

## Optimisation numérique en prototypage rapide

A. Schneider, J. Gardan, N. Gardan

► **To cite this version:**

A. Schneider, J. Gardan, N. Gardan. Optimisation numérique en prototypage rapide. AEPR'12, 2012, pp.actes de colloque. hal-00778316

**HAL Id: hal-00778316**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00778316>**

Submitted on 19 Jan 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## OPTIMISATION NUMERIQUE EN PROTOTYPAGE RAPIDE

**Alexandre Schneider**  
IFTS, Université Reims  
Champagne-Ardenne  
alexandre.schneider@univ-reims.fr

**Julien Gardan**  
Société AZTECH  
julien.gardan@aztech-innovation.com

**Nicolas Gardan**  
Centre technique DINCCS de MICADO  
nicolas.gardan@dinccs.com

### RESUME

Les Procédés de Prototypage Rapide de type additif utilisent le couple matière modèle/matière support lors de la construction d'une pièce. La matière support est, dans le meilleur des cas, conservée dans le cœur de la pièce prototypée et dans le pire purement éliminée ce qui implique une perte économique sèche pour l'utilisateur. Dans certains cas, pour certaines parties de pièces, le support n'a pas de rôle structurel et devient, de fait, un résidu de fabrication ce qui va à l'encontre des thématiques d'écoconception visant, entre autres, à optimiser la consommation de matière. L'approche structurelle reste relativement figée et ne s'adapte pas aux différentes sollicitations. Nous proposons d'améliorer la topologie interne d'une pièce en vue de l'adapter aux contraintes d'utilisations tout en diminuant son volume. Nous utilisons la simulation numérique pour optimiser le cœur de la structure et évaluer sa résistance mécanique pour présenter des solutions de conception prenant en compte le contexte d'utilisation tout en réduisant les coûts de réalisation.

### MOTS-CLEFS

Prototypage rapide, Procédés additifs, Optimisation topologique, Simulation numérique, Gestion de la connaissance

## 1. INTRODUCTION

Face à une situation économique et industrielle complexe, la chaîne numérique est une source de gains directs et indirects importants. Que ce soit par l'innovation et la prise en compte au plus tôt de toutes les contraintes (on sait qu'environ 75% des coûts sont déterminés dès les toutes premières phases de conception), ou par l'insertion des PME dans un tissu économique mondialisé (gains de nouveaux marchés, capacité à répondre aux donneurs d'ordres), la maîtrise de la chaîne numérique est indispensable. Il est cependant difficile pour les entreprises, notamment les PME, de disposer de toutes les compétences et outils en interne. La plate-forme NUM3D a ainsi été créée pour traiter les problématiques liées à l'ingénierie numérique et au reverse-engineering (reconstruction).

Le prototypage rapide intervient dans la majorité des cas dans la chaîne numérique pour valider une fonction d'un produit. Or la préparation du modèle numérique qui sert d'entrée au prototypage rapide est peu optimisée. En effet, l'évolution des procédés de prototypage rapide a fait émerger de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux pour mieux répondre aux fonctions d'un prototype. Dans cet élan, les machines sont devenues plus précises et les matériaux se rapprochent des caractéristiques physiques du produit final. Dans cette stratégie d'amélioration des systèmes de prototypage rapide, l'approche structurelle du modèle a gardé une géométrie homogène. Néanmoins, cette approche structurelle reste relativement figée et ne s'adapte pas à différentes sollicitations. De plus, le coût des matériaux est relativement élevé pour de nombreuses machines, et le besoin de consommer le moins de matière possible est devenue une véritable nécessité.

Nous proposons d'améliorer la topologie interne d'une pièce en vue de l'adapter aux contraintes d'utilisations tout en diminuant son volume. Nous utilisons la simulation numérique pour optimiser le cœur de la structure et évaluer sa résistance mécanique pour présenter des solutions de conception prenant en compte le contexte d'utilisation tout en réduisant les coûts de réalisation. La fabrication des spécimens est réalisée par prototypage rapide avec un matériau proche « bonne matière ». L'approche Design For Manufacturing (DFM) est utilisée à travers différents essais mécaniques nous permettant d'intégrer en amont des données nécessaires à l'analyse numérique. Plusieurs caractéristiques de fabrication ont été prises en compte pour interpréter le comportement mécanique de la structure. L'étude présente une alternative géométrique par rapport aux structures existantes à travers une démarche de simulation numérique, notamment d'optimisation topologique, et de fabricabilité.

## 2. PROCESSUS GENERAL

Les Procédés de Prototypage Rapide (PR) de type additif utilisent le couple matière modèle/matière support lors de la construction d'une pièce. La matière support est,

dans le meilleur des cas, conservée dans le cœur de la pièce prototypée et dans le pire purement éliminée ce qui implique une perte économique pour l'utilisateur. Dans certains cas ou certaines parties de la pièce, le support n'a pas de rôle structural et devient un résidu de fabrication ce qui va à l'encontre des thématiques d'écoconception visant, entre autres, à optimiser la consommation de matière. L'approche structurelle reste relativement figée et ne s'adapte pas aux différentes sollicitations.

Le gain matière peut être important que ce soit pour la matière support et/ou la matière modèle. Ce gain peut être obtenu sur une pièce de forme (sans objectif de tenue mécanique) mais également sur une pièce fonctionnelle qui prend en entrée un cahier des charges pour la simulation numérique. La figure 1 présente sur un schéma illustratif le gain éventuel entre une pièce pleine et son équivalent optimisé.

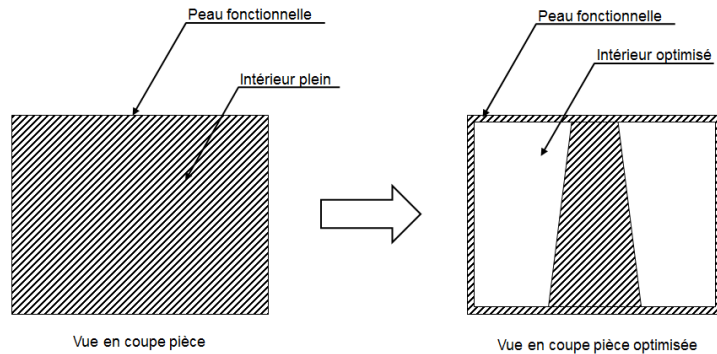


Figure 1 – Schéma illustratif du gain de matière

Nous nous proposons dans cet article une méthodologie qui répond à cette problématique. L'entrée de l'impression en PR n'est plus seulement qu'un fichier STL mais un modèle numérique qui a subi des modifications en simulation numérique et plus particulièrement d'optimisation numérique. Ce processus général (voir figure 2) permet de surcroît de modéliser la connaissance nécessaire à une bonne fabricabilité. Les évolutions technologiques en optimisation numérique permettent d'avoir un point de vue différent sur l'utilisation du PR. Selon le procédé de PR choisi et le contexte de mise en œuvre, l'utilisateur pourra définir ses espaces de conception et utiliser des arbres de décision liés à la modélisation de la connaissance pour piloter la mise en œuvre du produit.

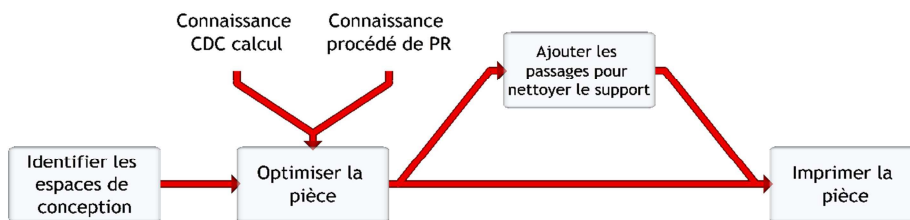


Figure 2 – Processus général

Après un état de l'art qui présente les travaux sur le gain matière support/modèle et l'optimisation numérique en général, nous présentons les aspects méthodologiques de nos travaux avant de montrer un exemple d'utilisation du processus général (figure 2) sur une application.

### 3. ETAT DE L'ART

L'étude se concentre essentiellement sur le PR par ajout de matière ou couramment appelé prototypage additif. La fabrication additive (ou AM pour Additive Manufacturing en anglais) inclut un ensemble de procédés capables de fabriquer des prototypes, des outillages ou des pièces réalisés par ajout de matière (Kruth *et al.* 1998). Le PR est une technologie qui permet d'aboutir à une représentation physique du produit défini numériquement, appelée aussi bien modèle, maquette, prototype. Le PR regroupe un ensemble d'outils qui, agencés entre eux, permettent d'aboutir à des projets de représentation intermédiaire de la conception de produits (Aoussat 2000). Pour l'AFPR, la notion de "PR" signifie littéralement "fabrication rapide de modèles et prototypes" et désigne différents procédés permettant de restituer physiquement des objets 3D, à partir du modèle CAO, dans un temps beaucoup plus court que par des techniques classiques. Il contribue à la validation de différentes fonctions que doivent remplir le produit (fonction d'usage, ergonomie, esthétique...).

Les procédés de fabrication additive sont couramment utilisés dans des domaines comme l'automobile, l'aéronautique ou le médical. Les matériaux peuvent être différents selon les procédés employés, comme des résines liquides photosensibles, des matériaux thermo-fusibles, des cires ou des poudres métalliques, plastiques, hydrauliques ou encore céramiques.

Pour l'expérimentation et la validation physique de notre étude, la machine que nous utilisons est une EDEN 260V de l'entreprise Objet Geometries™. La gamme EDEN utilise les matériaux Fullcure pour la fabrication de produit et le logiciel Objet Studio™ pour la génération des tranches à imprimer. Nous avons choisi pour l'étude la matière Modèle Fullcure 835™ (appelée VeroWhite) pour ses propriétés combinant stabilité dimensionnelle et visualisation très fine type produit fini permettant la mise en place d'assemblage. De plus, elle a comme avantage d'avoir des caractéristiques très proches d'une matière usitée en injection plastique, le PA66. Nous précisons que le manque de données sur les propriétés mécaniques de la matière modèle Fullcure 835™, nous a contraints à caractériser plus précisément le comportement du matériau pour l'utiliser en optimisation numérique. Enfin, La matière support utilisée est le Fullcure 705™ ; Gel photopolymère non toxique et retirable par nettoyage à eau sous pression.

Nous nous intéressons particulièrement à deux notions importantes : la perte de matière dans le cadre du PR et l'intégration de l'optimisation numérique pour améliorer cette perte tout en prenant en compte le contexte d'utilisation. A souligner que notre démarche s'appuie sur une technologie de type Polyjet™ pour la réalisation des essais et la validation de nos réflexions. Cependant la

méthodologie reste transversale à toutes les technologies de PR par ajout de matière.

### 3.1. PROTOTYPAGE RAPIDE ET PERTE MATIERE

Le PR dans le domaine de la fabrication additive, englobe des machines procédant par ajout de matière. Toutes les technologies existantes sont basées sur le même principe de reconstruction par superposition de couches. Les différences essentielles entre les technologies résident dans les matériaux à disposition, les systèmes de « solidification » de la matière (solidification d'une résine ou d'un matériau thermo-fusible, agglomération de poudre, collage de matériaux en feuilles...) et l'épaisseur des couches qui peuvent influencer l'état de surface et certaines fonctionnalités du produit. Chaque constructeur a introduit une technologie différente et un système d'exploitation propre à la machine.

Une approche fondamentale commune aux différentes techniques de prototypage est nécessaire pour obtenir une pièce viable. Elle est constituée de trois étapes (Chua C 2003):

- Un modèle virtuel est réalisé à partir d'un système CAO.
- Le modèle volumique ou surfacique construit est ensuite converti au format STL.
- Un programme spécifique analyse le fichier STL, et définit un modèle à fabriquer et à trancher en section.

Pour l'ensemble des procédés, le coût et la durée de fabrication augmentent selon la finesse des couches. La quasi-totalité des procédés implique des opérations de finition appelée post-traitement, comme l'étape finale de solidification pour certaines pièces frittées ou agglomérées, ou la dissolution de certains supports nécessaires à la tenue de la pièce lors de la fabrication.

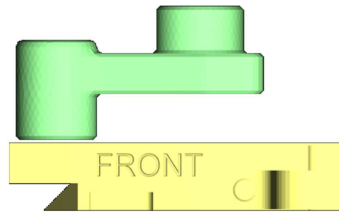
Un produit fabriqué par PR contient deux grands types de matière :

- La matière modèle qui constitue la pièce à fabriquer
- La matière support qui permet d'éviter à la pièce de s'effondrer lors de la fabrication

Dans le cadre de l'EDEN 260V le support est un gel photopolymère qui a pour objectif de créer un renfort autour de la matière modèle afin de la maintenir le temps que l'exposition aux Ultraviolets lui conférant sa rigidité. Par défaut, l'épaisseur de support sur le pourtour des parois est de 1.5mm. Plusieurs types de densité (voir tableau 1) sont disponibles en fonction de la pièce à fabriquer (support élevé pour des pièces à grand déport (voir figure 1), support léger pour des pièces dont la géométrie rend difficile la suppression de la matière, ...).

**Tableau 1 - Comparatif densité du support**

Type de densité	Matière Modèle	Matière Support	Temps de fabrication	M+S	Matières (support ou modèle) en sus
Support par défaut	81	71	04h28	152	Référence
Support élevé	84	68	04h28	152	M : + 3.7% S : - 4.22%
Support léger	74	78	04h28	152	M : - 8.64% S : + 9.85%

**Figure 1 - Pièce vue de côté issue de l'entreprise PEROLO SA**

La suppression du support peut se faire de manière différente. La solution la plus usitée consiste à le nettoyer sous une pression d'eau. Cependant lorsque le support est difficilement accessible ou lorsque les diamètres sont très petits, il est envisageable d'immerger la pièce dans une solution de NaOH (A. Bony'ar et al., 2010). Il est important de noter que la matrice support devient un déchet à traiter et une perte sèche pour l'utilisateur contribuant ainsi à augmenter les coûts de fabrication.

Beaucoup d'études ont été menées quant à l'optimisation (réduction) des matières support appliquée aux autres procédés de PR notamment les technologies où la matière support est perdue. Nous pouvons par exemple citer les travaux de (Inhaeng Cho et al., 2000) relatif au procédé LOM où les auteurs proposent une nouvelle méthodologie de construction induisant l'utilisation d'un support (non utile par la méthodologie standard) qu'il faut tout de même chercher à limiter. Mais également ceux de (L.M. Galantucci et al., 2008) qui s'intéressent à l'optimisation du support pour le procédé FDM, notamment à l'influence de la topologie de la structure interne sur le temps de fabrication ou encore sur le gain matière.

Ces études montrent que la diminution de la consommation de matières et la réduction des déchets sont de véritables préoccupations pour les utilisateurs. Par conséquent, notre étude s'inscrit logiquement dans cette démarche. De plus, cette réflexion trouve un fort écho dans le concept de l'écoconception et plus particulièrement dans l'Analyse du Cycle de vie d'Ingénierie. Des travaux sur

L'optimisation existent mais n'utilisent pas l'optimisation numérique en amont de la conception tout en intégrant la fabricabilité du modèle.

### 3.2. OPTIMISATION NUMERIQUE

L'optimisation d'un produit consiste à proposer la forme qui répond le mieux possible au triptyque coût, délai, qualité. (Madux, 1986) et (Sharpe, 1995) montrent que les phases en amont de la conception occupent 5% du processus de conception, mais engagent plus de 75% des coûts globaux du produit ; ainsi l'optimisation des structures en phase de conception se révèle capitale dans le cycle de vie du produit. L'utilisation de la simulation numérique pour optimiser les produits est devenue incontournable pour tester différentes formes, nuances matériaux, mais aussi mieux comprendre les phénomènes mis en jeu. La difficulté principale d'utiliser la simulation numérique en optimisation est de devoir gérer les boucles entre la CAO et le calcul. Ainsi toute modification de la géométrie induite par l'analyse du calcul peut imputer fortement le temps de réponse. Les méthodes d'optimisation de formes de structures permettent d'automatiser cette chaîne et de trouver une solution optimale au problème avec la prise en compte de la majorité des critères du cahier des charges. Outre la possibilité de tester des formes des solutions originales, l'utilisation de l'optimisation numérique permet de répondre au problème d'intégration du calcul dans les phases en amont du processus de conception. Il est alors nécessaire de mettre en place une méthodologie de capitalisation et de gestion de la connaissance performante.

L'intégration des techniques d'optimisation dans les processus de conception a été rendue possible grâce à l'évolution des outils de modélisation et de simulation numérique ainsi que par l'accroissement des performances informatiques. Ces différents outils de modélisation et de simulation, apportent des nombreux avantages (études de diverses solutions, optimisation des produits, réduction et diminution des coûts et des délais).

Dans le cas de l'optimisation de formes de structures mécaniques, les variables concernées sont les formes des structures elles-mêmes. C'est une optimisation plus compliquée que l'optimisation traditionnelle où les variables sont par exemple les propriétés des matériaux. On distingue trois grandes catégories d'optimisation de formes de structures en mécanique que sont : (Allaire G., 2001)

-« l'optimisation de formes paramétrique où les formes sont paramétrées par un nombre réduit de variables (par exemple, une épaisseur, un diamètre, des dimensions) ». Cette catégorie d'optimisation ne permet pas l'exploration d'autres formes possibles ou admissibles mais elle permet de trouver (de calculer) les dimensions optimales des formes paramétrées (formes existantes dans le modèle).

- « l'optimisation de formes géométrique où, à partir d'une forme initiale, on varie la position des frontières de la forme ». Cette optimisation grâce à la variation des frontières permet de trouver les contours optimisés pour les structures sans changer leur topologie initiale.



- « l'optimisation de formes topologique où l'on cherche, sans aucune restriction explicite ou implicite, la meilleure forme possible quitte à changer de topologie ». Cette troisième catégorie d'optimisation, la plus complexe d'entre les trois, est une méthode appropriée pour la phase de conception d'une nouvelle pièce car elle permet d'explorer de nouveaux concepts et de trouver des solutions dans les zones de « non confort » pour les ingénieurs (voir figure 2).

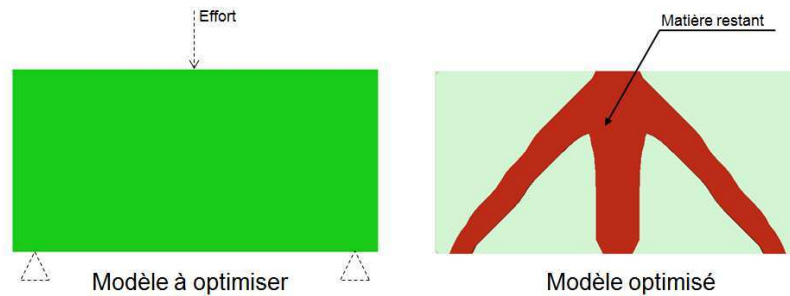


Figure 2 - Exemple d'une optimisation topologique simple

## 4. ASPECTS METHODOLOGIQUES

### 4.1.UTILISATION DE L'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE EN PROTOTYPAGE RAPIDE

Nous nous intéressons dans un premier temps à l'optimisation topologique dans le cadre de son utilisation en PR. Les autres technologies seront étudiées plus tard. L'optimisation topologique répond en effet au problème d'optimisation de la matière dans le cadre de formes 3D innovantes soumises à un chargement donné.

L'emploi de l'optimisation en PR (L.M. Galantucci et al. 2008) est généralement utilisé dans le cadre de l'optimisation de la direction de construction, l'optimisation des paramètres métiers, l'optimisation des algorithmes de construction des couches. L'optimisation de la matière utilisée est un objectif important dans le cadre du gain sur le développement d'un produit. Cette optimisation peut correspondre à la fois à la matière du produit mais également à la matière du support. La figure suivante présente le cas de l'utilisation d'une optimisation topologique à la fois sur la pièce et le support utilisé (les 2 optimisations sont réalisées séparément. En optimisation la zone « design » correspond à la zone qui peut être optimisée, c'est l'espace de conception à l'inverse de la zone « non design » qui ne peut être modifiée. Dans le cadre du PR, elle correspond à la peau de l'objet qui doit être visible (figure 3).

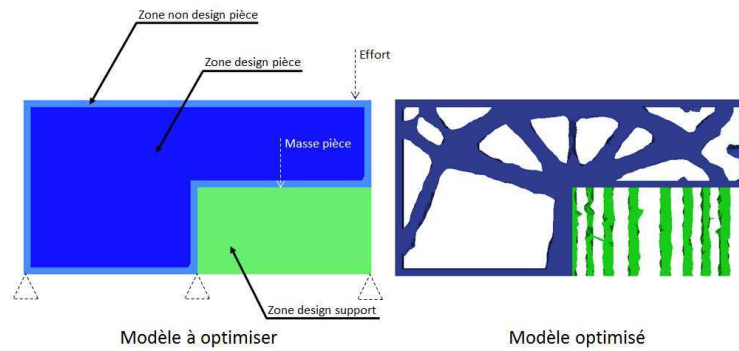


Figure 3 - Exemple d'une optimisation pièce et support

#### 4.2. GESTION DE LA CONNAISSANCE

L'utilisation de l'optimisation numérique repose sur une bonne intégration de la connaissance liée au procédé de PR. Il est ainsi nécessaire d'intégrer les connaissances liées au matériau (caractérisation), au procédé en lui-même (contraintes géométriques) en optimisation numérique. La capitalisation et la modélisation de la connaissance s'appuie ici sur des travaux réalisés par le centre technique DINCCS de Micado sur la méthodologie P4LM (Danesi, 2008). Elle permet d'organiser un projet ou une connaissance en centralisant les informations sous forme de processus. Ce processus décrit alors une suite de procédé permettant de réaliser le produit ou de modéliser la connaissance. Le procédé est une action définie selon plus niveaux d'abstractions (un procédé peut être un parcours d'outils comme l'utilisation d'une caractéristique de forme en CAO). Un procédé est représenté par une Expression GraphoNumérique (EGN) qui permet de structurer le vocabulaire métier. L'expression est basée sur des classes d'actions, d'objets et de contraintes. Un procédé est alors représenté par des phrases du type « créer une épaisseur de paroi de 1 mm ». De l'EGN sont définis des Paramètres GraphoNumériques (PGN) qui deviennent les contraintes à utiliser pour la modélisation du produit. Dans l'EGN précédente, le PGN résultant est « épaisseur\_pari = 1 mm » (Danesi, 2008). Une EGN peut contenir un ou plusieurs PGN.

La modélisation de la connaissance a été développée selon 2 axes : la modélisation du procédé/matériau de l'Eden et son intégration en optimisation numérique. La démarche a été de modéliser la connaissance qu'il était possible d'intégrer en optimisation numérique pour cibler la modélisation à effectuer autour du procédé. La qualité de réponse de la simulation numérique dépend fortement de la caractérisation du matériau. L'optimisation numérique qui a été réalisée dans le cadre de cette étude est basée dans le domaine linéaire mais les travaux en cours intègrent les notions de non-linéarités (matériaux et géométriques).

La démarche expérimentale repose sur l'utilisation d'éprouvettes normalisées (CAMPUS ISO 527-1/-2) fabriquées par PR et d'outils de mesures spécifiques à l'obtention de données comportementales du matériau soumis à un effort de traction. Les essais mécaniques ont été effectués sur des familles d'éprouvettes pour limiter la dispersion des valeurs. Par conséquent, les résultats présentés dans l'article sont rassemblés autour d'une valeur moyenne obtenue à travers un plan d'expérience. Pour ce faire nous avons réalisé une série d'essais sur banc de traction couplée à un système d'extensométrie bidimensionnelle (Caméra de déformation 3D Aramis GOM mbH<sup>1</sup>) (figure 4a) en nous inspirant de la mise en œuvre de l'essai de traction des travaux de (F. ABBASSI, 2006). Les essais de traction sont utilisés pour déterminer la loi de comportement du matériau nécessaire à la mise en donnée en optimisation topologique (voir figure 4b).

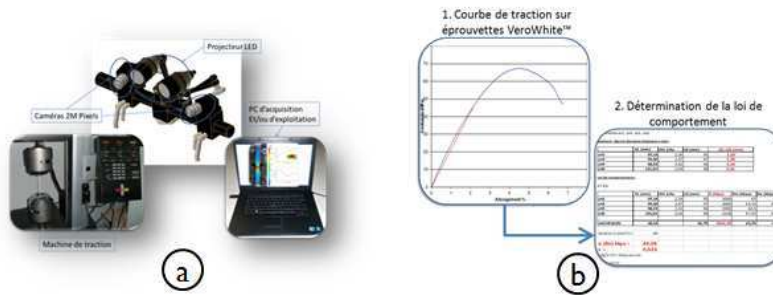
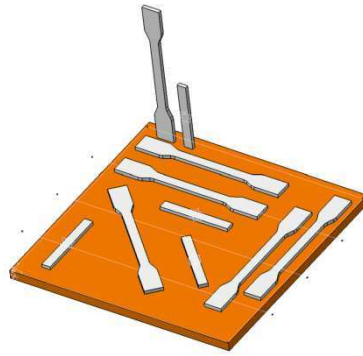


Figure 4 – a) essai de traction sur Aramis b) Caractérisation du matériau

Pour le coefficient de Poisson, nous avons privilégié une technique optique pour son caractère non intrusif, sa grande résolution spatiale ainsi que sa grande sensibilité [Special issue on Optical Methods for Shape Measurement, Optical Engineering, Vol. 39, No 1, janv. 2000.]. Les éprouvettes ont été disposées selon plusieurs orientations afin de quantifier l'influence du sens de fabrication sur les caractéristiques mécaniques (figure 6).

<sup>1</sup>www.gom.com



**Figure 6- Orientation des éprouvettes sur le plateau machine**

Afin d'implémenter l'outil d'optimisation géométrique, il est nécessaire de développer une base de connaissances spécifique à la technologie utilisée pour notre étude. Certains travaux (Scaravetti, 2001), présentent une démarche de qualification pour une machine de PR par addition de couches en réalisant une pièce test permettant de quantifier les défauts et d'en déterminer les causes. Les travaux de (T.H.C. CHILDS et N.P. JUSTER, 1994) ou de (THIRIOT, juillet 2000) permettent quant à eux d'identifier les défauts inhérents à chaque procédé. Cependant, ces approches ne tendent pas vers les limites technologiques de la machine.

Notre démarche consiste à déterminer trois facteurs importants pour l'optimisation géométrique de pièce :

- L'épaisseur minimum imprimable et nettoyable sans détérioration de la pièce : nous cherchons ici à optimiser l'épaisseur mini de la toile (matière finale) sans perte des qualités géométriques et morphologiques de la pièce ;
- Le diamètre minimum imprimable et nettoyable sans nettoyage mécanique : l'objectif est de pouvoir ainsi dimensionner au mieux des canaux pour le nettoyage de la structure interne de la pièce ;
- La hauteur maxi, en fait le ratio entre la longueur projetée et la hauteur de la pièce qui peut engendrer un effondrement.

Basée sur les travaux de (B.H. Lee, 2005) pour la détermination des paramètres influant sur la qualité d'un prototype fonctionnel réalisé sur FDM, une série de pièces a permis de déterminer les valeurs critiques selon le contexte d'utilisation (voir figure 7). Un processus d'utilisation a été mis en œuvre avec en résultante les PGN intégrables en optimisation numérique. Ce processus (sous-processus de la méthodologie générale) est une proposition pour permettre l'optimisation de pièces en PR de type additif (voir figure 8).



Figure 7–Plan d'expérience relié au modèle CAO et récapitulatif des pièces tests après impression et nettoyage

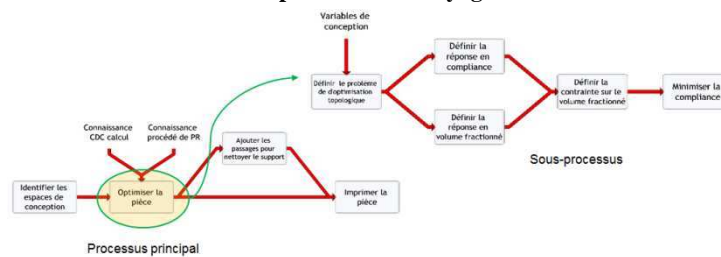


Figure 8–Processus d'optimisation numérique dédié au procédé de PR de type additif

L'optimisation consiste à contraindre le modèle en pourcentage de volume matière que l'on souhaite gagner et à minimiser la compléance (minimiser la compléance revient à maximiser la raideur totale en fonction d'un effort donné ; mesurer la compléance sur une pièce revient à mesurer le travail des forces extérieures). Les variables de conception correspondent à la direction d'extrusion, aux formes à répéter, aux symétries ou encore à certaines limites sur lesquelles l'algorithme d'optimisation se limite (épaisseur de paroi, contrainte maximum à ne pas dépasser, ...). Le tableau 2 présente quelques exemples de PGN issus des essais mécaniques intégrés à l'outil d'optimisation numérique.

Tableau2–Quelques exemples de PGN intégrés à l'outil d'optimisation numérique

Libellé PGN	Valeur
epaisseur#minimale_pari	0,5 mm
diametre#minimal_pari	0,7 mm
pourcentage#volume_matiere	0,3

## 5. APPLICATION

Afin de valider le principe et le processus complet, une forme simple, de type parallélépipédique, a été testée. Cette forme est considérée comme subissant un effort de 400 Newton sur le haut et la base posée sur un support (voir figure 9). Plusieurs topologies ont été déterminées en ayant comme contrainte de gagner 30 % de bonne matière. Le logiciel d'optimisation numérique utilisé est Optistruct de l'éditeur Altair.

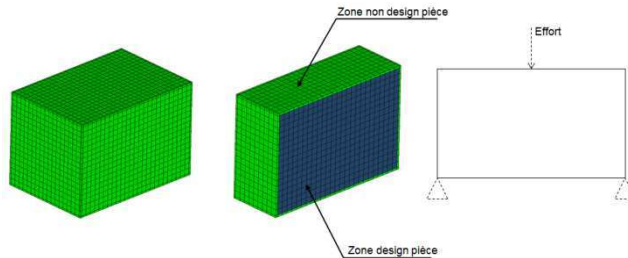


Figure 9–Pièce et chargement pour l'exemple d'application

Les différents PGN sont réglés selon la connaissance modélisée. Certains paramètres sont réglés quant à eux selon le contexte d'utilisation du produit : surface fonctionnelle ne devant pas être ouverte (pour les passages d'eau lors du nettoyage), direction d'extrusion en cas de dépouille, répétition de formes particulières, ... Tous ces paramètres sont issus de la modélisation de la connaissance issue du réglage des algorithmes d'optimisation topologique implémentés (variables de conception). Par exemple, les PGN liés à l'épaisseur de la paroi et le diamètre des canaux d'évacuation sont intégrés respectivement dans l'optimisation et la conception. Le pourcentage de gain matière souhaité a été réglé ici à 30 % et la variable de conception liée à la contrainte maximale à ne pas dépasser a été réglée sur la résistance élastique trouvée grâce aux essais physiques (soit 45 MPa). La figure 10 présente différentes propositions de design en fonction du réglage de certains paramètres.

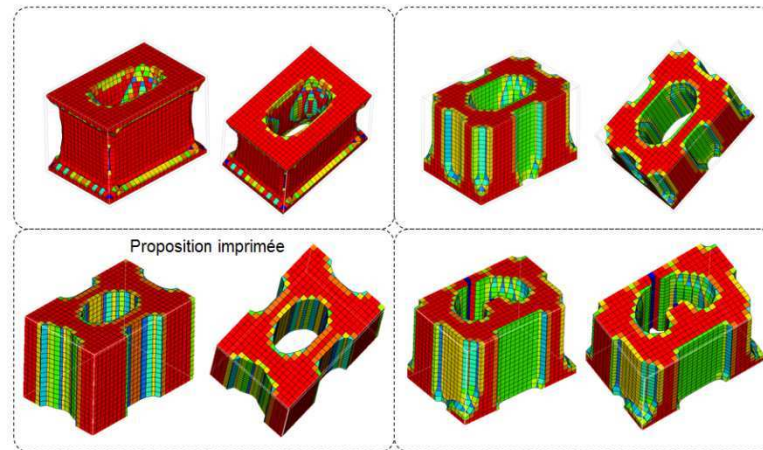


Figure 10–Vues de différentes propositions d’optimisation de la zone design selon le réglage de certains PGN

La prise en compte de l’extraction de la matière support a été réalisée après l’optimisation en ouvrant des zones sur deux faces non fonctionnelles du parallélépipède (voir figure 11).

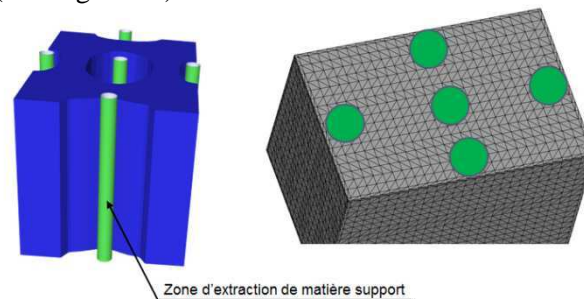


Figure 11–Insertion des zones d’extraction de la matière

Une forme pleine ainsi qu’une des propositions de forme optimisée (voir figure 10) ont été imprimées afin de réaliser des essais physiques et comparer les résultats. L’objectif de cette comparaison est de vérifier que :

- La limite élastique n’a effectivement pas été dépassée
- La différence entre les déformations de la forme pleine et évidée ne soit pas élevée
- Le nettoyage se réalise correctement

L’essai de compression a été réalisé avec un capteur de 5kN et une vitesse de déplacement de la traverse de 10mm/min selon le réglage suivant (voir figure 12) :

- Segment 1 : Mise en contact et début acquisition de mesure si  $F > 1N$
- Segment 2 : Effort appliqué jusqu’à 2000N

– Segment 3 : Relâchement jusqu'à 0N



Figure 12–Vue de l'essai de traction et la pièce optimisée imprimée et découpée pour visualiser l'intérieur

L'analyse des résultats a permis de montrer que les courbes entre les 2 modèles sont similaires (différence < 10 %) et que la pièce optimisée reste en-dessous de la contrainte maximum indiquée dans l'outil d'optimisation (voir figure 13). Une constatation sur l'essai a montré que malgré le réglage de l'effort maximum à 2000 N dans le protocole, l'essai a été jusqu'à 2500 N en raison de l'inertie de la traverse. Le gain volume matière est d'environ 20 % entre la masse du parallélépipède optimisé par rapport au plein pour une résistance à la compression identique. La différence entre l'estimation de réduction (30% escomptée) et les 20% effectifs peuvent s'expliquer par plusieurs raisons : la finesse du maillage, le fait de travailler en statique linéaire, les résidus restants après le nettoyage. Des essais complémentaires sont en cours sur ce sujet. Une comparaison entre les essais physiques et virtuels permet de montrer des différences de l'ordre de 5 %. La copie d'écran de la figure 13 montre le résultat du déplacement (en mm) pour une force de 411 N. L'essai physique a montré pour cet effort un déplacement de 0,018 mm et la simulation numérique un déplacement d'environ 0,017 mm.

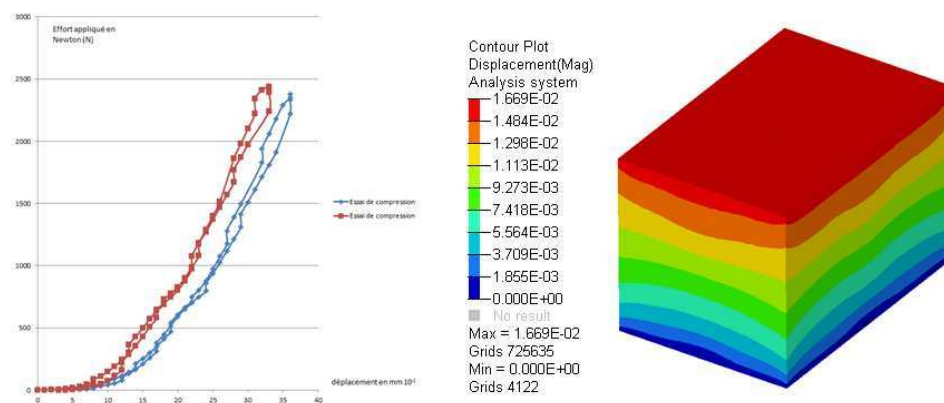


Figure 13–Comparaison entre les essais physiques sur pièce pleine/pièce optimisée et la simulation numérique de la pièce optimisée



## **6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

Nous avons montré la possibilité, grâce à l'optimisation topologique couplée à la gestion de connaissance en PR, de gagner en matière support et en matière modèle tout en respectant le cahier des charges du produit. La méthodologie mise en place permet d'utiliser les procédés de PR de type additifs d'une façon innovante. Une application permettant de gagner jusqu'à 20 % de volume matière nous a permis de l'appréhender.

L'approche d'un produit design répondant à des contraintes d'utilisations tout en gardant une « peau esthétique » liée à l'optimisation de formes ouvre différentes possibilités. Cette voie pose cependant un certain nombre de difficultés qu'il convient de lever, notamment pour d'autres procédés et d'autres matériaux. La méthodologie mise en œuvre a pour objectif d'être le noyau d'un outil qui serait greffé au procédé de PR. Pour ce faire de nombreux travaux sont en cours sur la possibilité d'utiliser l'optimisation en PR pour l'industrialisation, le développement de l'outil en lui-même, l'utilisation du domaine non-linéaire pour l'optimisation numérique (par exemple pour la prise en compte de la loi élasto-plastique du matériau), le développement d'arbres à la décision pour supporter l'utilisateur lors de l'impression de son produit, ... Une étude de cas est en cours de réalisation à travers un produit industriel pour nous permettre de chiffrer les gains matières et le temps.

## **REMERCIEMENTS**

Ce projet est en partie financé par la plate-forme NUM3D. Les principaux acteurs de la recherche et développement, l'UTT, l'ENSAM et l'ERT Gaspard Monge pour l'URCA sont partenaires pour la plate-forme NUM3D, cœur des moyens mis en place dans la région Champagne-Ardenne, le conseil général des Ardennes, le FEDER, et l'état. La société Aztech et le centre technique DINCCS remercient également Oséo pour leur implication.

## REFERENCES

- Allaire G. 2001, 'Shape Optimization by the Homogenization Method', *Springer Verlag*.
- Aoussat A D.R.&.D.P. 2000, 'Prototypage Rapide - Généralités', *Techniques de l'Ingénieur*, BM7017.
- B.H. Lee, J. Abdullah, Z.A. Khan 2005, 'Optimization of Rapid Prototyping Parameters for Production of Flexible ABS Object', *Journal of Materials Processing Technology*, 169, pp. 54-61.
- Chua C L.K.&.L.C. 2003, 'Rapid Prototyping : Principles and Applications', *World Scientific - Second edition*.
- Danesi, F. Gardan, N. Gardan Y. Reimeringer, M. 2008, 'P4LM: A Methodology for Product Lifecycle Management', *Computers in Industry* 59 , pp. 304-317.
- Dominique Scaravetti, Patrice Dubois, Robert Duchamp 2001, 'Conception D'une Procédure de Qualification des Moyens de Prototypage Rapide', *CPI'2001*, p. N°110 pages 1 à 18.
- F. Abbassi O.P.A.Z.S.M.R.R. 2006, 'L'Etude de Comportement Élastoplastique Anisotrope de Tôle D'Emboutissage Par L'Utilisation de Corrélation D'image (DIC)'.
- Inhaeng Cho et al. 2000, 'Development of a New Sheet Deposition Type Rapid Prototyping System', *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, p. pp. 1813 -1829.
- Kruth J., Leu M.& Nakagawa T. 1998, 'Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47, , p. p. 525-540.
- L.M. Galantucci et al. 2008, 'Study of Compression Properties of Topologically Optimized FDM Made Structured Parts', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, , , p. pp. 243 - 246.
- Madux, K. C., Jain, S.C. 1986, 'CAE for the Manufacturing Engineer: the Role of Process Simulation in Concurrent Engineering', *Manufacturing Simulation and Processes*, pp. 1-15.
- Olivier-Patrick Thiriou A.B. juillet 2000, 'Study of a Standard Part for Layer Manufacturing Processes', *European conference of Rapid Prototyping & Manufacturing*,.
- Sharpe J. 1995, 'Computer Tools for Integrated Conceptual Design', *Design Studies*, 16(4), , pp. 471-488.
- T.H.C. Childs et N.P. Juster 1994, 'Linear and Geometric Accuracies From Layer Manufacturing', *Annals of the CIRP*, vol. 43/1/1994, p. pp 163-166.