

Conférence de Monsieur le Professeur Claude Barlier



Du virtuel ... au réel ... La chaîne numérique du Développement Rapide de Produit, Application aux œuvres d'art, au design et à l'architecture

Introduction

J'ai grand plaisir à vous proposer cette conférence sur le thème « du virtuel au réel », mais avant, je tiens tout particulièrement à remercier M^{me} Le Président de l'Académie de Stanislas, Christiane Dupuy-Stutzmann ainsi que Le Professeur Robert Mainard d'avoir bien voulu me donner l'occasion de présenter cette contribution à caractère scientifique et technologique, aujourd'hui, au Conseil Général de Meurthe-et-Moselle, 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 particulièrement dans le domaine de l'art, du design et de l'architecture.

La Chaîne Numérique du Développement Rapide de Produit

L'ingénieur d'aujourd'hui doit intégrer dans ses travaux de conception toute la vie du produit, de la saisie du besoin jusqu'à son utilisation, voire sa destruction. Dans le même temps, l'utilisateur - que nous sommes - est devenu de plus en plus exigeant quand à l'adéquation du produit, à son attente.

Pour satisfaire cette exigence, les produits doivent se présenter sous plusieurs variantes et leur durée de vie est de plus en plus courte. Les services étude doivent proposer des solutions fiables dans des délais, eux aussi, de plus en plus courts.

C'est pour répondre à ce défi que nous avons créé en 1991 le centre de R&D CIRTES^{[1], [3], [4]}, figure 1, à partir de nos travaux de recherche sur le

procédé de prototypage rapide par stratoconception®^[2] et sur la surveillance de l'usinage.

VirtureaL, Pôle du Développement Rapide de Produit
CIRTES, l'Innovation par la R&D

Directeur Général
Claude BARTLIER

Responsable R&D Info
Benoît DELEBECQUE

Responsable R&D procédé
Cyril PELAINGRE

Responsable Plate-forme PR-OR
Rudy MICHEL

Responsable CAO-numérisation
Denis CUNIN

Responsable Motorisation
David DI GIUSEPPE

Responsable Etab. de Carreaux
Jérôme MASSOL

Intégration de la chaîne numérique du Développement Rapide de Produit
R&D en Prototypage et Outillage Rapide par Stratoconception®
R&D en Surveillance de l'usinage par le système Actarus®

CIRTES SRC CRT - SRC membre de l'EARTO À Saint-Dié-des-Vosges
Recherche Contractuelle

Antennes
CIRTES - Carreaux 1
© CIRTES 07 avril 2011

Figure 1

Afin de disposer des moyens humains indispensables au développement de ces activités, en 2000 à partir du CIRTES, avec l'Ecole des Mines de Nancy et l'Ecole des Mines d'Albi, nous avons initié la création de l'InSIC (Institut Supérieur d'Ingénierie de la Conception), pour la formation d'ingénieurs et de docteurs.

Pour développer nos travaux, nous avons également progressivement initié la création de quatre entreprises innovantes, pour la valorisation, la diffusion et le service. Toutes ces structures complémentaires (figure 2) sont aujourd'hui regroupées au sein du pôle VirtureaL.



Figure 2

Cet ensemble constitue en fait une véritable plate-forme technologique du Développement Rapide de Produit (DRP) qui met en œuvre toute la chaîne numérique qui permet d’aller du virtuel, c’est-à-dire d’une image 3D, jusqu’au réel, par exemple une maquette, voire jusqu’à une pièce réelle de présérie. Cette chaîne numérique du DRP est présentée sur la figure 3 et la figure 4 permet de situer nos propres recherches dans ces activités.

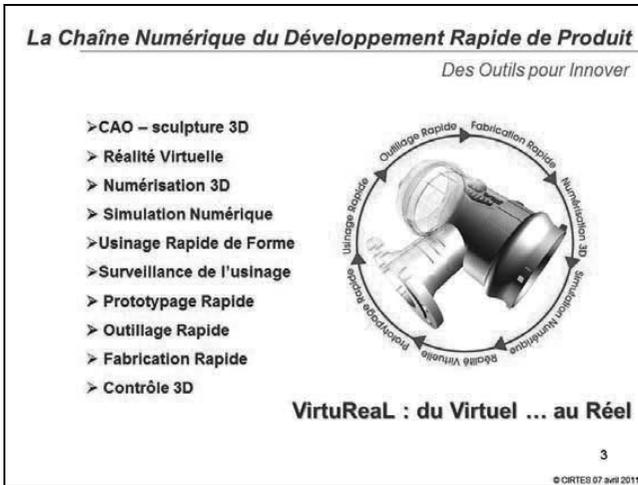


Figure 3

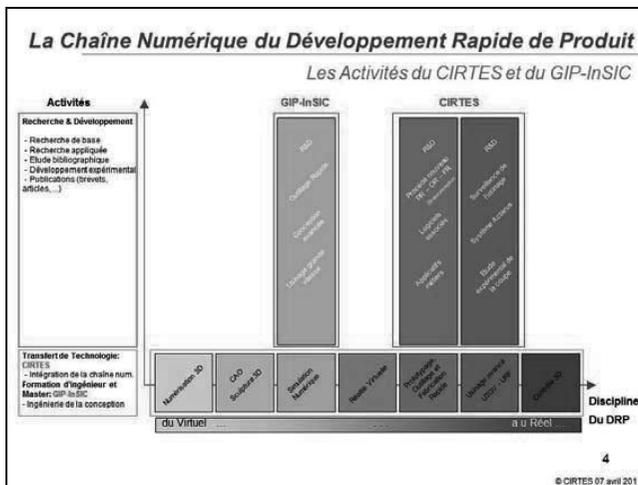


Figure 4

Le Prototypage Rapide

C'est dans ce contexte de compétitivité industrielle que sont apparus sur le marché, vers la fin des années 80, les procédés de Prototypage Rapide (Rapid Prototyping ou RP). Le principe de base qui procède d'un tranchage virtuel puis d'une reconstitution de couches en 3D est donné figure 5.

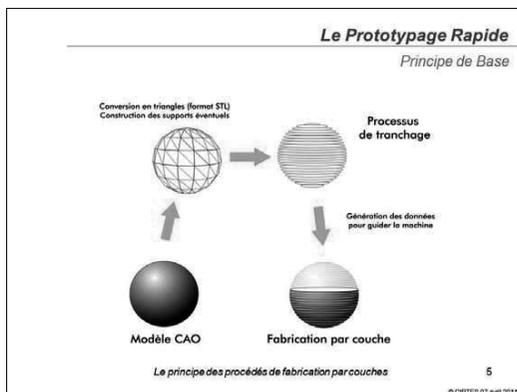


Figure 5

Simultanément les logiciels de simulation et de calcul puis les systèmes de prototypage virtuel sont devenus des outils numériques puissants permettant de dimensionner la pièce dans son environnement produit mais aussi au travers de son procédé d'obtention.

Il était attendu que les capacités de ces procédés de prototypage virtuel diminuent très vite le besoin, en quantité, de pièces obtenues par prototypage physique. Il n'en est rien actuellement d'une part, parce que certains phénomènes physiques d'utilisation du produit dans son environnement ne sont pas facilement modélisables et que d'autre part, les contraintes normatives et le niveau de fiabilité requis ont encore fait monter le degré d'exigence en conception/fabrication.

Dans l'automobile par exemple, la tendance est d'utiliser le calcul numérique pour sélectionner voire éliminer des solutions avant de valider la ou les solutions retenues par prototypage physique.

La notion simple de validation de l'aspect esthétique ou de la forme ne suffit plus, le besoin en prototypage est passé de celui de représentativité maquette à celui de représentativité produit et procédé.

C'est dans ce nouveau contexte que les procédés industriels de fabrication et les outillages associés retrouvent tous leurs sens et deviennent incontournables.

Les principes généraux sur lesquels sont basés les Procédés de Fabrication par Couches (PFC) sont classifiés suivant la méthode de transformation du matériau utilisé : liquide-solide, solide-solide et poudre-solide pour des procédés partant respectivement d'un matériau liquide, solide ou pulvérulent pour aboutir à l'objet solide.

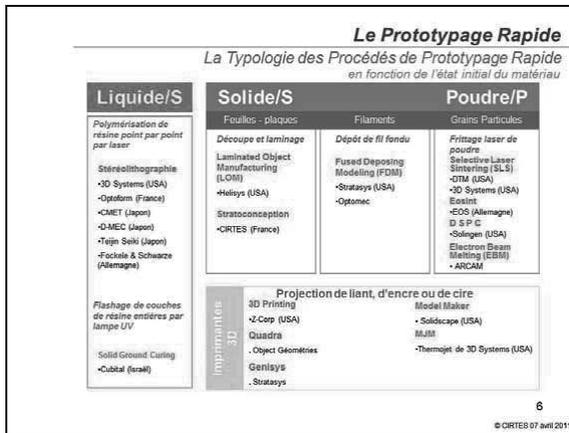


Figure 6

La figure 6 met en évidence une typologie des procédés de prototypage rapide en fonction de l'état initial du matériau, à partir d'un document proposé par l'ADIT (Agence de Diffusion des Informations Technologiques)^[5] :

- les procédés liquide-solide

Tous les procédés de cette famille sont basés sur la polymérisation par exposition localisée aux rayons ultraviolets (UV) d'une résine liquide photosensible.

- les procédés solide-solide

Dans le cas des procédés solide-solide, la matière première est fournie à l'état solide puis transformée. C'est le cas du procédé de Stratoconception breveté et développé en France par notre équipe, au Cirtes.

La méthode consiste, après tranchage virtuel, à découper ou même usiner les contours d'une couche dans un matériau en plaques. La couche est rigide et elle permet la réalisation de pièces de moyennes et grandes dimensions. L'approvisionnement de la matière est d'un coût plus faible et plus diversifié. Les couches doivent être positionnées puis assemblées entre elles.

- les procédés poudre-solide

Le principe consiste à agglomérer une poudre afin de constituer un objet solide. Les procédés se distinguent dans la façon d'agglomérer la poudre par fusion ou simple collage

Le concept général du prototypage Rapide est donné figure 7 et illustré figure 8.

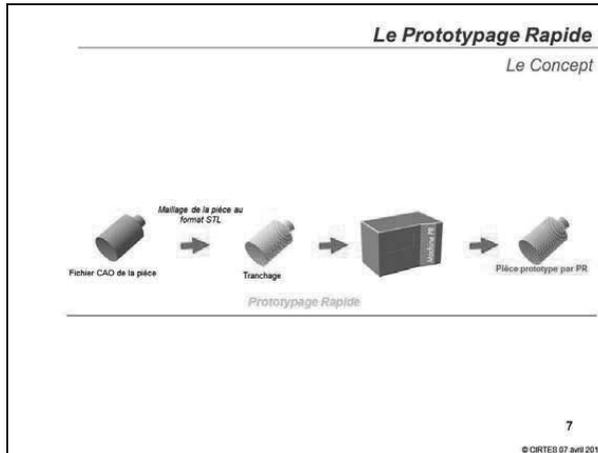


Figure 7

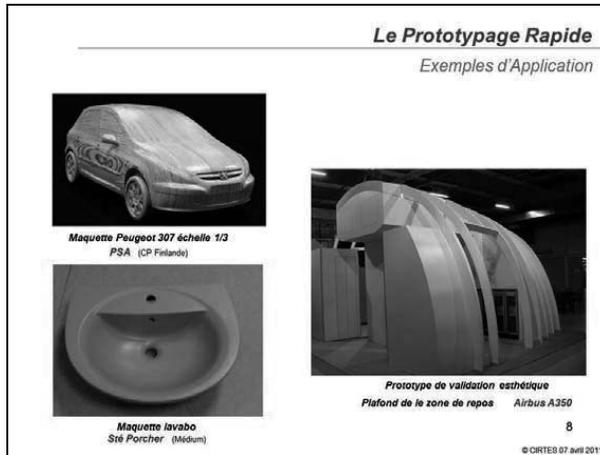


Figure 8

L'Outillage Rapide

Le concept d'Outillage Rapide (Rapid Tooling ou RT) est apparu naturellement dès 1995 et notre équipe a publié sur le plan international, dès l'origine^{[6], [7], [8], [9]} et au total, plus de 70 publications sur le sujet.

Il s'agit cette fois d'utiliser les procédés de prototypage rapide pour réaliser directement des outillages nouveaux utilisables ensuite par les grands procédés

industriels de la plasturgie, de la fonderie, de la mise en forme ... par exemple pour la réalisation d'outillages rapides d'injection nécessaires à la production en série de pièces plastique.

Le concept général de l'Outillage Rapide est donné figure 9 et illustré figure 10.

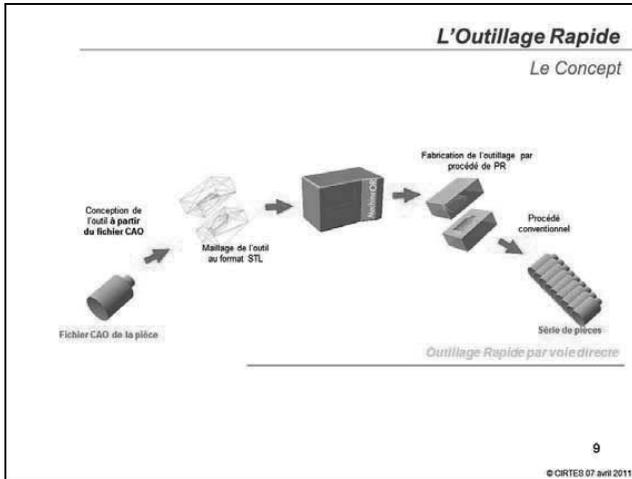


Figure 9

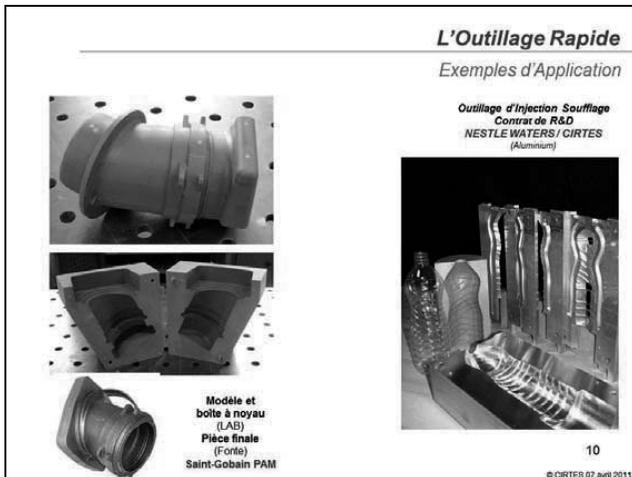


Figure 10

Tous les outillages sont aujourd'hui concernés, les résultats industriels les plus rapides ont été obtenus sur les outillages « basse pression - basse température », tels que modèles, pour la fonderie sable, le moulage au contact, le thermoformage ... où il est facile d'identifier les procédés de Prototypage Rapide, directement opérationnels.

L'enjeu est encore bien plus important pour ce qui concerne les grands procédés destinés à la grande série. Dans ce cas, les contraintes sur les outillages sont sévères tant du point de vue mécanique que thermique. Pour répondre à ces exigences, ce sont seuls les procédés de Prototypage Rapide utilisant les matériaux métalliques qui apportent une réponse industrielle. Les procédés de PR émergents sont par conséquent principalement le frittage de poudre métallique, la stratoconception métal et la fusion de poudres métalliques.

Les applications se multiplient dans le domaine de la plasturgie, pour l'injection et le soufflage, mais aussi dans celui de la fonderie sous pression et même de la mise en forme par emboutissage.

Plusieurs projets européens de R&D collective présentent aujourd'hui des résultats avancés dans ces domaines.

En France, par exemple, le CIRTES pilote le projet PROMAPAL sur l'outillage rapide pour l'injection d'aluminium en grandes séries de pièces type culasses moteur, pour un leader européen de l'automobile.

Un autre intérêt majeur apparaît ces derniers mois, les procédés de PR offrent de nouvelles possibilités de conception interne de ces outillages. Il est possible d'intégrer directement dans l'outillage tous les systèmes de régulation et de refroidissement et ceci de manière beaucoup plus optimisée. L'intégration de capteurs devient même possible.

La conception des outillages est fortement remise en cause et c'est bien cette nouvelle capacité qui pourrait bouleverser ce domaine traditionnel de la mécanique.

Une des premières conséquences de l'utilisation du concept d'outillage rapide est toutefois d'imposer une modélisation CAO numérique totale, non plus seulement de la pièce mais de l'outillage complet pour ses différentes parties avant de les convertir en format STL. Le passage d'un simple modèle surfacique de la peau d'une pièce à celui du pilotage de la CN de l'outil va devenir de plus en plus limité.

La Fabrication Rapide

Si cette dernière application d'outillage rapide reste de loin le domaine le plus porteur et ne cesse de se perfectionner, une autre voie se dessine actuellement, celle de la fabrication rapide (Rapid Manufacturing ou RM). Une opération qui peut être directe (sans aucun moule ou modèle intermédiaire), auquel cas la pièce est fabriquée en petite série grâce au système de PR.

Si la fabrication est indirecte, avec moule ou modèle intermédiaire réalisé avec les machines de PR qui serviront ensuite à fabriquer les pièces finies, nous revenons au concept de Rapid Tooling. Le concept général de la Fabrication Rapide est donné figure 11 et illustré figure 12.

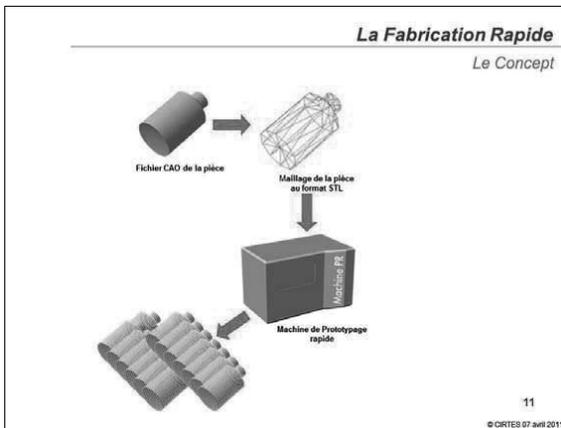


Figure 11

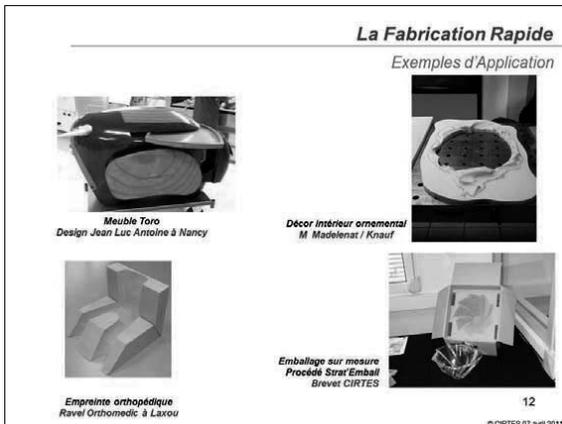


Figure 12

Encore à ses premiers balbutiements, cette démarche innovante de RM peut s'appliquer avantageusement à de nombreux domaines industriels : du médical, le précurseur, à l'automobile, l'aéronautique, l'électroménager, l'appareillage électrique, etc... Avantageusement, car il suffit de penser que grâce au RM, la mise au point et la fabrication d'un moule par les moyens classiques gourmands en temps et en argent, deviennent inutiles.

Malgré le fait que le RM n'en soit, en effet, qu'à ses premiers pas industriels et que l'on ne puisse inventorier que très peu d'applications, son potentiel est énorme. Son champ d'application est pratiquement sans fin dès lors que l'on envisage une autre conception des produits.

Le Prototypage Rapide dans la Chaîne Numérique du DRP

Fabriquer des nouveaux outillages grâce aux procédés de prototypage rapide ou fabriquer directement certains produits par ces mêmes procédés sont les évolutions industrielles majeures des prochaines années : un bouleversement technologique, source de réduction de délais et de coûts, qu'il va falloir prendre en compte dès la conception du nouveau produit dans l'environnement de la CAO.

La figure 13 situe les procédés de prototypage, d'outillage et de fabrication rapides dans la chaîne numérique du DRP.

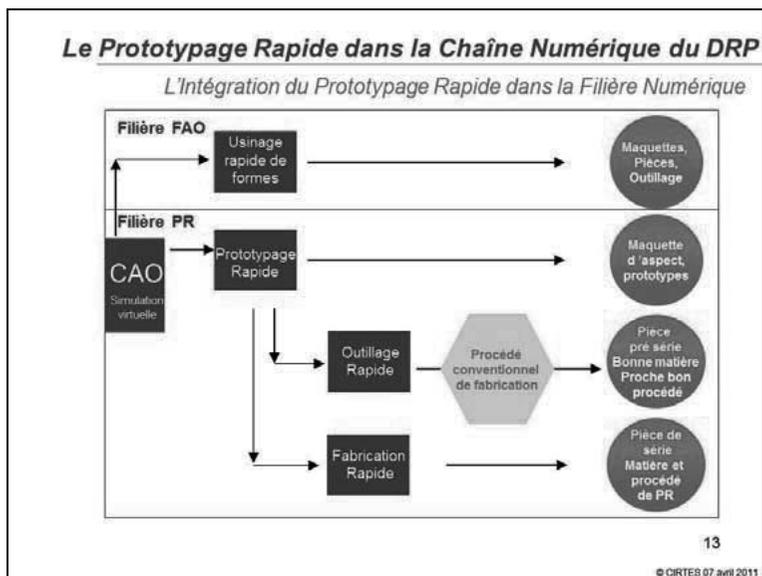


Figure 13

Le Procédé de Stratoconception®

A l'origine, à la fin des années 80, ce sont mes propres travaux de recherche qui ont conduit au procédé breveté de Stratoconception® en 1991^[2].

Stratoconception® est le procédé de prototypage rapide de type solide/solide qui permet la fabrication, couche par couche, d'un objet dessiné en CAO, sans aucune rupture de la chaîne numérique.

Le procédé (figure 14) consiste en la décomposition automatique de l'objet en une série de couches élémentaires complémentaires appelées strates, dans lesquelles sont placés des inserts de positionnement et des renforts.

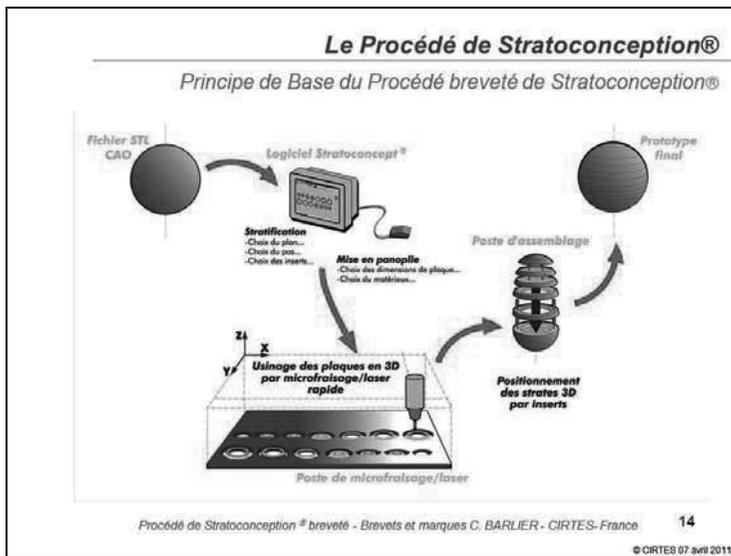


Figure 14

Chacune de ces strates est directement mise en panoplie, puis fabriquée 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. Toutes ces strates sont ensuite positionnées par des inserts, des pontets ou par des éléments d'imbrication et assemblées afin de reconstituer la pièce finale. L'assemblage des strates est pris en compte dès l'étape de conception afin d'assurer la tenue aux contraintes mécaniques pendant l'utilisation. Les inserts servent à la fois de pions de positionnement et de liens entre les strates. Dans le cas de pièces à parois minces, ils sont placés à l'extérieur de la pièce par l'intermédiaire de pontets sécables. Dans certains cas, il est également possible d'imbriquer les strates les unes dans les autres.

Le procédé est très rapide et sans limitation de forme (intérieure ou extérieure), de matériau (bois, polymères, métaux) ou de taille (quelques millimètres à plusieurs mètres). Il permet la fabrication de pièces massives avec contre-dépouilles qui ne pourraient pas être fabriquées avec des procédés conventionnels. Il peut être utilisé aussi bien pour la fabrication de pièces mécaniques, de maquettes ou de modèles, ...

Depuis l'origine du procédé, l'équipe du CIRTES travaille à sa mise au point et à son développement (figure 15) pour lequel 19 brevets internationaux (France, Europe, Etats-Unis, Canada, Chine et Japon) et 8 marques ont été déposés à ce jour (figure 16). Le procédé a fait également l'objet de nombreuses publications et communications internationales ainsi que d'articles dans les revues spécialisées.

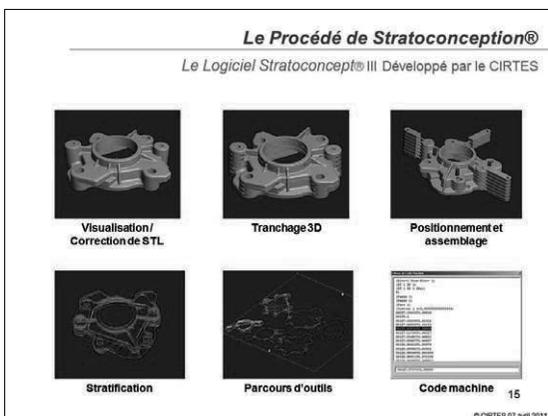


Figure 15

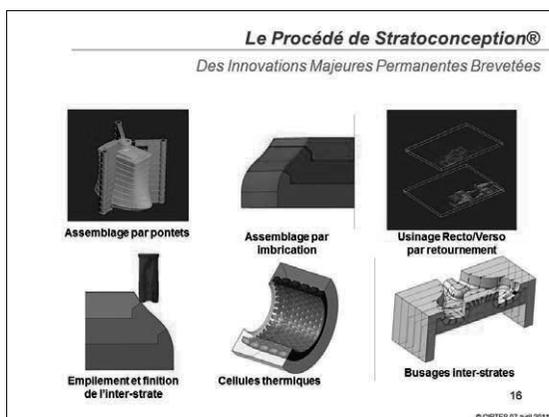


Figure 16

Le procédé de Stratoconception® s'est orienté très tôt (1995) vers l'outillage rapide, et en particulier vers les applications dédiées aux procédés tels que le thermoformage, la fonderie, l'emboutissage et ou bien l'injection. Il trouve des applications également dans le domaine de l'emballage et dans celui de la réalisation d'œuvres d'art, de moyennes et grandes dimensions.

Applications aux œuvres d'Art, au design et à l'architecture,

Les étapes de la création ou reproduction d'œuvres d'art sont données figure 17.

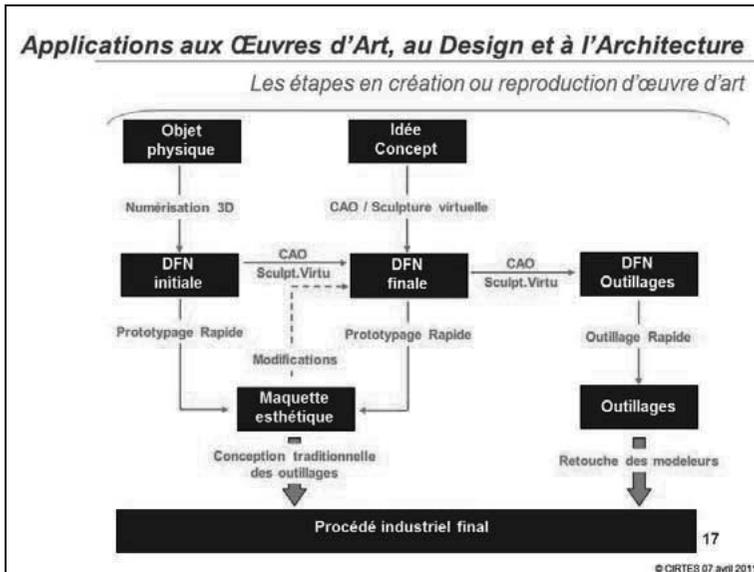


Figure 17

Notre équipe a publié de nombreuses fois sur le sujet, en particulier sur les thèmes présentés dans les publications suivantes : ^{[10], [11], [12], [13], [14]}.

Pour illustrer, je vous propose maintenant quelques exemples d'applications réalisées par nos équipes sur notre site de Saint-Dié-des-Vosges et sur notre site de Carmaux, dans le Sud-Ouest.

- Application à la reproduction d'une œuvre de Dominique POLLES ^{[15], [16]}

Cette première application est illustrée sur les figures 18 à 21. La figure 18 présente la première étape de numérisation de la création originale de D. Pollès, en général une taille réduite par rapport à la taille monumentale de l'œuvre finale.

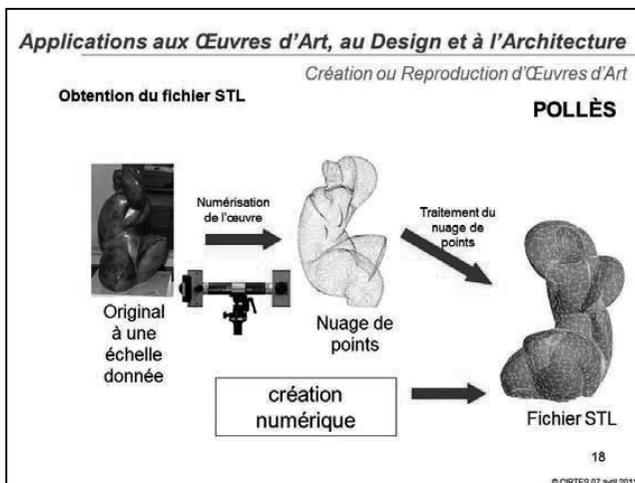


Figure 18

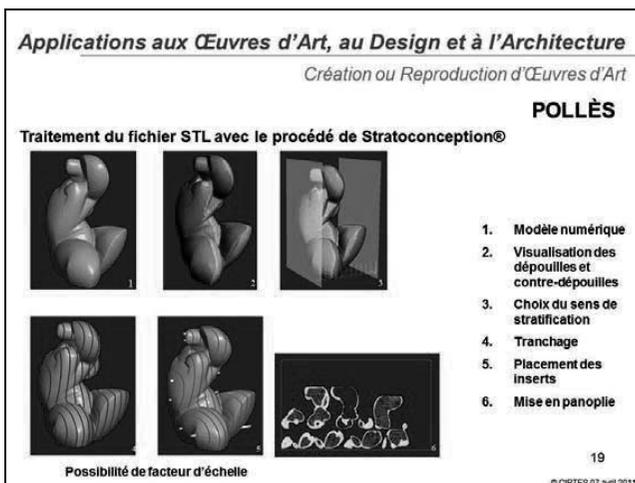


Figure 19

Cette numérisation conduit, après traitement, à l'obtention d'un fichier numérique sous forme de maillage au format STL. Les images suivantes présentent les étapes du procédé de stratoconception, de la recherche du plan de stratification jusqu'au parachèvement de la pièce finale en prototypage rapide (figure 20) puis en outillage rapide pour une réalisation de grande taille, en bronze ou en béton (figure 21). Nous avons souvent échangé avec Dominique Pollès, le sculpteur a intégré notre procédé de stratoconception dans son atelier en Toscane dès 2003.

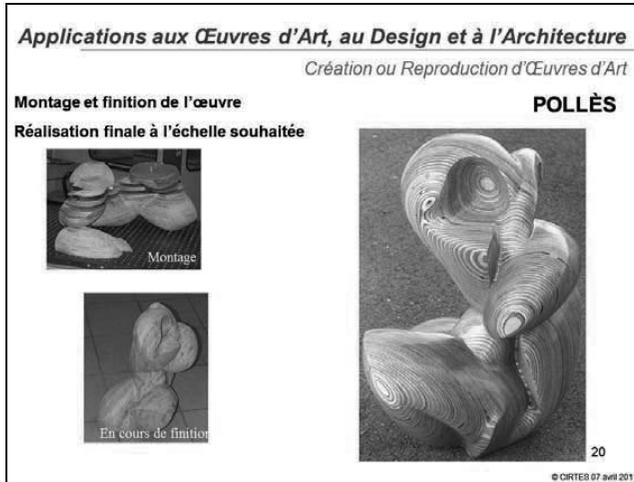


Figure 20

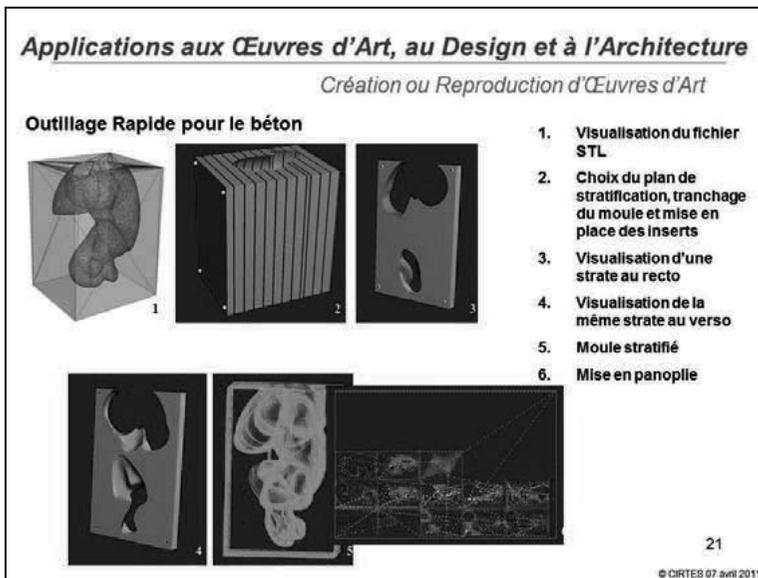


Figure 21

Pour situer l'artiste, dans l'ouvrage de Sylvie Blin qui présente Pollès et une partie de ses œuvres^[15], Maurice Rheims de l'Académie Française a écrit « Je l'ai dit, je l'ai écrit, je tiens Pollès pour l'un des plus remarquables sculpteurs de notre temps ».

- Application à la création de pièces pour Daum

Après une étape de numérisation d'un modèle en plâtre (figure 22), un bras haptique permet de réaliser, par sculpture virtuelle 3D (figure 23), un changement d'échelle, des modifications de posture, une modification de



Figure 22



Figure 23

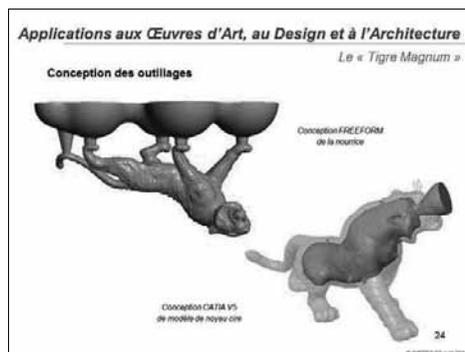


Figure 24

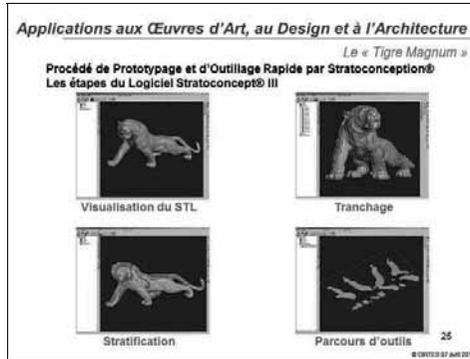


Figure 25



Figure 26



Figure 27

texture puis la conception des éléments d'outillage nécessaires à la coulée de la cire perdue. La réalisation du modèle mère est résumée sur les figures 24 à 26 et après le process global du métier d'art de verrier de Daum, la pièce est obtenue en pâte de verre (figure 27).

Une autre réalisation Daum pour le sculpteur Armand (Vénus) est présentée sur les figures 28 et 29.

Pour cette pièce unique d'exception, le procédé de stratoconception a été utilisé pour la réalisation d'outillages destinés à la fabrication de couches par Cire perdue en pâte de verre et par fonderie en argent massif.

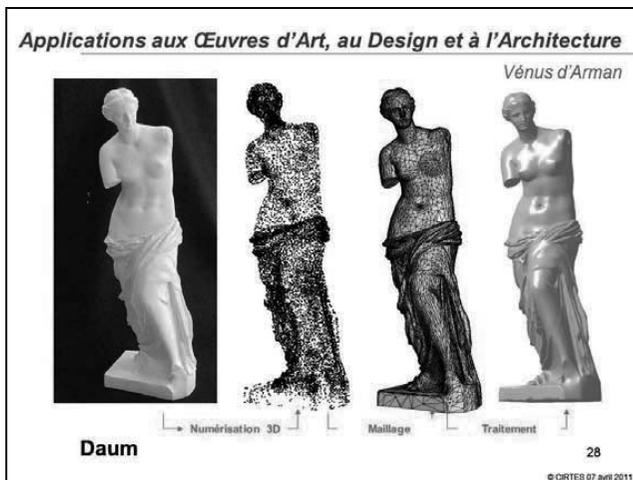


Figure 28



Figure 29

- Applications à la reproduction de pièces de musée, au design et à l'architecture

Les figures de 30 à 36 présentent des réalisations du Cirtes pour l'art, le design et l'architecture. Le buste de Jules Ferry a été réalisé en 1997 à partir de l'original déposé au musée Pierre Noël de Saint-Dié des Vosges, le modèle a permis de réaliser un bronze d'art à l'échelle 1 qui a été remis, à l'époque, au Ministre de l'enseignement supérieur et de la Recherche.

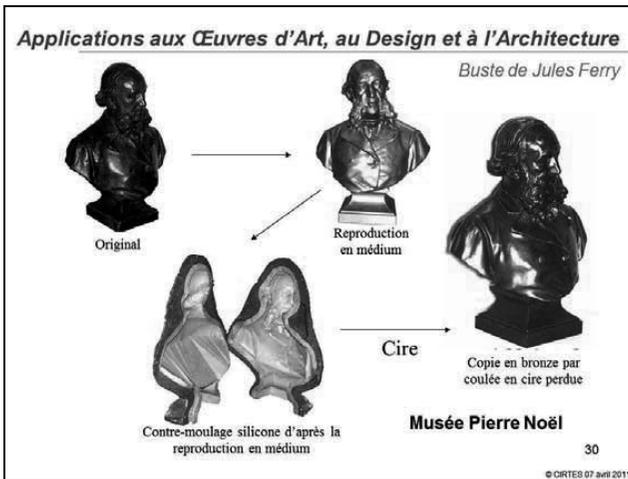


Figure 30



Figure 31

La grappe de raisin est une pièce monumentale réalisée en outillage rapide et coulée béton pour décorer un rond point de la ville de Boulay, en Moselle.

La cathédrale Saint Basile de Moscou a été réalisée en maquette pour une exposition dans le cadre du Festival International de Géographie en 2010, le pays invité étant la Russie. Le meuble Toro du designer Jean-Luc Antoine et la chaise Ot'Arts (figures 34 à 36) de ma propre création sont des exemples qui illustrent le concept de fabrication rapide.

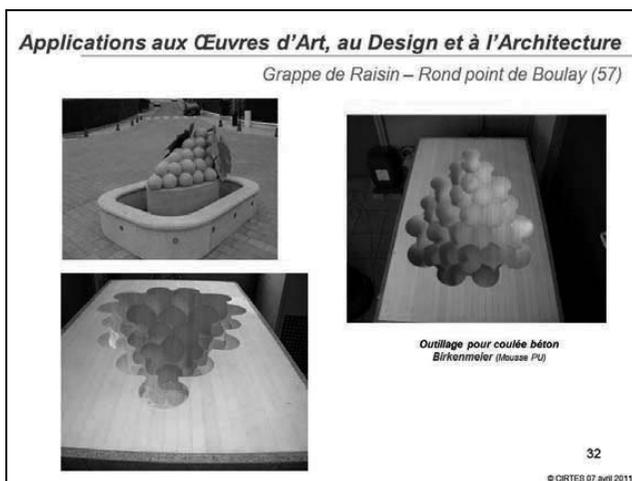


Figure 32



Figure 33

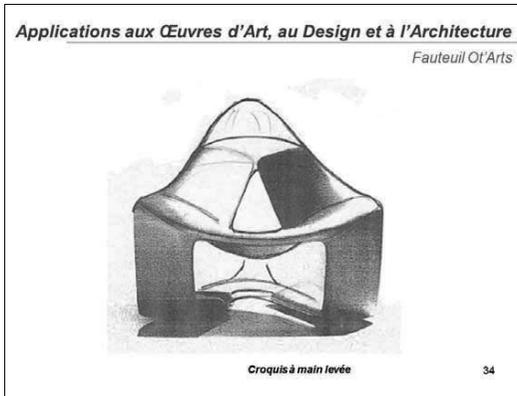


Figure 34

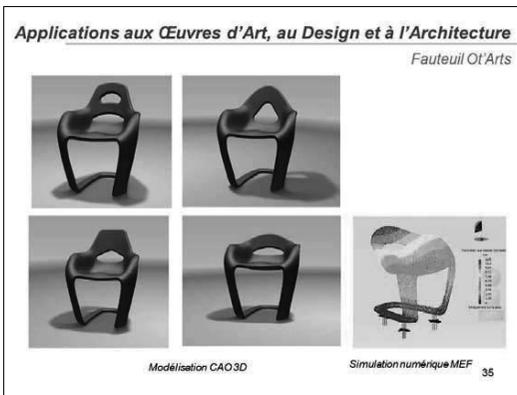


Figure 35



Figure 36

Conclusions et perspectives

Cette communication, illustrée par quelques exemples réalisés par nos équipes au cours de ces quinze dernières années, avait pour objectif de mettre en évidence le potentiel actuel déjà important de la filière numérique du développement rapide de produit, pour le domaine de l'art, du design et de l'architecture.

Les recherches dans ce domaine sont importantes, elles nécessitent une grande interdisciplinarité et elles font ainsi appel principalement aux sections universitaires des spécialités de recherche de la mécanique, des matériaux, des procédés, des mathématiques, de l'informatique et des arts.

Les procédés et technologies vont encore progresser pour devenir de plus en plus accessibles aux créateurs qui disposent ainsi de nouveaux outils permettant encore, pour leur création, de repousser le champ des possibles.



Bibliographie

- [1] - C. BARLIER - «Le CIRTES, centre européen de prototypage rapide de l'ESTIN à Saint-Dié-des-Vosges » - Actes des deuxièmes Assises Européennes du Prototypage Rapide, Ecole Polytechnique, Palaiseau, 26 mai 1993
- [2] - C. BARLIER - «Le procédé de prototypage rapide par STRATOCONCEPTION[®] » - Actes des premières Assises Européennes du Prototypage Rapide, Ecole Polytechnique, Palaiseau, 2-3 juin 1992.
- [3] - C. BARLIER - «Centre d'Ingénierie de recherche et de transfert européen » - Actes des IV^{èmes} conférences Internationales STRIDE, Metz, 7-8 février 1994
- [4] - D. GASSER, C. BARLIER - "Activity of Engineering Research and Transfer Centre" - "BRITE EURAM CRAFT project in partnership CIRTES - TRANSCAT" - EARP meeting in EIBAR - BILBAO, 12-15 mars 1995
- [5] - ML. SPAAK - Le prototypage Rapide pour comprendre et analyser les enjeux - ADIT - mars 1995
- [6] - C. BARLIER, U. FELTES, D. GASSER, F. MULLER - " STRATOCONCEPTION[®], Rapid Prototyping for die-forging tooling" - Actes - 28th ISATA à STUTTGART, Germany, 18th - 22nd September, 1995
- [7] - C. BARLIER, D. GASSER - «STRATOCONCEPTION[®] un procédé original de prototypage rapide » - Revue Internationale de CFAO et d'informatique graphique, volume 10, n° 6 - Pages 623/634 - Décembre 1995.

- [8] - J. THABOUREY, C. BARLIER, F. BILTERYST, M. LAZARD, J.L. BATOZ. Rapid laminated tooling in die casting : design, fabrication, modelling and experimental tests - The 1st DAAAM International Specialized Conference on Additive Technologies - Celje (Slovénie) - 20th April 2007
- [9] - B. DELEBECQUE, Y. HOUTMANN, G. LAUVAUX, C. BARLIER - Automated generation of assembly features in layered manufacturing - Rapid Prototyping Journal, Emerald Group Publishing Limited, ISSN. 1355-2546 - 2008 - Outstanding Paper Award 2009 - Le meilleur article de l'année 2009
- [10] - J.L. ANTOINE, M. DIETSCHÉ, 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
- [11] - E. HUGUENIN, C. BARLIER, E. DURAND - « Procédé STRATOCONCEPTION[®]. Intégration des outils CAO et prototypage rapide en vue de la reproduction d'œuvres d'art » - Revue CFAO et d'informatique graphique - Volume 13, n° 4-5-6 décembre 1999 - pages 137 à 152
- [12] - G. LAUVAUX, B. HENNION, C. BARLIER, E. DURAND - « Télé-sculpture virtuelle & prototypage rapide d'œuvres d'art de grandes dimensions - une évolution du procédé de « Stratoconception[®] dédiée à la réalisation de sculptures et de pièces aux formes libres à taille humaine » - Euro-RP' 2001 - 9^{èmes} Assises Européennes du Prototypage Rapide / 10th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing - PARIS EXPO - Porte de Versailles - 7 et 8 juin 2001
- [13] - G. LAUVAUX, S. LAZARD, C. BARLIER - « Orientation des pièces artistiques pour le procédé de Stratoconception[®] » - 10^{èmes} Assises Européennes de Prototypage Rapide - Courbevoie - les 14&15 Septembre 2004
- [14] - G. LAUVAUX - « Réalisation d'œuvres d'art par prototypage rapide avec le procédé de stratoconception[®] - Thèse de doctorat - Geoffroy Lauvaux - IFTS Charleville-Mézières - le 17 Juin 2005
- [15] - S. BLIN - POLLES - Editions Polistampa - septembre 2003
- [16] - M. ONFRAY - La vitesse des simulacres - Les sculptures de Pollès - Editions Galilée - novembre 2008