



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/8539>

To cite this version :

Robert DUCHAMP, Patrice DUBOIS, Améziane AOUSSAT - Prototypage rapide, généralités - 2000

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



PROTOTYPAGE RAPIDE

Généralités

par Patrice DUBOIS Améziane AOUSSAT Robert DUCHAMP

Laboratoire Conception de Produits Nouveaux et Innovation

à l' Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris

Sommaire

1. L'ENVIRONNEMENT DU PROTOTYPAGE RAPIDE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
2. DEFINITION DU PROTOTYPAGE RAPIDE.....	5
3. LES DIFFERENTES CATEGORIES DE MAQUETTE ET DE PROTOTYPE.....	6
4. LES DONNEES NUMERIQUES	8
5. LES OUTILS DU PROTOTYPAGE RAPIDE	11
5.1. LES PROCEDES DE FABRICATION PAR COUCHES	11
5.1.1. Généralités.....	11
5.1.2. Les procédés Liquide / Solide.....	12
5.1.3. Les procédés Solide / Solide	13
5.1.4. Les procédés Poudre / Solide	16
5.1.5. Les machines disponibles	17
5.2. LE REVERSE ENGINEERING.....	19
5.3. LES POST-TRAITEMENTS	22
5.3.1. La duplication des pièces par prise d'empreinte	22
5.3.2. La fonderie.....	23
6. L'OUTILLAGE RAPIDE	24
6.1. FRITTAGE LASER DE METAL.....	25
6.2. METALLISATION SUPERFICIELLE	25
6.3. AJOUT DE RESINE CHARGEE.....	25
6.4. DECOUPAGE DE FEUILLETS METALLIQUES	26
7. ORGANISATION	26
8. BIBLIOGRAPHIE :	26

Mondialisation des marchés, concurrence de plus en plus vive, réactivité de plus en plus en grande de la part des entreprises... Dans ce contexte, une entreprise qui souhaite conserver et/ou acquérir de nouvelles parts de marché doit :

- Maîtriser ses coûts ;
- Améliorer la qualité des produits et des études ;
- Réduire ses délais de développement.

Pour répondre à ces critères essentiels de réussite, les entreprises ont dû adapter leur processus de conception, mais aussi tenir compte de l'émergence de nouvelles technologies.

Ainsi, il devient crucial pour les entreprises de disposer d'outils permettant de matérialiser rapidement les produits en cours de développement, afin de détecter au plus tôt les erreurs de conception, de tester et de valider par l'ensemble des acteurs les différentes solutions techniques retenues.

C'est le champ de recherche du prototypage rapide.

1. L'environnement du prototypage rapide

Dans le contexte de la mondialisation des marchés, concurrence de plus en plus vive, réactivité de plus en plus en grande de la part des entreprises... Dans ce contexte, une entreprise qui souhaite conserver et/ou acquérir de nouvelles parts de marché doit :

- Maîtriser ses coûts : 80 % des coûts (de développement et d'industrialisation) sont engagés dès les phases amont de la conception (10 à 15 % du temps total). Par conséquent, les choix de conception doivent être validés au plus tôt,

- Améliorer la qualité des produits et des études : le produit doit répondre à des fonctions de signe, d'usage, d'échange mais aussi de productibilité : il est nécessaire de détecter au plus tôt les éventuelles erreurs de conception générant des modifications coûteuses et des retards,

- Réduire ses délais de développement : selon le cabinet McKinsey, un retard de six mois de mise à disposition du produit sur le marché peut entraîner une réduction des profits de 33 %, alors qu'un dépassement du budget des études ne ferait perdre que 5 %. Face aux fluctuations du marché, une entreprise qui souhaite être compétitive doit être en mesure de développer plus rapidement ses nouveaux produits.

Pour répondre à ces critères essentiels de réussite, les entreprises ont dû adapter leur processus de conception, mais aussi tenir compte de l'émergence de nouvelles technologies.

On notera l'apparition en 1986, aux Etats Unis de l'ingénierie concurrente (*concurrent engineering*). Cette approche permet de prendre en compte l'ensemble des étapes du cycles de vie d'un produit (voir figure 1) et de développer conjointement le produit et ses moyens de production.

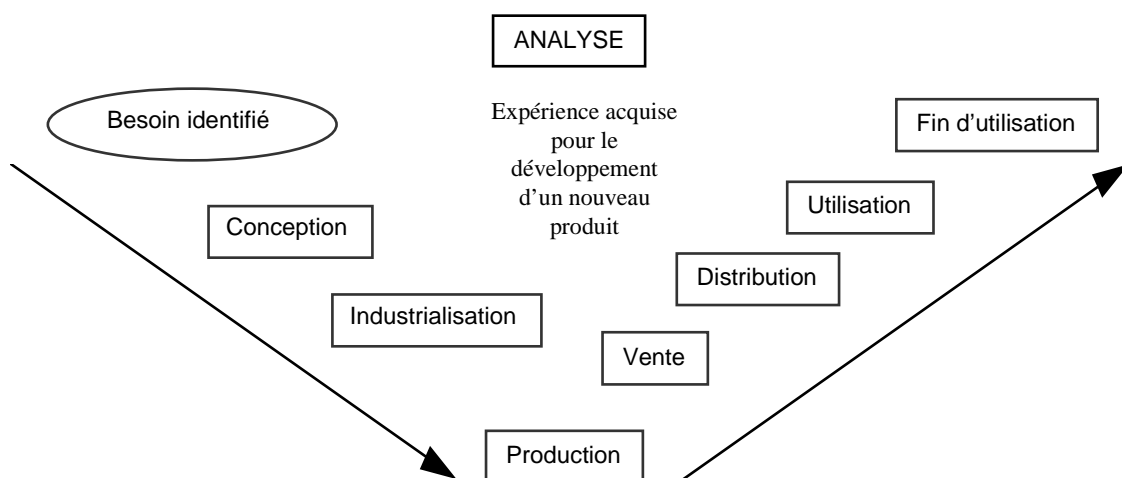


Figure 1 : le cycle de vie d'un produit

Quatre grandes notions caractérisent l'ingénierie concurrente [1] :

- une notion de simultanéité : l'engagement en parallèle des activités (et des tâches), des services (et des métiers) permet de diminuer les gaspillages et les pertes de temps notamment en évitant les temps de passages trop long,
- une notion de concurrence : par l'exploration de différentes variantes d'un produit afin de retenir la solution la mieux adaptée au problème posé,
- une notion de découpage du projet en sous projets ayant des interfaces bien identifiées,
- une notion d'intégration : concevoir un produit nécessite de faire appel à de multiples compétences métiers (Hommes du marketing, ergonomes, électroniciens, mécaniciens, méthodes...) regroupées au sein d'un groupe projet présent tout au long du cycle de vie du produit.

Ainsi, dans le contexte décrit précédemment, il devient crucial pour les entreprises de disposer d'outils permettant de matérialiser rapidement les produits en cours de développement, afin de détecter au plus tôt les erreurs de conception, de tester et de valider par l'ensemble des acteurs les différentes solutions techniques retenues.

C'est le champ de recherche du prototypage rapide.

2. Définition du prototypage rapide

Le prototypage rapide regroupe un ensemble d'outils qui, agencés entre eux, permettent d'aboutir à des objets de représentation intermédiaire de la conception de produits : les modèles numériques (au sens géométrie du modèle), les maquettes, les prototypes et les pré-séries [2, 3, 4, 5].

Ces modèles contribueront à valider les différentes fonctions que doit remplir le produit (fonctions de signe, d'usage, d'échange et de productibilité).

Le prototypage rapide intègre trois notions essentielles que sont le temps, le coût et la complexité des formes.

- Temps : l'objectif du prototypage rapide est de réaliser rapidement les modèles dans un but de réduction des temps de développement des produits,
- Coût : le prototypage rapide permet de réaliser des prototypes sans qu'il soit nécessaire de recourir à des outillages coûteux tout en garantissant les performances du

produit final. On sera donc en mesure d'explorer différentes variantes du produit en cours d'élaboration afin de retenir la solution la plus appropriée.

- Complexité des formes : les machines procédant par ajout de matière sont capables de réaliser des formes extrêmement complexes (inclusion, cavité...) irréalisables par des procédés tels que l'usinage par exemple.

Les moyens informatiques intervenant aujourd'hui dans le prototypage rapide sont :

- le reverse engineering (systèmes d'acquisition de formes associés aux logiciels de reconstruction des surfaces),
- la conception assistée par ordinateur,
- les procédés de fabrication par ajout et par enlèvement de matière,
- des post-traitements tels que la duplication par moule au silicone, la fonderie à modèle perdu...

3. Les différentes catégories de maquette et de prototype

La conception de produits requiert deux grands types de représentation physique :

- des représentations permettant de visualiser l'objet,
- des représentations permettant de valider les fonctions (par exemple sous la forme de tests ergonomiques...).

A chaque niveau d'avancement du développement du produit correspond un (des) type(s) de maquette et/ou de prototype(s) (voir figure 2) [6] :

Maquette ou modèle de conception

Pour juger la forme d'un objet (par exemple l'aspect esthétique), il n'est pas toujours utile que le matériau du modèle soit identique à celui du produit final. On privilégiera l'emploi de matériaux peu coûteux. Avec ces modèles appelés *maquette ou modèle de conception*, on pourra juger l'esthétisme du futur produit, son ergonomie, mais aussi l'employer pour réaliser des études de marché. Il convient de noter que certains métiers tels que celui de designer préfèrent travailler au travers de maquette physique.

Prototype géométrique

Au cours d'un développement de produit, les bureaux d'études doivent effectuer des modifications numériques de forme (CAO), soit directement sur le modèle physique. Le *prototype géométrique* a pour vocation de vérifier la conformité des formes (points de tangences, raccordements des surfaces) et des dimensions avec le modèle numérique de CAO.

Lorsque le prototype est suffisamment solide (on pourra employer les techniques de duplication par moulage au silicone par exemple), il est aussi utilisé par les moulistes en tant que support d'informations complémentaires (au modèle numérique) pour la conception et la réalisation des moules.

Prototype fonctionnel

Le *prototype fonctionnel* permet, par ses caractéristiques « bonne matière » de valider le produit, d'optimiser ses principes d'assemblage et de fonctionnement (tels que le clippage d'une pièce). La validation de ce prototype permet de lancer la conception des outillages (travail du bureau des méthodes).

Prototype technologique

Les *Prototypes technologiques* « simili bonne matière » ou « bonne matière » sont fabriqués avec un matériau conforme à celui de la fabrication série. Ces prototypes technologiques permettent de réaliser des tests mécaniques, thermiques... Fabriqués à cinquante exemplaires environ, ils contribuent à la validation du produit, aux choix des opérations de fabrication, ainsi que des moyens de production.

Présérie

Enfin, les prototypes de *Préséries* constituent l'ultime étape avant la fabrication en série. Ceux-ci sont fabriqués à plusieurs centaines d'exemplaires et peuvent être réalisés suivant le procédé de fabrication série. Les outillages peuvent être fabriqués avec l'aide des techniques de prototypage rapide. Ceux-ci permettent de déterminer et de valider les différents paramètres du processus de fabrication industriel (temps d'injection, temps de refroidissement dans un moule d'injection) contribuant à la mise en place et aux réglages des outils de la séries.

	Propriétés	Fonction au cours du développement
Maquette de Conception (1 pièce)	Tout matériau (peu cher) Qualités d'esthétique	-visualisation du dessin -tests d'ergonomie -étude de marché -définition des options technologiques de base
Prototype géométrique (1 pièce)	Matériau bon marché suffisamment solide Géométrie exacte	-faisabilité -tests d'emballage -modèle pour moules et outillages de production
Prototype fonctionnel (2 à 5 pièces)	Proche bonne matière Fonction de base	-tests fonctionnels -optimisation des principes d'assemblage et de fonctionnement -conception des outils et outillages
Prototype technologique (5 à 50 pièces)	Proche bonne matière ou bonne matière Fabrication proche des moyens de séries	-validation et choix des opérations de fabrication et moyens de production -fabrication des outils et des outillages
Préséries (jusqu'à 500 pièces)	Bonne matière Réalisé suivant le procédé de fabrication en série	-détermination et validation des paramètres du process -βtest -mise en place et réglage de l'outil de production série

Figure 2 : types de maquettes et de prototypes utilisés au cours du développement d'un produit d'après [5]

4. Les données numériques

Les données numériques ont un rôle centrale dans le prototypage rapide. Dans un processus de prototypage rapide, il est essentiel que les transferts de données entre les différents outils soient correctement effectués afin d'éviter toute perte d'information (voir figure 3).

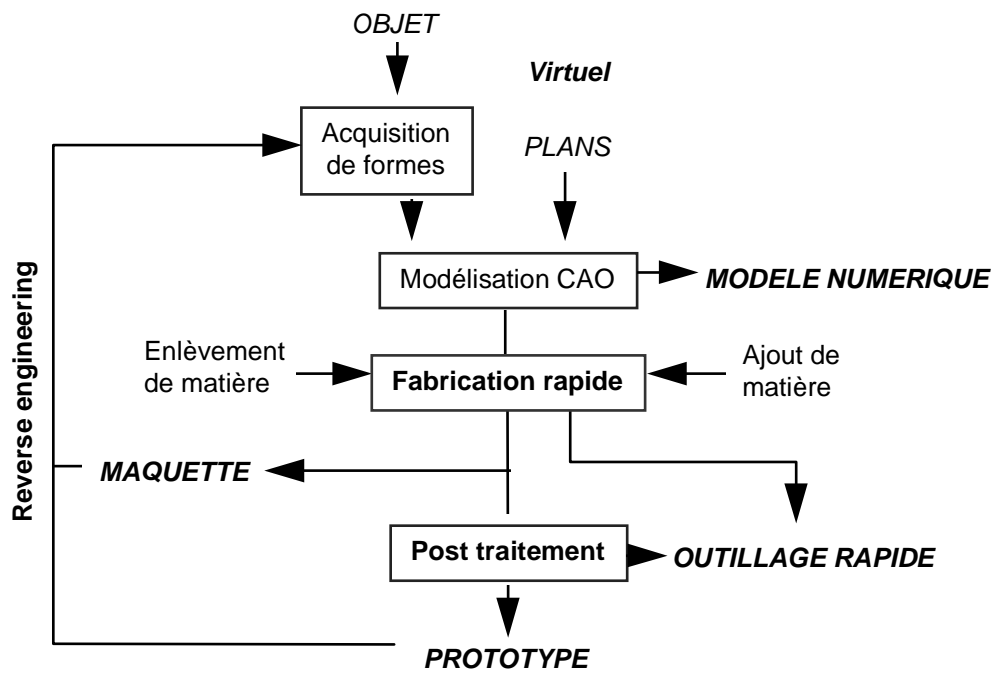


Figure 3 : processus de prototypage rapide

Différents types de données sont utilisées au sein du processus :

Les outils de numérisation (système d'acquisition de formes) ont pour objectif de recueillir des informations sur la topologie de l'objet à reproduire. Celles-ci se présentent sous la formes de nuages de points (dont on connaît les coordonnées x, y, z) aux formats ASCII ou Binaire. Ces nuages de points, traités par les logiciels de reconstruction de surfaces, permettent d'aboutir à des modèles surfaciques (Béziers, NURBS...) exportables aux formats IGES, VDA, SET... ou polyédriques (B-rep facettisé, STL)

Le format STL (pour stéréolithographie) introduit par la société 3D Systems en 1987 [5], permet de décrire un objet sous la forme d'un polyèdre à facettes triangulaires (voir figure 4). Aujourd'hui adopté par l'ensemble des fabricants de machines de prototypage rapide, il offre l'avantage d'être facilement généré par l'ensemble des outils CAO.

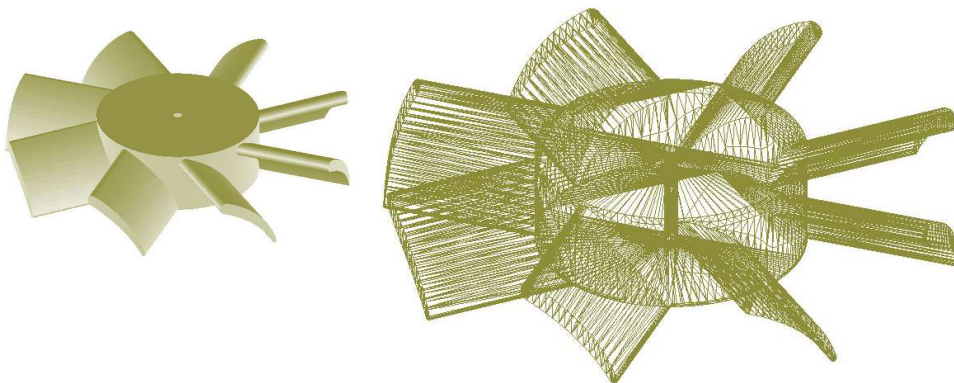


Figure 4 : Rendu réaliste d'une hélice de ventilateur, format STL (Image ENSAM).

Les surfaces d'un objet (issues d'une conception surfacique ou volumique) sont remplacées par des facettes approximant la définition géométrique initiale. Les incertitudes générées peuvent être minimisées par l'augmentation du nombre de facettes (les erreurs sont caractérisées par un paramètre « d » représentant la distance des points de la surfaces à la facette triangulaire associée.) (voir figure 5) [7].

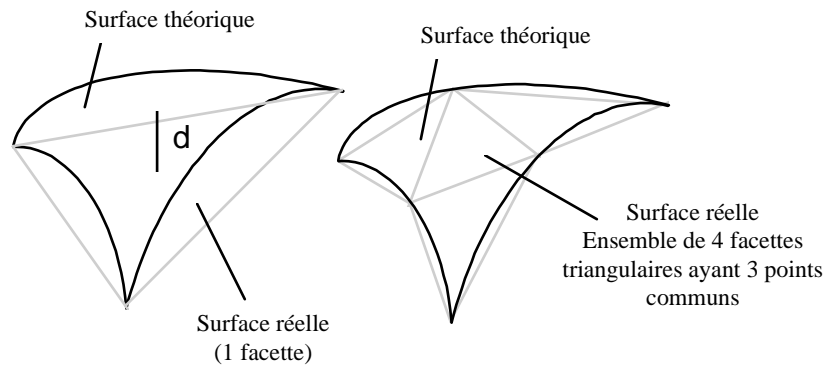


Figure 5 : Augmentation de la précision par multiplication du nombre de facettes

Sur cet aspect, de nombreux travaux sont en cours sur la simplification des représentations polyédriques sans affecter la forme de l'objet (diminution du nombre de facettes...).

Le format STL nécessite que la modélisation surfacique soit parfaite. Les surfaces doivent être parfaitement fermées et orientées. Si ces deux conditions ne sont pas remplies, le fichier STL sera de mauvaise qualité, voire inexploitable ultérieurement par la machine de prototypage rapide. Concernant la modélisation volumique, le modèle créé est réalisé à partir d'entités géométriques volumiques et par opérations booléennes par conséquent parfaitement assemblées.

De nombreux logiciels sont commercialisés : ils ont pour vocation de réparer les fichiers STL défectueux, afin d'éviter de repasser par une phase de CAO pour modifier et corriger le modèle.

Il est à noter qu'aujourd'hui, dans le domaine de l'usinage, les logiciels de programmation lisent en données d'entrée les fichiers STL. Les algorithmes de calcul des trajectoires d'usinage sont plus robustes et fiables comparés à des formats de types NURBS ou Bézier par exemple.

5. Les outils du prototypage rapide

Dans ce chapitre, nous présenterons les procédés de fabrication par couches, le reverse engineering et les post-traitement les plus couramment appliqués.

Dans le cadre de la fabrication rapide, on distingue deux voies principales : les procédés basés sur l'ajout de matière ; et ceux basés sur l'enlèvement de matière. Concernant ces derniers, nous faisons référence au domaine de l'usinage rapide, du découpage par fil chaud... Ces technologies ayant déjà été traitées, le lecteur pourra se référer à l'ouvrage suivant [8].

5.1. Les procédés de fabrication par couches

5.1.1. Généralités

Les procédés de fabrication par couches utilisent tous le même principe de fabrication. L'objet à réaliser est conçu en utilisant la conception assistée par ordinateur ou les outils de numérisation, puis il est facettisé au format STL. L'opération suivante consiste à définir les sections de l'objet à réaliser par un découpage successif de plans parallèles. La distance entre chaque section correspond à l'épaisseur d'une couche. Pour reconstituer l'objet, les sections sont empilées séquentiellement les une sur les autres (voir figure 6).

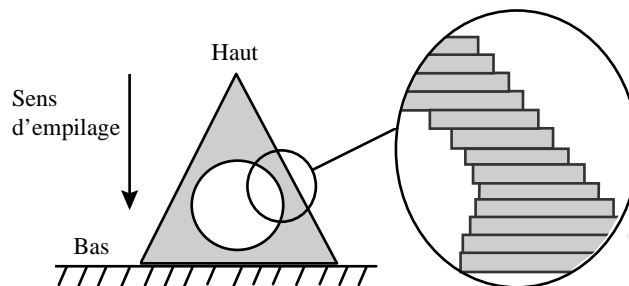


Figure 6 : Principe de construction d'un objet par empilage séquentiel de couches

Il est à noter que la qualité d'un fichier STL est un facteur important : un objet dont les surfaces jointives sont discontinues présentera sur le fichier STL des trous. En effet, le fichier STL découpé par des plans parallèles matérialisera des sections à contours polygonaux ouverts pour lesquels les notions de contours intérieur ou extérieur seront absentes. Aussi, on pourra avoir recours aux logiciels spécifiques permettant de réparer les fichiers STL défectueux évitant un passage obligé vers la CAO [9].

Selon les procédés, les matériaux employés peuvent être des résines liquides photosensibles (acrylates, époxydes), des matériaux en feuilles (métaux, papier, plastiques) des matériaux thermofusibles, des cires ou des poudres métalliques, plastiques, céramiques. Il est important de préciser que ces procédés ne permettent pas de disposer de modèle classé "bonne matière" (matière qui est utilisée en production finale). Les caractéristiques mécaniques diffèrent de celles d'un modèle de production. Par conséquent, une phase de duplication des modèles dans le matériau final peut s'avérer nécessaire.

Pour présenter les différents principes de procédés de fabrication par couches, nous reprenons une typologie proposée par François Nonnemacher [10]. Elle caractérise l'état initial et final du matériau employé selon trois catégories :

Les procédés Liquide / Solide,
 Solide / Solide,
 Poudre / Solide.

5.1.2. Les procédés Liquide / Solide

Les procédés Liquide / Solide utilisent le principe de la stéréolithographie. Ils se caractérisent par l'emploi d'une résine photosensible liquide qui se solidifie sous l'action d'une source lumineuse [11].

En l'absence de rayonnement, la solidification cesse instantanément. Il est possible de classer ces procédés en deux catégories selon le mode d'éclairage :

- solidification par faisceau laser (dite stéréolithographie point par point),
- solidification par flashage -utilisation d'un masque et d'une lampe à ultra violet)- (dite stéréolithographie par couches entières).

Stéréolithographie point par point

Les sources lumineuses employées sont de type laser à Helium-Cadmium (HeCd-325nm) ou laser argon ionisé (Ar^{+} - 351 et 363 nm). Ces derniers sont plus puissants autorisant une vitesse de fabrication plus élevée. Le faisceau laser est dévié par des miroirs permettant le balayage du faisceau laser dans le plan X-Y. La solidification de chaque section du modèle est réalisée par balayage point par point (voir figure 7).

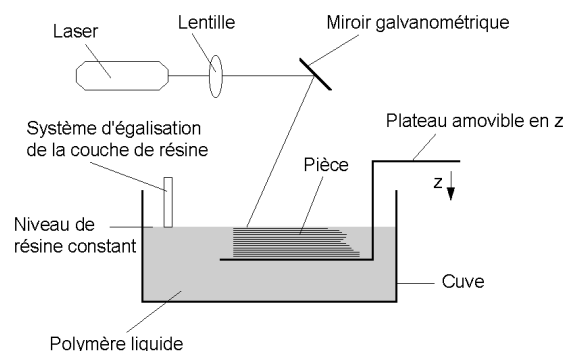


Figure 7 : Principe de la stéréolithographie

Stéréolithographie par couches entières

La source lumineuse est une lampe à ultra violet. Chaque section du modèle est éclairée par flashage au travers d'un masque (principe du pochoir) (voir figure 8) [12].

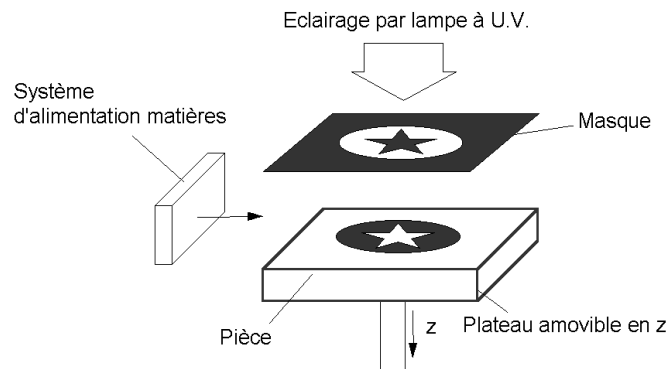


Figure 8 : principe du flashage de couches

Points communs aux deux procédés

Ces deux procédés utilisent des résines photopolymérisables. Les premières résines utilisées étaient uniquement à base d'acrylate. Aujourd'hui les résines époxydes sont les plus employées. Elles présentent l'avantage de posséder un faible retrait de la matière lors de la polymérisation, et d'être utilisable en tant que cire perdue dans le cadre de la fonderie (voir § 5.3). Plus précises que les acrylates, elles sont néanmoins sensibles à l'humidité posant certains problèmes pour des pièces à parois fines [13]. Les résines peuvent aussi recevoir une « charge » améliorant leurs caractéristiques mécaniques et thermiques.

Pour des surfaces en contre dépouilles, le modèle peut nécessiter selon le procédé employé la fabrication de supports.

L'épaisseur d'une couche est déterminée par le niveau de viscosité de la résine (inférieur au dixième de millimètre). La précision peut atteindre le 0,1% en millimètre.

Certaines pièces nécessitent l'utilisation d'un post traitement pour une polymérisation à coeur (en effet le faisceau laser déclenche la polymérisation; celle-ci se poursuit ultérieurement. Le post traitement permet de l'accélérer et de la stopper).

5.1.3. Les procédés Solide / Solide

Les procédés Solide / Solide se déclinent en trois classes :

- Extrusion et laminage d'un filament,
- Découpage et collage de strates,
- Projection de matières.

Extrusion et laminage d'un filament

Le principe consiste à extruder un filament de matière à l'aide d'une tête se déplaçant dans le plan X-Y. La tête est constituée d'une chambre chauffant le matériau au-dessus de son point de fusion, et d'une buse qui permet de déposer et de laminer le filament entre la couche précédente et sa surface plane (voir figure 9) [14].

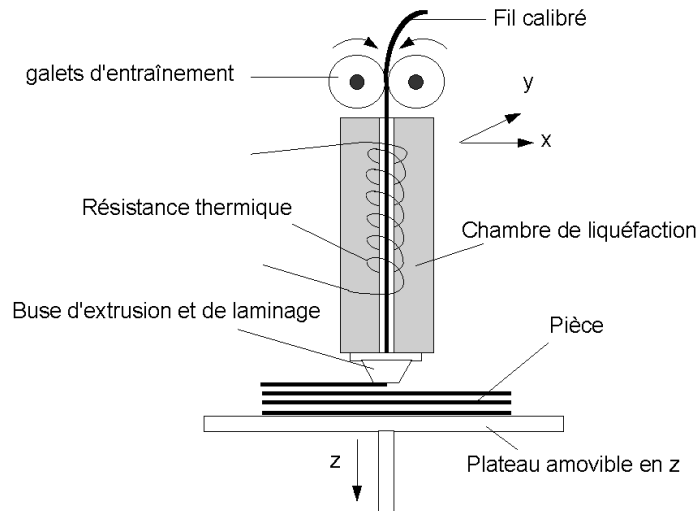


Figure 9 : Principe du procédé FDM de Stratasys [14]

Le filament au contact de la couche précédente se solidifie instantanément. Chaque couche est remplie par des balayages successifs de la tête.

La tête peut être constituée de deux buses : l'une servant à la fabrication du modèle, l'autre à la fabrication des supports.

Les matériaux employés sont des thermofusibles (ABS, ABS médical, élastomère, PA...) et de la cire pour un usage en fonderie à modèle perdu.

Aucun traitement spécifique n'est à prévoir.

Découpage et collage de strates

Le principe repose sur le découpage des sections de pièces dans des feuilles ou des plaques de matériaux calibrés. Chaque section réalisée est ensuite empilée manuellement ou automatiquement. L'assemblage est réalisé par collage, par fusion des matériaux ou mécaniquement [15,16].

Le découpage peut être réalisé avec un laser, un couteau, une fraise (fraisage CN), un jet d'eau...

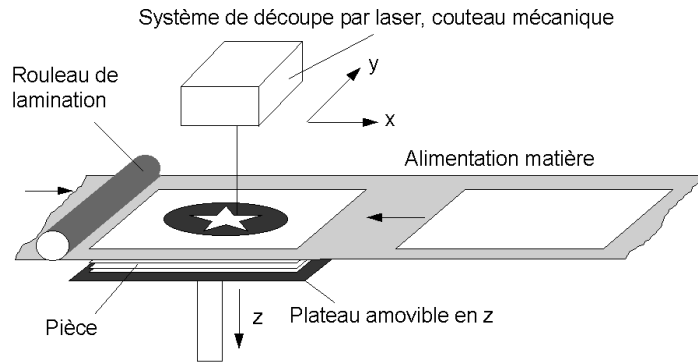


Figure 10 : principe de la fabrication par découpage et collage de strates

Ce type de technologie peut présenter certaines difficultés pour réaliser des formes creuses.

Tous les matériaux se présentant sous la forme d'une feuille peuvent théoriquement être employés. Il faut s'assurer de la compatibilité avec le mode de découpage et d'assemblage.

Projection de matières

Le principe utilisé peut être comparé avec la technologie des imprimantes à jet d'encre. Une tête se déplaçant dans le plan X-Y projette des gouttes de matière liquide (température au-dessus du point de fusion) (voir figure 11) [17].

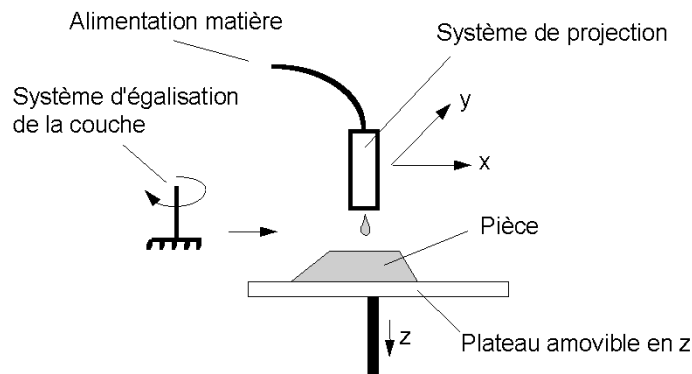


Figure 11 : principe de fabrication de couches par projection

Simultanément les supports nécessaires à la fabrication du modèle sont fabriqués dans de la cire (nécessitant de doubler le système de projection).

Les matériaux utilisables sont : la cire et les thermofusibles. Les supports sont supprimés par dissolution.

5.1.4. Les procédés Poudre / Solide

Nous pouvons classer les procédés Poudre / Solide selon deux catégories bien distinctes:

- Frittage de poudre,
- Projection de liant.

Frittage de poudre

Le principe est analogue à celui de la stéréolithographie: la résine photopolymérisable est remplacée par de la poudre et le laser argon (ou HeCd) par un laser infrarouge (CO₂). Le laser balaye la surface dans le plan X-Y provoquant une agglomération ou une fusion du matériau (voir figure 12). La poudre est préchauffée afin que le laser apporte juste l'énergie nécessaire pour provoquer la fusion. Un plateau supportant le bac rempli de poudre descend d'une épaisseur de couche après chaque passage.

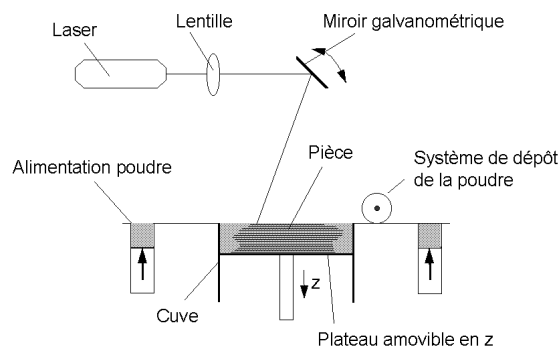


Figure 12 : Principe du frittage de poudre par laser

Divers types de poudre sont proposés selon les constructeurs de machine [18]:

- plastique (Nylon, ABS, polycarbonate, Nylon composite, polystyrène)
- métaux
- céramique
- cire
- sable

Les pièces fabriquées par ce type de procédé sont poreuses. Selon l'utilisation souhaitée, les constructeurs de machine proposent de réaliser des infiltrations de matière afin d'accroître les caractéristiques mécaniques des modèles fabriqués.

La société EOS propose une infiltration de cire pour des pièces fabriquées en polystyrène (pièces destinées principalement à la fonderie à modèle perdu).

Pour l'obtention de pièces métalliques, la société DTM propose pour diminuer la porosité de réaliser des infiltrations de cuivre en étuve.

Selon le type de pièces réalisées, et selon les technologies de fabrication, il peut être nécessaire de fabriquer simultanément des supports pour les parties en contre-dépouilles.

Projection de liant

Le principe repose sur la projection d'un liant liquide à la surface d'une cuve remplie de poudre. La projection est effectuée grâce à une tête se déplaçant dans le plan X-Y [19]. A l'issue de la fabrication d'une section d'objet, le plateau support descend d'une épaisseur.

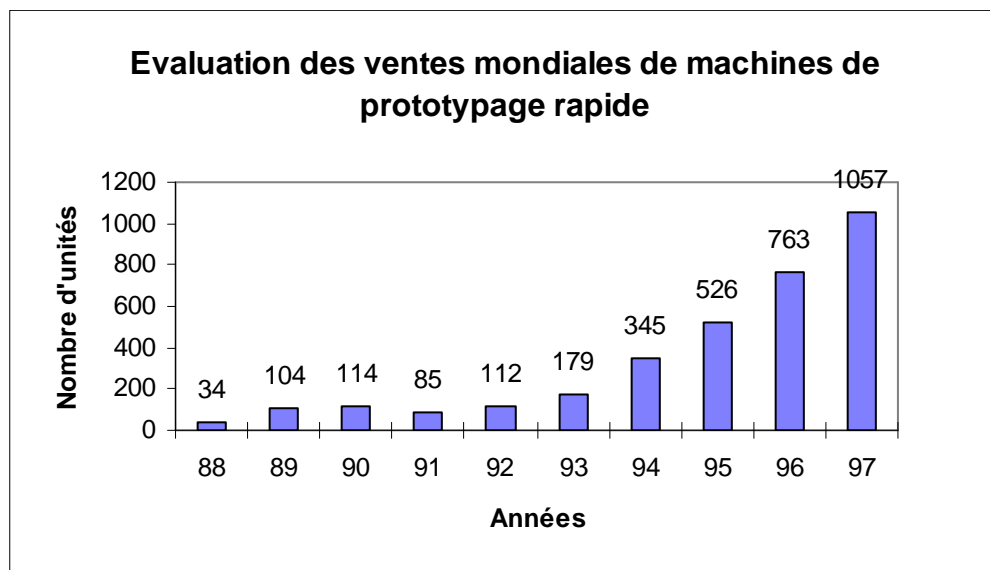
Ce type de fabrication peut nécessiter un traitement thermique afin d'évacuer le liant et fritter la poudre. Les pièces fabriquées peuvent présenter un retrait lors du frittage.

5.1.5. Les machines disponibles

Données économiques

La société 3D systems a commercialisé en 1988 la première machine de prototypage rapide. Depuis cette date, les ventes n'ont cessé d'augmenter.

On dénombre aujourd'hui 3289 systèmes¹ dans le monde (toutes technologies confondues). Le nombre de machines vendues ne cesse de grimper. La barre des 1000 machines vendues en une année a été dépassée au cours de l'année 1997 (1057 machines). Il est à noter qu'en France au mois de Juillet 1998, l'Association Française de Prototypage Rapide comptabilisait plus de 140 machines en France.



¹ Source Wohlers Associates, mars 1997

Figure 13 : Estimation des ventes de machines de prototypage rapide (source Wolhers Associates)

A l'origine, les principaux utilisateurs des procédés de fabrication par couches furent les domaines liés à l'automobile et à l'aéronautique. En 1998, ceux-ci ne représentent plus que 17,6 % et 12,6 % respectivement (voir figure 14)

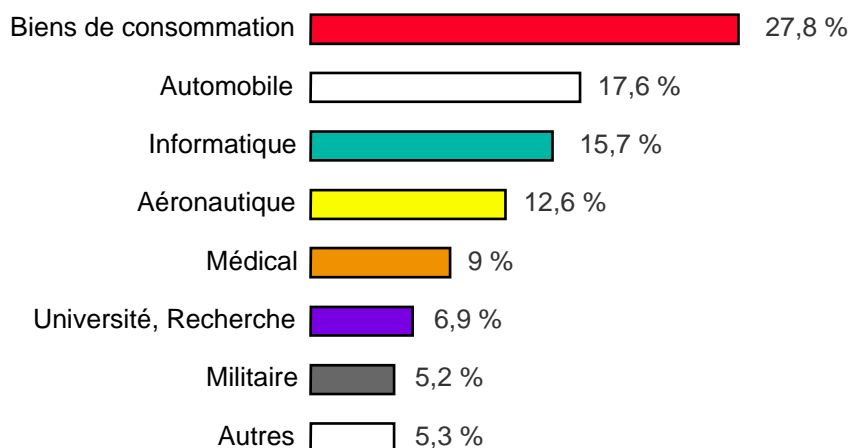


Figure 14 : Domaines d'application de la fabrication par couches

(source Industries et Techniques n° 796, 1998)

Les constructeurs

Constructeurs	Nom du procédé	Procédé	Matériaux
<i>Etats Unis</i>			
3D Systems	Stéréolithography Apparatus (SLA)	Stéréolithographie laser	résine acrylate, époxy
Helisys	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Laminage, découpe laser	feuille papier, plastique
Stratasys	Fused Deposition Modeling (FDM)	extrusion et laminage	ABS, ABS médical, cire perdue
DTM	Selective Laser Sintering (SLS)	frittage laser par fusion	nylon, métal, cire, polycarbonate
Sanders Prototype	Model Maker	Jet de matière	thermofusible
Soligen	Direct Shell Print Casting		céramique
ExtrudHone	Rapid Tooling System	Jet de liant	céramique, métal
Aeroflex	Aeroflex Solid Imager	Stéréolithographie laser	résine acrylate, époxy

Z-Corporation		Jet de liant	poudre cellulosique
3D systems	Multi Jet Manufacturing	Jet de matière	cire thermofusible

Europe

EOS (Allemagne)	STEREOS	Stéréolithographie laser	Résine acrylate, époxy
EOS (Allemagne)	EOSINT	Frittage de poudre par fusion	nylon, polystyrène, Electrolux (alliages métalliques)
Cubital (Allemagne/Israël)	Solid Ground Curing (SGC)	Stéréolithographie par masque	Résine Acrylate, cire
Fockele & Schwarze (Allemagne)	LMS	Stéréolithographie laser	
Laser 3D (France)	Stéréophotolithography (SPL)	Stéréolithographie laser	Résine acrylate chargée billes de verre, chargée céramique
OptoForm		Stéréolithographie	pâtes photopolymérisables
CharlyRobot(France)	Stratoconception	Découpe par fraisage, jet d'eau,...	tous types de matériaux en feuilles

Japon

CMET (Mitsubishi)	SOUP	Stéréolithographie laser	Résine époxy
D-MEC (JSR/Sony)	SCS	Stéréolithographie laser	Résine acrylate
Kira Corp	Selective Adhesive & Hot Press Process	Laminage et couteau	Papier
Teijin Seiki	Solid Forming System (Soliform)	Stéréolithographie laser	Résine acrylate chargée billes de verre.
Denken Engineering	Solid Laser Plotter (SLP)	Stéréolithographie laser	Résine acrylate
Meiko Corp	Meiko	Stéréolithographie laser	Résine acrylate
Mitsui Zosen	COLAMM	Stéréolithographie laser	-

5.2. Le reverse engineering

Le terme anglais « reverse engineering » se décline en français sous différents termes : ingénierie inverse, rétro conception, rétro-ingénierie..., numérisation tridimensionnelle.

La numérisation dans le prototypage rapide a deux objectifs [20] :

- partant d'une forme physique, définir un modèle de CAO;

- partant de la fabrication ou d'une duplication rapide (issue d'une conception assistée par ordinateur dans lequel le modèle est défini) comparer la géométrie du modèle physique à celle du modèle numérique (théorique).

Les outils de numérisation (ou digitalisation) de formes tridimensionnelles deviennent de plus en plus incontournables dans la chaîne numérique du prototypage rapide. Le principal intérêt des techniques de reverse engineering réside dans le gain de temps de la modélisation de l'objet. Une étude commandée par le *US AIR LOGISTIC CENTER (USA)* a montré qu'il était possible de réduire de 50 à 60 % le temps de modélisation d'un objet (un élément de structure d'un avion) en pratiquant le reverse engineering comparé à la démarche classique de CAO (création manuelle) [21]. Aussi, la pratique du reverse engineering s'est généralisée dans l'industrie, tout particulièrement dans le domaine automobile pour des maquettes design, mais aussi pour la duplication de moules de fabrication ou d'objet dont la définition numérique ou les plans papiers sont indisponibles.

L'utilisation de ces matériels permette l'acquisition de formes aussi diverses que des ensembles architecturaux, des statues, des formes humaines, des objets usuels, des jouets..., mais surtout des maquettes (réalisées à la main) issues des bureaux de design et de style. Les bureaux d'études disposant de ces maquettes doivent le plus rapidement possible les reconstruire numériquement. Par conséquent, la progression au sein des bureaux d'études est en forte augmentation accompagnée d'une offre croissante des matériels dont les coûts ont fortement chuté, et donc plus accessibles.

Le principe des systèmes d'acquisition repose sur la prise de points issus de la surface de l'objet à numériser (voir figure 15).

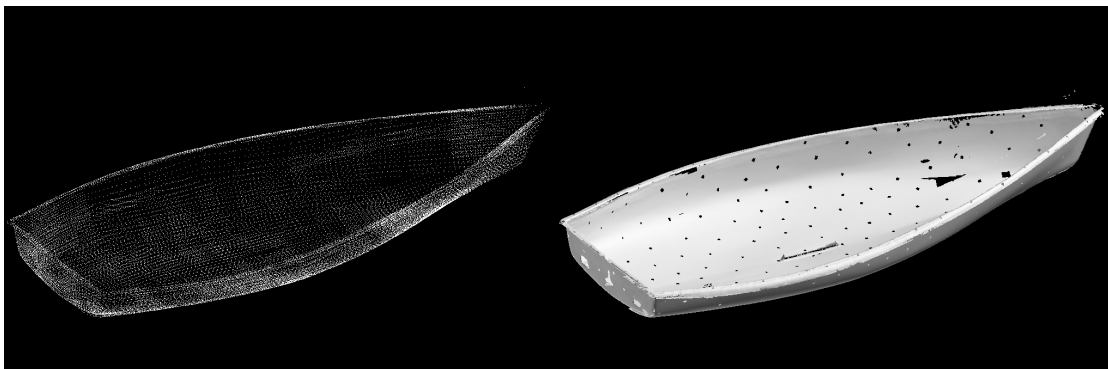


Figure 15 : Résultats d'une numérisation de bateau (photographies ENSAM)

Ces ensembles de points sont traités au travers de logiciels de Reconstruction de Surfaces (non traités dans ce document) permettant de définir la surface de l'objet par des entités mathématiques (carreaux de Béziérs, B-splines, NURBS). Exporté vers la CAO, l'objet défini numériquement pourra être modifié, adapté à son environnement, à son architecture interne. Les services marketing sont aussi fortement intéressés par ce type

d'approche. En effet, l'objet numérique peut être intégré dans un environnement virtuel grâce aux logiciels d'images de synthèse. Disposant d'images ou de films cinématographiques, des études sont réalisées afin de vérifier rapidement la pérennité du produit alors que celui-ci est encore virtuel.

Des interfaces spécifiques permettent à partir du nuage de points de réaliser un maillage STL de l'objet. Par conséquent, Le fichier peut être exploité par les différentes machines de prototypage rapide, ainsi que les logiciels de programmation d'usinages capables de traiter ce type de fichier. On dispose rapidement de plusieurs répliques conformes à l'originale.

La qualité d'un système d'acquisition de formes tridimensionnelles se caractérise par les paramètres suivant [22] :

- La résolution : espacement des points mesurés dans une direction donnée.
- La précision : erreur maximale entre la position mesurée d'un point et sa position exacte.
- La répétabilité : écart maximal entre deux mesures successives d'un même point.
- La rapidité de mesure : capacité à mesurer toutes les caractéristiques d'un point en un temps donnée.
- La rapidité d'acquisition : temps nécessaire pour obtenir une information exploitable.
- Le nombre de degrés de liberté : nombre minimum d'axes de déplacements relatifs entre le capteur et l'objet qui sont nécessaires à l'acquisition des points.
- Le volume de travail du capteur : volume maximal admissible de l'objet à numériser.

Il est important de noter que la précision globale du système d'acquisition est liée à la précision du capteur ainsi qu'à la précision du dispositif sur lequel il est monté.

La nuance qui existe entre la rapidité de mesure et la rapidité d'acquisition provient du temps nécessaire au traitement des informations, en particuliers dans le cas d'une acquisition en plusieurs prises.

On distingue deux grandes familles dans les procédés de digitalisation (voir figure 18) :

- Avec contact : le capteur est un palpeur mécanique généralement monté sur une machine à mesurer tridimensionnelle ou un bras articulé. La précision de ce type d'outils peut aller jusqu'au micron, toutefois les temps de prise de mesure peuvent être relativement longue (1,5 points / seconde pour les palpeurs points à points). Il est à noter que la mise en contact du capteur avec l'objet peut détériorer l'état de surface de l'objet.

- sans contact : le capteur n'est jamais en contact avec l'objet à mesurer. Diverses technologies sont disponibles sur le marché : point laser, plan laser, photogramétrie.... Le principal avantage de ces technologies réside dans le temps de prise de mesure (jusqu'à 430 000 points / seconde) mais au détriment de la précision (de l'ordre du centième de millimètre).

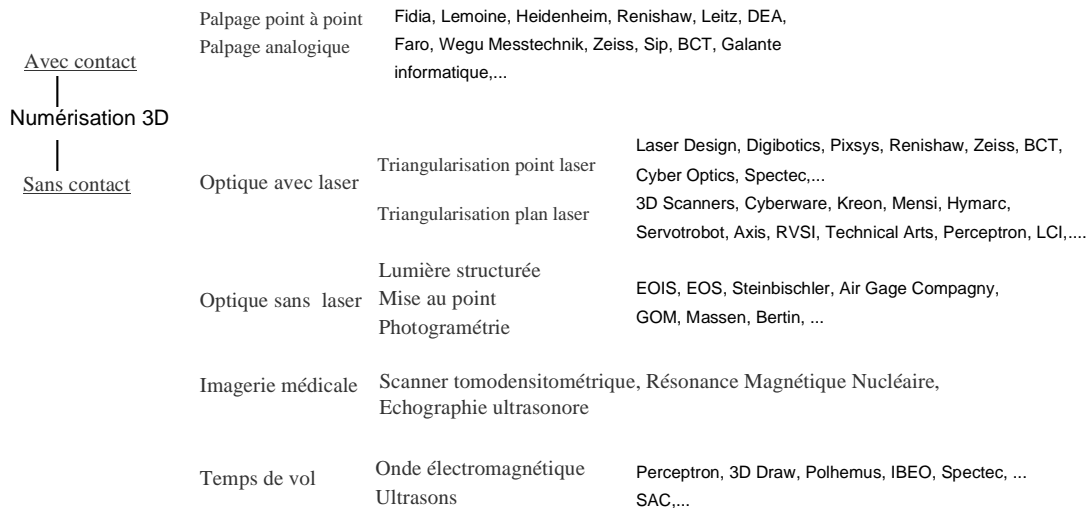


Figure 16 : Les différentes technologies de numérisation 3D utilisées dans le domaine du prototypage rapide

5.3. Les post-traitements

5.3.1. La duplication des pièces par prise d'empreinte

La technique la plus répandue pour dupliquer des pièces réalisées par prototypage rapide est la duplication par moulage au silicone (Room Temperature Vulcanizing). Ce type de duplication permet de disposer en quelques heures (ou quelques jours selon la complexité de la pièce) d'une vingtaine de pièces par moule. Au delà de vingt, les parois interne du moule commence à se détériorer et devient inutilisable. Le modèle à dupliquer est immergé dans une boîte appelée "caisson de coulée" remplie de silicone. On aura pris soin au préalable de définir les plans de joint, les événements nécessaires à l'évacuation de l'air et les amenées de coulée. Afin d'accélérer et d'achever la polymérisation du silicone, la boîte est placée dans une étuve pendant quelques heures. Le moule est ensuite découpé avec l'aide d'un cutter en suivant parfaitement le plan de joint afin de retirer la pièce originale. Lors de la duplication des pièces, les coulées sont réalisées à basse pression, voire sous vide (afin d'éviter le phénomène de bullage). On peut réaliser deux types de coulée :

- par gravité: le matériau pénètre le moule par gravité.

- par injection: le matériau est injecté dans le moule au moyen d'un pistolet sous pression. Ce type d'outil est très intéressant lors de la duplication de pièces à formes complexes présentant des parois fines sur de grandes longueurs.

Le silicone est une matière souple permettant de réaliser des formes compliquées et de s'affranchir le plus souvent des contre-dépouilles. Les détails reproduits peuvent être d'une très grande finesse. Le niveau de précision dépend du savoir-faire de l'opérateur. Il peut être cependant inférieur au dixième de millimètre. Les matériaux moulés peuvent être du Nylon, des résines à base d'acrylique, d'époxy, PPO, PVC, PP, cire, epoxy chargé aluminium.

D'autres techniques peuvent être employées telles que le moulage epoxy, le thermoformage, etc.

5.3.2. La fonderie

La technique de duplication de pièces par fonderie permet de disposer d'un modèle métallique. La fonderie est un moyen complémentaire aux procédés de fabrication par couches frittant des poudres métalliques. La fonderie dans le cadre du prototypage rapide est généralement utilisé selon deux modes principaux :

- la fonderie en moule sable,
- la fonderie à modèle perdu.

Les modèles réalisés par prototypage rapide intègrent toutes les contraintes liées à la fonderie (coefficients de retrait...). Le temps de réalisation des modèles est très intéressant dans un processus de prototypage rapide.

5.3.2.1. La fonderie en moule sable

Cette technique utilise des modèles (ou des éléments de modèle) réalisés par prototypage rapide pour constituer des outillages de fonderie tels que des plaques modèles. Le modèle est réalisé spécialement pour cette application. Par conséquent, le système d'alimentation en métal liquide, le masselottage... , pourront être aussi directement réalisés par prototypage rapide. Les noyaux seront obtenus par méthodes conventionnelles ou éventuellement avec des boîtes à noyaux réalisés par prototypage rapide. Le modèle retiré, les noyaux installés, le moule est prêt pour la coulée.

5.3.2.2. La fonderie à modèle perdu réalisé par prototypage rapide

La fonderie à modèle perdu se caractérise par la réalisation d'un moule unique à partir d'un modèle qui est détruit avant la coulée. Les principaux avantages sont la possibilité de fabriquer des formes complexes présentant des contre-dépouilles, des formes difficilement réalisables (voir irréalisables) par les procédés conventionnels, de fins détails et un très bon état de surface [23].

Le modèle peut être fabriqué avec les techniques de prototypage rapide :

- En cire perdue par frittage de poudre, par extrusion d'un fil de cire, par moulage (moule réalisé par prototypage rapide),
- En matériaux thermofusibles (ABS, résine acrylate...).

La fonderie à modèle perdu par carapace

Les modèles sont assemblés en grappe sur un entonnoir de coulée et des canaux de distribution. La grappe est ensuite plongée plusieurs fois dans une barbotine (liant + charge réfractaire) afin de réaliser des couches successives à épaisseur régulière (10 à 20 mm) [24].

La fonderie à modèle perdu par bloc

Ce type de fonderie est aussi appelé 'moulage au plâtre' ou 'moule bloc'. Le modèle de prototypage rapide est déposé dans un caisson. L'opération suivante consiste à remplir le caisson sous vide de plâtre réfractaire.

La phase suivante (carapace ou bloc) consiste à éliminer les modèles, les masselottes et les canaux de coulée par fusion, par combustion ou par dissolution (opération de décirage). Les coulées de métal peuvent s'effectuer à l'air libre ou sous pression. Les modèles métalliques sont obtenus par décochage (par vibration) puis tronçonnage (découpage des pièces). L'opération de finition (ébarbage) consiste à supprimer les surplus de matière et à réaliser les traitements thermiques adéquats.

Les avantages et les inconvénients de l'application de ces techniques au prototypage rapide sont exactement les mêmes que pour la fonderie traditionnelle [25].

6. L'outillage rapide

Le principe de l'outillage rapide est le suivant : fabriquer par les machines de prototypage rapide des outillages ou des parties d'outillages afin de fabriquer des pièces

classées « bonne matière ». Les applications de l'outillage rapide concernent essentiellement les moules d'injection de matière plastique, les moules en sable à l'usage de la fonderie et d'outillages de presse [26, 27, 28, 29].

Les moules d'injection de matière plastique peuvent être réalisés selon plusieurs procédés:

6.1. Frittage laser de métal

L'outillage est un moule métallique réalisé par frittage métallique. Selon le procédé, la porosité du métal est minimisée par l'adjonction de cuivre ou de résine époxy par infiltration. Le nombre de pièces fabriquées par ce type de procédé peut varier de 100 à quelques milliers de pièces par moules réalisés selon les conditions d'utilisation et le type de matériau injecté dans le moule [30].

6.2. Métallisation superficielle

Le moule peut être réalisé par des procédés tels que la stéréolithographie ou par extrusion d'un fil d'ABS. Le moule est métallisé par projection de métal à bas point de fusion (zinc...) ou par projection plasma (acier...). Ce procédé permet de fabriquer 500 à 1000 pièces par moule d'injection.

6.3. Ajout de résine chargée

Pour réaliser un moule d'injection de matière plastique -pour la production de pièces prototypes avec les matériaux de production- les inserts de matrice et de noyau sont réalisés par stéréolithographie. Ces inserts sont placés dans une base de moule en aluminium. Pour refroidir le moule lors de l'injection, on ajoute des lignes de refroidissement par eau. Le moule est complété par de la résine epoxy liquide (voir figure 17). Ce type de moules permet de réaliser environ 170 à 200 pièces selon le matériau injecté et les conditions d'utilisation [31].

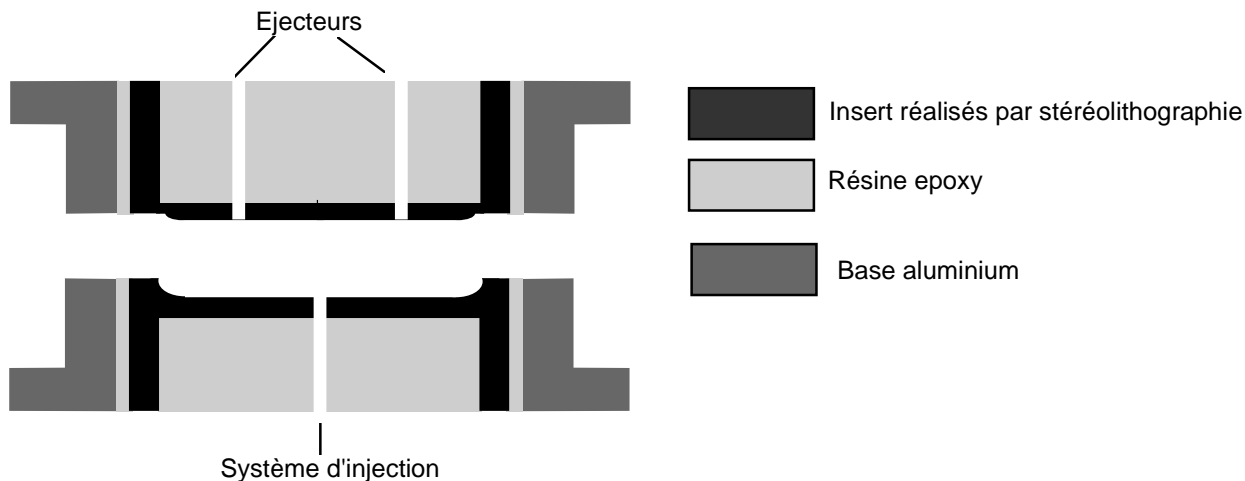


Figure 17 : Coupe du moule d'injection d'après [31]

6.4. Découpage de feuillets métalliques

Autre technique, le moule est réalisé par l'empilage de feuilles métalliques. le principe est le suivant : chaque section est découpée dans une feuille métallique. Une opération manuelle d'assemblage est nécessaire [30].



Figure 18 : moule d'injection réaliser par empilage de feuilles métalliques

7. Organisation

Association Française du Prototypage Rapide

AFPR 13-17 Rue Périer, 92 120 Montrouge

Tél. : + 33 1 49 65 08 09, Fax : +33 1 49 65 08 58

<http://www.evariste.org/ref/afpr.html>

8. Bibliographie :

[1] CARTER Donald E. & STIWEL BAKER Barbara, *CE Concurrent Engineering, The Product Development Environment for the 1990s*, Addison-Wesley Publishing Compagny, INC, 1992.

[2] BERNARD A. & TAILLANDIER G., *Le prototypage rapide*, Edition Hermès, 1998.

- [3] BARLIER C. et coauteurs, *Conception en Mécanique Industrielle. Partie 6 : Maîtriser les outils de prototypage rapide*, Collection "Référentiels", Editions DUNOD, 1995.
- [4] Agence pour la Diffusion de l'Information Technologique, *Le Prototypage rapide : pour comprendre et analyser les enjeux*, Collection "Décisions technologique", 1995
- [5] DOLENC A., *Overview of Rapid Prototyping Technologies in Manufacturing*, Helsinki University of Technologie, National Technical Information Service, VA. 22161, 1994.
- [6] BARALDI U. & DORMAL T., *VADE MECUM des technologies du prototypage rapide*, CRIF, Liège, 1993.
- [7] GALLAIS Eric & NEVEU Françoise, *Les métiers et la Conception Assistée par Ordinateur, de l'idée à l'objet*, Editions Hermès, 1994
- [8] TECHNIQUES DE L'INGENIEUR, Fonderie et moulage, sous la responsabilité de MASCRE Claude et DUFLOT Jean, volume M 6, Edition Les Techniques de l'Ingénieur, 1998
- [9] MÄKELÄ I & DOLENC A., *Deskartes rapid tools : a complete rapid prototyping software system*, in Actes des 5^{ème} Assises Européennes du prototypage rapide, 1996.
- [10] NONNENMACHER François, *La stéréolithographie en question - Rapport sur l'état du prototypage rapide en 1993*, 1993.
- [11] ANDRE Jean-Claude & CORBEL Serge, *Stéréolithographie*, Ed Polytechnica, 1994
- [12] MONY Charles & DJEAPRAGACHE, *Quand les lampes UV remplacent le rayon laser*, Instantanés Techniques, Revue trimestrielle des Techniques de l'Ingénieur, N°34, 1995.
- [13] STEINMANN B., *Epoxy resins for stereolithography with reduced vater sensitivity*, in Actes des 5^{ème} Assises Européennes du prototypage rapide, 1996.
- [14] MAITRE Dominique, *Evolution des technologies de Stratasys*, in Actes des 6^{èmes} Assises Européennes du Prototypage rapide, 2&3 décembre, 1997.
- [15] RAYMOND K. Martha, *Unraveling rapid prototyping methods*, American Machinist, Volume 140, N°6, June 1996.
- [16] WEINSTOERFFER M., BARLIER C., DELEBECQUE B. & HOFFSCHIR D. *Evolution du procédé de Stratoconception*, in Actes des 6^{èmes} Assises Européennes du Prototypage rapide, 2 & 3 dec. 1997.
- [17] BROCHU P., *When precisions counts ?*, in Actes des 6^{ème} Assises Européennes du prototypage rapide, 2 & 3 décembre 1997.
- [18] CABRERA M. & ROUSSEAU E., *Les derniers développements de machines EOS pour la stéréolithographie et le frittage laser de poudres*, in Actes des 4^{ème} Assises Européennes du prototypage rapide, 4 & 5 octobre 1995.
- [19] TASSE J.-C., FORGERIT Y. & REYMOND V., *Caractéristiques de la machine Soligen et Process de mise en oeuvre*, in Actes des 5^{èmes} Assises Européennes du Prototypage rapide, 2 & 3 oct. 1996.

- [20] GARDAN Yvon, *CAO, Design et Prototypage* , in Actes des 4^{ème} Assises Européennes du prototypage rapide, 4 & 5 octobre 1995.
- [21] LEON Jean-Claude, *Modélisation et construction de surfaces pour la CFAO*, Editions Hermès, 1991 .
- [22] HUMBERT, *Les différentes technologies de numérisation et capteurs associés*, Numérisation 3D, Actes des conférences, 1997.
- [23] CHABANEIX P., *Le Prototypage Rapide en Fonderie*, in Actes 4èmes Assises Européennes du Prototypage Rapide, 4 & 5 octobre 1995
- [24] BERTAUD C. , *Application de la stéréolithographie à la réalisation de pièces coulées par le procédé « Cire perdue »*, in Actes 4èmes Assises Européennes du Prototypage Rapide, 4 & 5 octobre 1995.
- [25] ATWOOD C. & al, *Rapid Prototyping, Aparadigm Shift in Investment Casting*, Rapid News, Volume 4, Number 6, 1997.
- [26] JACOBS Paul F., *Enhanced Stereolithography Patterns for Investement Casting and Rapid Tooling*, in Actes 4^{ème} Assises Européennes du Prototypage Rapide, 4 & 5 octobre 1995.
- [27] STIERLEN P., DUSEL K.-H., EYERERP. , *Materials for rapid tooling techniques* , Rapid News, volume 5, Number 7, december 1997.
- [28] AUFFRET Pierre, *L'outillage rapide*, in Actes des 6^{èmes} Assises Européennes du Prototypage rapide, 2 & 3 décembre, 1997.
- [29] WENDT F. , *Direct mold and core manufacturing for rapid prototyping and single-piece production of castings*, in Actes des 5èmes Assises Européennes du Prototypage rapide, 2 & 3 oct. 1996.
- [30] DORMAL T. , *Outillage rapide par frittage de poudre métallique et par empilage de tôles découpées par laser*, in Actes des 5^{ème} Assises Européennes du prototypage rapide, 1996.
- [31] HOROYSKY Mitch & GREAVES Tom, *Using Stereolithography to directly develop rapid injection mould tooling*, Rapid News, volume 5, Number 7, december 1997.