

Prototypage rapide

Généralités

par **Patrice DUBOIS**

Améziane AOUSSAT

et **Robert DUCHAMP**

Laboratoire Conception de Produits Nouveaux

et Innovation de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris

1. L'environnement du prototypage rapide	BM 7 017 - 2
2. Définition du prototypage rapide.....	— 2
3. Différentes catégories de maquette et de prototype.....	— 3
4. Données numériques	— 4
5. Outils du prototypage rapide	— 4
5.1 Procédés de fabrication par couches	— 5
5.1.1 Généralités	— 5
5.1.2 Procédés liquide/solide	— 5
5.1.3 Procédés solide/solide.....	— 6
5.1.4 Procédés poudre/solide.....	— 7
5.1.5 Machines disponibles.....	— 7
5.2 Reverse engineering.....	— 7
5.3 Post-traitements.....	— 8
5.3.1 Duplication des pièces par prise d'empreinte.....	— 8
5.3.2 Fonderie.....	— 9
6. Outillage rapide	— 10
6.1 Frittage laser de métal.....	— 10
6.2 Métallisation superficielle	— 10
6.3 Ajout de résine chargée	— 10
6.4 Découpage de feuillets métalliques	— 10
Pour en savoir plus.....	Doc. BM 7 017

Mondialisation des marchés, concurrence de plus en plus vive, réactivité de plus en plus 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, une **entreprise** qui souhaite conserver et/ou acquérir de nouvelles parts de marché **doit**, comme on l'a vu dans l'introduction :

- **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, comme déjà dit dans l'introduction, les entreprises ont dû adapter leur processus de conception, mais aussi tenir compte de l'émergence de nouvelles technologies.

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

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 passage 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 de mar-

keting, ergonomes, électroniciens, mécaniciens, méthodes...), regroupées au sein d'un groupe projet présent tout au long du cycle de vie du produit.

2. Définition du prototypage rapide

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

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 est 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 (figure 2) :

- le **reverse engineering** (systèmes d'acquisition de formes associés aux logiciels de reconstruction des surfaces) ;

- la **conception assistée par ordinateur** (CAO), 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...

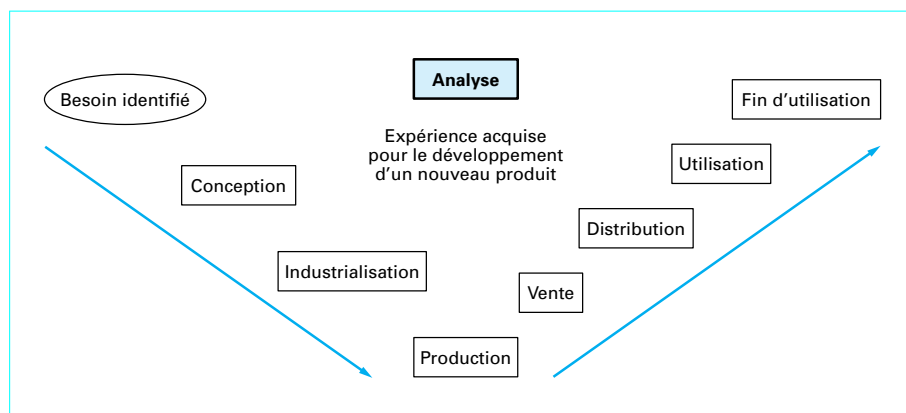


Figure 1 – Cycle de vie d'un produit

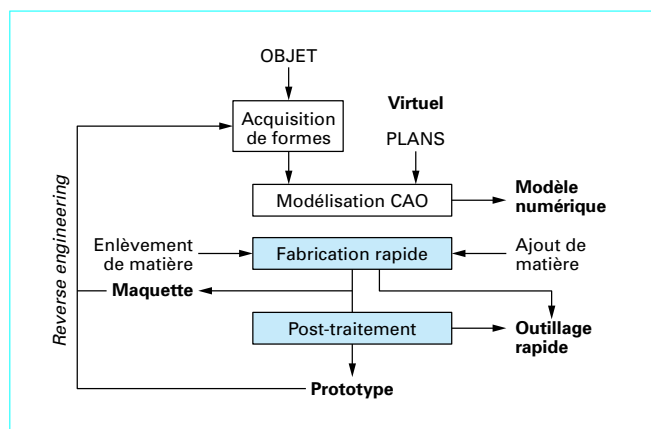


Figure 2 – Processus de prototypage rapide

3. 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...).

À chaque niveau d'avancement du développement du produit correspond un (des) type(s) de maquette et/ou de prototype(s) (tableau 1) [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 peut 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), voire 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 « proche 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.

Tableau 1 – Types de maquettes et de prototypes utilisés au cours du développement d'un produit (d'après [6])

Type	Propriétés	Fonction au cours du développement
Maquette ou modèle 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 – βtests (qui correspondent aux dernières pièces prototypes avant la production finale) – mise en place et réglage de l'outil de production 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 série.

4. Données numériques

Les données numériques ont un rôle central dans le prototypage rapide. Dans un tel processus, il est essentiel que les transferts de données entre les différents outils soient correctement effectués, afin d'éviter toute perte d'information (figure 2).

■ Différents types de données sont utilisés 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 forme 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 facetté, 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 ; la figure 3 en donne un exemple. 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.

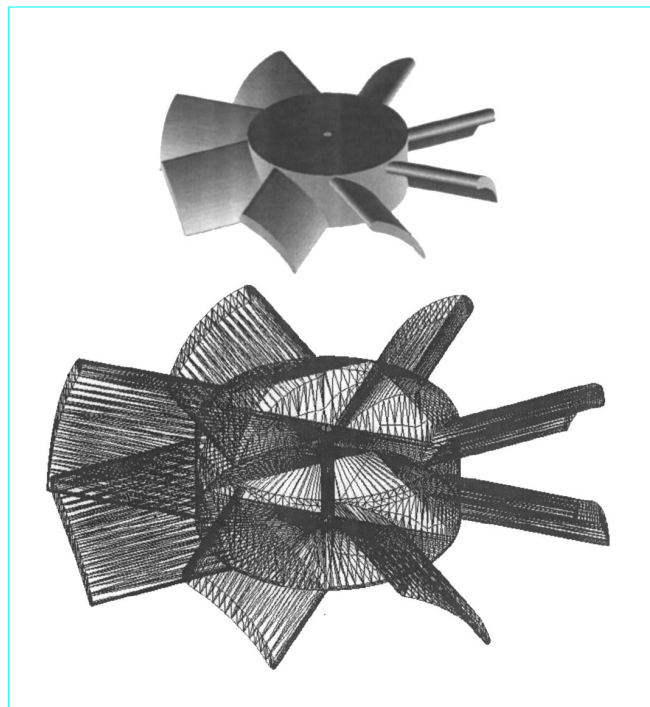


Figure 3 – Rendu réaliste d'une hélice de ventilateur, format STL (Image ENSAM)

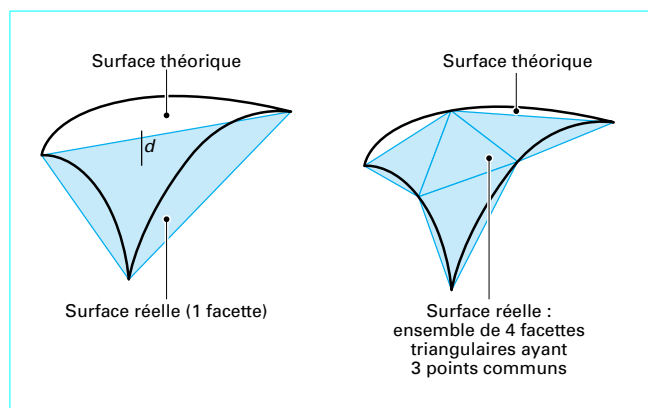


Figure 4 – Augmentation de la précision par multiplication du nombre de facettes

- Les surfaces d'un objet (issues d'une conception surfacique ou volumique) sont remplacées par des **facettes** approximaient 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 surface à la facette triangulaire associée (figure 4) [7].

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 ré-alisé 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 que, 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 Béziers par exemple.

5. Outils du prototypage rapide

Dans ce paragraphe, nous présentons les procédés de fabrication par couches, le *reverse engineering* et les post-traitements les plus couramment appliqués.

Dans le cadre de la fabrication rapide, on distingue deux voies principales :

- les procédés basés sur l'ajout de matière ;
- 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 référencé [8].

5.1 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 facetté 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 unes sur les autres (figure 5).

■ 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, matérialise des sections à contours polygonaux ouverts, pour lesquels les notions de contours intérieur ou extérieur sont absentes. Aussi, on peut 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, qui sont les procédés :

- liquide/solide ;
- solide/solide ;
- poudre/solide.

5.1.2 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, c'est-à-dire par utilisation d'un masque et d'une lampe à ultraviolet, dite stéréolithographie par couches entières.

■ Stéréolithographie point par point

Les sources lumineuses employées sont de type laser à hélium-cadmium (HeCd ; 325 nm) 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 (figure 6), 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.

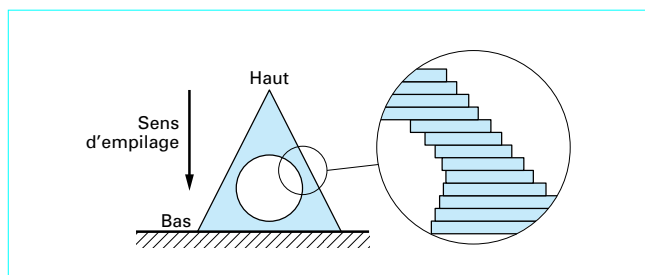


Figure 5 – Principe de construction d'un objet par empilage séquentiel de couches

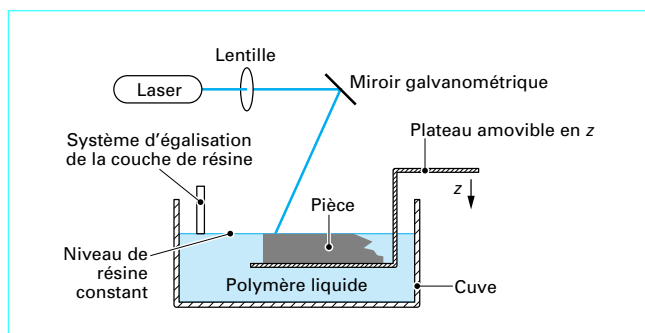


Figure 6 – Principe de stéréolithographie

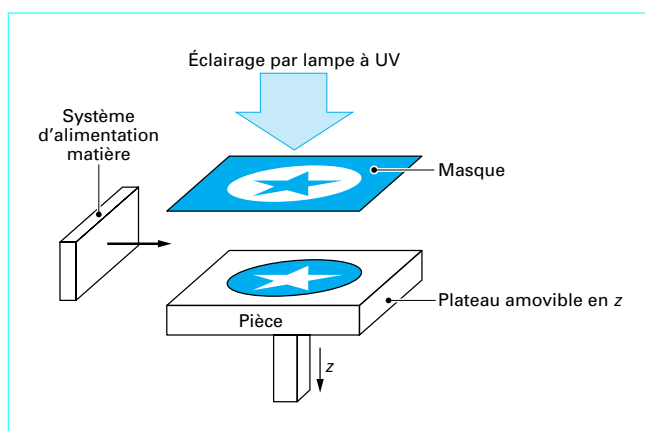


Figure 7 – Principe du flashage de couches

■ Stéréolithographie par couches entières

La source lumineuse est une lampe à ultraviolet (figure 7). Chaque section du modèle est éclairée par flashage au travers d'un masque (principe du pochoir) [12].

■ 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 utilisables en tant que cire per-

due dans le cadre de la fonderie (§ 5.3.2). Plus précises que les acrylates, elles sont néanmoins sensibles à l'humidité et posent 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 (inférieure au dixième de millimètre). La **précision** peut atteindre 0,1 % par millimètre.

- Certaines pièces nécessitent l'utilisation d'un **post-traitement** pour une polymérisation à cœur. 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 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 (figure 8), 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 [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 (polystyrène butadiène acrylonitrile), ABS médical, élastomère, PA (polyamide)...] et de la cire pour un usage en fonderie à modèle perdu (§ 5.3.2).

- 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 (figure 9). 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 à commande numérique), un jet d'eau...

- 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 à une température au-dessus du point de fusion (figure 10) [17].

- 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.

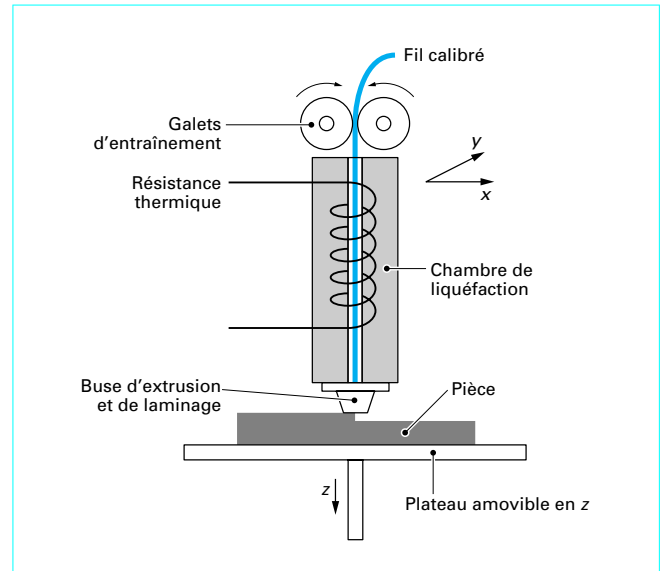


Figure 8 – Principe du procédé FDM de Stratasys [14]

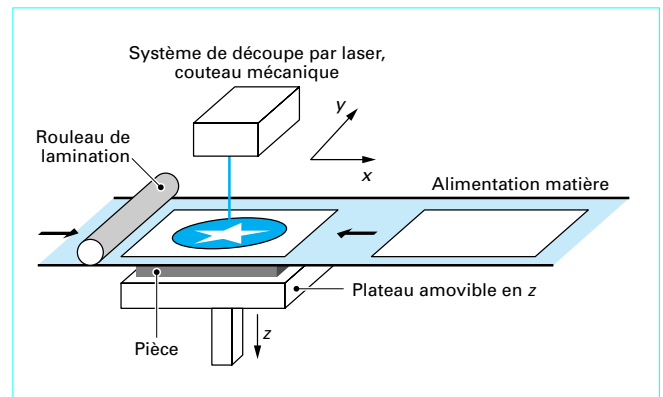


Figure 9 – Principe de la fabrication par découpage et collage de strates

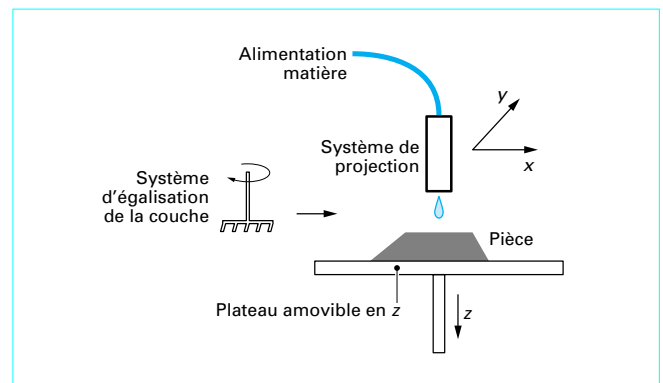


Figure 10 – Principe de la fabrication de couches par projection

5.1.4 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 (§ 5.1.2) : la résine photopolymérisable est remplacée par de la poudre et le laser argon (ou HeCd) par un laser infrarouge (CO₂). Le laser balaie la surface dans le plan x-y, provoquant une agglomération ou une fusion du matériau (figure 11). 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.

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

- plastique (Nylon, ABS, polycarbonate, Nylon composite, polystyrène) ;
- métaux (acier avec infiltration de cuivre en post-traitement mélange bronze-nickel...) ;
- 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]. À 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 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 3 289 systèmes (Source : Wohlers Associates, mars 1997) 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 que, au mois de juillet 1998, l'Association Française de Prototypage Rapide comptabilisait plus de 77 machines en France.

On donne, dans le fascicule [Doc. BM 7 017] *Pour en savoir plus*, une estimation des ventes mondiales de machines de prototypage rapide.

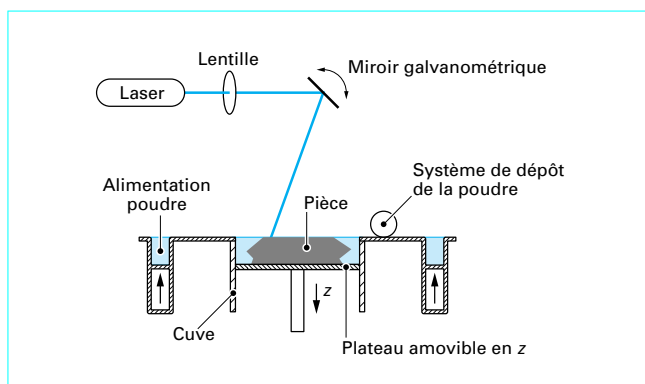


Figure 11 – Principe du frittage de poudre par laser

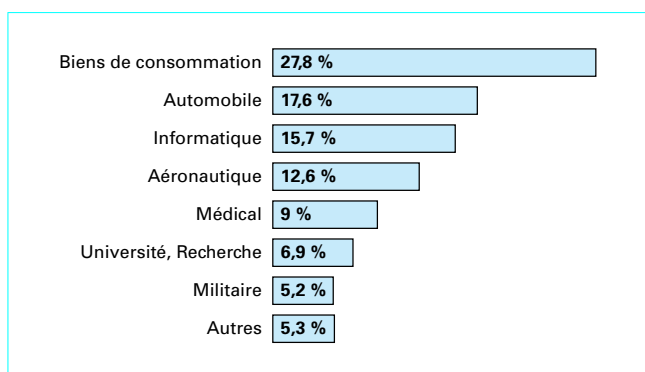


Figure 12 – Domaines d'application de la fabrication par couche (source Industries et Techniques, n° 796 ; 1998)

À 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 (figure 12).

La liste des Constructeurs par procédé est également donnée dans le fascicule [Doc. BM 7 017].

5.2 Reverse engineering

Le terme anglais « reverse engineering » se décline en français sous différents termes : ingénierie inverse, rétroconception, 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 (États-Unis) 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 permet 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 sont donc plus accessibles.

■ Le **principe** des systèmes d'acquisition repose sur la prise de points issus de la surface de l'objet à numériser (figure 13). Ces ensembles de points sont traités (comme déjà dit paragraphe 4) au travers de logiciels de reconstruction de surfaces (non traités dans cet article) permettant de définir la surface de l'objet par des entités mathématiques (carreaux de Bézières, 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** suivants [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 donné ;
- la **rapidité d'acquisition** : temps nécessaire pour obtenir une information exploitable ;
- le **nombre de degrés de liberté** : nombre minimal 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 particulier dans le cas d'une acquisition en plusieurs prises.

■ On distingue deux grandes **familles** dans les procédés de digitalisation (tableau 2).

- **Avec contact** : le capteur est un palpeur mécanique généralement monté sur une machine à mesurer tridimensionnelle ou un bras articulé.

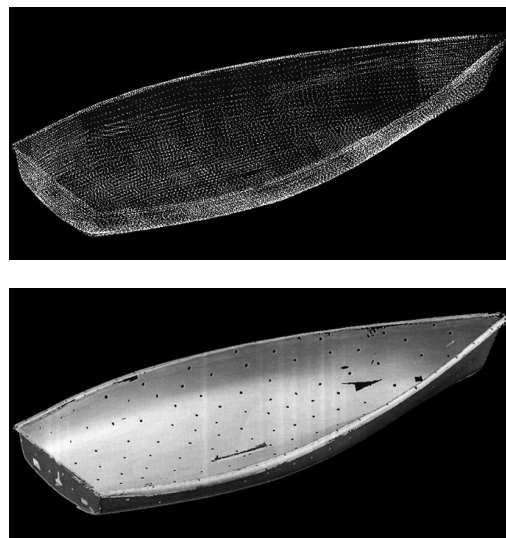


Figure 13 – Résultat d'une numérisation de bateau
(photographies ENSAM)

La précision de ce type d'outils peut aller jusqu'au micromètre ; toutefois les temps de prise de mesure peuvent être relativement longs (1,5 point par seconde pour les palpeurs point par point).

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, photogrammétrie...

Le principal avantage de ces technologies réside dans le temps de prise de mesure (jusqu'à 430 000 points par seconde), mais au détriment de la précision (de l'ordre du centième de millimètre).

5.3 Post-traitements

5.3.1 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*, coulée sous vide en moule silicone). 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 internes du moule commencent à se détériorer et deviennent inutilisables.

Le modèle à dupliquer est immergé dans une boîte, appelée « caisson de coulée », remplie de silicone. On prend 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).

Tableau 2 – Différentes technologies de numérisation 3D utilisées dans le domaine du prototypage rapide

Famille de numérisation 3D	Capteur	Technologie	Constructeur
Avec contact	Palpage point par point		Fidia, Lemoine, Heidenheim, Renishaw, Leitz, DEA,
	Palpage analogique		Faro, Wegu Messtechnik, Zeiss, Sip, BCT, Galante informatique, ...
Sans contact	Optique avec laser	Triangularisation point laser	Laser Design, Digibotics, Pixsys, Renishaw, Zeiss, BCT, Cyber Optics, Spectec, ...
		Triangularisation plan laser	3D Scanners, Cyberware, Kreon, Mensi, Hymarc, Servotrobot, Axis, RVSI, Technical Arts, Perceptron, LCI, ...
	Optique sans laser	Lumière structurée Mise au point Photogramétrie	EOIS, EOS, Steinbischler, Air Gage Compagny, GOM, Massen, Bertin, ...
	Imagerie médicale	Scanner tomodensitométrique Résonance magnétique nucléaire Échographie ultrasonore	
	Temps de vol	Onde électromagnétique Ultrasons	Perceptron, 3D Draw, Polhemus, IBEO, Spectec, ... SAC, ...

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, de PPO (polyoxyphénylène), de PVC (polychlorure de vinyle), de PP (polypropylène), de cire, d'époxy chargé aluminium.

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

5.3.2 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 utilisée 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 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, etc. pourront aussi être directement réalisés par prototypage rapide.

Les **noyaux** sont obtenus par des 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 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 (voire 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...).

■ Fonderie en 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 et charge réfractaire), afin de réaliser des couches successives à épaisseur régulière (10 à 20 mm) [24].

■ 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. Dans l'opération qui suit, on doit 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 de prototypage rapide sont exactement les mêmes que pour la fonderie traditionnelle [25].

6. Outillage rapide

Le **principe** de l'outillage rapide est le suivant : fabriquer, à l'aide des machines de prototypage rapide, des outillages ou des parties d'outillages, afin de produire des pièces classées « bonne matière ». Les applications de l'outillage rapide concernent, essentiellement, les moules d'injection de matière plastique, les moules sable à l'usage de la fonderie et les 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 ce procédé, la porosité du métal est minimisée par l'adjonction de cuivre ou de résine époxy par infiltration.

Le nombre de pièces fabriquées peut varier de 100 à quelques milliers de pièces par moule, réalisé 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.

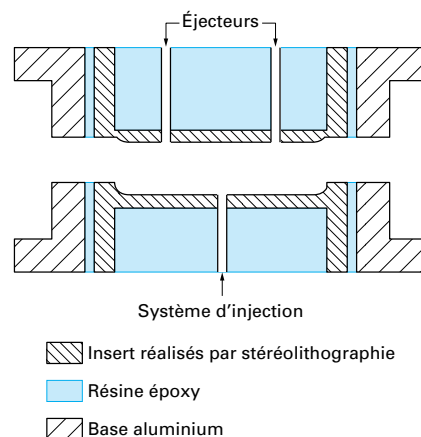


Figure 14 – Coupe du moule d'injection (d'après [31])

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 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 époxy liquide (figure 14).

Ce type de moule permet de réaliser environ 170 à 270 pièces selon le matériau injecté et les conditions d'utilisation [31].

6.4 Découpage de feuillets métalliques

Le moule est réalisé, avec cette autre technique, 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].