

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

INTÉGRATION DES CARACTÉRISTIQUES DE CYCLE DE VIE
DANS LA PHASE DE CONCEPTION

MAMADOU SY
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR
(GÉNIE MÉCANIQUE)
DÉCEMBRE 2007



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

ISBN: 978-0-494-37136-7

Our file *Notre référence*

ISBN: 978-0-494-37136-7

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse est intitulée:

INTÉGRATION DES CARACTÉRISTIQUES DE CYCLE DE VIE
DANS LA PHASE DE CONCEPTION

Présenté par: SY Mamadou

En vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiae Doctor

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

M. VADEAN Aurelian, Doct., président

M. MASCLE Christian, Doct. ès sc., membre et directeur de recherche

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., membre

M. DESROCHERS Alain, Doct. Ing., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette thèse.

J'exprime ma reconnaissance profonde à mon directeur de recherche, M. Christian MASCLE, pour sa disponibilité constante, ses directives et conseils permanents mais aussi son support financier tout au long de cette thèse de doctorat en génie mécanique.

J'exprime aussi toute ma gratitude au département de Génie Mécanique de l'École Polytechnique de Montréal pour m'avoir autorisé à poursuivre cette thèse de doctorat.

Mes sincères remerciements vont à tous les membres du jury, Messieurs Aurelian VADEAN, Marek BALAZINSKI et Alain DESROCHERS qui m'ont fait l'honneur de faire l'examen de ce travail de thèse de doctorat et d'en être les rapporteurs.

Enfin, je remercie profondément les membres de ma famille particulièrement mon épouse Sélbé ainsi que mes enfants pour leur patience durant ces longues années consacrées à la thèse.

RÉSUMÉ

L'ingénierie simultanée a permis de réduire le coût de développement des produits manufacturés mais son application n'a pas permis de proposer une méthodologie pour améliorer les performances des produits manufacturés du point de vue de la conception.

Le développement d'un modèle de produit intégrant des caractéristiques de cycle de vie du produit relatives aux phases successives de la conception est nécessaire pour réduire les coûts d'assemblage du produit, améliorer sa recyclabilité, réduire ses impacts environnementaux, accroître sa fiabilité, etc.

Cette thèse présente une approche de conception qui intègre les caractéristiques de cycle de vie de produit durant les premières étapes de la conception en se basant sur la conception par caractéristiques (*design by features*). Les caractéristiques technologiques liées à l'assemblage, le désassemblage, la maintenabilité, le recyclage et l'environnement sont prises en considération ainsi que les informations géométriques et topologiques du modèle.

En utilisant une méthode de représentation par objet, les caractéristiques technologiques peuvent être liées à la topologie et la géométrie du produit. On obtient un modèle de représentation du produit comprenant l'ensemble des informations qui sont nécessaires pour évaluer la conception du modèle par rapport aux aspects du cycle de vie pris en compte. Cette forme de représentation permet de mettre en évidence les classes d'objets, les attributs de cycle de vie ainsi que les relations existant entre les données de conception.

Le modèle du produit peut être évalué sous plusieurs aspects du cycle de vie et le concepteur est en mesure d'améliorer son modèle connaissant les attributs de conception

du produit tels que l'efficacité d'assemblage, la recyclabilité, etc. Le système permet également d'obtenir une mesurabilité de la conception par rapport aux caractéristiques qui sont prises en compte.

Puisque les systèmes de modélisations solides ne permettent pas de représenter l'ensemble de ces informations, OpenCascade (un modéleur solide gratuit dont les codes sont accessibles) et *Visual C++* ont été utilisés pour implémenter cette méthodologie d'intégration des caractéristiques.

Des exemples pratiques sur des produits mécaniques ont permis de valider la méthodologie de recherche entreprise.

Le concepteur est en mesure d'évaluer l'efficacité de sa conception à l'aide de plusieurs paramètres obtenus tels que l'efficacité d'assemblage, le taux de recyclabilité, les impacts environnementaux et de choisir de modifier ou non sa conception en toute connaissance de cause.

Mots clés : Conception de produit, Conception pour X, Conception pour le cycle de vie, Caractéristiques de conception, caractéristiques de cycle de vie, Modélisation de produit, CAO/FAO, Développement de produit, Analyse de la conception du produit.

ABSTRACT

Although concurrent engineering has reduced the development cost of manufactured products, its implementation in the design phase has yet to effectively improve the product performance regarding the life cycle of the product. The development of a product model that integrates the product life cycle features taking into account the downstream applications is necessary in order to reduce the assembly cost, improve the product recyclability and environmental performance or the reliability of the product.

This thesis presents a design approach that integrates the product life cycle features during the early stages of the design process. The technological characteristics associated with the assembly, disassembly, maintainability, recycling and the environment are taken into consideration as well as the geometrical and topological information. Using an object model representation, the life cycle attributes are integrated to the topology and geometry of the product. A product representation that includes all the information required in order to access the design with respect to the chosen life cycle applications. The model of the product can be evaluated from several aspects of the life cycle and the designer is able to improve its product design attributes such as product assembly efficiency, recyclability, etc. The system also allows to obtain a measurability of the product design given the features that have been taken into account.

Since current solid modeling systems do not permit the representation of such, OpenCascade, a software development platform which is freely available in open source and VC++ are used to implement the design methodology.

Practical examples on mechanical products are used to validate our theory.

Keywords : Product Design, Design for X, Life Cycle Design, Design by features, Life Cycle Features, Product Modeling, CAD/CAM, Product Development, Product Design Analysis

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
Table des matières.....	ix
Liste des tableaux.....	xii
Liste des figures	xiii
Liste des sigles et abréviations.....	xvi
Introduction	1
CHAPITRE 1 : Revue de la littérature	10
1.1 Introduction	10
1.2 Intégration de technologies de conception pour X.....	10
1.3 Conception par <i>features</i>	14
1.4 Intégration de caractéristiques (<i>features</i>) technologiques.....	16
1.5 Conclusion	19
CHAPITRE 2 : Synthèse de la recherche	21
2.1 Problématique de la recherche	21
2.2 Objectif de la recherche	24
2.3 Hypothèses de la recherche.....	27
2.4 Processus de conception de produit	29
2.4.1 Approches méthodologiques.....	29
2.4.2 Conception pour le cycle de vie.....	36
2.4.3 Conception pour X.....	38
2.4.4 Ingénierie concourante.....	41

2.5	Modèle géométrique et topologique.....	44
2.5.1	Structure hiérarchique d'un produit	44
2.5.2	Schéma de représentation du modèle géométrique.....	46
2.5.3	Méthodes constructives (Constructive Solid Geometry)	47
2.5.4	Méthodes de représentation par frontières (Boundary representation).....	48
2.6	Caractéristiques (<i>features</i>) de cycle de vie et applications du DFX	51
2.6.1	Caractéristiques de cycle de vie	51
2.6.2	Application de la Conception pour X.....	57
2.7	Modélisation des données de cycle de vie	69
2.7.1	Modélisation par l'approche orientée objet	69
2.7.2	Modèle du produit	71
2.8	Analyse de la conception	78
2.8.1	Attributs de conception	78
2.8.2	Evaluation des caractéristiques du cycle de vie	83
2.8.3	Performance de la conception	88
CHAPITRE 3 : Article 1 - Data base representation of Life Cycle Design Features		91
3.1	Introduction	92
3.2	Related Works.....	94
3.2.1	Life Cycle Design Domain.....	96
3.2.2	Life Cycle Design Attributes	98
3.3	Product Model.....	101
3.3.1	Mathematical Representation of Design Features.....	101
3.3.2	Product Model Information Structure	104
3.3.3	Life-cycle and design for X features	105
3.4	System architecture and implementation	119
3.5	Example and discussion	121
3.6	Conclusion	126

3.7 References	127
CHAPITRE 4 : Article 2 - Product analysis design based on life cycle features	131
4.1 Introduction	132
4.2 Related Works	134
4.3 Life cycle design features	138
4.3.1 Definition of life cycle features.....	138
4.3.2 Product features.....	138
4.3.3 Life Cycle Design Modeling.....	140
4.3.4 Design attributes.....	143
4.3.5 Life cycle feature attributes.....	148
4.4 Implementation and discussion	157
4.5 Conclusion and perspective	160
4.6 References	162
CHAPITRE 5 : Discussion générale.....	169
Conclusion et recommandations	202
Références	205
Annexe	212

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Impacts environnementaux et substances nocives	63
Tableau 2.2 Coût du Cycle de vie d'un produit	65
Tableau 2.3 Caractéristiques de conception pour la fiabilité	67
Tableau 2.4 Stratégies de conception.....	81
Tableau 2.5 Attributs géométriques et technologiques d'un composant selon plusieurs aspects de conception pour X.	82
Tableau 2.6 Modes de défaillance et effets sur le produit	86
Table 4.1 Design Strategies	143
Table 4.2 Geometric and technological part attributes for DFX analysis.....	145
Table 4.3 Failure modes and effects	151
Table 4.4 Product Life Cycle Design Attributes.....	155
Tableau 5.1 Efficacité d'assemblage	183
Tableau 5.2 Index de désassemblage	186
Tableau 5.3 Caractéristiques de fiabilité et maintenabilité	189
Tableau 5.4 Taux de recyclabilité	191
Tableau 5.5 Caractéristiques liées à la conception pour l'environnement.....	193
Tableau 5.6 Coefficients affectés aux caractéristiques de cycle de vie	194
Tableau 5.7 Résultats de l'analyse de la conception du produit mécanique.....	195
Tableau 5.8 Résultats de l'analyse de la conception sur la variante du produit	198

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Relation entre les exigences des fonctions du produit et les paramètres de conception.....	30
Figure 2.2 Processus de conception d’après Pahl et Beitz.....	33
Figure 2.3 Analyse de la fiabilité dans l’étape <i>embodiment design</i>	35
Figure 2.4 Cycle de vie du produit.....	37
Figure 2.5 Coût de la conception	39
Figure 2.6 Coût du changement en fonction des phases de développement du produit ..	40
Figure 2.7 Ingénierie séquentielle et ingénierie concourante.....	43
Figure 2.8 Structure hiérarchique du produit	45
Figure 2.9 Schéma de représentation d’un produit	46
Figure 2.11 Modèle de représentation B-Rep	49
Figure 2.12 Structure topologique d’un modèle B-Rep.....	50
Figure 2.13 Caractéristiques de produit	56
Figure 2.14 Choix de la méthode d’assemblage	59
Figure 2.15 Analyse du cycle de vie.....	62
Figure 2.16 Intégration de l’analyse d’impact sur l’environnement	64
Figure 2.17 Modèle topologique du produit avec des informations non géométriques...	73
Figure 2.18 Caractéristiques de conception pour X.....	74
Figure 2.19 Caractéristiques liées à la face.....	75
Figure 2.20 Caractéristiques de cycle de vie du produit.....	76
Figure 2.21 Conception pour X, cycle de vie et phases de la conception.....	79
Figure 3.1 Design domains	96
Figure 3.2 Design mapping process.....	98

Figure 3.3 Product life cycle and design stages	101
Figure 3.4 Product life cycle features	103
Figure 3.5 Product structure.....	105
Figure 3.6 Product model features	106
Figure 3.7 Life cycle features.....	107
Figure 3.8 Design for X features.....	108
Figure 3.9 Design for assembly features.....	109
Figure 3.10 Design for manual assembly.....	110
Figure 3.11 Design for automatic assembly.....	111
Figure 3.12 Design for disassembly features	112
Figure 3.13 Maintainability and reliability features.....	113
Figure 3.14 Design for environment features	115
Figure 3.15 Design for recycling features.....	116
Figure 3.16 Face information attributes	117
Figure 3.17 Materials features	118
Figure 3.18 Product model information	120
Figure 3.19 System architecture.....	121
Figure 3.20 Exploded view of the piston assembly	122
Figure 3.21 Entity selection in product assembly	122
Figure 3.22 Dialog part information	123
Figure 3.23 Design for recycling	124
Figure 3.24 Integrated life cycle feature information	125
Figure 4.1 Product features	140
Figure 4.2 Geometric and product attributes representation model.....	141
Figure 4.3 Product life cycle and design process.....	142
Figure 4.4 Design for recycling features representation	146
Figure 4.5 Design for manual assembly features	147

Figure 4.6 Product life cycle features representation.....	156
Figure 4.7 System architecture.....	158
Figure 4.8 Piston assembly	159
Figure 4.9 Snap shot of the application system	160
Figure 5.1 Architecture du système SCAV.....	171
Figure 5.2 Vue éclatée de l'assemblage mécanique (dimensions en mm).....	174
Figure 5.3 Représentation du modèle solide de la pièce mécanique.....	175
Figure 5.4 Importation et représentation du modèle solide de la pièce mécanique	176
Figure 5.5 Détermination des caractéristiques volumétriques	176
Figure 5.6 Information générale sur le produit	177
Figure 5.7 Sélection d'un composant et boîte de dialogue pour l'information générale sur un composant.	178
Figure 5.8 Exemple de symétrie α et β	180
Figure 5.9 Page d'information en vue de la conception pour l'assemblage	181
Figure 5.10 Page d'information en vue de la conception pour le désassemblage.....	185
Figure 5.11 Page d'information en vue de la conception pour la fiabilité et la maintenabilité.....	188
Figure 5.12 Page d'information en vue de la conception pour le recyclage	190
Figure 5.13 Page d'information en vue de la conception pour l'environnement.....	192
Figure 5.14 Caractéristiques de cycle de vie présentée par l'application informatique.	196
Figure 5.15 Variante 2 du produit mécanique.....	197
Figure A1. Exemples de relations dans un schéma NIAM	214

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ACV	:	Analyse du cycle de vie
B-Rep	:	Boundary Representation
CAD	:	Computer Aided Design
CAPP	:	Computer Aided Process Planning
CAD	:	Conception assistée par ordinateur
CAO	:	Conception assistée par ordinateur
CAM	:	Computer Aided Manufacturing
CE	:	Concurrent Engineering
CFAO	:	Conception fabrication et dessin assisté par ordinateur
CSG	:	Constructive Solid Geometry
DB	:	Database
DFLC	:	Design For Life Cycle
DFA	:	Design For Assembly
DFM	:	Design For Manufacturing
DFD	:	Design For Disassembly
DFR	:	Design For Recycling
DFRM	:	Design For Reliability and Maintainability
DFE	:	Design For Environment
DFX	:	Design For X
EOL	:	End Of Life
EDLA	:	End Of Life Cycle Adviser
FAO	:	Fabrication assistée par ordinateur
KBE	:	Knowledge Base Engineering
LCFS	:	Life Cycle Features Système

MLCA :	Multi Life Cycle Analysis
NIAM :	Natural Language Information Analysis Method
OCAF :	Open Cascade Application Framework
SCAV :	Système de Caractéristiques de Cycle de Vie

INTRODUCTION

De nos jours, les entreprises de production sont confrontées à une compétition internationale qui leur impose de développer des produits performants tout en réduisant leur prix de revient, mais aussi de raccourcir les délais de lancement sur le marché. Les chercheurs sont donc appelés à déterminer les meilleurs outils d'aide au processus de conception qui permettent de rendre le produit plus efficace à l'utilisation, avec une grande facilité d'entretien et qui ne constitue pas un fardeau environnemental lorsque le produit arrive à la fin de son utilisation. Cela revient à se questionner sur les meilleures techniques et outils de développement à mettre en œuvre en vue de minimiser le coût du produit pour l'utilisateur, le fabricant et la société. Tout au long de son cycle de vie, un produit nécessite la mise en œuvre de techniques d'application ou métiers tels que la fabrication de composants, l'assemblage du produit, l'utilisation, le contrôle de la qualité, le désassemblage, la maintenance, la mise à la décharge ou le recyclage. Dans ce contexte, la recherche sur l'optimisation des différentes phases de cycle de vie, la formalisation de connaissances, l'incorporation des caractéristiques de cycle de vie de même que l'analyse de la performance du produit à chaque étape est incontournable en vue d'atteindre les objectifs. Les contraintes liées à chaque niveau des applications de cycle de vie ou métier doivent être intégrées au niveau de la phase de conception pendant que les caractéristiques du produit sont entrain d'être définies.

La conception est la phase la plus valorisée dans le domaine de l'ingénierie, elle a pour objectif la création de nouveaux produits, de procédés de fabrication, de logiciels informatiques ainsi que d'organisations dans la société. Les sciences du génie contribuent de la sorte à la satisfaction des besoins de la société Suh (1990) [1]. Le processus de conception comporte une phase de création, dans laquelle de nouvelles idées ou

solutions sont synthétisées et ceci en l'absence d'exemple pré-établi et une phase analytique, dans laquelle les décisions prises dans la conception doivent être testées en vue d'évaluer les idées qui ont été émises au préalable. La phase de conception est très importante dans le processus de développement d'un produit parce que c'est dans cette phase que l'on détermine la finalité ultime des activités de l'ingénierie comme la fabrication des produits, l'amélioration de la qualité et la prise en compte de l'environnement. Les décisions qui sont prises à l'étape initiale de la conception ou dans les phases préliminaires affectent toutes les phases consécutives. Les corrections et les réglages au niveau des étapes subséquentes de la production du produit n'ont qu'un effet marginal sur le résultat final et à coup sûr ne peuvent pas rectifier les décisions erronées qui ont été prises dans la phase de conception.

La tâche principale de l'ingénieur est d'appliquer les connaissances scientifiques et technologiques en vue de déterminer les solutions aux problèmes techniques tout en cherchant à optimiser les solutions trouvées dans les limites des exigences définies au préalable et des contraintes de conception. La conception englobe à la fois un aspect de création ainsi que des connaissances et des expériences selon le domaine d'intérêt. L'introduction des systèmes de traitement de données par ordinateur continue de jouer un rôle déterminant dans le processus de conception. La conception assistée par ordinateur est en train d'influencer grandement les méthodologies de conception et de distribution du travail entre les concepteurs chargés de développer les concepts (*conceptual design*), ceux qui sont responsables de la conception détaillée mais aussi les concepteurs chargés de représenter et d'analyser les applications de cycle de vie du produit. La phase de la conception joue un rôle primordiale dans le processus de développement de produit parce que c'est dans cette phase que l'on définit la performance du produit et que l'on engage 70 à 80% des coûts de fabrication du produit.

C'est ainsi que, depuis une quarantaine d'années, de nombreuses industries se sont penchées sur les procédés et les méthodes d'optimisation de la conception qui tiennent en compte dès les premières étapes du processus de conception, des exigences et des aspirations des clients pour lesquels le produit conçu est destiné. La société Générale Électrique fait partie des premières entreprises à avoir développé des guides de fabrication à usage interne en vue de concevoir de meilleurs produits [2]. Des données de fabrication sont accumulées dans ce guide de fabrication permettant ainsi aux concepteurs d'être en mesure d'acquérir des connaissances de la production en vue de réaliser une conception plus efficace du point de vue de la productibilité. Vers la fin des années 1970, Boothroyd et Dewhurst [3] ont eu à conduire une série d'études sur la Conception pour l'assemblage (DFA) en prenant en compte les contraintes de l'assemblage par exemple les méthodes d'assemblage et leurs coûts durant les phases de la conception. En utilisant le DFA, le temps estimé pour réaliser l'assemblage peut être utilisé comme étant un guide qui permettra de déterminer les modifications de la conception qui peuvent conduire à une économie sur le coût total de l'assemblage. Des profits énormes ont été obtenus grâce à la mise en pratique de la conception pour l'assemblage notamment : la simplification des produits et la réduction des coûts d'assemblage. Stoll [4] a étendu l'étude de la conception pour l'assemblage en développant le concept de la conception pour la fabrication (DFMA) qui considère de façon simultanée tous les objectifs ainsi que les contraintes de conception des produits qui doivent être fabriqués. La mise en oeuvre de la conception pour l'assemblage et pour la fabrication (DFM) a permis la simplification des produits, la réduction des coûts d'assemblage et des coûts de fabrication, l'amélioration de la qualité et la réduction du temps de lancement sur le marché. De nos jours, les soucis de conservation de l'environnement, de réduction des impacts négatifs dus à l'exploitation des ressources naturelles, la fabrication et l'utilisation de ces produits ont fait qu'il devient urgent

d'incorporer les aspects de recyclage, de désassemblage et de maintenabilité le plus tôt possible durant les premières étapes de la phase de conception du produit. La conscience écologique a même poussé les clients à ne plus se limiter aux critères de fonctionnalité ou de qualité pour prendre une décision d'achat, mais aussi, à intégrer dans leur décision d'achat les coûts liés à la maintenance, à l'exploitation, au recyclage, à l'environnement, etc. Il apparaît donc un intérêt réel sur l'approche de détermination globale des impacts environnementaux du produit tout au long du cycle de vie lors de la phase de conception. La conception pour l'environnement (DFE) est donc devenue une composante essentielle dans le processus de développement d'un produit. Les efforts tendant à réduire le coût total du cycle de vie d'un produit à travers une conception innovatrice sont résumés sous le nom de la conception pour X (Design for X) ou DFX. La conception pour X a pour principal objectif d'accroître l'efficacité des produits conçus selon plusieurs aspects liés au cycle de vie du produit : l'assemblage, l'utilisation, le recyclage, etc.

Historiquement, les systèmes de conception assistée par ordinateur tels que CAO, FAO ont été développés dans le but d'intégrer les applications de cycle de vie du produit qui est conçu Chen et al [5]. Cependant la modélisation géométrique a pris une grande importance dans ces systèmes de modélisation. Les techniques de modélisation par caractéristiques sont particulièrement utilisées par ces systèmes en vue d'intégrer les représentations géométriques de niveau avancé afin de permettre une conception géométrique par paramétrisation et par contraintes. Ces systèmes assument que le concepteur a déjà terminé la première phase de la conception (conception préliminaire ou *conceptual design*) Ranta, M et al (1996) [6]. En outre, chaque système d'aide à la conception tel que la conception assistée par ordinateur (CAO), fabrication assistée par ordinateur (FAO), Planification des Procédés assistée par ordinateur (PPAO) sont

développés pour résoudre une seule application du cycle de vie (modélisation géométrique, fabrication, planification des procédés respectivement). Ceci a motivé ces dernières années, les chercheurs à s'intéresser à la détermination des caractéristiques non géométriques ainsi qu'à leur intégration dans les techniques de modélisation géométriques en vue d'accroître l'efficacité de la phase conceptuelle.

Bien que la mise en pratique des méthodologies de développement de produit basées sur l'ingénierie concurrente aient permis de réduire le temps de développement, il existe beaucoup d'écart quant à l'application effective d'outils appropriés et efficaces dans la pratique. La plupart des méthodologies de conception pour X ou d'ingénierie concurrente sont plutôt constituées de guides ou méthodologies difficile d'être exploités dans la pratique par les concepteurs dans un environnement de conception assistée par ordinateur (*Computer Aided Design*).

D'autre part, la plupart des logiciels de CAD concentrent leurs efforts de représentation au niveau les phases avancées, c'est-à-dire la détermination des caractéristiques géométriques des produits et par une représentation détaillée des formes ainsi que des tolérances. A cette étape de la phase de conception qui correspond à la conception détaillée, les performances du produit en terme de coût d'assemblage, d'efficacité de recyclage et d'impact d'environnementaux sont déjà définis au niveau des étapes antérieures de la conception.

Ceci a poussé les chercheurs à développer la notion de caractéristiques (*features*) dans le but d'intégrer les attributs du produit ou des composants en vue de concevoir des produits plus efficaces et en même temps réduire les délais de développement ainsi que le coût des produits. L'intégration des outils d'analyse et d'aide à la conception en intégrant l'assemblabilité, la fiabilité, etc., n'est pas encore effective. Les *features*

correspondent à des attributs d'un assemblage ou d'un produit et sont utilisés pour modéliser certains aspects du produit difficiles à représenter par les systèmes de modélisation solide actuels. Plusieurs chercheurs ont développé les technologies de *features* pour palier à ces insuffisances. La conception par caractéristiques ou conception par entités (*design by features*) permet de représenter les données non géométriques au stade de développement du produit, en même temps que la représentation géométrique des produit. Le concepteur a une vue multiple du produit suivant plusieurs références qui correspondent à des métiers particuliers. Les logiciels d'aide à la conception tels que *Computer Aided design (CAD)*, *Computer Aided Process Planning (CAPP)* et *Computer Aided Manufacturing (CAM)* sont beaucoup plus orientés sur la modélisation géométrique ou l'extraction des *features* de forme en vue de leur traitement. En vue de permettre au concepteur d'analyser tous les aspects du produit par rapport à la totalité des phases du cycle de vie, un outil se basant sur le processus de conception et favorisant l'intégration des paramètres de conception non géométriques au modèle du produit est nécessaire. Les outils de conception assistés par ordinateur permettent une parfaite représentation des formes mais sont limitées pour représenter les contraintes de conception, l'intention du concepteur ou d'autres données non géométriques. Ces outils partent de l'hypothèse que le concepteur a déjà terminé l'étape de la détermination des concepts du produit (*conceptual stage*) de même que la détermination des relations entre le concept et les formes du produit. De ce fait, les fonctions géométriques sont les seules existantes dans ces outils d'aide à la conception. L'introduction de caractéristiques ou *features* de produit peut combler les insuffisances citées précédemment.

En tenant compte des limites ci-dessus énumérées, notre recherche vise à développer une représentation sous forme de base de données des caractéristiques de cycle de vie pour l'évaluation du modèle de produit par rapport aux applications de cycle qui sont définies.

L'évaluation de la conception permet de s'assurer que les attributs du produit correspondent aux exigences de la conception.

Dans un premier temps, nous avons cerné l'ensemble des caractéristiques nécessaires pour chaque application du cycle de vie. Ces caractéristiques sont liées à la conception pour l'assemblage, pour le désassemblage, pour la maintenance, le recyclage et l'environnement.

Une méthode de représentation par objets a permis d'intégrer les attributs de conception aux données de modélisation solide constituées par la géométrie et la topologie du produit. Ce qui a pour but de déterminer les caractéristiques de la conception pour X.

Cette démarche a pour finalité de déterminer une valeur de conception du modèle du produit par rapport à plusieurs caractéristiques tels que l'efficacité d'assemblage, la durée d'assemblage, l'index de recyclabilité et de désassemblabilité, les conséquences des pannes ou défauts de fiabilité sur le produit de même que les impacts négatifs causés par le produit tout au long de son cycle de vie sur l'environnement. Cette démarche permet d'extraire et de manipuler les caractéristiques géométriques.

Finalement, cette méthodologie a été implémentée en vue de valider notre démarche avec la mise en oeuvre d'une application informatique *Life Cycle Features System LCFS* (Système de caractéristique de cycle de vie ou SCAV). SCAV a été réalisé avec à l'aide de OpenCascade, est un logiciel gratuit constitué d'une bibliothèque de fonctions pour la modélisation géométrique solide et *Visual C++*. SCAV est un environnement basé sur l'intégration de plusieurs application du cycle de vie comme la conception pour l'assemblage, la conception pour le désassemblage, la conception pour le recyclage, la

conception pour la fiabilité et la conception pour l'environnement. Ce système permet de représenter un modèle général de produit avec les attributs de conception pour X. Il a été développé dans le soucis de permettre au concepteur d'incorporer des données non géométrique au model de produit, d'importer plusieurs format de produit CAD et de sauvegarder le modèle de produit intégré pour une exploitation futur. D'une façon générale avec l'aide d'index représentant le poids de l'importante attribuée à chaque caractéristique découlant d'une application du cycle de vie, SCAV permet de déterminer la mesurabilité de la conception sur l'ensemble du cycle de vie. Il est donc possible de réaliser de façon économique la conception du produit en y intégrant les analyses de conception qui prennent en compte plusieurs aspects du cycle de vie, les contraintes et exigence de conception.

L'organisation générale cette thèse est la suite :

Au chapitre 1 nous abordons une revue exhaustive de la littérature portant sur les outils d'intégration des différentes applications de cycle de vie, la conception par caractéristiques, la conception pour le cycle de vie ainsi que l'intégration d'autres caractéristiques non géométriques.

Le chapitre 2 concerne la synthèse de la recherche. Il est question dans ce chapitre de déterminer la problématique de la recherche, les objectifs que nous nous sommes fixés d'atteindre ainsi que les hypothèses qui fondent la base de nos travaux.

Chapitre 3 et Chapitre 4 présentent les résultats des nos travaux de recherche en articles scientifiques, respectivement :

- *Data Base for the Representation of Life Cycle Features* soumis à la revue *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.

- *Product Design Analysis based on Life Cycle Features* soumis à la revue *Journal of Engineering Design*.

Le chapitre 5 porte sur la discussion générale.

Finalement nous terminons par une conclusion générale ainsi que les perspectives de recherche intéressantes que peuvent inspirer cette thèse.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons parcourir les travaux qui nous permettront de situer l'état de l'art, de relever les insuffisances et en même temps nous fournir les bases pour réaliser nos travaux.

1.2 Intégration de technologies de conception pour X

Vers la fin des années 1970, Boothroyd et Dewhurst [7] ont intégré les contraintes d'assemblage (méthodes d'assemblage et coûts) durant les phases de la conception. En DFA, le temps estimé pour réaliser l'assemblage peut être utilisé en tant que guide qui permet de déterminer les modifications de conception qui conduisent à une réduction du coût total. La mise en oeuvre de la conception pour l'assemblage et la conception pour la fabrication qui considèrent de façon simultanée tous les objectifs ainsi que les contraintes de conception des produits devant être fabriqués, a permis de créer des profits énormes dans l'industrie. Ces profits incluent la simplification des produits, la réduction des coûts d'assemblage et des coûts de fabrication, l'amélioration de la qualité et la réduction du temps de lancement du produit sur le marché. Cependant cette application n'a pas permis de réaliser l'intégration des autres aspects de la conception tels que la conception pour le désassemblage, pour le recyclage, etc.

La détermination des gammes d'assemblage et de désassemblage est un problème crucial rencontré dans l'industrialisation des produits . Plusieurs auteurs se sont penchés sur le désassemblage des produits en fin du cycle de vie et l'intégration du recyclage dans la conception des produits [8-13]. Gao et al., 2004[11] utilise la technologie des graphes ET/OU pour déterminer les gammes de désassemblage des produits. Kroll et al., (1999) [12] ont tenté d'estimer les temps de désassemblage en mettant en œuvre des indices pour évaluer les caractéristiques qui sont associées à chaque opération de désassemblage (accessibilité, positionnement, force utilisée, etc.).

Kuo et al., 2001 [13] ont répertorié toutes les applications de la conception pour X et conduit une importante revue de littérature. Ils ont souligné les défis qu'il faudra relever pour une bonne intégration de ces techniques dans le processus de conception en vue de maximiser ou d'améliorer la qualité des produit. L'intégration des applications du cycle de vie constitue un des importants problèmes à résoudre de même que la recherche sur l'évaluation d'un modèle du point de vue de la conception. A présent, il n'est pas possible de mesurer un produit en terme de bonne ou mauvaise conception en prenant en compte tous les aspects du cycle de vie.

Durant ces dernières années, la conscience écologique pour la conservation et la sauvegarde de l'environnement s'est développée à travers le monde. L'analyse du cycle de vie (ACV) appelée aussi bilan écologique est une méthode qui permet d'évaluer les impacts des produits, des services et des procédés de fabrication sur l'environnement. L'ACV permet de faire un bilan détaillé des consommations de matières premières, de l'énergie utilisée, des différentes émissions dégagées (sur l'air, l'eau et les sols), des déchets solides, des produits réutilisables ainsi que des impacts éco-toxicologiques sur l'environnement et toxicologique chez les êtres humains. Cependant, les techniques

d'ACV sont difficilement mises en pratique durant la phase de conception parce qu'elles requièrent une importante quantité d'information sur les procédés de fabrication, l'utilisation, le transport entre autres. Durant la phase de conception, le concepteur n'a pas forcément toutes les caractéristiques du produit.

Plusieurs auteurs se sont concentrés sur l'étude de l'évaluation environnementale du cycle de vie des produits [14-18]. Les ingénieurs concepteurs peuvent avoir un contrôle sur la mise à la retraite des produits en s'interrogeant dès la première phase de la conception sur la destination finale du produit. A savoir si le produit doit être simplement mis à la décharge, réutilisé, recyclé en partie ou de façon intégrale. Avec la connaissance de la fonction du produit à la fin de sa vie active, le concepteur pourra analyser le produit dans cette optique et pourra ainsi procéder à des changements de façon itérative sur le produit. Les composants électromécaniques génèrent une pollution à chaque étape de leur cycle de vie : il est donc nécessaire de trouver un moyen pour intégrer les connaissances des impacts sur l'environnement et la santé dans les décisions lors des premières phases de la conception. Cependant certaines décisions de conception ont plus d'impact sur l'environnement que d'autres et certains problèmes sont difficiles à résoudre avec le niveau de développement actuel d'avancement des technologies de récupération ou de recyclage.

Rose et al., (2000) [14] a proposé un aviseur de conception pour la fin de vie (*ELDA End-Of-Life Design Advisor*) qui permet de prédire les stratégies de fin de vie des produits électromécaniques. L'utilisation de l'aviseur *EDLA* permet au concepteur de refaire la conception et d'obtenir des produits avec un niveau élevé de réutilisation. L'auteur définit la fin de vie d'un produit comme étant le moment précis où le produit ne satisfait plus l'acquéreur initial. Ce qui permet une réutilisation en plus du recyclage

comme stratégies de fin de vie. Les stratégies de fin de vie peuvent être la réutilisation, la maintenance, le remanufacturing, le recyclage (en procédant à un désassemblage d'abord), le recyclage destructif et la mise à la décharge. Par exemple, les matériaux en céramique ou les matières composites peuvent être utilisés pour concevoir des produits avec une stratégie de réutilisation en fin de vie, ceci permet d'améliorer la durabilité du produit au détriment de la recyclabilité. L'utilisation des vis métalliques pour la liaison des composants en matières plastiques peut faciliter la maintenance du produit mais par contre au moment du recyclage destructif du produit, on obtiendra un mélange de matières plastiques et de métal. De ce fait, le concepteur doit prendre en compte les stratégies de fin de vie dans la conception des produits. Plusieurs caractéristiques peuvent affecter le traitement du produit en fin de vie telles que, les caractéristiques externes, les matériaux, le désassemblage et la logistique inverse.

Les facteurs qui influencent les stratégies de fin de vie sont : l'usure du produit due au temps, la fréquence du changement technologique, le nombre de composants du produit, le niveau d'intégration, le temps entre la reconception du produit et les risques du point de vue de la sécurité du produit.

Kumar et al., (2001) [15] utilisent une représentation sous forme de vecteurs d'attributs pour l'identification et l'analyse des impacts environnementaux du produit dès la phase de conception. Le vecteur associé aux impacts écologiques est constitué par les impacts environnementaux qui découlent du recyclage, de la réutilisation et de la refabrication (*remanufacturing*).

Dans les travaux de Rose[16], les recherches sont concentrées sur l'identification des attributs qui peuvent influencer les décisions sur les stratégies de fin de vie en prenant en

compte les caractéristiques de produit. Khan et al. [17] ont cherché à palier aux limites rencontrées dans l'application des techniques d'*ACV* au niveau des premières phases de la conception en utilisant une approche basée sur des indices de différentes caractéristiques. Chang et Tong [18] utilisent la notion de systèmes gris (*Grey relational analysis*) pour intégrer plusieurs paramètres du produit et développer une approche multicritère qui a pour objectif de générer les stratégies de fin de vie ainsi que la sélection des matériaux du produit.

Mosovsky et al. [19] ont étudié l'évaluation des variantes de conception en tenant compte de la performance environnementale du produit et du développement durable. Leur approche se base sur la mise en œuvre de liens entre les fichiers de conception CAO en utilisant le logiciel Pro Engineer et un logiciel d'analyse de cycle de vie relié à une base de données (*Multi Life cycle Analysis MLCA*). L'inventaire des impacts environnementaux du produit peut être généré par le logiciel. Les informations qui peuvent être extraites de la base de données concernant le produit sont : la dénomination du produit, les matériaux utilisés, la masse, le volume, la densité et les surfaces.

D'autres auteurs ont travaillé sur la conception pour la fiabilité et la maintenabilité [20-23]. Kimura et al. [20], ont concentré leurs recherches sur l'étude des perturbations et de la fonction du produit durant le cycle de vie du produit en vue de déterminer l'influence de ces facteurs sur la fiabilité du produit.

1.3 Conception par *features*

D'importantes recherches ont été conduites sur les l'intégration des caractéristiques de formes (*features*) pour supporter la conception du produit ont été mené par [24-26].

Taylor et Henderson [27] ont fourni une étude exhaustive sur les caractéristiques de produit.

Coma, Mascle et Veron [28] ont présenté une étude portant sur la reconnaissance des caractéristiques géométriques des pièces en vue d'automatiser la conception pour l'assemblage selon les critères de Boothroyd-Dewhurst. Pour chaque composant de l'assemblage, deux recherches de caractéristiques sont conduites en vue de classer la pièce comme une pièce cylindrique ou prismatique et ensuite déterminer la méthode d'orientation la plus efficace. Une décision basée sur la logique floue est prise pour permettre l'introduction des caractéristiques géométriques au niveau de l'évaluation du DFA. La méthodologie appliquée permet d'intégrer l'assemblage dans la conception du produit, mais aussi de minimiser les prises de décision du concepteur grâce à une automatisation de la recherche des caractéristiques géométriques et en utilisant la logique floue dans ce cas.

G. Chen et al (2005, 2006) [29-31] ont travaillé sur un modèle unifié de features de produit, en vue de palier aux insuffisances des logiciels de CAD et CAE de pouvoir supporter les différentes phases de cycle de vie du produit. Dans leurs travaux, ils proposent un système de modélisation basée sur les caractéristiques [30], ainsi qu'un modèle de raisonnement avec base de connaissances permettant d'intégrer les caractéristiques unifiées de produit en vue de résoudre les problèmes ci-dessus énumérés.

Le système proposé inclut un modèle de caractéristiques multi-vues qui permet d'inclure les propriétés non géométriques, tout en permettant d'associer les informations géométriques, topologiques, ainsi que les applications de ces caractéristiques.

Au fur à mesure que la phase de conception se rapproche de la conception détaillée, le module du produit devra être ajusté pour tenir compte de l'influence des applications de cycle de vie. La conception devra donc être améliorée pour tenir compte de ces nouveaux attributs et cela peut avoir comme conséquence la modification des propriétés géométriques du produit, qui est représenté par le systèmes CAO durant la conception détaillée.

Cependant leur modèle de conception quoique révolutionnaire, ne permet pas d'intégrer explicitement les caractéristiques du produit liées aux différentes étapes du cycle de vie en vue d'une analyse cycle de vie. Les différentes relations entre les phases de cycle de vie telles que: l'assemblage, la fabrication, la maintenance entrent en action dans la phase de modélisation que de façon implicite. Par exemple, les matériaux constitutifs sont déterminés selon les exigences fonctionnelles du produit.

1.4 Intégration de caractéristiques (*features*) technologiques

Penoyer et al (2000) [32] ont développé une base de connaissances de systèmes de cycle de vie de produit. La base connaissances d'engineering (KBE) développée permet de supporter la modélisation du produit en intégrant les caractéristiques de cycle dans le modèle CAO de produit.

Xue et Yang (2004) [33] se sont concentrés sur un modèle de représentation en base de données de l'ingénierie concurrente en vue de supporter les différents aspects du cycle de vie du produit dans la phase de la conception. Leur modèle permet d'établir une description du produit en intégrant les informations géométriques ainsi que les

informations non géométriques nécessaires permettant d'évaluer de la sorte si les exigences de la conception ont été remplies avec satisfaction.

Di Stefano et al (2004) [34] ont développés une approche de conception permettant d'extraire les caractéristiques sémantiques à partir de la représentation purement géométrique d'un objet. Ce qui permet de vérifier les exigences du produit en terme d'application cycle de vie. Les caractéristiques sémantiques du produit (*semanteme*) sont des attributs qui ont une signification du point de vue ingénierie.

Fitch et Cooper (2005 part I and part II) [35-36] ont concentrés leurs recherches pour modéliser le cycle de vie d'un produit en vue d'intégrer les caractéristiques dans la phase de conception (part I). Leur étude est suivie d' une application pratique consistant en l'évaluation des caractéristiques de matériaux utilisés dans le but de réduire les ressources mises en œuvre en vue d'accroître les qualités en terme de performance environnementale du produit fini.

Masce [37] (2005) utilise la notion de minimisation d'enthalpie dans le cas de la conception pour la maintenance et la réutilisation.

Olewnik et Lewis, 2005 [38] démontrent les limites de l'utilisation de l'approche de la conception axiomatique utilisée comme une prise de décision durant la conception en vue de valider les décisions qui ont prises durant la conception du produit.

Ballu et al., 2006 [39] ont entrepris des recherches pour déterminer les variations géométriques du produit durant son cycle de vie. Les auteurs ont utilisé une approche

axiomatique de la conception qui leur permet d'identifier les fonctions liées à la géométrie ainsi que les spécifications sur les tolérances.

Lockett et Guenov, 2005 [40] se sont investis dans les outils de reconnaissance de caractéristiques pour représenter les topologies de surface ainsi que la géométrie pour obtenir les caractéristiques des moules. Un démonstrateur est réalisé en programmation C++ dans le but d'identifier les bosses, trous, jonctions, etc. sur les moules.

Pasko et Shapiro, 2005 [41] ont présenté un rapport qui tente de développer les défis techniques et opportunités qui surviennent dans la conception des produits présentant des inhomogénéités au niveau des matériaux constitutifs en intégrant les features appropriées.

Chen et Feng, 2004 [42] ont développé un modèle de conception qui intègre les caractéristiques de matériaux du produit (microstructures, matériau constitutifs et autres éléments intégrés) en même temps que la représentation du modèle CAD en se servant de la conception axiomatique.

Jabbour, Mascle et Maranzana [43] ont travaillé sur la représentation par caractéristiques des produits mécaniques. Le produit est modélisé à chaque étape du processus d'assemblage en tenant compte des données géométriques, technologiques et fonctionnelles qui sont pertinentes au produit. Les caractéristiques qui ne peuvent pas être représentées par le modèleur CAO sont introduites manuellement par le concepteur. Le système détermine alors automatiquement les autres caractéristiques pertinentes aux faces, les composants et les sous-assemblages. C'est ainsi que l'ingénieur des méthodes peut automatiser la génération des gammes d'assemblage ou des ressources.

1.5 Conclusion

Les activités de recherches énumérées couvrent un vaste domaine mais avec l'unique but de supporter l'élaboration du produit, en incluant les phases consécutives à la conception c'est-à-dire, l'assemblage des composants, la maintenance, l'environnement. Bien que la durée de la conception soit relativement faible, c'est dans cette phase que sont définis les caractéristiques finales du produit et que la majeure partie des coûts du produit sont engagés. Les applications liées au cycle de vie apparaissent donc comme des sorties de l'activité de conception. De ce fait, en vue d'optimiser ces sorties qui correspondent aux performances que le produit doit avoir, il faudrait optimiser les caractéristiques d'entrées du modèle physique de produit.

La revue de littérature nous a permis de mettre en évidence les limites sur les modèles de produit proposés en vue de supporter le processus de conception.

Plusieurs auteurs ont exploités les *features* de forme pour décrire les caractéristiques d'assemblage d'un produit, les coûts d'usinage, les variantes de conception, etc. D'autres ont utilisé les outils de DFX pour rechercher les attributs de conception de conception. Cependant, nous notons que la plupart des recherches entreprises se concentrent sur un seul aspect de cycle de vie (assemblage, désassemblage, environnement, etc.). Aussi, les *features* non géométriques n'ont pas fait l'objet de recherches étendues.

Ce qui met en évidence les problèmes d'intégration des aspects du cycle de vie dans la phase de conception du produit. Le modèle de produit doit être représenté physiquement par la description de sa géométrie ainsi qu'aux éléments topologiques qui le composent. Mais aussi par ses propriétés technologique qui permettent de déterminer la performance

de la conception par rapport à plusieurs aspects. Il se pose donc le problème de la résolution de l'intégration des caractéristiques non géométriques qui permettent de déterminer le comportement du produit à concevoir.

Les caractéristiques sont donc un bon moyen de dresser une représentation exhaustive du produit et la mise en œuvre d'une méthodologie de conception permettra de déterminer les attributs liés au produit et finalement de déterminer la mesurabilité de conception par rapport aux applications du cycle de vie qui sont prises en considération.

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE DE LA RECHERCHE

2.1 Problématique de la recherche

Bien que les méthodes de conception pour X et l'ingénierie concourante aient permis de réaliser de gros progrès en intégrant la fabrication et la production dans le processus de conception, il existe encore beaucoup de difficultés dans la mise en pratique des modèles qui sont proposés. De nos jours, les impacts négatifs causés par les produits, conçus par les ingénieurs, sur l'environnement ont amené les chercheurs, les industriels et les décideurs à réfléchir sur la gestion des produits à la fin de leur cycle de vie et à l'intégration de la préservation de l'environnement et de la santé de la société dès les premières phases de conception. D'une façon plus étendue, la prise en compte de toutes les applications du cycle de vie est un élément essentiel permettant d'asseoir à long terme le développement durable. L'intégration du Design for X peut permettre aux concepteurs d'avoir une rétroaction sur les impacts environnementaux du cycle de vie en mettant en relief les matériaux de fabrication qui seront utilisés, l'énergie mise en oeuvre, les impacts sur l'environnement durant le cycle de vie du produit, les procédés de fabrication ou bien les variantes de conception possibles. L'intégration de tous les aspects du cycle de vie d'un produit au niveau de la phase de conception n'est pas encore effective d'après notre revue de littérature, il est donc encore difficile, voir impossible, d'optimiser la conception des produits du point de vue environnemental. Bien que plusieurs recherches aient été effectuées sur la reconnaissance et l'intégration des caractéristiques et des coûts en vue d'optimiser la conception du produit, la recherche est

à l'état d'adaptation embryonnaire quant aux méthodes citées pour établir un modèle pouvant être exploitable dans la pratique. Les méthodologies de conception pour X ainsi que les technologies à utiliser ne sont pas toujours énumérées. A cette difficulté s'ajoute le fait que les logiciels de CAO-DAO actuellement utilisés par les concepteurs ne permettent pas d'intégrer les multiples caractéristiques de cycle de vie autres que les caractéristiques purement géométriques. Dans le but d'optimiser la conception des produits, une intégration des exigences de la conception en tenant compte de toutes les étapes du cycle de vie du produit doit avoir lieu. Cette intégration doit prendre en compte: la sélection des matières, leur transformation, la planification des gammes d'assemblage et des procédés de fabrication, la fabrication, l'expédition, le service après vente, les stratégies de fin de la vie du produit, mais aussi les impacts sur l'environnement et sur la société. Des méthodes qui visent à représenter, à sauvegarder et à extraire les variantes de conception dans le contexte de l'ingénierie concurrentielle en vue de diminuer les temps de mise en marché et la réduction du temps de changement font défaut. Les concepteurs ont besoin de retrouver les variantes de conception les plus appropriées en spécifiant les matériaux, la configuration, la géométrie ainsi que les procédés de fabrication et de recyclage.

D'une façon plus élargie, le développement durable qui a pour finalité d'anticiper et de considérer à la fois les impacts écologiques et socio-économiques doit être tenu en considération et les exigences pour atteindre ce but ultime devront être intégrées dans les premières phases de la conception.

La plupart des systèmes actuels de CFAO et DAO sont conçus pour créer des modèles géométriques de composants avec seulement quelques performances analytiques pour la modélisation des assemblages (création de vue de l'assemblage, détection des

interférence, contraintes d'assemblage, etc.). Un ensemble d'information d'ordre technologique ou fonctionnel doit être représenté sur le modèle du produit si on vise à l'amélioration du modèle du produit au stade de la conception. Parmi ces informations on peut noter les caractéristiques intrinsèques aux pièces et à leur face tels que les tolérances géométriques, les propriétés environnementales des matériaux, les intentions du concepteur. Une autre catégorie importante est constituée par les caractéristiques relatives aux procédés d'assemblage, de vissage, de soudage, etc. Dans les modeleurs solides, il n'y a aucune possibilité de les représenter. Elles doivent être associées manuellement par le concepteur.

2.2 Objectif de la recherche

La revue de littérature nous a permis de constater que plusieurs recherches ont été entreprises dans les applications de la conception pour le cycle de vie et la conception pour X pour supporter la phase de conception dans le but d'améliorer l'efficacité des produits. Par ailleurs, la technologies de conception par caractéristiques a permis de représenter d'autres attributs du produit en dehors seulement des attributs de forme pour tenter de représenter les intentions du concepteur ou d'autres caractéristiques non géométrique. Il est donc possible de se baser sur les recherches antérieures sur la représentation et la modélisation des caractéristiques mais aussi sur les méthodologies de conception pour définir une représentation d'un modèle de produit plus complète intégrant toutes les applications du cycle de vie. Ce modèle de représentation permettra de mettre en œuvre un modèle de produit qui puisse décrire la géométrie et la topologie du produit tout en intégrant les informations implicites nécessaires à l'évaluation du produit ou d'un composant donné par rapport à une application particulière du cycle de vie. Ce qui permettra finalement d'analyser la conception du produit et de déterminer une mesurabilité de la conception qui soit fonction de plusieurs paramètres de conception déterminés à l'avance.

Le but de notre recherche est de développer un modèle de produit qui intègre les caractéristiques de cycle de vie pour supporter le développement de produits dans un environnement de conception assistée par ordinateur. Le modèle de produit développé comprend non seulement les informations géométriques et topologiques mais aussi l'ensemble des caractéristiques relatives à une applications particulière du cycle de vie du produit c'est-à-dire l'assemblage, le désassemblage, le recyclage, la maintenabilité, la

fiabilité ainsi que les impacts environnementaux. Pour chacune des ces applications, la méthodologie de conception suivie devra également permettre de déterminer l'efficacité de la conception qui détermine la mesurabilité de la conception par rapport à cette application du cycle de vie. Du moment que le modèle de produit développé prend en compte plusieurs applications du cycle de vie, il est possible de déterminer l'efficacité globale de la conception en prenant en compte les efficacités relatives de chaque application du cycle de vie. Ainsi, le concepteur est en mesure d'agir sur le modèle de produit en modifiant les paramètres de conception pour améliorer le modèle de produit dès les premières étapes de la phase de conception.

Les objectifs spécifiques peuvent être résumés comme suit :

- Proposer une définition de caractéristiques de cycle de vie d'un produit en vue de l'élaboration d'une représentation de ces caractéristiques.
- Élaborer une méthodologie d'intégration des caractéristiques de cycle de vie à la représentation géométrique du modèle.
- Développer un modèle orienté objet d'intégration des caractéristiques topologiques, géométriques et technologiques en définissant au préalable les classes, les objets ainsi que les attributs.
- Définir les outils d'analyse ainsi que les paramètres d'évaluation de ces caractéristiques de cycle de vie en fonction des différentes applications de la conception pour X : conception pour l'assemblage, conception pour le désassemblage, conception pour la fiabilité et conception pour l'environnement.
- Définir les méthodes d'analyse et de mesurabilité de la conception sur l'ensemble des aspects du cycle de vie.

- Proposer une architecture du système informatique et implémenter en même temps la méthodologie conduite pour l'intégration des données.
- Valider la méthodologie de conception à travers des exemples pratiques sur des produits industriels.

2.3 Hypothèses de la recherche

Notre modèle de conception ne prend en compte que les aspects suivants du DFX : la conception pour l'assemblage, pour le désassemblage, pour la fiabilité et pour la maintenabilité et enfin pour l'environnement.

L'application de ce modèle se limite aux produits électromécaniques.

Nous n'étudierons que les composants mécaniques rigides non flexibles pour lesquels les tolérances et les états de surface peuvent jouer un rôle dans le désassemblage des sous assemblages et des composants.

Une analyse environnementale pour le cycle vie simplifiée est mise en œuvre pour la détermination des impacts négatifs du produit sur l'environnement. Les impacts environnementaux causés par les procédés de fabrication tels que l'usinage, le soudage, etc., n'ont pas été intégrés dans notre recherche.

Les aspects sociaux, humains et esthétiques de la conception ne sont pas pris en compte.

Nous ne nous intéresserons pas aux des modules ou composants non-mécaniques pour la conception pour le recyclage ou pour la fiabilité tels que les assemblages de fileries, les composants électriques, etc.

L'optimisation de la conception en rapport aux paramètres de cycle de vie ne sera pas recherchées dans notre étude.

2.4 Processus de conception de produit

Dans cette section nous décrivons les principales méthodologies utilisées dans le processus de conception ainsi que certains outils de conception appliqués au moment des phases de développement d'un produit. L'analyse faite au niveau de cette partie permet de déterminer les moments où nous allons entrer les données géométriques, topologiques et technologiques pour supporter la conception pour le cycle de vie. En effet, la mise en œuvre du processus de conception doit être entreprise à l'aide d'une approche méthodologique permettant d'obtenir un produit performant par rapport aux exigences pré-établis. Le processus de conception vise à créer de nouveaux produits et implique plusieurs acteurs ainsi qu'une communication avec des aller-retour dans le but de s'assurer que les attributs du produit sont en adéquation avec les exigences de la conception.

2.4.1 Approches méthodologiques

Nous distinguons plusieurs méthodologies qui ont pour but d'améliorer l'efficacité de la phase conceptuelle des produits. Nous allons nous limiter aux deux approches plus couramment citées dans la littérature : la conception axiomatique et l'approche systématique de la conception.

2.4.1.1 Approche axiomatique de la conception

Les principes et l'évolution de la conception durant la phase de développement du produit sont décrits dans l'approche axiomatique de la conception [44]. La phase de la conception commence par l'établissement des exigences fonctionnelles (EF) dans le domaine fonctionnel du produit en vue de satisfaire un ensemble prédéfini de besoins et se termine par la création d'un produit qui satisfait les exigences fonctionnelles. Ceci est illustré dans la figure 2.1 où CN (*Customer needs*) représente les besoins des clients, PV (*Process Variables*) les variables de la fabrication et FR (*functional Requirements*) les exigences de fonctionnalité du produit.

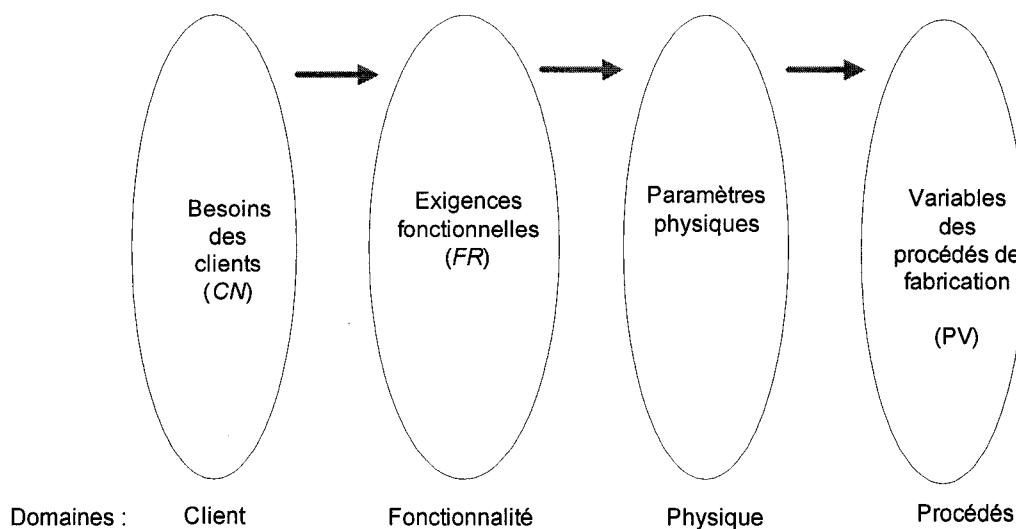


Figure 2.1 Relation entre les exigences des fonctions du produit et les paramètres de conception.

Une fois que les besoins de la société ou du client sont formalisés, les idées sont générées en fonction d'un ensemble d'exigences relatives à la fonctionnalité du produit en vue de concevoir le produit ou bien la structure organisationnelle. La sélection des exigences de fonctionnalité qui définit le problème de la conception est l'entière responsabilité du concepteur. Le produit conçu sera alors analysé et soumis à une comparaison avec l'ensemble des exigences fonctionnelles de départ à travers une boucle de contrôle.

Si le produit ne remplit pas les critères de fonctionnalité pré-établis, le concepteur devra apporter une nouvelle idée ou tout simplement changer son ensemble de *EF* qui reflétera de façon beaucoup plus précise les besoins de départ.

En plus des *EF*, la conception du produit doit respecter les contraintes de conception que sont les coûts, les dimensions ainsi que les impacts sur l'environnement. La solution sera acceptable si le produit conçu n'excède pas les contraintes déjà fixées. L'équation de la conception est représentée par la formule suivante :

$$FR = [A] DP \quad \text{ou bien} \quad \begin{pmatrix} FR_1 \\ \vdots \\ FR_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{1n} \\ \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_n \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Dans l'équation 2.1 :

FR est le vecteur représentant les exigences de fonctionnalité.

DP représente les paramètres de conception c'est-à-dire les caractéristiques physiques ainsi que les contraintes de conception.

[*A*] est la matrice de conception avec des éléments nuls et non nuls et définit la relation entre le domaine fonctionnel et le domaine physique.

La structure de la matrice A montre qu'un changement dans les caractéristiques fonctionnelles entraîne un changement de paramètres de conception. Si la matrice A est diagonale, chaque caractéristique de fonction peut être satisfaite par un seul et unique paramètre de conception et dans ce cas précis on assiste à une conception non-couplée. La conception devient plus complexe si le nombre d'éléments non nul de la matrice augmente (conception couplée). Plus la conception est couplée, moins la conception est flexible pour les changements qui sont causés par de nombreuses conditions environnementales, l'utilisation de la conception pour X, la prise en compte du cycle de vie, et l'interférence à d'autres disciplines.

2.4.1.2 Approche systématique de la conception

L'approche de la conception systématique développée par Beitz et Pahl se distingue de celle de la conception axiomatique principalement par la division de la phase de conception en trois étapes qui sont les suivantes :

- Développement des concepts (*Conceptual design*)
- Conception des formes (*Embodiment design*)
- Conception détaillée (*Detail design*)

Dans la représentation du processus de conception (figure 2.2), il existe des aller-retour entre les différentes étapes. Ceci a pour objectif l'amélioration de la conception en s'assurant que les exigences de la conception sont respectées à chaque étape.

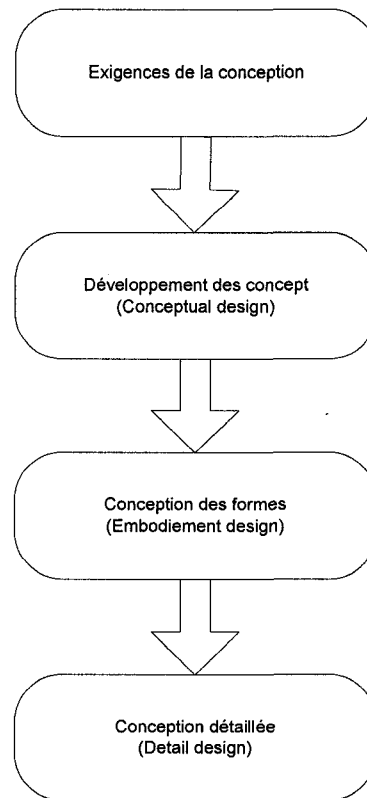


Figure 2.2 Processus de conception d'après Pahl et Beitz.

La première étape commence par la planification et la clarification des tâches. Ce qui correspond dans la conception axiomatique à l'étape d'élaboration des CN (*customer needs*). Cette phase commence par l'établissement des besoins du marché ainsi que des contraintes et des stratégies de l'entreprise. Elle se termine par l'élaboration d'une liste d'exigences et de caractéristiques du produit à concevoir.

L'étape *conceptuel design* consiste à produire les solutions de principe qui sont nécessaires dans l'établissement des exigences auxquelles le produit doit satisfaire. Cette étape commence par l'analyse du problème principal qui doit être résolu en vue de satisfaire les exigences de la conception qui ont été déterminées au moment d'établir les besoins du marché. Cela consiste à construire la structure fonctionnelle du produit, à rechercher et sélectionner les principes de fonctionnement et à combiner ces principes dans un ensemble cohérent et fonctionnel. Ces dernières sous étapes permettent de définir la structure du produit. Le concepteur devra déterminer la fonction principale du produit, c'est-à-dire la relation entre les entrées et les sorties du système. La fonction du produit exprime donc la transformation de l'énergie, des matériaux ou de l'information. Une fois que la fonction principale est déterminée, le concepteur procède par la décomposition de la principale fonction, en fonctions élémentaires de même caractéristique (énergie, matériau, information) exprimée par les sous assemblages, composants, etc. Les solutions de conception en terme de fonctionnalité pourront être déterminées par la suite de même que les principes de fonctionnement. La compatibilité de ces principes de fonctionnement affectent principalement les considérations physiques et géométriques des éléments du produit.

Au niveau de l'étape *embodiment design*, il s'agit de déterminer la structure générale du produit en prenant en compte les critères technologiques et économiques de la conception. La structure physique des composants de même que les caractéristiques de forme et de matériau sont également définies à ce niveau. C'est dans cette étape que le concepteur vérifie les caractéristiques de fonction, la résistance des composants, la compatibilité spatiale ainsi que la viabilité financière. Il est important également de pouvoir contrôler les facteurs ayant trait aux caractéristiques de cycle de vie telles que la sécurité, l'ergonomie, la fabrication, l'assemblage, la logistique, la maintenance,

l'environnement, etc. Du fait de ces facteurs dont certains sont interconnectés, cette étape représente la partie la plus importante de la phase de conception.

Dans le cas d'une d'amélioration de la conception d'un produit déjà existant par exemple en tenant compte de l'augmentation de la fiabilité et la maintenabilité ou tout autre facteur du cycle de vie, de nouvelles exigences de conception doivent être intégrées. La solution du concept obtenue à l'étape conceptuelle tient compte de ces nouvelles caractéristiques qui seront intégrées dans l'étape *embodiement design* (figure 2.3).

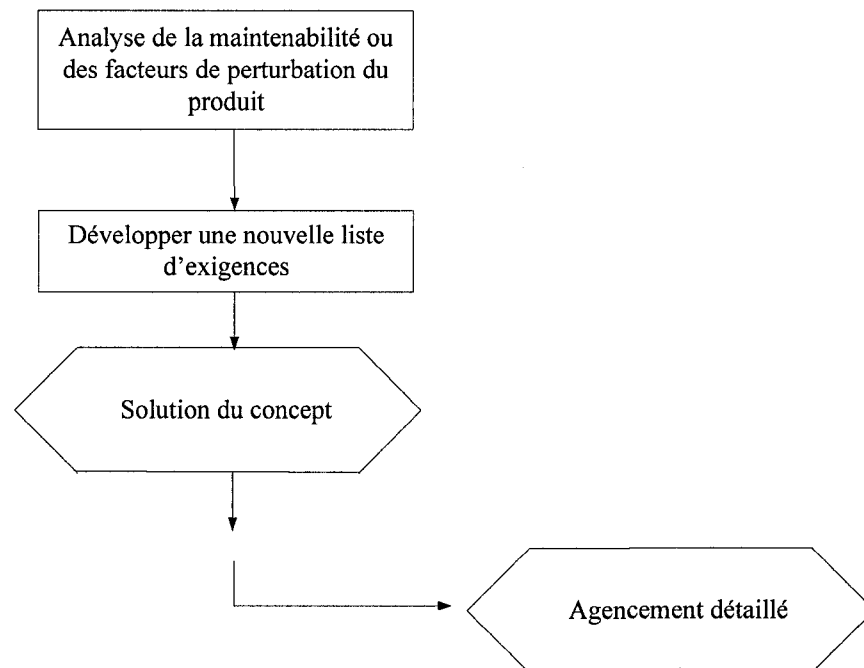


Figure 2.3 Analyse de la fiabilité dans l'étape *embodiement design*

L'étape correspondant à la conception détaillée (*detail design*) est exécutée par les systèmes de conception assistée par ordinateur pour la réalisation des assemblages, la précision des formes des composants, la définition des dimensions ainsi que l'assignation des propriétés de surface. Les matériaux mis en œuvre sont également spécifiés dans cette partie.

Les étapes décrites ci-dessous représentent le processus de conception selon Pahl et Beitz peuvent être exécutées de façon itérative à l'intérieur de chaque étape mais aussi entre les différentes étapes au fur et à mesure que la conception avance vers la conception détaillée. Les auteurs reconnaissent que ces cycles de *feed-back* peuvent exister, mais la recherche n'a pas été approfondie dans ce sens.

2.4.2 Conception pour le cycle de vie

Le concept 'cycle de vie' est largement utilisé dans plusieurs domaines des sciences et techniques pour l'analyse et l'interprétation des systèmes qui sont caractérisés par des changements avec le temps. La théorie du cycle de vie est basée sur la métaphore du phénomène de croissance organique typique en sciences biologiques. Si on définit un produit comme étant une entité possédant une représentation abstraite (besoin, conception, exigence) et une représentation concrète (produit fini), son cycle de vie peut être décrit par une série de phases successives dans laquelle chaque phase est nécessaire pour l'exécution de la phase subséquente. Les produits doivent donc être conçus en tenant compte de toutes les phases du cycle de vie : la fabrication des composants et des assemblages, l'utilisation, la maintenance et le service après vente mais aussi, les

stratégies qu'il faudra adopter à la fin de vie du produit (recyclage, réutilisation, mise à la décharge publique).

La figure 2.4 décrit les différentes étapes du cycle de vie d'un produit.

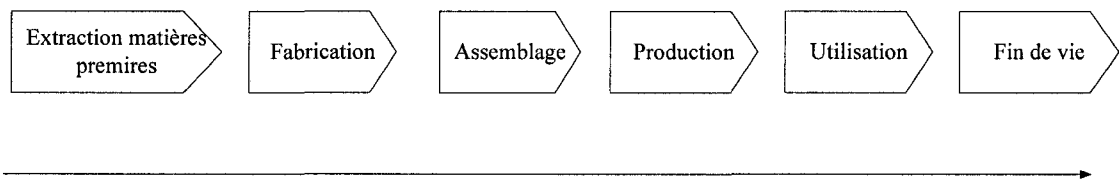


Figure 2.4 Cycle de vie du produit

La conception pour le cycle de vie (*Design for life cycle*) a pour objectif principal d'intégrer les préoccupations de chaque niveau du cycle de vie dans les premières étapes de conception. Le DFLC inclut :

- une étude de marché et de produit,
- les phases de la conception,
- les procédés de fabrication,
- le contrôle de la qualité,
- la prise en compte de la fiabilité, de la maintenabilité et les problèmes liés au service après vente.

2.4.3 Conception pour X

La plus grande partie des coûts d'un produit manufacturé est engagée durant la phase de conception avant même que le produit ne soit fabriqué. La figure 2.5 représente l'évolution des coûts du produit qui sont engagés en pourcentage du coût final selon les différentes phases du cycle de vie (conception, fabrication et utilisation). Cette figure exprime également la facilité de modification du produit suivant les phases du développement. Ainsi, corriger une erreur due à une mauvaise conception est plus beaucoup plus onéreuse lorsque le produit est rendu au stade de la fabrication.

Les méthodes de contrôle de la qualité des produits en cours de fabrication ne pourront en aucun cas corriger les défauts de correction inhérents au produit. Il faudra intégrer la fonction qualité au stade du processus de conception.

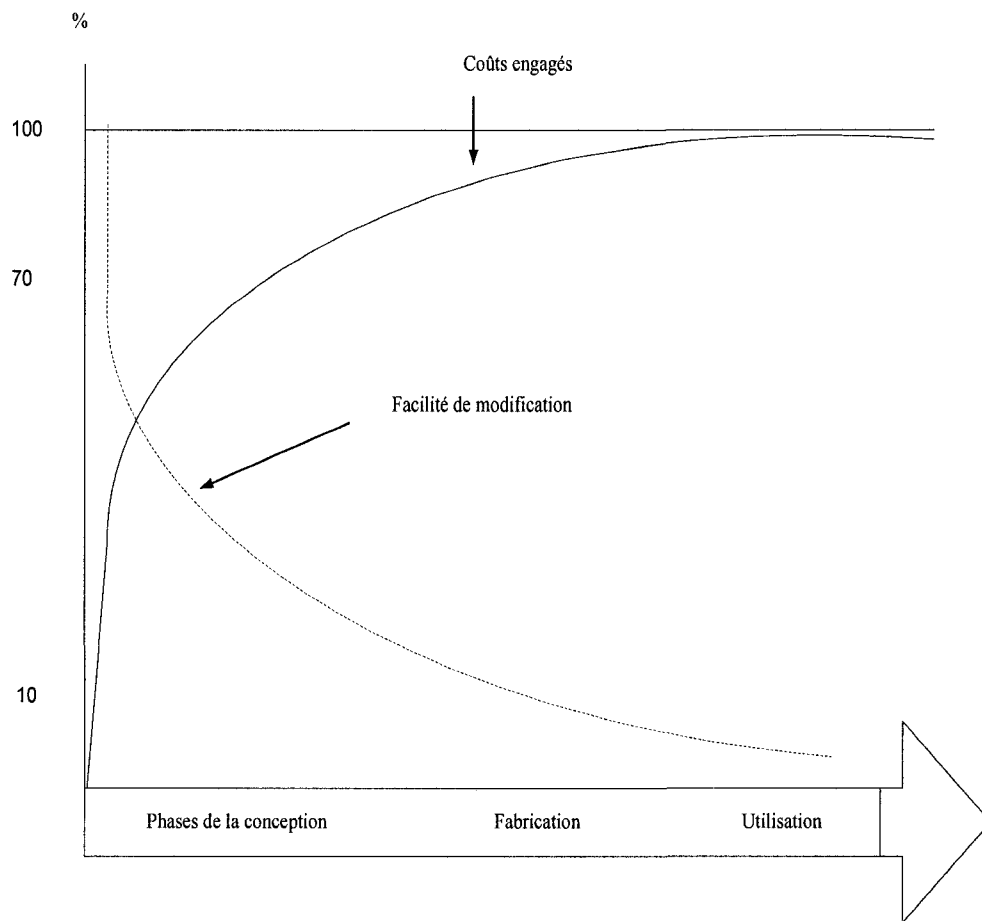


Figure 2.5 Coût de la conception

La figure 2.6 représente la fonction de croissance de type exponentiel du coûts du changement en fonction de la phase du cycle de vie d'un produit.

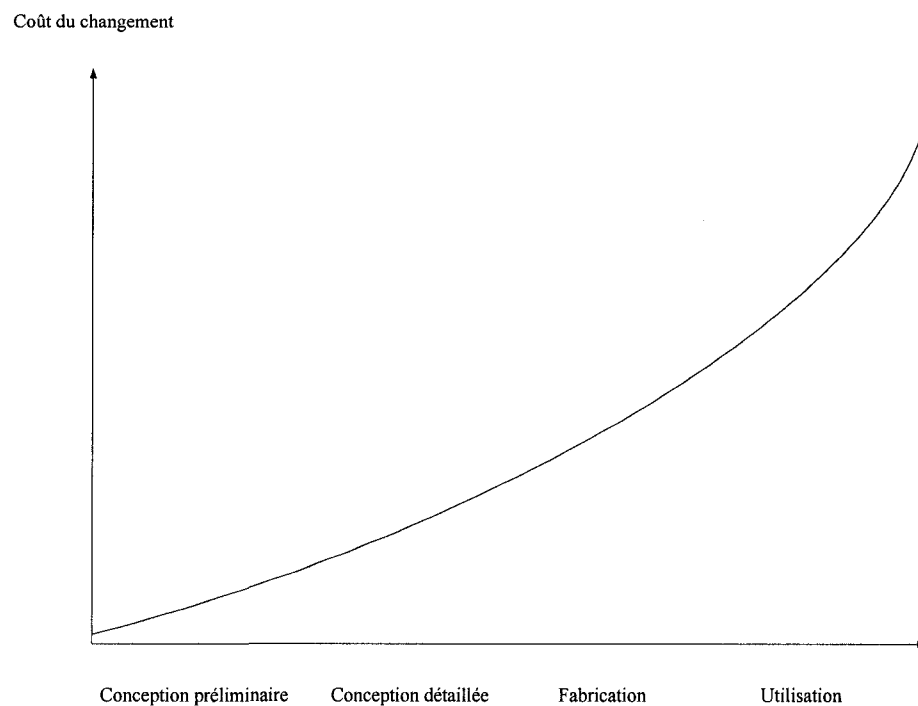


Figure 2.6 Coût du changement en fonction des phases de développement du produit

En vue de réduire les coûts de développement du produit, il est donc important de tenir compte des problèmes de fabrication, d'assemblage et de fiabilité au niveau de la phase de conception du produit en vue de réduire les coûts d'assemblage, de fabrication et de

fiabilité pour accroître la productivité. La conception pour X ou Design for X (DFX) a pour objectif principal de tenir compte et d'incorporer les connaissances technologiques liées à la fabrication, l'assemblage, le recyclage, etc., dans le but d'accroître l'efficacité de la conception par rapport à la connaissance technologiques déterminée. Elle englobe l'ensemble des outils, des méthodes ou des connaissances techniques permettant de déterminer les différentes propriétés techniques d'un système ou produit du point de vue du type d'industrialisation pris en compte. Ainsi le produit sera conçu en intégrant les aspects de maintenance ou DFA (Design for Assembly), de fabrication (Design for Manufacturing), recyclabilité des matériaux mis en œuvre (Design for Recycling), etc. Au niveau du DFX, le 'X' représente à la fois une caractéristique du produit (coût, qualité, maintenabilité, recyclabilité) et en même temps une phase du cycle de vie.

2.4.4 Ingénierie concourante

Traditionnellement, les activités de développement de produit sont découpées en plusieurs phases qui sont exécutées surtout séquentiellement sans échange entre les acteurs au niveau de chaque phase. Une fois que la phase de conception est achevée au niveau des bureaux d'études, le travail de conception est remis à la fabrication. Or les concepteurs n'ont pas forcément les compétences pour répondre à des problématiques de fabrication. Ce qui fait que les décisions prises au moment de la conception ne sont pas meilleures en terme de fabrication et ce n'est qu'à ce moment que corrections émises pour la fabrication seront prises en considération. Il s'en suit une perte de temps de développement causée par les aller-retour entre les départements et qui pourrait être évitée en impliquant tous les acteurs concernés en même temps que se déroule le développement du produit.

Pour combler les insuffisances de l'ingénierie séquentielle, l'ingénierie concourante a été développée dans le but de réduire les délais de développement de produit ainsi que les coûts induits dans cette phase. L'ingénierie concurrente (*concurrent engineering*), appelée aussi ingénierie simultanée (*simultaneous engineering*), est une nouvelle approche pour concevoir un produit prenant en compte l'ensemble des aspects de son cycle de vie jusqu' à la fin de vie du produit en intégrant la définition du produit, les processus de fabrication, l'utilisation, etc. Cette approche exige que les équipes de développement travaillent en parallèle pour atteindre les mêmes objectifs de fonctionnalités et de caractéristiques de prix. C'est donc une démarche de développement de produit qui permet à chaque acteur ou métier de coopérer et d'intervenir parallèlement tout en garantissant la cohérence des informations et la coordination des modifications faites indépendamment par équipe, tout au long du cycle de vie. Ce qui a pour finalité de réduire le temps de développement du produit, le prix de revient du produit, le nombre de changements, etc.

La figure 2.7 représente les différentes phases de l'ingénierie séquentielle et l'ingénierie concourante et met en évidence le gain de temps obtenu avec la mise en œuvre de l'ingénierie concourante.

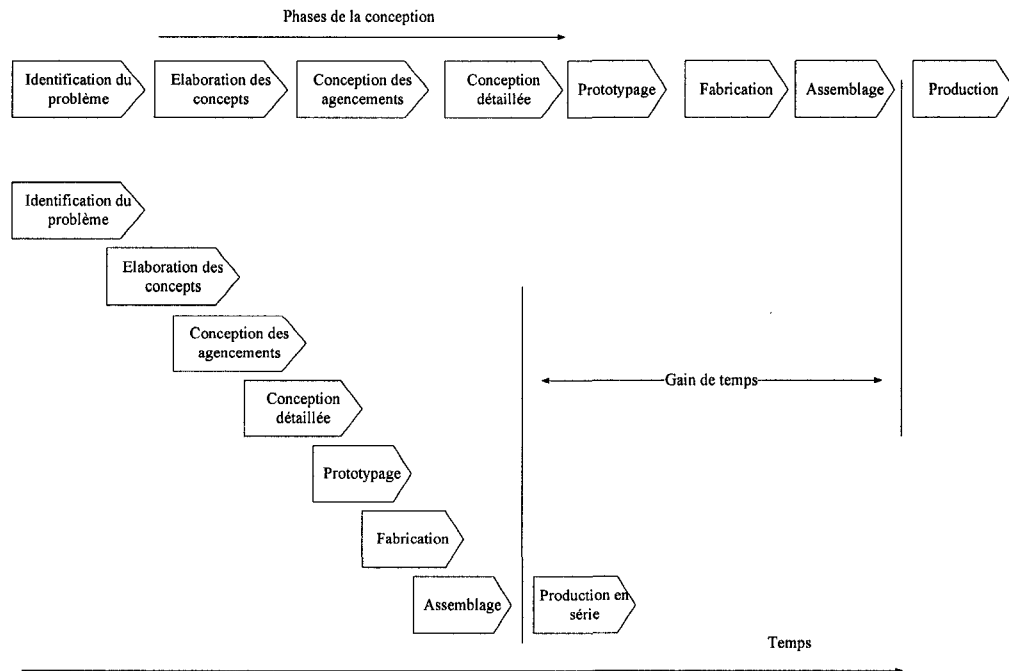


Figure 2.7 Ingénierie séquentielle et ingénierie concurrente

Dans cette section, nous avons développé plusieurs outils et méthodologies qui entrent en jeu dans la phase de conception lors du développement de produit. La performance d'un modèle de produit ne peut être déterminée objectivement, si les méthodologies de conception ne tiennent pas compte de l'ensemble des attributs technologiques du produit par rapport à plusieurs applications du cycle de vie.

2.5 Modèle géométrique et topologique

Les approches de conception de produit doivent faire appel aux fonctions de modélisation des informations du cycle de vie du produit, de la modélisation géométrique et en même temps des fonctions de distribution de l'activité d'ingénierie. La modélisation solide ou simplement modélisation 3D permet de représenter les composants mécaniques comme des solides qui sont définis sans ambiguïté par un modèle mathématique et une représentation graphique. Le modèle mathématique permet de s'assurer de la validité de la présentation. Les formes de modélisation solides les plus courantes sont la représentation B-rep et GSC.

2.5.1 Structure hiérarchique d'un produit

Un produit manufacturé P peut être décrit par une structure hiérarchisée sous la forme d'un arbre à N niveaux. Le produit est représenté par le niveau le plus haut et l'entité la plus basse correspond au composant. Un produit est donc formé d'un nombre fini de composants et/ou de sous assemblages. Le sous assemblage de niveau K inférieur ou égal à N est formé de composants et ainsi de suite.

L'ensemble des composants $C = \{c_1, \dots, c_N\}$ peut donc être scindé en deux parties :

- les sous ensembles de composants,
- les sous ensembles de sous assemblages.

Figure 2.8 représente la structure hiérarchique d'un produit.

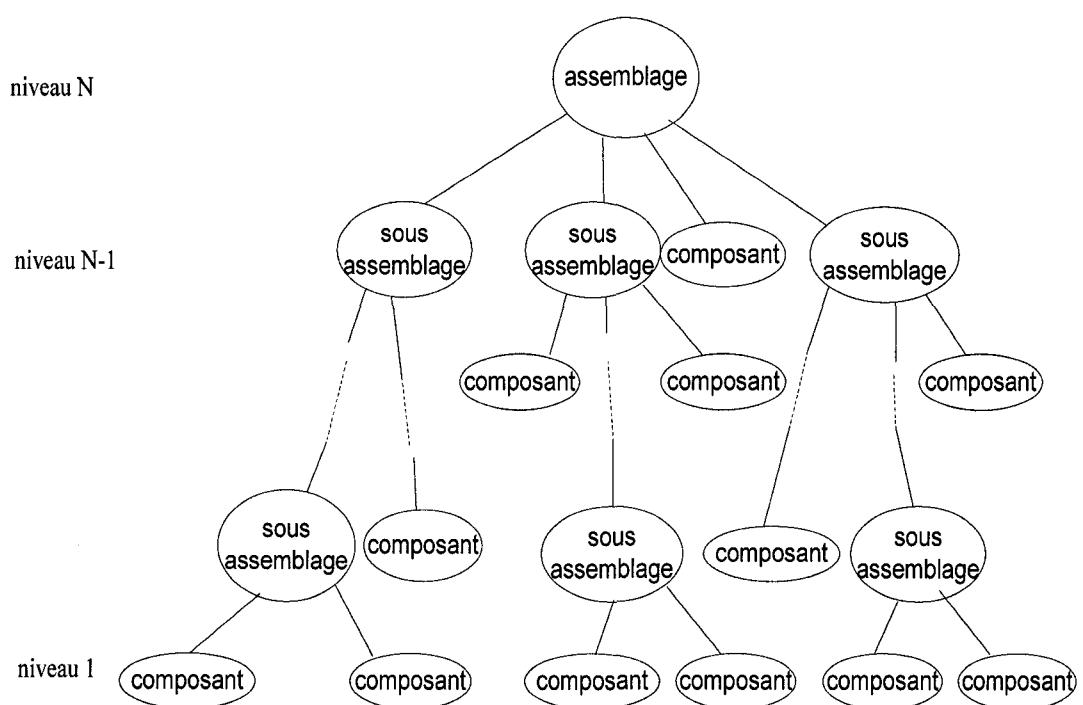


Figure 2.8 Structure hiérarchique du produit

La détermination des caractéristiques du produit doit se faire au fur et à mesure du niveau 1 au niveau N.

2.5.2 Schéma de représentation du modèle géométrique

Soit l'ensemble M l'espace contenant l'ensemble d'objets mathématiques d'un solide donné et R l'espace représentant les modèles géométriques, un schéma de représentation du solide est défini par la relation :

$$s : M \rightarrow R$$

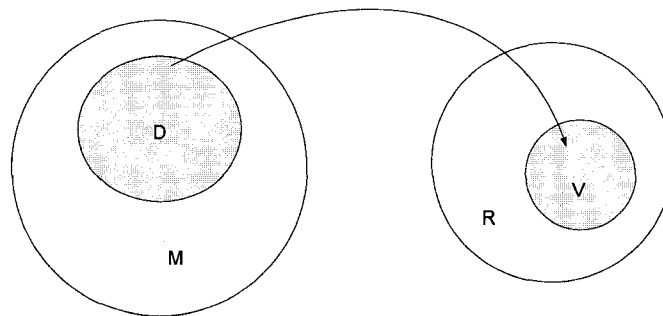


Figure 2.9 Schéma de représentation d'un produit

La figure 2.9 permet d'exprimer le schéma de représentation d'un produit.

D est un domaine représentant les objets géométriques de notre domaine objet de l'étude.

V est l'ensemble des objets qui correspondent à un solide c'est-à-dire valides (une représentation ne doit pas créer d'objet impossible ou invalide).

2.5.3 Méthodes constructives (Constructive Solid Geometry)

Le modèle CSG est utilisé pour représenter des objets complexes à partir de formes relativement simples appelées primitives. Le solide est modélisé en tant que l'expression algébrique des primitives tels que des prismes, cylindres, sphères, ou autre (figure 2.10). Ce qui permet une représentation de l'objet sous la forme d'un arbre binaire dont les nœuds sont les opérateurs booléens et les feuilles, les primitives de base.

La surface ainsi que les faces intérieures sont définies explicitement dans le modèle final du solide 3D. Cependant les applications qui sont basées sur l'évaluation locale de la frontière de l'objet ne permettent pas d'exploiter ce genre de représentation. En effet la structures de données obtenue résultant de cette représentation présente des insuffisance lorsqu'on est en présence d'arrondis et de dépouilles.

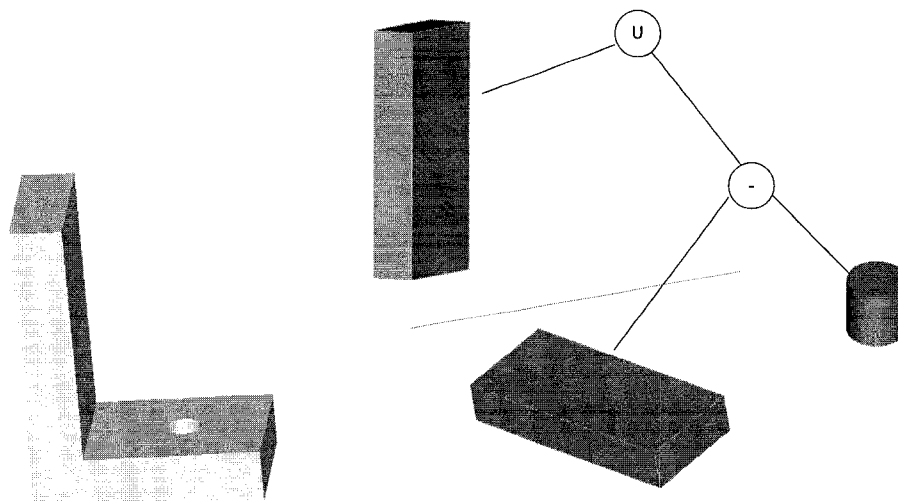


Figure 2.10 Modèle en CSG

2.5.4 Méthodes de représentation par frontières (Boundary representation)

La représentation solide par frontières des objets solides en 3 dimensions B-rep ou *boundary representation* permet de définir un solide à partir des surfaces définies par leurs frontières. Selon le modèle B-rep, un objet est représenté par l'ensemble des faces constituant l'enveloppe et chaque face est elle même limitée par un contour d'arêtes. Un composant est alors défini par des informations géométriques qui sont constituées par les coordonnées des sommets, les équations des faces et des arêtes, mais également, par des informations topologiques (corps, face, contour, arête et sommet). Cette forme de représentation peut être obtenue grâce à l'utilisation des équations d'Euler qui permettent de décrire la création et la destruction d'éléments géométriques. À l'opposé d'autres modèles de représentation surfacique, la modélisation B-rep permet la description de l'orientation des faces. Le sens de la normale à la face est définie par l'orientation de son contour. Cette notion d'orientation est très importante surtout pour déterminer les caractéristiques de face concernant ses matériaux constitutifs ou les états de surface.

La figure 2.11 montre une représentation d'un modèle B-rep.

La structure topologique du modèle B-rep est représentée à la figure 2.12.

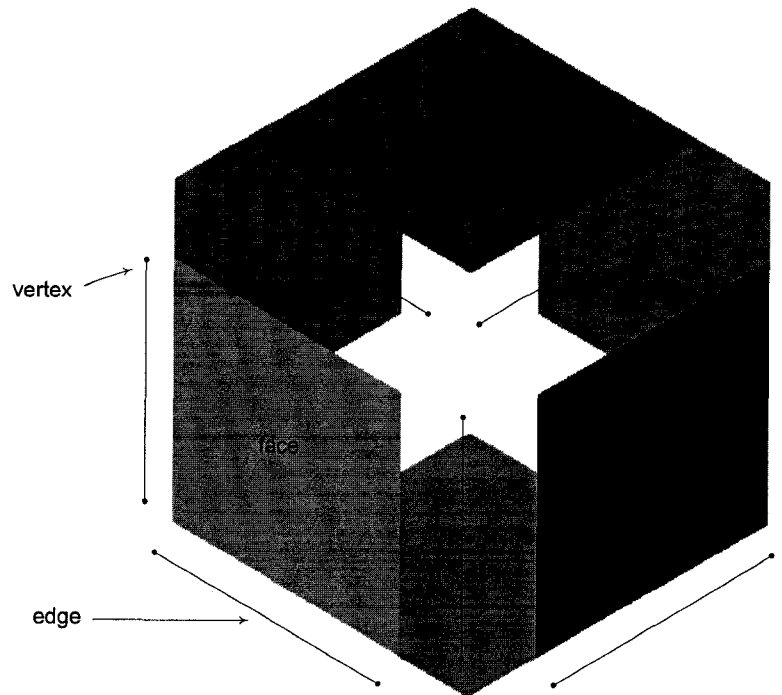


Figure 2.11 Modèle de représentation B-Rep

Le modèle B-Rep triangle est une forme particulière de la représentation B-Rep : les faces sont toutes des triangles. Les arêtes sont donc décrites par des segments de droite et la surface représentée par une facette est un plan. Ce modèle se situe entre le modèle filaire et la description B-Rep et profite ainsi des avantages de ces deux représentations :

- Non-ambiguïté du modèle, et faces orientées.
- Pas de mémorisation ni de traitement de la géométrie des facettes (implicitement toutes planes).

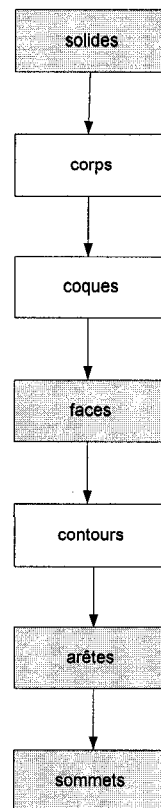


Figure 2.12 Structure topologique d'un modèle B-Rep

En modélisation solide 3D, les opérations topologiques sont utilisées en vue de générer ou de modifier la structure topologique d'un modèle géométrique. Celles qui sont les plus utilisés sont les équations d'Euler. Elles permettent de décrire la relation les éléments topologiques d'un modèle solide : les faces, les arêtes et les extrémités.

2.6 Caractéristiques (*features*) de cycle de vie et applications du DFX

Lors de l'analyse des informations permettant de supporter les différentes activités liées à l'assemblage, au désassemblage, au recyclage, à l'environnement et à la maintenabilité, il est nécessaire de passer en revue les informations explicites et implicites dont nous disposons puis remettre en évidence l'information utile idéalement. L'information explicite est décrite par les plans d'assemblage et de détail du modèle mais aussi par les informations ayant trait aux exigences de la conception comme les fonctions et sous fonctions du produit. L'information implicite relève des compétences de l'expert ou du domaine à travers lequel la conception du produit sera analysé. Le moyen le plus efficace pour disséminer les informations implicites et renseigner un système d'aide à la conception sur les intentions du concepteur est d'utiliser explicitement les primitives de conception chargées de valeurs sémantiques appelées *features*. Nous allons tenter de donner une définition de *features* de produit puis examiner comment ces dernières peuvent être utilisées pour supporter le processus de conception qui tient compte de l'ensemble du cycle de vie du produit.

2.6.1 Caractéristiques de cycle de vie

2.6.1.1 Rôle des caractéristiques

Les caractéristiques (*features*) jouent un rôle important dans le processus de conception mais leur définition reste encore vague et dépend généralement du domaine d'expertise du concepteur qui les utilise. Mais on peut s'accorder à dire que les caractéristiques

correspondent à des concepts liés à une application. Dans le cas particulier de la conception d'un produit électromécanique, ces caractéristiques peuvent être par exemple:

- les formes,
- les matériaux constitutifs,
- l'énergie utilisée durant les phases du cycle de vie,
- le tolérancement,

Jusqu'à présent, de nombreuses recherches ont été effectuées sur les caractéristiques de forme (*Material Form Feature*) et de temps à autre sur les caractéristiques de composants (*Material Composition Features*) ou les caractéristiques de tolérance (*Material Tolerance Feature*). Les sujets concernant d'autres types de caractéristiques tels que l'énergie ou l'information ne sont pratiquement pas étudiés.

2.6.1.2 Définition d'une caractéristique de cycle de vie

Si le concept de caractéristique ne trouve pas de définition consensuelle, nous pouvons dire que la caractéristique est un ensemble d'entités dont le regroupement a une signification particulière. On dénombre les caractéristiques de formes, de conception, d'usinage et bien d'autres. Cependant nous proposons notre propre définition des caractéristiques du cycle de vie. Celles-ci allient les informations de nature géométriques et d'autres de natures technologiques et fonctionnelle.

Nous pouvons fournir la définition de la caractéristique de cycle de vie :

‘Tout ensemble de données ou d’attributs relatifs à toute entité topologique ou géométrique permettant de définir les propriétés technologiques de l’ensemble constitué par le produit comme l’assemblabilité, la désassemblabilité, les impacts environnementaux, la fiabilité, etc.’

2.6.1.3 Représentation d’une caractéristique générale

La représentation d’une caractéristique de produit n’est pas unique mais d’une façon générale, les caractéristiques de forme peuvent être représentées par l’ensemble des entités topologiques d’un modèle de produit (Equation 2.2)

$$F \equiv \cup T , \quad T \in B(P) \quad (2.2)$$

F est la caractéristique de forme

T représente une entité topologique

$B(P)$ est le contour du modèle du produit P

En prenant compte de cette représentation, une caractéristique de base peut être élaborée à partir d’une caractéristique de niveau plus élevé comme par exemple les caractéristiques de fabrication. Cette caractéristique de base Ψ peut être représentée comme étant fonction des caractéristiques topologiques, des informations géométriques, des attributs du produit ainsi que de l’ensemble des relations de cette caractéristiques avec d’autres.

Les modèles de produits, qui sont utilisés dans les outils d'aide à la conception, contiennent les informations décrites plus haut en plus des matériaux ou tolérances, mais ne contiennent aucune information concernant la fonctionnalité des produits, les intentions du concepteur, l'objectif de la conception ou l'intégration du cycle de vie des produits. Une modélisation du produit doit intégrer la structure du produit et les informations relatives aux applications du cycle de vie. La représentation du modèle doit inclure également des informations sur les relations fonctionnelles, les contraintes dans l'espace, les intentions du concepteur, les variantes de conception ainsi que les décisions de conception.

2.6.1.4 Équation mathématique

A partir de la représentation d'une caractéristiques de base et de la définition d'une caractéristique de cycle de vie, nous sommes en mesure d'introduire une représentation mathématique d'une caractéristique de cycle de vie qui prend en compte tous les aspects du produit (matériaux, fabrication, assemblage, recyclage, etc.). Nous pouvons donc représenter le modèle du produit à l'aide de ses caractéristiques de cycle de vie (F_p^{LC}) qui sont fonction des attributs de chaque application du cycle de vie (A_p^{LC}), des informations géométriques (G), de sa structure topologique (T) ainsi que des relations entre ses caractéristiques (R) (Équation 2.3)

$$F_p^{LC} = \{T, G, A_p^{LC}, R\} \quad (2.3)$$

Etant donné qu'un produit peut être décomposé en assemblage de composants et de sous assemblage, les attributs de cycle de vie (A_p^{LC}) découlent à leur tour des attributs relatifs à chaque application du cycle de vie que l'on peut considéré pour les composants, sous assemblages, faces, etc. Les attributs du produit pour l'ensemble de son cycle de vie sont donc les caractéristiques relatives de conception pour X prises en considération et sont les suivantes:

- Attributs de conception pour l'assemblage (A_p^{DFA})
- Attributs de conception pour le désassemblage (A_p^{DFD})
- Attributs de conception pour le recyclabilité (A_p^{DFR})
- Attributs de conception pour la maintenance et la fiabilité (A_p^{DFRM})
- Attributs de conception pour l'environnement (A_p^{DFE})

Ainsi les attributs A_p^{LC} d'un produit P constitué de n composants peuvent être exprimés par l'ensemble des variables de conception pour X pris en considération.

$$A_p^{LC} = f(A_p^{DFA}, A_p^{DFD}, A_p^{DFRM}, A_p^{DFR}, A_p^{DFE}) = \left\{ \begin{array}{cccc} A_1^{DFA} & A_1^{DFD} & \dots & A_1^{DFE} \\ A_2^{DFA} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_n^{DFA} & A_n^{DFD} & \dots & A_n^{DFE} \end{array} \right\} \quad (2.4)$$

Chaque élément composant la matrice A_p^{LC} influence la détermination des caractéristiques générale de cycle de vie du produit. En vue de maximiser les paramètres de conception, il est important d'agir au niveau de l'application du cycle de vie qui permette d'optimiser la caractéristique globale de conception.

La figure 2.13 représente les caractéristiques qui sont liées au produit.

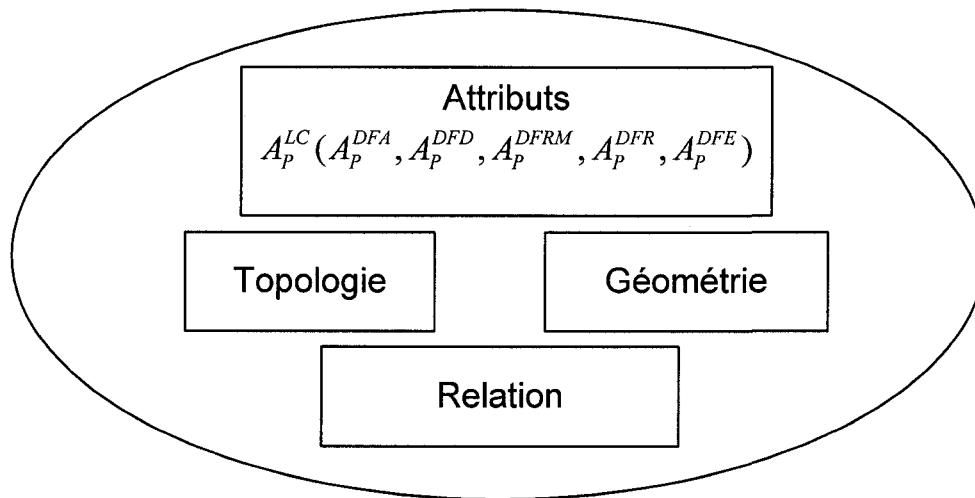


Figure 2.13 Caractéristiques de produit

2.6.2 Application de la Conception pour X

2.6.2.1 Conception pour l'assemblage

Boothroyd et Dewhurst sont les pionniers de la recherche sur le DFA qui prend comme hypothèse fondamentale que le coût le plus bas de l'assemblage peut être obtenu en concevant un produit de telle sorte qu'il puisse être assemblé économiquement par les systèmes d'assemblage les mieux appropriés. On distingue trois types de procédés pour la réalisation de l'assemblage du produit à partir de ses composants de base : l'assemblage manuel, l'assemblage automatique spécialisé et l'assemblage avec des machines programmables.

La méthode de DFA développée par Boothroyd et Dewhurst [5] est résumée de la façon suivante :

- En utilisant un critère élémentaire, l'existence de chaque pièce séparée est remise en cause et le concepteur devra fournir les raisons pour lesquelles la pièce ne pourrait pas être éliminée ou bien combinée à d'autres pièces.
- Le temps d'assemblage est estimé en utilisant une banque de données de temps réels standards développés spécifiquement pour cette raison.
- Un index de DFA (efficacité de conception) est obtenu en comparant la durée actuelle d'assemblage. Les difficultés d'assemblage qui peuvent engendrer des problèmes de fabrication et de qualité sont identifiées.

Dans l'assemblage, deux facteurs influencent le coût d'assemblage d'un produit ou d'un sous assemblage : (1) le nombre total de pièces, et (2) la facilité de manipulation,

d'insertion et d'attachement de cette pièce. Par conséquent, dans la méthode DFA, les alternatives que possède le concepteur en vue de réduire le coût de l'assemblage sont soit d'éviter certaines opérations d'assemblage ou bien de les simplifier. L'utilisation de la méthode DFA de Boothroyd permet de déterminer la méthode d'assemblage la plus appropriée pour un assemblage donné et d'évaluer ensuite l'efficacité de la conception de l'assemblage. Que ce soit pour l'étude de l'assemblage manuel ou automatique, la phase d'analyse comporte trois étapes :

- une estimation du coût pour saisir et manipuler le composant,
- une estimation du coût pour insérer le composant,
- une décision concernant l'élimination ou non du composant ou sa combinaison avec d'autres composants.

Les deux premières étapes se basent sur des critères géométriques (dimensions, symétries, etc.) et technologiques (matériau, processus d'assemblage, etc.). La troisième étape consiste à se poser des questions sur les mouvements relatifs des composants et l'indépendance de l'assemblage du composant.

La figure 2.14 montre les paramètres à considérer pour déterminer la méthode d'assemblage.

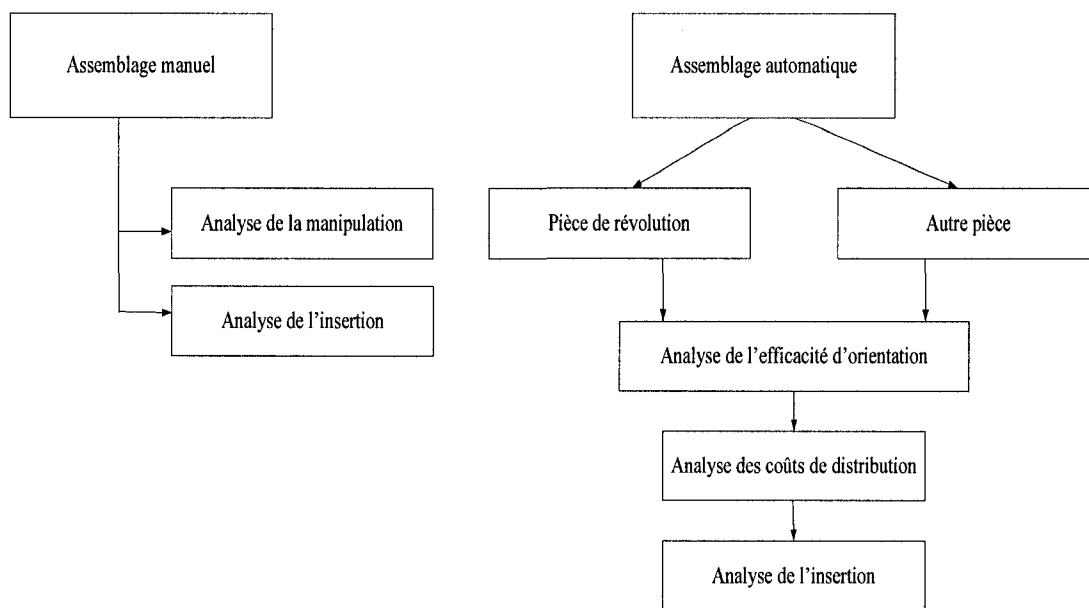


Figure 2.14 Choix de la méthode d'assemblage

2.6.2.2 Conception pour le désassemblage

Il est reconnu que le désassemblage des produits usagés est nécessaire si on veut que le recyclage soit économiquement viable dans les technologies de fabrication très avancées. Le désassemblage est défini par Brennan, Gupta et Taleb [7] comme étant “le processus d’enlèvement systématique des pièces désirées d’un constituant d’assemblage tout en s’assurant qu’aucune déféctuosité n’est apportée durant le processus”.

Dans le passé, les produits et machines étaient conçus en considérant uniquement les opérations d’assemblage. Aujourd’hui, les concepteurs ont besoin de prendre en considération aussi bien le désassemblage que le recyclage. Deux méthodes de base du désassemblage pourraient être utilisées : l’assemblage réversible et l’utilisation de la force brute. Dans le cas de l’assemblage réversible, si l’attachement est vissé, il est alors dévissé; si les deux pièces sont ajustées, elles sont donc séparées à part. Trois problèmes sont rencontrés dans la détermination des gammes de désassemblage :

- libérer les pièces des attachements,
- trouver les pièces se succédant dans la gamme de désassemblage,
- désassemblage des pièces successives,

2.6.2.3 Conception pour la recyclabilité

Récemment, le recyclage est devenu une priorité dans la plupart des pays industrialisés, cela est dû au fait que la quantité des produits usagés mise au rebut s’est accrue de façon extraordinaire. Les résultats d’une analyse de la gamme d’assemblage peuvent être utilisés par les concepteurs en vue d’évaluer le désassemblage et la recyclabilité des produits qu’ils sont en train de concevoir. Les modifications désirées peuvent être

apportées dans les premières étapes de la conception. De nombreux gouvernements ont maintenant adopté des schémas d'étiquetage écologique qui ont pour but d'informer les consommateurs sur le caractère écologique des produits. Il n'est pas possible ou économique de recycler un produit complètement; par conséquent, le but du recyclage devrait donc être de maximiser les ressources de recyclage et de minimiser la masse ainsi que la pollution des produits restants. Zussman, Kriwer et Seliger [8] ont proposé trois objectifs qui devraient être considérés durant l'évaluation de la conception:

- maximiser le profit durant la durée de vie du produit,
- maximiser le nombre de pièces à réutiliser,
- minimiser la quantité des produits mis en décharge.

2.6.2.4 Conception pour l'environnement

Le champ de DFE englobe plusieurs disciplines qui incluent la gestion des risques pour l'environnement, l'écologie, les ressources de conservation, la prévention des accidents et la gestion des déchets. La conception pour l'environnement a pour principal objectif d'étudier les différents impacts négatifs du produit sur l'environnement durant son cycle de vie (extraction des matières premières, assemblage, fabrication, utilisation et fin de vie) en vue de réduire ou bien d'éliminer ces impacts. Elle vise également à concevoir le produit avec le minimum de ressources naturelles et de consommation énergétique. Différents outils sont utilisés en vue d'évaluer les paramètres environnements d'un produit. L'analyse du cycle de vie est un de ces outils et sa mise en application a été définie par la série des normes ISO 14000 (Figure 2.15).

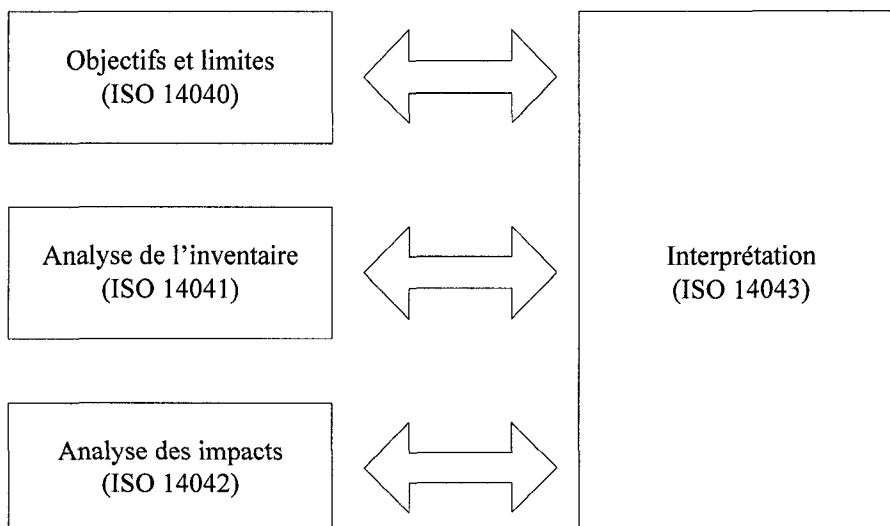


Figure 2.15 Analyse du cycle de vie

Les émissions au niveau de l'air, l'eau ou le sol des produits en fin de vie produisent des impacts négatifs sur l'environnement (figure 2.16). Nous distinguons principalement les impacts suivants:

- l'utilisation de ressources énergétiques non renouvelables ainsi que de ressources naturelles,
- la toxicité humaine qui regroupe les substances cancérigènes et autres substances toxiques,
- les impacts environnementaux dûs aux effets de substances agissant négativement et de façon directe sur l'environnement (tableau 2.1)

Tableau 2.1 Impacts environnementaux et substances nocives

Impacts environnementaux	Substances
Diminution de la couche d'ozone	Gaz chlorofluorocarbone (<i>CFC</i>)
Gaz à effet de serre	Gaz carbonique (<i>CO2</i>)
Produits causant le smog	Composés Organiques Volatils (<i>VOC</i>)
Pluies acides	Sulfates
Eutrophisation (diminution d'oxygène)	Nitrates et phosphates
Eco-toxiques	Métaux lourds
Déchets solides	Enfouissement

En utilisant les bases de données d'impacts environnementaux des matériaux et des procédés de fabrication, d'utilisation et de recyclage, il est possible de déterminer les différents impacts causés par un produit. Le choix des matériaux et des procédés de fabrication permettent également de déterminer les quantités d'énergie mises en œuvre ainsi que les ressources naturelles utilisées. À chaque matériau est attribué un indice environnemental qui indique le niveau d'impact du matériau. Connaissant donc la masse de chaque composant, il est possible de déterminer tous les impacts négatifs des sous assemblages, composant ou du produit.

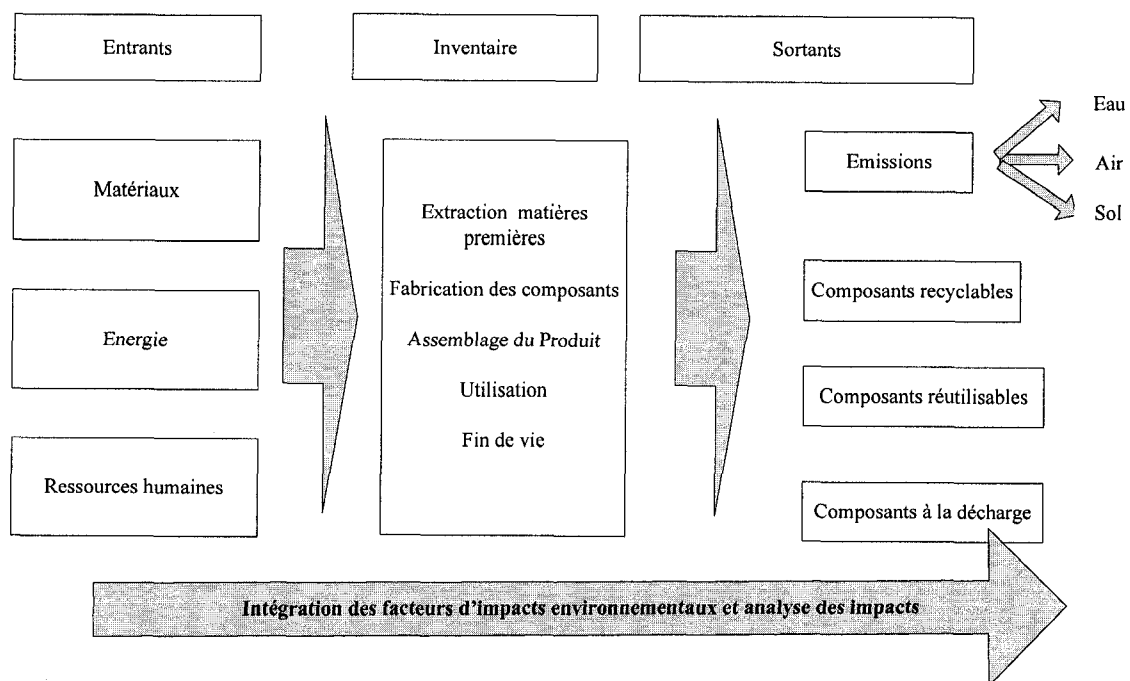


Figure 2.16 Intégration de l'analyse d'impact sur l'environnement

L'évaluation du cycle de vie (ACV) est un ensemble de méthodes ayant pour objectif de réaliser une évaluation exhaustive des matériaux mis en œuvre pour la fabrication des composants, les services liés à la distribution et à l'utilisation, les procédés et techniques de fabrication, la consommation d'énergie. En définitive les coûts d'environnement du produit depuis la conception jusqu'au recyclage, en passant par la fabrication et l'assemblage ne sont pas uniquement supportés par le fabricant et l'utilisateur, mais aussi la société dans son ensemble (tableau 2.2, Jovane et al., [10])

Tableau 2.2 Coût du Cycle de vie d'un produit

Phase du Cycle de vie	Coût pour la compagnie	Coût pour l' usager	Coût pour la société
Besoin	Reconnaissance du marché		
Conception	Développement		
Production	Matériaux, Energie, Bâtiments et salaires		Déchets, Pollution Dommmage sur la santé
Distribution	Transport, stockage Pertes	Transport, stockage	Déchets, pollution, pertes Emballage et dommage de santé
Utilisation	Garantie de service	Energie, matériaux Entretien	Déchets, pollution Dommmage sur la santé
Mise au Rebut		Coût de rebut	Maintenance des déchets, Rebuts, dommage de santé Pollution
Recyclage		Coût de recyclage	Déchets, dommage de santé Pollution.

2.6.2.5 Conception pour la fiabilité et pour la maintenabilité

Le but de la conception pour la fiabilité (Design for Reliability) ou DFR est d'intégrer la fiabilité des composants, produits ou des systèmes dès les premières phases de la conception. La fiabilité est définie comme étant la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité ($f(x)$) qu'il accomplisse une mission requise dans des conditions données, pendant un temps donné. Elle est exprimée sous la forme d'une fonction $R(t)$ qui varie selon les conditions d'opération, les conditions d'environnement et le temps écoulé jusqu'à la défaillance ou bien les cycles de défaillance du système.

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx \quad (2.5)$$

L'équation 2.5 permet de noter clairement que la fiabilité est la probabilité de non-défaillance jusqu'à un temps t . La défaillance étant toute perte ou diminution importante des caractéristiques d'un dispositif, en suite de quoi, il n'est plus capable d'accomplir une mission requise. Selon l'impact et la gravité des défaillances sur la sécurité d'utilisation les conséquences d'une défaillance d'un composant peuvent être qualifiée de critique, majeure ou mineure. La fiabilité prend en compte les besoins du consommateur de telle sorte que le produit puisse remplir toutes les fonctions pour lesquelles il a été conçu. Prédire la fiabilité d'un élément consiste à trouver un modèle qui s'ajuste au modèle de comportement en défaillance réel et estimer le MTTF (*Mean Time To Failure*), c'est-à-dire le temps moyen jusqu' à la défaillance.

La maintenabilité d'un produit caractérise la capacité de s'assurer que le produit reste facilement réparable tout au long de son cycle de vie à un coût raisonnable. Les besoins de maintenance peuvent être classés qualitativement ou quantitativement et sont exprimés en vue de définir les caractéristiques de maintenabilité (tableau 2.3) d'un système ou d'un équipement.

Tableau 2.3 Caractéristiques de conception pour la fiabilité

Accessibilités des sous assemblages ou composant en vue du désassemblage
Détection facile des défauts de fonctionnement
Isolation facile des pannes
Encombrement des sous assemblages remplaçables,
Faciliter de transport des sous assemblages ou composant pour la maintenance

Les concepts DFR et DFMT sont intimement liés c'est pourquoi on utilise le plus souvent la conception pour la fiabilité et la maintenabilité DFRM (design for reliability and maintainability).

Si on peut prédire la fiabilité de la conception d'une certaine configuration, on pourra alors prendre des décisions en toute connaissance de cause soit sur la possibilité d'amélioration future du MTTF ou bien se fier aux activités de maintenance préventive ou curative en vue de maintenir le système en état de fonctionnement à la suite d'une défaillance.

Pour intégrer la fiabilité d'un système dans la conception, l'arbre de défaillance peut être utilisé dans la phase de la conception préliminaire. Elle consiste à décomposer systématiquement le produit ou le service en une combinaison d'événements qui conduisent à la défaillance. Le concepteur pourra prendre une décision sur le meilleur choix de conception à faire en vue de prévenir la défaillance du système.

Au niveau de la conception détaillée, l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets peut être utilisée. La méthode consiste à recenser, pour chaque composant du système, tous les modes de défaillance potentielle et à examiner pour chacun de ces modes les effets possibles sur le système. L'analyse des modes de défaillances et leurs effets (FMEA) est une procédure très largement utilisée en fiabilité pour :

- Analyser les conséquences des défaillances qui peuvent affecter un système
- Identifier les défaillances ayant des conséquences importantes sur la sécurité, la disponibilité, la réussite d'une mission, la maintenance, etc.

La conception des composants mécaniques doit prendre en compte l'environnement dans lequel les systèmes conçus sont appelés à fonctionner. Ces facteurs de l'environnement sont l'humidité, la température, les vibrations, les chocs mais aussi les contraintes auxquelles le système est soumis.

2.7 Modélisation des données de cycle de vie

L'évaluation préliminaire des performances du produit obtenue à la suite de la détermination de ses caractéristiques du point de vue de l'assemblage, la maintenabilité, la fiabilité, l'environnement et le recyclage, nécessite l'utilisation de différents modèles complexes et variés (entrée-sortie, stochastique, etc.). Dans un soucis d'efficacité, on peut donc réduire les informations d'entrée du produit et présenter un modèle qui nous permet de décrire fidèlement les attributs du produit par rapport aux phases de cycle de vie. L'objectif recherché sera d'obtenir des simulations de propriétés à conférer au produit en vue d'estimer une grande partie des attributs qui permettent de déterminer sa performance (assemblabilité, fiabilité, coût, etc.).

L'approche détaillée ainsi que les résultats de cette partie sont présentés au chapitre 3 dans l'article '*Data base representation of Life Cycle Design Features*' présentée dans la revue *International Journal of Integrated Manufacturing*.

2.7.1 Modélisation par l'approche orientée objet

Il existe plusieurs raisons d'utiliser une représentation orientée objet pour obtenir une représentation intégrée de plusieurs caractéristiques dans le processus de conception. Dans le domaine de l'ingénierie, un objet est un constituant d'un système. Plus précisément :

- Un objet est une entité physique identifiable à laquelle on peut attribuer des caractéristiques.
- Un objet est un composant d'un système dont les attributs contribuent à déterminer les caractéristiques du système tout au long de son cycle de vie.
- Un objet possède une frontière définie sans aucune ambiguïté.

- Un objet a une structure particulière qui est indépendante des éléments extérieurs du système.

En utilisant donc une approche orientée objet pour intégrer toutes les informations lors du processus de conception de produit, cela permettra d'établir plus facilement les relations entre les caractéristiques de cycles et entre les objets. L'approche orientée objet est souvent utilisé par les chercheurs en vue de modéliser les systèmes, les produits, etc.

2.7.1.1 Techniques de modélisation

Une graphe de liaisons ou un simple modèle mathématique ne sont pas adéquat pour modéliser un produit. Pour cette raison nous avons opté pour un modèle intégré, dans le sens de la définition du modèle du produit, tout en adoptant la structure de base de données dans le sens de la définition des relations entre les objets et les caractéristiques du cycle de vie. La méthode de modélisation de données '*Natural language Information Analysis Method*' (NIAM) est une méthode de représentation Rôle/Objet (ORM) qui a pour but de représenter les domaines de conception, les classes, entités d'objet, ainsi que les attributs. Les classes, les entités et les attributs permettent de représenter les objets. Une classe donne lieu à une constante et une variable. Un attribut est modélisé comme une variable. Les relations sont définies entre les classes, les attributs et les entités.

Nous avons adopté le formalisme NIAM pour représenter le modèle généré (voir en Annexe). Il permet aussi au concepteur de traduire sa perception du produit. Le formalisme NIAM est particulièrement intéressant dans ce sens qu'il est indépendant de techniques de mise en œuvre. On peut donc utiliser le langage de programmation de son choix pour implémenter le modèle de conception. Il permet également de représenter explicitement tous les types d'entités informationnelles (objets ou attributs), les relations

entre elles, les relations cardinales ainsi que les contraintes sur ces relations (totalité, égalité, exclusion mutuelle, etc.). La relation définissant une variable d'un attribut peut être raffinée en une fonction, une injection, une surjection, ou une bijection, en fonction des propriétés supplémentaires de l'attribut.

La procédure de construction d'une base de données de caractéristiques de cycle de vie du produit a été adoptée en vue de supporter les différentes applications du cycle de vie, les attributs liés au face ou les propriétés des matériaux constitutifs des composants. Cet avantage offre la possibilité de développer des méthodes d'analyse de la conception en se basant sur les caractéristiques de cycle de vie.

2.7.2 Modèle du produit

Le modèle du produit est donc représenté par un ensemble cohérent et unique qui renferme les informations géométriques, topologiques et les informations nécessaire pour la détermination des attributs cycle de vie du produit. Pour automatiser la prise de décision lors de la conception pour le cycle de vie, il est important de fournir au système une structure de caractéristiques de cycle de vie comparable à celle que perçoit le concepteur, mais aussi permettre de réaliser des analyses ou des raisonnements comparables à celles de l'expert. Le modèle de produit est donc constitué par cette structure. On obtient des solutions qui sont les résultats de l'information contenue sur le modèle de produit. Plus souvent, les chercheurs ont développé des applications d'intégration en faisant appel au modèle de produit pour stocker les caractéristiques de produit.

2.7.2.1 Modèle géométrique et topologique

Le modèle géométrique et topologique caractérise la forme solide tridimensionnelle du produit qui est constitué de composants (*solid*). Le modèle de représentation par frontières (*B-rep*) a été adopté dans nos travaux. D'autres informations non géométriques permettant de définir plus généralement le produit y sont représentées. Dans ce modèle chaque composant (*solid*) du produit est représenté par l'ensemble des faces constituant l'enveloppe, chacune des faces étant délimitée par des contours composés d'arêtes. Les informations géométriques (surfaces, courbes, points) découlent des relations entre les attributs topologiques. Les propriétés liées aux faces, les informations de design for X relatives aux composants ainsi que les attributs de cycle de vie au niveau du produit sont ainsi collectées.

2.7.2.2 Modèle technologique

Le modèle technologique comprend les entités qui ne sont pas explicitement présentés dans le modèle topologique et géométrique. Cependant, il s'appuie sur le modèle topologique en lui apportant les contraintes de conception du produit liées à l'ensemble des applications du cycle de vie. Ce modèle se compose des caractéristiques technologiques du cycle de vie et peuvent être intrinsèques ou extrinsèques aux entités du modèle topologique et géométrique. Une caractéristique intrinsèque permet de préciser une qualité propre à une entité. Par exemple une caractéristique de matériau est obligatoire pour caractériser un composant. La caractéristique extrinsèque sert à préciser une contrainte ou une relation avec d'autres entités.

La figure 2.17 montre le modèle du produit, incluant la représentation géométrique et topologique, ainsi que les caractéristiques de cycle de vie, les caractéristiques de conception pour X au niveau des composants et d'autres caractéristiques (en pointillés). Les informations technologiques relatives aux composants et représentant les caractéristiques pour une conception pour X (DFX) donnée sont représentées à la figure 2.18.

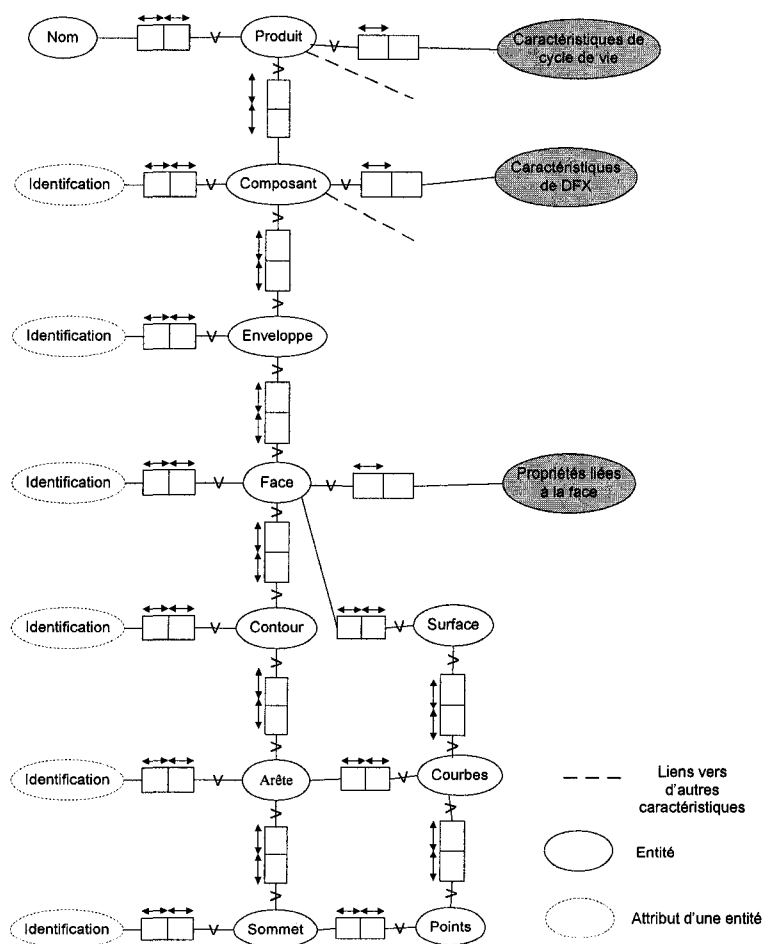


Figure 2.17 Modèle topologique du produit avec des informations non géométriques

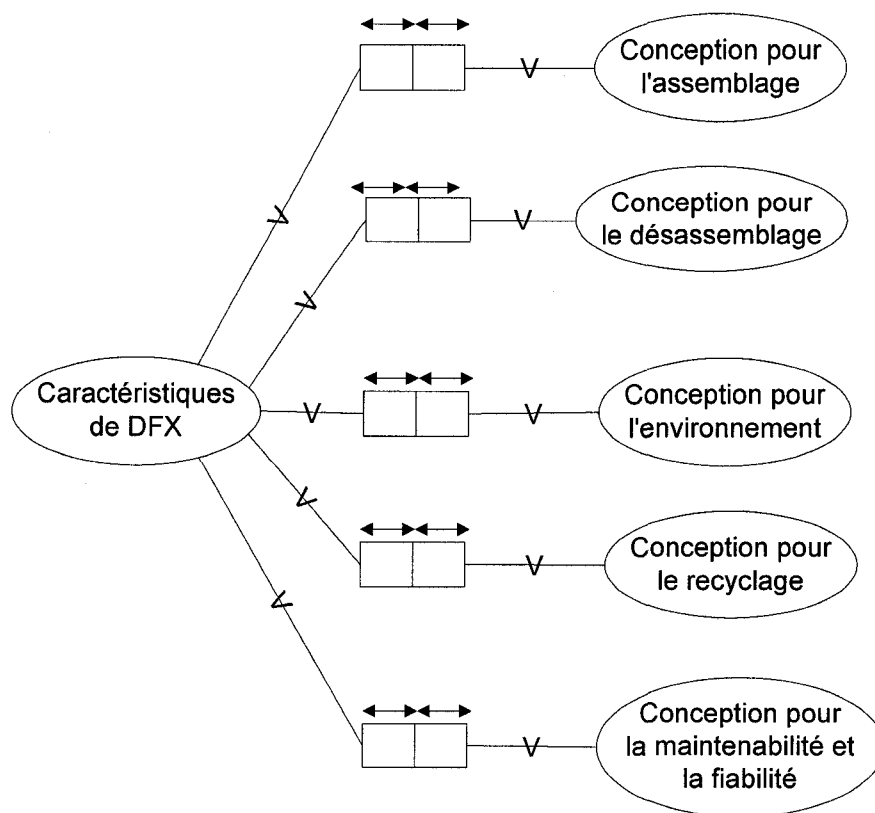


Figure 2.18 Caractéristiques de conception pour X

En assemblage comme en fiabilité, les attributs de face et les caractéristiques de matériaux participent à déterminer le comportement des produits. Les caractéristiques qui sont liées à la face (figure 2.19) ainsi que les attributs de matériaux (figure 3.17 de l'article 1 présenté au chapitre 3) doivent être intégrés dans le modèle de produit.

Les informations liées à une face comprennent :

- Les tolérances géométriques et dimensionnelles,
- Les rugosités de surface,
- Les traitements effectués sur la face,
- Les propriétés mécaniques du matériau déposé sur la face,
- Les ondulations.

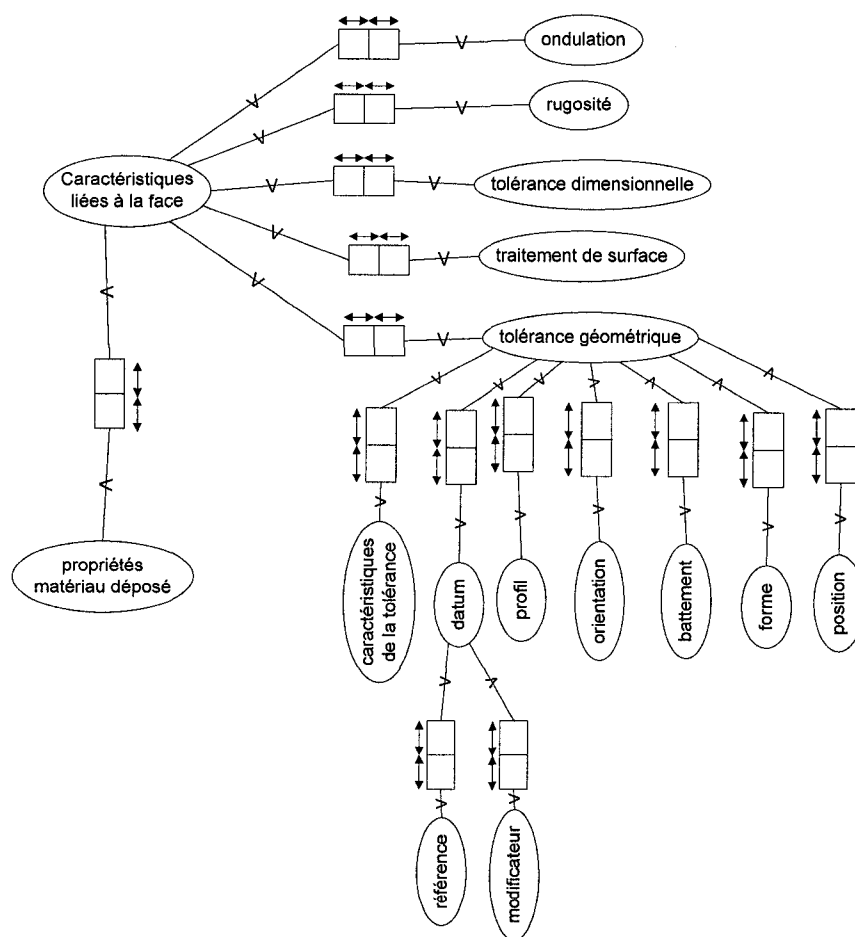


Figure 2.19 Caractéristiques liées à la face

La représentation des caractéristiques de matériaux est déterminante dans la conception du fait qu'elles interviennent dans toutes les applications du cycle de vie du produit, de la conception pour l'assemblage, la maintenabilité, le recyclage, etc.

Finalement, les attributs de cycle de vie sont représentés par l'ensemble des informations portant sur l'efficacité d'assemblage, le temps moyen de défaillance, les dommages environnementaux, le taux de recyclabilité, etc.

La figure 2.20 montre la représentation des caractéristiques de cycle de vie au niveau du modèle.

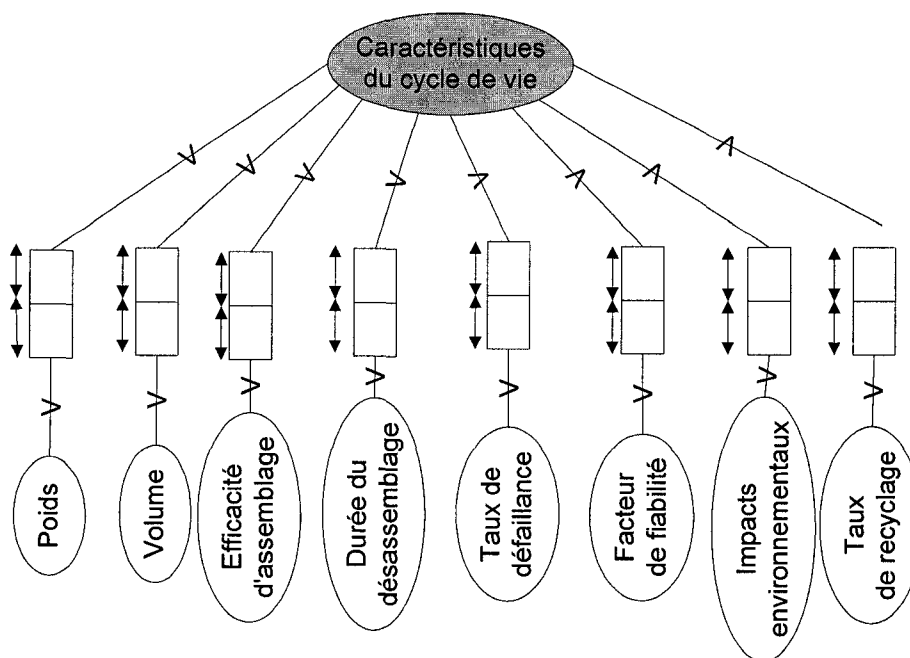


Figure 2.20 Caractéristiques de cycle de vie du produit

Ces attributs de cycle de vie découlent des caractéristiques de conception pour X mais aussi des caractéristiques de matériaux ainsi que des attributs géométriques et topologiques.

Les figures 3.10 et 3.11 de l'article "*Data Base Representation of Life Cycle Design Features*" illustrent respectivement les caractéristiques de conception pour un assemblage effectué manuellement et un assemblage de produit effectué de façon automatique. L'efficacité d'assemblage (*assembly efficiency*) est déterminée à l'aide de l'exploitation des caractéristiques de conception pour l'assemblage.

Conclusion

Dans cette section, nous sommes partis de la définition générale d'une caractéristique de produit pour introduire la notion de caractéristique de cycle de vie qui permet de représenter les informatiques technologiques nécessaires à la conception du produit.

Nous avons aussi identifié de façon extensive l'ensemble des caractéristiques de cycle de vie et de matériaux liées au produit, au composant et à la face . Le modèle du produit ainsi obtenu peut être représenté par l'ensemble des informations qui sont nécessaires pour la déterminations des caractéristiques de cycle de vie du produit telles que l'efficacité d'assemblage, le taux de recyclage, les impacts environnementaux.

Les résultats obtenus ont été présentés dans l'article '*Data base representation of Life Cycle Design Features*' du chapitre 3.

2.8 Analyse de la conception

Nous avons défini dans les sections précédentes un modèle de produit ayant comme base une structure hiérarchique, qui permet de mettre en évidence la structure du produit (produit, assemblage, face, etc.), ainsi que des caractéristiques du cycle de vie liées au produit. Ces caractéristiques permettent de déterminer les informations non géométriques et implicites qui doivent accompagner le processus de conception de produit en vue d'évaluer la conception selon chaque aspect du cycle de vie choisi mais aussi de déterminer une mesurabilité de la conception du modèle de produit en prenant en compte l'ensemble des attributs de conception pour X.

Dans cette section, nous décrivons les méthodes et procédures qui sont mises en œuvre pour effectuer l'analyse du modèle du produit selon plusieurs applications de cycle de vie en vue d'émettre une décision de conception sur le modèle.

L'approche détaillée ainsi que les résultats de cette partie sont présentés dans l'article '*Product Design Analysis Based on Life Cycle Features*' soumis à la revue *Journal of Engineering Design*.

2.8.1 Attributs de conception

Les exigences de conception ainsi que les caractéristiques en rapport aux applications de cycle de vie qui seront prises en considération sont répertoriées sur le tableau 2.4. Il s'agit pour chaque application de DFX donnée, de définir l'outil d'analyse ou d'appréciation qui permet d'évaluer la conception du produit. Par exemple, les outils DFA de Boothroyd permettent de calculer l'efficacité d'assemblage, de même que les

outils d'analyse de cycle de vie permettent de calculer les différents impacts du produit sur l'environnement. La figure 2.21 donne un aperçu des différentes applications de conception pour x qui sont mises en œuvre suivant l'étape de la phase de conception dans laquelle se trouve le concepteur.

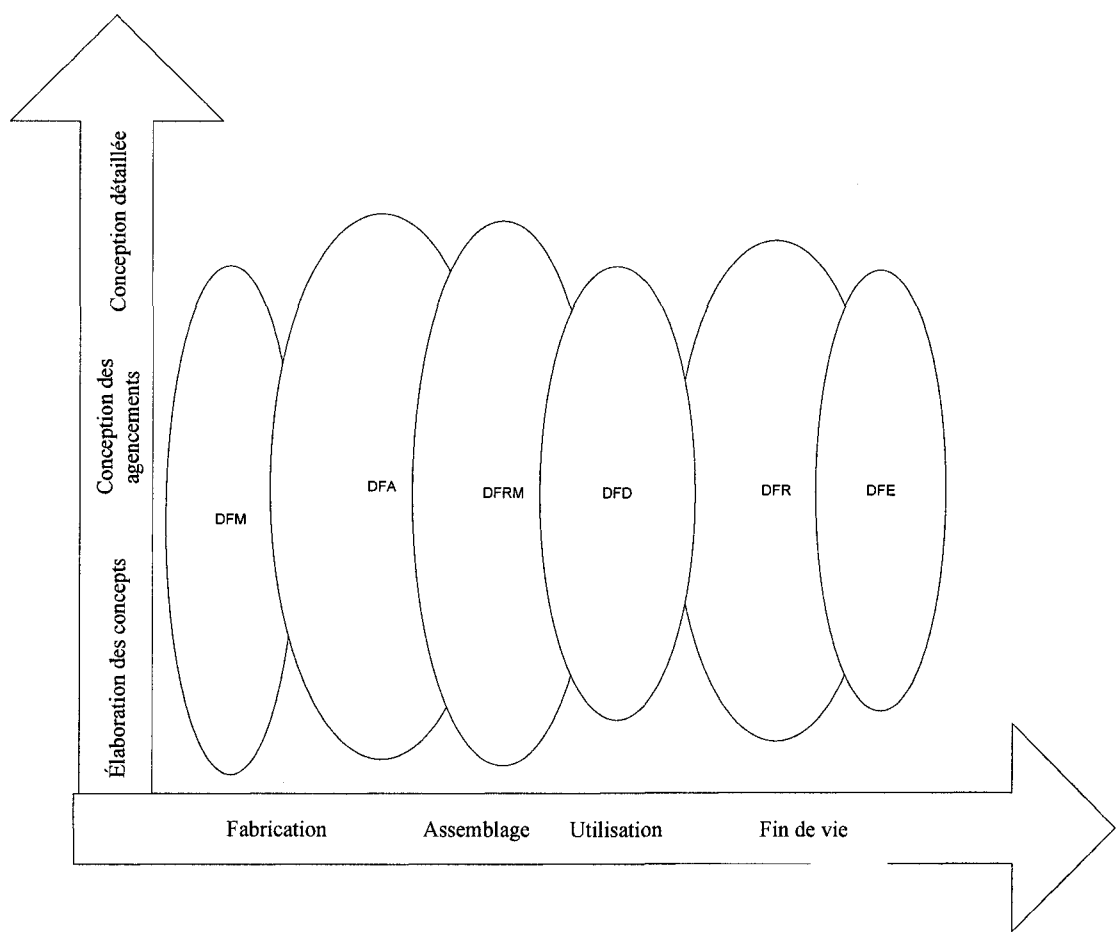


Figure 2.21 Conception pour X, cycle de vie et phases de la conception

Mathématiquement, nous pouvons exprimer l'ensemble des entités du produit par les ensembles suivants :

$C_n = (C_1, \dots, C_n)$ l'ensemble de tous les composants du produit.

$A_n = (A_1, \dots, A_n)$ l'ensemble des attributs.

La détermination des A_n , qui sont fonction des stratégies de conception ainsi que des propriétés technologiques est nécessaire en vue d'une évaluation précise du modèle sur chaque aspect du cycle mais aussi sur la totalité de son cycle de vie.

Dans la mise en oeuvre du processus de conception du produit, le concepteur ou les acteurs, agissant dans la conception, sont au courant des exigences du produit pour la conception X. Cela permet de déterminer la meilleure structure ainsi que les meilleures caractéristiques du produit, des composants etc., qui concourent à la satisfaction des besoins de conception. Puisque le modèle de produit est structuré hiérarchiquement en composants et faces, l'analyse de la conception du produit par rapport à un cycle de vie considéré peut être conduite en vue de prédire l'efficacité ou la performance du produit par rapport à l'application de la conception pour X ainsi prise en considération.

Les données servant à quantifier les attributs de cycle de vie sont complètes et regroupent l'ensemble des informations sur le produit qui sont pertinentes pour déterminer les attributs liés à l'assemblage, au désassemblage, à la maintenabilité, au recyclage et à l'environnement. Le tableau 2.4 indique les stratégies de conception pour X qu'il faut adopter pour apprécier la performance du produit à chaque application du cycle de vie.

Tableau 2.4 Stratégies de conception

Stratégies de conception	DFA	DFD	DFR	DFRM	DFE
Faciliter la manipulation	x	x	x	x	
Minimiser le temps d'insertion	x				
Facilité pour joindre les composants	x	x	x		
Minimiser le nombre de composants	x	x	x	x	x
Minimiser les directions d'assemblage	x				
Minimiser les mouvements d'assemblage	x				
Accéder facilement aux sous faces libres	x	x	x	x	
Concevoir des composants symétriques	x				
Eviter les obstructions	x	x	x	x	
Eviter les mouvements simultanés	x	x	x	x	
Eviter les matériaux incompatibles				x	x
Faciliter le positionnement des composants	x		x		
Faciliter l'accès aux composants	x	x	x	x	
Exigence d'outils pour le désassemblage		x	x	x	
Eviter les matériaux toxiques	x		x	x	x
Réduire le type de matériaux mis en oeuvre				x	
Minimiser les matériaux pouvant causer des accidents	x	x	x	x	
Faciliter la maintenance		x	x		
Libérer les espaces pour la manipulation des outils	x	x	x	x	
Minimiser le temps de désassemblage		x	x	x	
Réduire les matériaux non recyclable				x	x
Réduire le poids des composants	x	x	x		
Faciliter l'accès aux composants d'attachement	x	x	x	x	
Faciliter de manipulation	x		x		
Utiliser des matériaux biodégradables					x

Faciliter l'insertion	x		x		
Minimiser le nombre de pièces d'attachement	x	x	x	x	
Eviter les pièces pouvant s'entremêler	x		x	x	
Minimiser les composants non recyclable				x	x
Minimiser le coût de recyclage				x	x
Éviter la nécessité d'outil spécialisé	x	x	x	x	
Libérer les accès autour des pièces de connection	x	x	x		
Éliminer les possibilités de défaillance critique			x		
Utiliser des composants testés robustes			x		
Minimiser les conditions de charges extrêmes			x		
Minimiser les situations causant de l'usure ou la défaillance			x		

Les caractéristiques de cycle de vie découlent des stratégies de conception et en même temps des caractéristiques technologiques et géométriques résumées sur le tableau 2.5.

Tableau 2.5 Attributs géométriques et technologiques d'un composant selon plusieurs aspects de conception pour X.

Directions d'assemblage	Outils de désassemblage	Nombre d'interface	Composants non sécurisés
Nombre de composant	Pièces identiques	Accessibilité des outils	Résistance des matériaux
Etat de surface	Matériaux toxiques	Outils standard	Autres propriétés
Symétrie	Points de désassemblage	Alignement difficile	Module élastique
Centre de gravité	Direction de désassemblage	Fixé automatiquement	Alpha symétrie
Poids	Éléments d'attachement	Ajouté non fixé	Béta symétrie
Volume	Espace de travail	Composants flexibles	Tolérances
Matériaux	Temps de manipulation	S'entremêlent	Traitement de surface
Composition des matériaux	Prépositionnement	Composants flexibles	Matériaux déposés
Résistance des matériaux	Temps d'insertion	Emboîtés	Utilisation de force
Dimensions	Accessibilité des composants	Attachés fermement	Manipulation une main
Surface libre	Accessibilité des jonctions	Assistance mécanique	Manipulation deux mains
Robustesse	Matériaux compatible	Grossissement optique	Utilisation force brute

La symétrie alpha est la symétrie de rotation d'un composant autour d'un axe perpendiculaire à l'axe d'insertion.

La symétrie bêta est la symétrie de rotation du composant autour de son axe d'insertion.

2.8.2 Evaluation des caractéristiques du cycle de vie

En tenant compte des informations obtenues précédemment, il est possible d'évaluer quantitativement ou qualitativement, les caractéristiques de conception selon l'aspect de l'application du cycle de vie prise en considération. Nous décrivons ci-dessous les formules, index ainsi que les étapes mis en œuvre pour la détermination des propriétés de conception du modèle de produit.

2.8.2.1 Efficacité d'assemblage

L'objectif principal de l'intégration de la conception pour l'assemblage est de réduire le nombre de composants et par voie de conséquence le temps d'assemblage donc le coût du produit. L'efficacité d'assemblage manuel (A_{eff}) dépend des caractéristiques topologiques et géométriques des composants, mais aussi d'autres caractéristiques technologiques. L'équation 2.6 permet d'exprimer en terme de nombre de composants théoriques minimal (N_{min}), le temps de base pour l'assemblage t_a qui est de 3 secondes dans la formule de Boothroyd ainsi que la durée nécessaire pour réaliser de l'assemblage t_{ma} (Equation 2.6).

$$A_{eff_manuel} = \frac{N_{min} t_a}{t_{ma}} \quad (2.6)$$

Pour l'assemblage automatique, les temps d'insertion et de manipulation ne permettent pas la détermination du coût d'assemblage comme dans le cas de l'assemblage manuel . C'est plutôt la vitesse des machines d'assemblage ou le cycle de production qui entrent en jeu dans la détermination de l'efficacité d'assemblage. L'efficacité de l'assemblage automatique A_{eff_auto} exprimée dans l'équation 2.7 est fonction du coût estimé des opérations C_{ma} , du nombre minimal théorique de composants N_{min} et du coût optimisé C_a qui est de 0,009 selon la méthodologie de Boothroyd.

$$A_{eff_auto} = \frac{N_{min} C_a}{C_{ma}} \quad (2.7)$$

Dans le processus de la modélisation en assemblage, l'étude de la chronologie des différentes opérations aboutissant à la constitution du produit permet de générer la gamme d'assemblage. Le nombre de gammes admissibles pour un produit donné peut être important ce qui implique que le coût d'assemblage peut varier considérablement en fonction de la gamme choisie.

2.8.2.2 Index de désassemblage

La prise en compte du désassemblage des produits est nécessaire pour rendre efficace les opérations de recyclage, de maintenance, de réutilisation, etc. Une conception pour le désassemblage sélectif permet de réduire le coût de recyclage et de maintenance du produit. La gamme de désassemblage du produit est déterminée en tenant compte des liaisons réversibles des composants, de l'accessibilité et du poids. L'index de désassemblage peut être obtenu en évaluant les paramètres tels que les coûts de désassemblage ainsi que le temps des opérations de désassemblage.

L'index du désassemblage D_{ind} représente uniquement un facteur de caractéristique de désassemblage. Il peut être exprimé en fonction du nombre de composants N , de l'accessibilité A , la facilité de désassemblage E ainsi que la durée de l'opération D_i .

$$D_{ind} = F(N, A, E, D_i) \quad (2.8)$$

2.8.2.3 Taux de recyclage

L'analyse de la recyclabilité permet d'obtenir le taux de récupération des matériaux qui est exprimé en fonction du pourcentage des matériaux, des poids, des taux de recyclage ainsi que de la valeur des matériaux récupérés. La sélection des matériaux pour les composants, le choix des éléments d'attachement mais aussi le regroupement de matériaux similaires qui peuvent être recyclés en même temps sont à considérer. Le taux du matériau recyclable (R_{rec}) exprimé par l'équation 2.9, peut aussi être utilisé pour mesurer la recyclabilité du produit. C'est le rapport entre la masse des matériaux recyclable (M_{rec}) sur la masse totale du produit (M_{total}).

$$R_{rec} = \frac{M_{rec}}{M_{total}} \quad (2.9)$$

2.8.2.4 Fiabilité

Afin de réduire ou de minimiser les possibilités de défaillance du produit, la conception pour la maintenabilité et la fiabilité doit être prise en compte au niveau du modèle de produit durant la phase de conception. L'analyse des modes de défaillance et de leurs

effets est un outil intéressant qui permet au concepteur pour l'identification de chaque mode de défaillance à tous les niveaux du produit (produit, sous assemblage, composant). Les conséquences des modes de défaillances sur le produit permet au concepteur d'améliorer le comportement en fiabilité des composants qui sont jugés critiques ou dont la défaillance entraîne un effet sévère sur le fonctionnement du produit. Tableau 2.6 permet d'identifier les principaux modes de défaillances des composants mécaniques, les conditions de chargement ainsi que les indices qui sont liés à la gravité de la défaillance sur le produit. L'exploitation de ces indices permet de faire une appréciation sur le comportement en fiabilité d'un composant donné et d'améliorer la conception du produit du point de vue de la fiabilité.

Tableau 2.6 Modes de défaillance et effets sur le produit

Modes de défaillance	Conditions de chargement	Gravité de la défaillance et indice
Rupture brutale	Vibration	Sans gravité (4)
Rupture par fatigue	Température	Mineur (3)
Usure adhésive	Humidité	Moyenne (2)
Usure par laminage	Flexion	Majeur (1)
Usure par fatigue	Torsion	
Fléchissement	Compression	
Déformation plastique	Tension	
Déformation élastique	Fatigue	
Frottement		
Diffusion		

2.8.2.5 Impacts environnementaux

Les propriétés environnementales des matériaux constitutifs des composants du produit ont un effet direct sur l'impact environnemental du produit tel que l'énergie utilisée durant la fabrication, les émissions dégagées ainsi que la recyclabilité des composants.

L'impact environnemental (EI_{LC}) du produit durant le cycle de vie peut être exprimé par l'équation 2.10.

$$EI_{LC} = EI_{Mat} + EI_{Manuf} + EI_{Use} + EI_{EOL} \quad (2.10)$$

Les termes EI_{Mat} , EI_{Manuf} , EI_{Use} , EI_{EOL} représentent respectivement, les impacts environnementaux des matériaux mis en oeuvre pour la fabrication, les impacts dûs aux procédés de fabrication, les impacts pendant l'utilisation et les impacts après la fin de vie EOL (réutilisation, recyclage, décharge).

La performance environnementale d'un matériau ou indicateur écologique ei_{Mat} peut être évaluée en utilisant la méthode des éco-indicateurs (Eco-Indicator 99). De la même façon, ei_{Manuf_j} représente l'éco-indicateur du procédé de fabrication j relatif au matériau i par cycle de procédé. Ce qui revient à exprimer les impacts de matériaux (équation 2.11) et de fabrication (équation 2.12) par:

$$EI_{Mat} = \sum_{i=1}^n EI_{Mat_i} \text{ avec } EI_{Mat_i} = ei_{Mat_i} \cdot W_i \quad (2.11)$$

$$EI_{Manuf} = \sum_{j=1}^m ei_{Manuf_j} \cdot \lambda_{Manuf_j} \quad (2.12)$$

λ_i est le paramètre lié au procédé de fabrication du composant i .

W_i est le poids du composant.

L'impact environnemental EI_{Use} est déterminé selon l'utilisation spécifique du produit.

2.8.3 Performance de la conception

La performance du produit par rapport aux applications du cycle de vie prises en considération peut être déterminée en se basant sur les attributs de conception et les variables de conception pour X. En prenant en considération l'ensemble du domaine de cycle de vie, les attributs de cycle de vie d'un produit permettent d'exprimer une équation de conception qui tient compte de toutes les applications du cycle de vie (équation 2.13).

$$A_i^{DFX} = F (a_{ij}), \text{ avec } a_{ij} = a_{i1} \dots a_{im} \quad (2.13)$$

m représente le nombre d'application de DFX prises en compte pour le composant i et a_{ij} les éléments de la matrice de conception.

Finalement, dans notre contexte, on peut produire une fonction γ (équation 2.14) qui représente la performance de la conception par rapport aux attributs de cycle de vie déterminés précédemment.

$$\gamma = \lambda_1 A_{eff} + \lambda_2 D_{eff} + \lambda_3 R_{rec} + \lambda_4 Re a_{fac} + \lambda_5 E_{LC} \quad (2.14)$$

Les paramètres $\lambda_1 \dots \lambda_5$ représentent respectivement les indices variant de 0 à 1 qui expriment l'importance de l'aspect du cycle de vie pris en considération. Ils doivent être normalisés de sorte que leur somme soit égale à 1.

L'équation 2.15 est la généralisation de l'équation 2.14 et intègre un nombre fini n d'applications de cycle de vie:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \lambda_i E_i \quad (2.15)$$

E_i représente l'efficacité de conception par rapport à l'application du cycle de vie i

λ_i est le facteur qui détermine l'importance de l'application du cycle de vie i sur la conception du produit.

Conclusion

Dans cette section nous avons examiné les exigences de la conception ainsi que les caractéristiques de design for X qui permettent de déterminer une caractéristique définie du produit par rapport à une application du cycle de vie. Une telle méthodologie permet d'assurer une intégration et la mise en œuvre du système d'évaluation des caractéristiques du cycle du produit. Finalement, ces caractéristiques sont intégrées dans une fonction permettant d'évaluer la conception par rapport aux aspects pris en

considération en fonction d'indices qui sont introduits pour exprimer l'importance relative entre les aspects du point de vue des exigences de la conception.

Les résultats de cette partie sont présentés dans l'article '*Product Design Analysis Based on Life Cycle Features*' présenté au chapitre 4.

Les chapitres 3 et 4 présentent les résultats des travaux sous forme d'articles soumis aux revues scientifiques.

Au chapitre 5, nous décrivons de façon détaillée la maquette logicielle assurant les fonctionnalités que nous proposons. Plus précisément, nous parlons des commandes, des classes d'objets ainsi que des attributs mais surtout de son fonctionnement au sein du modeleur OpenCascade. Aussi, nous présentons une procédure détaillée pour l'intégration et l'analyse des caractéristiques de cycle de vie dans le modèle CAO du produit. Les limites de l'application informatique sont aussi présentées dans ce chapitre.

Nous terminons par une conclusion sur les travaux de cette thèse ainsi que des recommandations.

CHAPITRE 3 : ARTICLE 1 - DATA BASE REPRESENTATION OF LIFE CYCLE DESIGN FEATURES

(Soumis à la revue *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*)

Mamadou Sy, Christian Mascle

Ecole Polytechnique de Montréal, Department of Mechanical Engineering

C.P. 6079, Succ. Centre-Ville, Montréal, Québec, H3C 3A7 Canada

Phone: 514-340 4711, Fax: 514 340-5867

mamadou.sy@polymtl.ca, Christian.Mascle@polymtl.ca

Abstract:

Current computer aided design systems are efficient in capturing the geometrical content of a product but they are not suitable in integrating the useful design information required to optimize the product with respect to the entire life cycle applications, i.e. assembly, disassembly, recycling, maintainability, etc. In this research, a database representation integrating life cycle design activities, geometrical information and topological data of a product is proposed to support the product design. During the design process, the product requirements pertinent to the Design for X applications parameters (assembly, disassembly, environment, etc.), material features and face attributes are defined as the product life cycle design features. The product life cycle features are then integrated in the CAD representation of the product model using C++ object oriented programming language and Open Cascade geometric kernel. The representation of the product features along with the geometrical information can be accessed and retrieved later by the designer. The designer is able to effectively foresee

design problems with regards to the concerned DFX application and Life cycle features and modify the product accordingly. The integration of life cycle product parameters, geometric information and topological information makes our model different from many presented in the research community.

Key words: Product design; Life cycle design; Product modeling; CAD/CAM

3.1 Introduction

Several researchers have agreed that the design process counts for up to 80% of a manufactured product cost and the decisions made at the early stages of the design of a product have a great effect on the entire life cycle of a product. The life cycle of a product can be represented by the main phases of the product development process namely: raw material, manufacturing, assembly, disassembly, disposal and the environmental performance of the product. Despite the advances that have been noticed these recent years in concurrent design approaches and techniques, there is still a great lack of the integration of the life cycle aspects early in the design process. This is mostly due to the following reasons: (1) the traditional approach of the design is only centred on the functionality of the product, (2) the lack of a design tool that can access geometry data as well as life cycle design information and provide a feed back of the product to the designer regarding the engineering design aspects of life cycle application. The design for assembly pioneered by Boothroyd and Dewhurst [1] has contributed in anticipating the assembly issues during the design process and its implementation in the industry has led to many benefits including the simplification of the product, the ease of assembly and reduction of the assembly cost. The studies of the design for X, which deals with the consideration of the various applications of the product life cycle such as assembly, disassembly, environment and recycling during the design process in order to improve the design of manufactured products, continue to receive great attention by the

manufacturing and design communities. Nowadays, with the ever increasing environmental pollution and the problem of recycling and remanufacturing of mechanical products at the end of their life cycle, designers need a new methodology that could integrate effectively the different aspect of the life cycle of the product. In order to achieve sound product design with regards to such enumerated factors, the design engineer must foresee the impacts of his design decisions throughout the entire life cycle of the product. Unfortunately, present CAD systems used by design engineers do not allow direct integration of the design constraints or non geometrical design parameters in order to discover the impact of design decisions on the assembly, environment and recycling. Also, most of the design for X integrated tools aimed to improve the design of the product with regard to the life cycle applications consist of a series of guidelines or methodologies difficult to implement practically. Therefore, a new approach is investigated through this presented research to effectively integrate the geometry product model with its life cycle design variables and design for X parameters. The design parameters for the life cycle applications are defined as the product design features. The product model is represented by a data base consisting of the life cycle design information, product geometry data and the topology information of the product. The geometry and topology data of the product are imported from the CAD representation of the product. Using an object oriented modeling approach the entire product life cycle and design for X information can be represented as the product design features. The product life cycle information can be integrated to the physical representation. With this integration, the designer is aware of the main product characteristic with regard to each life cycle stage and therefore can foresee the impact of his decisions on the assembly, the disassembly, the maintainability, the environment and the recycling. Many design alternatives can be evaluated inexpensively against the important characteristics of the final product. The design tools have been implemented in

a physical model in order to evaluate its practicability. The results show that the product representation model can greatly improve the design since the downstream design applications data and life cycle features as well as the topological and geometrical information of the product are integrated in the product model.

3.2 Related Works

A number of authors have investigated the integration of life cycle applications in the early stage of the design process in order to improve the product aspects in terms of assembly, disassembly, environmental [2-6]. However, most authors provide viewpoints that focus on the analysis of a single life cycle aspects. In order to effectively improve the product model early in the design process the entire downstream applications of the product life cycle must be integrated effectively. Some studies in the integration approach of the product life cycle applications deal with concurrent engineering and product information [7-8]. The works of [7] is concerned of with the optimization of the life cycle based on a set of evaluation indices at each stage of the product life cycle. However, their studies do not provide the product data model necessary to conduct the analysis of each stage of the life cycle application. The approach presented by [8] consists of a framework of product information model that is intended to capture the product attribute, design rational, assembly and tolerance information. Most of the previous studies do not investigate the integration of the geometrical and topological information with the life cycle aspects information which is the main weakness of the present Computer Aided Design tools. Most modern CAD systems are good only at helping designers create detailed geometric models of single parts and assembly. Current product models used in the Computer Aided Design contain only information about the final stage of the design namely the geometry, topology, tolerances, material etc. but

contain little information about the functionality of the product or other design information regarding the entire product life cycle. The design-by-features and feature recognition have been introduced these recent years to provide designers with tools to capture engineering information of product as well as geometry in part models [9]. From the designer's point of view, features can be defined as primitive attributes that serve as the basis for product design in order to improve final product in regard to the life cycle applications. Most researches on features-based design have been concentrated on form feature [10-11]. Material, tolerance, surface finish feature and other life cycle features continue to receive less attention from the design community. In order to give designers a new tool that can integrate the several aspects of the product life cycle early in the design process, the life cycle features must be integrated into the product model. The information regarding the design constraints, alternatives and other life cycle application need to be incorporated and represented by a CAD physical model of the product assembly or component. Jabbour et al. [10] investigated the representation of the assembly features in mechanical product. In their model, the assembly features are defined by technological, geometrical or functional information assigned to the topological structure of the product. Their research focused on the sub-face assembly features. Geometric and form features are developed in [11] to implement the design for assembly methodology. The authors have successfully used an object oriented approach to model the form feature information linked to design for assembly requirements in order to improve the product assembly efficiency. [12] suggest a feature based product representation that integrate high level product entities pertinent to the design for manufacturing and the design for assembly. An integrated approach of the product design which deals with the entire life cycle applications and the geometrical information present in CAD model is hardly addressed presently by the researchers and the design community.

3.2.1 Life Cycle Design Domain

Engineering design is a creative process that begins with the recognition of the needs from the society. The principle of the design and the evolution of the design during the product development phase are described in the axiomatic approach of the design [13]. Axiomatic design provides a framework for describing design objects. During the design process, the problem that needs to be addressed can be divided in four design domains (Figure 3.1). The design process begins with the establishment of functional requirements (FR) in the functional domain to satisfy a given set of needs and ends with the creation of an entity or product that satisfies the functional requirements.

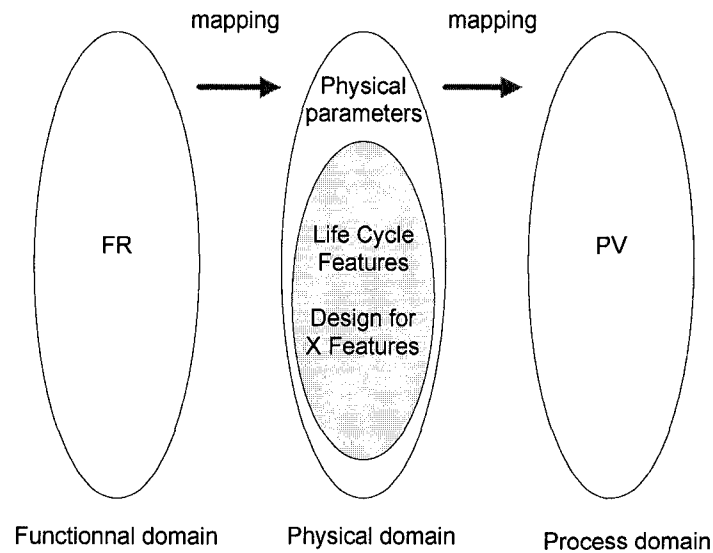


Figure 3.1 Design domains

During the design process, there is a continuous mapping process through the design domains and the product societal needs are compared with the original set of FR through a feed back loop. The physical domain is the domain in which the product features parameters are chosen in order to satisfy the functional requirements. The process domain specifies the manufacturing methods or process variables (PV) that can produce the design parameters (DP). With the increase of the new requirements like environment concerns, optimal disassembly, reliability and other design for X requirements , the design solution becomes more complex because of the additional mapping requirements due to the new life cycle applications. Therefore, during the mapping process, the designer must take into account the product life cycle features which are elements of the product physical domain. The life cycle parameters concerned can be defined as the design requirements that must be met to improve the design in terms of the product life cycle aspects such as for manufacturing, assembly, reuse, recycle. The design of the product in regard to the product life cycle aspects is done by mapping between the functional domain and life cycle and the product form features. Figure 3.2 represents the mapping process between functions, life cycle design parameters and product geometry represented by the form features.

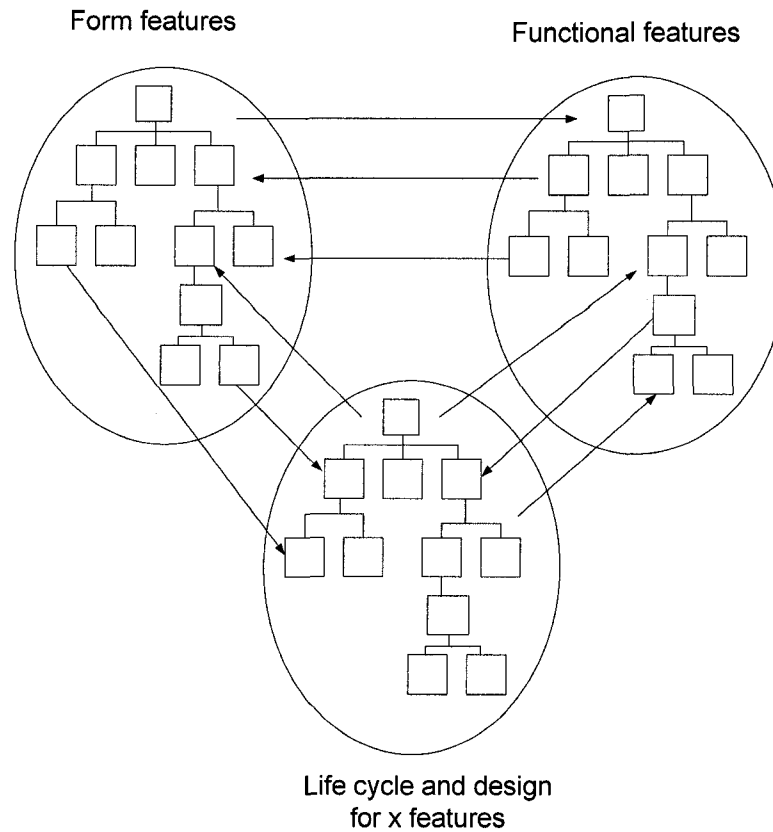


Figure 3.2 Design mapping process

3.2.2 Life Cycle Design Attributes

The design process can be divided into three stages: conceptual design, embodiment design and detail design. In the conceptual design, the customer needs and product attributes are analysed and translated into product function. In this stage, multiple design candidates are proposed and the candidates proven inferior in terms of the design requirements are eliminated or revised. The conceptual design stage of mechanical

product design has been recognized as the most critical domain. Since most mechanical engineering product design are performed through computer aided design, the generation of the preliminary 3-D product model during the design steps incorporating concurrently the design for X and life cycle information can help to improve the product. Early in the product life cycle stages, multiple design alternatives are created according to functional requirements. In order to ensure that a multitude of issues related to the design of the entire product life cycle information is taken into account, it is necessary that life cycle stage parameters are incorporated in the CAD product model. The product life cycle stages consists of the entire phases of the product development from the raw materials acquisition, manufacturing, assembly, usage as well as the disassembly phase and the end of life cycle (Figure 3.3). Mechanical products must be designed with respect to all these phases to achieve superior product. In order to minimize the product assembly cost, the design for assembly and design for manufacturing must be taken into account in the earliest steps of the design process. The DFA introduced by Boothroyd has contributed to boost the efficiency of the product in terms of reduction of the number of parts, the assembly cost and the assembly efficiency. Design for assembly has the objective of reducing the handling time and insertion time which mostly depend on the part form features. In the past products were made with the only consideration of the assembly during the design step. Now designers must consider the disassembly and the recycling of the parts as well. Since disassembly plays an important role in the recycling of the product, many researchers have concentrated their effort in disassembly planning and recycling issues of mechanical products [14-15]. The disassembly process is defined as the process of systematic removal of desirable parts from an assembly while ensuring that there is no impairment of the parts due to the process [14]. It has been recognize that design for disassembly which may be considered as the reverse of the assembly must be included in the design process in order to make recycling more viable. Disassembly

precedence graph is a powerful tool that helps designers to analyze the disassembly and recyclability of the products in the design process so that desirable changes can be made at the early step of the design. Designers must assess the product model according to a given end of life (EOL) scenario during the end of life product design. Due to new environment legislation and public awareness of the industrial impact of products on environment, the producers are expected to recycle or minimize the environment burdens on society of their products at the end of the life cycle. The huge quantity of products that are being discarded each year have prompted an emphasis in the research of design tools and methodologies to improve the environmental performance of mechanical products [16-17]. Life cycle design for the environment is an integrated design approach which goal is to integrate the environment issues of other life cycle applications early in the design process. Life cycle assessment (LCA) is used to assess the materials, services, products and manufacturing processes during the entire life cycle of a product. Material characteristics can provide information on the product environmental impacts and also what materials are needed to be clumped together in the assembly. Advance planning of the disassembly, maintainability, reliability and product end of life analysis requires the knowledge on the material compatibility, life cycle attributes as well as the product treatment at the end of its useful life cycle [18]. The entire product life cycle applications can be quantified as life cycle design attributes and integrated in the product model early in the design process.

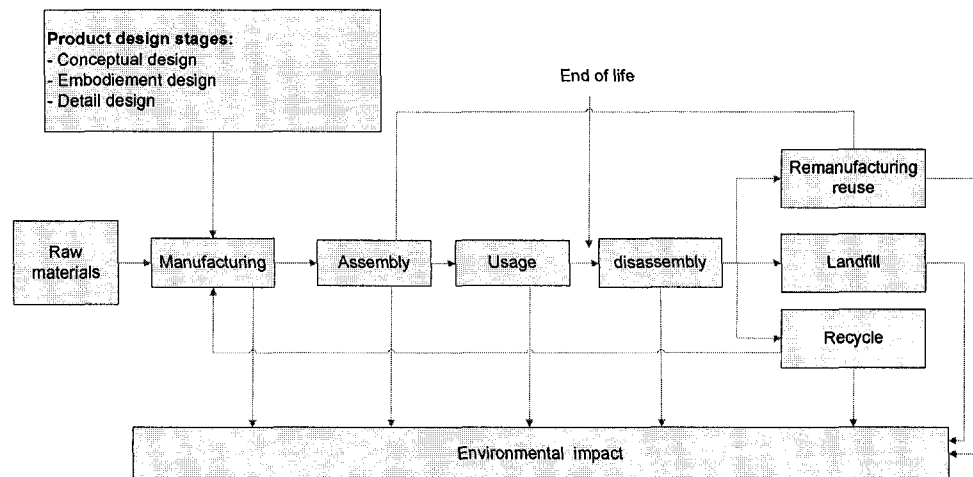


Figure 3.3 Product life cycle and design stages

3.3 Product Model

3.3.1 Mathematical Representation of Design Features

Most CAD-based systems allow only the designer to represent basic geometrical model of a product. They are focused on designing single component using generic build in user-defined features. These features allow the designer to modify the geometry of the features but not the topology and the non-geometrical information of the features. Design by features has been introduced to help the designers build their model with their own features and integrate them in the design process. Although features technologies have been an expanding subject of research in the design and manufacturing community, the definition of features is still not unanimously accepted. In general, features describe the information in relation to the concepts of interest in an application. In the case of the mechanical design, features can relate to the material, the energy and other design information like design intent, life cycle strategies, alternatives, etc. Most studies in

product feature technology have been focused on the form features [19-21]. By using a feature interface to a geometric modeller, the design engineer can be informed by possible shortcomings regarding a predefined life cycle application automatically rather than having to analyze the design manually. Although form features have received great attention from the research and design community, information or energy features have not been fully investigated. Mechanical product are not constituted by form features only, other useful information regarding the life cycle applications, design intent, manufacturing features and other life cycle features applications define also a product model. To make the designer aware of the consequence of his decisions during the design process, high level information and alternatives need to be incorporated as well. In order to ensure that a multitude of issues related to the design of the entire product life cycle information is taken into account, it is necessary to model and incorporate the pertinent life cycle parameters early in the design process. A product model can be defined by all its life cycle features, design attributes, geometric information, topologic information and the relationship between those entities. Life cycle product features (Figure 3.4) can be expressed as:

$$F_p^{LC} = \{T, G, A_p^{LC}, R\} \quad (3.1)$$

Where:

F_p^{LC} is the Life Cycle features of the product P

T is the pointer to the topological feature of the product P.

G is the geometric information

A_p^{LC} is the quantitative value of the Life Cycle Design attributes of the product F_p^{LC} .

R expresses the relationship between features, features attributes and geometrical information.

Since a mechanical product can be decomposed into assemblies, sub-assemblies and parts, the life cycle design attributes is the quantitative expression of every aspect of the product life cycle aspects namely the design for X information: design for assembly attributes (A_p^{DFA}), design for disassembly attributes (A_p^{DFD}), design for maintainability and reliability attributes (A_p^{DFRM}), design for recycling attributes (A_p^{DFR}) and design for environment attributes (A_p^{DFE}).

The product life cycle design attributes can be expressed in terms of design for X variables by:

$$A_p^{LC} = \{A_p^{DFA}, A_p^{DFD}, A_p^{DFRM}, A_p^{DFR}, A_p^{DFE}\} \quad (3.2)$$

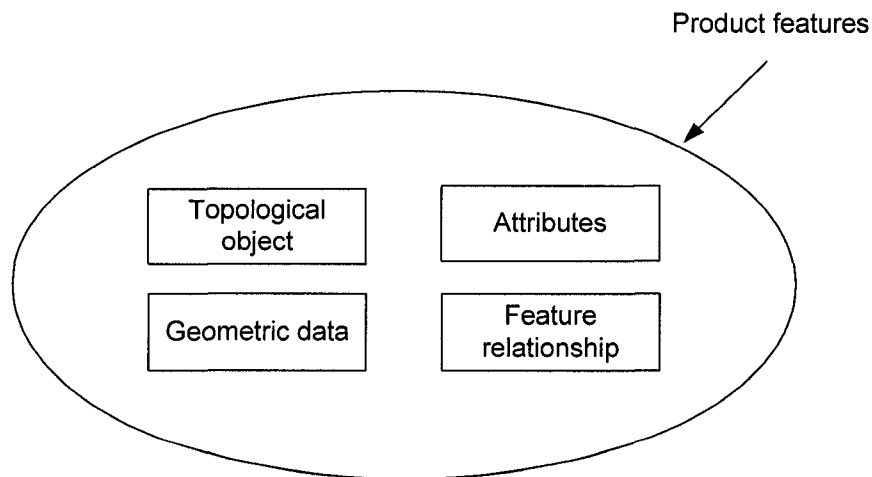


Figure 3.4 Product life cycle features

3.3.2 Product Model Information Structure

Each part of the assembly and the assembly of the product are modeled using commercial CAD software. Through this research, we adopt the boundary model representation (B-rep) which defines a solid by a representation of its bounding face. B-rep models are comprised of two parts: topology and geometry. The main topological data are faces, edges and vertices. The geometry describes the exact shape and position of each of the edges, faces and vertices and consists of surface, curve and points. To meet the objectives of the design integration, the various life cycle applications are investigated and the product features defined. The non-geometric features generated by the proposed model must be integrated in the CAD model during the product modeling stage. To facilitate the integration of this data information, an object oriented modeling approach is used. The relationship between topological elements, meta-data and geometrical elements is represented using an Object Role Modeling (ORM) precisely NIAM (Natural language Information Analysis Method) diagram. This ORM has also been chosen to model the information content of the product – non geometrical and geometrical- because it offers a flexibility to choose a user defined object programming to relate non geometrical attributes to the B-rep data representation. Through this research we define life cycle features as any geometric or technological or functional or design information assigned to a face, a part or a subassembly and whose presence is inherent to the product design process. Figure 3.5 expresses the representation of the product data structure with the product life cycle features, design for x features, product topology, geometry information and the relationship between those entities.

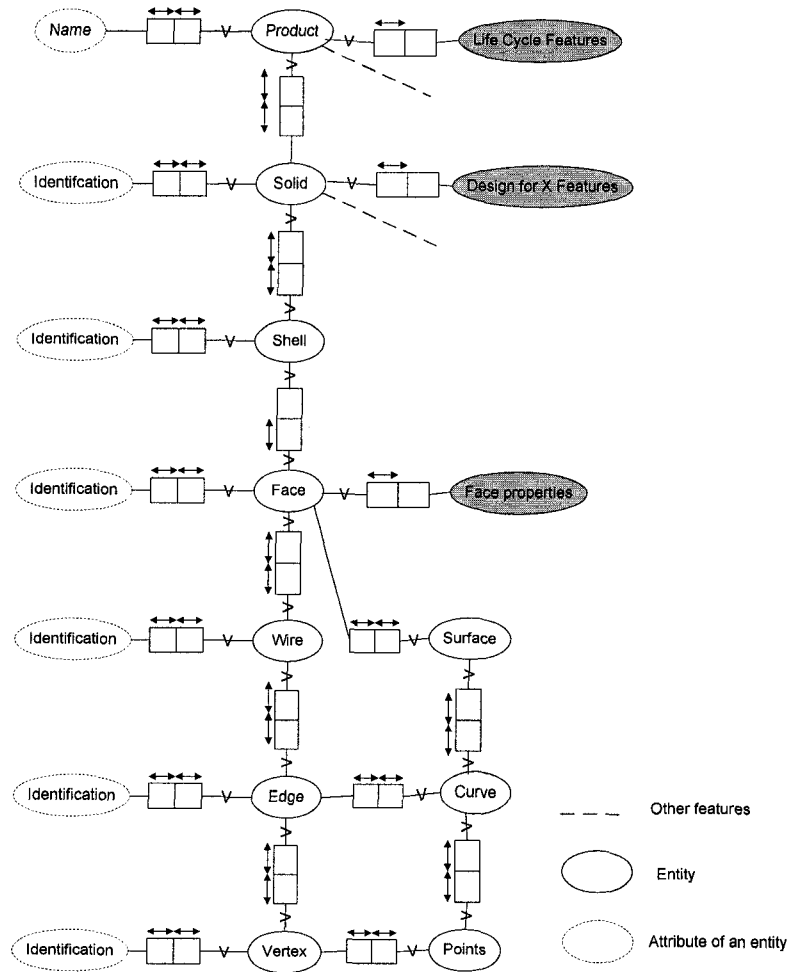


Figure 3.5 Product structure

3.3.3 Life-cycle and design for X features

Every electromechanical product is constituted by assembly, sub-assembly and parts. The part or component is the lowest level of a product assembly. Given the architecture of the product model, the product design attributes can be expressed by a combination of

design variables pertinent to the product life cycle application and design for X attributes. In the assembly or sub-assembly level, Life Cycle Features Class and Feature Type Class are represented. In the part or component level, Design for X features Class and Material Features class are integrated. From the face topological element, Face Attributes Class is introduced. Figure 3.6 describes the product model structure and the class features attached to every object of the product.

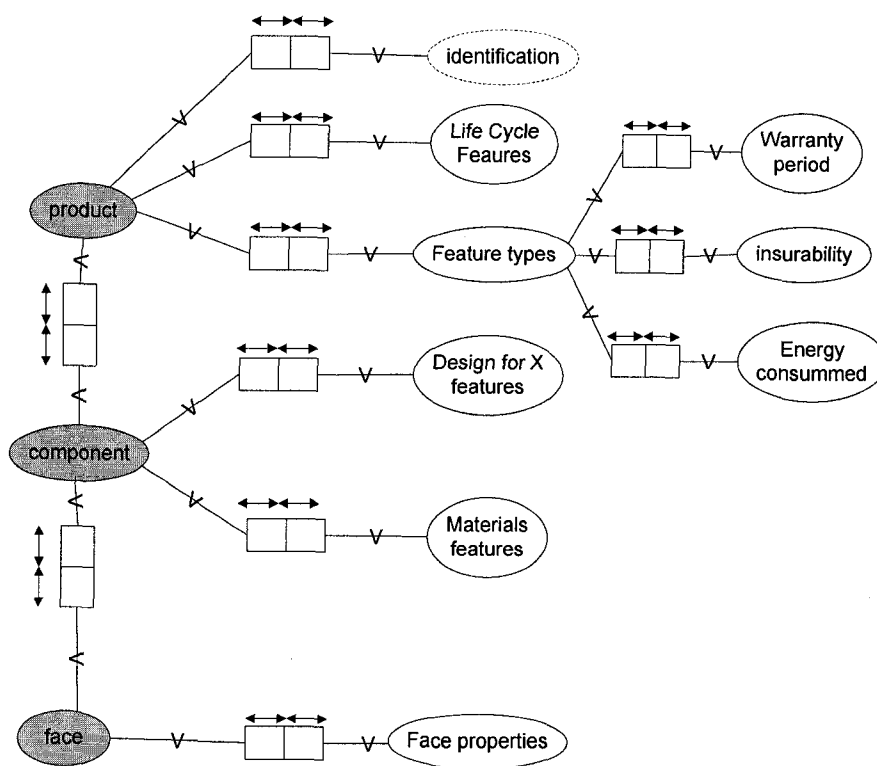


Figure 3.6 Product model features

The Life Cycle Features Class in Figure 3.7 summarizes the pertinent life cycle information that is obtained from the Design for X analysis of all the part components from the assembly product. The life cycle feature class attributes are comprised by the relevant design for assembly information, design for disassembly, design for environment, design for reliability and design for recycling information. Those attributes can be summarized by: the assembly efficiency, mean time to failure for the product, the disassembly time, failure rate, environmental damages and the percentage of recyclable material constituent. The design attributes in the sub-classes of the life cycle features class are the quantitative information derived from the design for X analysis. Other design features are important for the designer such as the identification, feature type which comprise of the product warranty, insurability and amount of energy consumed during the normal usage of the product.

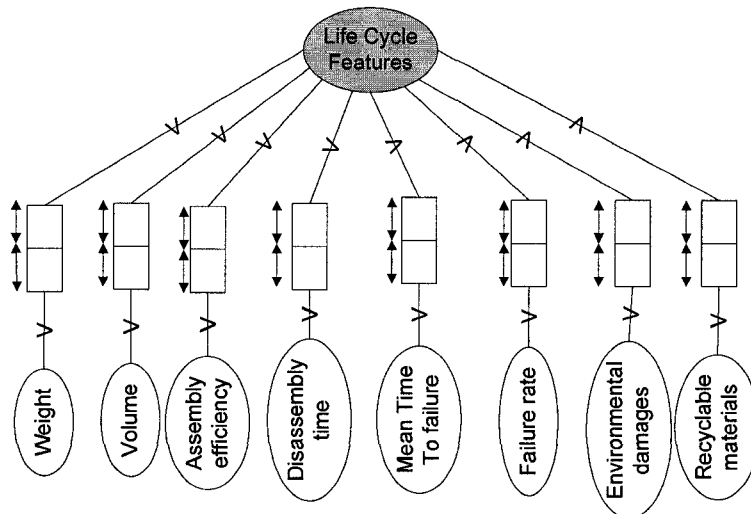


Figure 3.7 Life cycle features

Concurrent design efficiency can only be achieved if the design takes into account the component DFX features. The knowledge of the design for X features can provide an efficient tool to improve the product model in any aspects of the DFX application. The DFX features are expressed in Figure 3.8 and consist of the following features:

- Design for assembly
- Design for disassembly
- Design for environment
- Design for recycling
- Design for maintainability and reliability

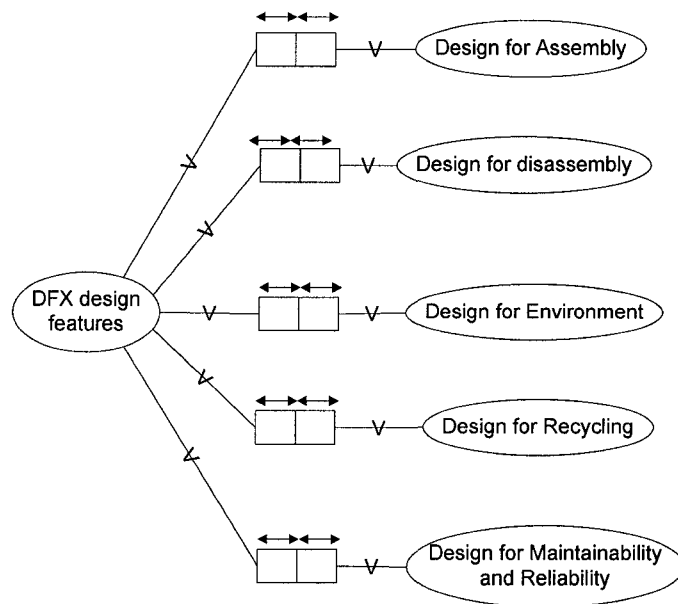


Figure 3.8 Design for X features

The analysis of the design in term of the assembly has to be taken in consideration in order to minimize the assembly cost. The design for assembly requirements is based on the premise that the lowest assembly cost can be achieved if the product is assembled in the most efficiency ways. The key factors that can influence the assembly efficiency are the handling time and insertion time for manual assembly. Those factors are function of the product geometrical features, insertion axis and other mechanical aspects (weight, etc.). Although design for assembly is an important factor to consider during the product design process when the product is to be manually assembled, it is also vital to consider the case when the product is to be assembled automatically. Figure 3.9 represents the design for assembly features that need to be integrated and Figure 3.10 and Figure 3.11 represents respectively the design for manual assembly features and design for automatic assembly features.

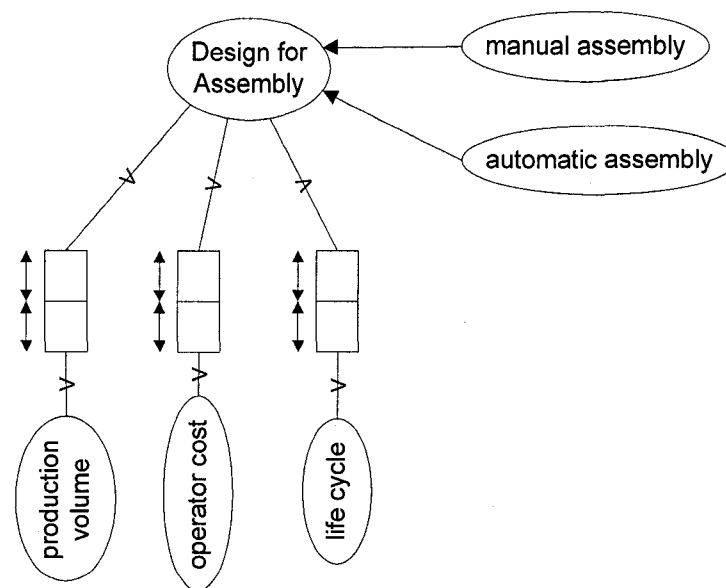


Figure 3.9 Design for assembly features

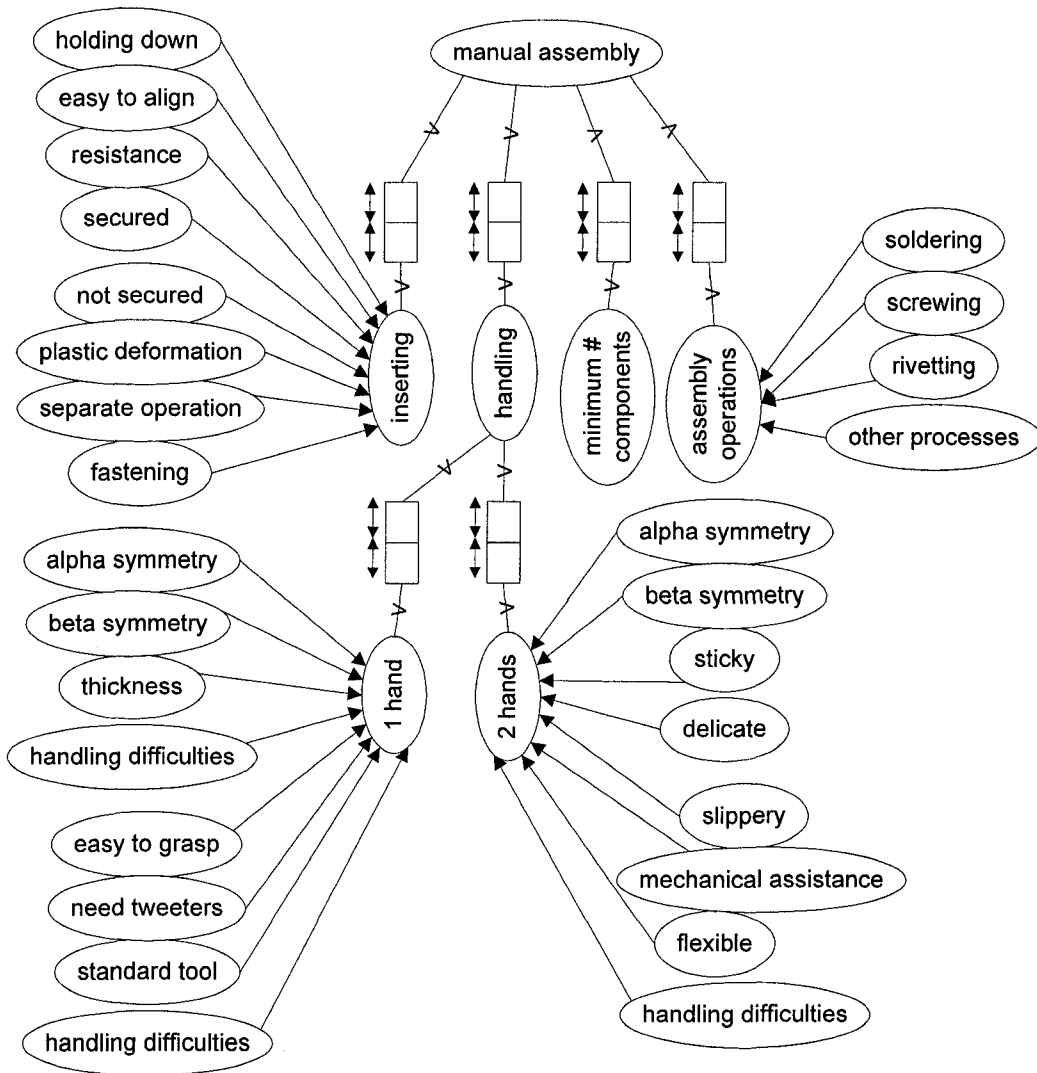


Figure 3.10 Design for manual assembly

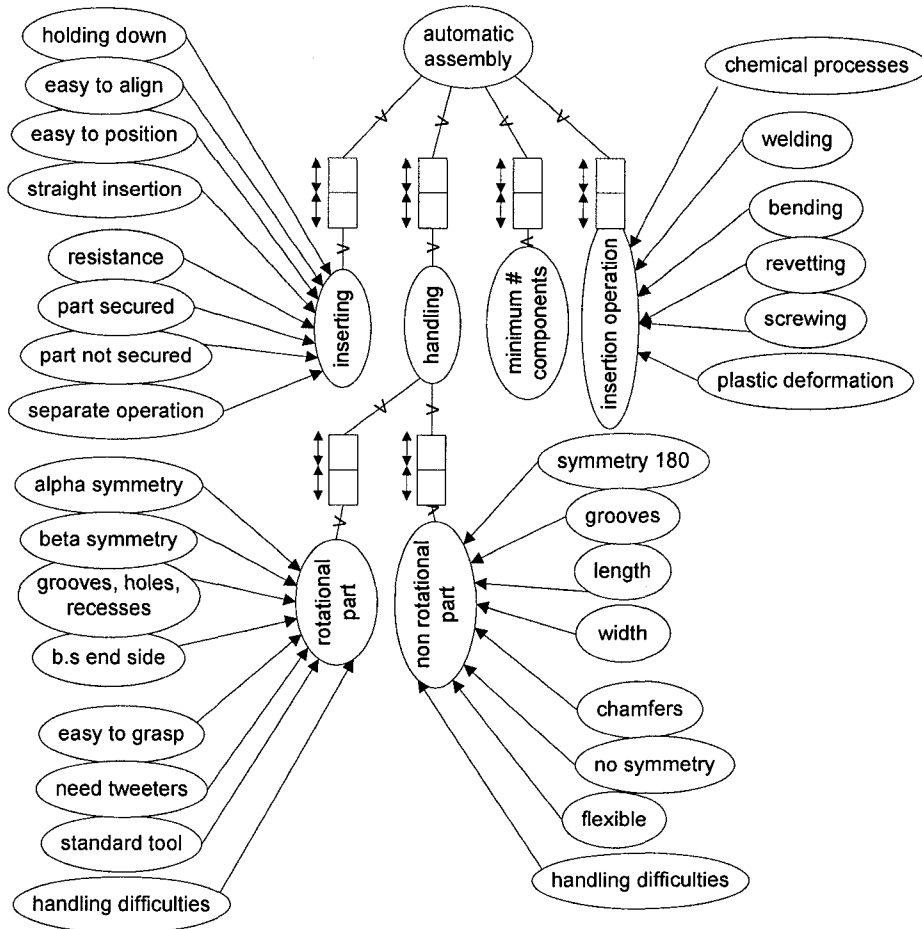


Figure 3.11 Design for automatic assembly

Disassembly is a systematic method for separating a product into its constituent parts, components, subassemblies, or other groupings for several reasons. Disassembly modeling, material selection and end of life strategies have a great impact in the product life cycle stages [22-24]. Planning in advance the optimal disassembly sequence with

regards to the design parameters can yield better product in term of maintenance, recycling and environment. The disassembly features (Figure 3.12) have a great influence in determining the end of the product life cycle strategies when the product does not satisfy anymore its first intended purpose. Disassembly efficiency affects also maintenance cost and remanufacturing cost.

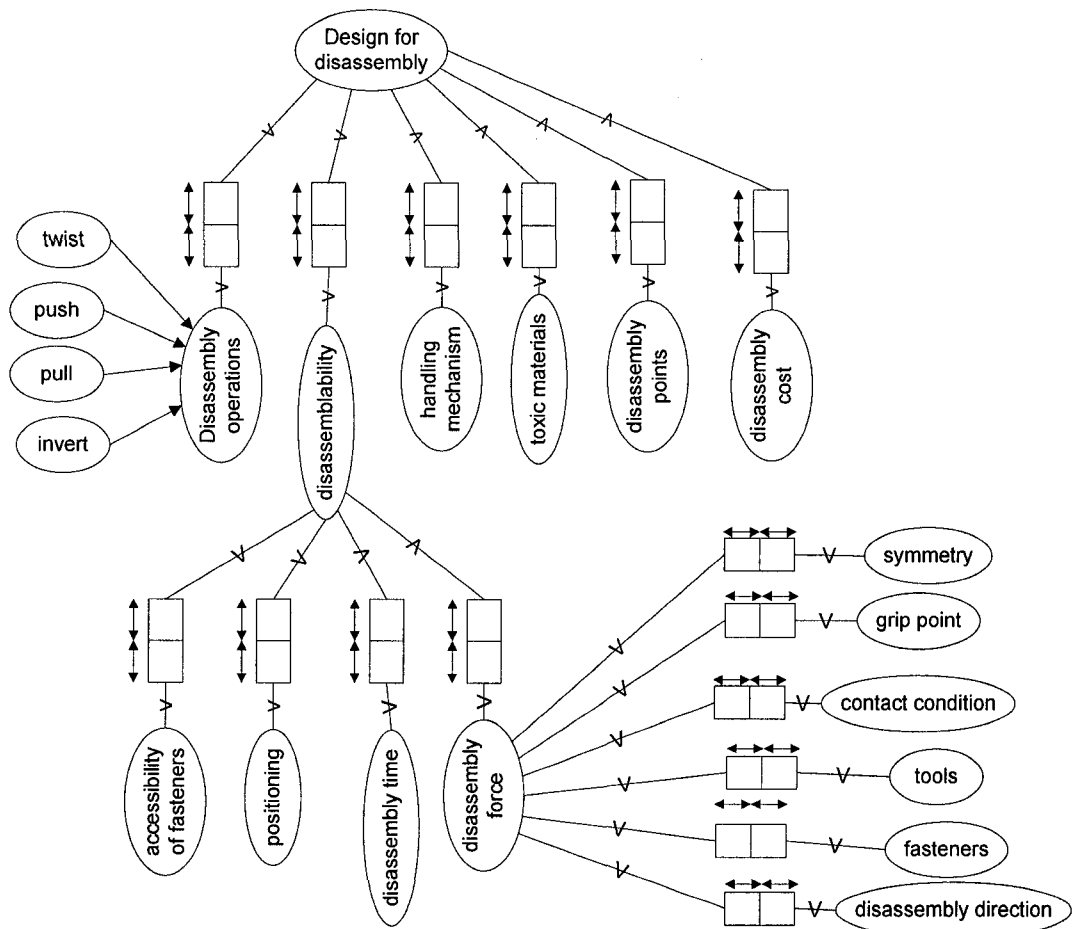


Figure 3.12 Design for disassembly features

During the course of the use of the product, quality and failure of the product may arise. In order to produce high quality product and reliable with the lowest failure rate, maintainability and reliability issues must be foreseen by the design in the early step of the product design . Since inspection and quality control cannot compensate a poor design, quality must be designed in the product. The basic objective of the design for maintainability is to ensure that a product can be maintained in a desired time during the course of its useful life. At the design stage, the design engineer must evaluate the potential failure mechanism, the failure stresses and the failure mode for a given mechanical product. The reliability analysis for mechanical products is basically a strength-stress analysis due to the main failure modes that occur in those products (Figure 3.13).

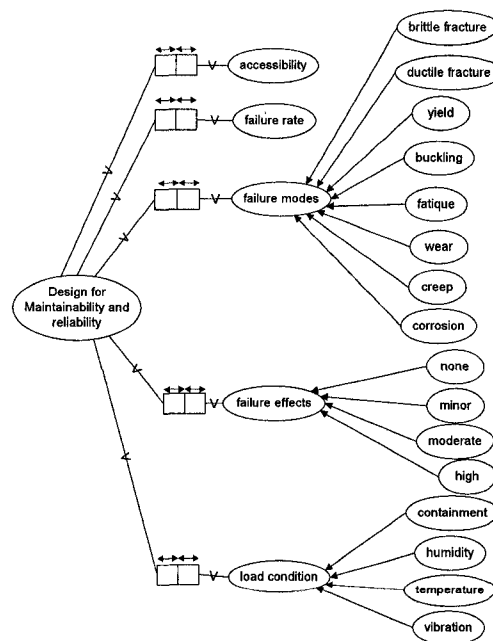


Figure 3.13 Maintainability and reliability features

The environmental performance of a product must be included early in the design process by using the best recyclable or biodegradable materials and by minimizing the environmental impact of the manufacturing processes. The importance of accessing the environmental aspect of product early in the design process is described in [24-25]. Life cycle analysis implementations require extensive data acquisition and understanding of the manufacturing processes and material components. Since extensive information is limited during the design process, life cycle analysis does not provide a good indication of the product environmental performance. Most current Life Cycle Analysis software do not support the preliminary steps of the design, therefore a limited environment impact analysis should be conducted by the designer using the environmental features of the life cycle design. The designer can quickly produce a more environmental friendly product. The reduction of environmental impacts, resource consumption and waste require the definition of EOL strategies. Those strategies include, remanufacturing, reuse, recycling and landfill. The remanufacturing is defined as a process aimed to maintain the product at its original or functioning state. Recycling is comprise of activities like collection, selection, processes by which valuable product components, valuable and hazardous materials are separated for reutilisation, land fill or waste treatment. Figure 3.14 and Figure 3.15 express the design for environment features and design for recycling features.

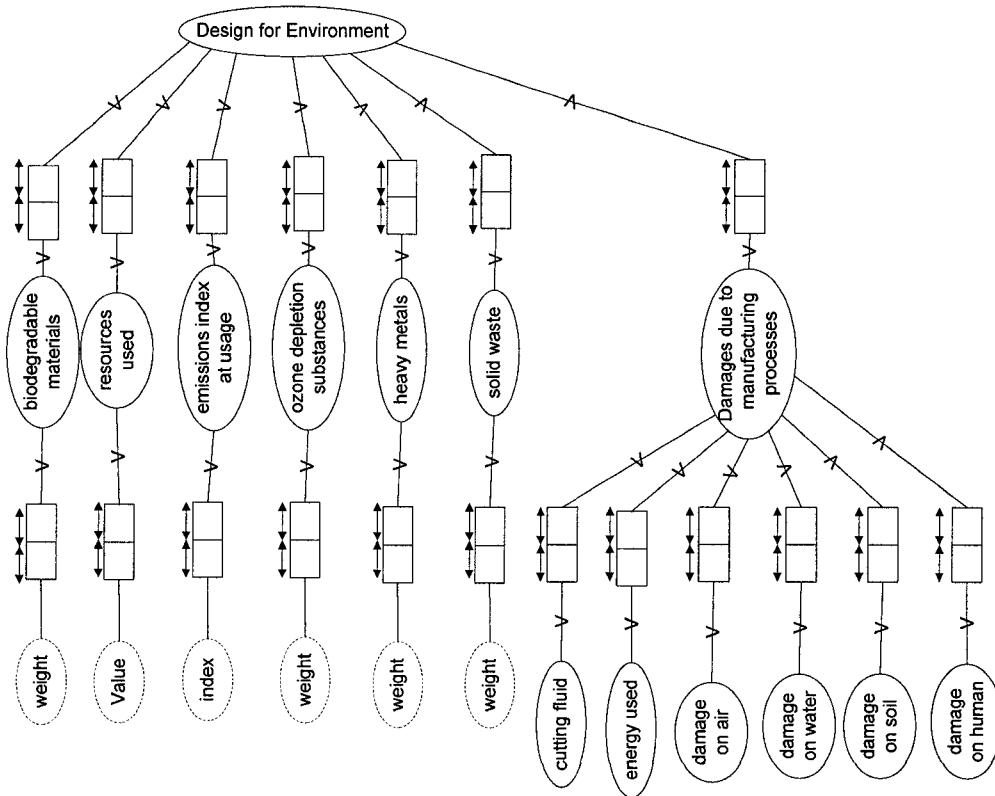


Figure 3.14 Design for environment features

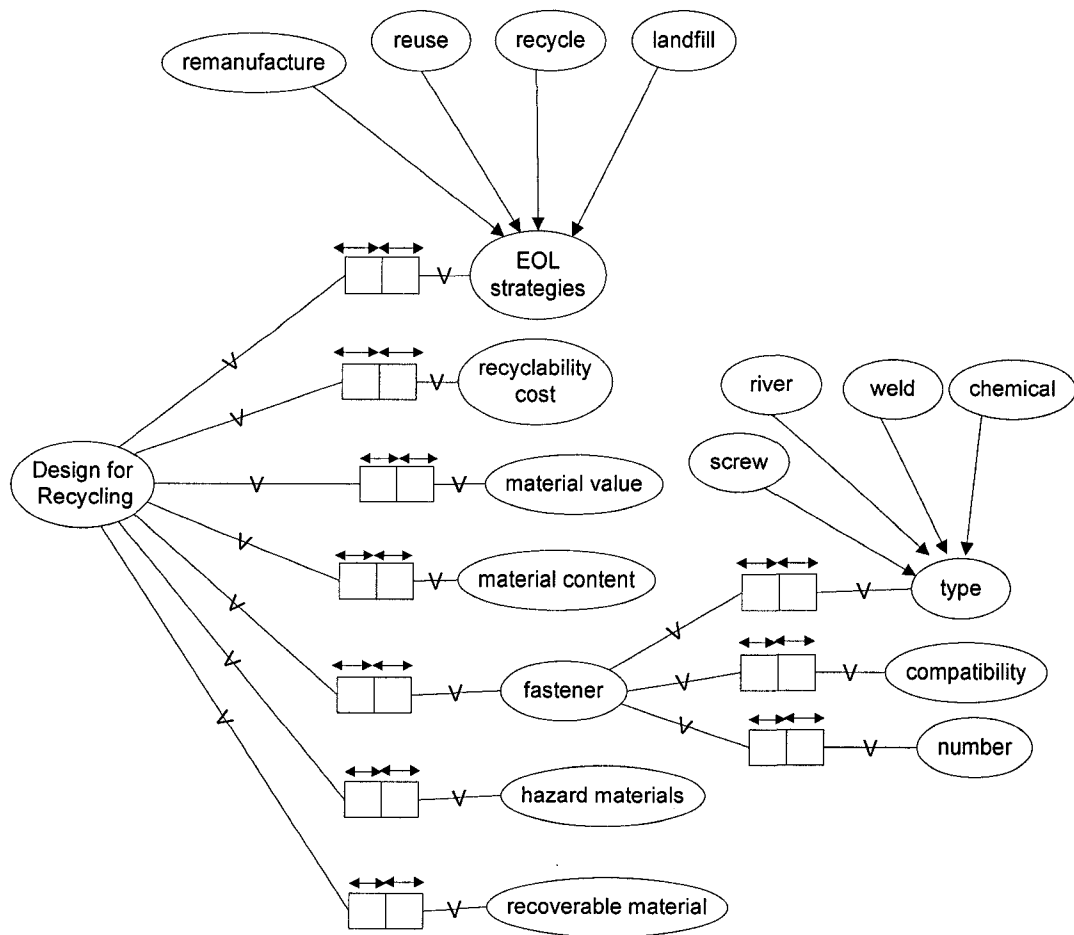


Figure 3.15 Design for recycling features

Since surface condition and attributes affect greatly the functionality of the part which it represents, face properties (Figure 3.16) that include tolerance information (GD&M) should be represented at the product modeling stage. The Face properties Class is constituted of the following information: surface roughness, dimensional tolerance,

surface treatment, geometric tolerance and the material properties of any layer deposited on the surface of the face.

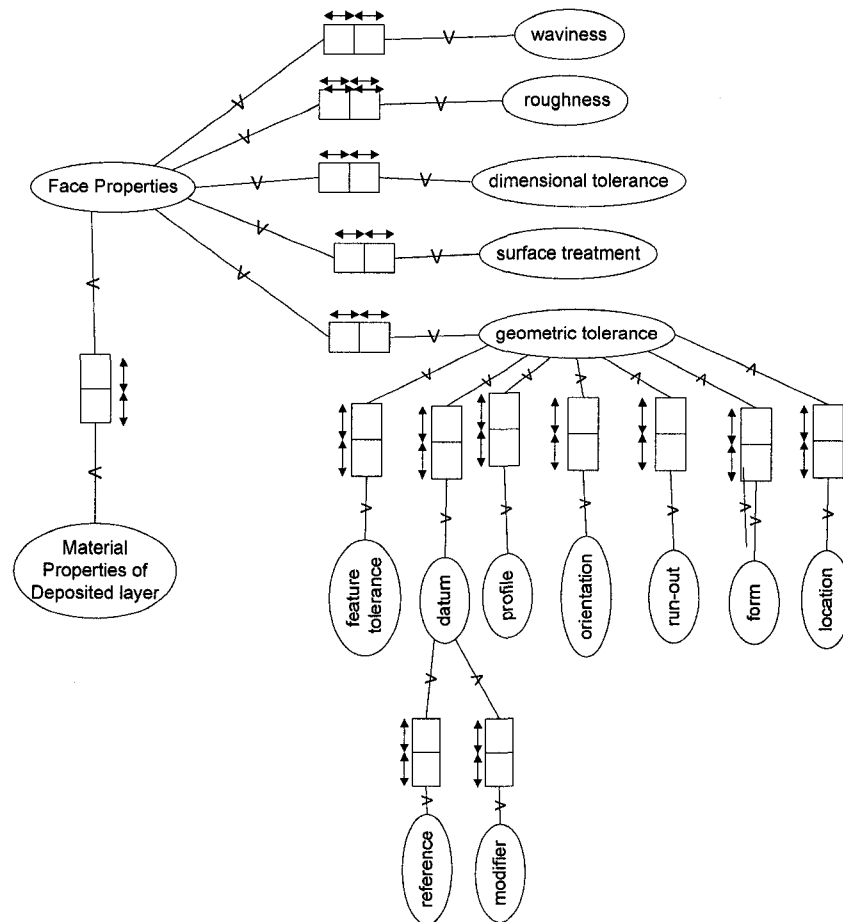


Figure 3.16 Face information attributes

An improper material selection can negatively affect the product performance. Material content determines greatly the environment pollution and the design for X attributes. The physical properties of the material are included in Material Features (Figure 3.17) in the product component. For each material constituent, it is necessary to integrate the information in regard to machining, environment and assembly. In this regard the materials class information is defined by the following attributes: material designation, mechanical properties, material homogeneity, and manufacturability.

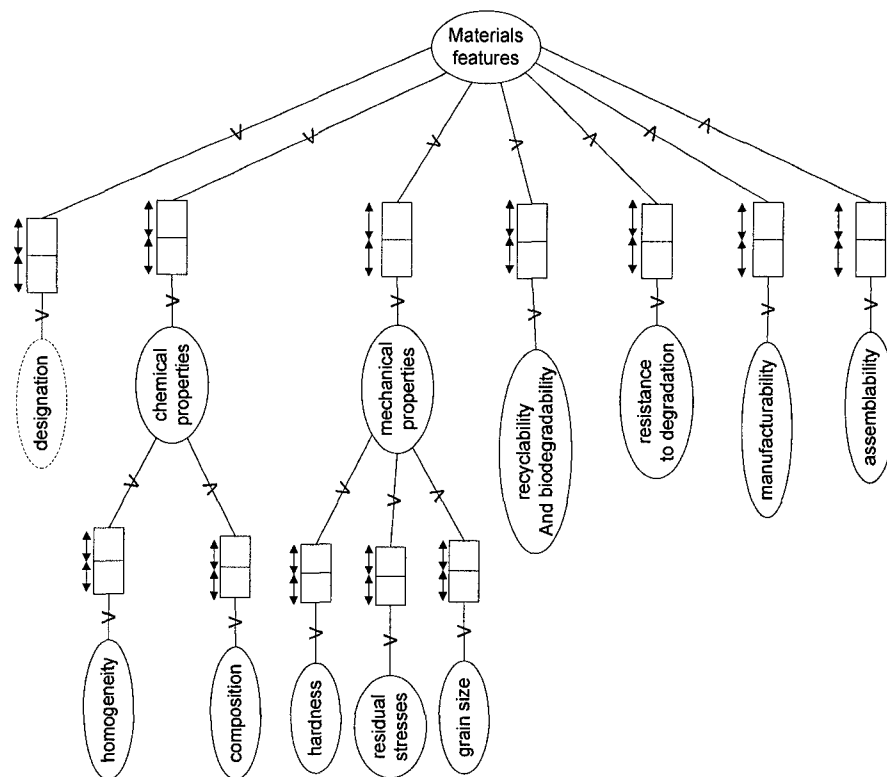


Figure 3.17 Materials features

3.4 System architecture and implementation

In the context of this present research, the emphasis is made on the integration of the product model information, the product structure of the physical model and the design for X constraints. In addition to the integration methodology, the acquisition, storage and exchange of the information are essential. In the proposed integration model, the designer is able to enter all the life cycle application information, the design intent and other design alternatives during any stage of the design. During the modeling stage, the user specifies a set of non-geometric data by means of interactive program design for X function modules. Each module provide a design tool to assign attributes to each part, assembly or face according to the design for X requirements and other life cycle constraints. Figure 3.18 represents the product model and Figure 3.19 the system architecture.

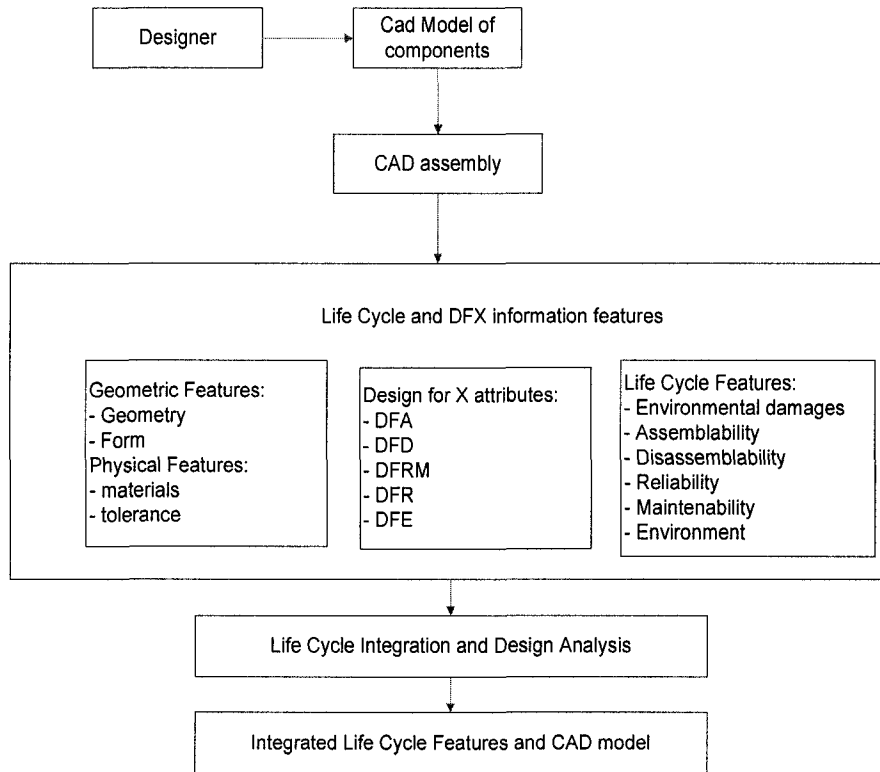


Figure 3.18 Product model information

The methodology of design described is applicable to several life cycle aspects and DFX applications including assembly, disassembly, maintainability and recycling.

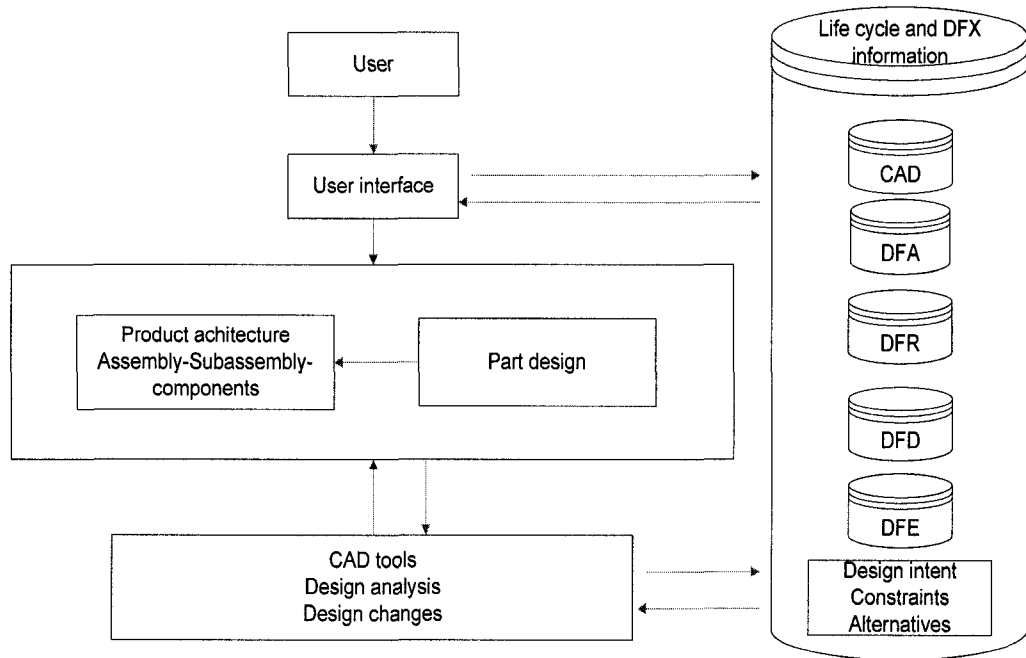


Figure 3.19 System architecture

3.5 Example and discussion

Figure 3.20 and Figure 3.21 show respectively the exploded view of a pneumatic piston and product entity selection (assembly and part) on the computer aided design product model. After the product model is imported, the main menu provides the selection of the required object of the product which can be a part component, a face or the entire product assembly.

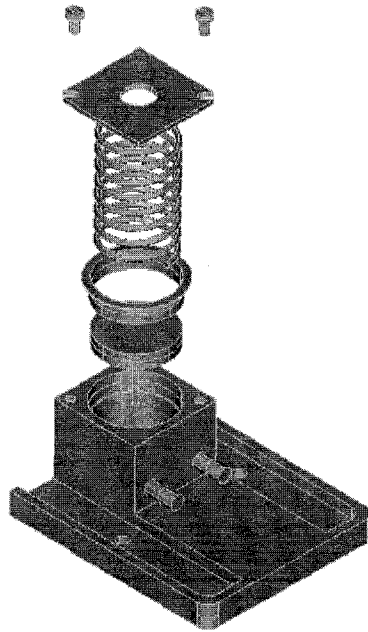


Figure 3.20 Exploded view of the piston assembly

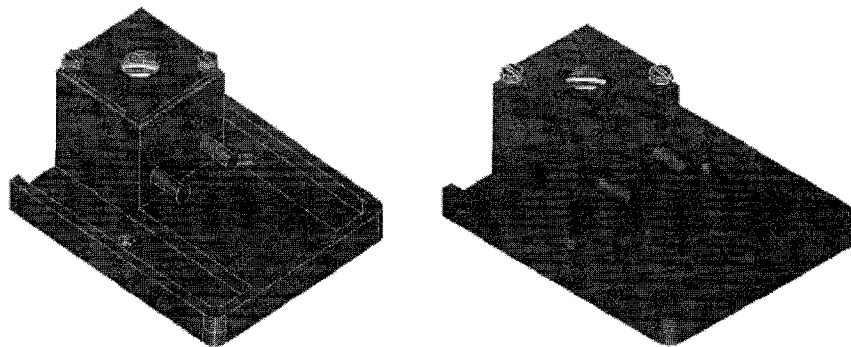


Figure 3.21 Entity selection in product assembly

The designer may enter the general information of the geometrical object selected (Figure 3.22) from the Part General Information dialog box provided from the main menu application. Other class attributes dialog information can also be selected.

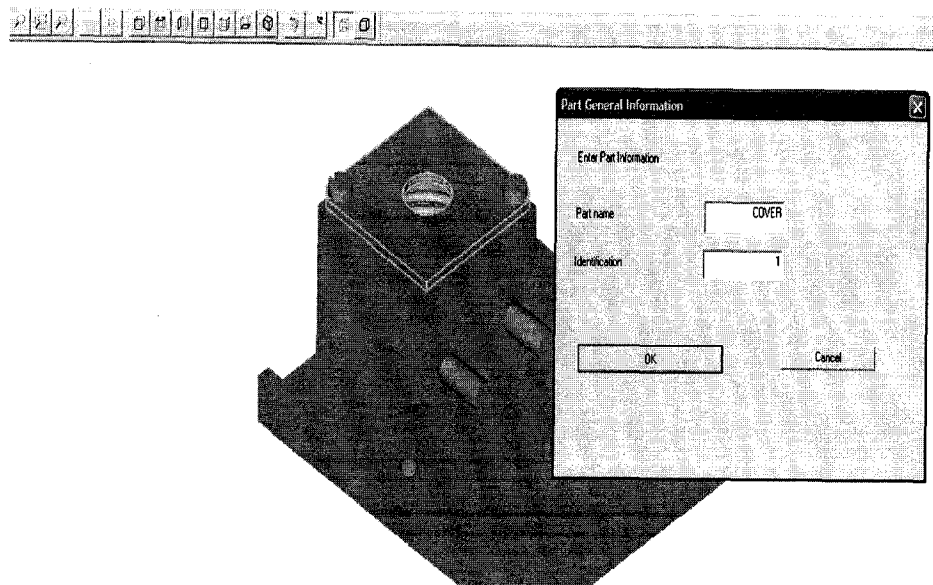


Figure 3.22 Dialog part information

Design for recycling features are shown in Figure 3.23.

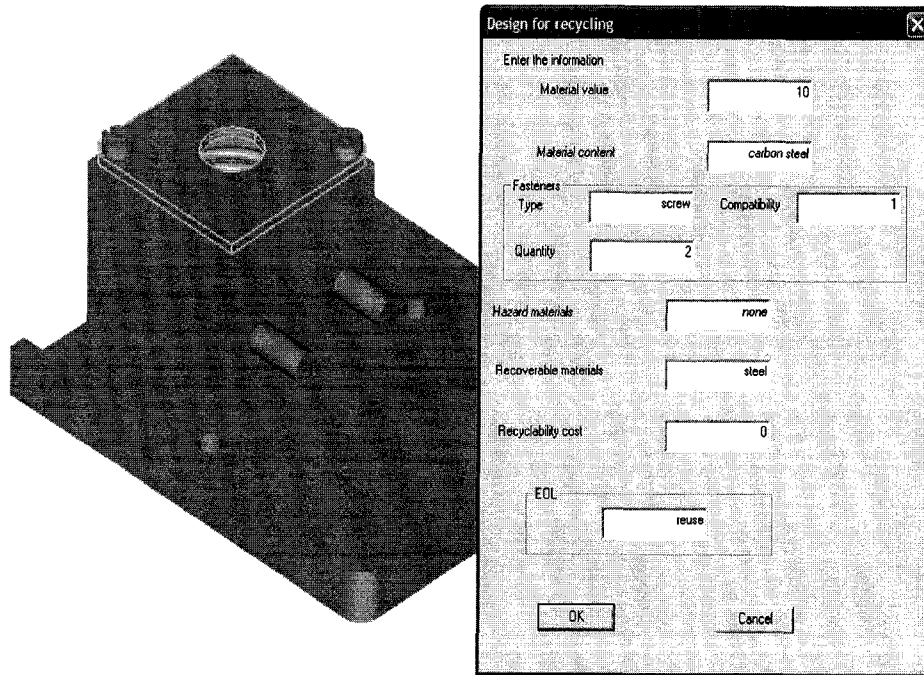


Figure 3.23 Design for recycling

In Figure 3.24, general information, design for x attributes as well as geometric model are represented in the application browser. The information provided browser includes the features from the part geometric information as well as design for X features. Using the design information given, the designer is aware of multiple issues regarding the product in several life cycle aspects and design for X application. The designer may also choose to save the design data which comprise by the geometric information and the pertinent design for X information.

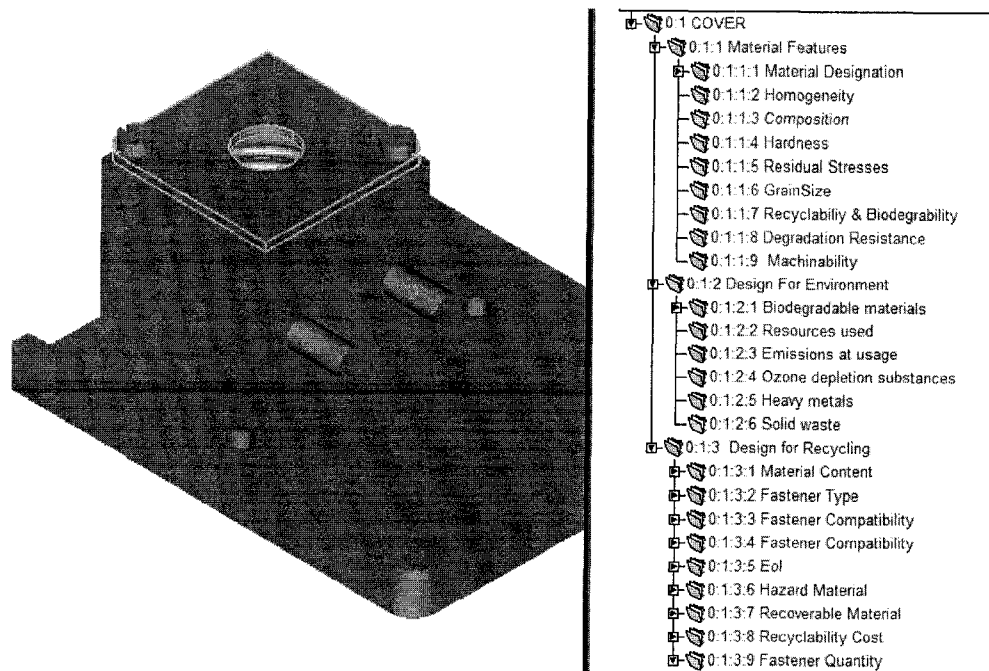


Figure 3.24 Integrated life cycle feature information

3.6 Conclusion

In this paper, a new data base representation model has been established to represent the life cycle design information and design for X features and attributes in the earliest step of the design process in product development activities. Our research is based on the issues surrounding the integration of the design information in CAD systems for mechanical products. CAD systems lack to incorporate the meta-information on the geometric model. The design process takes into consideration the product life cycle applications, material features as well as other design constraints. The life cycle features representation has been modeled in an object representation form and integrated in the CAD product data using OpenCascade geometric kernel libraries and Microsoft Visual C++. The system developed has been implemented in a real product to validate the design methodology. The system has several features. Firstly, the designer is able to import the product representation model in a computer aided design format, pick the appropriate part geometry namely product, component or face and interactively choose the appropriate DFX application function. The DFX application dialogs contain the design features regarding the several aspects of the product life cycle and design for X application such as assembly, disassembly, maintainability and environment. In the early step of the design process, the designers can capture vital information of the product and make sound decisions to improve his design. Secondly, the product model which contains the geometrical data and non geometrical information can be stored and retrieved for future improvements. The designer can improve the product model with regards to the life cycle applications and other constraints that have been defined. Finally, the system makes it possible to export only the geometrical product data. This research shows that it is possible to provide a new integration tool of the design for X

applications and the CAD geometric model in the early step of the design. The consideration of the design for X applications, life cycle aspects, material features, geometrical features make our model different from many methodologies found in the literature.

Future research will focus on the development of a computer-aided design analysis tools based on the design information framework provided in this article. The product information incorporates a multiple design features required to access the product life cycle applications during the design process. Since some product features might be needed by the designer earlier than others, it is therefore important to investigate how the sequence of product life cycle features affects the design efficiency.

3.7 References

- [1] Boothroyd G., Dewhurst P., 1983, Design for Assembly – a designers handbook. *Technical report Department of Mechanical Engineering (University of Massachusetts).*
- [2] Kuo, T.C., 2000, Disassembly sequence and cost analysis for electromechanical products, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 16 (1), 43–54.
- [3] Kroll E., and Carver B. S., 1999, Disassembly analysis through time estimation and other metrics. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 15, 191-200,
- [4] Kimura F., Matoba Y., and Mitsui K., 2007, Designing Product Reliability based on Total Product Lifecycle Modelling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56, 163-166.

- [5] Ishii K. et al., 2003, Assembly Quality Method: Integrating Design For Assembly Cost Effectiveness (DAC) to improve defect prediction. *Proceedings of DETC 2003 -2003 ASME Design Engineering Technical Conferences*.
- [6] Bovea M. D. and Wang B., 2007, Redesign methodology for developing environmentally conscious products. *International Journal of Production Research*, 45, 4057-4072.
- [7] Huang H.-Z., Gu Y.-K., and Tian Z.-G., 2006, An integrated product and process development model supporting life cycle. *International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice*, 13, 270-279.
- [8] Sudarsan R., Fenves S.J., Sriram R.D., and Wang F., 2005, A product information modeling framework for product lifecycle management. *Computer Aided Design*, 37, 1399-1411.
- [9] Han J. et al., 2000, Manufacturing feature recognition from solid models: a status report. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(6), 782-796.
- [10] Jabbour T., Mascle C., Maranzana R., 1998, A Database for the representation of assembly features in mechanical products. *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 8(5-6), 483-507.
- [11] Coma O., Mascle C., Veron P., 2003, Geometric and form feature recognition tools applied to a design for assembly methodology. *Computer-Aided Design*, 35, 1193-1210.

- [12] Changchien S. W., Lin L., 2000, Concurrent Design of Machined Product: A Multivariate Decision Approach, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Systems and Applications*, 30 (2), 252-264.
- [13] Suh N. P., 1990, Principles of Design, *Oxford University Press* (New York).
- [14] Brennam L., Gupta S.M., Taleb K.N., 1994, Operations planning issues in an assembly/disassembly environment, *International Journal of Operations and Production Management*, 14(9), 57-67.
- [15] Zussman E., Kriwet G., Seliger G., 1994. Disassembly-oriented assessment methodology to support design for recycling, *Annals of the CIRP*, 43(1), 9-14.
- [16] Fiksel J., Wapman K., 1994, How to design for environment and minimize life cycle cost, *IEEE symposium on Electronics and Environment*, 75-80.
- [17] Rose C. M., 2000, Design for Environment: A Method for Formulating Product End-of-life Strategies. *PhD. dissertation*, Mechanical Engineering, Stanford University.
- [18] Rose C. M., Ishii K., and Stevels A., 2002, Influencing design to improve product end-of-life stage. *Research in Engineering Design*, 13, 83-93.
- [19] Taylor L. and Henderson M., 1994 , Validating a feature –based Meta-Model for mechanical products: a case study. *Proceedings of the IFIP International*

Conference, Feature Modeling and Recognition in advance Cad/cam systems, 23-39.

- [20] Shah J. J. et al., 1988, Functional Requirements and Conceptual design of the feature-based modeling system. *Computer Aided Engineering Journal*, 5, 9-15.
- [21] Kashyap S., 1999 , A feature-based framework for attachment level snap-fastener design in product design for automate assembly, *IEEE international Symposium on Assembly and Task Planning*, 51-56.
- [22] Lambert A.J.D. and Gupta S.M., 2005, Disassembly modeling for assembly, maintenance, reuse, and recycling, *CRC Press* (Boca Raton, FL).
- [23] Chan J. W. K. and Tong T. K. L., 2007, Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: Grey relational analysis approach. *Materials and Design*, 28, 1539-1546.
- [24] Qian X., Yu Y., Zhang H., 2001, A semi-quantitative methodology of environmentally conscious design for electromechanical products. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 156-160.
- [25] Mosovsky J. et al., 2001, Assessing product design alternatives with respect to environmental performance and sustainability: A case study for circuit pack faceplates. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 252-257.

CHAPITRE 4 : ARTICLE 2 - PRODUCT ANALYSIS DESIGN BASED ON LIFE CYCLE FEATURES

(Soumis à la revue *Journal of Engineering Design*)

Mamadou Sy, Christian Mascle*

Ecole Polytechnique de Montréal, Département de Génie Mécanique, Section
Fabrication,

C.P. 6079, Succ. Centre-Ville, Montréal, Québec, H3C 3A7 Canada,

(*) Corresponding author: Phone: 514-340 4711 ext. 4398, Fax: 514 340-5867

E-mail: Christian.Mascle@polymtl.ca

Abstract:

In this research, we effectively integrate the downstream activities of the design process and present a product model representation. Using an extended definition of feature, the product model is represented by its life cycle features, design for X attributes, geometrical and topological information, material features, etc. The relationship between the product features defined makes possible the use of an object oriented approach to represent the product model with the complete description of the life cycle applications such as the assembly, disassembly, recycling, maintainability, environment, etc. In this way, the designer is able to assess the design performance regarding each life cycle application and redesign the product model accordingly. Since current CAD systems cannot represent the proposed life cycle features, LCFS (Life Cycle Feature System) is implemented using OpenCascade, a geometry kernel and C++

programming. The representation of a product model that integrates the product life cycle features, the geometry and topology of the product and the product model design analysis based on the downstream design activities make our study different from many product design models presented in the research community.

Key words: Life cycle, features, CAD, Design for X

4.1 Introduction

During the past decades, Computer Aided Design (CAD) systems have experienced a tremendous development but limited effort has been done on the integration of CAD and design analysis design based on product life cycle applications. Feature technologies have been introduced recently to complement the lack of CAD system in representing non geometric information. Design effectiveness of a manufactured product requires integration between the various phases of the product life cycle and product geometry. Concurrent engineering approaches can contribute in reducing the product development time but product efficiency with regards to downstream life cycle applications can only be achieved if product features are integrated during the design process and performance analysis conducted before the product is made. Several reseachers have agreed that the most efficient way to improve a product design is to incorporate life cycle applications early in the design process. It is estimated that close to 70% of a product's cost is defined during conceptual design [1](Pahl and Beitz, 1996). However, few methods exist that aid engineers at the conceptual stage; the most important part of the product development time and effort is dedicated to later stages of design. Improved methods to aid engineers at the conceptual stage would be of considerable benefit to industries, in particular techniques that help explore the design space in search of good alternatives. The design for assembly (DFA) methodologies pioneered by Boothroyd and Dewhurst

[2] has contributed in anticipating the assembly issues during the design process and its implementation in the industry has led to many benefits including the simplification of the product, the ease of assembly and reduction of the assembly cost. Since most engineering design studies are performed through the use of computer aided, the design engineer must foresee the impacts of his design decisions interactively in a CAD based throughout the entire life cycle of the product in order to achieve a successful product. Unfortunately, present CAD systems are only geometry oriented. Although concurrent design engineering approaches have contributed in reducing the development cost of new product by reducing the time to market, in a CAD standpoint, the integration of life cycle applications and analysis tools is still lacking. Historically, computer aided design tools, such as CAD, CAPP and CAM systems are devoted to support the entire product life cycle but geometrical modeling takes a significant position in these system (G. Chen et al) [3]. In order to give designers a new tool that can integrate the several aspects of the product life cycle early in the design process, the life cycle features must be integrated into the product model. They represent the entire geometry data but do not directly permit direct integration of the design constraints or other non geometrical information that are necessary in order to explore and discover the impact of the design decisions on the assembly, environment and recycling. Also it has been proved that the achievement of an effective product requires the effective integration of the various aspects of the product life cycle [4]. The traditional CAD system assumes that the designer has already finish the conceptual design stage as well as the concept-to-geometry mapping (M. Ranta et al. 1996) [5]. Therefore geometric functions are the only function that exists in these systems. Due to such limitations, feature technologies have been introduced for explicit embedding of life cycle attributes as well as design intent in order to enhance the product design efficiency., design constraints and

requirements regarding the different design for X applications (design for assembly, disassembly, environment etc.).

4.2 Related Works

Life cycle design and modeling is the subject of growing interest due to its importance in improving the product performance [6-12]. X.-T. Yan and H. Sawada (2006) [13] have developed a framework to support design decision based on the product life cycle. Others have researched the environmental aspects of the product life cycle (C. Vezzoli and D. Sciama (2006) [14] , X.-P. Jia et al. (2007) [15], M. D. Bovea and B. Wang(2007) [16]). Based on the NIST Core Product Model, R. Sudarsan et al [15] have developed a product model information framework for the product life cycle management. This framework include a design analysis integration model component in order to capture product features earlier in the design process as well as the evolution of the product throughout its life cycle. P. Fitch and J. S. Cooper (2005) [16] combine the environmental life cycle assessment and probabilistic methods to reduce the resign information and improve the product performance during the design stage. The product performance assessment is based on the following life cycle stages: assembly, use, maintenance and end of life (EOL). F. Kumura et al. (2007 [17] have focused their studies on the disturbances of the product life cycle applications on the reliability of mechanical products.

A feature-based design can be used the integration of non geometric attributes in the CAD model.

Although features technologies have been an expanding subject of research in the design and manufacturing community, the definition of features is still not unanimously accepted. One of the most comprehensive researches conducted in the feature technology research can be found in [18]. Design by features and feature recognition

tools have been introduced to provide designers with facilities to capture engineering information of product as well as geometry in part models [19]. Design by features provide designers the ability to build their model with their own features and integrate them in the design process. Most researches on features-based design have been concentrated on form feature [20-22]. Material, tolerance, surface finish feature and other life cycle features continue to receive less attention from the design community. Traditionally, a feature refers to form features which are a collection of shape elements expressed in terms of a geometric elements and topological entities. Mechanical product are not constituted by form features only, other useful information regarding the life cycle applications, design intent, manufacturing features and other life cycle features applications define also a product model [23].

Most design methodologies found in the literature do not consider the entire life cycle applications or the integration of materials features during the product design process. Rather they concentrated on only one aspect of the life cycle design application: assembly [24], disassembly [25] reliability and failure [26-27], quality [28], environment [29-30]. Many design for X (DFX where X stands for assembly, disassembly, recycle, etc.) methodologies have been developed independently. The design for assembly (DFA) have been extensively researched by Boothroyd and Dewhurst and successfully implemented in the design of mechanical product. The principal focus for assembly analysis is the simplification of the final product by eliminating the parts that are redundant and the elimination or redesign of parts form features that can lead to a greater handling time, inserting time and joining difficulties during assembly operations. The purpose of the design for manufacturing is the selection of the best manufacturing processes based on the part geometrical features of a particular part as well as the material properties, fasteners, surface finish, manufacturing features requirements, etc. In order to produce high quality product and reliable with the lowest failure rate,

maintainability and reliability issues must be foreseen in the early steps of the product design. Failure modes and effect analysis methods provide an effective tool to achieve a good design regarding the optimisation of the product reliability. The basic objective of the design for maintainability is to ensure that a product can be maintained in a desired time during the course of its useful life. During the design stage, the design engineer must evaluate the potential failure mechanism, the failure stresses and the failure mode for a given mechanical product. Since the main failure mode that occur in mechanical product are caused by worn-out materials or over-stress, one approach is to analyse the load conditions that cause failure and the potential failure mechanism. The environmental performance of a product must be included by using the best recyclable or biodegradable materials, minimizing the environmental impacts of the manufacturing processes and reducing the environmental impacts at the product's end of life (EOL). The reduction of environmental impacts, resource consumption and waste require the definition of the EOL strategies (landfill, recycle, reuse and remanufacture) of the product or component. C. Rose [31] proposed a design methodology aimed to determine the EOL strategies according to the product characteristics. Life cycle analysis (LCA) have been used to investigate the environmental product performance [32]. LCA studies require extensive data acquisition and understanding of the manufacturing processes, material and disposal. It is therefore difficult to integrate at the beginning of the design stage when most design choices are still unknown. In order to improve the effectiveness of the LCA, [33] uses a fuzzy inference system to simplify the life cycle analysis. The level of environmental impact are assessed by evaluating a set of predefined fuzzy rules. Limited environment assessment based on component environment index can deliver environmental superior product, quickly and a relative small time. However, they do not integrate the CAD component or other life cycle features in the design analysis. Also, present CAD design software do not integrate the environmental impact analysis along

with the geometrical modeling. Design for disassembly is an important aspect to consider in order to make valuable the recycling and remanufacturing activities. The effort to model and integrate life cycle parameters in the early stages of the design process is shown in [34-36]. In [34], the authors proposed an integrated process and product development model to analyse the product from different perspective of the life cycle based on a set of evaluation indices. The authors in [35] investigate the life cycle analysis issues which include the development cost and safety. [36] developed a life cycle assessment methodology to evaluate the material substitution opportunity to reduce life cycle impact (resource consumption, air emissions) and increase recyclables.

Given the limits of the representation models presented here, a product model representation that integrates the product life cycle application from the assembly, use, recycling, etc. as well as geometrical and topological information is introduced. An object oriented approach is used to model the product given the relationship between the life cycle features and the product CAD information. Using the design requirements, design attributes and other constraints, several life cycle applications can be assessed to determine the product design performance such as the assembly efficiency, recyclability index, environmental impacts, etc. Since CAD systems lack the ability to represent the non geometrical information previously defined, Opencascade and C++ are used to implemented the design methodology proposed in our study and practical examples are given to demonstrate the efficiency of the system.

4.3 Life cycle design features

4.3.1 Definition of life cycle features

A review in the literature reveals that features are defined in different ways by the various authors. Each author uses his own definition which, in fact, translates his specific point of view on the product model according to its application. Because of the large variety of parameters involved during the product life cycle, we adopt the widest definition possible for life-cycle features:

“ A life-cycle feature is defined as any geometric or technological or functional information assigned to a face, a part, or a subassembly and whose presence is inherent to the manufacturing, assembly, maintenance, recycling or disposal processes”

4.3.2 Product features

A product model can be defined by all its life cycle features, design attributes, geometric information, topologic information and the relationship between those entities Figure 4.1. From the general expression of product features [37], life cycle feature (F_p^{LC}) can be expressed as a function of the life cycle quantitative attributes (A_p^{LC}), geometric information (G), topological pointer (T) and feature relationship (R) (Equation 4.1).

$$F_p^{LC} = \{T, G, A_p^{LC}, R\} \quad (4.1)$$

Since a mechanical product can be decomposed into assemblies, sub-assemblies and parts, the life cycle design attributes is the quantitative expression of every aspect of the product life cycle aspects namely the design for X information: design for assembly attributes (A_p^{DFA}), design for disassembly attributes (A_p^{DFD}), design for maintainability and reliability attributes (A_p^{DFRM}), design for recycling attributes (A_p^{DFR}) and design for environment attributes (A_p^{DFE}).

The product life cycle design attributes for a product P of n components can be expressed in terms of design for X variables by:

$$A_p^{LC} = f(A_p^{DFA}, A_p^{DFD}, A_p^{DFRM}, A_p^{DFR}, A_p^{DFE}) = \left\{ \begin{array}{cccc} A_1^{DFA} & A_1^{DFD} & \dots & A_1^{DFE} \\ A_2^{DFA} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_n^{DFA} & A_n^{DFD} & \dots & A_n^{DFE} \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

Each element of matrices A_p^{LC} can influence the performance of the product regarding its life cycle features. Therefore, superior product model can be obtained by means of selection the design for X factors that contributes to the optimal life cycle features. The design objective should be aimed at optimizing design for x features and selecting superior design attributes that are not function of design for x attributes.

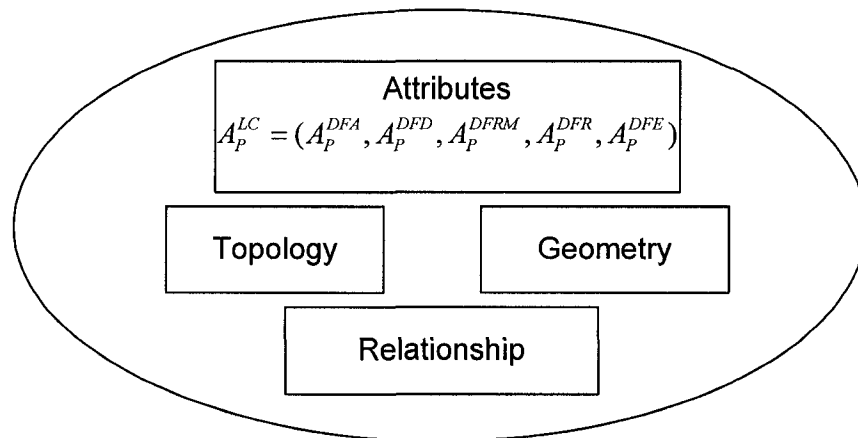


Figure 4.1 Product features

4.3.3 Life Cycle Design Modeling

4.3.3.1 Geometry and topology representation

A solid model of a product can be represented by a number of assembly components. Boundary representation (B-rep) model allow the representation of geometrical and topologic information of the product. Faces, edges , vertices and the related geometrical information are the basis component of B-rep models. Using an object representation approach, it is possible to present a product model that integrates the geometry and topology information and other technological information such as the life cycle features and attributes of the product. Figure 4.2 expresses the product information model (geometry, topology and life cycle features) using the information modeling approach NIAM (Natural Language Information Analysis Method).

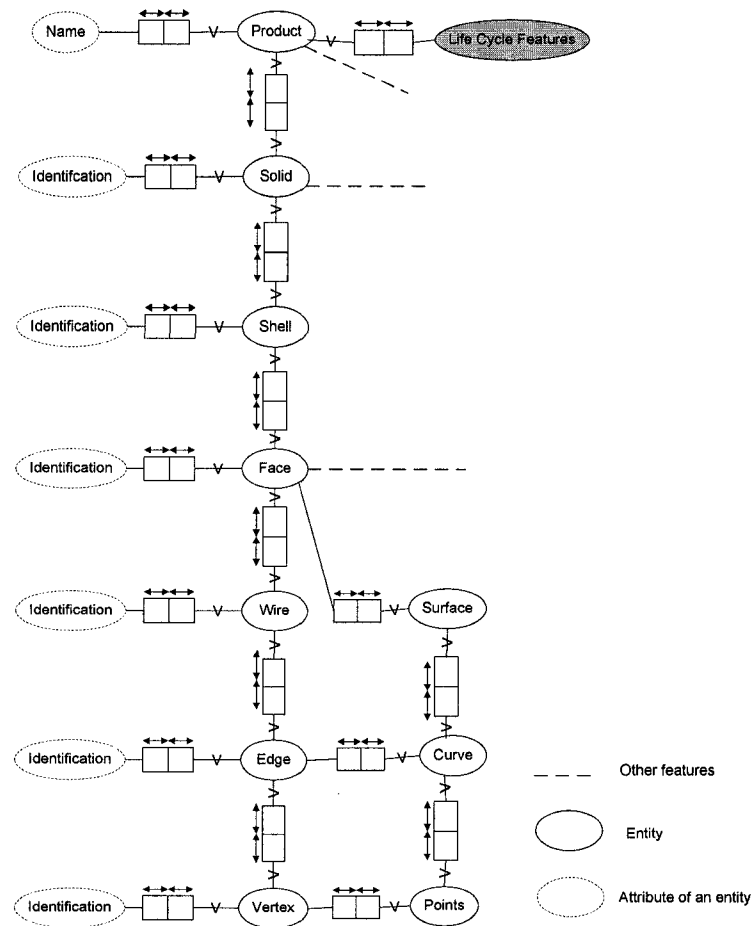


Figure 4.2 Geometric and product attributes representation model

4.3.3.2 Life Cycle Design Process

The product design process can be conceptualized as a process in which technical problems are solved in order to achieve a final solution of product which satisfies the requirements that are previously set. Pahl and Beitz [38] suggested the systematic design

approach and Suh [39], the axiomatic approach of the design process. Design engineers are mainly concerned with conceptual design, embodiment design and detailed design. The most critical phase of the design process is the conceptual design when the main product life cycle features are laid down. The detail design stage represents the final CAD drawing where tolerances, surface properties, form and dimensions of the individual component are defined. In axiomatic design theory, a set of axioms provide the tools to evaluate the relationship between product functions and design parameters. In order to assess the product model with respect to its life cycle, the life cycle design approach must be conducted regardless of the design process. Figure 4.3 shows the entire life cycle of a mechanical engineered product, from the extraction of raw materials through manufacturing, assembly, usage, disassembly and the product design processes.

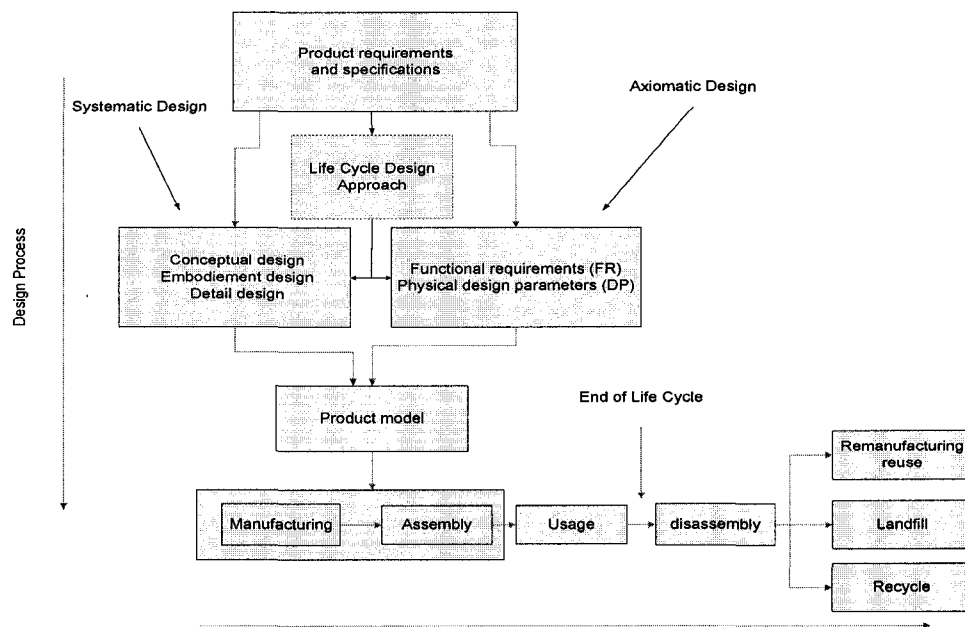


Figure 4.3 Product life cycle and design process

4.3.4 Design attributes

After the product requirements are defined and based on the design strategies on Table 1, the next for the designer is to define the product architecture that satisfy the design parameters and design strategies. Since each assembly is represented by the parts, the analysis of each life cycle design stage i.e. component design for X features can be used to predict the product life cycle attributes information. The life cycle attributes data contain the most complete information of the product with regard to the life cycle stages previously defined (assembly, disassembly, maintainability, recycling and environment). Design strategies on Table 4.1 indicate the appropriate design methodologies and requirements that need to be undertaken in order to assess the product life cycle attributes.

Table 4.1 Design Strategies

Design Strategies	Assembly DFA	Disassembly DFD	Maintainability and Reliability DFMR	Recycling DFRe	Environment DFE
Ease of handling	x				
Minimize insertion time	x				
Ease of fastening	x				
Minimize number of parts	x				
Minimize assembly directions	x				
Minimize assembly movements	x				
Ease the access to free surface	x				
Provide symmetric parts	x				
Avoid obstruction	x				

Avoid simultaneous fitting operations	x				
Avoid incompatible materials				x	
Ease of access to free surface	x	x	x		
Ease of positioning	x				
Ease of accessibility	x	x	x	x	
Requirement of tools to disassemble	x	x	x	x	
Avoid toxic materials	x	x	x	x	x
Reduce material variability			x	x	
Reduce hazard material content	x	x	x		
Easy to maintain			x		x
Tool clearance	x	x	x		
Minimize disassembly time		x	x	x	
Reduce non recyclable materials				x	x
Minimize part weight	x	x	x	x	x
Maximise accessibility of joints	x	x	x		
Easy to manipulate	x	x	x	x	x
Use biodegradable materials				x	x
Ease of insertion	x		x		
Minimize number of fixings	x	x	x	x	
Avoid part that tangle	x	x	x	x	
Minimise non recyclable parts					
Minimize recycling cost				x	x
Minimise the need for special tools	x	x	x	x	
Provide clearance around connectors	x	x	x	x	
Elimination of critical failures				x	
Use of robust components				x	
Tolerance evaluation	x		x		
Minimise over stress condition			x		
Minimise worn out situations			x		

Based on the design strategies which are function of the particular life cycle aspects, the technological information of the components and the topology and geometry information, life cycle attributes can be defined. The life cycle product attributes derive from the design for x features at the component level. Table 4.2 represents the geometric and technological attributes of a component for the purpose of DFX analysis.

Table 4. 2 Geometric and technological part attributes for DFX analysis

Assembly directions	Tools of disassembly	Compatible material	Part not secured
Number of components	Repetition of part	Number of interfaces	Strength
Contact conditions	Presence of toxic material	Accessibility of tools	Elasticity
Symmetry	Disassembly points	Use of standard tool	Material properties
Interlocking	Disassembly direction	Use of two hands	Modulus of elasticity
Center of gravity	Contact condition	Grasping aids	Part symmetry
Crisp point	Connecting element	Nesting parts	Beta symmetry
Weight	Working space	Tangling part	Alpha symmetry
Material composition	Handling mechanism	Flexibility of part	Geometric tolerance
Material strength	Handling time	Stickiness	Dimensional tolerance
Size	Positioning time	Slipperiness	Surface treatment
Free surface	Accessibility of component	Mechanical assistance	Material deposited
dimension (small, large)	Accessibility of joints	Optical magnification	Use of force

Where:

Symmetry alpha is the component symmetry with regard to the axis perpendicular to the direction of insertion.

Symmetry beta is the component symmetry with regard to the axis in direction of insertion.

Figure 4.4 and 4.5 show the data model representation of the design for recycling and design for assembly respectively.

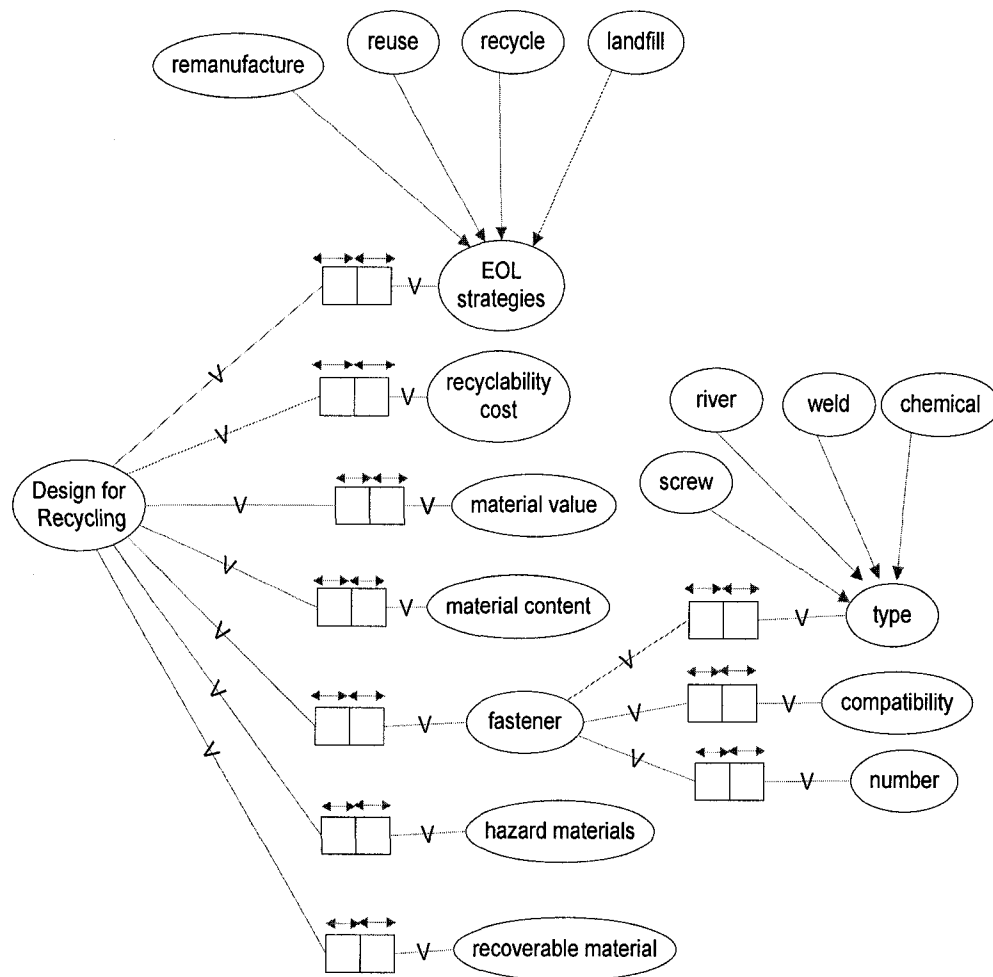


Figure 4.4 Design for recycling features representation

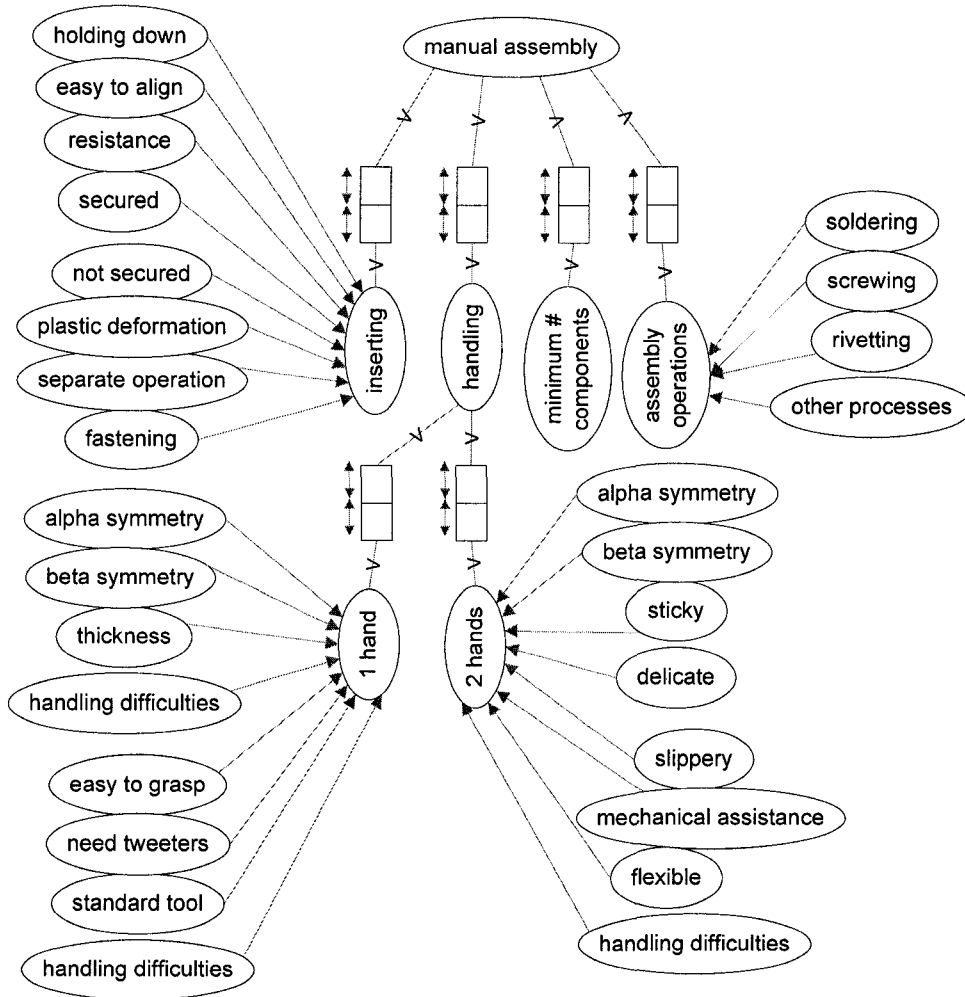


Figure 4.5 Design for manual assembly features

4.3.5 Life cycle feature attributes

In this section, some definitions are provided about the design for X parameters pertinent to the downstream life cycle applications such assembly, disassembly, recycling, reliability and environment. The assumptions are data used in the design for X application are described and a presentation of the geometrical, technological and physical criteria for each design for X step are given.

4.3.5.1 Assembly efficiency

In design for manual assembly, the most important characteristic used is the assembly efficiency A_{eff} which depends on handling time and inserting time. The main objectives is to reduce the number of parts and decrease the assembly time. In this prospect, both geometric data (form features) and other design parameters non geometric features are needed to determine the insertion time, handling and the assembly efficiency. A_{eff} is expressed in terms of the theoretical number of part N_{min} , basic assembly time t_a ($t_a=3$ seconds), and the estimated time to complete the assembly t_{ma} (Equation 4.3)

$$A_{eff} = \frac{N_{min} t_a}{t_{ma}} \quad (4.3)$$

In manual assembly, the time taken to accomplish various tasks such as grasp, orient, insert and fasten control the assembly cost. From the knowledge of the assembly labour worker's rate, the assembly cost can be estimated. Although design for manually

assembled products can lead to reduced cost of products, it is also important to analyse the product assembly in terms of automatic assembly. In automatic assembly, the handling time and insertion time do not control the assembly cost. Instead, the handling time depends on the machine rate or the cycles of the assembly system. Part features, orientation efficiency and overall dimensions are factors that affect the cost of feeding equipments and the assembly rate at which the system is designed to operate. Other factors can affect the difficulty of feeding the part automatically and can lead to considerable increases in the cost of developing automatic feeding devices (For examples if the edges are thin or overlapping). During automatic assembly design, one should avoid projections, holes or slots that will cause parts to tangle and make the part symmetrical to avoid the need for extra orienting devices and the corresponding loss in feeder efficiency. For plastic products assembly, the presence of certain assembly features such as guides and locators in the part design can improve the assembly process and assembly efficiency.

4.3.5.2 Disassembly evaluation

Disassembly is an important aspect to consider in order to make efficient recycling, and maintenance, re-use, etc. Disassembly can be defined as a way to separate the components from the assembly. A selective disassembly results in the reduction of both disassembly cost and time for maintenance/re-use or recycling. The disassembly ordering of a part is determined according to its disassemblability (reversible liaisons, accessibility, weight) and the influence of other parts. The disassembly evaluation is conducted by evaluating parameters such as cost and time in disassembling the product. The number of parts to be removed should be minimized and re-assembly must be possible for future maintenance or reuse. The following disassembly index D_{ind}

represent one component of the product disassembly feature and is function of the number of part N , accessibility of components A , ease of disassembly E and the disassembly time D_i .

$$D_{ind} = F(N, A, E, D_i) \quad (4.4)$$

4.3.5.3 Recyclability analysis

The recyclability analysis provides the recycling yield which represents the percentage of material, weight of the part, material type, recycling yield, material value of the recyclable. Material selection, choice of fasteners and clumping components that share the same end of life strategies are important aspects to be considered when designing for recycling. Fasteners can affect the difficulties of separating. Product gets to its end-of-life due to technology obsolescence or its physical wear-out [40]. The recyclability factor of a product p can be used to measure the recyclability parameter, it is the ratio between the weight of the recoverable components and the product total weight. At the component level, it is the ratio of the irrecoverable material mass of the component over the total mass. Equation 4.5 expresses Rec_{fact} :

$$Rec_{fact} = \frac{W_{recyclable}}{W_{total}} \quad (4.5)$$

4.3.5.4 Reliability analysis

In order to eliminate or reduce the potential failure modes, design for reliability and maintainability (DFRM) must be integrated early in the design step. Failure Modes and

effects analysis is a tool that can be used by a designer to identify each failures modes at different level (system, assembly and part) . All possible mode of failures as well as their consequences are accessed and the effort is concentrated on critical parts. The designer should focus on loading conditions that minimize the effects of failure on the product. Table 4.3 identifies the potential failure modes of mechanical components .

For mechanical equipments, the study of the failure rate leads to use the approach of stress-strength method which is also supported by finite element methods. The product reliability can be determined with the failures hypothesis, the evaluation of the stresses applied and the strength limits. For the purpose of the design analysis with respects to the reliability, the coefficients 1, 2, 3 and 4 are attributed to the failure effects on the product respectively high, moderate, minor or none.

Table 4.3 Failure modes and effects

Loading conditions	Failure modes	Failure effects
Vibration	Brittle fracture	High (1)
Disassembly	Fatigue crack	Moderate (2)
Temperature	Ductile fracture	Minor (3)
Humidity	Creep	None (4)
Containment	Corrosion	
Bending	Buckling	
Torsion	Wear	
Compression	Fretting	
Tension	Elastic deformation	
Fatigue	Diffusion	

For mechanical equipments, the study of the failure rate leads to use the approach of stress-strength method which is also supported by finite element methods. The product reliability can be determined with the failures hypothesis, the evaluation of the stresses applied and the strength limits.

4.3.5.5 Environmental impacts

The environmental impact of the product is directly influenced by the environmental properties of its material constituent such as energy, emissions involved in manufacturing, using and recycling. The product environmental impact of the entire life cycle (EI_{LC}) can be expressed Equation 4.6.

$$EI_{LC} = EI_{Mat} + EI_{Manuf} + EI_{Use} + EI_{EOL} \quad (4.6)$$

Where EI_{Mat} , EI_{Manuf} , EI_{Use} , EI_{EOL} are respectively, the environmental impact of the material needed to produce the component, the impact associated with the manufacturing processes, environmental impact of use and EOL impacts (reuse, recycling, disposal). The properties of a material's environmental performance can be expressed in terms of ei_{Mat} and can be evaluated using the techniques of life cycle assessment and the Eco-Indicator 99 method. Similarly, ei_{Manuf_j} is the eco-indicator that can be associated with the j -th manufacturing process of the i -th component's production cycle per unit of process parameter. The choice of the material and the manufacturing

assume an strategic importance and require a characterization of environmental behaviour of a product.

$$EI_{Mat} = \sum_{i=1}^n EI_{Mat_i} \text{ where } EI_{Mat_i} = ei_{Mat_i} \cdot W_i \quad (4.7)$$

$$EI_{Manuf} = \sum_{j=1}^m ei_{Manuf_j} \cdot \lambda_{Manuf_j} \quad (4.8)$$

λ_i is the main process parameter associated of the manufacturing process of component i . The environmental impact EI_{Use} is defined according to the specific usage of the product. W_i is the weight of component i .

4.3.5.6 Design performance

The product performance can be accessed based on its design attributes that represent the design for X variables. The evaluation of the life cycle features and attributes must take into account the integration of the entire life cycle domain (assembly, disassembly, recycling, maintainability and environment). The attributes of each life cycle aspect A_i^{DFX} is weighted and the influence factor can be set based on the criteria determined by the designer taking into account which design features or attributes are the most important to achieve the design requirements. Each evaluation factor has different influence on a given DFX attributes.

After the normalization of all factors, the evaluation index A_i^{DFX} (Equation 4.9) can be determined for each life cycle attributes.

$$A_i^{DFX} = F(a_{ij}), \text{ where } a_{ij} = a_{i1} \dots a_{im} \quad (4.9)$$

m is the number of DFX attributes of component i and a_{ij} element of the design attributes.

This ultimately produces a multi objective function γ based on the life cycle parameters (Equation 4.10).

$$\gamma = \lambda_1 A_{eff} + \lambda_2 D_{eff} + \lambda_3 Re c_{fac} + \lambda_4 Re a_{fac} + \lambda_5 E_{LC} \quad (4.10)$$

Where $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ are the weight factors which represent the assembly parameters, disassembly, recycling, reliability and environment and can vary from zero to one. These variables are normalized so their sum is equal to one. Some trade-off between the criteria is needed to ensure a satisfactory design since it is difficult to optimize the objective function.

Table 4.4 indicates the Product life cycle attributes that include the analysis results of the product attributes with respect the design for X features and Figure 4.6 the product life cycle features representation.

Table 4.4 Product Life Cycle Design Attributes

Product Life Cycle Design Attributes	Units	Assembly DFA	Disassembly DFD	Maintainability and Reliability DFMR	Recycling DFRe	Environment DFE
Number of component	Quantitative	x	x	x	x	
Total weight	kg	x	x	x	x	x
Warranty period	hour			x		
Insurability	Dimensionless			x		
Energy consumed	Watts					x
Assembly efficiency	Dimensionless	x		x		x
Disassembly index	Dimensionless		x	x	x	x
Failure rate	Quantitative			x		
Mean time to failure	hours			x	x	x
% Recyclable materials	% of mass				x	
Environmental impacts	Dimensionless					x
Toxic materials	% of mass	x	x	x	x	x

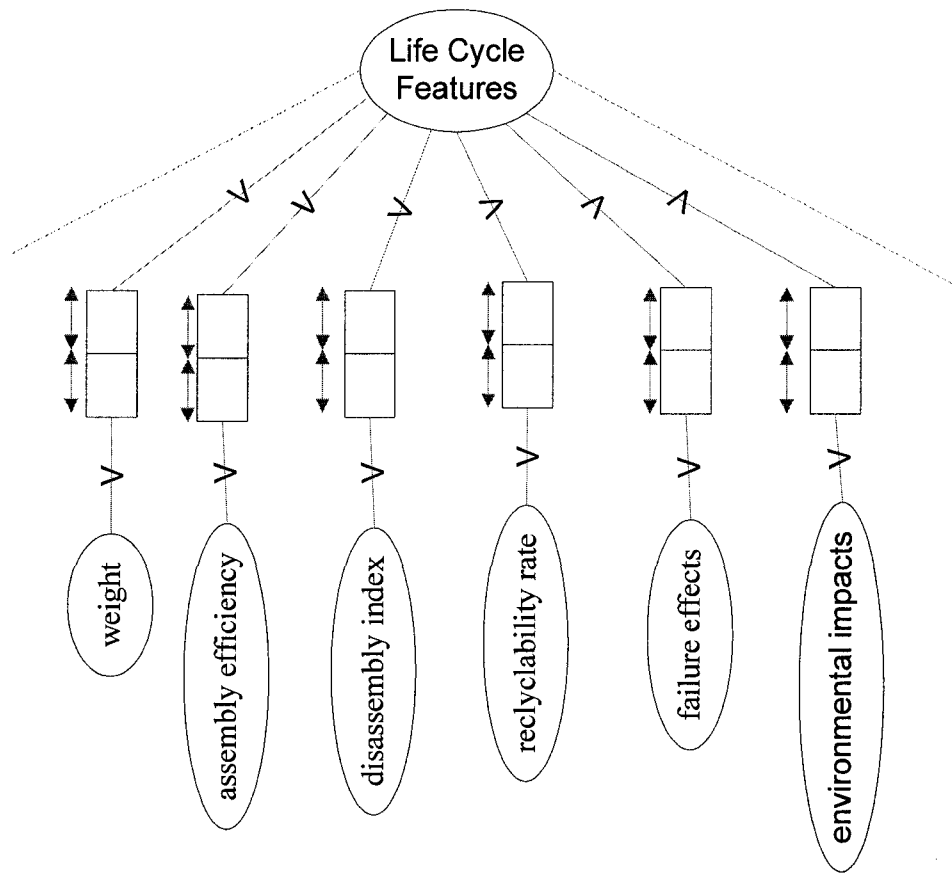


Figure 4.6 Product life cycle features representation

4.4 Implementation and discussion

The design methodology has been implemented in a Microsoft window environments using OpenCascade which is an open source geometric kernel and the development language is visual C++. The system architecture of the system developed named LCFS (Life Cycle Feature System) is presented in Figure 4.7. In LCFS, solid objects can be defined, handled and displayed. The objects themselves are stored using boundary representation. Life cycle features classes such as assembly, disassembly, recycling ,etc. that are not included in OpenCascade are created as well as other customized commands and dialog boxes. In this present research, the emphasis is made on the integration of the life cycle applications, the product structure of the physical model and design requirements. In addition to the integration of the product life cycle aspects, the acquisition, storage and exchange of the information are essential. The user is required to enter the assembly model and specifies non geometrical attributes of the component with regards to a chosen life cycle application by means of interactive program modules. The modules are used to assign a label to each part and to attribute material characteristics, design for assembly parameters, design for environment, etc. The methodology of design described here is applicable to several life cycle aspects and DFX applications including assembly, disassembly, maintainability and recycling and allow the design analysis with respect to such life cycle applications. Most of the form features of the components are extracted from LCFS functions, other form features recognition algorithms are taken from the previous studies of Coma, Mascle and Veron [23]. Using the relationship between the product features, the knowledge base of DFX design strategies, design intent and requirements, design analysis of a particular life cycle can be conducted and the product life cycle features can be derived. The computer

application developed in this study has the following advantages in supporting the product design process:

- Allowing the display of parts and their geometric features (faces, sub-faces, volumes, etc.).
- Working through the interactive modules to add non geometrical information.
- Operating certain procedures such as saving the non geometric data with the life cycle features that can be retrieved.
- Performing design analysis according to predefined life cycle applications.
- Exporting the CAD model in standard format.

Figure 4.9 represents a snap shots of LCFS based on the example on Figure 4.8 results.

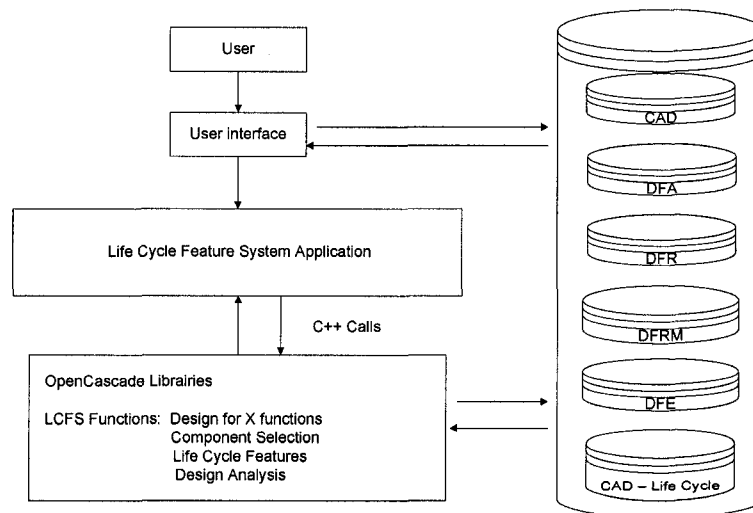


Figure 4.7 System architecture

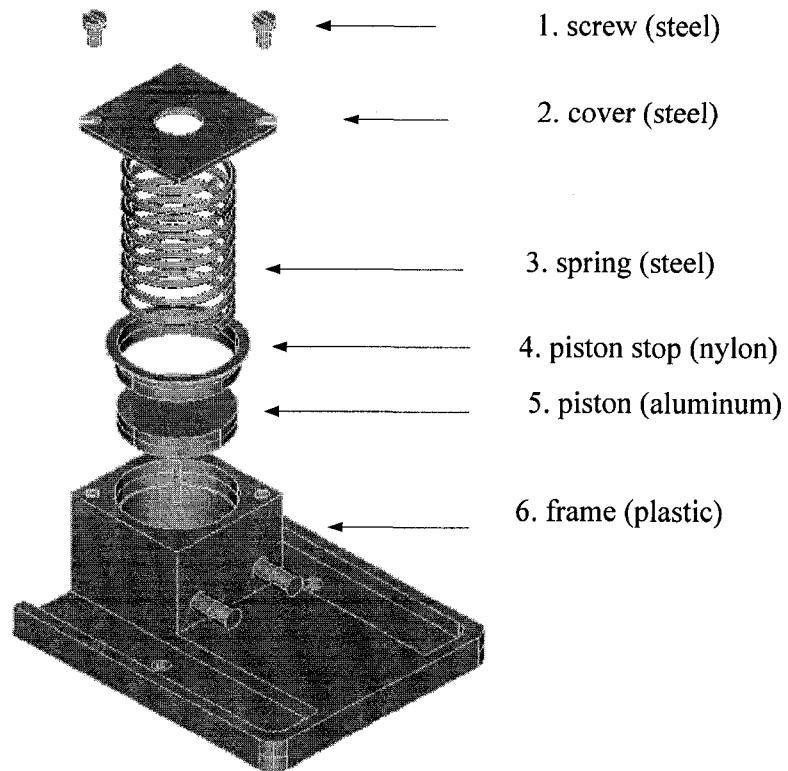


Figure 4.8 Piston assembly

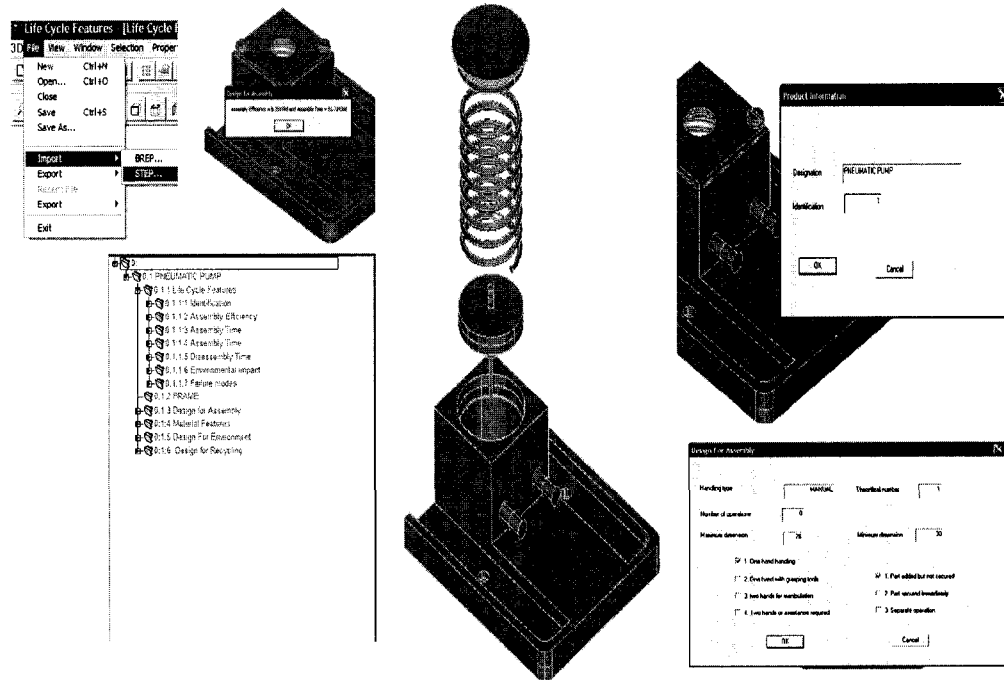


Figure 4.9 Snap shot of the application system

4.5 Conclusion and perspective

The approach presented in this paper suggests a life cycle features modeling and an integrated design analysis to support various applications of design for X for mechanical products. Given the limits presented by the models cited here life cycle features is introduced to model a complete representation of the product including several life cycle

aspects. The methodology is implemented with C++ and Opencascade geometry kernel. The developed system, Life Cycle Feature System, supports the various activities involved in the design for life cycle (assembly, disassembly, environment, etc.). The designer is able to interact with the geometrical data as well as the life cycle design features and perform design analysis with respect to several life cycle applications. In the early step of the design process, the designers can evaluate the product model with the knowledge of key design for X parameters such as the assembly efficiency, disassembly index, environment impact, etc. and redesign the product accordingly for better efficiency.

A pneumatic pump is given as an example and results are shown. *LCFS* bridges the gap that exists in current computer aided design system, design for X application and life cycle design and is valuable to the product design process.

A comprehensive study of the life cycle features and CAD should also take into account other life cycle aspects such as human factors or aesthetic features. In this way, a more comprehensive measure of the design goodness which is an important of research in product design [41] can be performed. The optimization of the design can be investigated through the use of genetic algorithms which are proven to be suitable for such design application.

4.6 References

- [1] Pahl G. and Beitz W., 1996. Engineering Design - A Systematic Approach. 2nd edition, London: Springer
- [2] Boothroyd G. and P. Dewhurst, 1983. Design for Assembly – a designers handbook. Technical report Department of Mechanical Engineering, University of Massachusetts.
- [3] Chen G., Ma Y.S., Thimm G. and Tang S.H., 2005. Knowledge-Based Reasoning in a Unified Modeling Scheme. *Computer-Aided_Design & Applications*, 2 (1-4), 173-182.
- [4] Ulrich K. T. and Eppinger S. D., 1995. Product Design and Development. McGraw Hill, New York.
- [5] Ranta M., Mantyla M., Umeda Y. and Tomiyama T., 1996. Integration of functional and feature-based product modelling. Tthe IMS/GNOSIS experience, *Computer-Aided-Design*, 18(5), 371-381.
- [6] Jia X.-P., Xiang S.-G., and Han F.-Y., 2007. Life cycle assessment and its application in process systems engineering. *Xiandai Huagong/Modern Chemical Industry* 27, 355-358.

- [7] Vezzoli C., and Sciama D., 2006. Life Cycle Design: from general methods to product type specific guidelines and checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines. *Journal of Cleaner Production* 14, 1319-1325.

- [8] Liu C., 2006. Feature based machining process planning modeling and integration for life cycle engineering. *Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal of Wuhan University of Technology* 28, 633-636.

- [9] Di Stefano P., 2006. Tolerances analysis and cost evaluation for product life cycle. *International Journal of Production Research* 44, 1943-1961.

- [10] Przekop L. A., and Kerr, S., 2004. Life cycle tools for future product sustainability. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 23-26.

- [11] Khan F. I., Sadiq R., and Veitch B., 2004. Life cycle iNdeX (LInX): A new indexing procedure for process and product design and decision-making. *Journal of Cleaner Production* 12, 59-76.

- [12] Nielsen P. H., and Wenzel H., 2002. Integration of environmental aspects in product development: a stepwise procedure based on quantitative life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 10, 247-257.

- [13] Yan X.-T., and Sawada H., 2006. A framework for supporting multidisciplinary engineering design exploration and life-cycle design using underconstrained problem solving. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM* 20, 329-350.

- [14] Bovea M. D. and Wang B., 2007. Redesign methodology for developing environmentally conscious products. *International Journal of Production Research*, 45, 4057-4072.

- [15] Sudarsan R., Fenves S.J., Sriram R.D., Wang F., 2005. A product information modeling framework for product life cycle management.. *Computer-Aided Design*, 37, 1399-1411.

- [16] Fitch P. and Cooper J.S., 2005. Life-cycle modeling for adaptive and variant design. Part 1: Methodology. *Research in Engineering Design* , 15, 216–228.

- [17] Kimura F., Matoba Y., and Mitsui K., 2007. Designing Product Reliability based on Total Product Lifecycle Modelling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56, 163-166.

- [18] Shah J.J., , Sreevalsan P., Rogers M., Billo R., Mathew A., 1988. Current Status of Features Technology (Document No. R-88-GM-04.1). Computer Aided Manufacturing-International Inc

- [19] Shah J. J. et al., 1988. Functional Requirements and Conceptual design of the feature-based modeling system. *Computer Aided Engineering Journal*, 9-15.
- [20] Kashyap S., 1999. A feature-based framework for attachment level snap-fastener design in product design for automate assembly. *IEEE international Symposium on Assembly and Task Planning*, 51-56.
- [21] Taylor L. and Henderson M., 1994. Validating a feature –based Meta-Model for mechanical products: a case stud. *Proceedings of the IFIP International Conference, Feature Modeling and Recognition in advance Cad/cam systems*, 23-39.
- [22] Henderson M.R. and Taylor L.E., 1993. A Meta-Model for Mechanical Products Based Upon the Mechanical Design Process”, *Research in Engineering Design*, 5, 140-160.
- [23] Coma O., Mascle C., Veron P., 2003. Geometric and form feature recognition tools applied to a design for assembly methodology. *Computer-Aided Design* 35, 1193-1210.
- [24] Jabbour T., Mascle C., Maranzana R., 1998. A Database for the representation of assembly features in mechanical products. *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 8(5 & 6), 483-507.

- [25] Jovane F. et al., 1993. A key issue in product life cycle: disassembly. *Annals of the CIRP*, 1-13.
- [26] Pappalardo M. and Naddeo A., 2005. Failure mode analysis using axiomatic design and non-probabilistic information. *Journal of Materials Processing Technology* , 164-165, 1423-1429.
- [27] Tuner I.Y. and Stone R.B., 2003. Mapping function to failure mode during product development.. *Research in Engineering Design*, 14 (1), 25-33.
- [28] Suh N.P., 1995. Designing-in of Quality Through Axiomatic Design. *IEEE Transactions on Reliability*, 44(2).
- [29] Donnelly K. et al., 2006. Eco-design implemented through a product-based environmental management system. *Journal of Cleaner Production* 14, 1357-1367.
- [30] Mosovsky J. et al., 2001. Assessing product design alternatives with respect to environmental performance and sustainability: A case study for circuit pack faceplates. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 252-257.
- [31] Rose, C. M., Ishii, K., and Stevels, A., 2002. Influencing design to improve product end-of-life stage. *Research in Engineering Design - Theory, Applications, and Concurrent Engineering* 13, 83-93.

- [32] Millet, D., Bistagnino, L., Lanzavecchia, C., Camous, R., and Poldma, T., 2006. Does the potential of the use of LCA match the design team needs? *Journal of Cleaner Production* 15, 335-346.
- [33] Gonzalez, B., Adenso-Diaz, B., and Muniz, L., 2001. Life cycle assessment in SMES: A fuzzy approach. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 149-157.
- [34] Huang, H.-Z., Gu, Y.-K., and Tian, Z.-G., 2006. An integrated product and process development model supporting life cycle. *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice* 13, 270-279.
- [35] Chytka, T. M., Brown, R. W., Shih, A. T., Reeves, J. D., and Dempsey, J. A., 2006. An integrated approach to life cycle analysis. 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 1360-1374.
- [36] Fitch, P., and Cooper, J. S., 2005. Life cycle modeling for adaptive and variant design part 2: case study. *Research in Engineering Design* 15, 229-241.
- [37] Kashyap S., 1999. A feature-based framework for attachment level snap-fastener design in product design for automate assembly. *IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, 51-56.
- [38] Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., and Grote K.-H., 2007. *Engineering Design: A Systematic Approach*, third edition, Springer. ISBN: 978-1-84628-318-5.

- [39] Suh, N. P., 2001, *Axiomatic Design: Advances and Applications*, Oxford University Press, New York, in press.
- [40] Xing, K., Abhary, K., and Luong, L., 2003. IREDA: An Integrated Methodology for Product Recyclability and End-of-life Design. *The Journal of Sustainable Product Design* 3, 149-171.
- [41] Kuo, T.-C., Huang, S. H., and Zhang, H.-C., 2001. Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering* 41, 241-260.

CHAPITRE 5 : DISCUSSION GÉNÉRALE

Dans ce chapitre nous commençons par décrire l'architecture de la maquette numérique du Système de caractéristiques de cycle de vie (SCAV). Cette maquette informatique nous permet de valider la méthodologie ainsi que les concepts que nous avons proposés dans les chapitres précédents. Nous décrivons également comment les différentes fonctions de SCAV sont assurées. Nous en tirons profit pour décrire la fonction globale de SCAV au sein de OpenCascade.

La maquette numérique a été entreprise dans le but d'assurer les caractéristiques géométrique, topologique ainsi que les attributs de cycle de vie relatifs à plusieurs applications. Elle comprend cinq phases essentielles :

- La construction de la structure des caractéristiques associées à chaque face, à chaque composant et au produit.
- La génération du modèle géométrique
- La modélisation dynamique des caractéristiques du produit
- L'évaluation de la conception par rapport à chaque aspect du cycle de vie considéré
- L'évaluation globale de la conception pour l'ensemble du cycle de vie

Le modèle du produit est représenté par un modèle B-rep topologique et géométrique dont les entités topologiques permettent de supporter les entités technologiques du cycle de vie.

Pour générer le modèle solide d'un assemblage, nous avons choisi OpenCascade qui est un logiciel ouvert de modélisation solide. Ce logiciel gratuit offre plusieurs avantages qui permettent une définition exacte des relations entre des entités topologiques et géométriques du produit. Il offre également les fonctionnalités suivantes :

- l'importation et l'exportation de plusieurs formats de modèles solides,
- la visualisation des modèles ainsi que les fonctions qui y sont rattachées,
- l'utilisations des procédures API (*Application Procedural Interface*) qui permettent l'exécution des fonctions géométriques tels que la détermination des volumes, des surfaces ainsi que le balayage des faces dans une direction déterminée, etc.,
- la possibilité d'incorporer d'autres bibliothèques de fonctions par l'ajout de classes, d'objets et d'attributs,
- l'avantage de sauvegarder le modèle géométrique et topologique en même temps que les attributs non géométriques dans un même fichier grâce à leurs bibliothèques de fonction OCAF.

Les deux dernières fonctionnalités de OpenCascade constituent une grande particularité de ce modéleur par rapport aux autres logiciels de modélisation solide. L'exploitation de ces fonctionnalités nous a permis de réaliser une adaptation en intégrant les caractéristiques du cycle de vie telles que nous les avons définies dans le chapitre consacré à la représentation des données.

La Figure 5.1 décrit l'architecture du système SCAV.

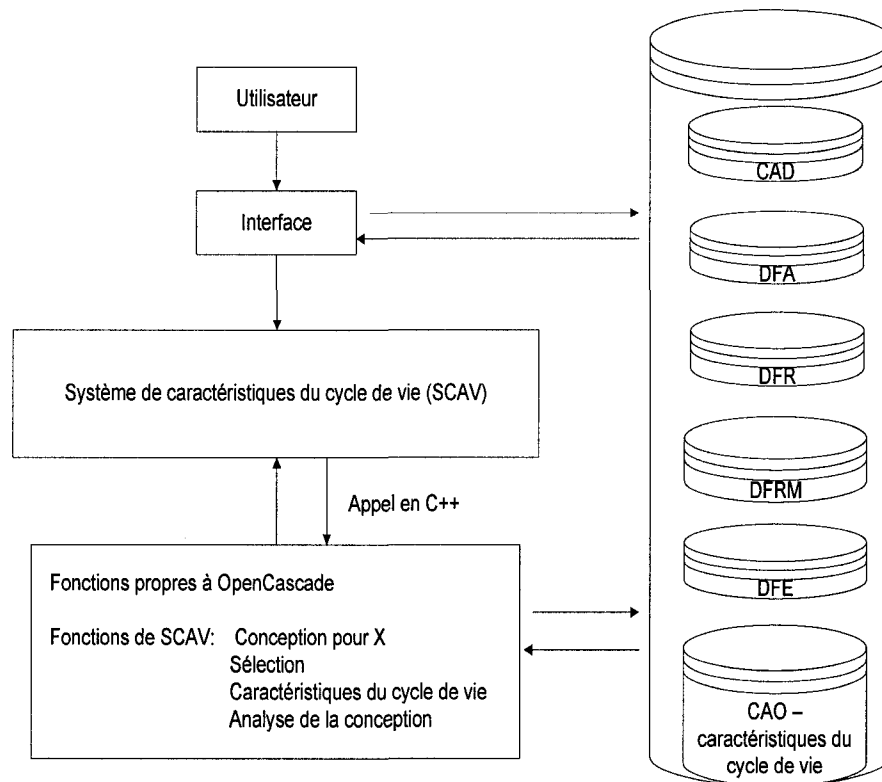


Figure 5.1 Architecture du système SCAV

Les fonctionnalités de SCAV sont les suivantes :

- exécuter les différentes tâches de modélisation du produit,
- intégrer les caractéristiques technologiques liées au cycle de vie à chaque niveau de la structure topologique du produit,
- visualiser le modèle géométrique et topologique du produit,

- visualiser les caractéristiques liées à chaque composant,
- importer des modèles solides 3D de produits,
- exporter ou sauvegarder les caractéristiques du produit avec le modèle géométrique.

Le résultat est la génération d'un modèle de produit intégrant toutes les caractéristiques de cycle de vie propres à chaque composant, chaque face ainsi que le résultat sur l'analyse de la conception par rapport à un aspect particulier du cycle de vie.

La génération du modèle de produit est réalisée en plusieurs étapes décrites de façon plus détaillée dans la partie consacrée à la procédure d'analyse. Mais elles peuvent être résumées comme suit :

- sélectionner l'entité topologique sur laquelle une caractéristique doit être attribuée,
- sélectionner l'application cycle de vie qui sera étudiée et déterminer les caractéristiques de cycle de vie qui sont associées à l'entité topologique. Cette tâche est interactive et se fait à partir de l'interface utilisateur ce qui permettra d'associer tour à tour les caractéristiques de cycle de vie liées à chaque composant.

Le résultat consiste à générer les caractéristiques cycle de vie produit puisqu'elles découlent des caractéristiques intrinsèques aux composants, aux faces etc.

Ces résultats apparaissent sous la forme d'un navigateur qui intègre toutes les caractéristiques non géométriques. Le modèle topologique et géométrique est représenté

sur la vue principale. Ce qui offre l'avantage d'exécuter les fonctions liées à la visualisation telles que les projections, agrandissement, etc.

Les classes d'objets et d'attributs de SCAV ont été définies en suivant les recommandations spécifiques pour pouvoir les intégrer dans le noyau de OpenCascade. Ce qui permet de sauvegarder les données et de les régénérer similairement aux classes d'objets et d'attributs de OpenCascade.

En tenant compte des observations précédentes, l'exécution des procédures de fonctionnalité de SCAV se fait à partir de fonctions associées à chaque classe d'objets ou d'attributs. Les fonctions mise en œuvre permettent de faire appel aux fonctions propres du modelleur. Ce qui mène à une extension de ce dernier pour supporter l'intégration des caractéristiques de cycle de vie et l'évaluation de la conception du modèle du produit.

Procédure d'analyse

La procédure d'analyse de conception est décrite à travers un exemple pratique de conception d'un produit mécanique. Elle comprend les étapes énumérées de 1 à 9 et commence par l'identification des informations géométriques du produit, ensuite l'analyse du produit du point de vue de la conception pour le cycle de vie en prenant en compte les caractéristiques du produit. Elle se termine par l'évaluation de l'ensemble des caractéristiques de cycle de vie prises en considération et une reconception en vue de l'amélioration des caractéristiques de cycle de vie du produit.

Les étapes 1 à 3 décrivent l'identification du produit ainsi que l'importation du modèle CAD du produit au niveau de l'application informatique. L'analyse des caractéristiques

de cycle de vie (assemblage, désassemblage, etc.) est effectuée à travers les étapes 4 à 8. L'étape 9 permet d'attribuer une caractéristique de conception du produit du point de vue de la conception pour le cycle de vie.

Etape 1 : Il s'agit dans cette étape d'obtenir les meilleures informations sur le produit ou l'assemblage. Les éléments utiles sont les suivants:

- les schémas d'ingénierie
- les exigences de conception
- les dessins existants

La figure 5.2 montre une vue éclatée d'un produit mécanique.

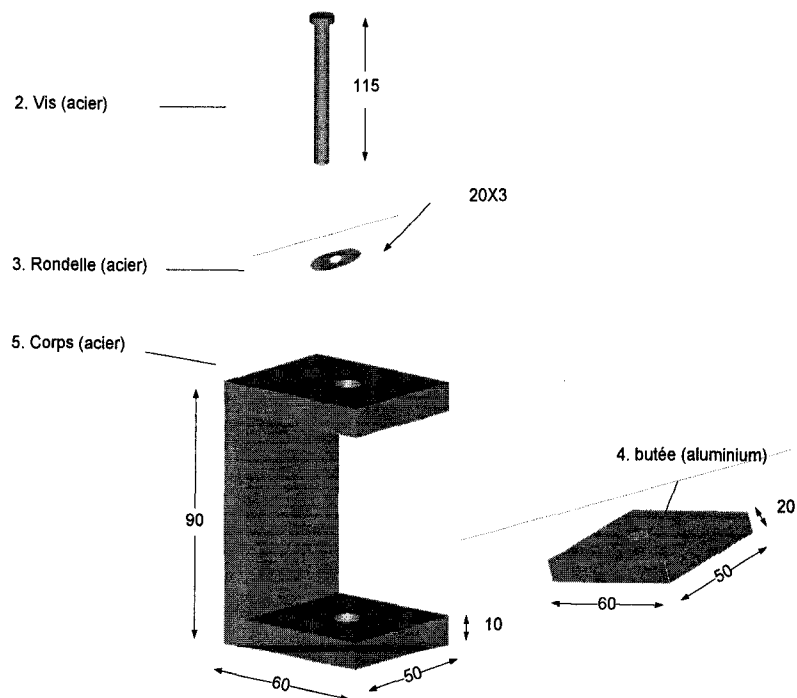


Figure 5.2 Vue éclatée de l'assemblage mécanique (dimensions en mm)

Etape 2 : Le modèle de produit est exécuté par un logiciel de modélisation pour être importé dans l'application par la fonction *import* de la librairie de OpenCascade. L'utilisation de cette fonction offre l'avantage de maintenir les informations géométriques et topologiques de même que l'assemblage du produit. Une autre utilité de cette fonctionnalité est la possibilité de déterminer les propriétés liées à la géométrie que le concepteur a besoin pour déterminer le poids des composants si les caractéristiques de matériaux ont été bien définies.

Les figures 5.3, 5.4 et 5.5 représentent respectivement le modèle 3D solide d'une pièce mécanique réalisé avec un modeleur solide commercial ; une vue en 3D du modèle importé au niveau du logiciel d'application ; les propriétés volumiques obtenues pour un composant au niveau de l'application informatique. La connaissance des informations volumétriques est nécessaire pour obtenir le poids des composants par exemple qui sera utilisé pour l'évaluation de certaines caractéristiques du cycle de vie du produit.

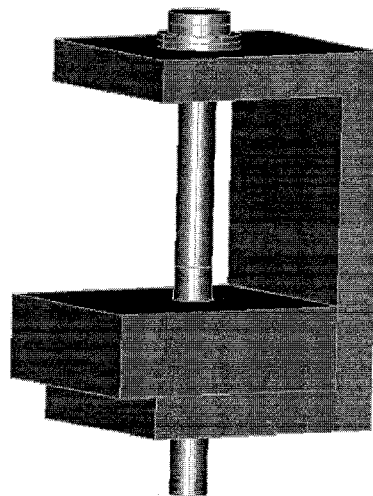


Figure 5.3 Représentation du modèle solide de la pièce mécanique

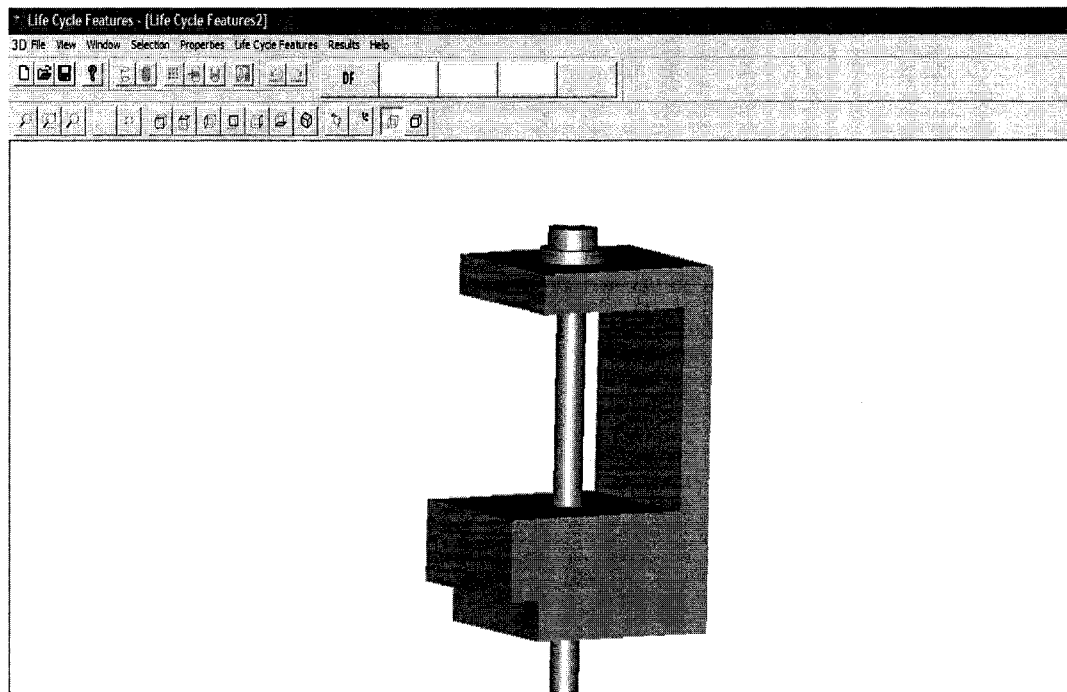


Figure 5.4 Importation et représentation du modèle solide de la pièce mécanique

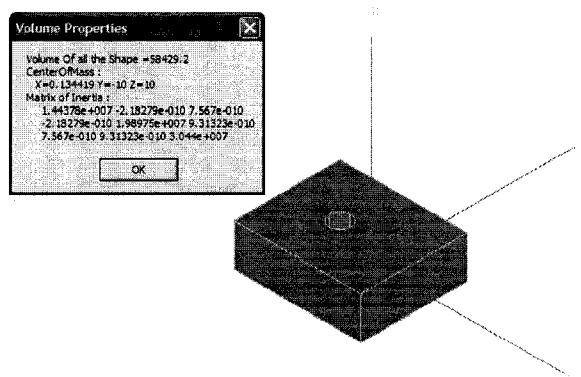


Figure 5.5 Détermination des caractéristiques volumétriques

Etape 3

Numéroter les composant en commençant par l'assemblage (1) ainsi de suite tout en suivant l'ordre d'un démontage (figure 5.6).

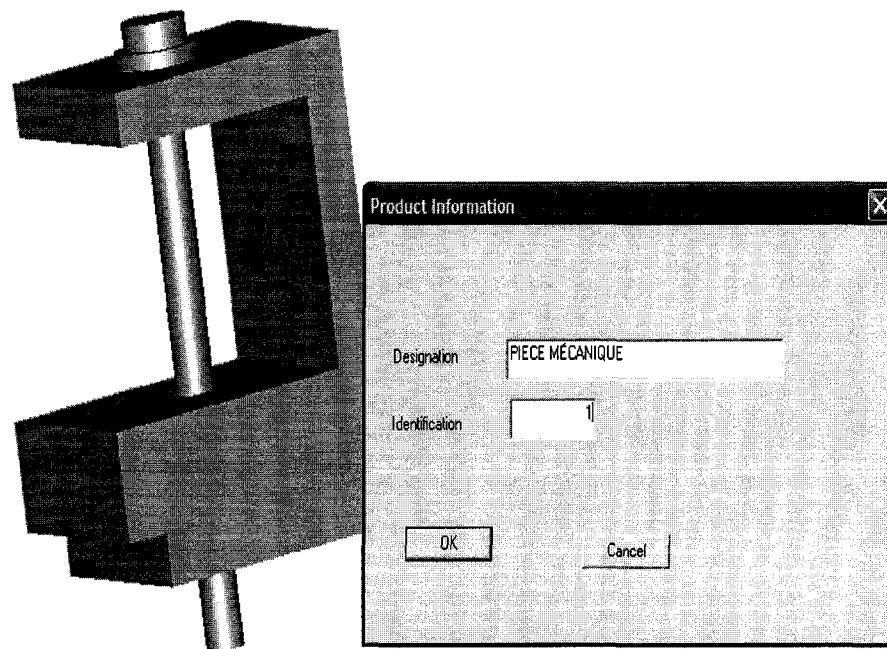


Figure 5.6 Information générale sur le produit

La page générale sur la figure 5.7 permet la sélection d'un composant ainsi que la saisie des données élémentaires.

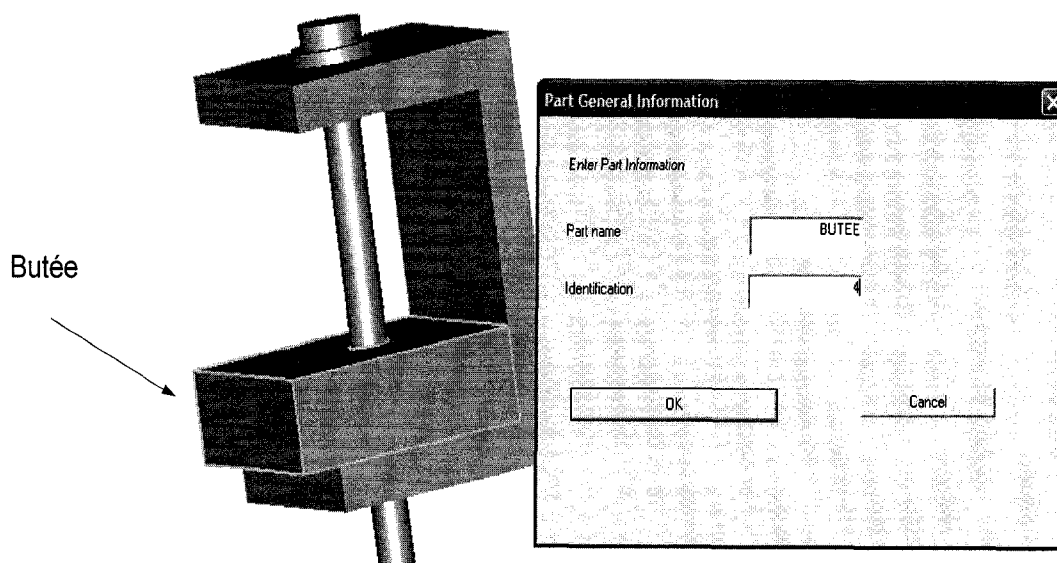


Figure 5.7 Sélection d'un composant et boîte de dialogue pour l'information générale sur un composant.

Etape 4 : Analyse de la conception pour l'assemblage

La méthode suivie est celle de Boothroyd [46]. Cette analyse a pour but de déterminer l'assemblabilité des composants et présente comme sortie un coefficient représentant l'efficacité d'assemblage du produit. La méthode de Boothroyd-Dewhurst permet de déterminer le système d'assemblage le plus adapté à un produit en fonction des

paramètres du produit et ceux de l'entreprise à partir d'un tableau dédié. Des tableaux sont également utilisés dans le processus d'évaluation d'une pièce qui, en fonction des caractéristiques géométriques et technologiques, fournissent une estimation des coûts de manipulation et d'insertion de cette pièce, en opérations manuelles ou automatiques. Le processus de manipulation manuelle comprend la prise en main, le transfert et l'orientation des pièces ou sous-ensembles avant qu'ils ne soient insérés ou ajoutés au support de travail ou à l'assemblage partiellement construit. Ce tableau concerne avant tout des caractéristiques géométriques, notamment les symétries α et β et les dimensions de la pièce. Il fournit le code à deux chiffres de manipulation manuelle et l'estimation du temps de manipulation d'une pièce dans la méthode de Boothroyd. Les caractéristiques géométriques élémentaires de la pièce sont aussi prises en compte.

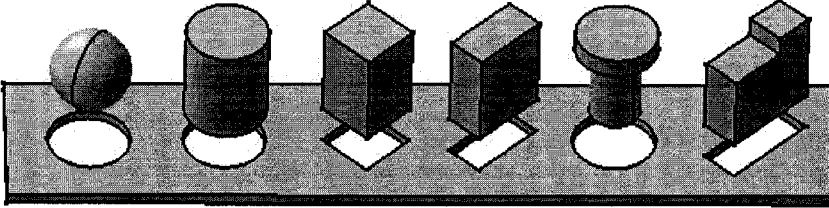
Pour le composant numéro 5 (figure 5.2), corps en acier, les paramètres ci-dessus sont pris en considération en ce qui concerne l'analyse de la conception en vue de l'assemblage.

Paramètres d'entrées :

- Type d'assemblage (*handling type*): il s'agit d'un assemblage manuel
- *Redundancy* est le critère qui exprime si le composant est nécessaire ou non dans la réalisation du produit.
- Le nombre de fois que le composant est présent dans l'assemblage
- *Maximum dimension* et *minimum dimension* expriment les encombrements de la pièce et permettent de déterminer la classe du composant
- Analyse de la manipulation
- Analyse de l'insertion

- La symétrie α est la symétrie de rotation d'une pièce autour d'un axe perpendiculaire à l'axe d'insertion. Une pièce est de symétrie α lorsqu'elle ne requiert aucune orientation par rapport à ses extrémités.
- La symétrie β est la symétrie de rotation d'une pièce autour de son axe d'insertion. Une pièce à symétrie rotationnelle β ne requiert aucune orientation autour de son axe principal de révolution.

Les symétries α et β nécessitent la connaissance de l'axe d'insertion de la pièce dans le produit. La figure 5.8 fournit un exemple de détermination des symétries α et β pour différentes formes géométriques.



α	0	180	180	90	360	360
β	0	0	90	180	0	360

Figure 5.8 Exemple de symétrie α et β

Les informations relatives à la conception pour l'assemblage sont représentées à la figure 5.9.

Design For Assembly

Handling type: MANUEL

Redundancy: 1

Number of operations: 1

Symmetry alpha: 360

Symmetry beta: 360

Maximum dimension: 90

Minimum dimension: 60

Handling operations:

- 1. One hand handling
- 2. One hand with grasping tools
- 3. two hands for manipulation
- 4. Two hands or assistance required

Inserting operations:

- 1. Part added but not secured
- 2. Part secured immediately
- 3. Separate operation

OK Cancel

Figure 5.9 Page d'information en vue de la conception pour l'assemblage

Quand la saisie est terminée, il faut cliquer sur « OK » pour enregistrer tous les paramètres. Il faut noter que la saisie de tous les paramètres n'est pas nécessaire. La sélection par défaut correspond à celle d'une pièce idéalement conçue pour être assemblée.

En suivant la méthode de Boothroyd-Dewhurst, le concepteur obtient les résultats présentés ci-dessous.

Résultat de l'analyse de la conception pour l'assemblage pour le composant numéro 5 :

- le composant est petit
- le composant peut être manipulé d'une seule main sans l'aide d'outils,
- la symétrie alpha est 360 et la symétrie bêta 360,
- le composant est facile à saisir
- le composant n'a pas de mouvement relatif par rapport aux autres composants déjà assemblés.
- Il n'est pas d'un matériau différent et n'est pas isolé de tous les composants déjà assemblés. Le composant n'est pas indépendant de ceux déjà assemblés pour permettre leur assemblage et leur démontage.

Les informations sur les dimensions et les symétries permettent de déterminer les codes pour la manipulation manuelle et l'insertion manuelle. Ces codes permettent de connaître les temps exprimés en secondes pour la manipulation et l'insertion du composant.

Ainsi pour le composant numéro 5, nous obtenons les informations suivantes :

- Le temps de manipulation de 1.95 s
- Le temps d'insertion est de 1.5 s

En renouvelant la saisie des données et l'analyse de la conception pour l'assemblage pour toutes les pièces, les résultats sont synthétisés sur le tableau 5.1.

Tableau 5.1 Efficacité d'assemblage

Composants	Numéro	Nombre de fois	Temps de manipulation	Temps d'insertion	Temps d'assemblage	Nombre minimal Théorique
corps	5	1	1.95	1.5	1.38	1
butée	4	1	1.80	2.5	4.3	1
rondelle	3	1	2.25	2.5	4.75	0
vis	2	1	1.5	8	9.5	1

$$TM= 19.93s \quad NM= 3$$

$$EM = 3 \times NM / TM \quad (5.1)$$

EM est l'efficacité de la conception manuelle

NM est le nombre minimal théorique de composants

TM est le temps d'assemblage total

$$EM= 0.45$$

Etape 5 : Analyse de la conception pour le désassemblage

L'accessibilité est exprimée par la facilité d'accéder à un composant à l'aide d'un outil ou de façon manuelle. Le positionnement mesure le degré de précision nécessaire pour mener l'opération de désassemblage.

La difficulté de désassemblage est fonction de l'accessibilité, le positionnement, l'utilisation d'outil de désassemblage et de positionnement, la manipulation des composants et la force nécessaire pour le désassemblage:

- Accessibilité
- Utilisation d'outil
- Force de désassemblage
- Manipulation

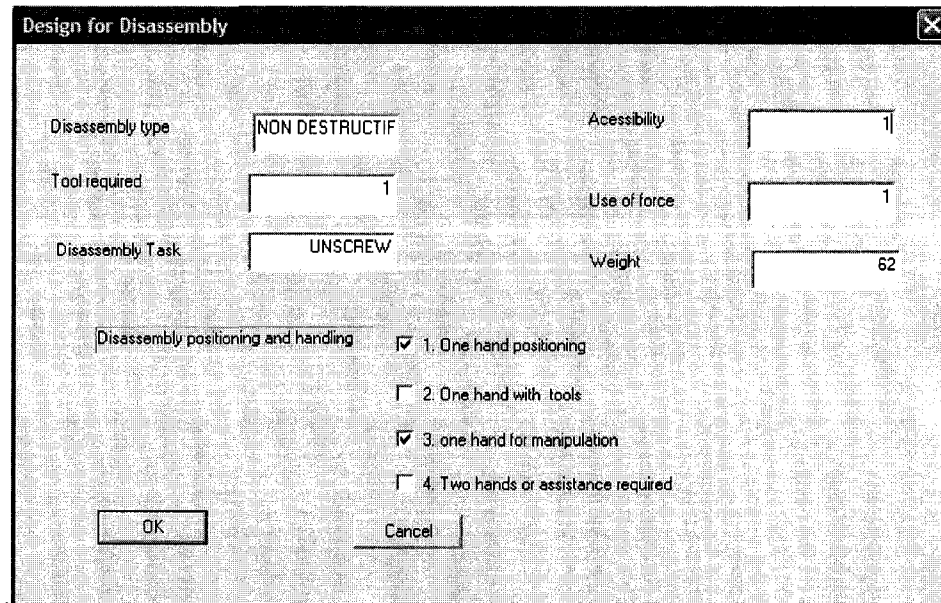
Paramètres d'entrées :

- Type de désassemblage: destructif ou non destructif (pour la maintenance)
- Eléments d'attachement
- Outil utilisé
- Redondance: le critère qui exprime si le composant est nécessaire ou non dans la réalisation du produit.
- Les encombrements du composant
- Le poids du composant
- Le volume
- Les symétries

Paramètres de sorties:

- L'accessibilité du composant : 1(difficile)...4 (facile)
- Nécessité d'un outil pour le désassemblage : 1(avec outil)... sans outil (4)
- Force de désassemblage : 1(importante)... faible (4)
- Manipulation: 1 (difficile)... 4 (facile)
- Index de désassemblage

Les informations relatives à la conception pour le désassemblage sont représentées à la Figure 5.10.



The screenshot shows a dialog box titled "Design for Disassembly" with a close button (X) in the top right corner. The dialog box contains the following fields and options:

Disassembly type	NON DESTRUCTIF	Acessibility	1
Tool required	1	Use of force	1
Disassembly Task	UNSCREW	Weight	62

Below the input fields, there is a section titled "Disassembly positioning and handling" with four options:

- 1. One hand positioning
- 2. One hand with tools
- 3. one hand for manipulation
- 4. Two hands or assistance required

At the bottom of the dialog box, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Figure 5.10 Page d'information en vue de la conception pour le désassemblage

Résultat de l'analyse de la conception pour le désassemblage pour le composant numéro 2 (vis):

- L'accessibilité du composant: 4
- Nécessité d'un outil pour le désassemblage: 1
- Force de désassemblage: 4
- Manipulation: 2

L'index de désassemblage du composant numéro 2 est exprimé par la somme des indices :

$$D_{\text{index composant}} = (4 + 1 + 4 + 2) / D_{\text{index max}} \text{ avec } D_{\text{index max}} = 16$$

$$D_{\text{index composant}} = 0.69$$

En renouvelant la saisie des données et l'analyse de la conception pour le désassemblage pour toutes les pièces on obtient les résultats qui sont compilés dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 Index de désassemblage

Composants	Numéro	Nombre de fois	Accessibilité	Outil	Force	Manip.	D _{index}
Corps	5	1	4	4	4	3	0.94
Butée	4	1	4	4	4	3	0.94
rondelle	3	1	4	4	4	4	1
Vis	2	1	4	1	4	2	0.69

$$D_{index_produit} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{index_composant}}{n} \quad (5.2)$$

n est le nombre de composant du produit.

$$D_{index_produit} = 0.89$$

L'index appliqué au niveau de la conception pour le désassemblage est de 0.89

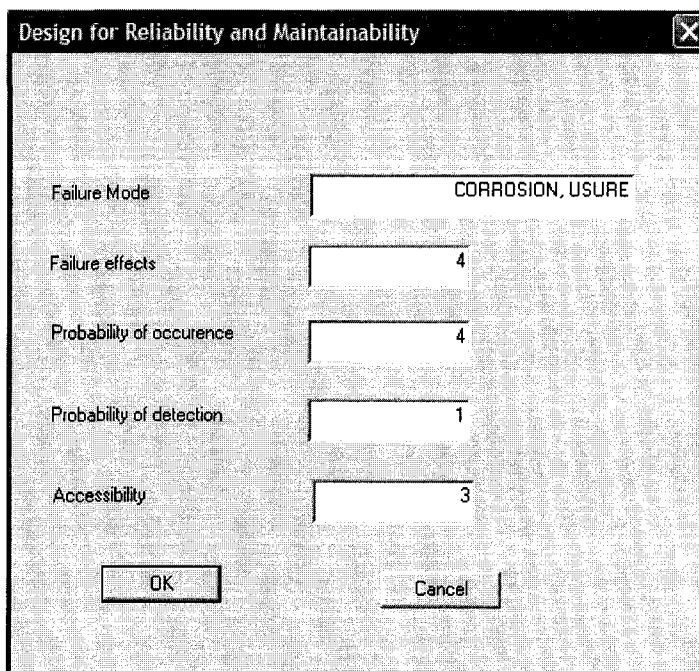
Etape 6 : Analyse de la conception pour la maintenabilité et la fiabilité

Il s'agit pour chaque composant d'analyser les modes de défaillances auxquels il est soumis, la probabilité que cette défaillance survienne ainsi que les effets de la défaillance sur le produit.

Les paramètres à prendre à compte sont les suivants:

- Mode de défaillance
- Conséquence négative de la défaillance: 1(faible)...4(élevée)
- Indice de la défaillance (exprime la probabilité de défaillance): 1(faible)...4(élevée)
- Indice de détection des défauts (exprime la probabilité de détection des défauts): 1(élevée)...4(faible)
- Accessibilité aux défauts: 1(élevé)...4(faible)

La figure 5.11 montre les caractéristiques de maintenabilité et fiabilité liées au composant numéro 5.



Parameter	Value
Failure Mode	CORROSION, USURE
Failure effects	4
Probability of occurrence	4
Probability of detection	1
Accessibility	3

Figure 5.11 Page d'information en vue de la conception pour la fiabilité et la maintenabilité.

L'indice de fiabilité et de maintenabilité est le produit des paramètres de la figure 5.11 soit 48 (conséquence de la défaillance, indice de défaillance, détection et accessibilité).

Le processus est répété pour l'ensemble des composants pour aboutir aux résultats présentés sur le tableau 5.3.

Tableau 5.3 Caractéristiques de fiabilité et maintenabilité

Composants	Numéro	Nombre de fois	mode de défaillance	Conséquence de la défaillance	Indice de défaillance	Indice de détection	Accessibilité	Facteur de risque
Corps	5	1	corrosion, usure	4	4	1	3	48
Butée	4	1	usure	4	4	1	3	48
rondelle	3	1	usure	3	2	1	3	18
Vis	2	1	corrosion, fatigue	4	3	2	2	48

Le facteur de risque moyen associé à cet assemblage est 40.5.

Etape 7 : Analyse de la conception pour le recyclage

On s'intéresse à déterminer à ce niveau le taux de recyclabilité de l'assemblage. Ce taux est obtenu avec le cumul des poids des composants recyclables et la connaissance du poids total de l'assemblage.

Paramètres d'entrées :

- Poids du composant
- Index de désassemblage
- Poids total de l'assemblage
- Coût du recyclage
- Présence de matières dangereuses

Pour le composant numéro 5 (corps), la figure 5.12 permet d'identifier les paramètres liés à la conception pour le recyclage.

Design for recycling

Material content:

Weight:

Fasteners

Type: Compatibility:

Quantity:

Hazard materials:

Recoverable materials:

Recyclability cost:

EDL:

OK Cancel

Figure 5.12 Page d'information en vue de la conception pour le recyclage

Le processus d'analyse est répété pour l'ensemble du produit. Le tableau 5.4 résume les résultats obtenus pour l'analyse du produit selon la conception pour le recyclage.

Tableau 5.4 Taux de recyclabilité

Composants	Numéro	Nombre de fois	Matériau	Matières toxiques	Poids brut	Poids recyclable	Stratégie de fin de vie
Corps	5	1	acier	non	734	734	recyclage
Butée	4	1	aluminium	non	158	158	recyclage
rondelle	3	1	acier	non	6	6	recyclage
Vis	2	1	acier	non	62	62	recyclage

$$\text{Poids brut} = 960 \quad P_{\text{recyclable}} = 960$$

Le taux de recyclabilité du produit est le rapport entre le poids des composants recyclable sur le poids total de l'assemblage. Pour notre cas, le taux de recyclage est de 100%.

Etape 8 : Analyse de la conception pour l'environnement

Pour chaque composant, on détermine les facteurs d'impact élémentaire en fonction des matériaux constitutifs, des procédés de fabrication ainsi que de la stratégie de fin de vie qui a été choisie lorsque le produit atteint la fin de vie. Les impacts élémentaires exprimés en *millipoints* par kg sont déterminés par la méthode des éco-indicateurs 99 [47].

Paramètres d'entrées :

- Poids du composant
- Matériau constitutif
- Impact environnemental élémentaire pour l'extraction des matériaux
- Impact environnemental élémentaire pour la fabrication
- Stratégie de fin de vie
- Impact environnemental élémentaire en fin de vie

Pour le composant numéro 5, la figure 5.13 représente la page interface pour l'acquisition de données des paramètres de conception pour l'environnement.

Design for environment

Materials

Weight

End Of Life Strategy

Indicator (in millipoints per kg)

Materials	<input type="text" value="86"/>	EOL	<input type="text" value="-70"/>
Manufacturing	<input type="text"/>		

OK Cancel

Figure 5.13 Page d'information en vue de la conception pour l'environnement

Paramètres de sortie :

- Impacts environnementaux
- Impacts environnementaux de fabrication
- Impact environnementaux à la fin de vie

Le processus d'analyse est répété pour chaque composant et le tableau 5.5 résume les résultats obtenus pour l'analyse de la conception du produit selon le critère environnemental.

Tableau 5.5 Caractéristiques liées à la conception pour l'environnement

Composants	Numéro	Matériau	$e_{\text{matériau}}$	Poids brut (g)	Em	$e_{\text{recyclage}}$	E_{eol}
Corps	5	acier	86	734	63.124	-70	-51.380
Butée	4	aluminium	60	158	9.480	-720	- 113.760
rondelle	3	acier	86	6	0.516	-70	-0.420
Vis	2	acier	86	62	5.332	-70	-4.340

Les unités d'impacts environnementaux sont en millipoints.

L'impact environnemental est de : $78.452 - 169.9 = -91.448$

Etape 9: Performance de la conception

La performance de la conception est déterminée en faisant appel aux paramètres de pondération (λ) appliqués à chaque caractéristique de conception pour le cycle de vie. Ces paramètres indiquent le poids d'un critère donné sur l'évaluation de l'ensemble du cycle de vie. D'autre part, puisque les caractéristiques de conception pour le cycle de vie obtenues suite à l'analyse de conception ne sont pas homogènes, des valeurs harmonisées sont définies au tableau 5.6. A chaque caractéristique de cycle de vie, on attribue une valeur V de 1, 2, 3 ou 4 selon le résultat obtenu dans la conception pour X qui a été prise en considération.

Tableau 5.6 Coefficients affectés aux caractéristiques de cycle de vie

	Valeur	DFA	DFD	DFR	DFRM	DFE
Très bien	4	>0.5	>0.9	>0.9	<16	<10
Bien	3	$0.4 \leq x \leq 0.5$	$0.8 \leq x \leq 0.9$	$0.8 \leq x \leq 0.9$	$16 \leq x \leq 60$	$10 \leq x \leq 40$
Moyen	2	$0.3 \leq x < 0.4$	$0.7 \leq x < 0.8$	$0.7 \leq x < 0.8$	$60 < x \leq 150$	$40 < x \leq 100$
Faible	1	< 0.3	< 0.7	< 0.7	> 150	> 100

Finalement le tableau 5.7 résume les résultats qui sont obtenus pour l'analyse de la conception du produit mécanique.

Tableau 5.7 Résultats de l'analyse de la conception du produit mécanique

Critère d'évaluation	λ	Caractéristiques de cycle de vie	Attributs de cycle de vie	V non pondérée	V pondérée λV
DFA (bonne assemblabilité)	0.3	Efficacité d'assemblage	0.45	3	0.9
DFD (facile à désassembler)	0.2	Index de désassemblage	0.89	3	0.6
DFR (recyclage maximum)	0.2	Taux de recyclage	1	4	0.8
DFRM (fiable et facile à maintenir)	0.2	Facteur de risque	40.5	3	0.6
DFE (impacts envi. minimum)	0.1	Impacts environ.	-91.448	4	0.4

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1 \qquad \sum_{i=1}^m V_{i(\text{non_pondéré})} = 17 \qquad \sum_{i=1}^m V_{i(\text{pondéré})} = 3.3$$

m est le nombre d'aspects de cycle de vie.

La valeur de la conception selon les aspects de cycle de vie pris en considération est obtenue par la relation suivante :

$$LFC_{\text{pondéré}} = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i V_{i(\text{non_pondéré})}}{V_{\text{max}} \sum_{i=1}^m \lambda_i} \text{ avec } V_{\text{max}} = 4 \qquad (5.3)$$

$$LFC_{\text{pondéré}} = 0.825$$

$$LFC_{non_pondéré} = \frac{\sum_{i=1}^m V_{i(non_pondéré)}}{mV_{max}} = 0.85$$

A la suite d'une reconception du produit mécanique dans laquelle on essaie d'améliorer certaines caractéristiques de cycle de vie comme les caractéristiques de DFA, DFD ou DFRM, la nouvelle variante peut être comparée à la variante 1 de la conception en calculant de nouveau la caractéristique de cycle de vie ($LFC_{pondéré}$). Ce qui permet de comparer deux types de produit du point de vue de la conception pour le cycle de vie. La figure 5.14 montre une vue de l'application informatique avec les caractéristiques de cycle de vie, le modèle solide 3D du produit ainsi que les valeurs de la caractéristique globale (non pondérée et pondérée).

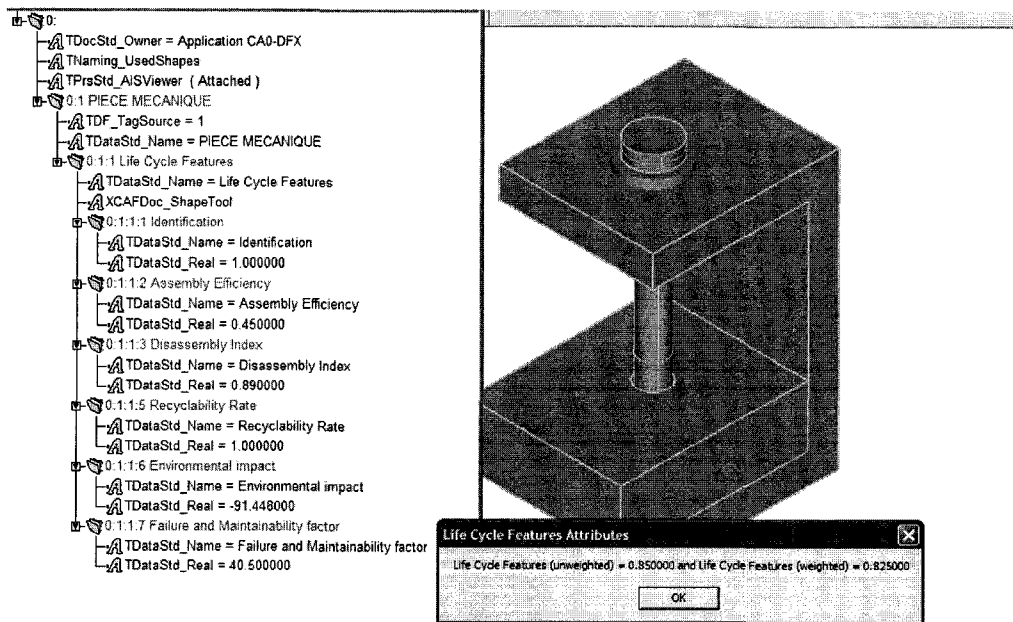


Figure 5.14 Caractéristiques de cycle de vie présentée par l'application informatique

Ainsi pour le produit mécanique, en vue d'améliorer l'assemblage, le désassemblage et la maintenabilité, le schéma de la variante 2 est présentée à la figure 5.15. Dans ce modèle, la rondelle est supprimée et le PVC rigide est choisi comme matériau pour tous les composants. Ceci a pour conséquence de réduire le temps d'assemblage, d'améliorer le désassemblage, de rendre le produit plus fiable (corrosion supprimée) et plus maintenable. Ceci va au détriment de la conception pour l'environnement. Cependant la pondération λ attribuée à cette caractéristique étant plus faible, nous améliorons ainsi la caractéristique cycle de vie du produit.

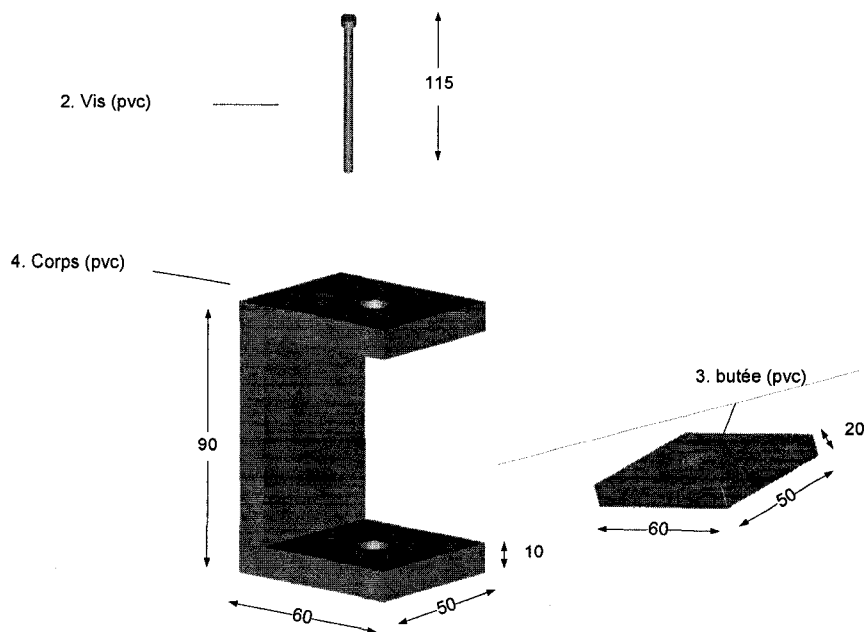


Figure 5.15 Variante 2 du produit mécanique

Le tableau 5.8 présente le résumé des résultats de l'analyse de la conception pour la variante 2 du produit mécanique.

Tableau 5.8 Résultats de l'analyse de la conception sur la variante du produit

Critère d'évaluation	λ	Caractéristiques de cycle de vie	Attributs de cycle de vie	V non pondérée	V pondérée λV
DFA (bonne assemblabilité)	0.3	Efficacité d'assemblage	0.59	4	1.2
DFD (facile à désassembler)	0.2	Index de désassemblage	0.94	4	0.8
DFR (recyclage maximum)	0.2	Taux de recyclage	1	4	0.8
DFRM (fiable et facile à maintenir)	0.2	Facteur de risque	18	3	0.6
DFE (impacts envi. minimum)	0.1	Impacts environ.	22.4	3	0.3

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1 \qquad \sum_{i=1}^m V_{i(\text{non_pondéré})} = 18 \qquad \sum_{i=1}^m V_{i(\text{pondéré})} = 3.7$$

$$LFC_{\text{pondéré}} = 0.925 \text{ et } LFC_{\text{non_pondéré}} = 0.90$$

La variante 2 a donc une meilleure caractéristique globale de conception pour le cycle de vie.

Limites

La méthodologie que nous avons suivie dans nos travaux de recherche ont permis d'intégrer les caractéristiques du produit durant son cycle de vie au stade de la conception en vue d'une évaluation de la conception. Cependant force est de noter les limites inhérentes à notre méthodologie qui sont les suivantes :

- Dans l'évaluation des caractéristiques de cycle de vie relatives à l'assemblage et au désassemblage, nous assumons que certaines caractéristiques géométriques telles que la boîte englobante ou les axes de symétrie des composants sont acquises par un module de détection de caractéristiques. Elles peuvent aussi être évaluées manuellement par le concepteur.
- Le modèle permet au concepteur de faire une évaluation rapide de la performance environnementales du produit en vue de modifier le modèle de produit pour satisfaire les exigences de conception au stade du développement du produit. Cependant cette évaluation n'est pas complète puisqu'elle ne tient pas compte de plusieurs aspects tels que les impacts environnementaux causés par l'utilisation du produit ou durant les procédés de fabrication. Une telle étude suppose d'avoir beaucoup plus de données relatives au produit durant la phase de conception. Ce qui n'est pas très évident.
- La méthodologie de conception suivie n'a pas permis la détermination des caractéristiques telles que le taux de défaillance du système. Cependant il permet au concepteur de se faire une idée sur les conséquences de la défaillance (critique, grave, etc.) d'un composant donné sur le produit à travers les caractéristiques de conception pour la maintenabilité et la fiabilité. L'information fournie est purement qualitative à ce

niveau. Au fur et à mesure que la conception progresse, les informations sur le taux de défaillances ou le MTTF sont très importantes à évaluer pour connaître le comportement du produit en terme de fiabilité et maintenabilité.

- Les caractéristiques en rapport avec la recyclabilité et le désassemblage doivent être plus développées. Ces caractéristiques doivent tenir compte de beaucoup plus de paramètres pour être plus représentatives.

- Aussi, certaines caractéristiques ont été intégrées manuellement dans le système. Il sera intéressant de développer un outil plus automatique qui permet de prendre des caractéristiques de conception sur d'autres bases de données qui seront liées à SCAV. Ceci contribuera à réduire les délais de conception de produits.

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a été consacré pour la matérialisation de la méthodologie décrite dans les pages précédentes. Une maquette logicielle a été mise en œuvre en vue de valider la construction des attributs pour chacune des applications de cycle de vie liées à chaque composant ainsi que les caractéristiques de matériau prises en compte pour évaluer la conception du produit sous plusieurs aspects (environnement, assemblage, etc.). Ces caractéristiques nécessaires pour l'évaluation du modèle du produit ne sont pas prises en compte par les systèmes actuels de modélisation solide.

D'autre part, l'association des caractéristiques technologiques aux composants en plus des informations géométriques et topologiques permettent de donner un attribut de cycle

de vie au produit par rapport à l'ensemble des caractéristiques qui sont prises en compte dans le modeleur.

Le système d'aide à la conception mis en place a permis de procéder à la détermination des différentes caractéristiques liées aux entités choisies.

Les exemples présentés permettent d'envisager un composant avec plusieurs pièces, mais aussi d'ajouter d'autres fonctionnalités qui peuvent correspondre à la prise en compte de nouvelles applications de cycle de vie.

La prise en compte d'un volume d'information important démontre la viabilité du système mis en œuvre ainsi que la pertinence de la méthodologie d'intégration de cycle de vie adoptée pour analyser la conception de produit sous plusieurs angles.

D'autres démonstrations sur le système à travers des exemples d'application industrielles portant sur plusieurs produits et sur plusieurs applications de cycle de vie doivent être menés. Cela pourrait servir à mieux déterminer la performance du système en vue de procéder à des améliorations possibles.

Aussi, il serait intéressant d'étudier la possibilité de sauvegarder les caractéristiques dans une base de données (mysql, sap, etc.)

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans une démarche de modélisation de produits mécaniques. Il comprend une formalisation permettant l'établissement d'un modèle de produit par un support informatique compact et efficace. Ce modèle vise à supporter le cycle de vie d'un produit du point de vue de la conception en tenant compte des attributs technologiques dans le but d'améliorer les caractéristiques de conception liées à des applications particulières du cycle de vie. Les applications du cycle de vie qui ont été définies sont : l'assemblage, le recyclage, la maintenabilité et la fin de vie.

Un travail exhaustif sur l'état de l'art a permis de mettre en évidence que les *features* constituaient une caractéristique intéressante à prendre en compte pour la modélisation des caractéristiques technologiques d'un produit.

Une maquette informatique a été réalisée en vue de valider la méthodologie de recherche utilisée.

Les contributions originales des travaux qui ont été menés peuvent être résumées autour des axes suivants:

- La modélisation d'un produit avec les informations topologiques, géométriques et les caractéristiques de cycle de vie liées à plusieurs aspects.

- L'intégration des caractéristiques de cycle de vie dans un modèle de produit en vue de déterminer l'efficacité de conception d'un produit par rapport à plusieurs applications du cycle de vie.

Les résultats des travaux de recherche ont été décrits dans deux articles soumis aux journaux scientifiques:

- *Data base representation of Life Cycle Design Features* soumis à la revue *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*
- *Product Design Analysis Based on Life Cycle Features* soumis à la revue *Journal of Engineering Design*.

Recommandations

Le développement de notre recherche nous fait penser à plusieurs directions de recherche en vue de supporter la phase de conception des produits.

D'une part les recherches portant sur l'intégration d'autres aspects de cycle de vie qui n'ont pas été pris en compte dans nos études notamment :

- la prise en compte des facteurs humains
- la fabrication (extraction des caractéristiques d'usinages) ce qui permet une intégration des impacts environnementaux dus à la fabrication des composants en vue de donner des valeurs de caractéristiques avec plus d'exactitudes pour le modèle que nous avons développé.
- la prise en compte des aspects esthétiques du produit [48].

Les facteurs que nous venons d'énumérer sont importants et méritent d'être évalués en vue de compléter notre modèle de caractéristiques de produit.

D'autres axes de recherche concernent le développement de la partie analyse et optimisation de la conception. En effet, il est possible de rechercher les paramètres de conception ou caractéristiques de cycle de vie qui conduisent à une optimisation de la conception. Il sera utile de développer une fonction objective qui permette de bien modéliser l'ensemble des caractéristiques pour des applications données de cycle de vie. De ce fait, en fonction des contraintes de conception, il serait possible d'utiliser les méthodes d'algorithmes génétiques pour l'optimisation de la conception et la reconception (*redesign*) du modèle de produit.

Un autre axe de recherche consiste à étudier les séquences pour l'acquisition des différentes informations technologiques liées aux entités topologiques en vue de déterminer leur ordre de précédence. C'est à dire répondre à la question fondamentale : quelles sont les informations dont le concepteur a besoin à chaque étape du processus de conception. Il serait intéressant de déterminer les caractéristiques liées au cycle de vie du produit qu'il faut intégrer dans le modèle du produit durant les étapes *conceptual design*, *embodiment design* et *detail design*, de même que leur ordre d'insertion dans le modèle. De ce fait, on pourrait déterminer l'influence de la séquence d'information sur l'efficacité de la conception du produit.

Enfin, nous espérons que les travaux entrepris dans cette thèse suscitent de nouvelles idées chez le lecteur.

RÉFÉRENCES

- [1] Suh N. P, 1990. Principles of Design. New York: Oxford University Press.
- [2] General Electric Co., 1960. Manufacturing Producibility Handbook (MPH). Manufacturing Services Scenectady, NY.
- [3] Boothroyd G. and Dewhurst P., 1983. Design for Assembly – a designers handbook – Technical report, Department of Mechanical Engineering, University of Massachusett.
- [4] Stoll, H. W., 1986. Design for manufacture: An overview. Appl. Mech. Rev., 39(9), 1356–1364.
- [5] Chen G., Ma Y.-S., Thimm G., Tang S.-H., 2005. Knowledge-based reasoning in a unified feature modeling scheme. Computer-aided Design and Applications 2 (1-4) 173-182.
- [6] Ranta, M., Mantyla, M., Umeda, Y., and Tomiyama, T., 1996. Integration of Functional and Feature-Based Product Modeling —The IMS/GNOSIS Experience. Computer Aided Design, 28(5), 371–381.
- [7] Dewhurst, P., and Boothroyd, G., 1983. Computer-Aided Design for Assembly. Assembly Engineering 26, 18-22.
- [8] Zussman, E., Kriwet, A., and Seliger, G., 1994. Disassembly-oriented assessment methodology to support design for recycling. CIRP Annals 43, 9-14.

- [9] Knight, W. A., and Boothroyd, G., 1997. Analysis of products for end-of-life management. In Professional Program Proceedings of the Electronics Industries Forum, Boston, 9- 28.
- [10] Jovane, F., Alting, L., Armillotta, A., Eversheim, W., Feldmann, K., Seliger, G., and Roth, N., 1993. Key issue in product life cycle: Disassembly. *CIRP Annals* 42, 651-658.
- [11] Gao, J., Xiang, D., Chen, H., Duan, G., and Wang, J., 2003. Disassembly AND/OR graph model for "disassembly for recycling". In *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Boston, 54-59.
- [12] Kroll, E., and Carver, B. S., 1999. Disassembly analysis through time estimation and other metrics. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 15, 191-200.
- [13] Kuo, T.-C., Huang, S. H., and Zhang, H.-C., 2001. Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering* 41, 241-260.
- [14] Rose, C. M., Stevels, A., and Ishii, K., 2000. A new approach to end-of-life design advisor (ELDA). In *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, San Francisco, 99-104.
- [15] Kumar, K. R., Lee, D., and Malhotra, A., 2001. Methodology to assess the environmental impact of a product and its processes. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Boston, 204-214.
- [16] Rose, C. M., Ishii, K., and Stevels, A., 2002. Influencing design to improve product end-of-life stage. *Research in Engineering Design* 13, 83-93.

- [17] Khan, F. I., Sadiq, R., and Veitch, B., 2004. Life cycle iNdeX (LInX): A new indexing procedure for process and product design and decision-making. *Journal of Cleaner Production* 12, 59-76.
- [18] Chan, J. W. K., and Tong, T. K. L., 2007. Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: Grey relational analysis approach. *Materials and Design* 28, 1539-1546.
- [19] Mosovsky J. et al., 2001. Assessing product design alternatives with respect to environmental performance and sustainability: A case study for circuit pack faceplates. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 252-257.
- [20] Kimura, F., Matoba, Y., and Mitsui, K., 2007. Designing Product Reliability based on Total Product Lifecycle Modelling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56, 163-166.
- [21] Franceschini, F., and Galetto, M., 2001. A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA. *International Journal of Production Research* 39, 2991-3002.
- [22] Dindeleux, J.-J., Durand, J., and Delsaut, S., 2005. Design-integrated reliability studies according to requirements analysis and return of experience the proposed ALSTOM transport company "EFICARE" method. In *Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 30-36.
- [23] Vintr, Z., and Vintr, M., 2005. FMEA used in assessing warranty costs. In *Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 331-336.

- [24] Henderson M.R. and Taylor L.E., 1993. A Meta-Model for Mechanical Products Based Upon the Mechanical Design Process”, *Research in Engineering Design*, 5, 140-160.
- [25] Shah J. J. et al., 1988. Functional Requirements and Conceptual design of the feature-based modeling system. *Computer Aided Engineering Journal*, 9-15.
- [26] Shah J.J., , Sreevalsan P., Rogers M., Billo R., Mathew A., 1988. Current Status of Features Technology (Document No. R-88-GM-04.1). Computer Aided Manufacturing-International Inc
- [27] Taylor L. and Henderson M., 1994. Validating a feature –based Meta-Model for mechanical products: a case study. *Proceedings of the IFIP International Conference, Feature Modeling and Recognition in advance Cad/cam systems*, 23-39.
- [28] Coma O., Mascle C., Veron P., 2003. Geometric and form feature recognition tools applied to a design for assembly methodology. *Computer Aided Design* 35, 1193-1210.
- [29] Chen G., Ma Y.-S., Thimm G., Tang S.-H., (2005). Knowledge-based reasoning in a unified feature modeling scheme, *Computer-aided Design and Applications* 2 (1-4) 173-182.
- [30] Chen, G; Ma, Y S; Thimm, G; Tang, S H., 2004. Unified Feature Modeling Scheme for the Integration of CAD and CAx .*Computer-Aided Design and Applications*, 1(1-4), 595-602.
- [31] Chen G., Ma Y.-S., Thimm G., Tang S.-H., 2006. Associations in a Unified Feature Modeling Scheme. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 6(2), 114-126.

- [32] Penoyer J.A., 2000. Knowledge based product life cycle systems: principles of integration of KBE and C3P. *Computer Aided Design* 32 , 311–320.
- [33] Xue, D., and Yang, H., 2004. A concurrent engineering-oriented design database representation model. *Computer Aided Design* 36, 947-965.
- [34] Di Stefano, P., Bianconi, F., and Di Angelo, L., 2004. An approach for feature semantics recognition in geometric models. *Computer-Aided Design* 36, 993-1009.
- [35] Fitch, P., and Cooper, J. S., 2005. Life-cycle modeling for adaptive and variant design. Part 1: Methodology. *Research in Engineering Design* 15, 216-228.
- [36] Fitch, P., and Cooper, J. S., 2005. Life cycle modeling for adaptive and variant design part 2: Case study. *Research in Engineering Design* 15, 229-241.
- [37] Mascle, C., 2005. Entropy minimization in design for maintenance, re-manufacturing, re-using. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Montréal, Canada*, 254-259.
- [38] Olewnik, A. T., and Lewis, K., 2005. On Validating Engineering Design Decision Support Tools. *Concurrent Engineering* 13, 111-122.
- [39] Ballu, A., Falgarone, H., Chevassus, N., and Mathieu, L., 2006. A new Design Method based on Functions and Tolerance Specifications for Product Modelling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55, 139-142.
- [40] Lockett, H. L., and Guenov, M. D., 2005. Graph-based feature recognition for injection moulding based on a mid-surface approach. *Computer-Aided Design* 37, 251-262.

- [41] Pasko, A., and Shapiro, V., 2005. Heterogeneous object models and their applications. *Computer Aided Design* 37, 285.
- [42] Chen, K.-Z., and Feng, X.-A., 2004. CAD modeling for the components made of multi heterogeneous materials and smart materials. *Computer-Aided Design* 36, 51-63.
- [43] Jabbour T., Mascle C., Maranzana R., 1998 . A Database for the representation of assembly features in mechanical products. *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 8 (5 & 6), 483-507.
- [44] Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., and Grote, K. H., 2007. *Engineering Design: A Systematic Approach*, third edition, Springer. ISBN: 978-1-84628-318-5.
- [45] Suh, N. P., 2001. *Axiomatic Design: Advances and Applications*. Oxford University Press, New York.
- [46] Boothroyd, G., Dewhurst, P., Knight, W., 1994. *Product design for manufacture and assembly*. Dekker, ISBN 0824791762.
- [47] PRé Consultants, 2000. *Eco-Indicator 99 Manual for Designers: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*. The Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment.
- [48] Sequin, C. H., 2005. CAD tools for aesthetic engineering. *Computer-Aided Design* 37, 737-750.
- [49] Halpin, T. A., 1988. Object-role modeling (ORM/NIAM). In *Handbook on Architectures of Information Systems*, chap. 4.

- [50] Deneux, D., 1993. Méthodologie de reconnaissance des caractéristiques d'usinage. Contribution à l'ingénierie simultanée. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes.

ANNEXE

LE FORMALISME NIAM

Le formalisme NIAM (*Nijssen language Information Analysis Method*) est un outil pour l'analyse d'informations permettant au concepteur de créer une structure parfois complexe de base de données. Il se définit comme un langage pour décrire le monde réel en terme d'objet jouant un rôle (Object Role Modeling) et permet la manipulation des connaissances à un niveau avancé d'abstraction en partant de la notion d'objectification. Des illustrations de ce concept peuvent être trouvées dans Halpin, (1998) [49] ou des expressions complexes du langage naturel sont traduit en un langage de modélisation.

Dans la modélisation de connaissances avec NIAM, on peut partir des concepts (ou objets) qui permettent de décrire le modèle sans prendre en considération les interprétations de ces concepts. On peut aussi ajouter des relations entre les concepts et intégrer également des caractéristiques à partir d'autres caractéristiques.

Dans le formalisme NIAM, un objet (ou entité) est représenté par un cercle plein. Un cercle en pointillé représente l'attribut d'une entité. Une relation est décrite par un lien muni d'une boîte comportant deux cases. Chaque case représente un lien unidirectionnel de l'entité la plus proche de cette case vers la plus éloignée et précise littéralement la relation dans ce sens. Une flèche s'étendant sur la largeur des deux cases précise que certains A sont en relation avec certains B et inversement. Un V placé sur un lien unidirectionnel précise que la totalité des entités proches du V est soumise à cette

relation. Une flèche placée sur une seule case, proche d'une entité A, dans une direction de A vers B, précise que certains A sont en relation avec un et un seul B.

On peut regrouper certaines entités sous forme d'un sous-typage et représenter les informations du sous-type vers l'ensemble général à l'aide d'une relation fléchée. Dans ce cas, les relations entre les entités peuvent être contraintes. Ces contraintes peuvent porter sur un ensemble de sous-types pour exprimer les idées de :

- Totalité : l'ensemble des sous-types forme le type (symbole T)
- Exclusion : un type ne peut se dériver qu'en un seul de ses sous-types (symbole X)
- Totale exclusion mutuelle : combinaisons des contraintes précédentes (T/X)

Dans l'exemple montré à la figure A1 tiré de Deneux, (1993) [50], les informations suivantes sont représentées:

- une tâche peut débuter à zéro, une ou plusieurs dates de lancement
- une date de lancement peut lancer zéro, une ou plusieurs tâches
- toute tâche a un et un seul code
- tout code identifie une et une seule tâche
- une tâche utilise zéro, une ou plusieurs ressources
- toute ressource réalise zéro, une ou plusieurs tâches
- toute ressource appartient à un ou plusieurs ressources
- une ressource appartient à un et un seul atelier
- un atelier peut avoir zéro, une ou plusieurs ressources
- une ressource peut être humaine ou matérielle

- les ressources matérielles et humaines forment l'ensemble exhaustif des ressources
- une ressource ne peut être simultanément humaine et matérielle

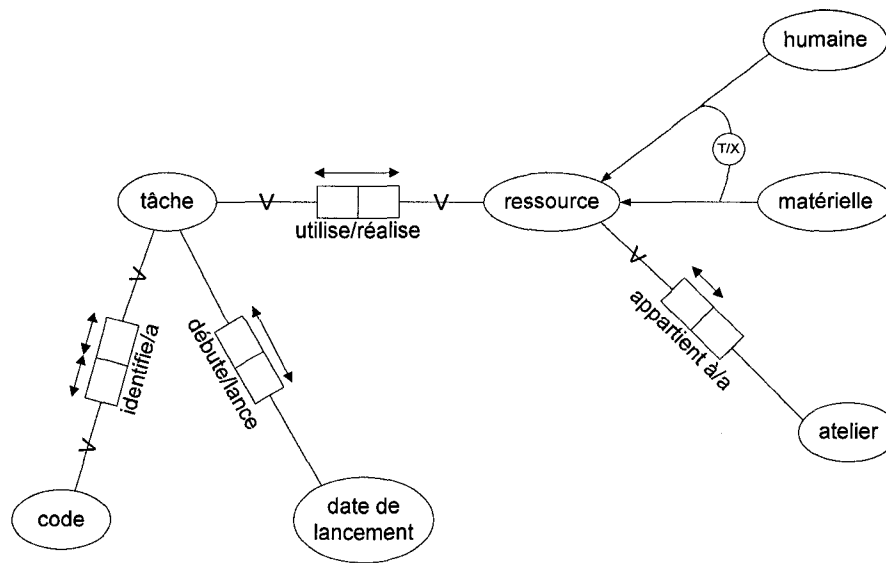


Figure A1. Exemples de relations dans un schéma NIAM