

Communication de Monsieur Claude Barlier



Séance du vendredi 19 avril 2013



L'impression numérique d'objets en 3D de l'origine aux principes et aux applications actuelles

Introduction

J'ai grand plaisir à vous proposer cette conférence sur le thème « *L'impression numérique d'objets en 3D* », mais avant, je tiens tout particulièrement à remercier Le Professeur Bernard Guidot, Président de l'Académie de Stanislas, d'avoir bien voulu me donner l'occasion de présenter cette contribution à caractère scientifique et technologique, aujourd'hui, à l'Académie, à Nancy.

J'ai retenu de vous faire une présentation avec un point de vue orienté « applications » plutôt que « recherche » et l'aspect numérique n'est traité qu'au niveau des concepts de base. Toutes les applications, qui illustrent mon exposé, ont été réalisées par nos équipes.

Les premiers outils de la chaîne numérique de conception et de fabrication en mécanique

La communication présente tout d'abord une rapide rétrospective de l'évolution des outils de conception et de fabrication depuis les années 70 jusqu'aux années 90. Comment l'industrie manufacturière à forte dominante mécanique est passée de processus linéaires, séquentiels et très hiérarchisés, à une intégration des outils de conception et de fabrication dans une chaîne numérique, avec une approche d'ingénierie simultanée.

Dans l'industrie, jusqu'en 1970, on peut dire pour être simple, que :

- La conception des produits se fait à partir de plans 2D sur table à dessin avec calques et instruments, les règles sont celles du dessin technique,
- La géométrie descriptive est le seul outil mathématique qui permet de réaliser un tracé avec rigueur,
- Il est difficile de réaliser graphiquement la représentation d'un produit en perspectives 3D, c'est souvent la perspective cavalière qui est retenue,
- La création est presque toujours issue de l'imagination à partir d'un plan en coupe 2D du mécanisme,
- Les prototypes et les modèles sont réalisés manuellement par des ébénistes, modeleurs et maquettistes,
- Les outillages sont fabriqués par les procédés conventionnels de tournage et fraisage, qui génèrent des plans et des surfaces de révolutions,
- La production est ensuite réalisée en série à partir de ces outillages,
- Le processus est linéaire, séquentiel et très long..., des mois, voire des années...

En conclusion, il faut attendre la sortie des pièces en production pour vraiment visualiser le produit. A ce stade ultime, il n'est plus possible d'apporter des modifications, le produit est figé.

La figure 1 illustre, de manière séquentielle, les différentes étapes de l'analyse du besoin jusqu'à la destruction du produit.

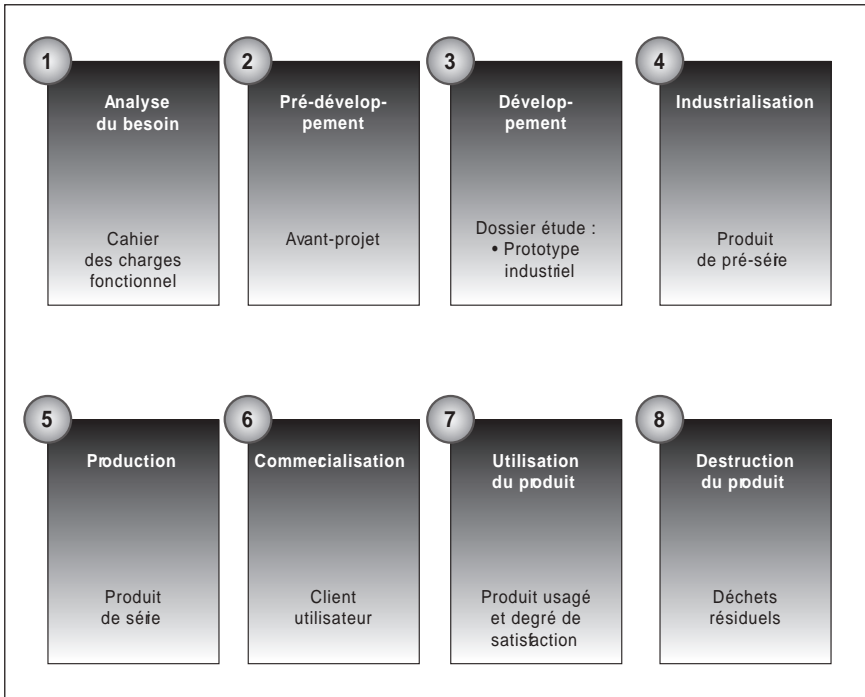


Fig. 1. Illustration des différentes étapes de l'analyse du besoin jusqu'à la destruction du produit

C'est dans les années 70 que les premiers outils numériques d'aide à la conception et à la fabrication arrivent dans les bureaux d'étude, aux méthodes et dans les ateliers :

- les sociétés de développement informatique et les éditeurs proposent les premiers logiciels de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) 2D puis de Conception assistée par Ordinateur (CAO) 3D,
- La simulation numérique est à ses débuts, le plus souvent elle permet de vérifier le comportement sous charge d'une structure de géométrie imposée, elle n'est pas encore utilisée pour dimensionner une pièce,
- Les premières commandes numériques permettent aux machines-outils de déplacer simultanément 2 axes dans l'espace, les premières trajectoires dans le plan sont possibles,
- Les premiers logiciels permettent de programmer les commandes numériques des machines, manuellement au clavier, à partir des plans papier en 2D,

- Les premiers logiciels de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) apparaissent, ils permettent de programmer une trajectoire dans le plan, à partir de sa définition mathématique, géométrique.

Dans les années 80, l'offre CAO/FAO se structure et les premiers logiciels de FAO deviennent opérationnels pour piloter les Machines-Outils à Commande Numérique (MOCN) en 3 axes.

Dans les années 85, les premiers logiciels de Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO) relient directement CAO et FAO et les premières surfaces complexes sont réalisables sur des machines à 3 axes numériques simultanés, puis 4 et 5 axes positionnés et enfin en 5 axes simultanés (figure 2).



Fig. 2. Exemple de réalisation de pièces sur MOCN 5 axes simultanés (aube de turbine)

En 1988, nous avons initié une 1^{ère} « journée productive CFAO » à Nancy, dans le cadre d'une collaboration entre les classes préparatoires aux grandes Ecoles du Lycée Loritz et la Société des Eaux de Vittel. Nous avons présenté pour la première fois une démonstration d'une chaîne numérique directe en temps réel, retransmise sur grand écran, de la conception d'une pièce en CAO à la fabrication directe sur MOCN, en passant par la préparation en FAO. Les sites entre CFAO et MOCN étaient distants de plus de 100 mètres.

L'origine de l'impression numérique des objets en 3D

C'est seulement à la fin des années 80, qu'apparaît le concept de prototypage rapide (PR) (figure 3), il est alors rendu possible par :

- L'avancée de la CAO volumique,
- La puissance des calculateurs,
- Les travaux de recherche sur les matériaux,
- Les bases mathématiques de la modélisation géométrique 3D,
- Les premiers algorithmes de tranchage virtuel d'un modèle géométrique.

Pour la première fois, il est possible de fabriquer directement et numériquement des pièces 3D avec des formes complexes intérieures et extérieures, sans rupture de la chaîne numérique, à partir de matériaux à l'état initial liquide, solide ou sous forme de poudre.

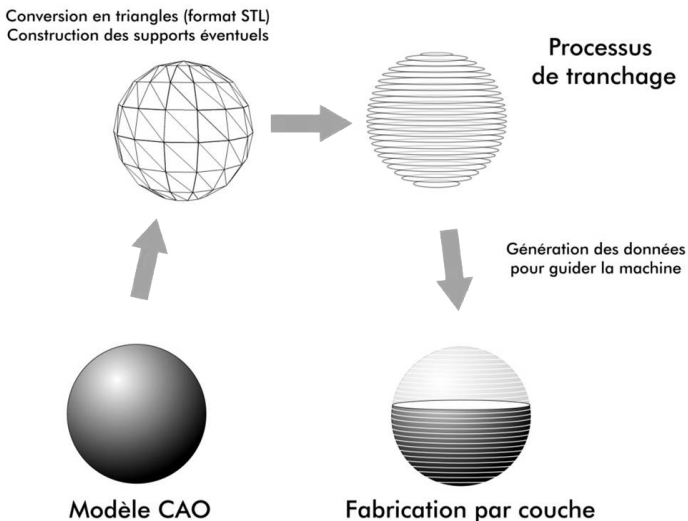


Fig. 3. Illustration du concept de prototypage rapide

Le concepteur prépare la création d'une pièce sur son écran d'ordinateur puis pilote directement sa fabrication 3D en couches, sur une machine de prototypage rapide.

A partir des années 90, le concept émerge dans le monde.

Notre équipe a présenté de nombreuses conférences majeures sur le sujet et particulièrement sur notre procédé de Stratoconception®, en France dès 1992 aux « premières assises nationales du prototypage rapide » à l'Ecole Polytechnique de Palaiseau [1], puis à MICRONORA à Besançon [2]. Dans le même temps, nous avons également présenté la création du CIRTES, Centre Européen de Prototypage Rapide [3], créé en 1991 spécifiquement à partir de ces travaux innovants, pour poursuivre la recherche et entreprendre le développement du procédé de Stratoconception®.

Depuis 1995, il est retenu de classer les procédés de fabrication par couches en trois familles, à partir de l'état initial du matériau de base :

Les procédés de fabrication par couche liquide/solide (L/S)

Les procédés de fabrication par couche poudre/solide (P/S)

Les procédés de fabrication par couche solide/solide (S/S),

La typologie de ces procédés est présentée à partir d'un document proposé par l'ADIT (Agence de Diffusion des Informations Technologiques [4]

Depuis 1996, plusieurs ouvrages [5], [6], [7], [8], décrivent les procédés de prototypage rapide et leurs applications.

Les applications se multiplient d'abord pour permettre la réalisation de maquettes et de prototypes mais aussi des œuvres d'art [9].

C'est dans les années 2000 qu'apparaît la première extension du concept vers l'outillage rapide. Cette fois il est possible de réaliser directement des outillages par les procédés de PR, afin d'obtenir des préséries de pièces en bonne matière, à partir des grands procédés industriels lourds - Illustrés dans la communication « Du Virtuel au Réel » dans les Mémoires de l'Académie de Stanislas [10].

Une deuxième extension du concept apparaît presque simultanément et de manière naturelle : la fabrication rapide ou fabrication directe. Cette fois, l'idée est de fabriquer directement des pièces série, à partir des procédés de prototypage, sans aucun autre procédé de mise en forme.

La diversification des besoins et l'évolution des machines vont ensuite faire émerger très vite les « imprimantes 3D professionnelles » qui rendent ces outils accessibles aux bureaux d'étude et aux petites entreprises.

Dans le même temps, aux Etats Unis, un physicien du MIT imagine et propose des ateliers de fabrication qui s'ouvrent quasi librement au public - ou plutôt à certains publics ciblés -, c'est le concept de «Fablabs» ou «laboratoires de fabrication». Ces ateliers se sont ensuite très vite développés pratiquement partout dans le monde.

Ces années dernières apparaissent des machines encore plus légères, disponibles en vente directe en kit sur internet : «les imprimantes 3D personnelles».

Aujourd'hui, tous ces procédés sont regroupés sous le vocable de «fabrication additive», un comité de normalisation est en place. Tous les pays s'en préoccupent et de nombreux observateurs ont identifié une véritable révolution industrielle irréversible. Depuis quelques mois, tous les médias se sont emparés du sujet.

Des équipes de recherche travaillent partout dans le monde sur les matériaux et sur les procédés de fabrication additive.

Présentation et illustration des principaux procédés industriels de fabrication additive [5].

- la stéréolithographie

Procédé inventé par Jean-Claude André (CNRS/INPL) en 1984 puis par Charles W. Hull aux Etats-Unis. Le procédé consiste à polymériser localement une résine photosensible à l'aide d'une source lumineuse.

Cette méthode utilise une source lumineuse de type laser (hélium-cadmium, HeCd et argon ionisés, Ar+) que l'on dirige dans le plan XY grâce à deux miroirs galvanométriques.

Les matières transformées sont des résines acrylates et époxydes, photosensibles

Afin de rigidifier l'objet lors de sa fabrication, il est nécessaire d'ajouter des supports à la pièce. Un traitement de postpolymérisation est nécessaire et nécessite un four UV.

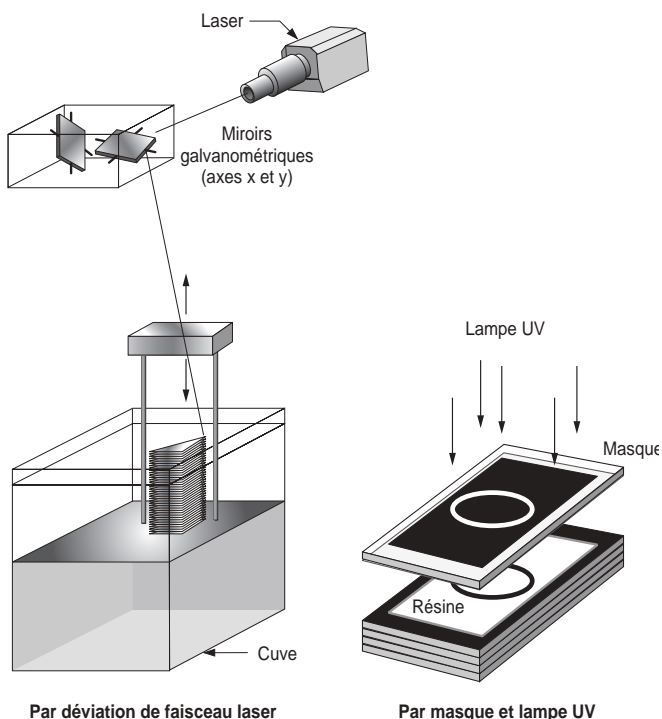


Fig. 4. Schéma de principe du procédé de stéréolithographie [5]

- la fusion de poudre

Procédé qui consiste à réaliser la fusion locale d'un matériau présenté sous forme de poudre en le faisant fondre sous l'action d'un laser ou à l'aide d'un faisceau d'électrons de forte puissance.

Le laser est dirigé par deux miroirs galvanométriques, sur la zone à solidifier.

Le faisceau d'électrons est dirigé par des électro-aimants.

Ainsi, l'objet est créé section par section.

L'enceinte est sous atmosphère contrôlée, elle est thermostatée en fonction du matériau.

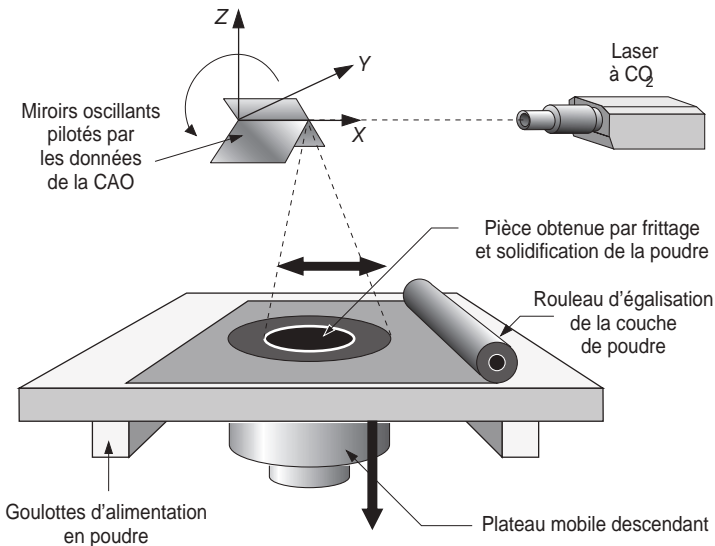


Fig. 5. Schéma de principe du procédé de fusion de poudre [5]

- le dépôt de fil fondu

Procédé, développé par Stratasys, qui consiste à déposer un cordon de matériau thermofusible.

Un fil de matériau thermofusible circule à l'intérieur d'une buse chauffante afin de le liquéfier.

La tête est pilotée suivant les axes x et y.

Le cordon déposé se solidifie dès le contact avec la couche précédente pour créer l'objet section par section.

Afin de rigidifier l'objet lors de sa fabrication, il est nécessaire d'utiliser des supports.

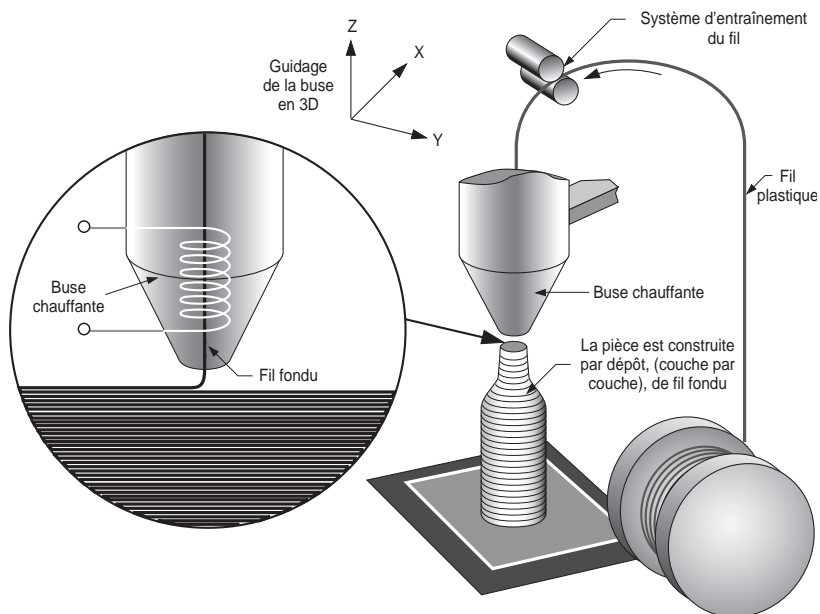


Fig. 6. Schéma de principe du dépôt de fil fondu [5]

- Le procédé LOM

Procédé LOM (Laminated Object Manufacturing©) développé par Helixsys qui consiste à découper par l'intermédiaire d'un laser CO² les différentes sections d'un objet que l'on veut créer, dans une fine couche de papier thermocollable (couche polyester).

Les différentes couches sont empilées et sont assemblées par fusion du polyester. Le laser découpe le contour de la pièce et les bords de la feuille pour former un bloc, il hachure également les zones extérieures pour faciliter l'extraction des pièces.

L'extraction des parties creuses limite les formes géométriques.

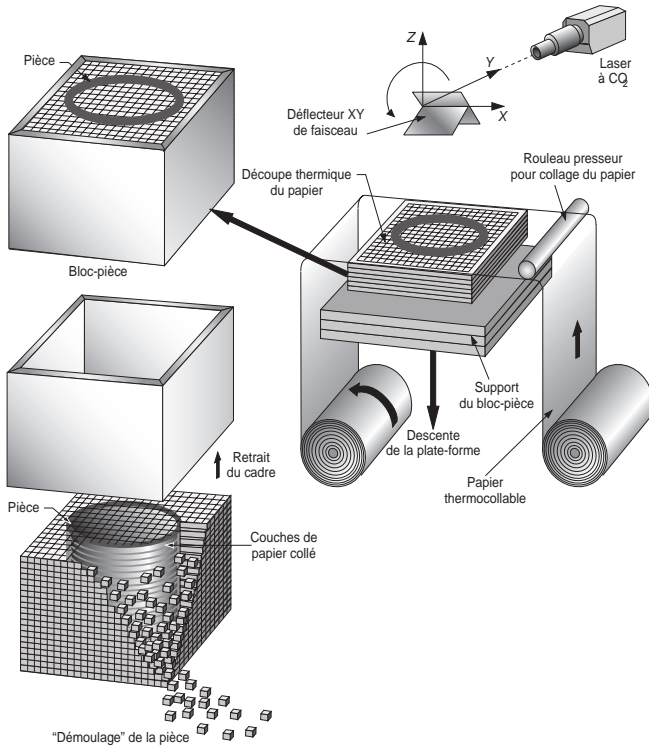


Fig. 7. Schéma de principe du procédé LOM [5]

- la stratoconception

Le procédé développé par Claude Barlier et son équipe au milieu des années 80 et breveté en février 1991, consiste en la décomposition automatique de l'objet en une série de couches élémentaires 3D complémentaires appelées strates. Chacune de ces strates est directement mise en panoplie, puis fabriquée automatiquement par micro-fraisage rapide, par découpe laser, par découpe au fil, ou par tout autre moyen de découpe à partir de tous matériaux en plaques (bois, polymères, métaux, ...). Ces strates sont ensuite positionnées par des inserts, des pontets ou par des éléments d'imbrication et assemblées afin de reconstituer la pièce finale.

Il est possible de réaliser des pièces composées de plusieurs matériaux.

Dans certains cas, le joint disparaît lors de l'assemblage

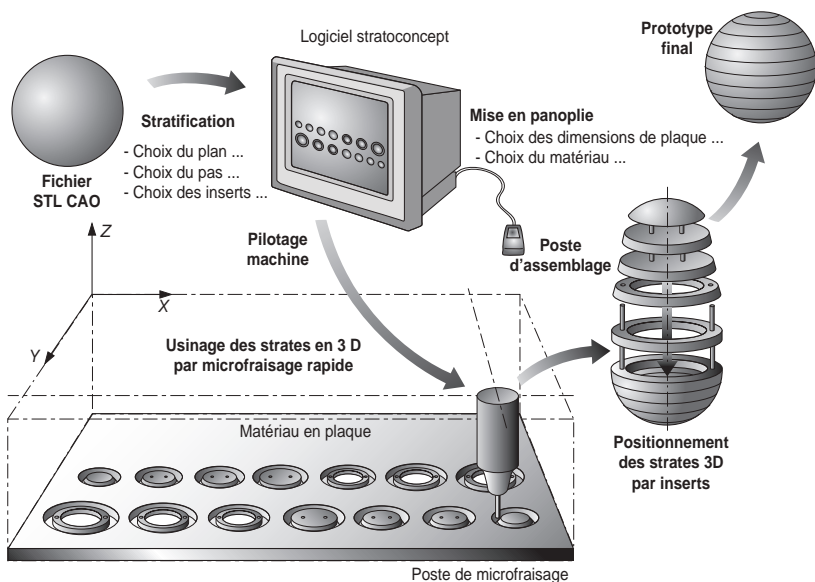


Fig. 8. Schéma de principe du procédé de Stratoconception® [5]

- l'impression 3 D

Il s'agit de machines destinées aux petits professionnels et au grand public.

A l'origine du concept, les premières machines sur le marché fonctionnent par jet de matière, par similitude avec l'impression jet d'encre papier classique, mais avec dépôt par couches de liant, d'encre ou de cire.

Pratiquement tous les procédés de fabrication additive proposent aujourd'hui une version impression 3D, particulièrement le dépôt de fil fondu, le L.O.M. et la Stratoconception.

Les machines les plus économiques, à usage personnel, utilisent la technique de dépôt de fil fondu.

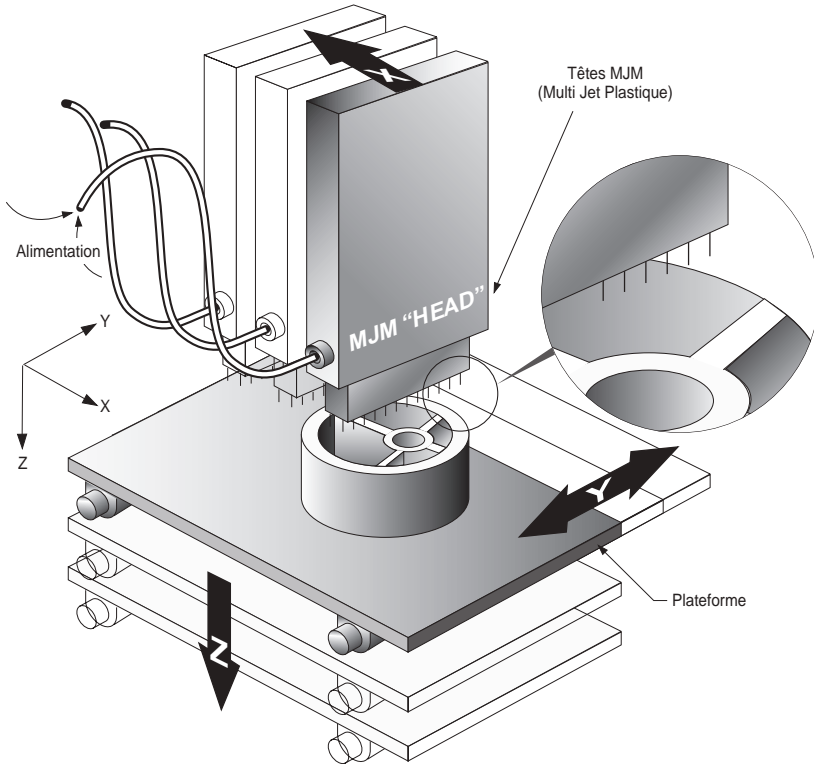


Fig.9. Schéma de principe de l'impression 3D [5]

Les applications actuelles

La fabrication additive est devenue incontournable devant la complexité et les difficultés de mise au point des nouveaux produits, et le besoin accru de nombreuses itérations.

Les diapositives présentées lors de l'exposé ont mis en évidence de nombreuses applications dans les domaines du luxe, du design et surtout dans les grands secteurs de l'industrie des produits manufacturés (automobile, aéronautique, ferrovière, électroménager, ...). Les exemples suivants, réalisés par notre équipe, illustrent simplement les 3 familles d'applications de la fabrication additive.

Les applications en prototypage rapide

Il faut rappeler qu'il existe plusieurs types de prototypes. Sous ce vocable, nous retrouvons des représentations physiques de pièces ou du produit tout entier à différentes étapes du développement produit :

- des maquettes de concept,
- des maquettes de style,
- des maquettes géométriques,
- des maquettes de fonctionnement,
- des prototypes technologiques, qui représentent le produit complet.



*Figure 10. Prototype géométrique par Stratoconception® d'une dent de godet de pelleuse
- Application minière pour LIEBHERR – 2013 -*

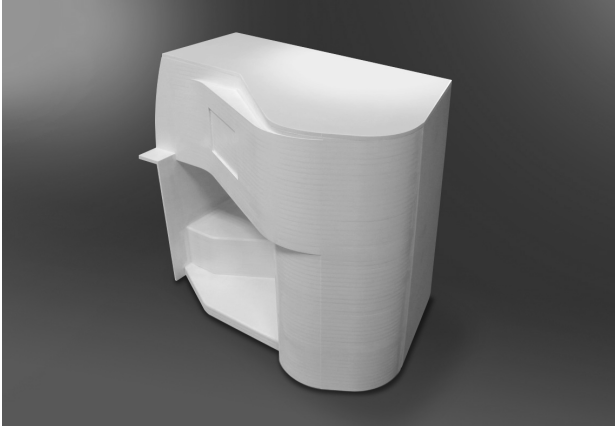


Figure 11. Prototype géométrique par Stratoconception ® pour validation d'encombrement - aménagement intérieur d'avion pour ZODIAC AEROSPACE- 2014 -

Les applications en Outillage Rapide

La pièce série est la seule réellement « représentative » c'est-à-dire représentative du bon procédé de mise en forme (le procédé série final) qui met en œuvre le bon matériau, à partir du bon outillage.

L'Outillage Rapide associé au procédé de mise en forme permet d'obtenir cette pièce représentative.

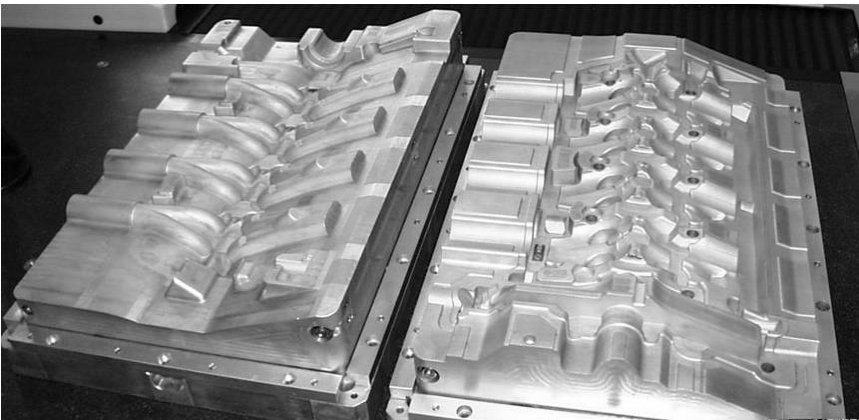


Figure 12. Outillage d'injection par Stratoconception ® métal pour modèles perdus en polystyrène, destinés à la fonderie (PMP) de culasses de moteur PSA/BMW - Contrat de R&D PSA / CIRTES - 2009 -

Les applications en Fabrication Rapide, directe

En fabrication directe, la pièce issue de la FA est considérée comme représentative, le procédé final de fabrication série est le même procédé de FA.

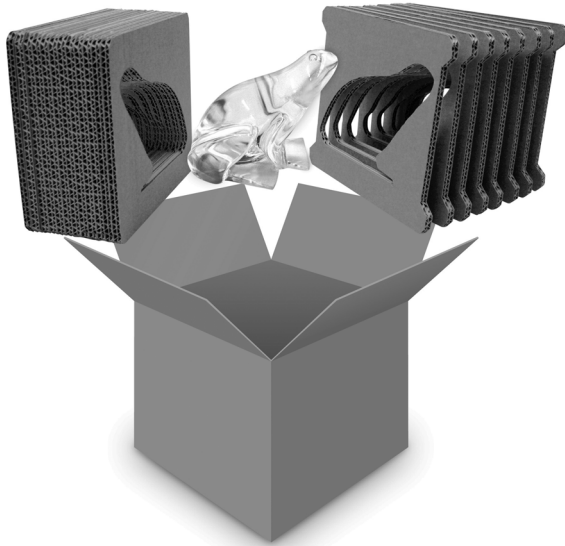


Figure 13. Emballage sur mesure par Stratoconception ®, Procédé Pack&Strat, - Brevet CIRTES 2007 -

Conclusion

En conclusion, nous proposons un bilan de la fabrication additive et les perspectives d'avenir de l'impression 3D.

Le Prototypage Rapide est aujourd'hui présent dans pratiquement tous les secteurs d'activité.

Les procédés ne cessent :

- de proposer de nouveaux matériaux qui profitent aux prototypes des caractéristiques nouvelles, proches des produits de série,
- d'accroître la qualité des prototypes réalisés,
- de réduire les coûts des prototypes et des machines,
- de réduire les délais d'obtention des prototypes,
- de permettre la réalisation de pièces de plus en plus grandes.

L'outillage rapide est un axe majeur de développement des procédés de fabrication par couches.

L'intégration d'intelligence à l'intérieur des outillages (canaux conformables de régulation thermique, passage de fluides dans les outillages, ...) a pour objectif de supplanter les outillages traditionnels en particulier par :

- l'augmentation de la productivité (diminution des temps de cycle),
- la réalisation de géométries de pièces plus complexes,
- l'amélioration de la qualité des pièces produites,
- la diminution des délais d'obtention des outillages.

Pour le concepteur, la fabrication rapide ou fabrication directe devient un compromis entre :

- La possibilité d'intégration de nouvelles fonctionnalités dans la pièce (pièce creuse, structure plus fine, mélange possible de matériaux, ...), diminution du nombre de pièces dans un ensemble, ...
- Des caractéristiques mécaniques et thermiques liées à la matière et au procédé de PR et non pas au procédé de mise en forme,

La précision et l'état de surface obtenus qui dépendent du procédé de PR.

Le prix et les délais de réalisation d'une petite série qui peuvent être intéressants par rapport à la filière conventionnelle avec outillages.

Les nouvelles imprimantes 3D personnelles offrent maintenant la possibilité à chaque particulier de fabriquer ses propres objets, à domicile ou dans des Fablabs [8].

Cependant, nous pouvons nous interroger sur les capacités de conception de produits et sur la possibilité d'accès des particuliers aux outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), indispensables pour créer les fichiers numériques nécessaires au pilotage de ces machines.

De même, il ne faut pas oublier que les caractéristiques mécaniques des pièces sont obtenues lors de la mise en œuvre des procédés industriels de fabrication. Sans ces considérations, il y a donc un grand risque de produire, en fabrication additive, des pièces mécaniques non conformes.

Ces nouvelles possibilités de création 3 D n'ont pas supprimé la nécessité absolue de conception préalable des produits qui ne se limite jamais à créer une forme mais plutôt à organiser une répartition de la matière dans l'espace pour garantir des fonctionnalités souvent très contraintes.

Pour que les pièces puissent remplir parfaitement le cahier des charges du produit, il est indispensable que le procédé de fabrication rapide soit élevé au rang de procédé de fabrication et soit pris en compte dès la conception des pièces au bureau d'étude.

L'évolution est majeure et irréversible, la chaîne numérique et la fabrication additive apportent des outils nouveaux qui bouleversent et ouvrent considérablement le champ des possibles en matière de création industrielle et individuelle, mais il n'est pas question aujourd'hui de rivaliser avec la grande industrie mondiale de la conception et de la fabrication des produits manufacturés.



Bibliographie

- [1] - C. Barlier - « Le procédé de prototypage rapide par STRATOCONCEPTION[®] » - Actes des premières Assises Européennes du Prototypage Rapide - Ecole Polytechnique, Palaiseau - 2-3 juin 1992.
- [2] - C. Barlier, «STRATOCONCEPTION[®], un procédé original de conception de pièces en mécanique», Actes du Colloque MICRONORA, Besançon, 22-26 novembre 1992.
- [3] - C. Barlier - «Le CIRTES, centre européen de prototypage rapide de l'ESSTIN à Saint-Dié-des-Vosges» - Actes des deuxièmes Assises Européennes du Prototypage Rapide - Ecole Polytechnique, Palaiseau - 26 mai 1993.
- [4] - ML. Spaak- Le prototypage Rapide - Pour comprendre et analyser les enjeux - ADIT - mars 1995.
- [5] - C. Barlier et coaut – Référentiel « Conception en mécanique industrielle », partie 6. - Editions DUNOD – 1996 – 2003.
- [6] - A. Bernard - G. Taillandier – Le Prototypage Rapide - HERMES - 1998.
- [7] - A.Gebhardt - Rapid Prototyping - Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung - Hanser - 2000.
- [8] - M. Berchon - L'impression 3D - EYROLLES – 2013.
- [9] - JL. Antoine, M. Dietsche, B. Delebecque, C. Barlier - «Intégration du Prototypage Rapide dans le domaine du Design - Application du procédé de STRATOCONCEPTION[®]» - 6^{èmes} Assises du Prototypage Rapide - La Défense, PARIS - 2/3 Décembre 1997.
- [10] - C. Barlier - «Du Virtuel au Réel - La chaîne numérique du Développement Rapide de Produit, Application aux œuvres d'art, au design et à l'architecture» - Mémoires de l'Académie de Stanislas - années 2010-2011 - 8^{ème} série - tome XXV.