

Le prototypage rapide au service du design de produits

CLAUDE BARLIER, DAVID DI GIUSEPPE⁽¹⁾

Les techniques de prototypage rapide, qui conduisent rapidement à des modèles validant la conception et à des tests fonctionnels, apportent une contribution capitale à la production mécanique.

De la numérisation au prototype virtuel puis à la fabrication rapide de maquettes physiques, voici donc un tour d'horizon des aspects stratégiques et techniques de la chaîne numérique de développement rapide de produits, avec plusieurs études de cas.

Les concepteurs d'aujourd'hui doivent intégrer pleinement le cycle de vie du produit, qui va de la saisie du besoin jusqu'à sa destruction en passant par son utilisation. Pour ce faire, ils disposent des nombreux outils de la chaîne numérique de développement rapide de produit (DRP) **1** **2**, de plus en plus adaptés et de plus en plus performants. Issus des procédés de prototypage rapide (*rapid prototyping* ou RP), apparus sur le marché à la fin des années 1980 dans un contexte de compétitivité industrielle et de développement des procédés de fabrication ainsi que des nouvelles technologies

liées au développement très rapide de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique, ces outils pluritechnologiques ont considérablement déplacé les limites de la création. Ils ne sont plus réservés aux centres de recherche & développement des grands groupes industriels, et sont maintenant accessibles aux bureaux d'études de petites entreprises.

Les maillons de la chaîne Les logiciels de simulation

Les logiciels de simulation et de calcul sont maintenant tellement développés qu'ils permettent de tester et d'opti-

Mots-clés

conception et définition, design industriel, outil et méthode, prototypage

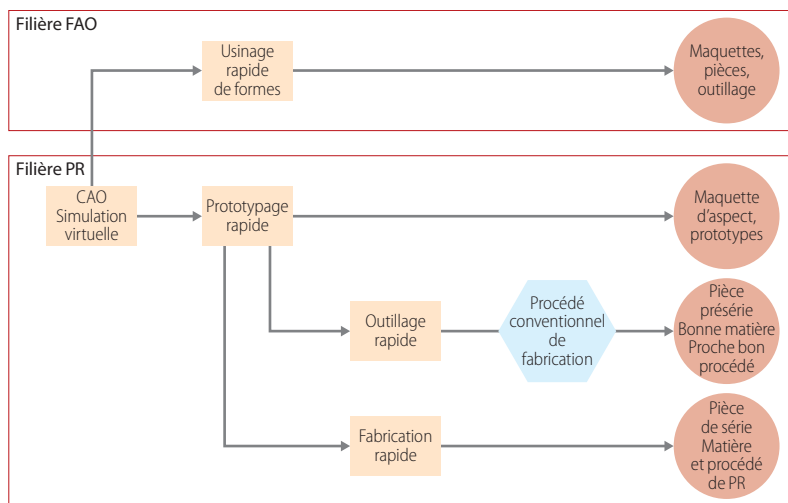
miser un grand nombre de paramètres en conception, en fabrication et en utilisation du produit. On peut les classer en trois grandes familles :

- Les logiciels de conception et d'optimisation de produit en mécanique (cinématique, dynamique, thermique, acoustique...) permettent de valider la conception même du produit, et de vérifier son adaptation aux sollicitations extérieures qui lui sont appliquées.
- Les logiciels de simulation de procédés (emboutissage, forge, fonderie, plasturgie, assemblage, UGV...) vérifient, à partir des définitions numériques des pièces, que les outillages conçus en CAO permettent bien leur obtention, en termes de géométrie et de caractéristiques mécaniques.
- Les logiciels de simulation de l'environnement (biomécanique, dynamique des fluides, compatibilité électromagnétique...) permettent d'anticiper le comportement du produit dans son environnement.

Le prototypage virtuel

Les systèmes de prototypage virtuel ou réalité virtuelle sont venus compléter cette chaîne. Il s'agit d'outils performants de visualisation du design du produit dans un environnement virtuel proche du réel pour lequel il est destiné **3**. Cette visualisation peut être réalisée en 3D et également de manière immersive avec des interactions possibles avec l'opérateur. Une autre utilisation majeure de la réalité virtuelle est la possibilité de couplage de celle-ci avec les logiciels de conception, de mise en forme, voire d'évolution dans l'environnement.

L'une des conséquences des capacités de ces procédés de prototypage



1 La chaîne numérique du DRP



virtuel a été la diminution très rapide de la quantité de pièces obtenues par prototypage physique.

Actuellement, ce n'est plus le cas, parce que d'une part certains phénomènes physiques liés à l'utilisation du produit dans son environnement sont difficilement modélisables, et que d'autre part les contraintes liées aux normes et le niveau de fiabilité requis ont fait monter le degré d'exigence en conception/fabrication.

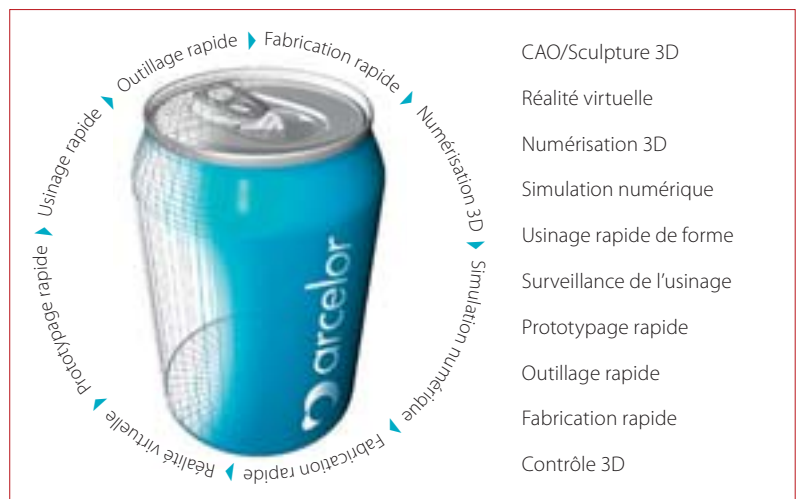
Dans l'automobile, par exemple, la tendance est d'utiliser le prototypage virtuel pour sélectionner des solutions technologiques et esthétiques avant de les valider par prototypage physique.

L'outillage rapide

Le développement technologique des procédés de prototypage rapide s'accroît très rapidement tant dans le domaine des procédés que dans le domaine des matériaux. La simple validation de l'aspect esthétique ou de la forme du produit ne suffit plus ; le besoin en prototypage est passé de la représentation du produit par une maquette à la représentation du produit *et* du procédé. Le concept



3 La maquette géométrique d'un turbo réalisé par Stratoconception pour PSA



2 La chaîne de développement rapide de produit appliquée à l'emballage et au conditionnement (thématique de VirtualReal 2006)

d'outillage rapide (*rapid tooling* ou RT) est alors apparu naturellement dès 1996.

Il s'agit cette fois d'utiliser les procédés de prototypage rapide pour réaliser directement de nouveaux outillages utilisables par les procédés industriels du domaine de la plasturgie, de la fonderie, de la mise en forme par emboutissage..., par exemple des outillages rapides d'injection, nécessaires à la production en série de pièces de fonderie.

Tous les outillages sont aujourd'hui concernés. Les résultats industriels les plus rapides ont été obtenus sur des outillages basse pression, basse température, appliqués à la fonderie sable, au moulage au contact, au thermoformage..., où il est facile d'identifier les procédés de prototypage rapide, directement opérationnels.

L'enjeu est encore bien plus important en ce qui concerne certains procédés destinés à la grande série. Les contraintes sur les outillages sont tellement importantes d'un point de vue mécanique et thermique que seuls les procédés utilisant les matériaux métalliques peuvent apporter une réponse satisfaisante. Les procédés de prototypage rapide émergents sont donc principalement le frittage de poudre métallique, la Stratoconception métal et la fusion de poudres.

Les applications se multiplient dans la plasturgie, pour l'injection et le soufflage, mais aussi dans la fonderie sous pression et même dans la mise en forme par emboutissage. Plusieurs projets européens de R&D collective de type Craft (*Cooperative research action for technology*)^[2] présentent aujourd'hui des résultats avancés dans ces domaines.

Les procédés de prototypage rapide offrent de nouvelles possibilités dans la conception des outillages. En effet, il est possible d'intégrer directement dans l'outillage tous les systèmes de régulation et de refroidissement... et même des capteurs ! Il s'agit alors du concept d'« outillage rapide intelligent », concept initié par le Cirtes (lire en encadré) avec le système Actarus dès 1996. Ces capteurs, une fois intégrés et associés à un système d'acquisition et de traitement des informations en continu, permettent de créer une véritable

[1] C. Barlier est professeur des Écoles des mines, directeur général du Cirtes et directeur de l'Insic (Institut supérieur d'ingénierie de la conception) ; D. Di Giuseppe est ingénieur chef de projet R&D au Cirtes.

[2] Ces projets permettent à un minimum de trois PME mutuellement indépendantes, situées dans au moins deux États membres ou un État membre et un pays associé, de demander ensemble à un organisme de recherche tiers (qui n'est pas considéré par la Commission comme un participant au projet) de conduire, en sous-traitance, une recherche pour leur compte.



4 Un outillage par Stratoconception pour la mise en forme des matériaux composites SMC
(contrat de R&D MEA/Cirtes)

boucle de régulation matériau-outillage-procédé.

La conception traditionnelle des outillages est par conséquent fortement remise en cause, ce qui bouleverse les usages de la mécanique. L'une des premières conséquences de l'utilisation de ce concept d'outillage rapide est d'imposer une modélisation CAO numérique totale, et non plus une modélisation numérique de la pièce, puis de l'outillage qui lui est associé **4**.

Même si cette dernière application de l'outillage rapide reste de loin le domaine le plus porteur et ne cesse de se perfectionner, l'autre voie qui se dessine actuellement est celle de la fabrication rapide.

La fabrication rapide

La fabrication rapide (*rapid manufacturing* ou RM) est une opération qui peut être directe (sans moule ou modèle préalable), auquel cas la pièce est fabriquée en petite série directement grâce au système de prototypage rapide.

Dans le cas où la fabrication est indirecte (avec un moule ou un modèle préalable réalisé avec les machines de prototypage rapide, lesquelles serviront ensuite à fabriquer les pièces finies), nous revenons au concept d'outillage rapide.

Encore à ses premiers balbutiements, cette démarche innovante de fabrication rapide peut s'appliquer avantageusement à de nombreux



5 Un emballage réalisé en fabrication rapide (procédé Strat'Emball)

domaines industriels : du médical, le précurseur, à l'automobile, l'aéronautique, l'électroménager ou l'appareillage électrique, en passant par le mobilier de bureau, voire la décoration.

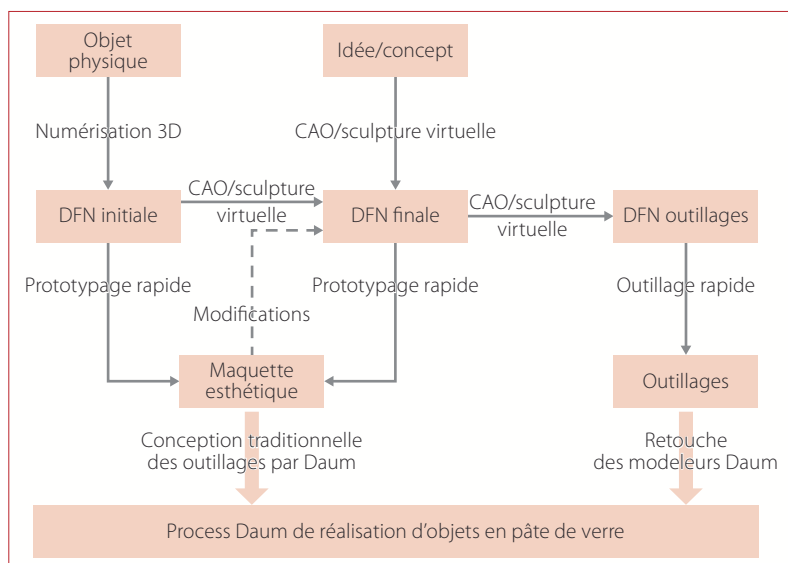
Grâce à la fabrication rapide, la mise au point et la fabrication d'un moule par les moyens classiques (gourmands en temps et en argent) deviennent inutiles.

Du point de vue de la conception :

- Les pièces de fabrication rapide peuvent être plus complexes sans poser de problèmes en fabrication (pour les pièces moulées ou réalisées en fonderie, car il n'est pas nécessaire de concevoir les angles...).
- Le nombre de composants d'un assemblage complexe est réduit.
- Le modèle de conception peut être modifié autant de fois que nécessaire.
- Certains assemblages peuvent être réalisés en une seule partie avec le paramétrage CAO.
- Des structures non homogènes avec différentes propriétés d'une zone à l'autre peuvent être conçues.

Du point de vue de la fabrication :

- La géométrie du produit peut varier sans influencer la production.
- L'élimination de l'outillage réduit le cycle de fabrication et les coûts de production.
- Le processus se déroule en flux tiré sans en-cours et avec moins de stocks.
- La production est plus flexible.



6 La chaîne numérique mise en place chez Daum

© CIRTES



Cette fabrication rapide est plus économique pour des petites séries et du sur-mesure **5**, car elle permet une meilleure adaptation aux fluctuations de la demande. Elle est aussi possible localement, ce qui réduit les coûts d'emballage, de transport et de stockage...

Bien que la fabrication rapide n'en soit qu'à ses premiers pas industriels et que l'on ne puisse inventorier que très peu d'applications pour le moment, son potentiel est énorme. De plus, son champ d'application est pratiquement sans fin, dès lors que l'on envisage une autre conception des produits.

La numérisation et le contrôle 3D

Le contrôle 3D est réalisé traditionnellement avec des machines à mesurer tridimensionnelles qui viennent palper un objet afin d'en contrôler les dimensions et la géométrie. Il s'agit là d'un bouclage de la chaîne de conception du produit. Dans certains cas de pièces à forme gauche, la numérisation 3D permet de réaliser ces contrôles dimensionnels. Cependant, la numérisation est plutôt un point d'entrée de la chaîne numérique qui permet d'obtenir une définition numérique d'un objet à partir d'une pièce existante.

Dans une démarche de conception, l'idéal est d'associer tous les maillons de la chaîne. Cependant, ce n'est pas toujours possible ou utile. Actuellement, les entreprises qui maîtrisent tout le processus de conception et fabrication du produit ne possèdent ou n'utilisent qu'une partie de cette chaîne numérique.

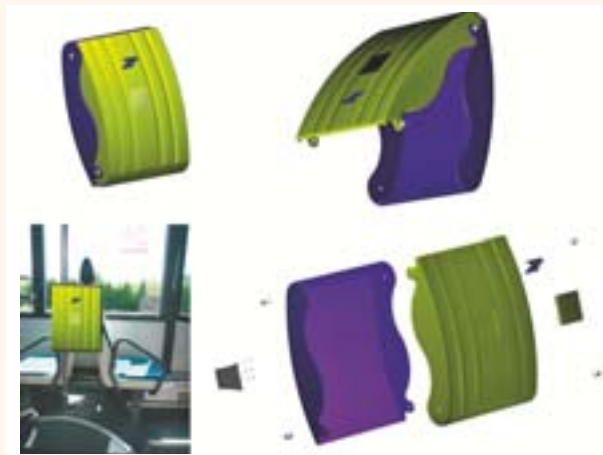
Fabriquer de nouveaux outillages plus rapides et plus « intelligents » grâce aux procédés de prototypage rapide ou fabriquer directement certains produits par ces mêmes procédés, telles seront les évolutions industrielles majeures des prochaines années. Ce bouleversement technologique, ayant pour effet la réduction des délais et des coûts, devra être pris en compte dès la conception d'un nouveau produit dans la chaîne numérique.

Des exemples d'applications de prototypage rapide

1

UNE BOÎTE À LETTRES POUR LA POSTE

(contrat de R&D Cirtes/LaPoste)



Le modèle virtuel



Le modèle réel en situation

2

UNE GAMME DE MACHINES DE TRI SÉLECTIF POUR LA SOCIÉTÉ PELLENC

(Architecture et design/PSV/Strat'ym/Pellenc/Cirtes)

Les étapes de la réalisation d'une pièce composite

- Outillage rapide par Stratoconception : maître-modèle
- Outillage de série en matériau composite
- Pièce série en composite

Ces exemples ont été présentés lors des conférences de novembre dernier dans le cadre des Rencontres internationales du développement rapide de produit VirtuReal 2007, dont le thème était : « Les outils du DRP pour le design ». Les Rencontres 2008 du mois de novembre prochain porteront sur l'utilisation des outils du DRP pour le développement des véhicules.



Comme nous allons le voir, l'apport de quelques maillons chaînés est déjà très important.

Le prototypage rapide appliqué aux objets d'art en pâte de verre

Depuis trois ans, le Cirtes mène des travaux de recherche & développement et de transfert de technologies pour les cristalleries Daum de Nancy. L'objectif de ce programme est d'introduire chez le verrier lorrain une véritable chaîne numérique du développement rapide de produit (numérisation 3D, sculpture numérique, prototypage et outillage rapide...) 6. L'étude menée a permis de mettre en évidence et d'intégrer ces outils à tous les développements de pièces du cristallier.

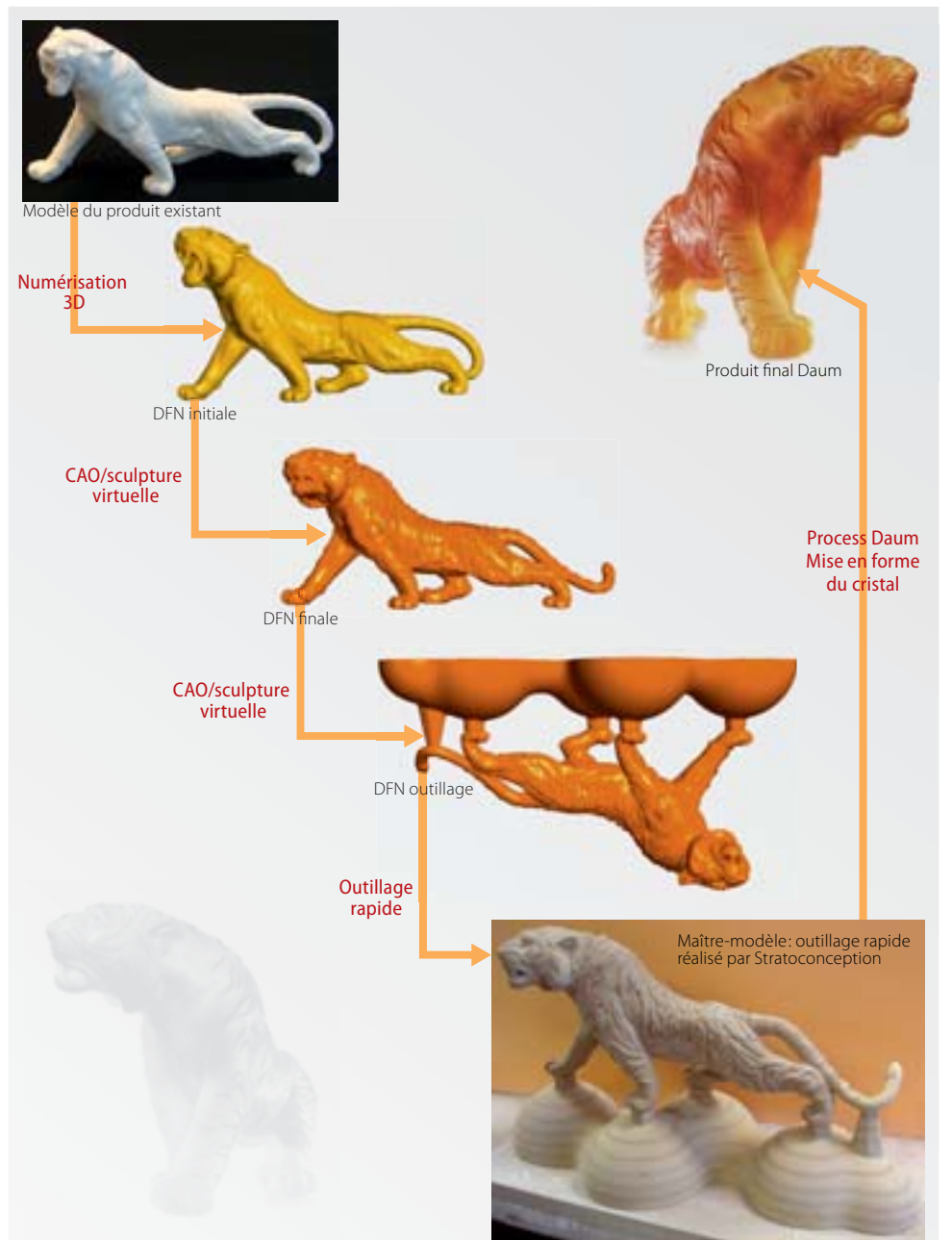
Comme le montre la figure 6, la conception d'une nouvelle pièce de collection peut partir d'un objet existant (sculpture d'un artisan modeler de chez Daum, œuvre d'un musée...). Les technologies de numérisation 3D vont permettre d'intégrer cette nouvelle pièce au sein de la chaîne numérique.

Sinon, une nouvelle pièce peut être directement conçue en CAO. Dans ce cas, les modelers ont recours généralement au dispositif de sculpture numérique, par exemple un bras à retour d'effort SensAble lié au logiciel FreeForm.

La DFN (DéFinition Numérique) ainsi obtenue peut être aisément modifiée selon les désirs du responsable de la création. Elle est aussi directement utilisable pour la fabrication d'un prototype permettant de valider l'œuvre sur un modèle physique. Cette maquette est également utilisée comme « maître-modèle », permettant le développement d'un outillage pour la future fabrication en série.

Dans le cas de pièces complexes, la DFN finale sert à la conception de la DFN des outillages utilisée pour la production.

Le partenariat entre le Cirtes et l'entreprise Daum a permis un nombre



7 Le processus de modification du tigre à l'aide de la chaîne numérique

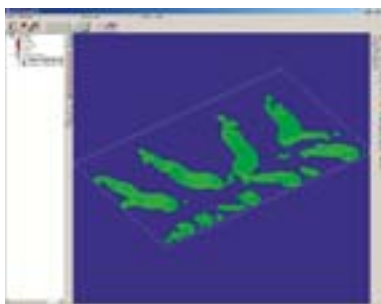
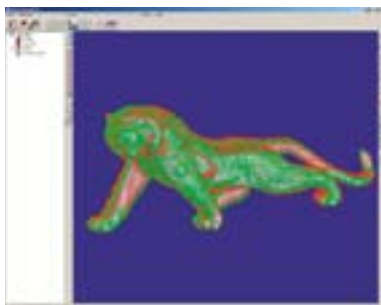
important d'études de cas liées aux différents plans de collection. Parmi elles, la conception et la réalisation du tigre Magnum, qui illustrent bien les nouvelles possibilités offertes aujourd'hui aux créateurs.

Le tigre Magnum

La mise en place de la chaîne numérique a permis la réalisation d'une variante de cette pièce existante de l'entreprise Daum. Le tigre est devenu plus gros, et son attitude moins agressive.

L'original a été numérisé en 3D au Cirtes. La définition numérique ainsi obtenue a été traitée et modifiée grâce à un système de sculpture virtuelle qui permet de retravailler très facilement des définitions numériques de pièces de formes complexes. Ce dispositif a d'ailleurs été aujourd'hui implanté dans l'atelier de création du cristallier 7 8.

C'est à ce moment qu'intervient la fabrication à l'aide du procédé de prototypage rapide Stratoconception.



8 Les différentes étapes du logiciel Stratoconcept III pour la réalisation de la maquette mère du tigre Magnum

Les avantages majeurs de ce procédé sont dans ce cas, d'une part, la possibilité de réaliser des pièces de grande taille (ce qui a permis la fabrication directe des modèles et des différents outillages de plus de 700 mm de long) et, d'autre part, la possibilité de choisir le matériau des maquettes. Ce procédé permet ainsi une finition directe sur le modèle prototypé.

Le Cirtes



Le Cirtes, centre français du développement rapide de produit en Europe, est situé au cœur du bassin industriel de Saint-Dié-des-Vosges, avec une antenne à Carmaux dans le Sud-Ouest. Équipé des systèmes industriels les plus performants – numérisation, CFAO, prototypage, outillage rapide, fabrication rapide, usinage rapide de formes en 5 axes et mesures tridimensionnelles –, le Cirtes met à la disposition des entreprises industrielles, de manière contractuelle, ses équipes de recherche et de transfert de technologies dans le domaine des procédés nouveaux.

Structure de recherche contractuelle, le Cirtes a pour objet de mener à bien des projets de R&D autour de deux domaines : le prototypage et l'outillage rapide par son procédé breveté de Stratoconception ; la surveillance de l'usinage par son système breveté Actarus.

Parmi les contrats actuels du Cirtes, PSA et Mecachrome pour l'automobile, Daum et Baccarat pour la cristallerie, Saint-Gobain PAM pour les canalisations, Airbus et la direction des applications militaires du CEA pour l'aéronautique et l'armement, La Poste...

Le pôle VirtuReal

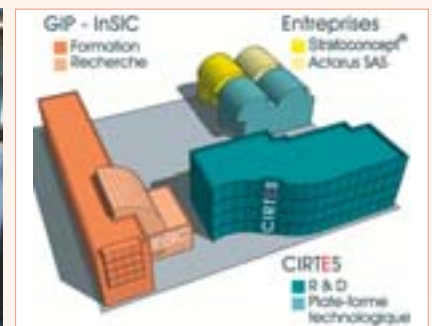
Afin d'industrialiser et de diffuser ses travaux, le Cirtes a initié la création de trois entreprises de technologies innovantes : Stratoconcept pour la diffusion du procédé de Stratoconception, Strat'ym pour la fabrication de pièces et outillages par Stratoconception et, enfin, pour la diffusion du procédé de surveillance de l'usinage, Actarus SAS.

Dernière composante du pôle, le groupement d'intérêt public (GIP) Insic (Institut supérieur d'ingénierie de la conception), qui délivre le diplôme d'ingénieur de l'École des mines de Nancy en ingénierie de la conception. L'Insic est un groupement entre l'École des mines d'Albi, l'École des mines de Nancy et le Cirtes ; il abrite également l'Équipe de recherche en mécanique et plasturgie (ErmeP). Le Cirtes et l'Insic organisent chaque année les Rencontres internationales du développement rapide de produit VirtuReal.

Les cinq entités forment le pôle VirtuReal, qui rassemble sur un même site de 6 000 m² 60 ingénieurs et chercheurs, 100 élèves ingénieurs et 12 thésards, travaillant tous sur la filière numérique du développement rapide de produit.



La plate-forme technologique outillage rapide et usinage rapide de formes



Le pôle VirtuReal

Le stage national Cerpet

Chaque année, le Cirtes invite à Saint-Dié-des-Vosges les enseignants des sections BTS à participer à une formation d'une semaine sur la chaîne numérique du DRP. Un ensemble de présentations suivies de travaux pratiques permettent aux enseignants d'assimiler et de manipuler les derniers outils numériques du développement rapide de produit.

Le projet européen EDTI de formation continue au design en Europe

Le Cirtes participe au projet European Design Training Incubator (EDTI, www.edti.eu), qui s'inscrit dans le cadre du programme Leonardo da Vinci, et dont l'objectif est de soutenir les industries créatives en Europe à travers la formation tout au long de la vie.

Le projet EDTI consiste à établir en deux ans une plate-forme européenne qui permette aux organismes liés au design d'étudier l'offre actuelle de formation continue, d'identifier les besoins, de partager et de coordonner le développement de formations ainsi que leur implantation.

Sous la coordination de Design Innovation (Belgique), outre le Cirtes, quatre partenaires européens ont été choisis pour leur expertise :

- Bayern Design (Allemagne)
- L'Estonian Design Centre (Estonie)
- Le Ruse Business Support Centre for Small and Medium Enterprises (Bulgarie)
- La Gray's School of Art de l'université Robert-Gordon (Royaume-Uni)

www.cirtes.com



9 La maquette de validation esthétique de *L'Âme de Vénus*

Les différents modèles et outillages ainsi fabriqués peuvent entrer dans le cycle de fabrication des pièces en pâte de cristal et permettre l'obtention d'une œuvre d'art représentative.

Cette même expérience a été répétée plusieurs fois au cours du partenariat. Pour la collection « Chine » de Daum, où la problématique était de reproduire des œuvres asiatiques exposées dans les musées Guimet et Cernuschi de Paris sans les toucher sous peine de les détériorer, une chaîne numérisation 3D, sculpture virtuelle, fabrication des modèles par prototypage rapide a été mise en place et a permis l'édition de cette collection dans des délais très courts.

Aux yeux du verrier lorrain, ces nouvelles technologies appliquées à

la création d'œuvres en pâte de verre représentent une multitude d'avantages : l'augmentation notable de la capacité de création, l'ouverture des possibles pour les créateurs, le raccourcissement conséquent du cycle de conception-développement, etc.

L'Âme de Vénus

Autre application majeure chez Daum : la création de l'œuvre *L'Âme de Vénus* d'Arman 9. Il s'agissait également d'obtenir, à partir d'une statue en plâtre, une première définition numérique, c'est-à-dire une modélisation en 3D. C'est ensuite, grâce aux outils de sculpture numérique 3D, que la statue a pu être « déstructurée » en couches successives de bronze (ou d'argent) et de pâte de verre pour

laisser naître à l'écran l'œuvre finale. C'est à ce moment qu'intervient le prototypage rapide par Stratoconception. À partir de la définition numérique précédente, le procédé a permis de fabriquer directement une maquette ou un modèle, parfaitement fidèle à l'œuvre initiale. Enfin, après validation de la maquette fabriquée, des outillages spécifiques ont été conçus et réalisés par Stratoconception. Ils ont permis la fabrication des lames en pâte de verre et en métal (argent massif ou bronze), ainsi que celle de différents éléments qui constituent l'œuvre finale.

Le procédé a, par conséquent, permis de réaliser deux types d'outillages rapides, un pour la fonderie et un pour la mise en forme de la pâte de verre.

Cette utilisation de la chaîne numérique est aujourd'hui, pour l'entreprise Daum, un outil essentiel pour la création. De nouvelles études, en cours dans le cadre du projet MIPI-Verre du pôle de compétitivité lorrain MIPI (Matériaux Innovants Produits Intelligents), visent à caractériser et à modéliser le comportement du verre pendant son écoulement dans le moule. À l'issue de ces recherches s'ajouteront de nouveaux maillons à cette chaîne déjà en place, ceux de la simulation numérique de procédé, qui apporteront de nouveaux gains de productivité au verrier nancéen. ■