le cas de procédés faisant partie des trois catégories présentées précédemment.

Tableau 4.2 Taux d'utilisation de la matière

Procédé	Taux d'utilisation de la matière	Procédé	Taux d'utilisation de la matière
SLA	100%	Fraisage	65-70%
SLS	100%	Tournage	< 60%
FDM	100%	Emboutissage	< 90% (\approx 80%)
LOM	> 85%	Extrusion	< 93% (\approx 80%)

On comprend donc que les procédés de mise en forme traditionnelle nécessitent un plus grand apport de matière première et que celle-ci est rejetée à environ 30%. Beaucoup d'efforts sont fait pour recycler cette matière, mais, il reste encore un grand nombre d'étapes à passer avant de pouvoir considérer ces technologies comme n'étant pas "énergivores".

De plus, la fabrication rapide n'utilise pas d'outils proprement dit, ni de montage particulier, pas plus que de matrices, ce qui implique une diminution des ressources mobilisées. Dans les machines d'usinage traditionnel, on retrouve l'usage d'huile de toutes sortes: huile de transmission hydraulique, de coupe, de lubrification. Ces huiles devront être changées et recyclées lorsqu'elles seront dégradées ou contaminées.

Les technologies de fabrication ont donc un pas d'avance sur les technologies conventionnelles au sujet de la consommation de ressources.

4.3.2 Consommation d'énergie

Sans même effectuer d'analyse détaillée de l'énergie consommée par une machine de fraisage pour laquelle la broche tourne à haute vitesse et qui

combat une grande force de résistance provenant de l'effort de coupe, il est évident que les technologies de fabrication rapide nécessitent un apport d'énergie moindre. La plupart de ces technologies utilisent des lasers de faible puissance et fonctionnent grâce à des mécanismes lents qui n'utilisent que très peu de courant. Il faut malgré tout apporter une nuance à cette comparaison, car les technologies utilisant des lasers n'ont qu'un faible rendement énergétique. De plus, certaines de ces machines nécessitent une montée en température du matériel de construction augmentant ainsi la consommation totale d'énergie.

Un bilan de l'énergie consommée par les technologies de fabrication rapide montrerait un écart non négligeable par rapport aux procédés de fabrication par enlèvement de matière ou par déformation.

4.3.3 Retombées environnementales

Les aspects de protection environnementale sont de plus en plus examinés de nos jours. On retrouve maintenant dès lors de la phase de conception d'un produit tout le cheminement du produit, de sa fabrication à son utilisation ainsi que son recyclage en évaluant ses effets sur l'environnement. Hors, les procédés de fabrication conventionnelle génèrent encore beaucoup de poussière, de copeaux, d'eaux et d'huiles usées qui sont des sources de pollution. Malgré un contrôle plus sévère de l'émission de ces polluants dans l'environnement, leur recyclage reste encore difficile d'exécution dû à la présence de particules métalliques et organiques dans les eaux et les huiles. Les technologies de fabrication rapide permettent une diminution importante de ces polluants de part leur fonctionnalité intrinsèque.

Il faut malgré tout apporter une nuance à ce jugement. Les chercheurs et fabricants des matériaux utilisés dans les technologies de fabrication rapide ne considèrent pas simultanément la protection de l'environnement, les facteurs économiques et les propriétés mécaniques du matériau. La majorité des matériaux utilisés sont: métaux, céramiques et plastiques. Le recyclage et la réutilisation de ces matériaux sont difficiles.

- il est difficile de retirer les impuretés des matériaux métalliques,
- les céramiques sont impossibles à décomposer et à réutiliser,
- les plastiques ne sont pas biodégradables et se consument en dégageant des gaz toxiques.

Le diagramme suivant (Figure 4.2) présente la place de l'environnement dans le cycle d'utilisation des matériaux dans les technologies de fabrication rapide. Comme le présente ce diagramme, il faut évaluer l'impact du procédé de fabrication rapide autant dans le cycle de fabrication que dans le choix du matériau de base.

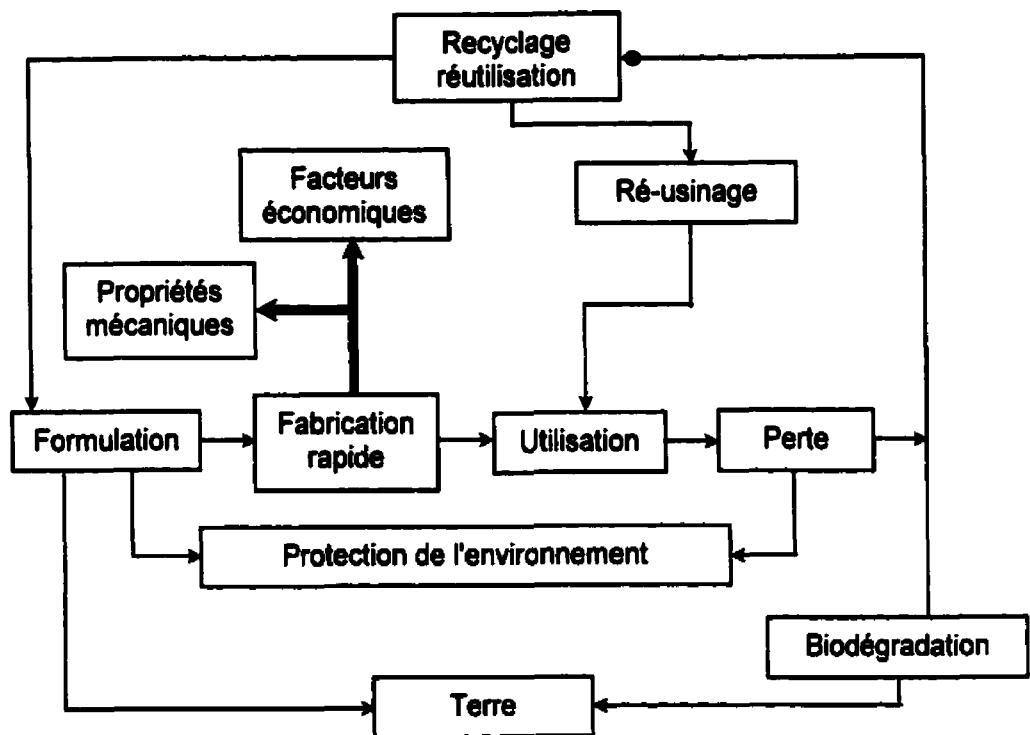


Figure 4.2 Place de l'environnement dans le cycle d'utilisation des matériaux

4.4 Conclusion

Les technologies d'outillage rapide répondent à des besoins spécifiques qu'il faut être en moyen de déterminer précisément avant la prise de décision par rapport à l'utilisation d'une technologie. Bien que moins grands consommateurs d'énergie, les procédés d'outillage rapide doivent malgré tout porter une attention particulière aux impacts qu'ils peuvent avoir sur l'environnement.

CONCLUSION

L'outillage rapide est sans aucun doute en pleine évolution. Issu du prototypage rapide, il ne possède que quelques années de développement, et pourtant il présente déjà un potentiel énorme. Plusieurs courants de pensées commencent à émerger. Des idéologies telles que la fabrication de forme libre, la fabrication rapide et le développement rapide de produits semblent vouloir promettre à ce nouveau courant de mise en forme de la matière un futur très prometteur. À quand l'apparition du premier "replicator" de l'émission de sciences-fictions Star Trek ?

L'outillage rapide tente de se définir un marché ciblé lui permettant de se développer et d'atteindre une maturité propre. Pour ce faire, son domaine d'application doit être défini de façon rigoureuse et précise. Le travail présenté dans ce rapport a permis de poser les bases et les limites de ce domaine. Au travers de l'élaboration d'une pièce type, les limites de création géométrique sont présentées. Les trois procédés d'outillage présentés Direct AIM™, Cuivre Polyamide et RapidSteel® 2.0 ont permis de montrer la validité de ce concept pour la fabrication de pièces plastiques injectées. La méthode présentée pour la création des inserts pour ces technologies peut également servir de guide lors du design d'un nouveau produit. La modélisation tri-dimensionnelle des inserts rajoute une complexité supplémentaire que l'on ne retrouve pas lors de la fabrication conventionnelle de moule à injection.

L'analyse de la dispersion de fabrication sur les inserts ainsi que sur la pièce plastique finale est probablement l'aspect manquant le plus crucial de ces nouvelles technologies. Une méthode d'analyse du défaut de forme des surfaces planes a été développée au cours de ce travail. Cette méthode permet

d'utiliser un nombre de données limitées et d'en faire une représentation tridimensionnelle afin d'évaluer la forme globale de la surface. Cette méthode peut être appliquée à toutes les étapes de fabrication des inserts ainsi que de la pièce plastique finale. De plus, une analyse dimensionnelle et géométrique a permis de délimiter les cotes minimales de tolérancement qui peuvent être appliquées à l'insert issu du procédé RapidSteel® 2.0 afin de valider la conformité de la pièce finale. De cette façon, les limites des tolérances de perpendicularité, circularité, rectitude et positionnement ont été précisées. Aucun travail de ce type n'a encore été publié. Seules des analyses de précision générale fournies par les vendeurs des technologies se retrouvent sur le marché

De plus, des grilles de paramètres d'injection ont été définies et pourront ainsi être utilisées par les mouleurs amoindrissant leurs craintes face à ces nouvelles technologies.

L'étude présentée dans ce rapport démontre bien qu'il existe un avenir certain à l'outillage et que les applications qui peuvent en bénéficier sont très vastes. Par contre, celles-ci doivent définir leurs besoins de façon claire afin de ne pas faire l'usage d'une technologie qui ne s'y prête pas. Autant ces nouvelles technologies peuvent être bénéfiques dans le cycle de développement de produits, autant elles peuvent être néfastes si utilisées à mauvais escient.

RÉFÉRENCES

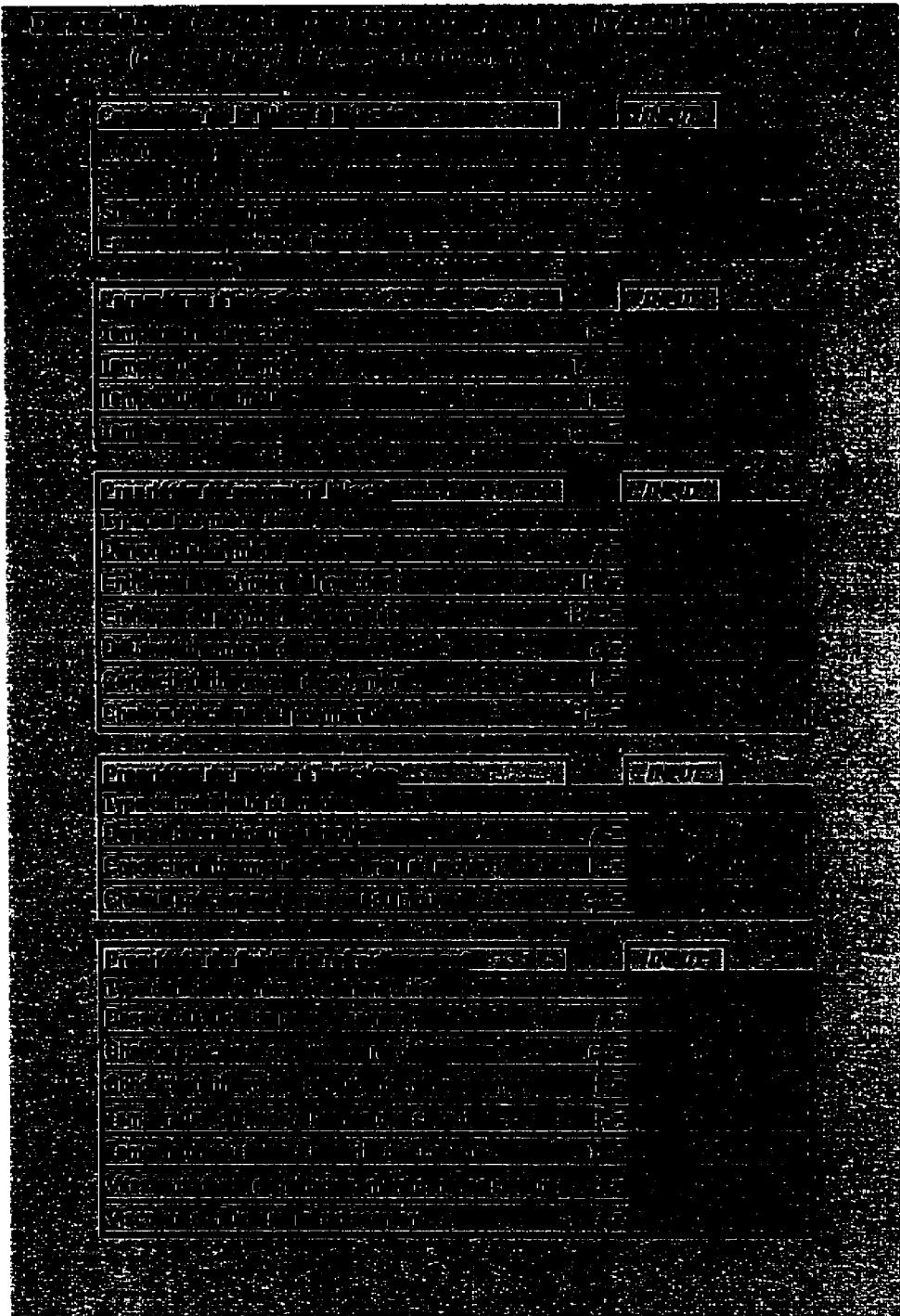
- [1] FEYGIN, M., (1994). Apparatus and Method for Forming an Integral Object from Laminations, U.S. Patent No. 0 272 305.
- [2] FEYGIN, M., (1988). Apparatus and Method for Forming an Integral Object from Laminations, U.S. Patent No. 4 752 352.
- [3] Co-ordinator and partners, (1996). Process Chains for Rapid Technical Prototypes (RAPTEC). Overview Report of Analysed and Selected Processes – First Selection Report – RAPTEC deliverable 1 of task 2
- [4] Site web du Centre Prototech, <http://www.prototech.polymtl.ca/>
- [5] WOHLERS, T., (1999). 1999 Worldwide Progress Report. Rapid Prototyping & Tooling, State of the Industry, Wohlers Associates, Inc., Etats-Unis
- [6] DICKENS, P., (1999). Rapid Manufacturing. Proceedings, TCT Conference Europe 1999, Rapid News Publications plc.
- [7] BERNARD, A., TAILLANDIER, G., (1998). Le prototypage rapide, HERMES, Paris
- [8] WILLIAMS, J., (1999). Rapid Tooling For Plastic Injection Moulds: Application and Decision-Maker Tools. Proceedings, TCT Conference Europe 1999, Rapid News Publications plc.

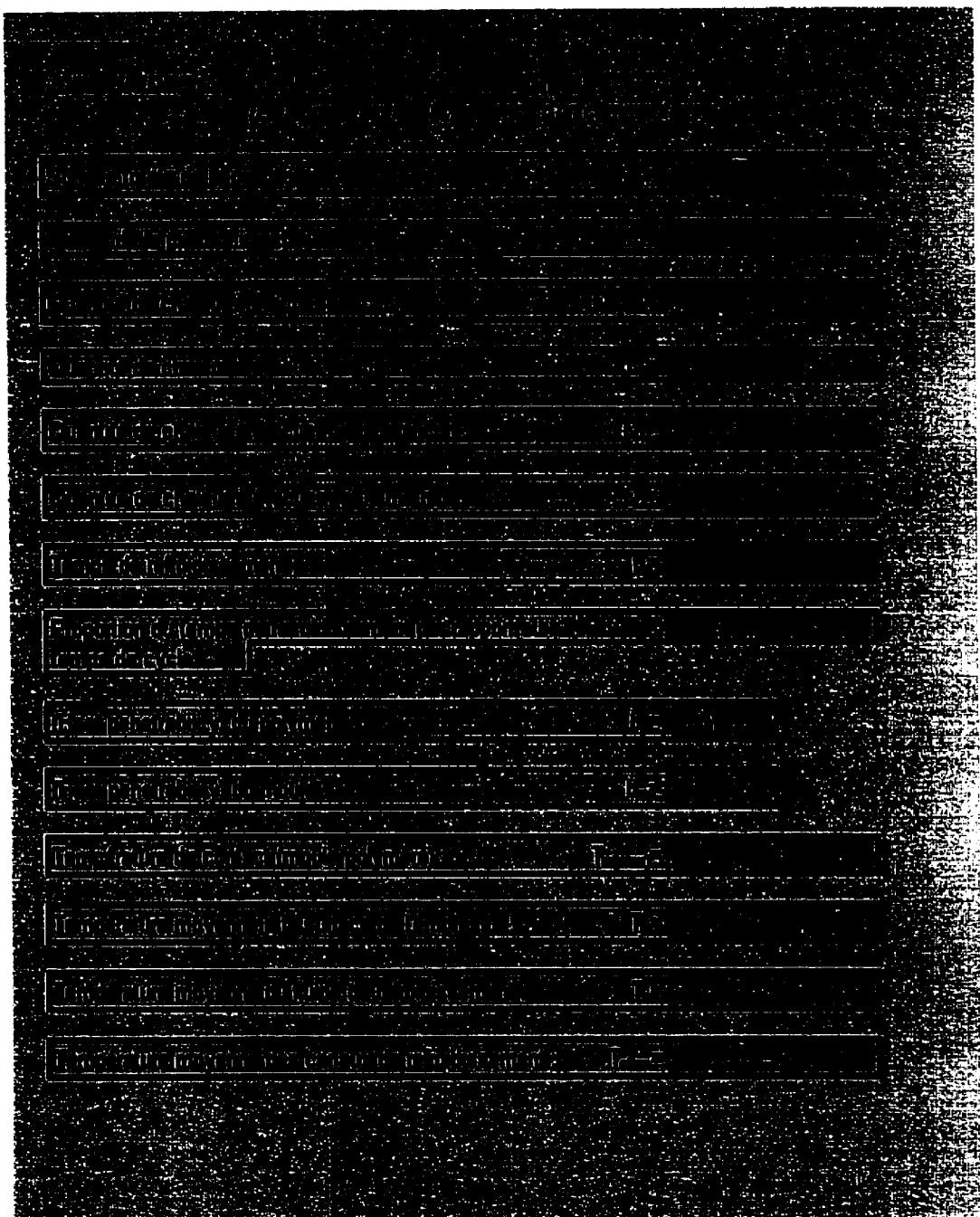
- [9] PLUNKETT, T., (1999). Is Rapid Tooling the Way Forward for the Rapid Prototyping Industry or a Distraction ?. Proceedings, TCT Conference Europe 1999, Rapid News Publications plc.
- [10] UPCRAFT, S., (1999). Exploring and Exploiting Time-Compression Technologies for Smaller Businesses. Rapid Prototyping Association of the Society of Manufacturing Engineers, Vol.5, NO.3
- [11] SCHERMER, S., (1999). Présentation de conférence, TCT Conference Europe 1999, Rapid News Publications plc.
- [12] PRASHANT, K., (2000). A review of process planning techniques in layered manufacturing, Rapid Prototyping journal, Volume 6, Number 1, 2000, pp. 18-35
- [13] ZHANG, G. et al., (1999). Analysis of the Green Properties of Rapid Prototyping and Manufacturing, Rapid Prototyping journal, Volume 5, Number 2
- [14] MENGES, G., MOHREN, P., (1986). How to Make Injection Molds, Éd. Hanser
- [15] XU, X., SACHS, E., (1998). Designing Conformal Cooling Channels for Tooling, Solid Freeform Fabrication Proceedings, August 1998, pp. 131-145
- [16] TYVAERT, I., FADEL, G., ROUHAUD, E., (1999). A Methodology to Create STL Files from Data Point Clouds Generated with a Coordinate

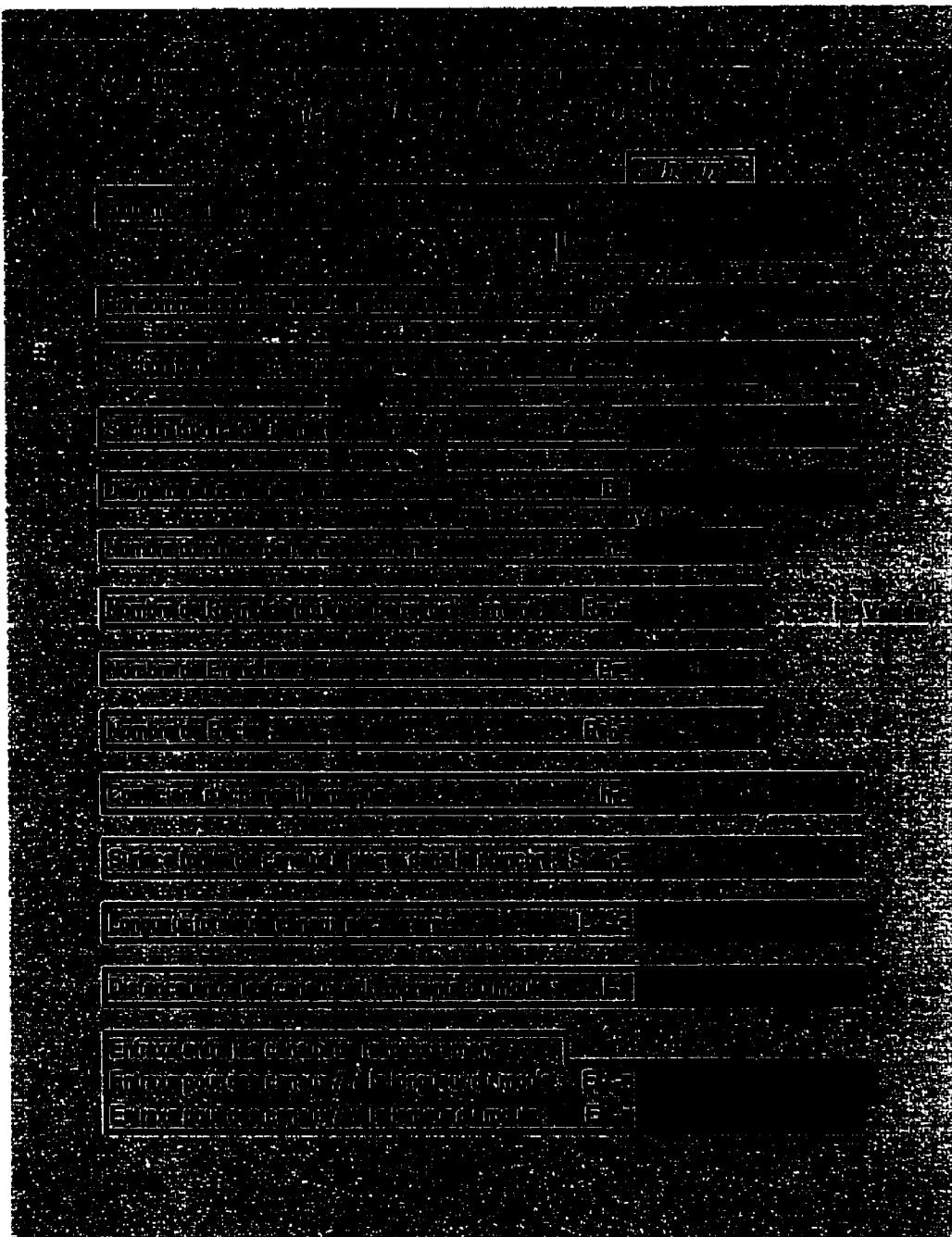
Measuring Machine, Solid Freeform Fabrication Proceedings, August 1999,
pp 47-57

- [17] SHI, D., GIBSON, I., (1998). Surface Finishing of Selective Laser Sintering Parts with Robot, Solid Freeform Fabrication Proceedings, August 1998, pp. 27-35
- [18] SHELLABEAR, M., (1999). Benchmark Study of Accuracy and Surface Quality in RP Models, RAPTEC Task 4.2, Report 2, June 1999
- [19] STUCKER, B., HARDRO, P., (1999). Die Cast Tooling from Rapid Prototyping: Part II, Time Compression Technologies, Volume 4 issue 7, December 1999, pp. 36-45

ANNEXE I
ÉLABORATION DES CANAUX DE REFROIDISSEMENT





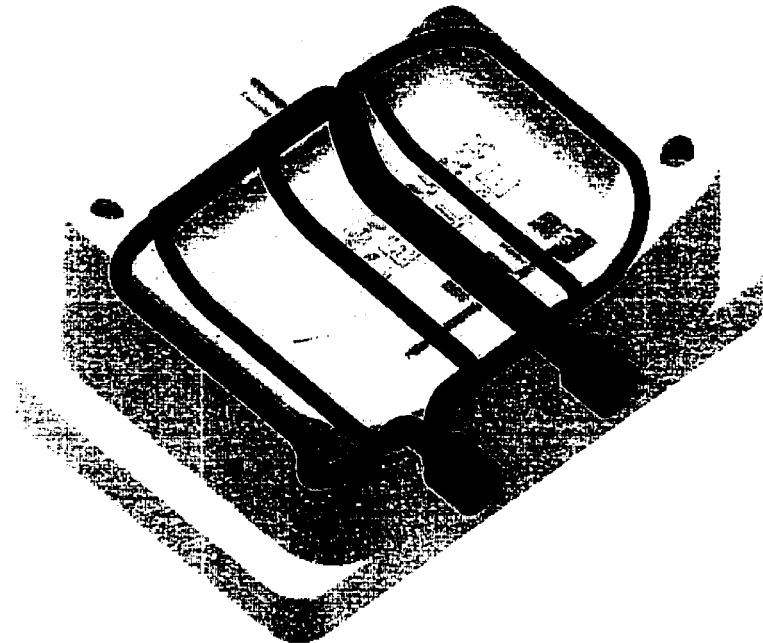


Les calculs présentés dans cette annexe font partie intégrante d'un utilitaire mis au point au cours d'un projet de fin d'études effectué sous la supervision de Clément Fortin et Sylvain Masounave. Ces calculs sont majoritairement basés sur les notes de cours de Bernard Sanschagrin [14].

ANNEXE II

CALCULS DES DIAMÈTRES DES CANAUX DE REFROIDISSEMENT

À partir des résultats obtenus à l'annexe I, il est maintenant possible de pouvoir calculer le diamètre de tous les canaux de la partie poinçon des inserts.



Le calcul de perte de charge quant à lui se base sur les équations suivantes:

$$(4) \Delta P = \frac{8Q\eta L}{\pi R^4} \Rightarrow \Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_i \Rightarrow \frac{L_1}{R_1^4} = \frac{L_2}{R_2^4} = \frac{L_i}{R_i^4}$$

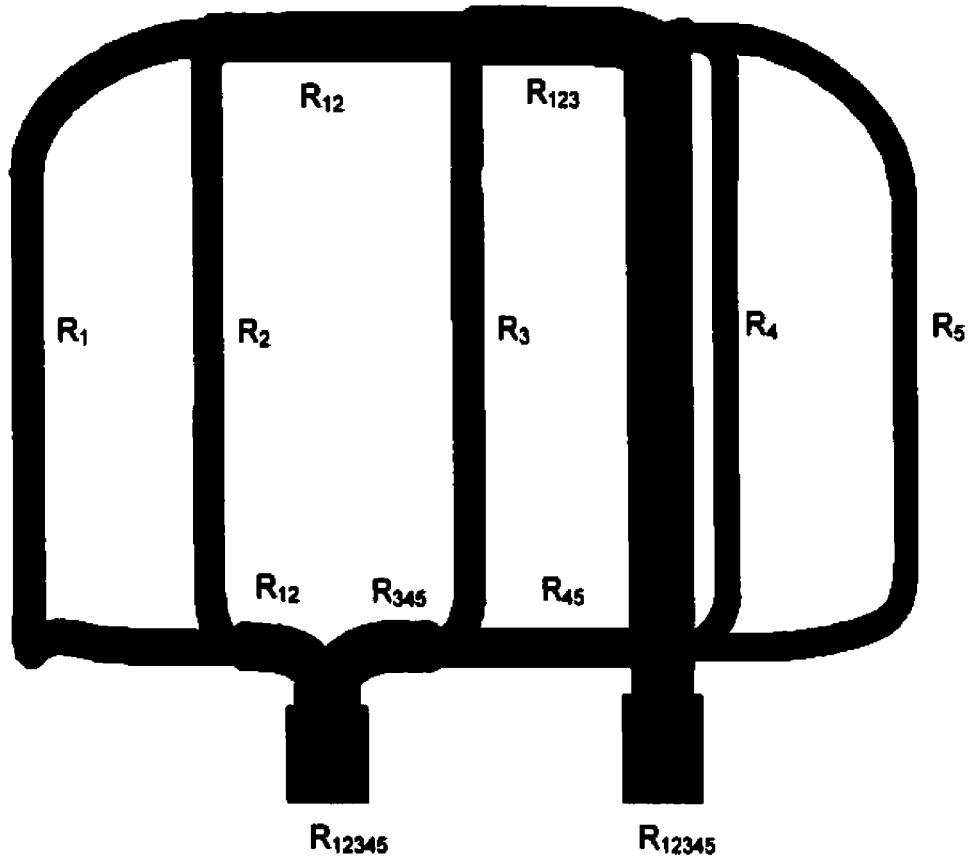
Loi d'écoulement d'un fluide newtonien dans un cylindre.

$$(5) S_{Total} = \sum S_i \Rightarrow R_{Total}^2 = \sum R_i^2$$

Loi de conservation du volume d'eau dans chacun des canaux.

Ces trois équations ont permis de déterminer les paramètres géométriques (diamètre et positionnement) des canaux de refroidissement dans la partie

matrice des inserts. L'encombrement dû aux guides des tiges d'éjection ne permet pas d'optimiser le positionnement des canaux de refroidissement dans la partie poinçon. Seul le diamètre de ceux-ci sera optimal.



$R_{12345}=3,175 \text{ mm}$	$R_{123}=2,66 \text{ mm}$	$R_{12}=2,17 \text{ mm}$	$R_1=1,62 \text{ mm}$
			$R_2=1,44 \text{ mm}$
	$R_{345}=2,32 \text{ mm}$	$R_{45}=1,72 \text{ mm}$	$R_3=1,55 \text{ mm}$
			$R_4=1,21 \text{ mm}$
			$R_5=1,22 \text{ mm}$

ANNEXE III
DIMENSIONNEMENT DES INSERTS

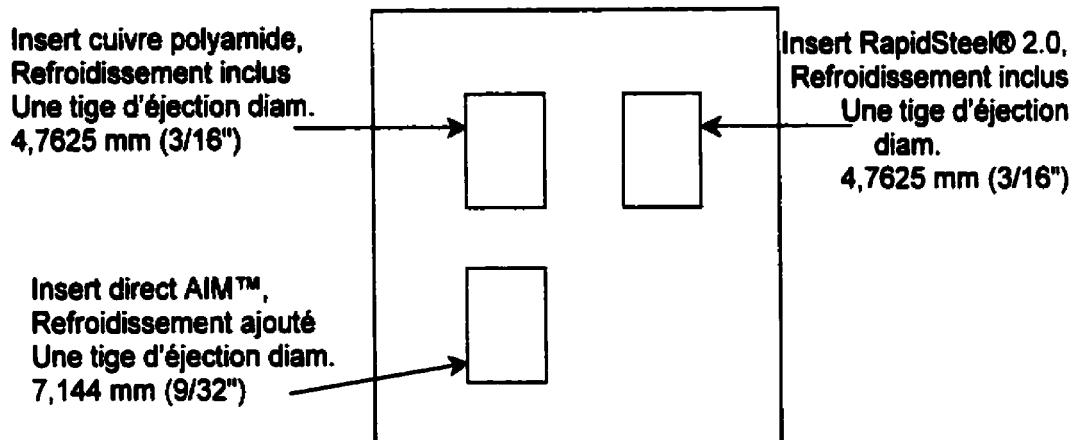
Position des centres des alésages de positionnement pour les tiges d'éjection de diamètre 3,175 mm (1/8"). Les axes V et H sont représentés sur la figure ci-dessous.

Trou	H (mm)	V (mm)
1	21,34	80,65
2	56,00	79,10
3	30,65	71,34
4	41,00	72,90
5	28,75	62,75
6	40,73	63,77
7	53,27	63,26
8	23,23	49,25
9	41,33	52,33
10	52,27	52,73
11	21,91	34,42
12	30,50	25,50
13	51,50	25,50

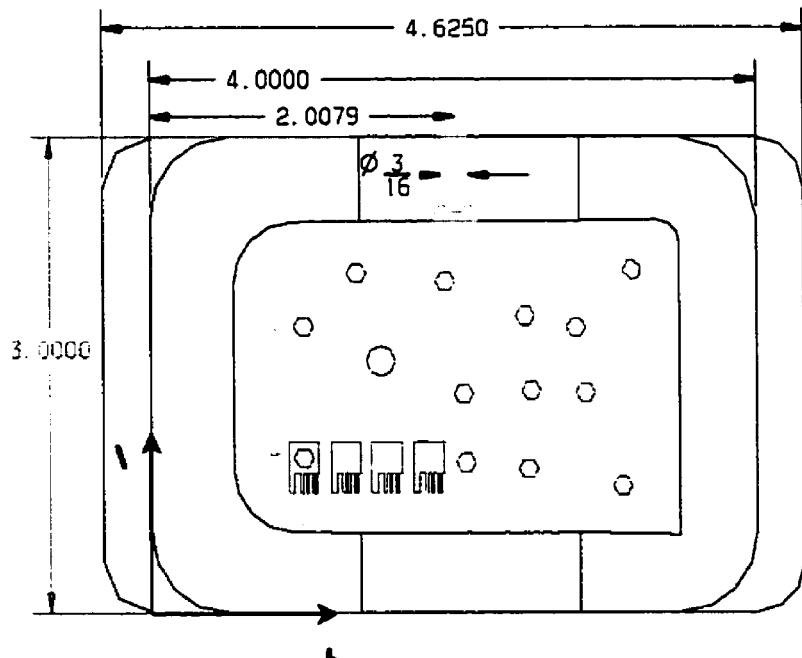
Position en pouce trous diamètre 4,7625 mm (3/16") et 71,144 mm (9/32").

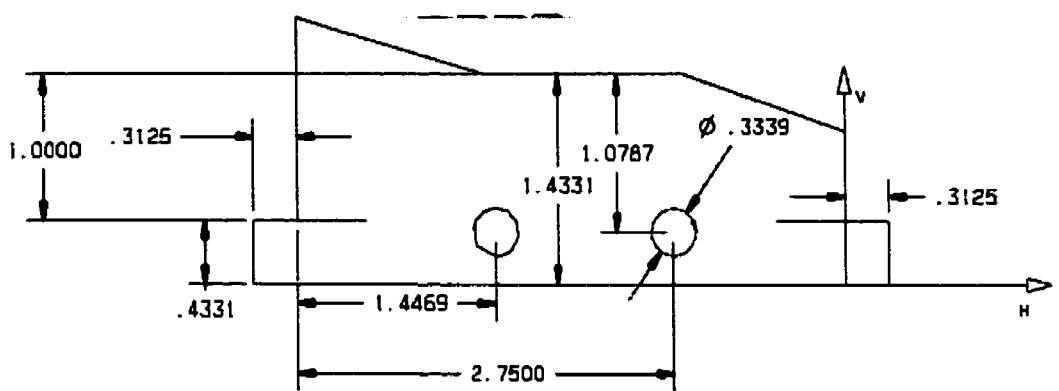
H : 1.4173 mm V : 1.5157 mm

La répartition des cavités est représentée sur la figure suivante. On retrouve également l'influence des canaux de refroidissement sur la configuration des cavités.



Les deux figures ci-dessous présentent les plans des inserts nécessaires à l'usinage. Les cotes sont en pouce.





ANNEXE IV

STRATÉGIE D'INJECTION

Stratégie d'injection

Presse à injection Bettcherid de 80 tonnes avec un contrôleur Allen Bradley

Technologie	Copper Polyamide	Volume de la puce	19.2cm3.
Matériau	Polypropylène	Diamètre du puce	45mm
		Transfert si Pmax	0.3s

Échantillon	Pression de transfert nulle (psi/in ²)	Vitesse (mm)	Temps / Pression Maintient (lb/in ² & s)	Dosage (in)	T° injection réelle (°C)	Retourissement (pression nulle) (s)	Remarques	Autres
1	217	0.8		0	0.6	200		
2	205							
3	205							
4	205					200		
5	205					200		
6	205					200		
7								
8	221					180		
9								
10								
11	205							
12	205					200		
13	205	0.85						
14	205			0.60	210			
15	205					210		
16	205							
17	216					210		
18	211							
19	205	0.9						
20	205							
21	205							
22	205							
23	205	10/15s				210		
24	205							
25	205							
26	205	10/15s						
27	205					200	Issue de moulage	
28	205					205		
29	205					200		
30	205					210		
31	205					210		
32	205					210		
33	205					210		
34	205					210		
35	205	1.00				210		
36	205							
37	205	20/10s						
38	205	20/10s						
39	205							
40	205							
41	205	0.80				210		
42	205							
43	205	20/10s						
44	205	20/10s						
45	205							
46	205							
47	205	0.80				210	Un fort retrait	
48	205	1.1						
49	205							
50	205	20/10s				210		
51	205	20/10s				210		
52	205	20/10s				210		
53	205	20/10s				210		
54	205	20/10s				210		
55	205	20/10s				210		
56	205	20/10s				210		
57	205	20/10s				210		
58	205	20/10s				210		
59	205	20/10s				210		
60	205	20/10s				210		
61	205	20/10s				210		
62	205	20/10s				210		
63	205	20/10s				210		
64	205	20/10s				210		
65	205	20/10s				210		
66	205	20/10s				210		
67	205	20/10s				210		
68	205	20/10s				210		
69	205	20/10s				210		
70	205	20/10s				210		
71	205	20/10s				210		
72	205	20/10s				210		
73	205	20/10s + 0/0/0s		0.75				Timeup = 55°C
74	205	20/10s + 0/0/0s + 0/0s				212		Cylindre 3 ^{ème} arraché
75	205	20/10s + 0/0/0s + 0/0s						Pression = 0
76	205	20/10s + 0/0/0s + 0/0s						Pression = 0
77	205	20/10s + 0/0/0s						
78	205	110/0s + 0/0/0s + 0/0s						Cylindre principal arraché
79	205	0/0/0s + 0/0/0s						Pression = 0
80	205							
81	205							
82	205							
83	205							
84	205							
85	205							
86	205							
87	205							
88	205							
89	205							
90	205							
91	205							
92	205							
93	205							
94	205							
95	205							
96	205							
97	205							
98	205							
99	205							
100	205							
101	205							
102	205							
103	205							
104	205							
105	205							
106	205							
107	205							
108	205							
109	205							
110	205							
111	205							
112	205							
113	205							
114	205							
115	205							
116	205							
117	205							
118	205							
119	205							
120	205							
121	205							
122	205							
123	205							
124	205							
125	205							
126	205							
127	205							
128	205							
129	205							
130	205							
131	205							
132	205							
133	205							
134	205							
135	205							
136	205							
137	205							
138	205							
139	205							
140	205							
141	205							
142	205							
143	205							
144	205							
145	205							
146	205							
147	205							
148	205							
149	205							
150	205							
151	205							
152	205							
153	205							
154	205							
155	205							
156	205							
157	205							
158	205							
159	205							
160	205							
161	205							
162	205							
163	205							
164	205							
165	205							
166	205							
167	205							
168	205							
169	205							
170	205							
171	205							
172	205							
173	205							
174	205							
175	205							
176	205							
177	205							
178	205							
179	205							
180	205							
181	205							
182	205							
183	205							
184	205							
185	205							
186	205							
187	205							
188	205							
189	205							
190	205							
191	205							
192	205							
193	205							
194	205							
195	205							
196	205							
197	205							
198	205							
199	205							
200	205							
201	205							
202	205							
203	205							
204	205							
205	205							
206	205							
207	205							
208	205							
209	205							
210	205							
211	205							
212	205							
213	205							
214	205</td							

Stratégie d'Injection

Presse à injection Battenfeld de 80 tonnes avec un contrôleur Allen Bradley

Technologie:	Direct AIM	Volume de la pièce:	19,2cm ³
Matériau:	Polypropylène	Diamètre du piston:	45mm
		Transfert si Pmax	0,3in

Stratégie d'injection

Presse à injection Battenfeld de 80 tonnes avec un contrôleur Allen Bradley

Technologie:	Rapid Steel II	Volume de la pièce:	19.2cm3
Matériel:	Polypropylène	Diamètre du piston:	45mm
		Transfert si Pmax:	0,3in

Echantillon	Pression de transfert réelle (lb/in ²)	Vitesse (in/s)	Temps / Pression Maintient (lb/in ² & s)	Dosage (in)	T° injection réelle (°C)	Refroidissement (pression nulle) (s)	Remarques	Autres
1	144	0.8		0	242		90	carotte seule
2	202				218			
3	240							
4	207							
5	217				218			
6	245			0.45				
7	309							
8	301	0.85						
9	338						80	
10	281		15/10s	0.5				
11	318							
12	422				215			
13	335							
14	361						70	
15	349			0.55				
16	364		30/10s		230			
17	379			0.58				
18	346							
19	307				230		50	
20	361	0.9						
21	357							
22	354			0.6				
23	395							
24	397	0.97						pause de midi
25	402							
26	400							
27	382							
28	405	1						
29	397				206			
30	407		40/10s					
31	420			0.65				
32	433				217			
33	433							
34	405							
35	405	1.05						
36	367							
37	377							
38	368							
39	362		55/10s					
40	400		55/10s+40/5s	0.7			30	
41				0.6	228			
42					210			
43	412							
44	425			0.75				
45	425							
46	431	1,1						
47	402							
48	425				215			
49	437							
50	440				217			
51	422			0.6				
52	453							
53	456	1.15						
54	470							
55	470			0.85				
56	430				212			
57	470							
58	467							
59	467	1						
60	466						20	
61	445			0.9				
62	445							
63	430							
64	456		70/10s+0.65s					
65	513	1.22						
66	460			0.91			15	
67	665			0.9				
68	592		70/13s+40/5s					
69	593							
70								
71								
72	458							
73			50/13s+40/7s		206			
74								
75	470			0.91				

75	597						
77							
78	524					205	
79	597	92/14s+60/7s					adhérence
80	458						
81	569	1.27				203	
82	453	1.26					
83	433						
84	450						
85	455						Max=0.29
86	478						
87	567						
88	455						
89							Pmax=200
90	568						Pmax=300
91	468						Pmax=400
92	516						Pmax=500
93	443				200		
94	481						
95	463	1.27					
96	453	98/14s					
97	514						
98	524						Pclamp=1150
99	531						Pclamp=1300
100							
101							Pclamp=1500
102	450	105/14s+70/7s+50/5s					
103		1.28					
104	466	1.29					
105	476	110/10s+70/7s+50/5s					Pclamp=1650
106	526	1.3					
107	460	1.32					Pclamp=1800
108	592				196		
109	692	1.34					Pclamp=2000
110							
111	534	120/10s+70/7s+50/5s					
112	470	1.36		0.92			
113	486	1.4					
114	473						
115	686			0.94			
116	478	1.45					Pclamp=2500
117	478	130/10s+70/7s+50/5s					
118	526						
119	517						Pclamp=2900
120	529	146/10s+70/7s+50/5s					Pmax=550
121	769						pièce concave
122	498						demie-lune
123	807						
124	369						Dernière pièce
125							

Stratégie d'injection

Presse à injection Battenfeld de 80 tonnes avec un contrôleur Allen Bradley

Technologie:	Rapid Steel II	Volume de la pièce:	19,2cm ³
Matériau:	Polyacrylique	Diamètre du piston:	45mm

Pression de fermeture = 1000 PSI

Vitesse de la vis = 50 tpm

Pression de transfert nominale = 500 (lb/in²)

76						
77						
78						
79		450/10s + 450/10s + 350/10s + 150/10s				
80						
81						
82						
83						
84		450/10s + 350/10s + 250/10s + 150/10s				
85						
86						
87						
88						
89		350/10s + 300/10s + 250/10s + 150/10s				
90						
91						
92						
93						
94						
95						
96						
97		450/10s + 400/10s + 250/10s + 150/10s				
98						
99		300/10s + 250/10s + 150/10s + 100/10s				
100						
101						
102						
103						
104						
105						
106						
107						
108						
109						
110						
111						
112						
113						
114						
115						
116						
117						
118						
119						
120						
121		350/10s + 250/10s + 200/10s + 150/10s				
122						
123						
124						
125						
126						
127						
128						
129						
130						
131						
132		200/10s + 050/10s + 000/10s + 000/10s				
133						
134						
135						
136						
137		250/10s + 050/10s + 000/10s + 000/10s				
138						
139						
140						
141						

Zone hachurée: Polyéthylène

142	$250/5s + 350/10s + 300/10s + 300/10s$				Matériel ABS
143					
144					
145					
146					
147					
148					
149	$450/5s + 250/5s + 150/5s + 300/10s$				
150					
151					
152					
153	$350/5s + 250/5s + 150/5s + 300/10s$				
154					
155					
156					
157					
158					
159					
160					
161	$450/5s + 250/5s + 150/5s + 300/10s$				
162					
163					
164					
165					
166					
167	$500/5s + 300/5s + 150/5s + 300/10s$				
168					
169					
170	$550/5s + 350/5s + 150/5s + 300/10s$				
171					
172					
173					
174					
175	$600/5s + 400/5s + 200/5s + 300/10s$				
176					
177					
178	$650/5s + 450/5s + 250/5s + 300/10s$				
179					
180					
181		217 201 195 175			
182					
183	$700/5s + 500/5s + 300/5s + 300/10s$				
184					
185		217 208 190 175			
186					
187		217 210 190 175			
188					
189					
190					
191					
192	$800/5s + 600/5s + 400/5s + 300/10s$				

Stratégie d'jection

Presse à injection Battenfeld de 80 tonnes avec un contrôleur Allen Bradley

Technologie:	Rapid Steel II	Volume de la pièce:	19.2cm3
Matériau:	Polypropylène	Diamètre du piston:	45mm
		Transfert si Pmax:	0.25 in

