POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Méthodologie de conception et d'optimisation de mécanismes fabriqués par fabrication rapide
Title:

Auteur: Hugo Rodrigue
Author:

Date: 2010

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Rodrigue, H. (2010). Méthodologie de conception et d'optimisation de mécanismes fabriqués par fabrication rapide [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/415/
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: https://publications.polymtl.ca/415/
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Mickael Rivette
Advisors:

Programme: Génie Industriel
Program:

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION ET D'OPTIMISATION DE MÉCANISMES FABRIQUÉS PAR FABRICATION RAPIDE

HUGO RODRIGUE

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE EN SCIENCES APPLIQUÉES

GÉNIE INDUSTRIEL

AOUT 2010

© Hugo Rodrigue, 2010.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION ET D'OPTIMISATION DE MÉCANISMES FABRIQUÉS PAR FABRICATION RAPIDE

présenté par : RODRIGUE Hugo

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise en sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. AGARD Bruno, Ph.D., président

M. RIVETTE Mickaël, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. MASCLE Christian, Ph.D., membre

RÉSUMÉ

La fabrication rapide est un procédé de fabrication dont le marché est en expansion rapide. Ce procédé de fabrication présente de nouvelles possibilités de fabrication révolutionnaires, telle la possibilité de créer des formes plus complexes et la possibilité de fabriquer des pièces composées de plusieurs matériaux. De plus, avec les procédés de fabrication traditionnels, dits par enlèvement de matière, le facteur le plus important du coût de fabrication est la complexité de la pièce. En utilisant la fabrication rapide comme moyen de fabrication, le coût de fabrication est influencé principalement par le volume de la pièce, ce qui fait qu'ajouter de la complexité n'est pas un problème.

Les méthodologies de conception utilisées auparavant aident le concepteur à créer des pièces simples à fabriquer avec des procédés par enlèvement de matière et donc de diminuer les coûts. Toutefois, aucune de ces méthodologies ne sont applicables à la fabrication rapide. Avec la fabrication rapide, il est préférable de guider le concepteur à ajouter de la complexité afin d'améliorer le produit.

Ce mémoire vise à développer une méthodologie qui a pour objectif d'aider le concepteur à apporter des améliorations au produit et de l'aider à incorporer les avantages de la fabrication rapide dans son produit, ce qui n'existe pas dans la littérature actuelle. Pour ce faire, une analyse est faite des différentes méthodologies d'aide à la conception ainsi que de méthodologies reliées à la fabrication rapide afin de déterminer si certaines des approches utilisées par d'autres méthodologies sont applicables à la fabrication rapide.

À la suite de ces observations, une méthodologie adaptée spécifiquement à la fabrication rapide est présentée. La méthodologie développée guide le concepteur à concevoir en termes de solutions optimales, non en termes de limitation, et à implémenter parallèlement des solutions pour consolider l'assemblage, prévenir les défaillances de l'assemblage et l'optimiser vers un but défini par le concepteur.

Afin de vérifier le bon fonctionnement de la méthodologie, celle-ci est appliquée à un assemblage mécanique qui doit répondre à certains critères et dont le concepteur veut optimiser le poids. En suivant la méthodologie proposée, diverses améliorations sont apportées au produit et le poids est optimisé de manière considérable tout en répondant aux critères prédéfinis.

Toutefois, il y a des problèmes avec la chaine numérique quant à la prise en compte de l’aspect multimatériaux. Les formats de transferts de données, capables de prendre en compte cet aspect, ne sont pas entièrement implémentés et ne conservent donc pas cette information. Les logiciels de CAO et d’IAO ne permettent pas de concevoir des pièces multimatériaux et n’intègrent pas d’algorithmes permettant d’optimiser la distribution de matériel dans une pièce.

ABSTRACT

Rapid manufacturing is a manufacturing processes of which the market is in rapid growth. This process presents revolutionary fabrication possibilities, such as the possibility to create complex shapes and multi-material parts. Furthermore, with traditional manufacturing process which function by materiel removal, the most important factor influencing the cost of a part is the complexity. With rapid manufacturing the manufacturing cost is influenced primarily by the volume of the piece, adding complexity is therefore not a problem.

Older methodologies help the designer to create pieces that are easy to manufacture using traditional manufacturing processes and thus to diminish the manufacturing cost, although none of these methodologies are applicable to rapid manufacturing. With rapid manufacturing it is preferable to guide the designer into adding complexity in order to improve the product.

This thesis has for goal to develop a methodology which aims at helping the designer to bring ameliorations to his product and also to incorporate the advantages of rapid manufacturing in the product, which doesn't exist in the actual literature. To do so, an analysis of the different design methodologies and of methodologies related to rapid manufacturing is done in order to determine if some of the approaches used by these methodologies are also applicable to rapid manufacturing.

Further on, from these observations a methodology adapted specifically for rapid manufacturing is presented. The proposed methodology guides the designer to conceive in terms of optimal solutions instead of in terms of limitation and to implement in parallel solutions to consolidate the assembly, prevent failures in the assembly and to optimize the assembly towards a user-defined goal.

In order to verify that the methodology works properly it is applied to a mechanical assembly that has to answer to certain criteria and of which we want to optimize the weight. By following the proposed methodology, various ameliorations are brought to the product and the weight was significantly optimized while answering to the predefined criteria.

However, there are issues with the numerical chain with regards to being able to take into account the multi-material aspect of parts. The data transfer formats, which capable of taking into account this aspect, aren't fully implemented and thus do not save this information. The Computer-Aided

Design and Computer-Aided Engineering software don’t let the user properly design multi-material parts and do not ingrate algorithms which would permit to optimize material distribution within a part.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ III

ABSTRACT V

TABLE DES MATIÈRES VII

LISTE DES TABLEAUX X

LISTE DES FIGURES XI

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XII

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE 4

1.1 Méthodologies courantes 5

1.1.1 La méthode Lucas DFA Evaluation Method 5

1.1.2 La méthode Hitachi Assemblability Evaluation Method étendue 6

1.1.3 La méthode Boothroyd-Dewhurst DFA Method 7

1.1.4 Les méthodes de conception pour la fabricabilité 9

1.1.5 Conception d'éléments mécaniques 9

1.1.6 La méthode TRIZ 11

1.1.7 La méthode Axiomatique 13

1.1.8 Synthèse des méthodologies courantes 14

1.2 Méthodes reliées aux procédés de fabrication par addition de matière 15

1.2.1 Outil d'aide à la décision pour le choix d'une méthode de fabrication 15

1.2.2 Méthodes de conception d'outillage par assemblage de composants élémentaires hybrides 16

1.2.3 Méthodes pour l'implantation de mésostructures 18

1.2.4 Synthèse des méthodes reliées aux procédés de fabrication par addition de matière 20

1.3 Représentations standards et méthodes se basant sur celles-ci 20

1.3.1 Force-Flow Diagram 21

1.3.2 Décomposition fonctionnelle 23

1.3.3 Risk in Early Design 25

1.3.4 Biomimétisme 26

1.3.5 Synthèse des représentations standards et des méthodes se basant sur celles-ci 28

1.4 Méthodes d'optimisation numériques de la géométrie 29

1.4.1 Optimisation de forme.....30

1.4.2 Optimisation topologique.....31

1.4.3 Optimisation à objectifs multiples.....32

1.4.4 Synthèse des méthodes d'optimisation numériques.....33

1.5 Synthèse de la revue de littérature.....34

CHAPITRE 2 DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE ET ORGANISATION GÉNÉRALE DU DOCUMENT 35

2.1 Démarche de l'ensemble du travail de recherche.....35

2.2 Organisation générale du document.....36

CHAPITRE 3 A DESIGN METHODOLOGY FOR RAPID MANUFACTURING 37

3.1 Abstract 37

3.1.1 Background 37

3.1.2 Method of approach 37

3.1.3 Results 37

3.1.4 Conclusions 37

3.2 Introduction 38

3.3 Related work 39

3.3.1 Rapid Manufacturing methodologies 39

3.3.2 Design for Assembly and Design for Manufacturing 40

3.3.3 Part and function representations and function-based methodologies 40

3.3.4 Numerical optimization methods 42

3.3.5 Concept generation methods 43

3.4 Method 44

3.4.1 Problem definition.....46

3.4.2 Consolidation 46

3.4.3 Part optimization with regards to failure prevention.....48

3.4.4 Part optimization with regard to the user-defined goals 51

3.4.5 Implementation of solutions.....51

3.5 Example.....51

3.5.1 Problem definition.....51

3.5.2 Consolidation 52

3.5.3 Part optimization with regards to failure prevention.....53

3.5.4 Part optimization with regard to the user-defined goals 57

3.5.5 Implementation of solutions.....59

3.6 Conclusions 59

3.7 Annex 60

3.8 References 61

CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE 64

CONCLUSION 70

BIBLIOGRAPHIE 73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Exemple de résultat de la méthode Hitachi Assemblability Evaluation 7

Tableau 1.2: Termes de fonction standard pour le système de fonctions standardisées 23

Tableau 1.3: Termes de flux standard pour le système de fonctions standardisées 24

Tableau 1.4: Tableau des Function ID classés selon leurs énoncés fonctionnels 27

Tableau 1.5: Tableau des Product ID classés selon les Function ID.....28

Tableau 1.6: Tableau de fonctions classées selon leurs Product ID.....28

Table 3.1: Functional basis reconciled function set 41

Table 3.2: Functional basis reconciled flow set 42

Table 3.3: Likelihood ratings for the planetary gear system.....55

Table 3.4: Function-failure knowledge base from NTSB rotorcraft accident study.....60

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Modification d'une géométrie afin d'uniformiser le stress.....10

Figure 1.2: Exemple de solution pour un problème en utilisant la méthode Substance-Domaine 12

Figure 1.3: Relation entre les domaines dans la méthode axiomatique 13

Figure 1.4: Graphe de subdivision d'un assemblage en composants élémentaires hybrides (Rivette, et al., 2007).....17

Figure 1.5: Exemple de méso-structure.....19

Figure 1.6: Exemple de Force-Flow Diagram après l'étape 3 22

Figure 1.7: Exemple de Force-Flow Diagram après l'étape 5 22

Figure 1.8: Exemple de représentation de fonction standardisée.....24

Figure 1.9: Exemple d'optimisation de forme 30

Figure 1.10: Exemple d'optimisation topologique 32

Figure 3.1: Design methodology.....46

Figure 3.2: Function block example.....48

Figure 3.3: Planetary gear system assembly 51

Figure 3.4: Planetary gear system mechanism.....52

Figure 3.5: Consolidation of the planetary gear system.....53

Figure 3.6: Functional decomposition of the planetary gear system.....54

Figure 3.7: Casing optimization boundaries 58

Figure 3.8: Casing optimized using topology optimization in Altair Hypermesh 58

Figure 4.1: Délimitation de matériaux hétérogène (à gauche) et en gradient (à droite) 67

Figure 4.2: Exemple d'optimisation d'une frontière hétérogène.....67

Figure 4.3: Exemple d'optimisation d'une frontière en gradient 68

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CAs	Consumer Attributes
CFE	Candidates for Elimination
DFA	Design for Assembly
DFAM	Design for Additive Manufacturing
DFM	Design for Manufacturing
DFMA	Design for Manufacturing and Assembly
DFRM	Design for Rapid Manufacturing
DPs	Design Parameters
FEA	Finite Element Analysis
FFDM	Function-Failure Design Method
FMEA	Failure Modes Effect and Analysis
FRs	Functional Requirements
PVs	Process Variables
RED	Risk in Early Design
RM	Rapid Manufacturing
Su-Field	Substance-Domaine
TRIZ	Theory of Inventive Problem Solving

INTRODUCTION

La fabrication rapide est définie comme étant la fabrication directe de produits finis par l'utilisation de procédés de fabrication qui construisent la pièce par ajout de matière, ce qui élimine le besoin d'outillage (Wohlers, 2007). Selon le plus récent rapport Wohlers de l'industrie, (Wohlers, 2009) les applications de cette technologie ont augmenté de presque 30% par année en moyenne durant les six dernières années. En 2008, un sondage de compagnies œuvrant dans le domaine de la fabrication par ajout de matière prévoyait que d'ici 2013 la fabrication rapide représenterait 35.9% de leur commerce et 50.5% d'ici 2018.

Les procédés de fabrication rapide ouvrent la porte à de nouvelles possibilités de fabrication novatrices et uniques qui permettent de grandement améliorer le produit sur tous les plans. Ces possibilités devraient être prises en compte lors de la phase de conception afin de pleinement en bénéficier, par contre les outils de conception actuels ne sont pas adaptés à prendre en compte ces nouvelles possibilités. Le but de cette recherche est de développer une méthodologie de conception qui aide le concepteur à intégrer les avantages de la fabrication rapide dans le produit lors de la phase de conception.

Ces procédés procèdent en déposant de la matière point par point afin de former une couche de matière qui sert ensuite de support à la prochaine couche de matière. Puisque chaque couche de matériau doit reposer sur la précédente, l'utilisation de supports permet de donner à chaque couche la forme voulue sans se préoccuper de la géométrie de la précédente. Étant donné que la fabrication se fait en superposant des couches de matériaux qui peuvent varier en forme d'une couche à l'autre, il n'y a pas de limitation de forme. De plus, en variant le matériau pendant la fabrication il est possible de fabriquer des pièces multimatériaux. Puisqu'il y a très peu de restrictions au niveau des géométries possibles, ces procédés sont parfois nommés 'Solid Freeform Fabrication', qui se traduit par 'fabrication de solide à forme libre', afin de mettre l'accent sur le peu de restrictions géométriques de ces procédés.

Les procédés de fabrication traditionnels, dits par enlèvement de matière, ont plus de contraintes au niveau des formes réalisables. Par exemple lorsqu'une machine à commande numérique tente de créer une poche dans un solide elle doit utiliser une fraise cylindrique 2 tailles ayant un volume d'enlèvement de matière en forme de cylindre. En utilisant cette fraise, il n'est pas possible de réaliser une poche ayant des coins à angle droit. Les contraintes au niveau des formes

admissibles sont, dans ce cas, reliées à la forme des outils de fabrication ainsi qu'à leurs trajectoires d'approche. De plus, des recherches en cours permettent, grâce à l'utilisation des supports solubles, de fabriquer en une seule étape des assemblages comportant des pièces ayant des mouvements relatifs entre elles.

La seule contrainte de la fabrication rapide au niveau de la géométrie est l'enlèvement des supports qui n'est pas toujours possible lorsque le support se trouve entièrement enclos dans la géométrie du solide. La fabrication rapide n'est pas contrainte pas les limitations reliées aux outils de fabrication et présente très peu de limitation géométrique.

Puisque le matériau est déposé point par point il est possible d'obtenir plusieurs matériaux sur une même pièce en changeant le matériau déposé. Il est ainsi possible d'avoir soit une division hétérogène entre les matériaux ou d'avoir un gradient de concentration. Certaines limitations au niveau des compatibilités entre les matériaux sont imposées par les propriétés des lasers et des matériaux utilisés.

De plus, le facteur de coût le plus important de la fabrication rapide est le volume de la pièce. La complexité géométrique de la pièce n'influence pas le coût de fabrication, ce qui est à l'opposé des procédés traditionnels avec lesquels la complexité géométrique est généralement la variable de coût la plus importante. Avec la fabrication rapide, il est donc possible d'ajouter de la complexité à une pièce afin de l'optimiser sans pour autant incrémenter substantiellement le coût de fabrication, voir même le diminuer lorsqu'on diminue le volume de la pièce. Finalement, puisqu'il n'y a pas de moule de fabrication, ou autres coûts fixes par modèle de pièce, il est possible de faire de la personnalisation de masse où chaque produit fabriqué est différent.

En résumé, la fabrication rapide a comme avantages par rapport aux méthodes de fabrication traditionnelles:

- **la possibilité de fabriquer des pièces multimatériaux** en variant le matériel utilisé pendant la fabrication,
- **pas de restriction géométrique** puisque la fabrication se fait couche par couche et utilise des supports solubles,
- **la complexité n'est pas un facteur du coût de fabrication**, mais plutôt de facteurs indépendants de la complexité tel que le volume de la pièce,

- **possibilité de personnalisation de masse** découlant du fait que la fabrication rapide ne fait pas appel à des outillages tel des moules de fabrication.

Toutefois, au niveau de l'économie d'échelle la fabrication rapide à un net désavantage par rapport aux méthodes traditionnelles. Les temps et les coûts de fabrication ne diminuent pas en accroissant la quantité de pièces produites, ceci rend le temps et les coûts d'assemblage moins importants que ceux de la fabrication. Le concepteur a donc avantage à optimiser au maximum chaque produit.

Les méthodologies de conception telles que le Design for Assembly et le Design for Manufacturing sont basées essentiellement sur les limitations des procédés d'assemblage et de fabrication traditionnels (i.e. par enlèvement de matière). Toutefois, les procédés de fabrication par ajout de matière ne sont pas contraints par les mêmes limitations et offrent de nouvelles possibilités qui doivent être prises en compte lors de la conception du produit. Puisqu'il y a peu de contraintes lors de la conception d'éléments mécaniques fabriqués par fabrication rapide, les concepteurs peuvent donc arrêter de concevoir en fonction de limitations et penser en termes d'améliorations. Il faut donc adapter les méthodes de conception afin de penser en termes d'améliorations et non de restrictions.

Les méthodes de conception de produit actuellement utilisées ne sont pas applicables à la fabrication rapide puisqu'elles ne sont pas adaptées à ce nouveau paradigme. Il est toutefois important d'avoir une méthode adaptée à la fabrication rapide puisqu'avec ce type de procédé "les possibilités de concept ne sont limitées que par les outils de conception et sa propre imagination". (Wohlers, 2009) La méthode développée et présentée dans ce mémoire est une méthodologie de conception adaptée à la fabrication rapide qui aide le concepteur à optimiser et améliorer son produit en utilisant les avantages de ce procédé.

CHAPITRE 1 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE

Dans la littérature actuelle touchant au développement de produit, il n'existe pas de méthode permettant de concevoir en prenant en compte les améliorations que la fabrication rapide peut apporter au produit. Une méthodologie de conception de produit pour la fabrication rapide doit permettre au concepteur de penser en termes d'améliorations à apporter au produit, lui permettre d'analyser toutes les sources d'inspiration disponibles et elle doit prendre en compte l'assemblage et non seulement de la pièce.

Premièrement, les méthodologies de conception actuelles se concentrent plutôt à travailler à l'intérieur des limitations du procédé de fabrication et d'assemblage. Ces méthodologies seront l'objet du premier chapitre de cette revue de littérature. L'examen de ces méthodologies sera fait en vue de déterminer si une partie ou l'ensemble de ces méthodes peuvent être aussi applicables à la fabrication rapide, ou modifiés pour l'être.

Deuxièmement, les méthodologies reliées à la fabrication additive seront analysées. Ces méthodologies ne portent pas sur le processus de conception d'assemblage, mais aident plutôt le concepteur à déterminer quand et où utiliser la fabrication rapide ou à incorporer un type spécifique de structure dans une pièce. Même si ces méthodologies ne remplissent pas tous les besoins d'une méthodologie de conception par ajout de matière elles peuvent inclure des éléments importants qui pourraient être réutilisés dans une méthodologie plus complète.

Troisièmement, une représentation standard aide le concepteur à décomposer l'assemblage de manière à faciliter l'application systématique de méthodes plus loin dans le processus de conception. Deux des représentations les plus utilisées sont la représentation par pièce et celle par fonction. De plus, certaines méthodes construisent directement sur ces représentations afin d'améliorer le produit, dans le cadre de ce mémoire les solutions suivantes sont présentées : la méthode de Force-Flow Diagram, la méthode de Risk in Early Design et une archive de solutions biomimétique se basant sur les fonctions standard de la représentation. L'ensemble de ces représentations et méthodes sera l'objet de la troisième section de la revue de littérature.

Dernièrement, cette revue de littérature fera l'étude des différentes méthodes d'optimisation numérique servant à optimiser la géométrie d'une pièce. Ce type d'optimisation se doit de faire partie de la méthodologie proposée puisque les formes possibles d'une pièce sont infinies et seuls

des algorithmes complexes et itératifs peuvent permettre la sélection de la meilleure géométrie. Les méthodes d'optimisation numérique répondant aux besoins de la fabrication rapide seront analysées, c'est-à-dire la méthode d'optimisation de forme, l'optimisation topologique, l'optimisation de mésostructures (analysée au chapitre 1.2.3) et l'optimisation à objectifs multiples.

1.1 Méthodologies courantes

Dans cette section, nous analyserons les méthodologies de conception de produit et d'amélioration de concept les plus couramment utilisées et enseignées. Les méthodes de 'Design for Assembly', de 'Design for Manufacturing', de conception d'éléments mécaniques, la méthode TRIZ et la méthode axiomatique seront détaillées et analysées afin de déterminer si elles, ou une de leurs parties, pourraient être adaptés à une méthodologie de conception pour la fabrication rapide.

Les méthodologies de conception de produit sont basées sur les limitations des systèmes d'assemblage et de fabrication. Toutefois, ces méthodes contiennent généralement plusieurs outils qui globalement forment la méthodologie, l'analyse effectuée vise à déterminer si certains de ces outils pourraient être adaptables à la fabrication rapide et permettraient d'améliorer la forme ou la fonction du produit. Les divers éléments de ces méthodologies seront analysés séparément pour déterminer si une des procédures effectuées est utile et adaptable à la fabrication rapide.

Les méthodologies d'amélioration de concept, c'est-à-dire la méthode TRIZ et la méthode axiomatique, ont des approches très différentes d'autres méthodologies et sont couramment utilisées en industrie. Elles seront analysées afin de déterminer si une partie de ces méthodes peuvent aider à apporter des améliorations au produit durant la phase de conception en tirant avantage des particularités de la fabrication rapide.

1.1.1 La méthode Lucas DFA Evaluation Method

Cette méthode (Redford & Chal, 1994), développée par Lucas Corporation et University of Hull en 1989, se base sur un système à base de connaissances. En guidant le concepteur à travers plusieurs analyses, elle lui permet d'obtenir une mesure de l'efficacité fonctionnelle de

l’assemblage, de difficultés d’alimentation en pièces du processus et de difficulté d’insertion des composants.

Chaque activité d’assemblage est assignée dans la catégorie essentielle ou non essentielle en fonction de si la pièce assemblée est nécessaire dans les fonctions de l’assemblage ou non. L’efficacité fonctionnelle est mesurée en faisant le ratio de pièces essentielles sur le nombre total de pièces. Si ce ratio est trop bas, il est suggéré de retravailler l’assemblage pour améliorer l’efficacité fonctionnelle. La méthode suggère 60% comme seuil pour un ratio acceptable.

Ensuite, en analysant les processus d’alimentation et d’installation le concepteur peut déterminer les opérations qui sont coûteuses ou qui ralentissent le processus à partir de tables servant à calculer des ratios d’alimentation et d’installation. Si l’un ou l’autre des ratios est trop élevé, il est recommandé de retravailler l’assemblage.

Cette méthode se concentre principalement à minimiser les temps et les coûts d’assemblage. Puisque les coûts et les temps d’assemblage ne sont pas des facteurs aussi importants pour la fabrication rapide que pour la fabrication traditionnelle, cette méthode serait d’une utilité très limitée dans une méthode adaptée à la fabrication rapide.

1.1.2 La méthode Hitachi Assemblability Evaluation Method étendue

Cette méthode (Ohashi, Iwata, Arimoto, & Mayakawa, 2002) a été développée par la firme Hitachi Limited afin d’améliorer la qualité de l’assemblage de ses produits. Utilisée dans les débuts du processus de conception, cette méthode évalue l’assemblage à l’aide d’une méthode quantitative et met de l’avant les faiblesses de cet assemblage. De plus, il peut être utilisé afin de comparer diverses alternatives de méthode d’assemblage.

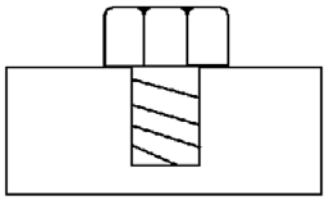
Lors de cette méthode, un score d’assemblage est calculé afin de déterminer la qualité du concept d’assemblage. Pour ce faire, l’assemblage des pièces est analysé en termes de tâches d’assemblage élémentaires. Pour chacune de ces tâches, un score de facilité d’assemblage est calculé qui est représentatif du degré de difficulté et du temps requis afin d’effectuer cette tâche. Ce coefficient est calculé à partir d’une table de valeur en se basant sur les facteurs susceptibles d’influencer le temps requis ou la difficulté d’effectuer ces tâches d’assemblage élémentaires.

Ensuite, la moyenne des scores de chaque pièce est calculée pour obtenir le score de qualité d’assemblage. Plus le score d’une pièce ou la moyenne des pièces de l’assemblage est faible, plus

il est recommandé de considérer des alternatives. En comparant le score de ces alternatives, le concepteur tente d'augmenter le score d'assemblage pour obtenir l'assemblage le plus efficace.

Le tableau 1.1 présente le résultat de l'analyse d'un assemblage dans lequel une vis est vissée dans une pièce. Ensuite, le score de facilité d'assemblage de chaque pièce est calculé ainsi que la moyenne de ces scores et est déduit des résultats que la pièce à améliorer est la vis.

Tableau 1.1: Exemple de résultat de la méthode Hitachi Assemblability Evaluation

	Structure du produit et opérations d'assemblage		E : Score d'évaluation de l'assemblabilité de la pièce	E : Score d'évaluation de l'assemblabilité de l'assemblage	Pièce à améliorer
Example		Poser le chassis A	100	82.5	B
		Fixer la vis B	65		

Cette méthode est particulièrement adaptée à la production en chaine, où le temps d'assemblage représente une large fraction du coût de fabrication. Toutefois, avec la fabrication rapide le temps et le coût d'assemblage sont négligeables par rapport au temps et au coût de fabrication. De plus, cette méthodologie n'a pour seul but que d'améliorer le produit en réduisant le temps d'assemblage et non de l'optimiser par rapport à ses fonctions.

1.1.3 La méthode Boothroyd-Dewhurst DFA Method

La méthode de Design for Assembly de Boothroyd-Dewhurst (Boothroyd, Knight, & Dewhurst, 2002) a pour but de simplifier le produit afin qu'il contienne moins de pièces et qu'il soit plus facile, rapide et peu coûteux à assembler.

Premièrement, la méthode tente d'estimer et de réduire le temps d'assemblage. Avant de procéder à l'estimation de temps d'assemblage, la méthode aide le concepteur à choisir le moyen d'assemblage le plus approprié. Cette étape se fait à l'aide d'une table qui se base sur les propriétés de la production, par exemple le nombre de modèles du produit et le nombre de pièces à assembler.

Par la suite, la méthode évalue les pièces de l'assemblage par rapport aux deux points suivants :

- la **facilité de manipulation** de la pièce en fonction de sa taille, de son poids et de la facilité d'orientation
- la **facilité d'insertion** de la pièce selon les besoins d'alignement, le type de méthode d'attachement et si cette méthode est automatique ou si elle nécessite une procédure d'attachement séparée.

Des tables sont utilisées pour évaluer le temps associé à la manipulation et à l'insertion de chaque pièce. En faisant la somme des temps de manipulation et d'insertion de toutes les pièces, le concepteur obtient le temps total d'assemblage.

Ensuite, un ensemble de trois règles est utilisé pour déterminer la nécessité de chaque pièce. Une pièce nécessaire est une pièce qui ne peut pas être éliminée de l'assemblage puisqu'elle remplit une fonction essentielle. Si une pièce répond oui à une ou à plusieurs des questions suivantes, la pièce est considérée comme étant une pièce essentielle :

- pour des raisons essentielles la pièce doit-elle avoir un mouvement relatif par rapport à toutes les autres pièces.
- pour des raisons essentielles la pièce doit-elle être faite d'un autre matériau que toutes les autres pièces.
- pour des raisons essentielles la pièce doit-elle être démontable à fin de maintenance ou d'assemblage.

Ensuite, le concepteur apporte des changements à l'assemblage si le temps d'assemblage total ou d'une pièce est jugé comme étant trop élevé ou si le ratio de pièce nécessaire sur le nombre de pièces total est jugé trop bas. À l'aide des temps obtenus précédemment, le concepteur sait quelles pièces ralentissent l'assemblage. La méthode donne des directives de conception afin de faciliter la manipulation et l'insertion de chaque pièce ainsi que des directives sur comment simplifier l'assemblage.

Cette méthode sert à adapter le produit au processus d'assemblage et à réduire les temps et les coûts d'assemblage, toutefois elle n'aide pas à incorporer les avantages de la fabrication rapide. Le système de questions servant à déterminer le nombre de pièces essentielles pourrait être adapté à la fabrication rapide et servir à déterminer quelles pièces pourraient être consolidées.

1.1.4 Les méthodes de conception pour la fabricabilité

Le but des méthodes de conception pour la fabricabilité telle la méthode DFM de Boothroyd-Dewhurst (Boothroyd, et al., 2002) est de concevoir une pièce de manière à simplifier sa fabrication afin de réduire les coûts de fabrication et d'identifier et corriger les éléments qui ne sont pas fabricables au moment de la phase de conception.

Pour ce faire, un ensemble de directives sont établies, par exemple de viser à garder le design fonctionnel et simple. Elles guident le concepteur à concevoir son assemblage en fonction des limites établies par les capacités de fabrication des procédés de fabrication traditionnel, par exemple les formes possibles pour une poche en utilisant une fraiseuse.

Toutefois, ces méthodes sont basées sur les limitations des outils de fabrication. Une méthode de conception pour les procédés de fabrication par ajout de matière ne peut pas être basée sur les limitations du procédé, puisque la fabrication rapide a très peu de limitations et puisque le coût de fabrication n'est pas fonction de la complexité géométrique. Avoir pour but d'enlever de la complexité à la pièce n'est d'aucune utilité. Au contraire, une méthode basée autour des possibilités du procédé afin d'optimiser le produit en ajoutant adéquatement de la complexité serait plus approprié.

1.1.5 Conception d'éléments mécaniques

Les méthodes de conception d'éléments mécaniques visent à prévenir la défaillance des pièces de l'assemblage. Deux approches principales sont proposées dans (Collins, Busby, & Staab, 2010), la première basée sur les principes d'ingénierie et la deuxième sur des applications spécifiques.

En utilisant les principes d'ingénierie, le concepteur commence par déterminer les modes de défaillance des pièces de l'assemblage. Ensuite ces modes de défaillances sont analysés selon les principes de base de l'ingénierie et de calculs mécaniques, afin de déterminer les variables influençant les probabilités de défaillances en termes de propriétés des matériaux et de variables géométriques.

Les variables déterminées précédemment qui sont reliées aux matériaux sont traduites en termes de caractéristiques de matériel, par exemple une dureté élevée. Les matériaux sont ensuite choisis en comparant des chartes et des tables de matériaux en utilisant les caractéristiques des matériaux

déterminés précédemment. Cette méthode de sélection de matériaux est assez générale et peut facilement aider au choix des matériaux.

La méthode offre des principes de base et des directives pour déterminer la grandeur et la taille de la géométrie, par exemple elle stipule que la géométrie devrait utiliser une trajectoire directe pour la transmission de la charge ou que la forme de la pièce devrait être ajustée afin de garder un stress constant à travers la géométrie. Dans la figure 1.1, la géométrie à gauche est modifiée afin d'uniformiser le stress à travers le volume en variant l'aire de la section transversale, le résultat est présenté à droite. Ces directives peuvent être un bon point de départ, mais restent trop générales pour réellement optimiser une pièce.

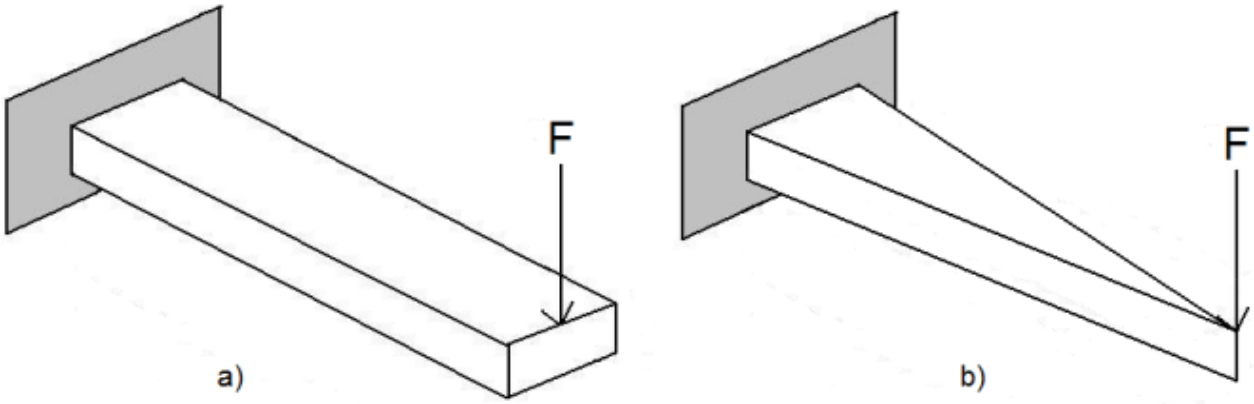


Figure 1.1: Modification d'une géométrie afin d'uniformiser le stress

La conception d'élément mécanique basé sur des applications spécifiques se base sur le savoir-faire et les standards préétablis concernant ces applications spécifiques. En cherchant l'information concernant une application spécifique, le concepteur obtient des instructions précises sur comment concevoir la géométrie, l'ajustement, les conditions de surface et comment choisir les matériaux. Ces solutions sont recueillies selon une perspective de prévention de défaillance basée sur les différentes solutions disponibles à travers les méthodes de fabrication traditionnelles.

Cette méthode vise à prévenir la défaillance de la pièce. Elle amène le concepteur à trouver des solutions très adaptées à ce but, toutefois elle ne tente pas d'optimiser le produit vers des buts définis par l'utilisateur et ne peut être adaptée pour le faire. Toutefois, même si l'implémentation de ces solutions est exclusive d'autres solutions lorsque l'on conçoit pour les procédés de

fabrication traditionnels, elles peuvent êtres intégrées localement dans le produit en utilisant la fabrication rapide et optimiser le produit pour d'autres buts en parallèle.

Les deux méthodes de conception d'assemblage permettent de générer des solutions pour la prévention de défaillances, elles pourraient être utilisées dans le cadre de la méthodologie proposée afin d'aider à générer des solutions potentielles.

1.1.6 La méthode TRIZ

L'abréviation TRIZ est un acronyme pour 'Theory of Inventive Problem Solving' en russe. Cette méthode (Terninko, Zusman, & Zlotin, 1998) a été développée par Genric Altshuller. Pour ce faire, Altshuller a fait l'analyse de centaines de milliers de brevets afin de trouver des modèles récurrents utilisés dans les brevets les plus inventifs. À partir de ces modèles, il a développé une méthode algorithmique d'aide à la résolution de problèmes qui comprend plusieurs outils.

La méthode principale de TRIZ est l'algorithme de résolution inventive de problèmes. Cette méthode aide à présenter le problème sous une nouvelle perspective en structurant le problème en termes de contradiction. Si la contradiction est technique, c'est-à-dire une dépendance inverse entre des paramètres ou caractéristiques du produit, elle est ensuite développée selon des paramètres standards et résolue en utilisant des principes standards, ces paramètres et principes étant extraits de l'analyse de brevets faite par Altshuller. Si la contradiction est physique et non pas technique, des principes de séparation sont appliqués.

Un deuxième outil, en lien avec l'algorithme précédent, est la méthode du concept idéal. Selon cette méthode le concepteur définit un système idéal et tente par six approches distinctes d'atteindre ce système idéal en utilisant les ressources disponibles. Par exemple, une usine thermique dégage des eaux usées alcalines ayant été utilisées pour nettoyer les résidus de scories ainsi que des gaz provenant de la combustion et le système idéal serait de ne dégager aucun de ces éléments puisqu'ils sont néfastes pour l'environnement. En utilisant l'approche de l'utilisation de ressources existantes dans le système, les eaux usées alcalines sont utilisées afin de traiter les gaz produits par cette même usine. Ainsi deux ressources existantes dans le système ayant des effets néfastes sont utilisées pour neutraliser leurs effets afin d'obtenir un système idéal.

Le troisième outil de TRIZ est le modèle Substance-Domaine (abrévié Su-Field en anglais). Il est utilisé afin d'établir un modèle de système technologique existant servant à résoudre un problème existant dans ce système. Une fois ce modèle défini, à l'aide de 76 solutions types standards le concepteur est amené à choisir une solution pouvant rectifier le problème du système. Une fois cette solution définie, le concepteur doit développer un concept afin d'implémenter la solution choisie. Par exemple, un système où un marteau pneumatique doit casser une roche est modélisé à gauche dans la figure 1.2. Ce système n'est toutefois pas assez effectif puisque le système n'arrive pas à casser cette roche. Le concepteur considère plusieurs fonctions standard et choisit d'ajouter une substance plus effective dans le système entre le marteau et la roche. Dans cet exemple, un burin est utilisé pour concentrer les impacts sur un seul point et le système final est présenté à droite dans la figure 1.2.

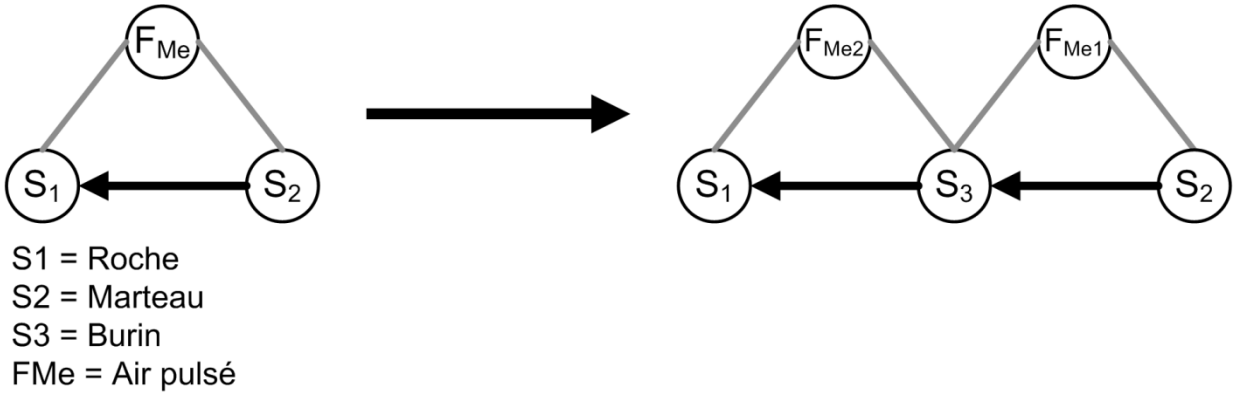


Figure 1.2: Exemple de solution pour un problème en utilisant la méthode Substance-Domaine

Le dernier outil est le modèle d'évolution qui consiste à jumeler le produit avec un modèle standard d'évolution de produits. Cet outil est surtout utilisé pour comprendre comment les produits évoluent à travers le temps, ce qui permet de connaître quand et comment ce produit pourrait évoluer. Par exemple, dans un échangeur de chaleur la superficie doit être faible lorsque la température est basse et haute quand la température est haute. On peut améliorer l'échangeur de chaleur en ajoutant des rabats métalliques à mémoire de forme selon le principe de dynamisation interne, qui dicte que l'on peut augmenter le degré de liberté du système en lui rajoutant des parties mobiles.

La méthode TRIZ présente plusieurs outils ayant diverses applications servant à améliorer le concept du produit ou à prévenir des effets néfastes sur le produit, ce qui est très utile lors de la phase de développement de concept. Toutefois, elle ne s'applique pas lors des phases de

conception subséquente et n'aide par lors de l'optimisation de l'assemblage ni des pièces. Elle ne sera donc pas utile pour une méthodologie de conception pour la fabrication rapide même si elle peut être utile en amont de celle-ci.

1.1.7 La méthode Axiomatique

La méthode de conception axiomatique (Suh, 2001) a été développée par Nam P. Suh professeur à l'université MIT. Le but principal de cette méthode est d'utiliser des lois fondamentales et des principes de conception applicable à tous les types de problèmes.

Premièrement, les variables du système sont définies comme suit :

- Consumer Attributes (CAs) : Variables qui caractérisent le concept selon ce que le client a besoin et veut du produit fini.
- Functional Requirements (FRs) : Variables qui caractérisent le comportement voulu du produit et répondants aux CAs.
- Design Parameters (DPs) : Éléments faisant partie de la solution de conception dans le domaine physique qui répondent aux FRs.
- Process Variables (PVs) : Éléments du domaine des processus qui caractérisent le processus qui répond aux DPs.

Le même concept est représenté dans chaque espace par un vecteur des différentes variables. Ensuite, il faut définir la relation entre ces différentes variables, la figure 1.3 montre la relation entre les différents domaines.

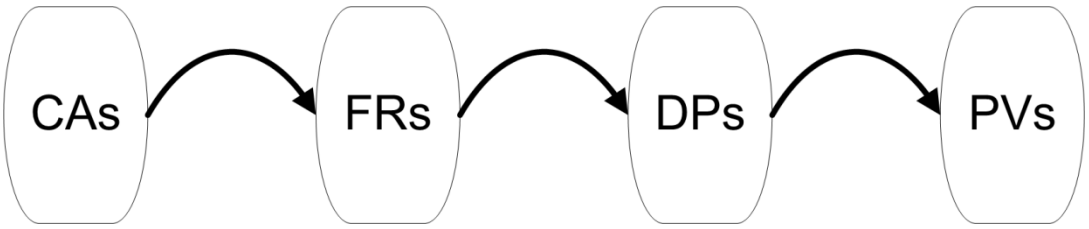


Figure 1.3: Relation entre les domaines dans la méthode axiomatique

Une fois définie la relation entre les différentes variables de chaque domaine le concepteur doit appliquer deux axiomes de conception fondamentaux afin de savoir quoi améliorer dans le concept. Les deux axiomes de conception fondamentaux sont les suivants :

- Axiome d’indépendance : Un concept optimal maintient toujours l’indépendance des requis fonctionnels du concept. C'est-à-dire que chaque requis fonctionnel est satisfait sans en affecter un autre.
- Axiome d’information : Le meilleur concept est celui contenant le moins d’information. Ce qui veut dire que l’on tente de maximiser la gamme de paramètres du système faisant partie de la gamme pour lequel le système est conçu.

La méthode se base sur l’utilisation de ces deux axiomes et d’une représentation matricielle des attributs du consommateur, des requis fonctionnels, des paramètres du design et des variables de procédé pour déterminer où effectuer des améliorations. La principale utilité de cette méthode est d’obtenir un concept optimal, mais n’aide pas à l’optimisation du produit après la sélection d’un concept et ne porte pas attention aux améliorations à apporter au produit ainsi qu’aux particularités des procédés de fabrication.

1.1.8 Synthèse des méthodologies courantes

Dans cette section ont été analysées les méthodologies de conception de produit et d’amélioration de concept les plus couramment utilisées et enseignées. De chaque méthode ont été tirées les conclusions suivantes :

- Méthodes de Design for Assembly de Lucas, Hitachi et Boothroyd-Dewhurst : ces méthodes tentent généralement d’optimiser l’assemblage afin de réduire les temps et les coûts d’assemblage ce qui n’est pas très utile dans une méthodologie de conception pour la fabrication rapide. Toutefois, un outil de la méthode DFA de Boothroyd-Dewhurst permettant de déterminer les pièces nécessaires d’un assemblage pourrait être adapté pour la fabrication rapide.
- Méthode de Design for manufacturing de Boothroyd-Dewhurst : cette méthode permet d’adapter les pièces de l’assemblage aux limitations des procédés de fabrication afin de limiter les coûts et le temps de fabrication, ce qui est contraire aux buts d’une méthodologie de conception pour la fabrication rapide.
- Conceptions d’éléments mécaniques : cette méthode guide le concepteur à concevoir un assemblage pour en prévenir la défaillance en appliquant les principes de base de l’ingénierie et en se basant sur les standards établis des éléments de l’assemblage.

Toutefois, cette méthode n'optimise pas l'assemblage vers des buts définis par le concepteur.

- TRIZ et méthode axiomatique : ces méthodes permettent d'améliorer un concept en utilisant divers outils et sont utiles lors du développement de concepts. Par contre, elles ne sont pas utiles lors de la conception de l'assemblage et des pièces.

1.2 Méthodes reliées aux procédés de fabrication par addition de matière

Plusieurs méthodologies ont été proposées dans la littérature touchant à des aspects reliés à la fabrication additive, ces méthodes seront analysées dans cette section. Ces méthodologies ne sont pas des méthodes qui aident le concepteur à concevoir un assemblage ou à prendre des décisions reliées à la conception, mais qui l'aide plutôt à prendre des décisions par rapport à quand et où utiliser la fabrication additive ou à implémenter un certain type de structure qui n'est fabricable que par fabrication additive dans une pièce. Même si leur but premier n'est pas d'être applicables au niveau de la phase de conception, elles peuvent présenter certaines méthodes ou outils qui pourraient être utiles dans la méthodologie proposée. De plus, les méthodologies détaillées dans cette section pourraient traiter de certains aspects reliés à la fabrication additive qui devraient être pris en compte dans la méthodologie développée.

1.2.1 Outil d'aide à la décision pour le choix d'une méthode de fabrication

Cette méthodologie présentée dans (Munguia & Riba, 2008) évalue la possibilité d'utiliser la fabrication rapide comme moyen de fabrication en comparant la fabrication rapide avec les procédés traditionnels. Pour ce faire, un système d'aide à la décision est implémenté en utilisant un outil d'aide à la décision.

Premièrement le concepteur doit choisir quels éléments sont à prendre en compte dans chacune des catégories suivantes :

- Géométrie : les dimensions et caractéristiques géométriques présentes (poches, cavités, etc.)

- Besoins fonctionnels : l'importance de la résistance à la corrosion, de l'absorptivité, de la conductivité, etc.
- Apparence : le fini de surface, la tolérance et les étapes de finition à être utilisés
- Besoins mécaniques : le type de matériel, l'importance des propriétés mécaniques.

Ensuite à chacune des catégories est assigné un poids par le concepteur et un score est calculé pour chacun des procédés de fabrication. Ceci permet de comparer les procédés de fabrication selon leurs capacités.

Un problème avec la méthode proposée est qu'elle fait la comparaison entre les différentes méthodes de fabrication sans considérer les avantages que peut apporter la fabrication rapide au produit. La fabrication rapide a plusieurs avantages qui devraient être pris en compte lors de la comparaison à d'autres procédés de fabrication.

1.2.2 Méthodes de conception d'outillage par assemblage de composants élémentaires hybrides

Le but d'un assemblage à composants hybrides est d'utiliser les moyens de fabrication les mieux adaptés à diverses sections de la pièce. Dans (Rivette, Hascoët, & Mognol, 2007) une décomposition d'outillage en composants élémentaires hybrides pour outillage est effectuée en établissant premièrement une représentation graphique de l'outil et de ses éléments suivant une légende. Ensuite, à partir de la représentation graphique, la pièce est divisée en composants élémentaires, c'est-à-dire un regroupement d'entités géométriques indissociables dues aux contraintes technologiques et géométriques des procédés de fabrication.

Afin de déterminer quelles entités sont indissociables, le concepteur débute par analyser la pièce pour déterminer quels éléments de la géométrie peuvent être divisés en sous-sections et être fabriqués en plusieurs parties. Une légende est utilisée pour catégoriser les pièces. Ensuite, le lien entre chacun de ces éléments est associé à une légende représentant la force du lien topologique entre ces éléments géométriques, c'est-à-dire si les éléments peuvent être sur différents composants ou non. Ces deux légendes sont combinées dans un graphe et forment la base de la méthodologie, un exemple de graphe subdivisé est présenté dans la figure 1.4. Par la suite, la

méthode suit des règles afin de découper l'assemblage en composants élémentaires en déterminant où on peut découper l'assemblage selon les différentes légendes.

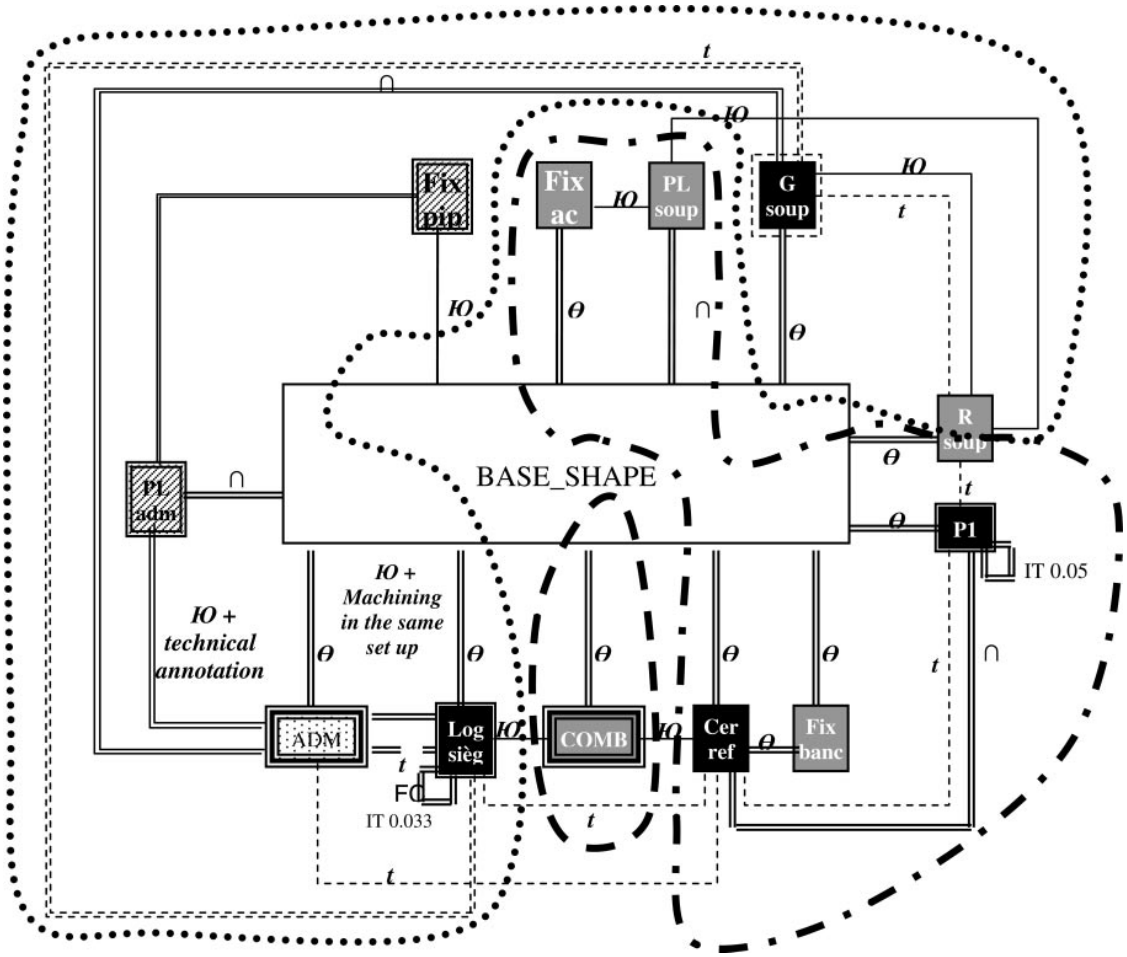


Figure 1.4: Graphe de subdivision d'un assemblage en composants élémentaires hybrides (Rivette, et al., 2007)

Une méthode de logique floue est ensuite appliquée pour déterminer quel moyen de fabrication est le plus adapté pour chaque composant élémentaire. L'utilisation de cette méthode permet de réduire le temps et le coût de développement de produit complexe en utilisant les moyens de fabrication les mieux adaptés à chaque partie de la pièce et permet également de rendre l'outillage évolutif en changeant les différents composants.

Une autre méthode de conception d'outillage hybride est celle de (Kerbrat, Mognol, & Hascoet, 2010) qui utilise une décomposition en octree de la pièce, c'est-à-dire un volume cubique dont la taille dépend de la complexité géométrique locale. Ensuite, une évaluation de l'index de facilité

d’usinage de chaque octree est faite afin de déterminer quels procédés devraient être utilisés pour chaque partie de la pièce.

Ces méthodes aident à prendre des décisions quant au procédé utilisé pour la fabrication de pièces en déterminant où utiliser l’ajout de matière, mais elles n’aident pas à incorporer les avantages de la fabrication rapide dans le processus de conception de la pièce.

1.2.3 Méthodes pour l’implantation de mésostructures

Les mésostructures sont des structures contenants un grand nombre de structure intermédiaire, par exemple des treillis comme illustrés dans la figure 1.5 ou des cellules en forme de nid d’abeille. Souvent appelées ‘structures cellulaires’ puisque ces structures sont composées de cellules, ces structures présentent des avantages par rapport à des structures pleines. Par exemple, les mésostructures offrent des propriétés structurelles exceptionnelles par rapport à leurs poids (Gibson, 2005). Toutefois, ces structures ont une géométrie complexe et non fabricables par les procédés de fabrication autres que le prototypage rapide et la fabrication rapide. La fabrication rapide fait en sorte que les mésostructures soient une option viable lors des étapes de conception. Des méthodologies ont donc été développées pour l’implémentation et l’optimisation de mésostructures dans une structure lors de la phase de conception sous le nom de *Design for Additive Manufacturing* (DFAM).

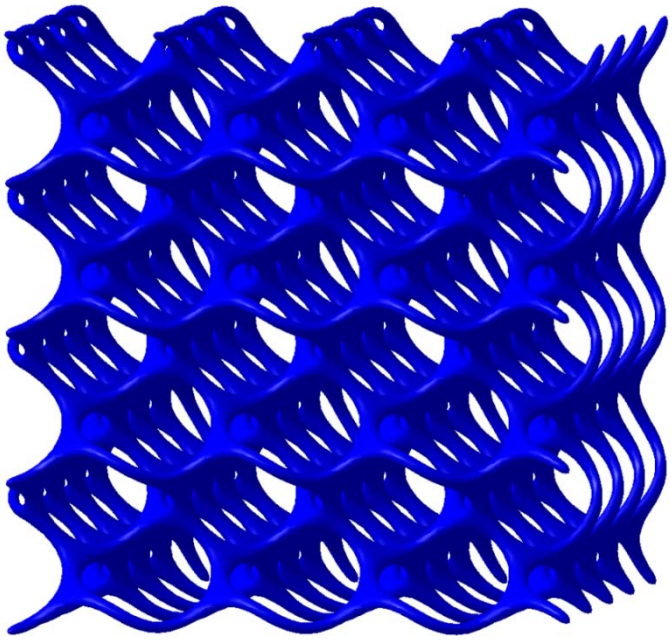


Figure 1.5: Exemple de méso-structure

Des approches d'optimisation de mésostructures sont proposées dans (Wang, 2005), (Rosen, 2007) et (Chu, Graf, & Rosen, 2008) ayant quelques variations au niveau des algorithmes choisis. Étant principalement intéressés par ce que le concepteur doit faire pour faire fonctionner la méthode et ce qu'il en ressort, cette revue de littérature ne présentera que les étapes de l'optimisation et non les algorithmes à utiliser. La méthode proposée se base toutefois sur celle proposée par (Wang, 2005) qui établit chaque sous-structure comme étant une cellule pour laquelle le placement et la taille sont optimisés. Les étapes de cette méthode sont les suivantes :

Étape 1 : Déterminer le but de l'optimisation des structures cellulaires selon les buts définis par le concepteur.

Étape 2 : Choisir le type de cellule qui sera utilisé à travers le produit en se basant sur les buts déterminés à l'étape 1.

Étape 3 : Déterminer le domaine de conception, c'est-à-dire les frontières de la pièce.

Étape 4 : Créer la topologie initiale en disposant les cellules à travers le domaine de conception.

Étape 5 : Appliquer l'optimisation de grandeur et/ou topologique à la structure définie à l'étape 4 par rapport aux objectifs définis à l'étape 1.

Ces méthodes servent à appliquer un type de structure à une pièce, toutefois ces méthodes ne regardent pas le produit au niveau de l'assemblage, n'aide pas à déterminer quand utiliser ce type de structure et ne considère que ce type de structure. Ce type de méthode et de structure doit faire partie d'une méthode plus globale de conception d'assemblage pour la fabrication rapide et sera donc utilisé dans la méthodologie proposée.

1.2.4 Synthèse des méthodes reliées aux procédés de fabrication par addition de matière

Dans cette section ont été analysées les méthodes reliées aux procédés de fabrication par addition de matière détaillée dans la littérature. De chaque méthode ont été tirées les conclusions suivantes :

- Outil d'aide à la décision pour choix de méthode de fabrication : cette méthode aide le concepteur à déterminer quel moyen de fabrication utiliser en analysant les caractéristiques de la pièce. Toutefois, elle ne considère pas les avantages que peut apporter la fabrication rapide au produit.
- Méthodes de conception d'outillage par assemblage de composants élémentaires hybrides : ces méthodes aident à diviser une pièce en sous-sections et à déterminer le moyen de fabrication optimal pour chacune de ces sous-sections. Toutefois, elles n'aident pas à incorporer les avantages de la fabrication rapide dans le processus de conception de la pièce.
- Méthodes pour l'implantation de mésostructures : ces méthodes servent à implémenter des mésostructures dans une pièce et à en optimiser la disposition. Ces structures présentent de bonnes caractéristiques physiques tout en étant légère, mais ne représentant qu'une des possibilités de la fabrication rapide.

1.3 Représentations standards et méthodes se basant sur celles-ci

Les représentations schématiques en 2 dimensions sont fondamentales à diverses étapes du processus de développement de produit, que ce soit afin de donner forme à une idée ou pour faire le détail des dimensions d'une pièce. Utilisées à bon escient durant le processus de conception d'assemblage, les représentations peuvent aider à structurer la pensée du concepteur, lui

permettre de mieux visualiser le problème et ensuite d'appliquer des méthodes se basant sur ces représentations.

Dans cette section de la revue de littérature seront analysées deux représentations standards et trois méthodes. Les deux représentations sont celles les plus couramment utilisées dans la littérature et l'enseignement du design et les trois méthodes se basent sur ces représentations.

Premièrement, la méthode de Force-Flow Diagram sera détaillée qui se base sur une représentation par pièce de l'assemblage et y ajoute le flux de force dans l'assemblage afin de déterminer comment l'assemblage peut être consolidé.

Les deux autres méthodes présentées se basent sur une représentation fonctionnelle de l'assemblage. Cette représentation permet de mieux comprendre le fonctionnement de l'assemblage et la relation entre les divers éléments qui le composent. Les deux méthodes présentées sont celles de Risk in Early Design et une archive de solutions biomimétiques.

1.3.1 Force-Flow Diagram

Le Force-Flow Diagram se base sur une représentation par pièce de l'assemblage, c'est-à-dire une représentation dans laquelle chaque pièce représente un élément, et des flèches démontrant le flux de forces entre chaque pièce. Cette représentation permet de mieux comprendre d'où proviennent ces forces, leur chemin à travers l'assemblage, par où elles quittent l'assemblage et d'appliquer une méthode de consolidation des pièces non nécessaires dans l'assemblage. La méthode de Force-Flow Diagram est détaillée dans (Otto & Wood, 2001) et consiste des étapes suivantes :

Étape 1 : Identifier les flux de forces primaires transmis à travers le produit.

Étape 2 : Schématiser le flux de force à partir de la source à travers chaque composant jusqu'à sa sortie de l'assemblage. Il faut porter une attention particulière aux flux se séparant.

Étape 3 : Documenter les résultats dans un Force-Flow Diagram dans lequel les nœuds sont des composants et les connexions sont des forces. Un exemple du résultat de la méthode jusqu'à cette étape est présenté dans la figure 1.6.

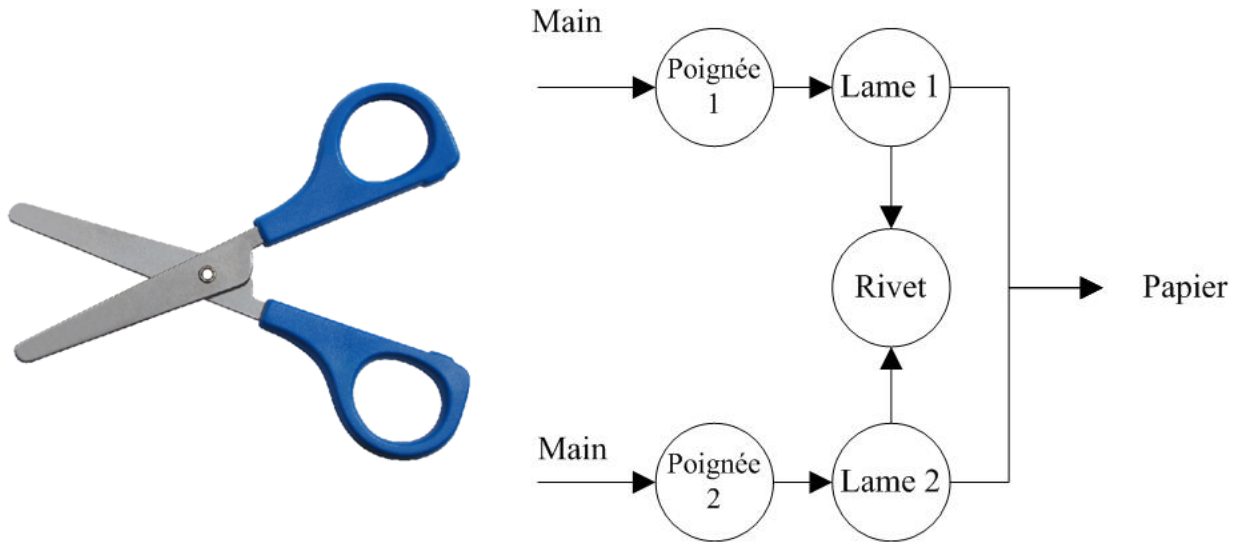


Figure 1.6: Exemple de Force-Flow Diagram après l'étape 3

Étape 4 : Analyser le diagramme et annoter les mouvements relatifs entre composants avec un ‘R’.

Étape 5 : Décomposer le diagramme en groupes séparés par des ‘R’ et faire une boite englobant ces groupes. Suite à ces étapes, le résultat appliqué sur l’exemple est montré dans la figure 1.7.

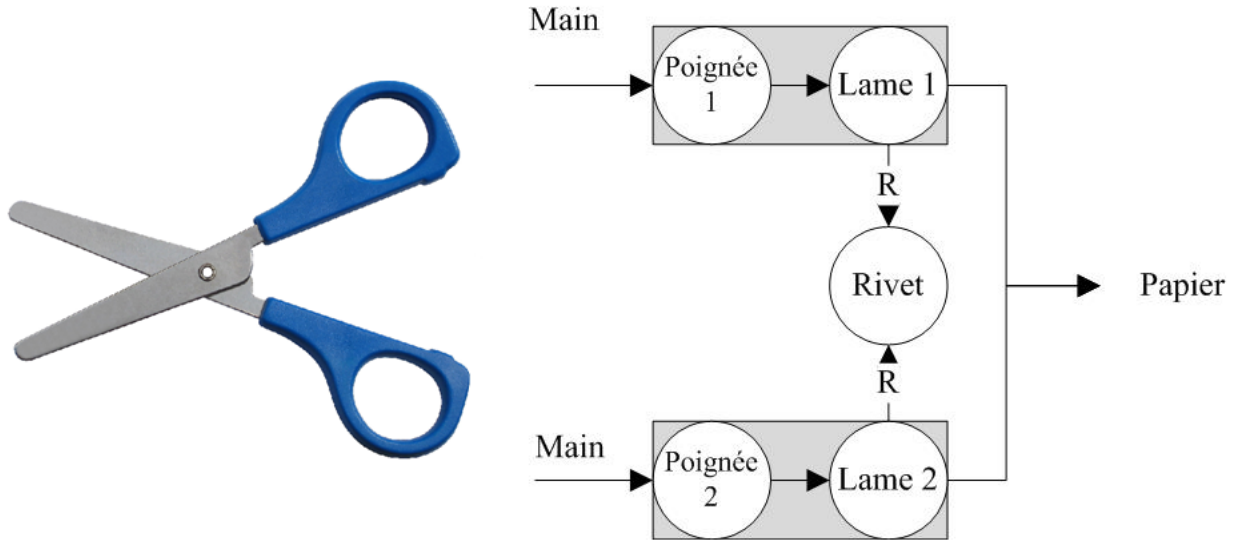


Figure 1.7: Exemple de Force-Flow Diagram après l'étape 5

Étape 6 : Déduire les sous-fonctions et les besoins des consommateurs qui sont affectés pour chaque groupe.

Étape 7 : Développer des solutions créatives afin de combiner les composants de chaque groupe.

Étape 8 : Répéter pour chaque flux de force.

Une solution possible est de combiner les poignées et les lames de manière en une seule pièce de manière à obtenir deux pièces jointes par un rivet.

Cette méthode de consolidation de pièce est simple et efficace. Toutefois, elle ne prend pas en compte toutes les possibilités de la fabrication rapide afin de pousser plus loin la consolidation de l'assemblage. Cette méthode pourrait être utilisée comme point de départ afin de construire une méthode de consolidation de pièces prenant en compte les possibilités de la fabrication rapide.

1.3.2 Décomposition fonctionnelle

La décomposition fonctionnelle de l'assemblage est une représentation par fonction du produit qui fait abstraction de sa forme pour expliquer son fonctionnement à travers un assemblage de fonction standardisée. Ces fonctions ont été définies premièrement dans (Stone & Wood, 2000) et mise à jour dans (Hirtz, Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002) et permettent de systématiquement décomposer tout produit. Cette représentation ouvre plusieurs portes au concepteur afin d'appliquer des méthodes de génération de concepts ou de solutions.

Les fonctions standardisées utilisées lors de cette décomposition sont composées d'un verbe décrivant l'action (la fonction) et d'un nom décrivant le flux réalisant l'action. Les termes de fonction et de flux sont choisis à partir d'une liste de fonction et flux standard qui sont présentés dans les tableaux 1.2 et 1.3. Chaque fonction est représentée graphiquement, comme dans la figure 1.8, par une boite avec une entrée et une sortie d'énergie, de matériau et de signal.

Tableau 1.2: Termes de fonction standard pour le système de fonctions standardisées

Class (Primary)	Material						Signal	
Secondary	Human	Gas	Liquid	Solid	Plasma	Mixture	Status	Control
Class (Primary)	Energy							
Secondary	Human	Acoustic	Biological	Chemical	Electrical	Electromagnetic		Solar
Class (Primary)	Energy							
Secondary	Magnetic	Mechanical	Pneumatic	Radioactive/Nuclear		Thermal	Hydraulic	

Tableau 1.3: Termes de flux standard pour le système de fonctions standardisées

Class (Primary)	Branch		Channel				Connect	
Secondary	Separate	Distribute	Import	Export	Transfer	Guide	Couple	Mix
Class (Primary)	Control Magnitude				Convert	Provision		
Secondary	Actuate	Regulate	Change	Stop	Convert	Store	Supply	
Class (Primary)	Signal			Support				
Secondary	Sense	Indicate	Process	Stabilize	Secure	Position		

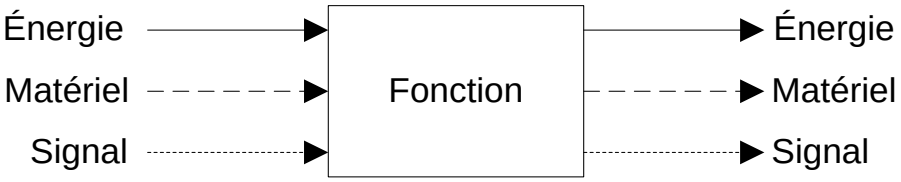


Figure 1.8: Exemple de représentation de fonction standardisée

Afin de déterminer chaque fonction et leur positionnement dans la représentation fonctionnelle la procédure suivante est suivie :

Étape 1 : Identifier la fonction générale qui doit être accomplie par l'assemblage en utilisant les termes de la base fonctionnelle. Identifier les flux d'énergie, de matériel et de signal qui entreront le système et ceux qui en sortiront.

Étape 2 : En utilisant le langage courant écrire une description des fonctions individuelles que le produit doit accomplir pour effectuer la fonction générale établie à l'étape 1.

Étape 3 : Adapter ces fonctions du langage courant à la forme de la base fonctionnelle. Ces fonctions deviennent un bloc de fonction comme représenté à la figure 1.8

Étape 4 : Arranger les blocs de fonction dans l'ordre qu'ils doivent prendre afin d'effectuer la fonction générale.

Étape 5 : Ajouter les flux d'énergie, de matériel et de signal entre les blocs de fonctions. Les flux doivent être conservés de l'entrée à la sortie et prêter une attention particulière aux flux qui se séparent.

Étape 6 : Vérifier chaque bloc pour déterminer s'ils ont besoin de flux additionnels.

Étape 7 : Vérifier les blocs pour déterminer si le modèle doit être raffiné. Le raffinement du modèle arrête lorsque chaque bloc de fonction peut être rempli par une seule solution qui est un objet ou une action et que le niveau de détail est suffisant pour satisfaire les besoins du consommateur.

La représentation fonctionnelle de l'assemblage permet de s'assurer d'avoir bien établi toutes les fonctions de l'assemblage. Ces fonctions et leurs représentations servent de base à plusieurs autres méthodes, dans les prochaines sections seront présentées deux de ces méthodes, c'est-à-dire la méthode de Risk in Early Design et une méthode d'archivage de solutions biomimétiques.

1.3.3 Risk in Early Design

La méthode de Risk in Early Design (RED) présentée dans (Lough, Stone, & Tumer, 2009) est le fruit d'une évolution des méthodes de Failure Modes Effect and Analysis (FMEA). Premièrement introduite par l'armée américaine par le US Military Standard MIL-P-1629A (MIL-P-1629A, 1980) la méthode FMEA guidait le concepteur à cataloguer et analyser les défaillances afin d'en extirper des connaissances qui permettront de subséquemment éviter ces erreurs. Toutefois, cette méthode avait un défaut majeur, elle était très dépendante des connaissances et de l'expérience du concepteur afin de bien appliquer la méthode de la faute du manque de standard dans l'application de la méthode. En cataloguant les défaillances selon les fonctions standards définies par (Hirtz, et al., 2002) la Function-Failure Design Method (FFDM) (Stone, Tumer, & Wie, 2005) a été obtenue. En créant une base de données de défaillances cataloguées selon les fonctions standards le concepteur peut connaitre pendant la phase de conception les modes de défaillances les plus enclins à poser problème. À des fins d'exemples, (Stone, et al., 2005) utilise une base de données développée en se basant sur les données d'accidents d'hélicoptère du NTSB (Robert, Stone, & Tumer, 2002).

Toutefois, la méthode FFDM est tout de même problématique. Au fur et à mesure que le catalogue de défaillances répertorié s'agrandit, le nombre de défaillances répertoriées pour chaque fonction grandit et même si certains modes de défaillances sont improbables, ils sont considérés comme étant aussi importants que ceux étant très probables. Afin de remédier à ce problème, la méthode de RED a été développée afin de traiter l'information obtenue avec la méthode FFDM selon la probabilité et les conséquences. Quatre formules sont proposées pour classer les risques et les conséquences selon une cote de sévérité de 1 à 5. Dans la méthodologie

proposée, la méthode de RED est utilisée et la formule de classification utilisée est celle de probabilité suivante :

$$l_{ij} = int\left\{5\frac{ef_{prod_{i,j}}}{max_{1\leq j\leq m}^{1\leq i\leq n}(ef_{prod_{ij}})}\right\}$$

$l_{i,j}$ = Cote de probabilité de 1 à 5 pour la fonction “i” et le mode de défaillance “j”.

$ef_{prod_{i,j}}$ = Nombre de défaillances listées dans la base de données pour la fonction “i” et le mode de défaillance “j”.

$max_{1\leq j\leq m}^{1\leq i\leq n}\left(ef_{prod_{ij}}\right)$ = Nombre de défaillances maximal listé dans la base de données pour les fonctions présentes dans le produit.

Le seul défaut de cette formule selon (Lough, et al., 2009) est qu’elle calcule le risque des défaillances en comparant le nombre de défaillances répertoriées à celle ayant le plus d’occurrences de défaillance répertorié. Donc si la défaillance la plus probable est elle-même très improbable, toutes les défaillances sont considérées comme étant probable.

Toutefois, avec la fabrication rapide, l’optimisation d’une fonction n’exclue pas l’optimisation d’une autre. Donc, même si la pièce est optimisée par rapport à ses défaillances, elle peut tout de même être optimisée par rapport aux buts définis par l’utilisateur. Par exemple, si en utilisant la formule précédente on détermine qu’un matériau peut être utilisé pour prévenir un mode de défaillance, un autre matériau peut tout de même être utilisé sur le reste de la pièce pour d’autres raisons. Même si ces solutions sont mutuellement exclusives pour les moyens de fabrication traditionnels, il est possible d’implémenter ces deux solutions en utilisant la fabrication rapide.

1.3.4 Biomimétisme

Le Biomimétisme consiste à analyser des propriétés ou des caractéristiques d’un système biologique ou naturel et de les reproduire dans un système fabriqué par l’homme. L’étendue de ces propriétés et de ces caractéristiques est très large, de l’utilisation de structures cellulaires spécifiques dont les géométries proviennent de la nature (Gibson, 2005) jusqu’à des robots dont les mouvements sont inspirés d’insectes (Bruck, et al., 2007). Le biomimétisme est en mesure de fournir un nombre de solutions et d’applications gigantesques, toutefois il peut être problématique de trouver de quel système s’inspirer. Donc ces solutions doivent être répertoriées

pour pouvoir subséquemment y accéder. Toutefois, pour pouvoir accéder à toutes les solutions potentielles, il faut avoir un système d'archivage efficace et simple d'utilisation.

Un système d'archivage de solution inspirée de la nature est proposé par (Golden, 2005) dans lequel les solutions sont archivées selon la structure de fonction standard de (Hirtz, et al., 2002). Cette méthode se base sur trois archives :

- Archive des énoncés fonctionnels standard afin de trouver les Function ID des fonctions.
- Archive des fonctions qui permettent à partir du Function ID de connaitre la fonction et le Product ID.
- Archive des produits qui permettent de connaitre le produit à partir du Product ID.

Les étapes pour naviguer dans ces archives afin d'accéder aux solutions répertoriées sont les suivantes :

Étape 1 : Établir un énoncé fonctionnel selon la base fonctionnelle détaillée dans (Hirtz, et al., 2002) consistant en un terme de flux et un terme de fonction et ajouter un terme de propriété qui décrit à quoi est lié la solution recherchée. Par exemple, si le concepteur veut prévenir la défaillance d'un axe par fracture, il défini l'énoncé fonctionnel comment étant 'stop solid' et ajoute le terme de propriété 'fracture'.

Étape 2 : Faire une recherche dans la base de données des énoncés fonctionnels classifiés pour trouver des fonctions archivées dont l'énoncé fonctionnel correspond à celui posé précédemment. Noter les Function ID correspondant à ces fonctions. Pour l'exemple précédent, les résultats sont les suivants :

Tableau 1.4: Tableau des Function ID classés selon leurs énoncés fonctionnels

FuncID	Action	Synonym	Entity1Type1	Entity1Type2	Property	PropertyType
28	Stop	Resist	Material	Solid	Fracture	Failure
238	Stop	Resist	Material	Solid	Fracture	Failure
245	Stop	Resist	Material	Solid	Fracture	Failure
285	Stop	Resist	Material	Solid	Fracture	Failure

Étape 3 : À partir des Fonction ID chercher l'archive de fonction et vérifier si ces fonctions correspondent au problème en main, si tel est le cas noter le Product ID. Pour l'exemple, les résultats de cette étape sont les suivants :

Tableau 1.5: Tableau des Product ID classés selon les Function ID

FuncID	Product ID	Function
28	8	Resist fracture of ceramic
238	73	Resist fracture of tube
245	75	Resist fracture of axe
285	86	Resist fracture of structure

Étape 4 : Chercher dans l'archive de produit pour trouver les produits desquels s'inspirer en utilisant les Product ID trouvés précédemment. Ces produits sont des produits inspirés de la nature qui répondent à la fonction déterminée à l'étape 1. Pour l'exemple, les produits sont les suivants :

Tableau 1.6: Tableau de fonctions classées selon leurs Product ID

Product ID	ProductName	ProductType	BiologicalName
8	Ceramic coating	Material	Horse
73	Fibrous tubes	Structure	Bamboo
75	Ice axe	Structure	Woodpecker
86	Aerospace structures	Structure	Horse

Étape 5 : Analyser ces produits inspirés de la nature afin de déterminer comment ces solutions peuvent être adaptées pour remplir la fonction désirée. En analysant la littérature associée aux couches de céramiques, tel que suggéré par le Product ID 8, on tente de trouver des solutions à intégrer au produit. Une solution possible est d'intégrer un gradient fonctionnel de métal et de céramique afin de limiter l'expansion de craques vers l'intérieur de l'axe (Jin & Batra, 1996).

1.3.5 Synthèse des représentations standards et des méthodes se basant sur celles-ci

Dans cette section ont été analysées deux représentations standard d'assemblage ainsi que les méthodes se basant sur celles-ci. De chaque méthode ont été tirées les conclusions suivantes :

- Force-Flow Diagram : cette méthode analyse graphiquement les relations entre les pièces d'un assemblage afin de déterminer quelles consolidations pourraient être effectuées dans

l'assemblage. Elle pourrait être adaptée afin de construite une méthode de consolidation de pièces pour la fabrication rapide.

- Décomposition fonctionnelle : cette méthode sert à détailler les fonctions primaires d'un assemblage en sous-fonctions. Elle est utilisée afin d'appliquer les méthodes de Risk in Early Design et afin de catégoriser une base de données pour le Biomimétisme.
- Risk in Early Design : cette méthode se base sur une base de données des défaillances afin de permettre au concepteur de connaitre les risques et les conséquences de défaillances d'un assemblage à partir de sa représentation fonctionnelle. Cette méthode permet au concepteur d'évaluer le risque et les conséquences tôt dans le processus de conception.
- Biomimétisme : le biomimétisme permet au concepteur de trouver des solutions pour un but précis en s'inspirant de la nature. La méthode présentée se sert d'une base de données classifiée selon les fonctions de la décomposition fonctionnelle, ce qui permet d'obtenir des suggestions originales.

1.4 Méthodes d'optimisation numériques de la géométrie

L'optimisation de la géométrie d'une pièce est un procédé complexe requérant plusieurs itérations puisque le nombre de solutions possibles est infini dû à des variations infimes dans la géométrie. Puisque les méthodes d'optimisation numériques de la géométrie permettent d'analyser un nombre très important de solutions en un temps minime, elles sont un atout important dans une méthodologie de conception de produits. De plus, ces méthodes sont particulièrement adaptées à la fabrication par ajout de matière puisque le résultat de ces optimisations est généralement de forme complexe non fabricables par procédés de fabrication traditionnels.

Les méthodes qui permettent d'optimiser numériquement la géométrie des pièces par rapport à un ou plusieurs critères sont présentées dans cette section, c'est-à-dire l'optimisation de forme, l'optimisation topologique et l'optimisation multicritères. Ces méthodes seront analysées pour vérifier si elles sont capables de prendre en compte tous les avantages de la fabrication rapide et comparées entre elles pour déterminer les avantages des unes par rapport aux autres. Elles seront évaluées selon le niveau d'optimalité géométrique de la solution obtenue et la possibilité d'optimiser la distribution de matériaux dans une pièce multimatériaux.

1.4.1 Optimisation de forme

L’optimisation de forme est une méthode d’optimisation numérique de la géométrie définie par (Bucur & Buttazzo, 2005) comme étant une méthode qui consiste à déformer et modifier les frontières de la géométrie d’une pièce à l’intérieur d’un domaine défini. Cette forme commence comme un domaine prédéfini par le concepteur et s’ajuste itérativement afin de se conformer à une fonction de coût qui doit être optimisée.

Dans l’exemple montré dans la figure 1.9, on débute par une géométrie dont la périphérie doit rester intacte, donc les contours pouvant être déplacés sont ceux des quatre trous. Dans la solution, l’algorithme ne peut que déplacer ces formes de manière plus optimale jusqu’à ce que l’on remplisse la fonction de coût.

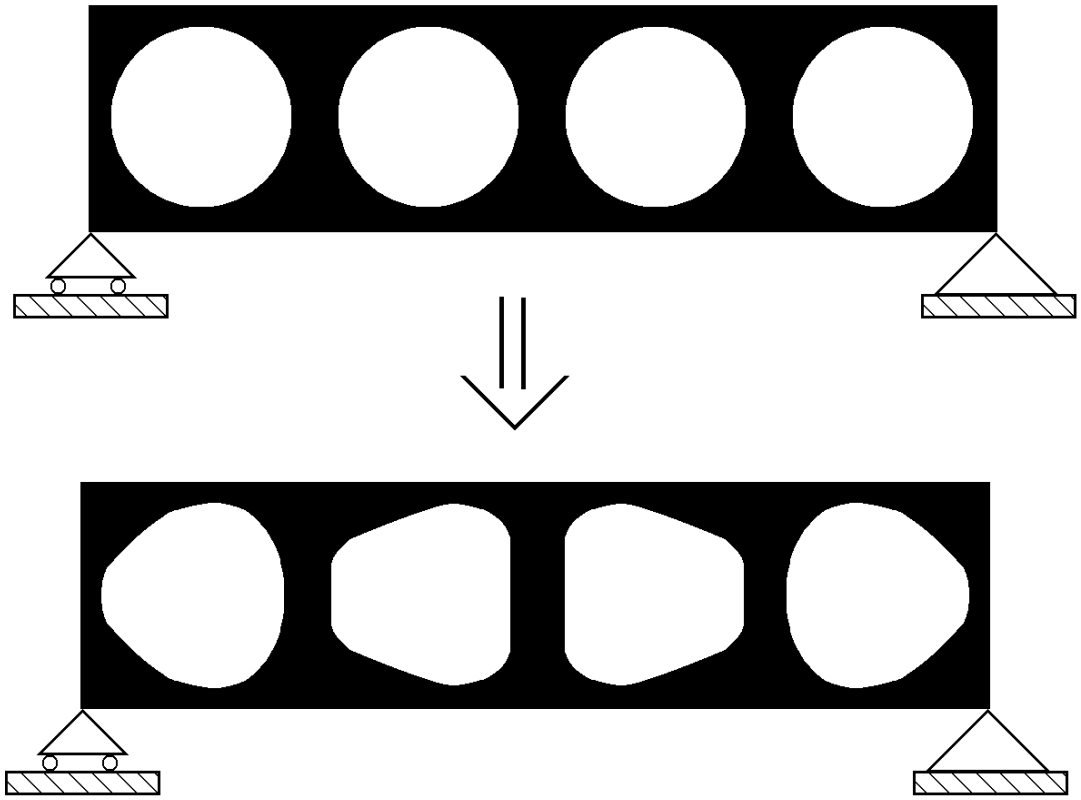


Figure 1.9: Exemple d'optimisation de forme

Même si la base du fonctionnement ainsi que le but de ce type d'optimisation reste toujours le même, l'algorithme qui détermine comment les frontières se déplacent et les conditions d'optimalités peuvent influencer les résultats.

Le résultat de cet algorithme est une solution dans laquelle le placement de la frontière est optimal pour un problème renfermant un certain nombre d'ouvertures, toutefois il ne crée pas de nouvelles frontières, tel un nouveau trou dans la structure. Ce qui fait que la méthode ne considère pas toutes les possibilités et donc la solution de ce type d'algorithme n'est pas toujours optimale.

1.4.2 Optimisation topologique

L'optimisation topologique telle que détaillée dans (Bendsøe & Sigmund, 2003) vise à construire une géométrie optimisée en ne connaissant que les variables à optimiser, les charges appliquées sur le concept, les conditions de support ainsi que les contraintes géométriques du volume de la structure. Ce qui veut dire que le concepteur ne connait rien par rapport à la forme finale de la pièce. Les contraintes géométriques qui doivent être spécifiées sont les volumes qui doivent absolument être occupés par le volume final ainsi que les limites dans lequel l'algorithme peut placer du matériau.

Cette méthode, fonctionnant par itération, débute par le concepteur qui pose le problème et les conditions. Ensuite, la partie itérative de l'algorithme débute et se poursuit comme suit :

Étape 1 : L'algorithme calcule par méthode d'éléments finis les déplacements et déformations locales à travers la géométrie.

Étape 2 : La raideur mécanique de l'assemblage est calculée. Si l'amélioration est marginale ou si des conditions d'optimalités sont définies et satisfaites l'algorithme s'arrête. Sinon on continue à l'étape suivante.

Étape 3 : L'algorithme fait le calcul des nouvelles variables de densité de la géométrie.

Étape 4 : Retour à la première étape en utilisant la géométrie définie à l'étape 3.

La figure 1.10 montre les possibilités de cette méthode et permet aussi de montrer que contrairement à l'optimisation de forme, l'optimisation topologique est capable de créer ses propres trous.

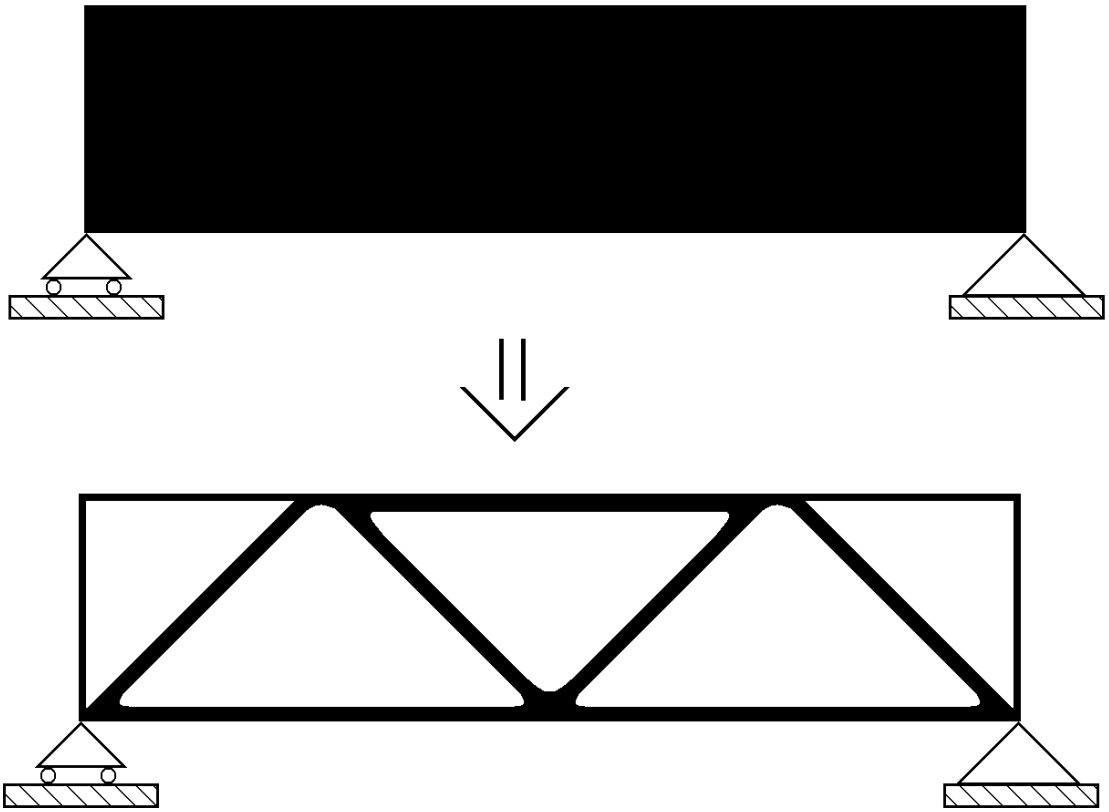


Figure 1.10: Exemple d'optimisation topologique

Cette méthode permet d’obtenir une géométrie optimisée sans connaitre la forme de celle-ci ni la disposition finale ou le nombre des ouvertures dans la pièce, ce qui permet au concepteur de facilement optimiser la pièce. Le défaut de cette méthode est que tel qu’implémenté dans les logiciels d’analyse d’éléments finis elle ne permet pas de prendre en compte l’aspect multimatériaux dans la pièce. Puisque l’optimisation topologique considère plus d’options de structures que l’optimisation de forme en ajoutant ses propres ouvertures elle est donc une méthode plus appropriée dans le cadre d’une optimisation de pièce.

1.4.3 Optimisation à objectifs multiples

La dernière méthode est l’optimisation à objectifs multiples. Avec cette méthode, plusieurs variables sont prises en compte pour déterminer l’optimalité de la solution et ces variables peuvent appartenir à différentes disciplines. Par exemple, une pièce pourrait être optimisée sur la base de sa résistance aux forces mécaniques et de sa capacité à conduire la chaleur. Toutefois, il

n'y a pas de solution optimale unique puisque la solution est un compromis entre plusieurs variables. Puisque la solution optimale comprend plusieurs solutions, le concepteur doit choisir une approche afin de déterminer quelle combinaison de solution est considérée optimale. Trois approches sont proposées dans (Mastinu, Gobbi, & Miano, 2006) :

- Méthode de la frontière Pareto-optimale : ceci est la limite où plusieurs solutions forment une frontière dans laquelle il n'est pas possible d'améliorer une variable sans en détériorer une autre. Le concepteur choisit donc la solution à partir de celles sur la frontière à la fin de l'optimisation.
- Méthode basée sur les préférences : cette méthode prend en compte les préférences du concepteur avant le processus d'optimisation pour comparer les résultats à travers le processus, ce qui fait qu'on obtient une solution unique à la fin de l'optimisation.
- Méthode interactive : selon cette méthode, le concepteur fait des choix de solution à diverses étapes du processus ce qui conduit à une solution unique.

Ces méthodes sont toutes viables, mais elles ne sont pas encore intégrées dans les logiciels d'Ingénierie Assistée par Ordinateur actuels ce qui rend leur utilisation plus complexe puisque leur implémentation doit être faite par le concepteur. Il serait donc avantageux pour la méthodologie proposée de faire appel à l'optimisation topologique puisque celle-ci est intégrée dans les logiciels de CAO.

1.4.4 Synthèse des méthodes d'optimisation numériques

Dans cette section ont été analysées les méthodes d'optimisation numériques. De chaque méthode ont été tirées les conclusions suivantes :

- Optimisation de forme : cette méthode optimise la pièce en déplaçant les frontières de la géométrie. Toutefois, elle est limitée au niveau de ses résultats puisqu'elle ne peut pas créer de nouvelles frontières dans la pièce.
- Optimisation topologique : cette méthode optimise la pièce en modifiant itérativement la densité à travers la géométrie. Cette méthode a beaucoup moins de limitations que la méthode d'optimisation de forme puisqu'elle n'est pas limitée au niveau des frontières.

Cette méthode pourrait être utile dans une méthodologie de conception pour la fabrication rapide afin d'optimiser la géométrie.

- Optimisation à objectifs multiples : cette méthode aide le concepteur à déterminer comment choisir une solution lorsqu'il y a plusieurs objectifs lors de l'optimisation. Cette méthode pourrait être utile lorsqu'il y a plus d'un objectif lors de l'optimisation.

1.5 Synthèse de la revue de littérature

Dans ce chapitre de revue de littérature ont été couvertes plusieurs méthodologies de conception couramment utilisées, des méthodes reliées aux procédés de fabrication par addition de matière provenant de la littérature, des représentations standards d'assemblage ainsi que des méthodes se basant sur celles-ci et finalement des méthodes d'optimisation numérique. Ci-dessous sont présentées les grandes lignes des éléments de ces méthodes qui ont été retenus comme pouvant être utiles pour la méthodologie proposée.

- Un outil provenant de la méthode de Design for Assembly de Boothroyd-Dewhurst ainsi que la méthode de Force-Flow Diagram pourrait servir de base afin de développer une méthode de consolidation de pièce adaptée à la fabrication rapide.
- La méthode de Risk in Early Design pourrait utilisée afin de déterminer quelles sont les défaillances les plus probables dans un assemblage tôt dans le processus de conception.
- La méthode de biomimétisme a été retenue afin d'aider le concepteur à trouver des solutions optimales.
- La méthode d'optimisation de mésostructures permet d'implémenter un type de structure qui pourrait être optimal pour certaines applications.
- L'optimisation topologique et l'optimisation multi-objectifs ont été retenues afin d'optimiser la géométrie du produit.

CHAPITRE 2 DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE ET ORGANISATION GÉNÉRALE DU DOCUMENT

2.1 Démarche de l'ensemble du travail de recherche

Le but du travail de recherche est de permettre au concepteur de prendre en compte les avantages de la fabrication rapide lors du processus de conception de produit. Les avantages de la fabrication rapide sont les suivants :

- La possibilité de fabriquer des pièces multi matériaux
- Pas de restriction géométrique
- La complexité n'est pas un facteur du coût de fabrication
- Possibilité de personnalisation de masse

Pour ce faire, le concepteur doit arrêter de penser en termes de restrictions et doit commencer à penser en termes de possibilités. De plus, la méthodologie doit aider le concepteur à implémenter adéquatement des solutions multimatériaux et des solutions à géométrie complexe.

En résumé, la méthodologie développée doit remplir les objectifs suivants :

- Penser en termes de possibilités et non de restrictions
- Utilisation des possibilités de multimatériaux
- Utilisation de géométries complexes

Une méthodologie de conception touchant à la conception au niveau de l'assemblage et à l'optimisation des fonctions de l'assemblage a été développée. En empruntant des éléments aux méthodes analysées dans la littérature et en développant de nouveaux outils une méthode est développée qui permet au concepteur d'optimiser un assemblage en faisant appel aux avantages de la fabrication rapide. Cette méthodologie est en attente de verdict du journal Journal of Mechanical Design sous le nom de 'A Design Methodology for Rapid Manufacturing'.

2.2 Organisation générale du document

La méthodologie proposée dans ce travail de recherche est celle présentée dans l'article 'A Design Methodology for Rapid Manufacturing', qui est présenté dans le chapitre 3 de ce mémoire. Cette méthodologie vise à remplir les objectifs de recherche définis précédemment (cf. paragraphe 2.1) en aidant le concepteur à systématiquement intégrer les avantages de la fabrication rapide dans le produit.

Suite à la présentation de cette méthodologie, le chapitre 4 discutera de la façon selon laquelle la méthodologie proposée remplit les objectifs de recherche ainsi que des limitations apportées par l'utilisation de cette méthode.

Finalement, une réflexion sur la méthodologie proposée ainsi que des perspectives de recherche ultérieures sont présentées dans le chapitre 5.

CHAPITRE 3 A DESIGN METHODOLOGY FOR RAPID MANUFACTURING

3.1 Abstract

3.1.1 Background

Rapid Manufacturing processes have few geometrical manufacturing restrictions and they enable new manufacturing possibilities such as the fabrication of multi-material parts. These possibilities aren't taken into account in current design methodologies which aim at guiding the designer towards avoiding the limitations of the manufacturing process. This paper aims at proposing a design methodology that takes into account the possibilities of Rapid Manufacturing during the design process.

3.1.2 Method of approach

Various design methodologies are analyzed to determine if some of their sections could be applicable to a design methodology for Rapid Manufacturing. Afterwards a design methodology that builds on past methodologies is proposed that aims to integrate past knowledge in a methodology that guides the designer towards taking full advantage of Rapid Manufacturing.

3.1.3 Results

The proposed methodology guides the designer to improve the product by helping him consolidate his assembly and then by optimizing the assembly in parallel towards failure prevention and towards user-defined goals. This method is then applied to a mechanical assembly.

3.1.4 Conclusions

The proposed approach helps cover a wide range of ameliorations that can be brought to the product without restricting the designer to certain solutions or optimization methods and the example illustrates the extent of the ameliorations that can be integrated into the assembly.

Keywords: DFRM, DFAM, rapid manufacturing, layered manufacturing, design methodology, product design

3.2 Introduction

Rapid Manufacturing (RM) is defined as the direct production of finished goods through additive fabrication processes that eliminate tooling (Wohlers, 2007). This manufacturing method functions by layer-wise superposition of material, along with a sacrificial support material, in order to manufacture parts. By changing the powder being deposited during manufacturing it is possible to build a part containing multiple materials (Kumar & Kruth, 2010). Thus it is possible to fabricate complex internal and external features that aren't possible to manufacture with traditional tool-based manufacturing. Furthermore, the manufacturing cost isn't function of this complexity, but rather of global criteria like volume and build direction (Alexander, Allen, & Dutta, 1998). The elimination of tooling in the manufacturing process means that design methodologies based around the limitations of tooling are no longer valid and that "the possibilities for design are limited only by the design tools and one's imagination" (Wohlers, 2009). New capacities for RM are also being developed, such as the possibility to build multiple parts with relative motion in a single step (Ansorge, Badstübner, & Reichl, 2007). Thus, RM allows for new design freedoms and the optimization of products further than previously possible.

A manufacturing process is usually chosen for a specific design based on the cost of manufacturing and whether its limitations permit the manufacturing of the part. Design methodologies for non-additive manufacturing processes are typically based on adapting a design to the limitations of the manufacturing process in order to limit the costs of manufacturing. However, RM has very few limitations, many possibilities and is usually chosen to obtain optimized parts. Thus a limitation-based design approach is not a viable approach for a Design for Rapid Manufacturing (DFRM) methodology.

Changes will be required in the way designers and engineers practice design when taking into account the new possibilities of RM. As designers stop thinking about limitations of the manufacturing process during the design process and start thinking about possibilities a shift of paradigm will be needed in design methodologies. An example of this shift in paradigm is

provided in Rosenberg (Rosenberg, 2008) in which engineers at Bell Helicopter were having trouble designing a cool air duct with RM processes due to their notes for the design of a duct being related to limitations of the manufacturing processes. This paper aims at providing a new DFRM methodology applicable to all types of mechanical assemblies in which the designer is guided towards possibilities instead of away from limitations.

3.3 Related work

3.3.1 Rapid Manufacturing methodologies

Current design methodologies involving additive manufacturing come in two types, either to determine when to use additive manufacturing or to implement a specific type of structure into a part.

In Munguia (Munguia & Riba, 2008) a method is presented to assess the possibility of using RM for manufacturing versus traditional methods using artificial intelligence tools. In Rivette et al. (Rivette, et al., 2007) a methodology to determine which components of a multicomponent prototype could be manufactured using RM processes through a graph-based representation of the part's features and fuzzy logic. Another methodology for hybrid multicomponent prototypes is presented in Kerbrat et al. (Kerbrat, Mognol, & Hascoët, 2008) using an octree decomposition of the tool followed by an evaluation of the machinability of each octant using a machinability index. These methods help make decisions regarding the fabrication of parts with RM, but they do not help the user take advantage of layered manufacturing during the design process.

Some Design for Additive Manufacturing (DFAM) methodologies have been proposed with the aim of implementing cellular structures, which is a structure comprised of a large amount of intermediate shape elements which combine to form structures with excellent physical properties (Gibson, 2005), into a design through the capabilities of RM. In Rosen (Rosen, 2007) and Chu et al. (Chu, et al., 2008) a DFAM design methodology for the implementation of cellular structures which consists of choosing a cell size and mapping it into the design area followed by a shape optimization procedure to determine the diameter of the lattices. In Wang (Wang, 2005) unit trusses are used as unit cell to design adaptive cellular structure via geometric modeling, finite element analysis, engineering optimization, and additive fabrication. These methodologies help

implementing a specific structure but do not look at implementing any other type of solution into a product, this method may be useful as part of a more global design methodology.

3.3.2 Design for Assembly and Design for Manufacturing

Design for Assembly methodologies are widely used in the manufacturing industry to design products that are easy to assemble with a specific assembly method in order to save time and money on the assembly process. Such methods include the Lucas DFA Evaluation Method (Redford & Chal, 1994), Hitachi Assemblability Evaluation Method (Ohashi, et al., 2002) and the DFA portion of the Boothroyd-Dewhurst DFMA Method (Boothroyd, et al., 2002). While these methods are useful in the context of mass manufacturing, they simply aim at adapting the product for a specific assembly method while never looking at improving the actual product. However, one of the tools of the DFA portion of the Boothyord-Dewhurst methodology bases itself off three questions to determine the theoretical lowest part count of the assembly and can be useful in a RM methodology. This set of question is adapted for RM and used in the proposed methodology to determine necessary parts of the assembly.

The DFM portion of the Boothroyd-Dewhurst DFMA Method (Boothroyd, et al., 2002) guides the user into choosing an appropriate process for manufacture and to modify the parts based upon the limitations of this process in order to ensure manufacturability and to reduce the cost of manufacture. However the goal isn’t to improve the product and these methodologies do not look at incorporating new possibilities of a manufacturing process into the product, because of this DFM methods aren’t appropriate for RM.

3.3.3 Part and function representations and function-based methodologies

A standard representation helps decompose assemblies such that it is easy to systematically apply methodologies further down the design process. Two of the most prominent representations are part and function representation, the first being simply a graph showing all parts of the assembly and the second being a graph detailing the functions that explain the functioning of the assembly.

Part representations of the assembly helps with visualization and using the Force-Flow Diagram (Otto & Wood, 2001) can also be used to realize part count reduction based on a simple set of

rules applied by analyzing the graph. While these rules aren't adapted to the new possibilities of RM they could be changed to do so. The proposed methodology uses Force-Flow Diagram as a basis for assisting the designer with part count reduction.

Failure Mode Effect and Analysis (FMEA) was originally developed from the US military standard MIL-P-1629A (MIL-P-1629A, 1980) in order to catalogue failures, analyze these failures and to apply the knowledge gained from these failures to future products. However this method is highly dependent on the designer's knowledge and experience due to lack of a standard function structure for the application of the method. A functional basis for engineering design was first proposed in Stone and Wood (Stone & Wood, 2000) and consolidated into its actual form in Stone et al. (Hirtz, et al., 2002). The functional basis consists of making a functional statement involving a standard flow term and a standard function term; these standard terms are presented in Table 3.1 and Table 3.2. This functional basis was combined with the FMEA method in order to obtain the Function-Failure Design Method (FFDM) (Stone, et al., 2005). FFDM is a FMEA method for failure prevention using standard functions and a function-based failure database applicable during the conceptual stage of design based. This method relies on a database of failure and the article used the database developed by using NTSB rotorcraft accident data (Robert, et al., 2002) which is reproduced in Table 3.4 included in annex. However, given large enough amounts of data in the database it is likely that all failure modes will become possible for every function. For this reason the Risk in Early Design (RED) (Lough, et al., 2009) which proposes four methods of interpreting the data obtained through FFDM based on risks and consequences.

Table 3.1: Functional basis reconciled function set

Class (Primary)	Branch		Channel				Connect	
Secondary	Separate	Distribute	Import	Export	Transfer	Guide	Couple	Mix
Class (Primary)	Control Magnitude				Convert	Provision		
Secondary	Actuate	Regulate	Change	Stop	Convert	Store	Supply	
Class (Primary)	Signal			Support				
Secondary	Sense	Indicate	Process	Stabilize	Secure	Position		

Table 3.2: Functional basis reconciled flow set

Class (Primary)	Material						Signal	
Secondary	Human	Gas	Liquid	Solid	Plasma	Mixture	Status	Control
Class (Primary)	Energy							
Secondary	Human	Acoustic	Biological	Chemical	Electrical	Electromagnetic		Solar
Class (Primary)	Energy							
Secondary	Magnetic	Mechanical	Pneumatic	Radioactive/Nuclear		Thermal	Hydraulic	

Biomimetism, which consists of drawing inspiration from nature to generate new and innovative solutions, can also be paired with a functional decomposition of the assembly in order to organize and search a repository of design solutions inspired by nature. Golden (Golden, 2005) proposes such a repository which enables the designer to easily and systematically analyze original solutions inspired from nature.

3.3.4 Numerical optimization methods

Optimization refers to choosing the best solution from a set of available alternatives, however when referring to the optimization of a geometry the solutions are infinite and their performance quantifiable. Thus numerical optimization methods are used to speed up the optimization process by solving complex iterative solutions in order to obtain an optimal solution. The literature on optimization of structural and mechanical systems is extensive and beyond the scope of this research, therefore some of the most relevant methods that are widely used in industry are going to be presented. These include topology optimization and optimization of mesostructures, which has been detailed in section 3.3.1.

Topological optimization is detailed in Bendsøe and Sigmund (Bendsøe & Sigmund, 2003) and aims at constructing an optimized geometry knowing only the applied loads, the support conditions, the boundaries of the volume of the structure and user-defined goals. This method allows the user to find optimal geometries without him knowing what this geometry would look like.

Another method not used in this paper but worth mentioning is Multicriteria Optimization in which the goals of the optimization span many disciplines. One of the challenges of such an

optimization is to determine the optimal solution since the solution is a compromise between the results from many disciplines. Various methods for Multicriteria Optimization and solution selection are described in Ehrgott (Ehrgott, 2005).

These methods are particularly suited for RM as they result in optimized geometries that are often complex and need to be adapted for traditional manufacturing processes, but can easily be manufactured without alterations using RM processes.

3.3.5 Concept generation methods

Concept generation methods aim to assist the designer in finding potential solutions that would fit the problem's requirements and improve the design over its previous iterations. A few such methods will be analyzed in order to determine if they have potential applications in a DFRM methodology. These methods are mechanical element design methods, design for X and biomimetism.

Mechanical element design as presented in Collins et al. (Collins, et al., 2010) aims first and foremost at preventing failure of the design by applying tacit knowledge related to specific mechanical applications such as bearings or shafts. Looking up the information relevant to a specific mechanical application will yield instructions on how to design the geometry, the fit, the surface conditions as well as choosing the right materials for this application. Although this method is restricted to solutions for failure prevention, it does so very thoroughly.

Design for X represents a collection of tacit knowledge presented in the form of guidelines, but instead of being application-specific like mechanical element design it is goal-specific. Pahl et al. (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007) offers details on the most prominent of these guidelines, which include DFA and DFM which have been analyzed in section 3.3.2. These guidelines can provide a good set of solutions for a particular goal.

Biomimetism is the application of biological methods and systems found in nature to the study and design of engineering systems and modern technology. Due to their diversity it can hard to find the right method or system for a particular problem and there is therefore a need for an organized solution archiving and retrieving system. The most promising of these systems include Vincent et al. (Vincent, Bogatyreva, Bogatyrev, Bowyer, & Pahl, 2006) who proposes to use the classification from the TRIZ methodology (Terninko, et al., 1998) and Golden (Golden, 2005)

who proposes using the standard function denomination from (Hirtz, et al., 2002) to classify functions into a database. Biomimetism can help generate innovative solutions to a problem once the right biological methods or systems are found.

According to Ulrich and Eppinger (Ulrich & Eppinger, 2004) some of the common dysfunctions of concept generation are:

- Consideration of only one or two alternatives
- Failure to consider entire categories of solutions
- Ineffective integration of partial solutions

For these reasons it is important to consider as many venues as possible to find potential solutions. The proposed methodology shouldn't restrict itself by looking at only a few avenues to find potential solutions or to optimize the assembly. As such, it may be worth looking into all these methods to find as many alternatives as possible.

3.4 Method

In this section the methodology developed for designing parts and assemblies while taking into account the advantages of RM processes is introduced. These advantages include:

- Shape complexity: There are no limitations to the possible shapes with RM.
- Material complexity: Due to material being processed one point at a time it is possible to vary the material between points and thus create multi-material parts.
- Cost function: The cost function of manufacturing is not a function of product complexity.
- Cost not dependant on batch size: Batch size has no effect on manufacturing cost, thus RM is economic for batch-sizes down to one.

Since the cost of a part is not a function of its complexity and that RM can introduce new levels of complexity into a part, a design methodology for RM should look at new ways to structure the design process in order to improve a part through adding complexity. Current methodologies do not look at the ameliorations that can be brought at the assembly-level of a design and usually focus on a single application of RM.

The proposed methodology's goal is to use the benefits of RM at the assembly-level by consolidating parts and by optimizing towards two goals in parallel: first by optimizing each part for failure prevention and second towards user-defined goals. Solutions for both of these optimizations are found using numerical optimization methods and concept generation methods such as the ones described in section 3.3.4 and 3.3.5. Both optimization steps are done independently of each another and implemented into the same parts by taking advantage of the shape and material complexity advantages of RM.

The steps of the methodology are presented in Figure 3.1 and can be defined as following:

Problem definition: In the problem definition the designer has to establish what he wants to manufacture and why. This will lay the foundations needed to apply the proposed methodology.

Part consolidation: Part consolidation consists of establishing a part-level representation of the assembly and grouping together parts that can be consolidated. To determine if parts can be consolidated a set of questions based on the criteria for Candidates for Elimination of Boothroyd-Dewhurst (Boothroyd, et al., 2002) is used.

Part optimization with regards to failure prevention: Starting from the part-level representation of the assembly a functional decomposition of the assembly is done. The Risk in Early Design method is then used to determine what the failure modes are and concept generation methods and numerical optimization methods such as the ones detailed in section 3.3.4 and 3.3.5 is used to find potential solutions.

Part optimization with regards to user-defined goals: The concept generation methods and numerical optimization methods such as the ones detailed in section 3.3.4 and 3.3.5 are used with the aim being the optimization of parts towards the user-defined goals.

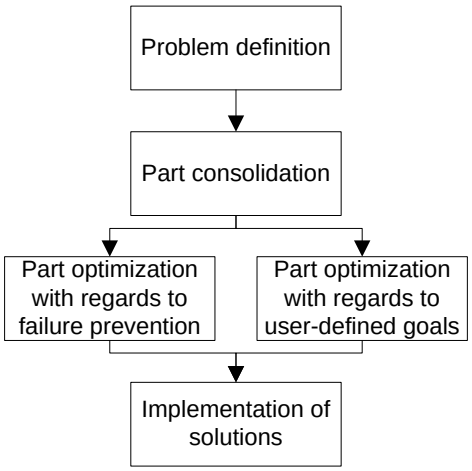


Figure 3.1: Design methodology

3.4.1 Problem definition

Before beginning the optimization process the first step is to define the context of the design and to understand the problem at hand. In addition it is important to properly define the following elements:

- Design goals: These are user-defined goals are the characteristics of the assembly that the methodology aims at optimizing. An example is the weight of the assembly.
- Draft of the assembly: The draft should contain all necessary parts and connectors in order to have a working design, but it does not need to contain any further information.

Once these two elements have been properly detailed the designer can start consolidating the assembly.

3.4.2 Consolidation

The draft of the assembly represents the assembly as it was imagined by the designer, however if the designer thinks in terms of traditional manufacturing he will segment the part in order to limit complexity and divide the parts that need to be made of different materials. RM does not need to do those segmentations and can even manufacture parts with relative movement in certain cases. In this section a consolidation method for RM is presented that adds geometrical and material complexity into the assembly to bring the design to its minimum amount of parts.

The only limitation to RM in terms of consolidation is building certain parts with relative movement. Given the right conditions RM is able to build these parts. To the author's best knowledge there are no established standards to determine when building parts with relative movement is possible as it depends largely on the capacity and accuracy of the machine used. However, basic guidelines will be given in the methodology to determine when parts with relative movement can be consolidated.

The Force Flow Diagram method (Otto & Wood, 2001) provides a structure to determine which components can be consolidated in the design, however the method is limited to combining non-moving parts. The Candidates For Elimination (CFE) method (Boothroyd, et al., 2002) helps determine which parts can be consolidated based on a simple set of questions, though all but one can be removed due to the new possibilities of RM. However the CFE method lacks a comprehensive structure.

The proposed consolidation method combines the Force Flow Diagram with the relevant criterion from CFE and a guideline to determine when parts with relative movement can be consolidated. Furthermore this representation will be built upon through the functional decomposition of the assembly in the following part of the methodology.

Step 1: Identify the primary force flows transmitted through the product.

Step 2: Map the force flow from the external source through each component of the product until the flows exit to the exterior. Special care should be exercised to identify when force flows split (become parallel) through components.

Step 3: Document the result in a Force Flow Diagram, where the nodes are components and the connections are forces flows.

Step 4: Analyze the flows of the assembly between parts, if no relative motion happens between parts group the parts together and these groups are now defined as a part.

Step 5: For every part ask the following question: 'Does the part need to move relatively to all connecting parts for the concept to accomplish its purpose?' If the answer is no then these parts can be grouped together.

Step 6: Generate alternative concepts for the parts that answered ‘no’ to the question in the previous step in order to find a concept where the part has no relative movement to any of its connecting parts or is deemed more satisfactory by the designer.

Step 7: For each relative movements left in the assembly, analyze whether the accuracy needed for the fit and geometry of the parts to function properly is less than the accuracy of fabrication of the machine used. If so these parts can be fabricated as one part with relative movement.

3.4.3 Part optimization with regards to failure prevention

In addition to optimizing towards a specific goal, the proposed methodology aims at also optimizing for reliability and the results of both these optimizations can be implemented onto the same part through the multi-material and complex geometrical possibilities of RM.

To conduct this part of the methodology a functional decomposition of the assembly is done part by part, which have been identified in the consolidation section, in order to obtain an overview of all the functions and energy flows of the assembly. This will allow us to apply the Function Failure Design Method to each of these functions and systematically analyze them to find the failure modes. Afterwards, solutions will be found using numerical optimization methods and concept generation methods such as the ones described in section 3.3.4 and 3.3.5 and implemented after both optimizations.

3.4.3.1 Functional decomposition

Each of the assembly’s components has to be decomposed into a series of individual functions that accomplish its overall function. Each function is represented by a block with input and output flows of energy, material or signal as represented in Figure 3.2.

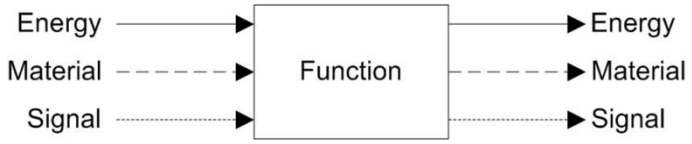


Figure 3.2: Function block example

A simplified method to create the function structure of a component is described in (Dieter & Schmidt, 2009) and summarized as following:

Step 1: Identify the energy, material and signal flows that are input and output of the component using the standard flow classes defined in Table 3.1.

Step 2: Using everyday language, write a description of the individual functions that are required to accomplish the overall function of the component.

Step 3: For each of the individual functions identify a standard function from Table 3.2 that fulfill the description written in the previous step.

Step 4: Arrange the function blocks such as to depict the working structure based upon the precedence of functions.

Step 5: Add the energy, material and signal flows between the function blocks. Preserve the input and output flows from step 1. Not all flows will travel through each function block.

Step 6: Examine each block in the function structure to determine if additional energy, material, or signal flows are necessary to fully describe the function.

Step 7: Review each function block again to see if additional refinement is necessary.

Once this is done for every component, the individual function structures are assembled into a single structure of the assembly, input and output flows between parts connected and to the environment. Do a final review to verify that the decomposition is complete. This decomposition will serve as the basis of part optimization with regards to failure prevention.

3.4.3.2 Optimization of functions for failure prevention

The Risk in Early Design (RED) method (Lough, et al., 2009) is a Design for Quality method that is adapted from the Function-Failure Design Method (FFDM) (Stone, et al., 2005) by normalizing failure modes with regards to the consequences or likelihood of each failure mode. The likelihood or consequence rating is graded from 1 to 5. FFDM and RED remediate one of the major flaws of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), being that it requires designers to have a vast knowledge of all potential failures or disturbing factors for a given component, by adding a knowledge base that links basic functions to failure modes. However, this method's purpose is mostly to determine failure modes and their likelihood, on the other hand the solution-finding approach is limited.

For this reason, the proposed methodology combines the Risk in Early Design method to find the failure modes that are most likely to happen with concept generation methods and numerical optimization methods such as the ones detailed in section 2.4 and 2.5 in order to optimize the functions against failure. The steps of the method for the optimization of parts for failure prevention are the following:

Step 1: Ensure that function and flow pairings match the terms from Table I and Table II.

Step 2: From the function-flow pairings query the function-failure modes from the knowledge base in Table III to create a list or table containing only the function-failure modes present in the assembly.

Step 3: Using the list of function-failures modes present in the assembly as done in the previous step, apply the following formula to determine the likelihood rating:

$$l_{ij} = \text{int}\left\{5\frac{ef_{prod_{i,j}}}{\max_{1\le j\le m}^{1\le i\le n}(ef_{prod_{i,j}})}\right\}$$

l_{ij} = Likelihood rating from 1 to 5 for function “i” and failure mode “j”.

$ef_{prod_{i,j}}$ = Amount of failure listed in the database for function “i” and failure mode “j”.

$\max_{1\le j\le m}^{1\le i\le n}(ef_{prod_{i,j}})$ = Maximum amount of failures listed in the database for the failure modes present in the assembly.

Step 4: Improbable failure modes should be discarded, for example those that aren’t possible given the conditions of the problem or those with a low likelihood rating.

Step 5: Refer to concept generation methods and numerical optimization methods such as the ones detailed in section 3.3.4 and 3.3.5 to find solutions for the prevention of the failures of the failure modes left after step 4.

Step 6: Select component physical solutions or concept variant comprising structure and material found at the last step that will prevent the failure modes found in Step 2.

Following these steps for every function-flow pair will yield parts that are optimized for failure prevention with regards to their individual functionalities in the assembly. These solutions will

be implemented locally in the parts of the assembly alongside the solutions found in the part optimization with regards to user-defined goals.

3.4.4 Part optimization with regard to the user-defined goals

In the last section concepts have been generated to prevent failure of each function of each part, next is to generate concepts to optimize each part of the assembly towards the design goals as defined in the problem definition section. In order to do so concepts are generated using numerical optimization methods and concept generation methods such as the ones described in section 3.3.4 and 3.3.5 by optimizing each part with regards to the user-defined goals.

3.4.5 Implementation of solutions

Once the parts have been consolidated and solutions found to optimize the assembly against failures and with regards to the user-defined goals. Next is to implement all of those solutions into the parts, no specific guidelines are provided as the solutions found can vary greatly.

3.5 Example

3.5.1 Problem definition

The design methodology is illustrated by applying it to the casing of a planetary gear system. The results of the design concept and the draft of the assembly are presented in Figure 3.3 and is the starting point for the developed methodology.

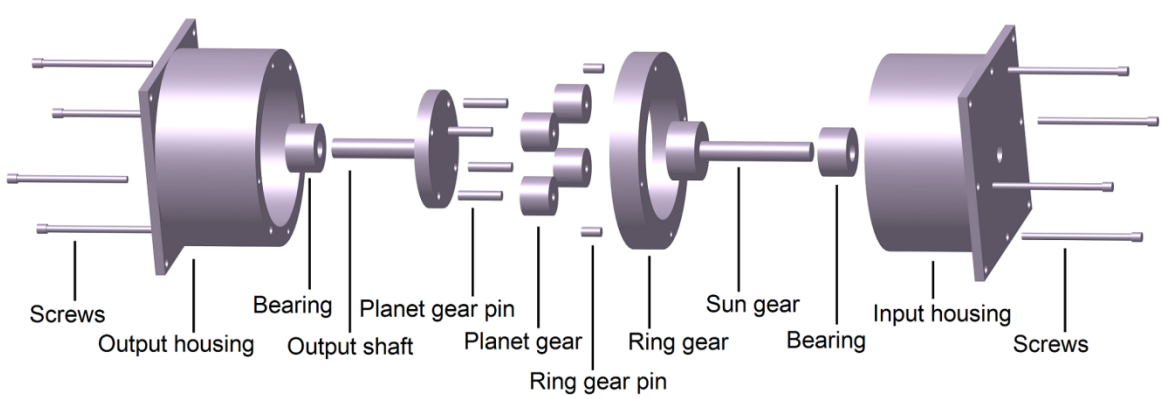


Figure 3.3: Planetary gear system assembly

The functioning of the mechanism is displayed in Figure 3.4 and the gear ratio is function of the radius of the sun gear and the ring gear.

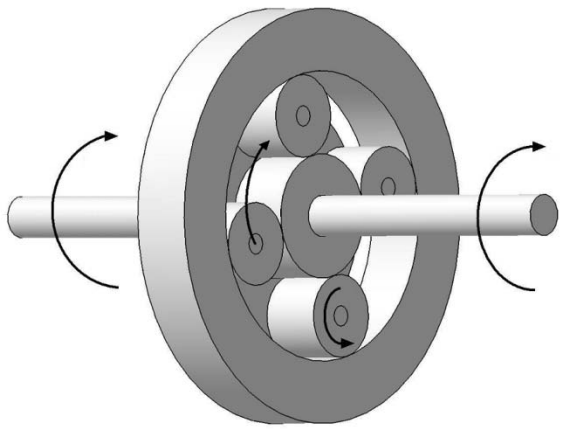


Figure 3.4: Planetary gear system mechanism

The design is intended to have an engine outputting 14 N·m of torque to which the input housing part of the casing is attached and to have a motor weighting 12 kilograms held in cantilever on the other side. As illustrated in Figure 3.3 both the motor and engine are attached to the input and output housing using screws.

The primary goal of applying the design methodology is to reduce the overall weight of the casing while complying with mechanical loads.

3.5.2 Consolidation

Following steps 1 through 3 of section 3.4.2, the Force-Flows Diagram of the assembly is established and represented in Figure 3.5 which displays the parts as nodes and force flows as arrows between these nodes.

In the next steps the groups of parts that are going to be consolidated are defined. First, parts which do not have relative movements are grouped together, as per step 4, and represented in Figure 3.5 as the groups in dark grey.

Applying the candidates for elimination criteria to each component of the assembly, as per step 5, it is seen that the bearings do not need to move for the design to be functional. As dictated by step 6, a brief concept generation to fulfill the role of the bearing yields the proposition of a

bushing which can be integrated into the casing and grouped together with the elements of the casing. This results in the change to Figure 3.5 shown in light grey.

Following step 7, it is determined that the accuracy of the fits between the remaining parts is too tight to allow fabrication as a single part. No changes to the design have been made following this step.

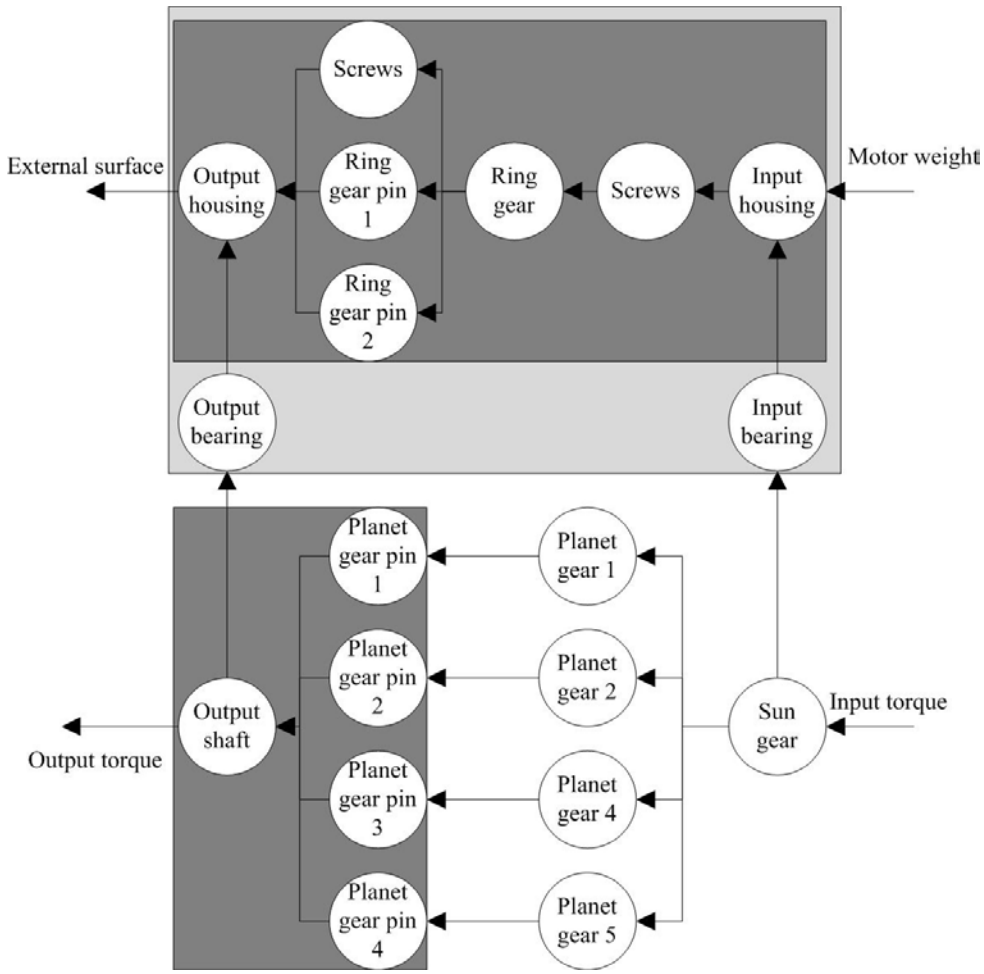


Figure 3.5: Consolidation of the planetary gear system

3.5.3 Part optimization with regards to failure prevention

3.5.3.1 Functional decomposition

In this step a functional decomposition of the entire assembly is done which will enable the application of the RED method in the following section to determine which functions should be optimized against failure prevention.

The input and output energy flows of the system are the rotational energy going in through the sun gear and out through the output shaft as well as mechanical energy that enters through the screw hole of the input housing and exits through the screw holes of the output housing.

A description of the individual functions is written down using everyday language and then translated into standard function terminology as following:

- The screw holes on both sides of the casing serve to position the screw holes.
    - Position Solid
- The bushings guide the rotation the shafts.
    - Guide Rotational Energy
- The teeth constrain the movement of the planetary gears
    - Guide Solid

The method is similarly applied to the other parts to obtain all the standard functions of the assembly. Following this, the function blocks and the energy flows between the functions blocks are laid out to obtain the result displayed in Figure 3.6.

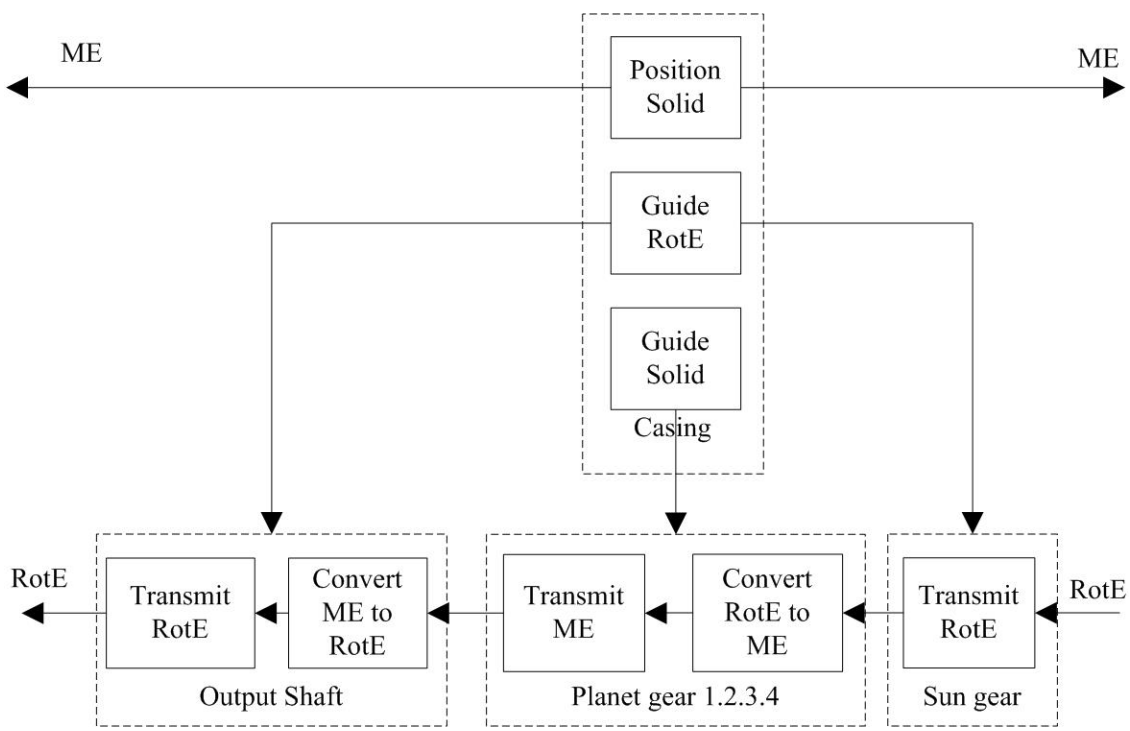


Figure 3.6: Functional decomposition of the planetary gear system

3.5.3.2 Optimization of functions for failure prevention

In this step the RED method is used to determine which failures are most prone to happen in the design and through which function they will happen, afterwards concept generation methods and numerical optimization methods are applied in order to prevent these failure modes from happening.

Following the steps established in section 3.4.3.2, a list containing only the function-failure modes present in the assembly is created by short-listing the entries related to the functions in the assembly from Table 3.4.

Afterwards, formula 1 is applied to the list of function-failure modes present in the assembly in order to obtain the likelihood rating of failure for the failure modes of each function of the assembly. The resulting table is shown in Table 3.3.

Table 3.3: Likelihood ratings for the planetary gear system

Function/Failure	Abrasive Wear	Adhesive Wear	Buckling	Corrosion Fatigue	Deformation Wear	Direct Chemical Attack	Force Induced Deformation	Fretting Fatigue	Galling and Seizure	High Cycle Fatigue	Low Cycle Fatigue	Stress Corrosion	Thermal Fatigue	Thermal Shock	Yielding
Position Solid	1	1	1	1	1	2	1	1	1	5	0	1	1	2	3
Guide RotE	0	0	0	0	1	0	0	1	1	2	0	0	0	1	0
Guide Solid	1	0	1	1	0	0	0	1	0	2	0	1	1	1	1
Transmit RotE	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0
Convert RotE to ME	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Transmit ME	0	1	0	1	1	1	1	1	0	3	1	0	0	1	3

Likelihood ratings of 0 or 1 are discarded as they are less likely to happen. Looking only at the possible failure modes with likelihood ratings of 2 or more for the casing yields the following potential failure modes:

Casing:

- Position solid
    - High Cycle Fatigue (l = 5)

  - Yielding (l = 3)
  - Due to the environment conditions thermal shock and direct chemical attack won't be considered as a potential failure mode.

- Guide rotational energy
  - High cycle fatigue (l = 2)
- Guide solid
  - High cycle fatigue (l = 2)

Following this, numerical optimization methods and concept generation methods are to be used to find solutions for the prevention of the failures of the failure modes found previously.

Solutions are found using the mechanical design methodology based on design applications solutions for the function "guide rotational energy" of the casing. Using the guidelines found in (Collins, et al., 2010) the size, fit and materials for the features of the casing that guide the shafts are determined to be:

- Soft material for the feature (the bushings) and hard material for the guided object (the sun gear and the output shaft). Bronze and steel are chosen.
- Standard clearance and fit sizes are to be used.

The 'guide solid' geometry is the gear teeth that guide the planet gears. As no relevant DfX guidelines exist and no biomimetism products fit the function, mechanical element design is used:

- Tungsten Carbide is used for the gear teeth as it has high hardness to resist fatigue and high heat resistance.
- Standard gear teeth geometry.

The "position solid" function failure relates to the entire part and is going to be optimized against its potential failure modes as part of the optimization with regards to designed-defined goals.

3.5.4 Part optimization with regard to the user-defined goals

According to the design goals that have been determined in the problem definition section, the goal is to minimize the overall weight of the assembly. Following this, looking at the available options it is determined that the best type of structures for this type of goal is obtained either through mesostructures or topological optimization. In this example, the material of the structure will be determined using the material selection methodology detailed in (Collins, et al., 2010) and a topology optimization method will be used in order to determine the final geometry of the part. Since the material is needed to realize the topology optimization it will be determined first.

The material-specific application requirements are determined to be the following:

- Strength/weight ratio
- Stiffness
- Wear resistance
- Desire to use specific manufacturing process (must be a material that RM can manufacture)

Using the methodology provided in (Collins, et al., 2010), aluminum is chosen for the body of the structure.

Finite element analysis (FEA) software, namely Altair Hypermesh, is used to realize the topology optimization. The first step is to define the support and loading conditions as well as the design space, which was done based upon the problem specifications.

- Design variables: In this example the only variable design variable is the volume of the design space.
- Objective: As previously defined, it is desired to minimize the volume of the design space.
- Design space: The design space is shown in Figure 3.7 as the part in grey, though the gear teeth have been simplified.
- Non-design space: The non-design space is shown in Figure 3.7 as the parts in light grey.

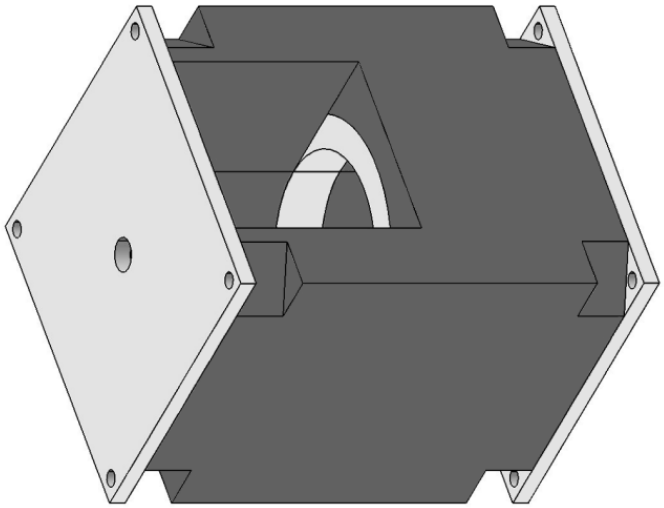


Figure 3.7: Casing optimization boundaries

- Loading conditions: A mass of 3 kg is applied on each screw hole (totaling 12 kg, as in the problem definition) and a torque of 14 N·m on the gear teeth.
- Design constraints: Zero displacement constraints were applied to the input housing screw holes. In addition the design has to be able to withstand the loads acting upon it.

A mesh is applied to the design space and the optimization is launched in Altair Hypermesh with the previously defined variables. The result is displayed in Figure 3.8.

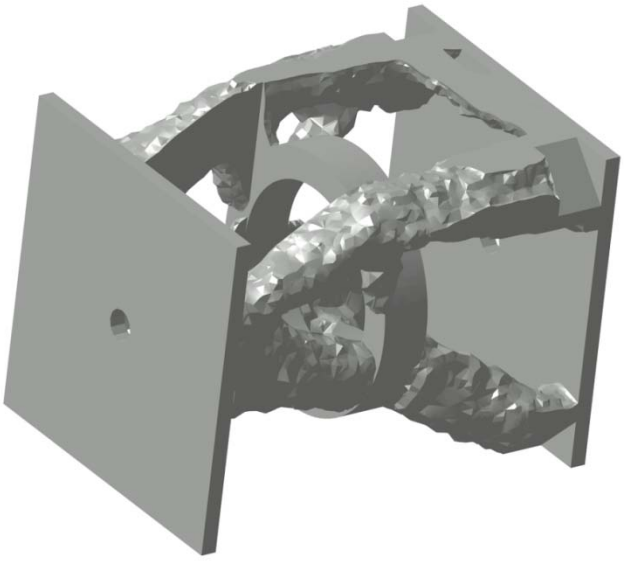


Figure 3.8: Casing optimized using topology optimization in Altair Hypermesh

The solution to the topology optimization gives a good idea of a lightweight geometry that meets the loading conditions.

3.5.5 Implementation of solutions

The final step is to implement the solutions found in section 3.5.2, 3.5.3 and 3.5.4 into the design. The resulting product is only manufacturable through the possibilities that RM offers.

3.6 Conclusions

The proposed methodology defines a framework for the optimization of a product through RM's capabilities. RM has practically no limitations and is able to fabricate geometrically complex parts made from multiple materials. In addition, the volume of the material is the most important cost factor while complexity isn't, thus complexity can be added into the product at no extra cost. Because of this the proposed methodology has to stray from design methodologies for traditional manufacturing which are based around avoiding complexity and working around the limitations of the process.

The structure of the methodology proposed in this paper guides the designer into consolidating the assembly, optimizing the functions of the assembly to prevent failures and towards user-defined goals. By having a method that helps the designer integrate solutions to the product related to these three aspects helps the designer integrate a broad range of ameliorations while taking advantage of the possibilities of RM. Current methodologies focus on only one of these three aspects and are integrated into the solution finding aspect of the proposed methodology as part of a more global method.

One of the important challenges of a Design for RM methodology is to keep up with the ever increasing possibilities of RM. The next step for DFRM methodologies will always be to adapt quickly to these changes and allow the integration of these new possibilities into the design process. Furthermore, since the proposed methodology uses existing concept generation methodologies that will evolve, the user needs to stay up-to-date on expanded databases and algorithms. Finally, numerical optimization methods need to adapt to the reality of DFRM and allow easier optimization of multiobjective and multimaterial problems.

3.7 Annex

Table 3.4: Function-failure knowledge base from NTSB rotorcraft accident study

Function/Failure	Abrasive Wear	Adhesive Wear	Buckling	Corrosion Fatigue	Deformation Wear	Direct Chemical Attack	Force Induced Deformation	Fretting Fatigue	Galling and Seizure	High Cycle Fatigue	Low Cycle Fatigue	Stress Corrosion	Thermal Fatigue	Thermal Shock	Yielding
Change Gas	0	0	1	1	0	0	0	1	0	2	0	0	1	1	1
Change Liquid	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Change PnE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	1	1
Change RotE	0	0	0	0	1	0	0	1	2	3	0	0	0	2	0
Convert HE to RotE	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Convert PnE to ME	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Convert RotE to ME	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Convert RotE to PnE	0	0	1	1	0	0	0	1	0	2	0	0	1	1	1
Couple Solid	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Distribute Liquid	0	0	0	0	1	0	0	1	2	3	0	0	0	2	0
Distribute ME	0	2	1	1	1	3	0	2	0	7	1	0	0	1	3
Distribute ThE	2	0	0	0	1	1	0	0	0	4	0	1	2	1	2
Export Gas	2	0	1	2	0	0	0	2	0	4	1	1	2	1	2
Export HyE	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Export Liquid	0	1	1	2	2	3	1	2	2	6	0	0	0	3	3
Export ME	0	0	0	0	0	2	1	0	0	2	0	0	0	0	2
Export PnE	0	0	1	2	0	0	0	2	0	4	1	0	1	1	2
Export RotE	1	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	1	1	1	0
Export Solid	2	2	1	2	2	4	1	3	2	12	1	1	2	4	8
Export ThE	1	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	1	1	0	1
Guide Gas	1	0	1	2	0	0	0	2	0	4	1	1	2	1	2
Guide HyE	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Guide Liquid	0	1	1	2	1	3	1	1	0	3	0	0	0	1	3
Guide PnE	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Guide RotE	0	0	0	0	1	0	0	1	2	4	0	0	0	2	0
Guide Solid	2	0	1	2	0	0	0	1	0	3	0	1	2	2	1
Import Gas	2	0	1	2	0	0	0	2	0	4	1	1	2	1	2
Import HE	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Import HyE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Import Liquid	0	1	1	2	2	3	1	2	2	6	0	0	0	3	3
Import ME	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Import PnE	0	0	0	1	0	0	0	1	0	4	1	0	1	1	2
Import RotE	1	0	1	1	0	0	0	1	2	5	0	1	2	2	1
Import Solid	2	2	1	2	2	4	1	3	2	12	1	1	2	4	8
Import ThE	1	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	1	1	0	1
Inhibit Liquid	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Join Solid	0	2	1	1	2	3	1	3	2	9	1	0	0	3	7
Link Solid	2	1	0	1	1	1	0	1	2	6	0	1	2	3	1
Position Solid	1	2	1	2	2	3	1	2	2	9	0	1	2	4	6
Regulate HyE	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

Regulate Liquid	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Regulate ME	0	1	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	1	1
Secure Solid	2	2	1	2	2	4	1	3	2	12	1	1	2	4	7
Stabilize Solid	0	1	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Stop Gas	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Stop HyE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Stop Liquid	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Stop PnE	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Stop Solid	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	1	0
Store ME	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
Supply ME	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Transmit ME	0	1	0	1	1	2	1	1	0	5	1	0	0	1	6
Transmit PnE	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	1
Transmit RotE	1	1	0	0	1	1	0	1	0	2	0	1	1	1	0
Transmit ThE	2	0	0	0	2	1	0	1	2	7	0	1	2	3	2

3.8 References

Alexander, P., Allen, S., & Dutta, D. (1998). Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. *Computer-Aided Design, 30*(5), 343-356.

Ansorge, F., Badstübner, K., & Reichl, H. (2007). *Novel rapid prototyping processes: Building movable parts.* Paper presented at the 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal.

Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2003). *Topology, optimization: theory, methods and applications*. Berlin, Germany: Springer.

Boothroyd, G., Knight, W., & Dewhurst, P. (2002). *Product design for manufacture and assembly* (2nd ed.). New York: Marcel Dekker.

Chu, C., Graf, G., & Rosen, D. W. (2008). Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. *Computer-Aided Design and Applications, 5*(5), 686-696.

Collins, J. A., Busby, H., & Staab, G. (2010). *Mechanical Design of Machine Elements and Machines: A Failure Prevention Perspective* (Second ed.). Danvers, MA, USA: Wiley.

Dieter, G. E., & Schmidt, L. C. (2009). *Engineering Design* (Fourth ed.). New York: McGraw-Hill.

Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria Optimization* (Second ed.). Berlin, Germany: Springer.

Gibson, L. J. (2005). Biomechanics of cellular solids. *Journal of Biomechanics, 38*, 377-399.

Golden, I. J. (2005). *Function Based Archival and Retrieval Developing a Repository of Biologically Inspired Product Concepts.* University of Maryland, College Park, College Park, USA.

Hirtz, J., Stone, R. B., McAdams, D. A., Szykman, S., & Wood, K. L. (2002). A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts. *Research in Engineering Design, 13*, 65-82.

Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoët, J. Y. (2008). *Manufacturing criteria in hybrid modular tools: How to combine additive and subtractive processes.* Paper presented at the 3rd

International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal.

Kumar, S., & Kruth, J.-P. (2010). Composites by Rapid Prototyping Technology. *Materials and Design, 31*, 850-856.

Lough, K. G., Stone, R. B., & Tumer, I. Y. (2009). The Risk in Early Design Method. *Journal of Engineering Design, 20*(2), 155-173.

MIL-P-1629A. (1980). Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis. *Department of Defense*.

Munguia, J., & Riba, C. (2008). *A concurrent Rapid Manufacturing advice system.* Paper presented at the 4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Washington, DC.

Ohashi, T., Iwata, M., Arimoto, S., & Mayakawa, S. (2002). Extended assemblability evaluation method (AEM). *JSME International Journal: Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 45*(2), 567-574.

Otto, K., & Wood, K. (2001). *Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development.* Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall.

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach* (Third ed.). London: Springer.

Redford, A. H., & Chal, J. (1994). *Design for assembly: principles and practice*. Berkshire, England: McGraw-Hill.

Rivette, M., Hascoët, J. Y., & Mognol, P. (2007). A graph-based methodology for hybrid rapid design. *Journal of Engineering Manufacture, 221*(4), 685-697.

Robert, R. A., Stone, R. B., & Tumer, I. Y. (2002). *Deriving Function-Failure Similarity Information for Failure-Free Rotorcraft Component Design.* Paper presented at the ASME Design Engineering Technical Conferences, Design for Manufacturing Conference, DETC2002/DFM-34166, Montreal, Canada.

Rosen, D. W. (2007). Computer-aided design for additive manufacturing of cellular structures. *Computer-Aided Design and Applications, 4*(1-6), 585-594.

Rosenberg, B. (2008). Rapid prototyping to rapid manufacturing. *Aerospace Engineering & Manufacturing, 28*(4), 37-39.

Stone, R. B., Tumer, I. Y., & Wie, M. V. (2005). The Function-Failure Design Method. *Journal of Mechanical Design, 127*, 397-407.

Stone, R. B., & Wood, K. L. (2000). Development of a Functional Basis for Design. *Journal of Mechanical Design, 122*, 359-370.

Terninko, J., Zusman, A., & Zlotin, B. (1998). *Systematic innovation: an introduction to TRIZ (theory of inventive problem solving)*. Boca Raton, FL: St. Lucie Press.

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2004). *Product Design and Development* (Third ed.). New York: McGraw-Hill/Irwnin.

Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A.-K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of The Royal Society Interface, 3*(9), 471-482.

Wang, H. V. (2005). *A Unit Cell Approach for Lightweight Structure and Compliant Mechanism.* Georgia Institute Of Technology, Atlanta, USA.

Wohlers, T. (2007). *Wohlers report: rapid prototyping, tooling & manufacturing state of the industry: annual worldwide progress report*. Fort Collins, CO: Wohlers Associates.

Wohlers, T. (2009). *Wohlers report: rapid prototyping, tooling & manufacturing state of the industry: annual worldwide progress report*. Fort Collins, CO: Wohlers Associates.

CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE

La fabrication rapide se présente comme étant un nouveau procédé de fabrication permettant de fabriquer une pièce en déposant de la matière couche par couche, donc en procédant par ajout de matière. Cette manière de procéder est à l'opposé des procédés d'usinage traditionnels qui procèdent par enlèvement de matière. En procédant par ajout de matière le procédé procure de nouvelles possibilités aux concepteurs qui font en sorte que ces procédés se distinguent fortement des procédés traditionnels. Les avantages que la fabrication rapide a par rapport aux procédés de fabrication traditionnels sont :

- La possibilité de fabriquer des pièces multimatériaux
- Pas de restriction géométrique
- L'ajout de complexité ne décuple pas le coût de fabrication
- Possibilité de personnalisation de masse

La méthodologie de conception présentée au chapitre 3 a pour but d'aider le concepteur à incorporer les avantages de la fabrication rapide dans un produit au moment de la phase de conception.

Les deux premiers avantages ouvrent de nouvelles portes au concepteur, ils lui permettent de fabriquer des pièces d'un niveau de complexité qui n'était pas possible auparavant. Le troisième avantage est celui qui influence le plus grandement le procédé de conception puisqu'il est en contradiction avec la base des méthodologies de conception de produit actuelles, c'est-à-dire celles développées pour les procédés de fabrication traditionnelle. Ces méthodologies ont pour but de minimiser la complexité du fait qu'elle est le facteur qui influence généralement le plus le coût d'une pièce. Puisque la complexité ne décuple pas le coût de fabrication, les méthodes développées pour minimiser la complexité ne font que limiter le potentiel de la fabrication rapide. Au contraire, il serait plus adéquat de trouver des méthodes pour adéquatement ajouter de la complexité au produit. De cette contradiction surgit le défi suivant : comment amener le concepteur à changer de paradigme de conception et penser en termes d'améliorations à apporter au produit.

Afin de permettre au concepteur de changer de paradigme de conception, la méthodologie de conception doit le guider à optimiser le produit en lui permettant de systématiquement apporter des améliorations à divers aspects du produit. Pour ce faire, la méthodologie doit, dans un premier temps, le guider à bien définir tous les éléments qui peuvent être optimisés et, en un deuxième temps, l'amener à une solution optimale pour chaque élément à optimiser. Toutefois, lors de l'optimisation de chaque élément, la méthodologie doit prendre en compte les nouvelles possibilités de fabrication multimatériaux et les possibilités de fabrication de géométrie plus complexe. En résumé, la méthodologie développée doit remplir les objectifs suivants :

- Penser en termes de possibilités et non de restrictions
- Utilisation adéquate de géométries complexes
- Utilisation adéquate des possibilités de multimatériaux

Afin d'aider le concepteur à penser en termes de possibilités, la méthodologie proposée dans ce mémoire guide le concepteur à concevoir sa pièce en trouvant des solutions qui servent à optimiser cette pièce parallèlement contre les défaillances et vers un ou plusieurs buts définis par le concepteur. Le fait de concevoir en pensant en termes de solutions optimales équivaut à penser en termes de possibilités et non en se basant sur les restrictions du processus.

En optimisant simultanément les pièces de l'assemblage vers deux buts distincts, le concepteur est mené à intégrer plusieurs solutions géométriques et plusieurs matériaux dans une même pièce, et ce de manière à améliorer le produit. Le concepteur est donc guidé à utiliser adéquatement les possibilités de fabrication de géométries complexes et les possibilités de fabrication de pièces multimatériaux.

Cependant, la méthodologie proposée a toute de même certaines limitations reliées aux capacités des méthodes d'optimisation numérique, des logiciels et l'exhaustivité des bases de données auxquels le concepteur fait appel. Ces limitations sont détaillées ci-dessous.

Premièrement, les méthodes d'optimisations numériques de la géométrie permettent d'optimiser la géométrie d'une pièce par rapport à certains critères et chacune possède ses propres avantages et désavantages. La méthodologie proposée suggère de considérer l'optimisation topologique et l'optimisation de mésostructures afin de trouver des solutions optimales, toutefois ces méthodes

ont des limitations au niveau de leurs résultats qui imposent donc des limitations à la méthodologie.

L'optimisation topologique permet d'obtenir une structure pleine et uniforme qui remplit certains critères d'optimalité. Toutefois, la solution est toujours pleine et uniforme, c'est-à-dire que la structure obtenue ne peut pas contenir de sous-structures, telle une mésostructure, et ne sera composée que d'un seul matériau.

L'optimisation de mésostructures permet d'optimiser la forme des cellules et leurs dispositions à travers la géométrie. Toutefois, l'optimisation de méso-structure ne permet pas d'optimiser l'aspect multimatériaux ni d'intégrer plusieurs types de cellules. Elle ne peut pas non plus mener à une structure pleine.

Afin d'obtenir une géométrie optimale, le concepteur doit conduire plusieurs optimisations numériques de la géométrie et ensuite comparer les résultats pour choisir quel type de structure utiliser. De plus, les méthodes numériques ne lui permettent pas d'optimiser l'aspect multimatériaux.

Deuxièmement, les logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), les logiciels d'Ingénierie Assistée par Ordinateur (IAO) et les formats de transferts de données tels qu'implémentés dans ces logiciels ont des limitations au niveau de leur intégration des possibilités de multimatériaux de la fabrication rapide. Lorsqu'une pièce contient plusieurs matériaux, il y a plusieurs nouvelles variables décrivant la disposition de ces matériaux que le logiciel doit être en mesure de modéliser et optimiser.

Les logiciels de CAO sont limités au niveau de la modélisation multimatériaux d'une pièce. Certains sont en mesure de représenter une pièce multimatériaux ayant une délimitation hétérogène entre les matériaux (à gauche dans la figure 4.3), toutefois ils ne peuvent pas modéliser une pièce dans laquelle il y a un gradient de concentration entre les deux matériaux (à droite dans la figure 4.3).

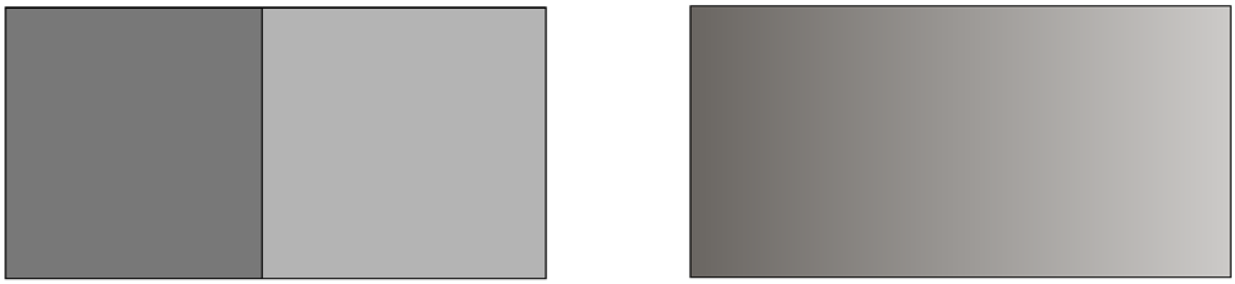


Figure 4.1: Délimitation de matériaux hétérogène (à gauche) et en gradient (à droite)

De plus, les logiciels d'IAO devraient permettre l'optimisation d'une pièce multimatériaux, et ce selon plusieurs variables. Dans une pièce à frontière hétérogène l'algorithme doit optimiser simultanément la position et la forme de la frontière entre les matériaux, toutefois même si les logiciels d'IAO sont en mesure de modéliser une pièce multimatériaux à frontière homogène ils ne sont pas capables d'optimiser ni le placement ni la forme de cette frontière. La figure 4.4 montre comment la frontière entre deux matériaux pourrait être déplacée et déformée.

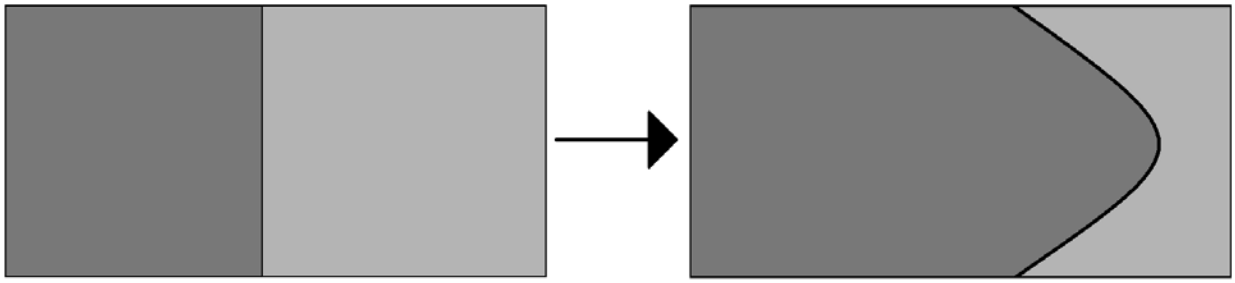


Figure 4.2: Exemple d'optimisation d'une frontière hétérogène

Le nombre de variables pour décrire une pièce multimatériaux à frontière en gradient est plus élevé que pour une frontière hétérogène. Il faut donc que le logiciel soit en mesure de modéliser précisément ce gradient pour ensuite l'optimiser. Les logiciels actuels ne sont pas en mesures ni de modéliser ni d'optimiser un tel type de pièce, ce qui limite le concepteur. Un exemple d'optimisation de pièce multimatériaux à frontière en gradient est présenté à la figure 4.5. Dans cet exemple, une pièce dont le gradient se fait à travers toute la pièce est modifiée afin d'avoir un gradient plus court et plus près du côté gauche de la pièce.

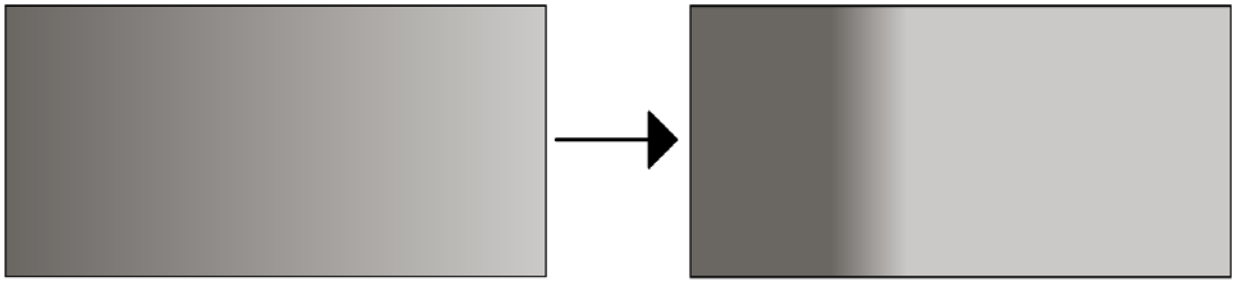


Figure 4.3: Exemple d'optimisation d'une frontière en gradient

Une autre limitation des logiciels de CAO et d'IAO est le format de transfert de données utilisé pour importer et exporter l'information sur le modèle. Le format de Standard for the Exchange of Product model data (STEP) est le format de transfert de données le plus complet. Il a été développé afin de permettre de transférer toute l'information relative au produit à tous les niveaux de celui-ci. Ce format de transfert de données est censé pouvoir contenir toute l'information géométrique et les données relatives aux matériaux du produit, toutefois un travail de recherche réalisé par Abderrahmane Jaidi dans le cadre du programme d'Unité de Participation et d'Initiation à la Recherche (UPIR) les logiciels de CAO et d'IAO les plus courants (Catia, MSc Patran, Altair Hyperworks, Ansys Workbench) n'exportent que la géométrie et n'exportent pas les données sur les matériaux.

Troisièmement, la méthodologie proposée peut faire appel à certaines bases de données, notamment une base de données de produits inspirés de la nature et de défaillances de produits. L'exhaustivité de ces bases de données a une incidence directe sur les résultats trouvés par les concepteurs et ainsi un manque d'exhaustivité peut limiter les solutions trouvées par les concepteurs ou les induire en erreur. Par exemple, la base de données de solutions inspirées par la nature est utilisée pour trouver des solutions qui peuvent être implémentées dans le produit, mais cette base de données ne contient qu'une partie de ce type de solution. Elle omet des solutions telles que des structures en forme de nids d'abeilles qui peuvent être une solution intéressante pour la structure de divers produits, le concepteur ne sera donc pas systématiquement guidé à considérer cette solution.

Malgré ces limitations au niveau de son application, la méthodologie proposée n'est pas grandement influencées par ces éléments puisque ce sont des limitations externes à la méthodologie et que la méthode de consolidation ainsi que la structure proposée ne sont pas

directement affectés par ces limitations. La méthodologie proposée n’aura donc pas besoin d’être modifiée au fur et à mesure que ces limitations sont amenées à disparaitre.

En guidant le concepteur à consolider les pièces de l’assemblage et en optimisant simultanément chacune de ces pièces vers des buts distincts, la méthodologie aide le concepteur à penser en termes de possibilités et à prendre avantage des possibilités de fabrication de géométries complexes et de fabrication multimatériaux. La méthodologie a été testée sur un assemblage mécanique et de nombreuses améliorations ont été apportées au produit, et ce à plusieurs niveaux tant pour prévenir les défaillances de l’assemblage que pour optimiser cet assemblage vers un but défini par le concepteur.

CONCLUSION

Ce travail de recherche visait à développer une méthodologie de conception et d'optimisation de mécanismes fabriqués par fabrication rapide. L'objectif d'avoir une telle méthodologie est d'aider le concepteur à rentrer dans un nouveau paradigme de conception où il pense en termes d'améliorations à apporter au produit et non en termes de limitations auxquelles le produit est contraint par les procédés de fabrication. Ce nouveau paradigme de conception est nécessaire puisque la fabrication rapide présente peu de limitation, le processus de conception ne doit donc plus se concentrer sur concevoir autour de ces limitations. De plus, la méthodologie doit aider le concepteur à utiliser adéquatement les possibilités de fabrication de géométrie complexe et de fabrication multimatériaux qu'offre la fabrication additive.

Afin de développer une méthodologie de conception pour la fabrication rapide, ce travail de recherche a débuté par analyser les méthodologies actuelles de conception de mécanismes et de pièces, les méthodologies associées à la fabrication rapide, les représentations standards, les méthodes se basant sur celles-ci et les méthodes d'optimisation numérique de la géométrie. De ces méthodologies ont été soulevés divers éléments pouvant être applicables à une méthodologie de conception pour la fabrication rapide. En construisant sur ces éléments, une méthodologie a été développée en tentant de répondre aux objectifs de recherche établis précédemment :

- Penser en termes de possibilités et non de restrictions
- Utilisation adéquate de géométries complexes
- Utilisation adéquate des possibilités de multimatériaux

La méthodologie proposée guide le concepteur à concevoir en termes de solutions optimales et non en termes de limitation. Elle guide le concepteur à implémenter parallèlement des solutions pour prévenir les défaillances de l'assemblage et pour l'optimiser vers des buts définis par le concepteur. Puisque la méthodologie aide à implémenter des solutions optimales, elle guide le concepteur à penser en termes de possibilités et non de limitations. De plus, puisqu'elle guide le concepteur à implémenter plusieurs solutions dans les pièces de l'assemblage, donc parfois en implémentant plusieurs matériaux dans une même pièce, la méthode guide le concepteur à faire appel à des solutions multimatériaux. Finalement, l'utilisation d'optimisation numérique de la

géométrie permet de faire une utilisation adéquate des possibilités de fabrication de géométries complexes. La méthodologie développée répond donc aux objectifs de recherche.

Des problèmes ont été rencontrés au niveau de la prise en compte des aspects multimatériaux à tous les niveaux de la chaine numérique. En effet, les logiciels d'IAO, de CAO, les formats de transfert de données numériques ainsi que les méthodes d'optimisation numériques ne prennent pas en compte l'aspect multimatériaux. Cette limite est toutefois externe à la méthodologie développée.

La méthodologie a été appliquée à un système d'engrenage planétaire pour fin de validation. Le but primaire du processus de conception étant de réduire le poids de l'assemblage, une réduction du poids d'environ 50% a été obtenue. En implémentant des solutions dans l'assemblage, la méthodologie a conçu l'assemblage en y apportant des améliorations et non en pensant en termes de limitations. Les capacités de multimatériaux ont été utilisées à divers endroits de l'assemblage et une optimisation topologique a été effectuée faisant appel aux capacités de fabrication de géométries complexes du procédé de fabrication. L'exemple du système d'engrenage planétaire a validé la capacité de la méthodologie à concevoir un assemblage en prenant en compte les avantages et les particularités de la fabrication rapide.

La méthodologie proposée remplit bien les objectifs de recherche, mais elle pourrait tout de même être améliorée et inclure plus d'outils afin d'aider le concepteur à prendre certaines décisions plus facilement.

Premièrement, la méthodologie guide le concepteur à choisir plusieurs matériaux à implémenter sur une même pièce et ainsi faire appel aux capacités de fabrication multimatériaux. Toutefois, il y a des limites au niveau du choix des matériaux dû aux compatibilités entre les divers matériaux. Ces limitations au niveau de la compatibilité inter-matériaux dépendent de la machine de fabrication utilisée et des caractéristiques des matériaux. La méthodologie proposée pourrait être améliorée par l'addition d'une méthode permettant au concepteur de faire des choix optimaux pour les pièces multimatériaux en tenant compte des compatibilités entre les différents matériaux.

Deuxièmement, une méthode aidant à déterminer quand les pièces peuvent être fabriquées préassemblées serait utile afin d'aider le concepteur à minimiser le temps d'assemblage et à consolider au maximum l'assemblage. Afin de déterminer si les pièces peuvent être fabriquées pré-assemblées, plusieurs variables doivent être prises en comptes, notamment la précision de la

machine et l’espacement entre les pièces. Une méthode permettant de quantifier ces variables permettrait de guider le concepteur à systématiquement concevoir des assemblages pré-assemblés.

BIBLIOGRAPHIE

Alexander, P., Allen, S., & Dutta, D. (1998). Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. *Computer-Aided Design, 30*(5), 343-356.

Ansorge, F., Badstübner, K., & Reichl, H. (2007). *Novel rapid prototyping processes: Building movable parts.* Paper presented at the 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal.

Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2003). *Topology, optimization: theory, methods and applications*. Berlin, Germany: Springer.

Boothroyd, G., Knight, W., & Dewhurst, P. (2002). *Product design for manufacture and assembly* (2nd ed.). New York: Marcel Dekker.

Bruck, H. A., Gershon, A. L., Golden, I., Gupta, S. K., Jr, L. S. G., Magrab, E. B., et al. (2007). Training mechanical engineering students to utilize biological inspiration during product development *Bioinspiration & Biomimetics, 2*(4), 198-209.

Bucur, D., & Buttazzo, G. (2005). *Variational methods in shape optimization problems: Progress in nonlinear differential equations and their applications* (Vol. 65). Boston: Birkhäuser.

Chu, C., Graf, G., & Rosen, D. W. (2008). Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. *Computer-Aided Design and Applications, 5*(5), 686-696.

Collins, J. A., Busby, H., & Staab, G. (2010). *Mechanical Design of Machine Elements and Machines: A Failure Prevention Perspective* (Second ed.). Danvers, MA, USA: Wiley.

Dieter, G. E., & Schmidt, L. C. (2009). *Engineering Design* (Fourth ed.). New York: McGraw-Hill.

Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria Optimization* (Second ed.). Berlin, Germany: Springer.

Gibson, L. J. (2005). Biomechanics of cellular solids. *Journal of Biomechanics, 38*, 377-399.

Golden, I. J. (2005). *Function Based Archival and Retrieval Developing a Repository of Biologically Inspired Product Concepts.* University of Maryland, College Park, College Park, USA.

Hirtz, J., Stone, R. B., McAdams, D. A., Szykman, S., & Wood, K. L. (2002). A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts. *Research in Engineering Design, 13*, 65-82.

Jin, Z.-H., & Batra, R. C. (1996). Some Basic Fracture Mechanics Concepts in Functionally Graded Materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 44*(8), 1221-1235.

Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoet, J. Y. (2010). Manufacturing complexity evaluation at the design stage for both machining and layered manufacturing. [doi: DOI: 10.1016/j.cirpj.2010.03.007]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2*(3), 208-215.

Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoët, J. Y. (2008). *Manufacturing criteria in hybrid modular tools: How to combine additive and subtractive processes.* Paper presented at the 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal.

Kumar, S., & Kruth, J.-P. (2010). Composites by Rapid Prototyping Technology. *Materials and Design, 31*, 850-856.

Lough, K. G., Stone, R. B., & Tumer, I. Y. (2009). The Risk in Early Design Method. *Journal of Engineering Design, 20*(2), 155-173.

Mastinu, G., Gobbi, M., & Miano, C. (2006). *Optimal Design of Complex Mechanical Systems: With Applications to Vehicle Engineering*. Berlin, Germany: Springer.

MIL-P-1629A. (1980). Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis. *Department of Defense*.

Munguia, J., & Riba, C. (2008). *A concurrent Rapid Manufacturing advice system.* Paper presented at the 4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Washington, DC.

Ohashi, T., Iwata, M., Arimoto, S., & Mayakawa, S. (2002). Extended assemblability evaluation method (AEM). *JSME International Journal: Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 45*(2), 567-574.

Otto, K., & Wood, K. (2001). *Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall.

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach* (Third ed.). London: Springer.

Redford, A. H., & Chal, J. (1994). *Design for assembly: principles and practice*. Berkshire, England: McGraw-Hill.

Rivette, M., Hascoët, J. Y., & Mognol, P. (2007). A graph-based methodology for hybrid rapid design. *Journal of Engineering Manufacture, 221*(4), 685-697.

Robert, R. A., Stone, R. B., & Tumer, I. Y. (2002). *Deriving Function-Failure Similarity Information for Failure-Free Rotorcraft Component Design.* Paper presented at the ASME Design Engineering Technical Conferences, Design for Manufacturing Conference, DETC2002/DFM-34166, Montreal, Canada.

Rosen, D. W. (2007). Computer-aided design for additive manufacturing of cellular structures. *Computer-Aided Design and Applications, 4*(1-6), 585-594.

Rosenberg, B. (2008). Rapid prototyping to rapid manufacturing. *Aerospace Engineering & Manufacturing, 28*(4), 37-39.

Stone, R. B., Tumer, I. Y., & Wie, M. V. (2005). The Function-Failure Design Method. *Journal of Mechanical Design, 127*, 397-407.

Stone, R. B., & Wood, K. L. (2000). Development of a Functional Basis for Design. *Journal of Mechanical Design, 122*, 359-370.

Suh, N. P. (2001). *Axiomatic design: advances and applications*. New York: Oxford University Press.

Terninko, J., Zusman, A., & Zlotin, B. (1998). *Systematic innovation: an introduction to TRIZ (theory of inventive problem solving)*. Boca Raton, FL: St. Lucie Press.

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2004). *Product Design and Development* (Third ed.). New York: McGraw-Hill/Irwnin.

Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A.-K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of The Royal Society Interface, 3*(9), 471-482.

Wang, H. V. (2005). *A Unit Cell Approach for Lightweight Structure and Compliant Mechanism.* Georgia Institute Of Technology, Atlanta, USA.

Wohlers, T. (2007). *Wohlers report: rapid prototyping, tooling & manufacturing state of the industry: annual worldwide progress report*. Fort Collins, CO: Wohlers Associates.

Wohlers, T. (2009). *Wohlers report: rapid prototyping, tooling & manufacturing state of the industry: annual worldwide progress report*. Fort Collins, CO: Wohlers Associates.