

Intégration des contraintes de désassemblage dans la conception modulaire de produits manufacturés. Contexte développement durable.

Hibo Said Chekh Waiss

► To cite this version:

Hibo Said Chekh Waiss. Intégration des contraintes de désassemblage dans la conception modulaire de produits manufacturés. Contexte développement durable.. Matériaux. Université Grenoble Alpes, 2017. Français. NNT : 2017GREAI068 . tel-01712382

HAL Id: tel-01712382

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01712382>

Submitted on 19 Feb 2018

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE
GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Génie Industriel**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Hibo SAID CHEKH-WAISS

Thèse dirigée par **Michel TOLLENAERE**, Professeur, Grenoble
INP, et
codirigée par **Peter MITROUCHEV**, Maître de Conférences,
Université Grenoble-Alpes

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**
dans l'**École Doctorale IMEP2**

Intégration des contraintes de désassemblage dans la conception modulaire des produits manufacturés. Contexte de développement durable.

Thèse soutenue publiquement le **19 octobre 2017**,
devant le jury composé de :

M. Samuel GOMES

Professeur, Université de Technologie de Belfort Montbéliard, Président

M. Christian MASCLE,

Professeur, École Polytechnique de Montréal, Rapporteur

M. Marc SARTOR

Professeur, INSA de Toulouse, Rapporteur

M. Vincent CHEUTET

Professeur, INSA de LYON, Examineur



Résumé

Ce travail de thèse s'inscrit dans un contexte d'intégration des contraintes de désassemblage dans la conception modulaire des produits manufacturés. Ce contexte est caractérisé par une collaboration pluridisciplinaire où un nombre important d'informations est utilisé, manipulé et échangé. Pour ce faire la contribution de ce travail consiste à en :

- La définition d'un modèle multi-vues orienté désassemblage permettant une représentation et l'exploitation des informations associées aux domaines du produit et du processus de désassemblage et en conséquence, une aide à l'intégration.
- La définition d'un cadre méthodologique permettant de prendre en compte les problématiques de désassemblage dès la phase préliminaire de conception modulaire de produits manufacturés. Ce cadre méthodologique vise à:
 - Faire intervenir différents acteurs concernés par les problématiques de désassemblage au moment le plus opportun et en particulier lors de la phase de conception préliminaire;
 - Définir un indice d'évaluation de la complexité de désassemblage;
 - Définir une méthode de conception modulaire des produits manufacturés. Un algorithme de regroupement des composants d'un produit en modules est proposé.
 - Générer des séquences de désassemblage en phase préliminaire de conception. Un algorithme de définition des séquences de désassemblage admissibles des produits manufacturés prenant en compte l'architecture modulaire des produits es proposé.

Le modèle et le cadre méthodologique sont validés par l'expérimentation sur différents produits. À titre d'exemple, ils sont illustrés sur la conception modulaire d'une agrafeuse et une lampe de bureau.

Mots clés: Modèle multi-vues, Complexité de désassemblage, Conception modulaire, séquence de désassemblage.

Abstract

This thesis work falls within the context of the integration of disassembly constraints into the modular design of manufactured products. This context is characterized by a multidisciplinary collaboration where a large deal of information is used, handled and exchanged. To this end the contribution of this work is:

- The definition of a multi-view model oriented disassembly allowing representation and exploitation of information associated with the areas of product and disassembly process and consequently integration assistance.
- The definition of methodological framework allowing taking into account the disassembly issues from the preliminary phases of modular design of manufactured products. This methodological framework aims to:
 - Involve different stakeholders by disassembly issues at the most appropriate time and in particular during the preliminary design phase.
 - Define an evaluation index of disassembly complexity.
 - Define a modular design approach of manufactured products. An algorithm for clustering the components of a product into modules is proposed.
 - Generated disassembly sequences in the preliminary design phase. An algorithm for defining the eligible disassembly sequences of products by taking into account the modular architecture is proposed.

The model and the methodological framework are validated by experiments on different products. They are illustrated in the modular design of a stapler and desk lamp.

Keywords: Multi-view model, Disassembly Complexity Modular design, Disassembly sequence.

Remerciements

Je tiens d'abord à exprimer mes plus profonds remerciements à Monsieur Christian MASCLE, Professeur à l'École Polytechnique de Montréal, et Monsieur Marc SARTOR, Professeur à l'INSA de Toulouse, pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail en acceptant d'être les rapporteurs. Tous vos retours ont été constructifs ; ils m'ont aidée à améliorer mon travail et à prendre le recul nécessaire.

Merci à Monsieur Vincent CHEUTET, Professeur à l'INSA de Lyon pour m'avoir fait l'honneur de bien vouloir examiner mon travail de recherche.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Samuel GOMES, Professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, pour m'avoir fait l'immense honneur d'être le président de mon jury de thèse.

Je tiens à remercier tout particulièrement, mon directeur de thèse Monsieur Michel TOLLENARE, Professeur à Grenoble INP et mon co-directeur de thèse Monsieur Peter MITROUCHEV, Maître de Conférences (HDR) à l'Université Grenoble-Alpes pour m'avoir permis de réaliser ce travail de recherche. Je suis très reconnaissante de la confiance qu'ils m'ont accordée au cours de ces années de thèse, leurs disponibilités, leurs encouragements et leurs précieux conseils à la fois pertinents et réalistes, qui m'ont accompagnée pendant la durée de la recherche.

J'adresse également mes remerciements à tous les membres du Laboratoire G-SCOP (*Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble*) pour m'avoir accueillie et pour les échanges intéressants sur les thématiques de recherche en conception de produits lors de certaines présentations, m'aidant ainsi à progresser dans la découverte du domaine de recherche de la conception et du désassemblage, qui ont su faire régner dans le Laboratoire une atmosphère studieuse et chaleureuse.

Je ne peux oublier l'Université de Djibouti pour le soutien Financier et pour m'avoir accordé des congés doctoraux permettant de bien mener ce travail de recherche. Merci à tous mes collègues de l'Université de Djibouti et mes amies qui m'ont soutenue, aidée et encouragée.

Enfin je tiens à adresser toute mon affection à mes parents qui m'ont toujours encouragée à poursuivre mes études et transmis une envie de découvertes. Merci à mon frère et mes sœurs pour s'être forcé au fil des années de vouloir comprendre mon sujet de thèse.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
Remerciements	iii
Table des matières	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des abréviations	x
Liste des publications	xi
Glossaire	xii
Introduction générale	1
1.1 Contexte de la recherche	1
1.2 Problématique de la recherche	6
1.3 Objectifs de la recherche	7
1.4 Plan de lecture	7
Chapitre 1. Activités de conception des produits	10
1.1 Processus et activités de conception	11
1.2 Conception pour le désassemblage des produits	20
1.3 Conception modulaire des produits	27
1.4 Bilan et positionnement	33
Chapitre 2. Génération, représentation et évaluation des séquences de désassemblage	35
1.1 Cycle de vie des produits	36
1.2 Désassemblage	37
1.3 Génération, représentation et évaluation des séquences de désassemblage	42
1.4 Bilan et positionnement	61
Chapitre 3. Vers un modèle de produit intégrant le désassemblage	63
1.1 Définition des parties prenantes et de leurs rôles	64
1.2 Identification des points de vues	65
1.3 Structuration des concepts	65
1.4 Modèle Multi-Vues orienté désassemblage	80
Chapitre 4. Cadre méthodologique de conception de conception modulaire orientée désassemblage	82
1.1 Méthode d'évaluation de la complexité de désassemblage	84
1.2 Méthode de conception modulaire	92

1.3	Définition des séquences de désassemblage	94
1.4	Conclusion.....	94
Chapitre 5. Application du modèle et du cadre méthodologique à des études de cas.....		96
1.1	Premier cas d'application	96
1.2	Deuxième cas d'application	107
1.3	Conclusion.....	114
Conclusion et perspectives		115
Bibliographie		117

Liste des figures

Figure 1: Triptyque coût/qualité/délai.	1
Figure 2 : Représentation du développement durable, le triptyque du XXIème siècle.	3
Figure 3 : Pyramide des scénarios de fin de vie (Heissel & Meye-krahmer, 1995).	4
Figure 4 : Représentation synoptique du mémoire de recherche.	9
Figure 5 : Le modèle systématique du processus de conception (Pahl & Beitz, 1996).	14
Figure 6 : Types de conception.	16
Figure 7 : Facteurs de désassemblabilité du DEI (Das, Yedlarajiah, & Narendra, 2000).	24
Figure 8 : Heuristiques pour l'architecture des fonctions.	29
Figure 9 : Matrice Indication Module.	32
Figure 10 : Principaux critères (lignes) et fonctions dominantes (colonnes).	32
Figure 11 : Modules selon la méthode MFD (Erixon, 1996).	33
Figure 12 : Cycle de vie des matériaux et des produits (Chevron, David, Binder, & Descotes-Genon, 2000).	37
Figure 13 : Représentation et actions de désassemblage (Torres, Puente, & Aracil, 2003). ...	39
Figure 14 : Graphe des liaisons hybride (Li, Khoo, & Tor, 2002).	43
Figure 15 : Graphe hiérarchique (Dong, Zhang, Tong, & Dong, 2006).	45
Figure 16 : Exemple de Graphe composant-liaison pour le désassemblage partiel d'un PC (Kuo, Zhang, & Huang, 2000).	48
Figure 17 : Arbre de désassemblage complet (Kuo, Zhang, & Huang, 2000).	49
Figure 18 : Exemple de produit X pour l'étude de la méthode de Lee et Kumara (Lee & Kumana, 1992).	50
Figure 19 : Exemple d'Algorithme Génétique-Logigramme.	59
Figure 20 : La vue fonctionnelle Produit.	70
Figure 21 : La vue comportementale Produit.	71
Figure 22 : La vue structurelle Produit.	73
Figure 23 : La vue contextuelle Produit.	74
Figure 24 : La vue technologique Produit.	75
Figure 25 : La vue comportementale Process.	76
Figure 26 : La vue structurelle Process.	78
Figure 27 : La vue contextuelle Process.	79
Figure 28 : La vue technologique Process.	80
Figure 29 : Modèle Multi-Vues orienté désassemblage.	81
Figure 30 : Description du cadre méthodologique DOMDE.	83
Figure 31 : Processus de prise en compte de la dés-assemblabilité.	91
Figure 32 : Diagramme de pieuvre de l'agrafeuse en phase d'utilisation.	96
Figure 34: Le FAST relative à la fonction agraffer.	98
Figure 35 : Vue éclatée de la solution et nomenclature associée.	98
Figure 36 : Graphe des liaisons de l'agrafeuse.	99
Figure 37 : Décomposition du produit en modules.	103
Figure 38: Matrice de précedence des composants.	104
Figure 39 : Matrice de précedence modifiée.	105

Figure 40 : Matrice de précédence des modules.	105
Figure 41 : Arbre de désassemblage de l'agrafeuse.	106
Figure 42: Graphe des liaisons de la lampe de bureau.	108
Figure 43: Décomposition du produit en modules.	110
Figure 44 : Matrice de précédence des composants.	111
Figure 45: Matrice de précédence des modules.	112
Figure 46 : Matrice de précédence pour les modules.	112
Figure 47 : Arbre de désassemblage.	113

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des approches DFX selon les aspects liés aux facteurs de compétitivités et aux phases du cycle de vie du produit.	19
Tableau 2 : Grille d'évaluation de désassemblage d'un produit (Kroll & Hanft, 1998).	23
Tableau 3 : Les critères de modularité dans la méthode MFD.....	31
Tableau 4 : Comparaison entre assemblage et désassemblage.	42
Tableau 5 : Matrice d'interférence de produit X (Lee & Kumana, 1992).	50
Tableau 6 : Matrice de balayage résiduelle du produit X (Lee & Kumana, 1992).	50
Tableau 7 : Identification des responsabilités des acteurs métiers via les règles de DFD d'après (Dowie T. A., 1995) (Simon, Mc Laren, & Dowie, 1996).....	66
Tableau 8 : Points de vues des parties prenantes identifiées.	67
Tableau 9 : Types des contacts.....	85
Tableau 10 : Types des combinaisons.....	86
Tableau 11 : Outils de désassemblage.....	87
Tableau 12 : Nombre des directions de désassemblage.	87
Tableau 13 : Qualification des opérateurs.....	88
Tableau 14 : Équipements requis.	88
Tableau 15: Pondérations des paramètres de désassemblage.....	89
Tableau 16 : Fonctions de services.....	97
Tableau 17 : Composants et poids des composants.	99
Tableau 18 : Évaluation des liaisons entre les composants.....	101
Tableau 19: Bilan de l'évaluation.	101
Tableau 20 : Liste des composants.....	107
Tableau 21 : Évaluation des liaisons entre les composants.....	109

Liste des abréviations

Acronyme	Nom complet
CAO	Computer Aided Design
DEEE	Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques
DFA	Design For Assembly
DFC	Design For Cost
DFD	Design For Disassembly
DFE	Design For Environment
DFM	Design For Manufacturing
DFQ	Design For Quality
DFR	Design For Recyclability
DFX	Design For X
DOMDE	Disassembly Oriented Modular DDesign
DSP	Disassembly Sequence Planning
G-SCOP	Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble
MFD	Modular Function Deployment
PEE	Produits Électriques et Électrotechniques
SIREP	Système d'Information et conception RobustE des Produits
VHU	Véhicules Hors d'Usage

Liste des publications

- 1 H. Said Chekh-Waiss, P. Mitrouchev, M. Tollenaere, Indicateurs d'évaluation de la dés-assemblabilité des produits, 21^{ème} Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, 26 au 30 août 2013, Réf S7B144EU.
- 2 Hibo Said, Peter Mitrouchev, Michel Tollenaere, Disassembly sequencing for End-of-life products, Proceedings of Joint Conference On Mechanical, Design Engineering & Advanced Manufacturing, Toulouse, France, 2014.

Glossaire

Accessibilité	Rapidité avec laquelle un élément peut être atteint.
Composant	Constituant élémentaire d'un produit qui peut être composé d'une ou plusieurs pièces mais qui est considéré comme une unité indémontable.
Dés-assemblabilité	Aptitude du produit à autoriser la déconnexion physique de ses composants.
Désassemblage	Ensemble d'activités qui permettent de transformer un produit en composant.
Élément géométrique	Surface ou groupe de surface jouant un rôle identique appartenant à un composant.
Exigence géométrique	Exigence fonctionnelle exprimée sous forme géométrique sur une ou plusieurs pièces élémentaires ou sur les composants d'un produit.
Liaison	Relation entre deux éléments géométriques appartenant à deux composants différents du produit et impliquant des contraintes de situation relative.
Opération	Tâche au cours de laquelle l'état du produit ou de ses composants est modifié.
Produit	Ensemble de composants liés entre eux et travaillant ensemble pour réaliser les fonctions attendues par le client.
Ressource	Moyen technique ou humain destiné à être utilisé pour la réalisation d'une opération.
Séquence de désassemblage	Chronologie de déconnexion des composants et de suppression des liaisons.
Technique de désassemblage	Ensemble indissociable d'opérations permettant la suppression d'une liaison entre deux composants.

Introduction générale

1.1 Contexte de la recherche

La préoccupation majeure des industries manufacturières, il y a quelques années encore, résidait essentiellement dans l'optimisation du triptyque coût/qualité/délai (Figure 1). Aujourd'hui, pour rester compétitives, les entreprises doivent s'adapter aux changements qui s'opèrent dans le marché où elles évoluent. Ce marché est caractérisé par une demande de produits de plus en plus personnalisés, de qualité sans cesse croissante, disponibles en un minimum de temps, aux moindres coûts et respectueux de l'environnement.

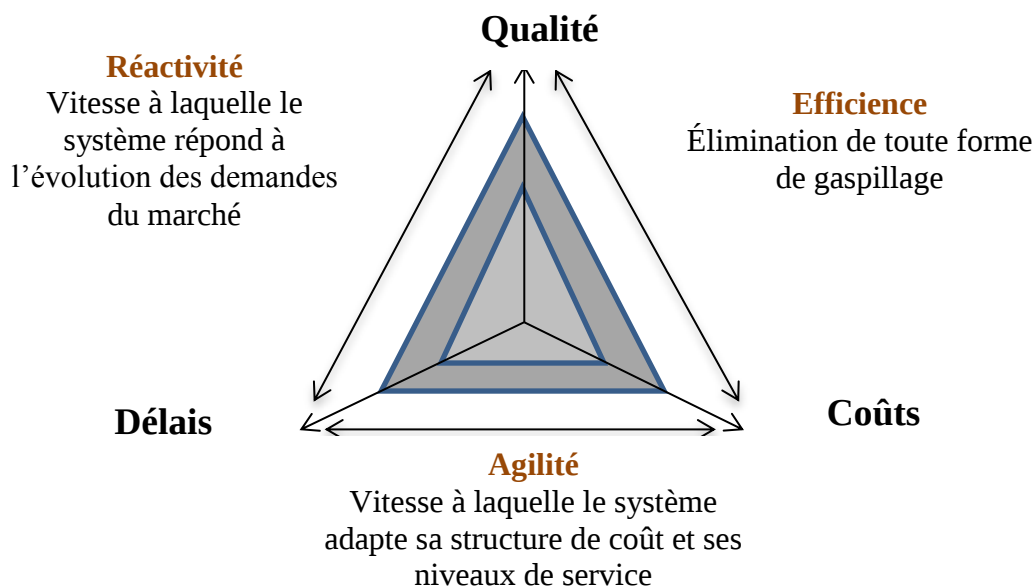


Figure 1: Triptyque coût/qualité/délai.

Grâce aux stratégies de la différenciation retardée et de la conception modulaire, les entreprises proposent des produits issus de l'assemblage d'éléments standards et spécifiques, permettant ainsi d'obtenir des produits personnalisés. Ces stratégies constituent un bon compromis entre la pratique de la fabrication sur mesure et la standardisation de produits et processus (José Flores & Tollenaere, 2005). La fabrication sur mesure vise à la satisfaction stricte de chaque besoin, mais conduit à une augmentation des coûts de production. Quant à la standardisation, elle vise à proposer un produit unique permettant de satisfaire un ensemble

de besoins. Elle permet de diminuer le nombre de références à gérer et d'augmenter les quantités de chaque composant avec les conséquences de réduction de la complexité dans le système de fabrication. Elle présente l'inconvénient de proposer des produits surdimensionnés. En effet, aux composants communs utilisés dans la fabrication des produits divers, sont ajoutés des fonctions pas toujours utiles.

Un outil d'aide à la conception de modules industriels (pour les faisceaux électriques automobiles) a été proposé dans (Agard, 2002) et (Agard & Tollenaere, 2002). Il permet d'assurer une diversité fonctionnelle totale des produits finis, en s'appuyant à la fois sur la description du produit et les processus de production. Un compromis est alors recherché entre le nombre de modules à réaliser et les coûts de production pour l'assemblage final des produits sous une contrainte de temps d'assemblage final liée à une livraison synchrone.

La production en réponse à la forte demande de produits nouveaux et personnalisés nécessite une consommation accrue des ressources naturelles que l'on sait aujourd'hui limitées et qui explose avec le développement des pays émergents. On parle même de l'extinction de certaines ressources naturelles dans le courant de ce siècle. Jusqu'à la dernière décennie, l'évolution des cours de métaux semblait en cohérence avec cette perspective d'extinction à long terme, et depuis trente ans, leur hausse est en effet très importante. Il en résulte de cette production des quantités importantes de produits obsolètes, qui augmentent encore à cause de la rapidité de mise sur le marché des nouvelles générations de produits. Ces produits obsolètes sont de bonne qualité, à cause du raccourcissement de leurs cycles de vie et contiennent des quantités importantes de ressources renouvelables.

Les modes d'utilisation et d'élimination (incinération et enfouissement parmi d'autres) des produits obsolètes génèrent des impacts sur l'environnement de moins en moins réversibles. Les impacts majeurs de l'activité humaine sur la planète sont maintenant bien connus :

- changement climatique;
- raréfaction des ressources naturelles;
- érosion du sol;
- dégradation de la biodiversité,....

Par ailleurs les produits étaient conçus principalement pour mieux répondre aux besoins des clients et aux possibilités des fabricants et logisticiens, sans pour autant tenir compte des

aspects environnementaux et ceux de recyclage lors de leur conception. Or, avec la mise en place des nouvelles normes de législation environnementale par la communauté internationale, l'urgence de se tourner vers des solutions de développement durable qui contribuent efficacement à diminuer les menaces environnementales globales et à améliorer les conditions de vie de la population, tout en assurant le développement économique, devient essentielle pour les industriels (Figure 2).

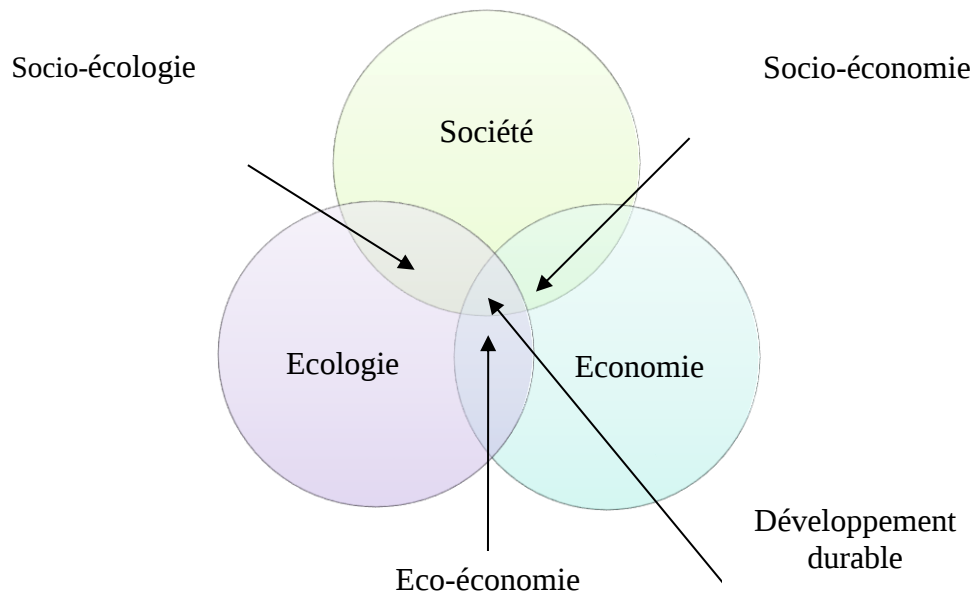


Figure 2 : Représentation du développement durable, le triptyque du XXIème siècle.

Parmi les principales directives européennes en vigueur, nous citerons à titre d'exemples :

- la directive 2000/53/CE portant sur la gestion des Véhicules Hors d'Usage (VHU) ;
- la directive 2002/95/CE relative à la limitation de substances dangereuses dans les Produits Électriques et Électrotechniques (PEE) (notamment le plomb, le cadmium ou encore le mercure) ;
- la directive 2002/96/CE concernant la gestion en fin de vie des Produits Électriques et Électrotechniques (PEE).

Une récupération de ces ressources pour une revalorisation (recyclage des matériaux, remanufacturing des produits, réutilisation des produits et/ou des composants) et pour un traitement propre des substances dangereuses, offre des perspectives économiques et limite les impacts sur l'environnement.

La Figure 3 représente graphiquement les conséquences environnementales des scénarios de fin de vie. Le recyclage permet d'économiser la production des matières premières. Les matières recyclées viennent se substituer aux matières premières dans les procédés industriels. En plus d'économiser les ressources de matières, le recyclage permet généralement une économie d'énergie. En effet les matières brutes (extraites directement du sol, des arbres, etc...) doivent en général être transformées avant de pouvoir servir de matières premières (aluminium, papier, etc...) et ces transformations demandent des quantités importantes d'énergie et émettent de nombreux polluants. Ainsi, la récupération des composants et matières constitue un enjeu stratégique pour les entreprises qu'elles ne peuvent plus ignorer. En fait cette récupération permet aux fournisseurs de proposer des composants 50% à 70% moins chers que des éléments neufs.

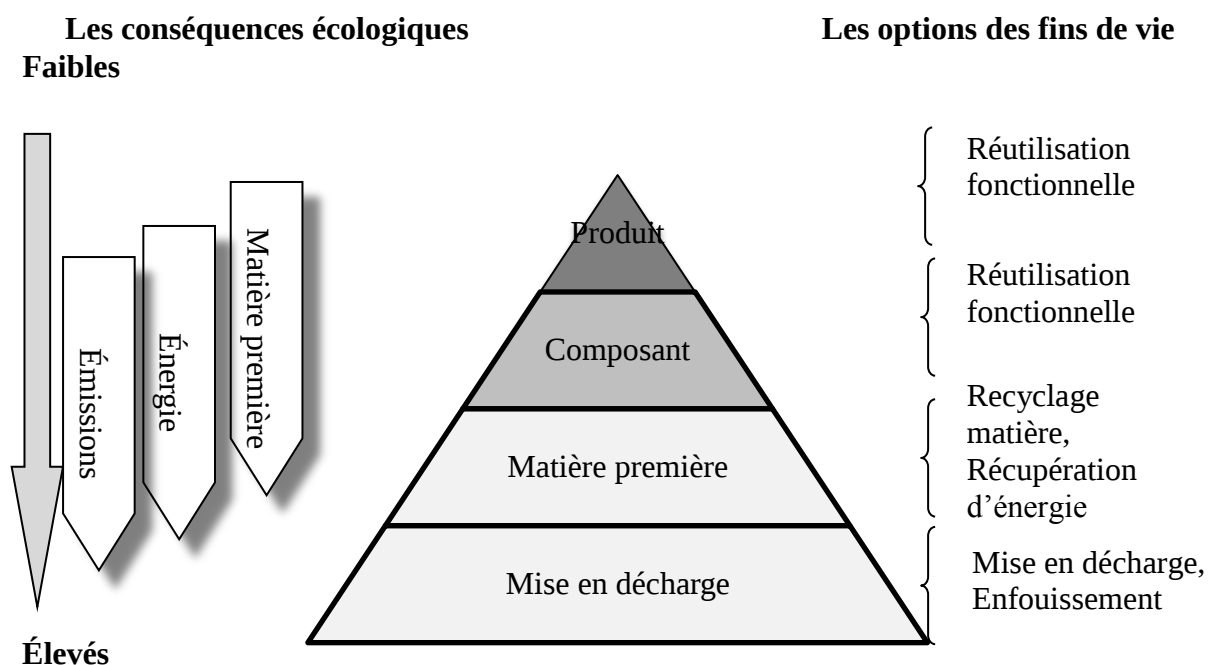


Figure 3 : Pyramide des scénarios de fin de vie (Heissel & Meye-krahmer, 1995).

Notons que la revalorisation bouleverse considérablement les organisations de collecte traditionnelle et nécessite la mise en place d'un programme de logistique inverse. Ce programme fait intervenir :

- des procédures de collecte, de groupage et de tri ;
- des transports de produits vers des installations de traitement ;
- des transports des déchets ultimes vers les centres d'enfouissement.

Mis à part les bénéfices économiques et environnementaux directs, la revalorisation des produits en fin de vie présente d'autres aspects bénéfiques. Elle permet de créer de nombreux emplois peu ou non spécialisés et garantit à terme une amélioration du cadre social (réduction du chômage, lutte contre la pauvreté, l'extrême vulnérabilité et l'exclusion sociale). Dans un rapport de juin 2011, l'organe paritaire de coordination des éco- organismes « OCAD3E » a démontré que la filière de gestion des DEEE avait engendré plus de 2100 emplois en équivalent temps plein, dont près de la moitié en insertion.

Dans certains pays, les contraintes environnementales et institutionnelles sont moins strictes et ne sont pas respectées, ce qui a favorisé l'exportation de produits vers ces pays. Les conséquences de ce commerce illégal des produits sont dramatiques au niveau de la contamination de l'environnement et des hommes (Arthur, 2014).

Le désassemblage comme procédé est une étape précédant la maintenance et la revalorisation des produits respectivement au cours de leur utilisation et en fin de vie. Dans ce contexte, les industriels sont amenés à intégrer de plus en plus tôt, les exigences et les contraintes liées aux différentes phases du cycle de vie du produit dans le processus de conception. Ainsi, le contexte scientifique de notre travail de recherche s'articule autour des problématiques d'intégration des contraintes de désassemblage dans la conception modulaire de produits. Un ensemble de méthodologies de conception pour le désassemblage a été proposé pour aider le concepteur à préparer le produit en vue de son désassemblage futur. Ces méthodologies interviennent à la fin du processus de conception permettant ainsi une évaluation sur une géométrie figée du produit et engendrant des modifications et une re-conception de celui-ci. Ces modifications, selon leur importance ne sont pas toujours prises en compte par le concepteur, en raison du temps d'ingénierie imparti. Dès lors, il est important d'apporter aux industriels, des outils d'aide à la conception afin qu'ils puissent fournir des produits se prêtant au mieux aux problématiques liées au désassemblage.

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire s'est déroulé au sein de l'équipe SIREP (*Système d'Information et conception RobustE des Produits*) du Laboratoire G-SCOP (*Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble*)-UMR 5272 CNRS, sous la direction de Monsieur Michel Tollenaere, professeur à Grenoble INP et de Monsieur Peter Mitrouchev, Maître de Conférences (HDR) à l'Université Grenoble-Alpes (UGA). Le Laboratoire G-SCOP mène depuis nombreuses années des recherches pour

l'amélioration de la conception des produits par l'étude des métiers du cycle de vie des produits, des méthodes et outils de conception et des processus de conception. Ainsi, le but de ces recherches est le développement d'outils d'interaction entre l'ensemble des acteurs de la vie du produit, afin de permettre des échanges et des compréhensions mutuelles plus efficaces.

1.2 Problématique de la recherche

Dans ce contexte, les industriels sont amenés à intégrer de plus en plus, les contraintes de désassemblage des produits manufacturés dès la phase initiale de la conception afin de garantir leurs désassemblages. Dès lors, il est important d'apporter aux industriels, des outils d'aide à la conception afin qu'ils puissent fournir des produits se prêtant au mieux aux problématiques liées au désassemblage. Mais ***Comment le désassemblage en tant qu'étape principale du processus de revalorisation des produits peut-il être intégré dès les premières phases de conception ?***

Afin de répondre à cette problématique générale, notre recherche s'attache à apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- *Quelles sont les caractéristiques d'un produit influençant sa complexité de désassemblage et comment les évaluer ?*
- *Comment soutenir l'intégration des contraintes liées au domaine du désassemblage dans la conception modulaire des produits manufacturés ?*
- *Comment développer des produits modulaires ?*
- *Quelles sont les étapes à suivre en phase de conception, pour valider la complexité de désassemblage ?*

Pour chaque étape :

- *Quelles données d'entrée sont nécessaires ?*
- *Quelles données de sortie doit-on obtenir ?*
- *Comment les interpréter ?*
- *Comment aider le concepteur à améliorer une solution qui ne satisfait pas les contraintes de désassemblage ?*
- *Comment élaborer des séquences de désassemblage dans la phase de conception ?*

1.3 Objectifs de la recherche

À partir de cette problématique, la contribution de ce travail peut être résumée de la manière suivante :

Proposer une approche de conception modulaire intégrant, dès la phase de conception, les contraintes de désassemblage.

Ainsi cet objectif à poursuivre se décline en deux étapes. La première étape consiste à proposer un modèle permettant la définition, la structuration et la propagation des informations liées au produit et à sa séquence de désassemblage. La deuxième étape concerne la proposition d'une méthode permettant d'identifier les points faibles de la conception d'un produit vis-à-vis de son aptitude à être désassemblé en fin de vie. Cette méthode s'appuie sur l'évaluation de la complexité de désassemblage de produit à l'aide d'un indice multi-paramètres, dont le mode de calcul est développé au cours de nos travaux. A partir des résultats de la mise en œuvre de la méthode, une équipe de conception doit être en mesure d'orienter les voies d'amélioration de la conception. La troisième étape concerne la proposition d'une méthode permettant la définition d'une architecture modulaire. Par la suite, notre recherche conduit à la construction d'une méthode permettant la définition des séquences de désassemblage. Elle s'appuie sur une analyse hiérarchique des modules constituant le produit. Ces modules sont obtenus à partir du graphe des liaisons et de la matrice des relations correspondantes au produit.

La méthode proposée comporte ainsi les caractéristiques suivantes :

- être utilisable en conception du produit, et permettant en particulier l'orientation des choix des équipes de conception,
- être intégrable au processus de conception du produit.

Ces contributions sont détaillées par la suite dans le manuscrit.

1.4 Plan de lecture

Cette thèse expose la synthèse de notre travail de recherche portant sur l'intégration des contraintes de désassemblage dans la conception modulaire des produits manufacturés. Ce manuscrit s'attachera à développer les arguments montrant l'intérêt de modèles et outils

d'aide aux choix de conception, afin que les industriels puissent fournir des produits se prêtant au mieux aux problématiques liées à leur désassemblage.

Le présent mémoire retraçant nos recherches est composé de cinq chapitres articulés selon le schéma synoptique défini ci-après (Figure 4).

Un *état de l'art*, décomposé en deux chapitres, expose les travaux scientifiques déjà réalisés et identifiés dans la littérature portant sur les thèmes majeurs de notre problématique, à savoir, la conception des produits orientée désassemblage et la génération des séquences de désassemblage ainsi que leur représentation et leur optimisation.

Le chapitre 3 intitulé « *Vers un modèle de produit intégrant le désassemblage* » introduit un modèle informationnel intégrant toutes les informations nécessaires à la définition d'un produit et de sa séquence de désassemblage.

Le chapitre 4 met en exergue la description du cadre méthodologique *DOMDE (Disassembly Oriented Modular Design)* permettant de prendre les problématiques de désassemblage dès les phases préliminaires de conception modulaire des produits manufacturés. Nous décrirons de manière détaillée les différentes étapes du cadre méthodologique permettant la définition d'une architecture modulaire des produits et de leurs séquences de désassemblage dès la phase préliminaire du processus de conception.

Le modèle et le cadre méthodologique sont testés par l'expérimentation sur différents produits manufacturés dans le chapitre 5.

Une conclusion générale synthétisant les propositions qui ont été présentées et des perspectives pouvant être considérées à la suite de ce travail de recherche sont exposées en fin de ce mémoire.

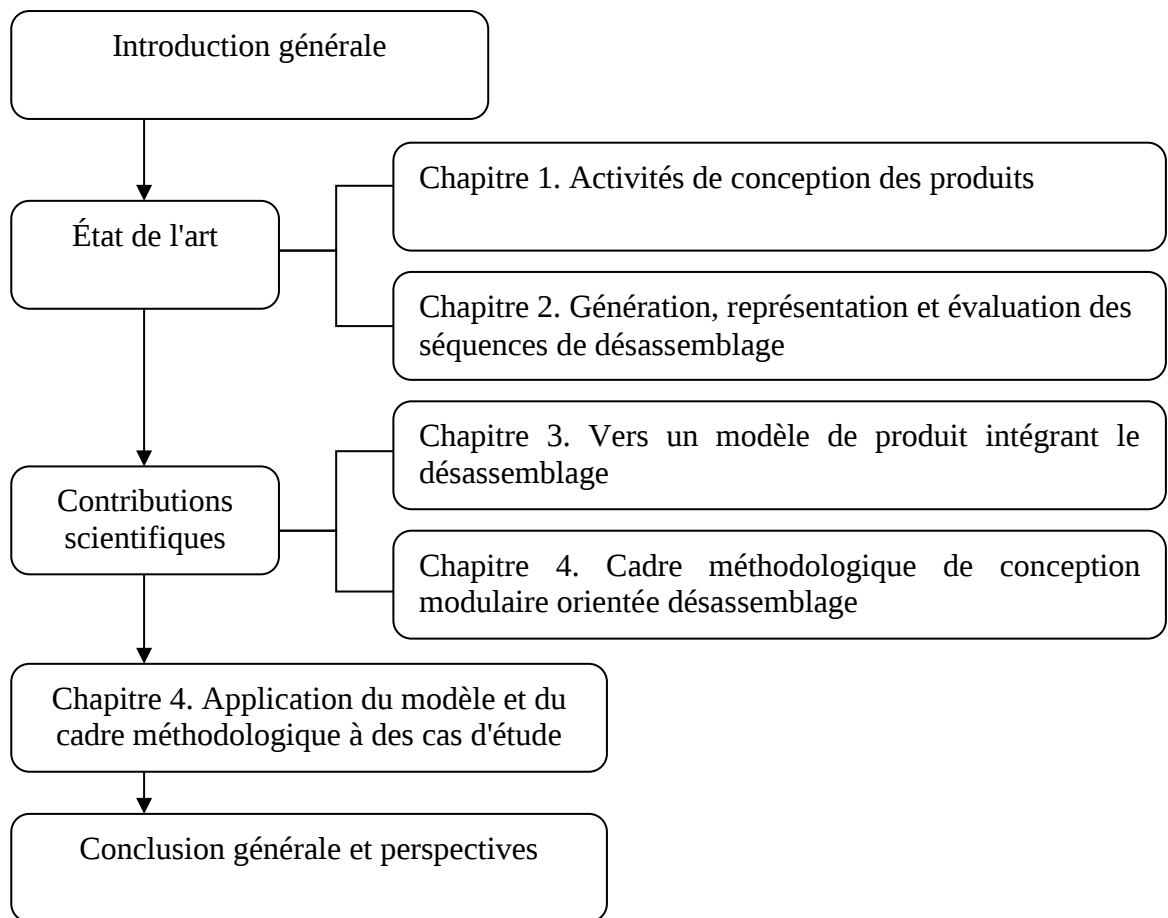


Figure 4 : Représentation synoptique du mémoire de recherche.

Chapitre 1. Activités de conception des produits

La conception accompagne l'Homme depuis fort longtemps. En effet, c'est aux temps les plus reculés de la préhistoire que remonte la conception des produits ou de ce que l'on nomme de façon plus scientifique artefact soit « phénomène artificiel d'origine humaine ». Cet objet artificiel peut être de nature très diverse (pont, autoroute, téléphone, ordinateur, maison, produit électronique, produit mécanique, etc...). Nous nous limiterons dans le cadre de notre étude aux produits manufacturés mécaniques : pièce mécanique unique ou ensemble mécanique tel que mécanisme, automobile, avion.

Le chapitre 1 dresse un état de l'art des problèmes de conception des produits et en particulier des produits modulaires en prenant en compte les contraintes de désassemblage. La section 1 met en évidence l'évolution de l'activité de conception d'une organisation séquentielle vers une organisation simultanée et intégrée, ainsi que les principaux concepts de la conception pour X. De manière plus spécifique, la section 2 fait état des travaux de recherche dans le domaine de la conception pour le désassemblage. La section 3 présente le concept de la conception modulaire. Une discussion sur les apports et les contraintes de chacune de ces approches par rapport à la problématique de conception modulaire orientée désassemblage est exposée en section 4, permettant de délimiter le périmètre de notre contribution et de mieux positionner le travail de recherche.

1.1 Processus et activités de conception

La conception peut être considérée comme un processus. Un processus de conception est considéré comme une séquence d'activités qui est nécessaire afin de créer une ou plusieurs représentations du produit. Les modèles de conception issus de cette vision, consistant à considérer la conception comme un processus sont divisés en deux types :

- le premier type considère un modèle descriptif, modèle décrivant le déroulement des travaux à réaliser ;
- le second type considère les modèles prescriptifs, propose une procédure de type algorithmique à suivre systématiquement. Nous pouvons citer le principal modèle prescriptif qui est le modèle « Systematic Design » de (Pahl & Beitz, 1996) qui s'appuie sur les directives VDI de la société des Ingénieurs Allemands.

La conception peut être également considérée comme une activité. C'est une transformation engendrant un changement d'état du produit. Le principal modèle appliquant cette vision est l'Axiomatic Design de (Suh, 1995). L'Axiomatic Design définit la conception comme la *création d'une solution sous la forme de produits, procédés ou systèmes qui satisfont des besoins identifiés, à travers des mappings entre les spécifications fonctionnelles dans le domaine fonctionnel et les paramètres de conception dans le domaine physique, au moyen de la correcte sélection des paramètres de conception qui satisferont les spécifications fonctionnelles.*

1.1.1 Les phases de la conception

Dans les deux cas, la conception qu'elle soit activité ou processus est conduite à travers quatre phases, différenciées par le niveau d'abstraction de la représentation du produit :

- élaboration du cahier de charges (Planning and clarifying the task);
- formalisation et spécification des principes (Conceptual Design);
- conception d'ensemble/architecturale (Embodiment Design);
- conception de détail (Detail Design).

1.1.1.1 Élaboration du cahier de charges

Au cours de cette phase initiale du processus de développement du produit, sont établies, les fonctions qu'il doit réaliser. Ces fonctions peuvent être quantitatives ou qualitatives et peuvent évoluer au cours de la conception. Pour y arriver les questions suivantes doivent être abordées en collaboration avec le client :

- Quels objectifs la solution doit satisfaire ?
- Quelles sont ses propriétés ?
- Quelles propriétés ne doit-elle pas avoir ?

Cette étape fait appel aux approches fonctionnelles afin de traduire les besoins du client en exigences fonctionnelles (comme le Quality Function Deployment), et généralement débouche sur l'élaboration d'une liste d'exigences. Une fois les besoins définis, ils sont communiqués au bureau d'étude.

1.1.1.2 Formalisation et spécification des principes (Conceptual Design).

Dans cette étape sont considérées les principales exigences et fonctions désirées du client afin de les structurer, hiérarchiser et caractériser. Un certain nombre de principes de solutions ou concepts sont générés qui peuvent être totalement innovants, créatives, choisis parmi les concepts déjà existants ou une modification d'un concept existant. Ces principes de solution correspondent à un ensemble de fonctions techniques ou à des schémas et concepts techniques. Cette étape est supportée par les outils de créativité et de résolution des problèmes tels que le brainstorming, le FAST (Function Analysis System Technic), l'essai-erreur ou l'analyse de la valeur. Cette phase hautement itérative demeure la phase de conception la moins contraignante et la plus ouverte : des nombreuses solutions de conception peuvent alors être testées. Elle aboutit ainsi à une configuration basique du produit (premières représentations graphiques et maquettes de produit).

1.1.1.3 Conception d'ensemble/architecturale (Embodiment Design)

Le concepteur élabore, au cours de cette phase, la structure physique du produit par le choix des matériaux, le dimensionnement et l'agencement d'un ensemble de composants. Le dimensionnement de la structure se réalise par des questions (Check-list) en utilisant des guides pour le concepteur afin de prendre en compte les différents points de vue sur le produit

et ne pas oublier des paramètres importants. Le concepteur évalue plusieurs solutions possibles de structure et d'architecture, parmi lesquelles sera choisie la plus satisfaisante, suivant des critères économiques et technologiques. Durant cette phase, le concepteur peut revenir en arrière lorsqu'il estime que les solutions finalement sélectionnées lors de la phase conceptuelle ne répondent pas aux contraintes de conception.

1.1.1.4 Conception de détail (Detail Design)

Cette phase consiste en la description finale du produit et la réalisation des plans qui seront utilisés pour la fabrication du produit. Sa description comprend toutes les informations relatives au produit :

- le choix des matériaux ;
- les études de structure (plan de composant et pièces) ;
- la définition de la géométrie des composants et leur position relative les uns par rapport aux autres (agencement des composants) ;
- la définition du type de liaisons entre les composants.

Cette dernière phase comprend différentes vérifications ainsi que l'optimisation des contraintes correspondantes à la conception. Elle permet en effet de vérifier si le produit répond bien aux spécifications du cahier de charges. La conception détaillée se traduit souvent par la réalisation d'un prototype physique, qui est souvent utilisé pour valider la solution avec le client et éventuellement pour réaliser des essais. Néanmoins cette phase tend à disparaître du fait des coûts et des délais qu'elle engendre. Avec le développement de la CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et de la simulation numérique, le maquettage physique est complété par le maquettage numérique, moins coûteux en temps de développement.

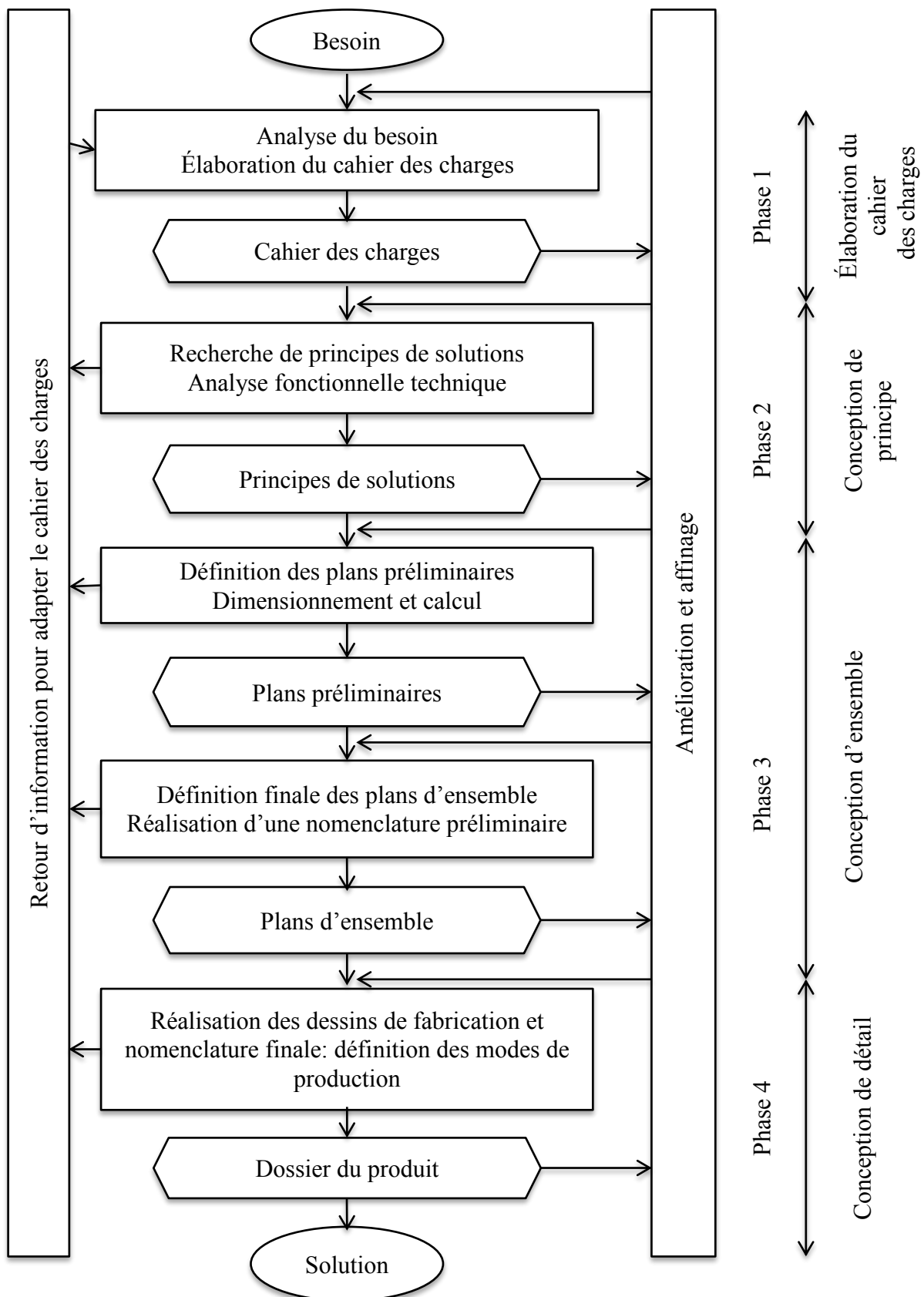


Figure 5 : Le modèle systématique du processus de conception (Pahl & Beitz, 1996).

1.1.2 Classification des types de conception

L'activité de conception peut être déclinée en quatre types, regroupés en deux classes. Ces deux classes mises en place par la communauté liée à ce domaine sont :

- La conception initiale (traduisant une absence de connaissances, de compétences voir d'expériences sur le sujet traité).
- La re-conception, qui est particulièrement adaptée, à l'ingénierie à base de connaissance puisqu'elle concerne la conception de produits ou d'éléments de produits à partir de composants développés auparavant.

La Figure 6 montre ces types de conception.

Concernant la conception initiale, il s'agit de concevoir et d'inventer un produit ou un processus pour la première fois, sans aucune référence ni aucune connaissance ou expérience passée qui permettrait de s'inspirer pour réutiliser, reconcevoir ou améliorer des solutions existantes (ex : conception d'un porte-avion à propulsion nucléaire...). La conception initiale est composée de deux types :

- la *conception créative* qui, par essence est la plus aventureuse et la plus risquée de toutes, puisque rien n'est connu au départ, pas même le concept physico-chimique de fonctionnement de l'objet (ex : conception créative d'un véhicule urbain volant au dessus du trafic) ;
- la *conception innovante* qui, à partir de la connaissance d'un ou plusieurs principes de fonctionnement connus (ex : la conception/fabrication d'un porte-avion à propulsion classique, la production de chaleur par fission nucléaire) propose une solution innovante pour l'architecture du produit (ex : porte-avion à propulsion nucléaire).

Concernant plus spécifiquement la re-conception, il s'agit de reconcevoir un produit ou processus existant. En général, cela se fait sur la base d'un cahier de charges déjà établi, voire stabilisé et motivé par une logique d'optimisation de l'architecture, des coûts, du poids, du volume, de la performance, etc... Il existe, en général, déjà de nombreux produits concurrents et des expériences passées réussies relative à l'objet à concevoir (ex : re-conception de téléphones mobiles). Les problèmes de re-conception se divisent en deux types :

- la *conception routinière* utilise les concepts et les architectures connues pour concevoir l'objet. Cette démarche doit prendre en compte la grande variété de

combinaisons et de topologies possibles (ex : téléphones mobiles à clapet, à glissière ou sans dispositif de fermeture/protection) ;

- la *conception paramétrique* utilise des concepts, des architectures et des configurations connus à l'avance. L'objet est conçu à partir d'un ensemble de paramètres hérités de propriétés connues (résistance électrique, condensateur, roulement à billes, ressort de traction, etc.). Fréquemment, le composant paramétrique fait l'objet d'un catalogue standard où l'activité de conception revient souvent à choisir des valeurs pour des dimensions prédéfinies dans un tableau correspondant au produit à concevoir. La conception paramétrique peut s'appuyer sur une modélisation et une configuration numérique permettant de transformer le besoin fonctionnel en solution géométriques 3D.

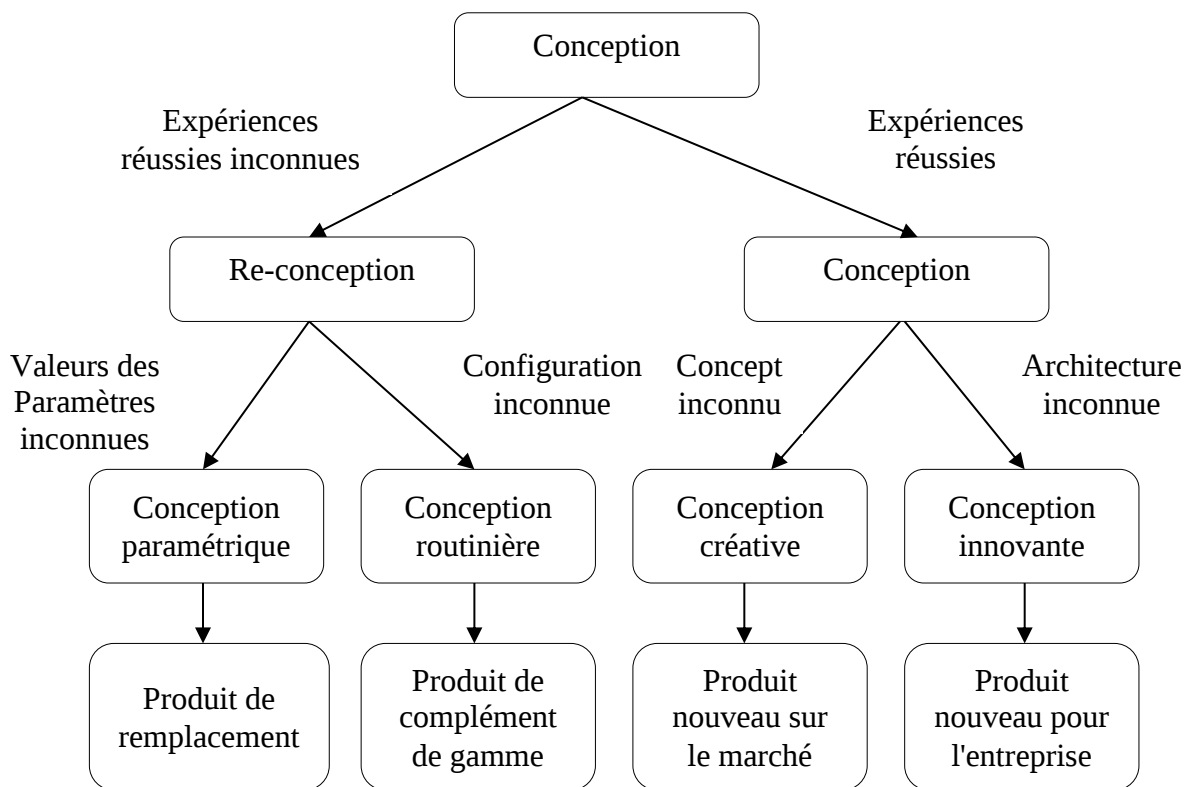


Figure 6 : Types de conception.

1.1.3 Vers une conception intégrée de produits

Selon l'organisation de la conception en processus séquentiel, des erreurs commises en phase amont du processus de conception, se propagent tout au long de ce processus et ne peuvent être détectées que bien après, lors par exemple des phases d'industrialisation voire de

production ou de maintenance. Il en résulte des retours en arrière sous forme d'itérations coûteuses et génératrices de pertes de temps et de qualité. C'est dans ce contexte d'inadéquation entre les pratiques de conception selon un schéma séquentiel et les nouveaux enjeux économiques (réduction des délais de mise à disposition de nouveaux produits sur le marché et l'augmentation des exigences clients en termes de qualité, minimisation des coûts) que des nouvelles démarches d'ingénierie ont émergés, sous diverses expressions : ingénierie concurrente, distribuée, simultanée, intégrée, collaborative.

Ces approches visent à prendre en compte, dès les phases amonts de conception, les contraintes liées à l'ensemble du cycle de vie du produit, depuis sa définition jusqu'à son déclin en passant par son industrialisation, sa distribution et son utilisation. Elles doivent permettre, une organisation simultanée des activités d'ingénierie impliquant les différents intervenants sur l'ensemble du cycle de vie du produit pour paralléliser au mieux les différentes phases du processus de développement, une réduction des délais et coûts de développement. Le principe de ces approches est de faire interagir et coopérer les différents intervenants et de faire comprendre les contraintes de chacun.

Ainsi la norme **AFNOR NFX 50415** propose la définition suivante : *« l'ingénierie intégrée est une approche qui permet une conception intégrée et simultanée des produits et processus liés à ces derniers, y compris la production et le soutien. Elle est destinée à permettre aux développeurs de prendre en compte dès l'origine toutes les phases du cycle depuis sa conception jusqu'à son retrait, y compris la qualité, les coûts, les délais et les exigences des utilisateurs »*.

Tichkiewitch, dans (Tichkiewitch, Chapa, & Belloy, 1995) explique que la notion de conception intégrée tend vers l'intégration du cycle de vie du produit pendant la phase de conception, par l'intégration de l'ensemble des acteurs devant intervenir dans l'histoire de ce produit. Par conséquent, il s'agit de :

- mettre à leur disposition les éléments qui sont nécessaires à leur réflexion,
- leur permettre d'interagir pour décider de la solution la mieux adaptée (un mécanisme de coopération, permettant la construction d'un compromis à partir des contradictions issues des objectifs propres de chaque acteur, doit être étudié),
- leur permettre d'agir sur la définition du produit.

Il ne s'agit plus seulement de formaliser, indépendamment du contexte, des connaissances que l'on rend disponibles pour le concepteur, mais de créer des outils permettant la coopération des personnes possédants différents points de vue sur le produit, au moment de sa conception. Ceci n'exclut nullement l'utilisation des moyens informatiques comme supports de cette intégration.

1.1.4 Conception pour l'X

Le concept de conception pour l'X a émergé à la fin des années 1950 avec comme objectif de mieux considérer les décisions prises en amont, au sein du processus de conception et de développement sur les métiers situés en aval. Plus précisément, les approches de DFX (Design For X) sont une multitude de méthodes de conception, où le « X » représente un point de vue lié aux phases du cycle de vie du produit, telles que la fabrication (Design For Manufacturing-DFM), l'assemblage (Design For Assembly-DFA), le recyclage (Design For Recycling-DFR), etc..., mais également aux facteurs de compétitivité voire aux métiers intervenants dans le processus de conception et de développement des produits : Design For Environment (DFE), Design For Quality (DFQ), Design to Cost (DFC), etc...

Le Tableau 1 récapitule les approches DFX selon les aspects liés aux facteurs de compétitivités et aux phases du cycle de vie du produit.

Tableau 1 : Récapitulatif des approches DFX selon les aspects liés aux facteurs de compétitivités et aux phases du cycle de vie du produit.

Orientation	Type d'approche	Objectif	Support
Cycle de vie	Design for disassembly	Réduire les temps/coûts opératoires de désassemblage Maximisation des revenus	Vérification de la faisabilité : Séquences de désassemblage Critères : coûts/temps opératoires de désassemblage
	Design for end-of-life	Réduire l'impact environnemental	Vérification de la faisabilité Critère : impact environnemental du produit en fin de vie
	Design for recycling	Augmenter le nombre de composants à recycler	Guide de conception Critère : taux de recyclabilité
	Design for manufacture and assembly	Réduire les coûts de production	Guide de conception Vérification de la faisabilité : fabrication/assemblage Critères : coûts de fabrication/assemblage
	Design for supplychain	Réduire les coûts des chaînes d'approvisionnement	Critères : coûts de la chaîne, qualité, niveau de collaboration, risque
Facteurs de compétitivité	Design for environment	Réduire l'impact environnemental	Guide de conception Critères : impact environnemental à travers l'analyse du cycle de vie (LCA, Eco-indicateurs)
	Design for quality	Augmenter la satisfaction du client	Critères : benchmarking, priorités des exigences géométriques en fonction des exigences client
	Design for maintainability	Réduire les coûts de maintenance	Critères : coûts de maintenance (MTBF, cost-based FMEA)
	Design for cost	Réduire les coûts	Critères : coûts estimés
	Affective design	Augmenter la satisfaction du client	Critères : réactions affectives (emotional design ; kansei engineering,...)

1.2 Conception pour le désassemblage des produits

La conception pour le désassemblage (Design For Disassembly-DFD) fait partie des approches DFX où « X » caractérise un point de vue lié aux phases du cycle de vie mais également aux facteurs de compétitivité voire aux métiers intervenants dans le processus de conception et de développement des produits. L'approche DFD, en regroupant un ensemble d'informations, de connaissances, de procédures d'analyse et de recommandations, vise à préparer le produit en vue de son désassemblage futur. Ainsi, le paragraphe suivant décrit d'une manière générale les objectifs et les principes de la démarche de conception pour le désassemblage, et d'une manière détaillée, les approches scientifiques associées.

1.2.1 Objectifs de la conception pour le désassemblage

La conception pour le désassemblage a pour objectif d'apporter au concepteur une compréhension sur les difficultés de désassemblage futur du produit, lors des différentes phases de conception. L'approche permet ainsi aux concepteurs d'anticiper et d'apporter des modifications sur le produit en tenant compte des contraintes issues du métier de désassemblage. Ainsi, dès la phase initiale de conception, il faut optimiser l'assemblage du produit pour pouvoir séparer les composants et les matériaux en fin de vie. Ces derniers pourront alors être réparés, recyclés ou valorisés énergétiquement au moment opportun. Plus généralement, les enjeux de la conception pour le désassemblage sont de :

- préserver les ressources en matières premières ;
- réduire la quantité de déchets non valorisables qui partent en enfouissement ;
- faciliter l'atteinte des objectifs réglementaire de recyclage.

Les approches DFD concernent une panoplie des méthodes permettant d'améliorer la désassemblabilité d'un produit. Ces méthodes peuvent être classées en trois catégories :

- les méthodes basées sur l'évaluation qualitative (recommandations) ;
- les méthodes basées sur l'évaluation quantitative ;
- les approches intégrées et à base de connaissances.

Au regard des objectifs énoncés ci-dessus, nous présenterons, dans les sections suivantes, un aperçu des différentes méthodologies et techniques qui ont été développées dans ce domaine.

On réalisera ensuite une critique et un bilan sur les apports et les contraintes de chacune de ces techniques.

1.2.2 Méthodes basées sur l'évaluation qualitative

Certains travaux scientifiques sont présentés dans cette section. Ces travaux considèrent l'approche DFD comme un ensemble de règles génériques de conception, répondant aux objectifs de DFD par la simplification et la structuration du produit. Les travaux de (Simon, Mc Laren, & Dowie, 1996), (Dowie T. A., 1995) et (Dowie & Simon, 1994) par exemple, ont permis de mettre en place une liste de règles de conception permettant un désassemblage facilité et plus rapide.

Règle 1 : Faciliter le désassemblage

- minimiser le nombre de fixations ;
- utiliser des fixations faciles à enlever ;
- minimiser la variété des fixations utilisées.

Règle 2 : Moins d'opérations de désassemblage

- réduire le nombre de composants dans un produit ;
- limiter les variétés de matières premières utilisées ;
- dans le cas où la limitation de matières est impossible, utiliser des matières compatibles qui pourront être recyclées ensemble ;
- regrouper les composants à désassembler en sous-assemblages (modules) ;
- faciliter l'accès aux composants susceptibles d'être récupérés.

Règle 3 : Réduire les variétés. Pour réduire le coût de désassemblage, il faut réduire les variétés des composants utilisés. Les règles suivantes peuvent être suivies :

- utiliser des composants standards (les mêmes composants doivent être utilisés dans la conception d'une famille de produits) ;
- faciliter l'accès aux composants.

Plus facilement, l'efficacité de désassemblage est élevée lorsqu'un produit est composé d'un minimum de pièces, dont chaque composant est démontable avec un minimum de difficultés, en un minimum de temps et avec un minimum d'outils.

1.2.3 Méthodes basées sur l'évaluation quantitative

Divers travaux ont été conduits quant à l'évaluation de la difficulté de désassemblage d'un produit à partir d'une expertise issue de l'expérience. Kroll et Hanft (Kroll & Hanft, 1998), Kroll et Carver (Kroll & Carver, 1999) ont proposé un outil s'appuyant sur des données empiriques issues de l'étude de nombreux projets industriels (trois années d'expériences de désassemblage manuel) pour évaluer la difficulté de désassemblage d'un produit. Cette évaluation permet d'améliorer sa conception et d'identifier ses points faibles (Tableau 2). Les auteurs évaluent la difficulté de désassemblage d'un composant en fonction des paramètres suivants:

- accessibilité ;
- positionnement : on évalue ici la précision nécessaire pour positionner l'outil ou la main nécessaire au démontage ;
- force nécessaire ;
- temps opératoire.

Exemple: une opération de dévissage est plus longue qu'une opération de retournement. Les auteurs notent ici le temps nécessaire pour réaliser l'opération sans difficulté, sans prendre en compte le temps pour positionner l'outil ou vaincre la résistance de l'assemblage.

Le sous-total permet d'agréger la difficulté de l'opération pour chaque composant. Il s'agit de la somme des colonnes '7' à '11' du Tableau 2.

Le score total pour chaque ligne (ou composant) permet de pondérer la difficulté de l'opération et le nombre de composants identiques. Il est la multiplication des colonnes '5' et '12'.

Le score total du produit s'obtient en additionnant l'ensemble des scores pour chaque composant.

Tableau 2 : Grille d'évaluation de désassemblage d'un produit (Kroll & Hanft, 1998).

Grille d'évaluation de désassemblage													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
						Évaluation de la difficulté (1 : facile.....10 difficile)							
Pièce n°	Quantité	Nombre mini de pièces	Type de tâche	Nb de répétition	Outil nécessaire	Accessibilité	Positionnement	Force	Temps de base	Spécial	Sous total	Total	Commentaire
1	4	0	Un	4	Ps	1	2	1	3	1	8	32	
2	4	0	Un	4	Ps	1	2	1	3	1	8	32	
...													
...													
Sous total du produit :													

Une fois cette analyse effectuée les auteurs déterminent deux métriques : un indicateur sur l'efficacité de la conception et un autre sur le temps opératoire de désassemblage.

$$\text{Efficacité de la conception en (\%)} = \frac{5 \times \sum_1^n \text{colonne n°3}}{\sum_1^n \text{colonne n°13}} \times 100 \quad (1)$$

avec

n : nombre de pièces

Cet indicateur traduit l'efficacité avec laquelle les composants sont assemblés en vue d'un désassemblage du produit. Plus l'indicateur est élevé, plus la conception est optimale. Une valeur de 100% correspond à l'assemblage de composants dont l'efficacité de désassemblage est idéale : un produit composé d'un minimum de pièces, dont chaque composant est démontable avec un minimum de difficulté, en un minimum de temps avec un minimum d'outil.

À l'aide de la grille, le deuxième indicateur à savoir le temps nécessaire au désassemblage du produit, est proposé :

$$T = (\sum_1^n \text{colonne } n^{\circ}13 - 5 \sum_1^n \text{colonne } n^{\circ}5) \times 1.04 + (NOPM) \times 0.9 \quad (2)$$

avec:

- *T*: Temps de désassemblage en secondes;
- *NOPM*: Nombre d'outils et de manipulations manuelles.

De même Das, Yedlarajiah et Narendra (Das, Yedlarajiah, & Narendra, 2000) ont proposé une méthode qui permet de faire une estimation du coût de désassemblage en fin de vie des produits en s'appuyant sur une analyse économique des activités de désassemblage. Ils proposent l'indice DEI (Disassembly Effort Index) qui repose sur 7 critères requis au désassemblage permettant d'évaluer l'effort du désassemblage :

- le temps ;
- l'outillage ;
- la technique d'enlèvement ;
- l'accessibilité ;
- les procédures de désassemblage ;
- les protections ;
- l'effort.

Chaque critère dispose d'une échelle quantitative et qualitative qui lui est propre, incluant la pondération. La Figure 7 donne l'échelle des critères accessibilité et outillage. Au final, avec les 7 critères proposés, l'indice DEI peut varier dans un intervalle de 0 à 100.

Outillage	Improvisé	Spécifique	Fourni par le fabricant	Outillage mécanique	Outil à air comprimé	Aucun	SCORE
	10	8	6	4	2	0	

Accessibilité	Invisible	Mouvements composés	Par le dessous	Profondeur > 15 cm.	Dégagement horizontal	Par le dessus	SCORE
	15	12	9	6	3	0	

Figure 7 : Facteurs de désassemblabilité du DEI (Das, Yedlarajiah, & Narendra, 2000).

Les auteurs proposent également de convertir cet indice en coût de désassemblage « C_d » afin de faciliter l'analyse économique.

$$C_d = \alpha \times \text{Durée totale de désassemblage} + \beta \times \text{indice DEI} \quad (3)$$

où α représente le taux horaire de travail ainsi que d'autres coûts basés sur le temps, tandis que β est représentatif des coûts généraux et indirects (peut être établi à partir de l'expérience acquise sur des précédents produits).

Quant à Das et Naik dans (Das & Naik, 2002), ils ont fait une analyse économique en séparant le coût de désassemblage en trois éléments principaux :

- le coût direct du temps de travail, associé au temps de désassemblage et au coût horaire appliqué ;
- le coût d'effort de désassemblage qui prend en compte l'outillage et les difficultés associées à chaque action ;
- le coût logistique qui s'applique en particulier aux opérations de tri dans un contexte de recyclage.

Le coût direct peut être estimé par une expertise issue de l'expérience. Au cas où cette expertise n'est pas disponible, Kroll, Beadsley et Parulian (Kroll, Beadsley, & Parulian, 1996) ont développé une méthode alternative pour estimer les temps de désassemblage à partir d'une analyse des tâches de travail.

L'effort de désassemblage est plus difficile à mesurer précisément. D'après les travaux de Das et Naik (Das & Naik, 2002), deux paramètres permettent d'estimer ce coût. Pour les actions de désassemblage non destructrices (*UA* pour *Unfastening Action* : action de désolidarisation), le coût est fonction du type d'attache, du nombre et de l'accessibilité à ces attaches. Pour les actions destructrices (*DA* pour *Destructive Action*), le coût est fonction du poids, de la réduction relative de poids et du procédé employé. La relation entre ces deux paramètres et le coût est obtenue par les taux de coût par action (de type *UA* ou *DA*) par unité, eux-mêmes renseignés par une approche multi-facteurs.

Le coût logistique est indépendant de la procédure de désassemblage choisie et représente une mesure extrinsèque au produit. Sortant du cadre de notre étude, il ne sera pas détaillé ici.

Dans leurs travaux, Desai et Mital (Desai & Mital, 2003) abordent la difficulté de désassemblage en proposant des échelles pondérées pour plusieurs facteurs, tels le degré d'accessibilité des composants et des attaches, les outillages nécessaires au désassemblage, la force, précision du positionnement, le poids, la forme etc. La somme des poids de pondération donne un temps opératoire de désassemblage total en TMU (Time Measurement Units). Cette unité de temps est définie de la manière suivante :

- 1 heure= 100 000 TMU
- Soit 1 TMU= 0.036 secondes

Ainsi, un score élevé indique des anomalies dans la conception du produit en vue de son désassemblage.

Des études proposant des méthodes d'évaluation de la désassemblabilité à partir des caractéristiques du produit obtenues via les modèles CAO ont été conduites également. Les paramètres utilisés pour l'évaluation sont :

- le nombre de composants à désassembler ;
- l'accessibilité par les directions d'extraction et
- les matériaux constitutifs du produit.

Ces paramètres consistent en trois types d'informations :

- la structure du produit ;
- la nomenclature des composants (nom, poids, matière, fonction, degré de toxicité,...) ;
- le détail des liaisons entre les pièces (type de liaison et direction des mouvements possibles, nombre de liaisons,...).

(Sabaghi, Mascle, & Baptiste, 2016) proposent une méthode d'évaluation du désassemblage d'un produit en phase de conception. Ils considèrent le désassemblage comme un problème de prise de décision multi-critère, plusieurs paramètres peuvent influencer la performance d'une tâche de démontage. Compte tenu de leur expérience accumulée au cours des travaux de démontage sur un avion Bombardier Regional Jet, cinq paramètres ont été pris en compte dans cette étude. Une méthode de conception hybride d'expérience (DOE) et de TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) a été proposée afin d'obtenir un modèle de désassemblage discriminant unique pour calculer l'indice de désassemblage pour chacun des deux composants donnés. Les résultats de ANOVA ont montré que le

modèle de désassemblage dérivé a une fiabilité de 94,30%. L'application du modèle proposé à la phase de conception pourrait faciliter l'évaluation de l'opération de désassemblage en fin de vie.

1.3 Conception modulaire des produits

La conception modulaire est une des méthodes de conception de produits permettant la diversification de l'offre. Un intérêt considérable s'est porté dans les années récentes sur la conception modulaire dans les secteurs (tels que l'informatique, l'automobile, l'aéronautique, etc) où la réactivité constitue un facteur-clé de succès. L'objectif de cette orientation stratégique est de réduire simultanément la complexité, les temps et les coûts de fabrication.

Nous présentons d'abord le concept de modularité, ensuite les avantages et les inconvénients de la conception modulaire. Nous réalisons une synthèse bibliographique sur les méthodes d'identification d'une architecture modulaire et sur les métriques de la modularité.

1.3.1 Modularité et familles des produits

Plusieurs politiques de conception de produits ont été proposés pour offrir une grande variété de produits finis à savoir:

- la différenciation retardée ;
- la conception modulaire ;
- la standardisation.

La conception modulaire consiste à assembler un produit à partir de modules fonctionnels. Un module est constitué d'un ensemble d'éléments fortement liés entre eux et faiblement à d'autres éléments externes au module (Baldwin & Clark, 2000).

Une famille de produits est un ensemble de produits ayant une ou plusieurs similarités dans leurs caractéristiques (fonctions, composants, processus d'assemblage, technologie) qui satisfont les exigences particulières des clients. Chaque produit individuel de la famille de produits est appelé variante du produit.

Dans (Pahl & Beitz, 1996), les auteurs proposent la classification suivante des modules :

- Module *basique* : il implémente une ou plusieurs fonctions fondamentales du produit ou de la famille de produits.
- Module *auxiliaire* : il implémente une ou plusieurs fonctions auxiliaires qui sont utilisées en association avec les fonctions fondamentales pour créer de la variété dans la famille de produits.
- Module *adaptatif* : il regroupe les fonctions qui permettent d'adapter un composant (ou un système) à un autre produit ou (à un autre système). Les modules adaptatifs permettent de gérer les contraintes imprévisibles.
- *Non module* : il implémente des fonctions spécifiques dictées par les besoins des clients. Ces fonctions ne sont pas partagées avec d'autres produits de la famille.

1.3.2 Avantages et inconvénients de la conception modulaire

Les principaux avantages de la conception modulaire sont :

- augmenter la variété de produits ;
- personnaliser l'offre ;
- faciliter les stratégies de plateformes ;
- limiter les coûts de développement et d'industrialisation ;
- permettre des économies d'échelle ;
- permettre une innovation technologique rapide ;
- réduire les délais de développement ;
- faciliter la maintenance, la réparation et le recyclage de produits.

Mais la conception modulaire présente quelques inconvénients car elle peut :

- engendrer des surcoûts ;
- être un frein pour la conception de produits performants à cause du compromis que réalise une architecture modulaire ;
- engendrer des difficultés concernant la conception des modules ;
- augmenter le risque de voir les produits copiés par des entreprises concurrentes ;
- rendre les produits semblables.

1.3.3 Les méthodes d'identification d'architecture modulaire

Trois méthodes sont fréquemment référencées pour l'identification des modules :

- méthode des heuristiques;
- méthode MFD (Modular Function Deployment);
- méthode de clustering d'une matrice structurelle de conception.

1.3.3.1 Méthode des heuristiques

Développé par (Stone R. W., 1998) (Stone, Wood, & Crawford, 2000), elle est basée sur trois heuristiques qui permettent d'identifier les modules fonctionnels d'un produit. Un ensemble de fonctions de ce produit interagit par des flux d'information (Figure 8) (flux dominants, flux ramifiés, flux convertis) pour former des modules physiques. Les principaux critères de modularisation sont fonctionnels et indépendants de l'architecture physique du produit. Les trois heuristiques sont :

- Heuristique des flux dominants : elle examine les flux à travers une arborescence fonctionnelle et suit les flux jusqu'à ce qu'ils sortent du système ou subissent une transformation. Elle conclut à s'il existe un ensemble de fonctions à travers lesquelles un flux passe jusqu'à la sortie ou la transformation, alors ces fonctions forment un module.
- Heuristique des flux ramifiés : elle examine les flux divergents ou convergents issus de chaînes de fonctions parallèles. Chacune de ces chaînes peut devenir un module dont l'interface correspond au point de branchement de la chaîne.
- Heuristique du module de conversion-transmission : elle examine les flux convertis. Ces flux sont convertis au niveau de certaines fonctions. On considère alors ces fonctions comme étant des modules à elles seules. Si dans une même chaîne de fonctions, il y a plusieurs fonctions de transmission ou de conversions, alors ces fonctions délimitent un module de conversion ou de transmission.

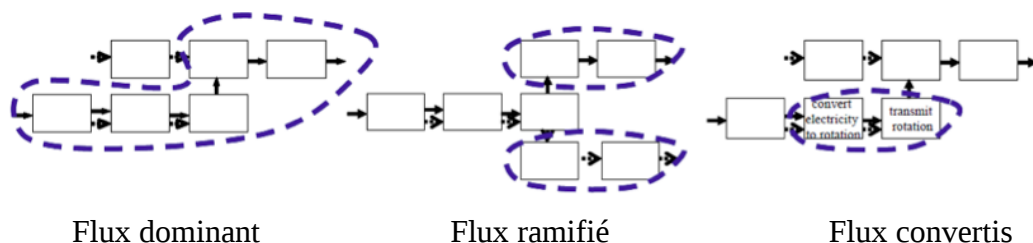


Figure 8 : Heuristiques pour l'architecture des fonctions.

1.3.3.2 Méthode MFD (Modular Function Deployment)

C'est une méthode de modularisation plus orientée management qu'ingénierie. Elle a été développée par (Erixon, 1996) et (Ericsson & Erixon, 1999) et est dédiée à la modularisation d'un seul produit. Dans cette méthode, des critères de modularité autres que la fonctionnalité sont considérés. Il y a douze critères de modularité dans MFD (Tableau 3).

Un ou quelques critères de modularité sont choisis en fonction de la stratégie de développement de produit modulaire de l'entreprise. L'entreprise applique ensuite la démarche de MFD qui comprend cinq étapes :

1. Clarifier la spécification du produit en utilisant une matrice QFD avec les pilotes de modularité qui remplacent les besoins des clients.
2. Analyser les fonctions et sélectionner les solutions techniques.
3. Identifier les modules possibles en utilisant la matrice MIM (Module Indication Matrix). Celle-ci sert à examiner les corrélations entre les critères de sélection de modules (normalement, ce sont les critères en relation avec les activités du cycle de vie du produit, par exemple facilité de conception, recyclage etc.) et les composants sélectionnés dans l'étape antérieure. Un questionnaire est fourni pour soutenir cette activité. Les composants (verticalement) sont évalués par rapport aux critères (horizontaux) selon le questionnaire fourni (Figure 9). Les composants avec une meilleure note sont appelés « porteurs ». Le reste des composants qui ont une bonne note dans les mêmes critères que les composants porteurs sont assemblés avec ces derniers pour former des modules. Par exemple, les composants « Grip » et « Cover » sont inclus dans un module avec le composant porteur « housing ».
4. Évaluer les concepts en testant les interfaces entre les modules.
5. Améliorer chaque module.

L'identification des modules selon la méthode MFD se fait en classant les fonctions selon un score croissant. Les fonctions participant à un même critère de modularité sont candidates pour former un module.

Tableau 3 : Les critères de modularité dans la méthode MFD.

Développement du produit	Reconduction	Une partie du produit peut être réutilisée et reconduite dans plusieurs produits.
	Évolution technologique	Les pièces sont susceptibles de subir des changements en raison des demandes de clients ou des innovations technologiques. Il est important de pouvoir adapter les interfaces de sorte que la nouvelle technologie puisse être introduite sans remettre en cause l'ensemble du produit.
	Modifications planifiées	L'entreprise a l'intention de développer et de changer certaines parties du produit.
Variabilité	Spécifications variables	Pour prendre en compte la personnalisation des produits efficacement, un concepteur devrait tâcher d'assigner toutes les variations à un petit nombre de composants.
	Style	Les modules de style contiennent les composants qui peuvent être altérés pour créer des variations du produit.
Production	Unité en commun	Les composants et fonctions en commun entre plusieurs produits permettent le partage d'une unité de production.
	Processus et/ou organisation	Des pièces exigeant le même processus de production sont groupées ensemble.
Qualité	Essais séparés	La possibilité de tester séparément chaque module avant la livraison à l'assemblage final peut contribuer à l'amélioration.
Achats	Disponibilité des fournisseurs	Modules standard d'achat disponibles chez les fournisseurs externes.
Après vente	Service et maintenance	Les composants nécessitant une maintenance peuvent être groupés ensemble pour former un module qui facilite les opérations de remplacement et de réparation.
	Amélioration	Il faut donner aux clients la possibilité de faire évoluer leur produit.
	Recyclage	Le nombre de matériaux dans chaque module devrait être limité. Les matériaux facilement recyclables peuvent former un module séparé.

	Fonction 1	Fonction 2	Fonction 3	Fonction 4	Fonction 5	Fonction 6	Fonction 7	Fonction 8	Fonction 9
Reconduction	3			1					
Évolution technologique		3	9		3			9	
Modifications planifiées		1	3			3		9	
Spécifications variables	1				3				
Style		3		9		9		1	
Unité en commun	9		3				9		
Processus et/ou organisation	3	1			3				
Essais séparés	3		3					1	9
Disponibilité des fournisseurs									9
Service et maintenance		9			9				
Amélioration			1		3			1	
Recyclage				3					3

Figure 9 : Matrice Indication Module.

	Fonction 1	Fonction 2	Fonction 3	Fonction 4	Fonction 5	Fonction 6	Fonction 7	Fonction 8	Fonction 9	
Reconduction	3			1						4
Évolution technologique		3	9		3			9		24
Modifications planifiées		1	3			3		9		16
Spécifications variables	1				3					4
Style		3		9		9		1		22
Unité en commun	9		3				9			21
Processus et/ou organisation	3	1			3					7
Essais séparés	3		3					1	9	16
Disponibilité des fournisseurs									9	9
Service et maintenance		9			9					18
Amélioration			1		3			1		5
Recyclage				3					3	6
	19	17	19	13	21	12	9	21	21	

Figure 10 : Principaux critères (lignes) et fonctions dominantes (colonnes).

M1 M3 M2 M1 M3M4

	Fonction 1	Fonction 2	Fonction 3	Fonction 4	Fonction 5	Fonction 6	Fonction 7	Fonction 8	Fonction 9	
Reconduction	3			1						4
Évolution technologique		3	9		3			9		24
Modifications planifiées		1	3			3		9		16
Spécifications variables	1				3					4
Style		3		9		9		1		22
Unité en commun	9		3				9			21
Processus et/ou organisation	3	1			3					7
Essais séparés	3		3					1	9	16
Disponibilité des fournisseurs									9	9
Service et maintenance		9			9					18
Amélioration			1		3			1		5
Recyclage				3					3	6
	19	17	19	13	21	12	9	21	21	

Figure 11 : Modules selon la méthode MFD (Erixon, 1996).

1.4 Bilan et positionnement

La recherche bibliographique effectuée nous a permis de remarquer que de nombreux auteurs ont développé des outils d'évaluation quantitative de la complexité du désassemblage d'un produit. Les méthodes et outils d'évaluation du désassemblage sont développés pour étudier et analyser la conception détaillée d'un produit. De ce fait, l'intégration du désassemblage dans la conception pour la valorisation porte sur la phase finale de la conception, les outils d'évaluation de désassemblage sont utilisés pour un objectif d'amélioration de la conception.

Les outils d'évaluation actuels, intégrés à la conception, sont bien souvent utilisés de manière déterministe. L'évaluation se base sur divers critères :

- cinématiques : les mobilités des composants et en conséquence les directions de désassemblage (pas de déformation des composants) ;
- géométriques : l'accessibilité, l'absence de collisions entre le composant manipulé et un obstacle extérieur ;
- technologiques : la nature des contacts entre les composants.

Ces critères sont regroupés dans une fonction objective qui évalue, élimine et sélectionne des composants candidats au désassemblage afin de proposer des séquences valides de désassemblage des points de vue géométrique et technologique simultanément.

En outre, alors que le désassemblage est actuellement un travail manuel, l'effort n'a pas beaucoup été porté sur les facteurs humains dans ce processus. En fait, la grande quantité de l'intervention humaine dans le désassemblage non seulement fournit une flexibilité supplémentaire, mais donne également lieu à de nombreuses incertitudes sur le temps opératoire de désassemblage et la qualité des composants désassemblés.

Nous avons présenté les avantages et les inconvénients de la conception modulaire. Ensuite nous avons réalisé une synthèse bibliographique sur l'identification d'une architecture et les méthodes de modularisation d'un produit. Nous avons également présenté les outils matriciels de représentation d'une architecture (DSM et matrice d'incidence) ainsi que les algorithmes permettant d'identifier une architecture modulaire d'un produit. Par conséquent, nous optons pour une méthode de modularisation qui consiste à modéliser les relations des composants d'un produit par une matrice de type DSM et à identifier des architectures modulaires par l'utilisation d'un algorithme de clustering.

Chapitre 2. Génération, représentation et évaluation des séquences de désassemblage

Le problème de génération des séquences de désassemblage (Disassembly Sequence Planning: DSP) est considéré comme un problème d'optimisation NP-difficile en raison du grand nombre de possibilités de décomposer un produit qui augmentent de façon exponentielle avec le nombre des composants du produit. Par exemple pour un ensemble de 3 composants, il y a $3! = 6$ séquences de désassemblage possibles. Pour 5 composants, il existe $5! = 120$ séquences !

Ce chapitre dresse un état de l'art des travaux de recherche sur le désassemblage. Dans les sections 1 et 2, les concepts de produits manufacturés, de cycle de vie de produits et du désassemblage sont rappelés. La section 3 rapporte les travaux de recherche sur la génération des séquences de désassemblage ainsi que leurs représentations et leurs optimisations. Une discussion sur les apports et les contraintes de chacune de ces approches par rapport à la problématique de conception modulaire orientée désassemblage est exposé en section 4, permettant de délimiter le périmètre de notre contribution et de mieux positionner le travail de recherche.

1.1 Cycle de vie des produits

La norme internationale ISO 9000 : 2000 définit le produit comme étant « *le résultat d'un processus* ». Ce dernier étant défini comme un « *ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforment des éléments d'entrée en éléments de sortie* ». On distingue quatre grandes catégories de produits :

- les services ;
- les logiciels ou « softwares » ;
- les produits issus de processus à caractère continu, tissus, profilés, liquide, gaz ;
- les produits manufacturés, formés, mis en forme, assemblés.

Un produit manufacturé est un assemblage structurel d'une ou plusieurs fonctions élémentaires, destinés à satisfaire un besoin exprimé dans un cahier des charges fonctionnel (CDCF). Il peut être une pièce élémentaire (indivisible) ou un assemblage de plusieurs pièces élémentaires. Ces produits peuvent être unitaires ou au contraire produits en séries plus ou moins grandes.

Le cycle de vie d'un produit peut être défini comme la totalité des étapes parmi lesquelles le produit passe. On distingue traditionnellement les phases suivantes :

- l'extraction et récolte des matières premières ;
- la production ;
- l'emballage ;
- le transport et la distribution ;
- l'utilisation et la maintenance ;
- la fin de vie.

Pour un cycle de vie complet et écologique, l'étape « fin de vie » comporte des étapes de collecte et de traitement des produits. L'une des illustrations la plus précise du cycle de vie d'un produit est sans doute celle de Chevron (Figure 12) (Chevron, David, Binder, & Descotes-Genon, 2000). Le reconditionnement de tout le produit ou certains de ses constituants permet de regagner de la valeur fonctionnelle du produit pour chacun des constituants récupérés. Ces produits ou constituants sont réinjectés dans la phase de production ou d'utilisation. Ces dernières années, un bon nombre de définitions du cycle de

vie du produit ont vu le jour et se rejoignent sur le fait que chaque étape du cycle de vie du produit intègre des activités, des acteurs, et des domaines d'expertises différents mais dépendants les uns des autres.

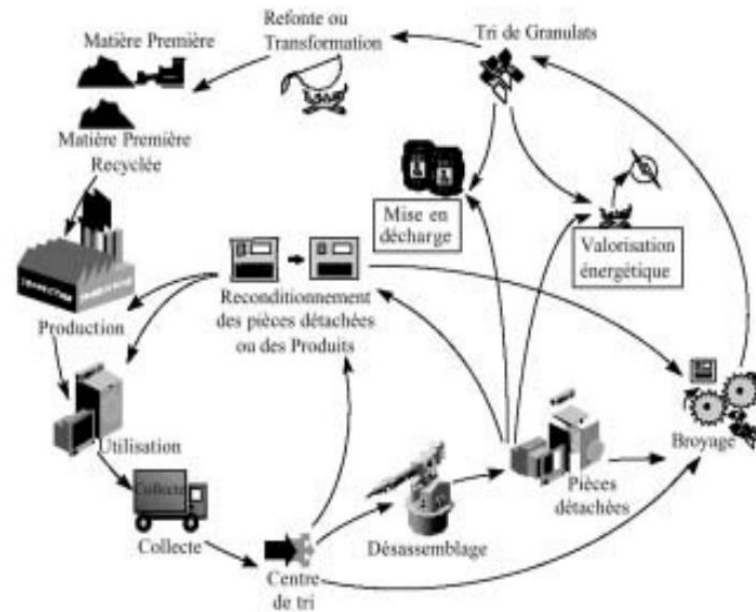


Figure 12 : Cycle de vie des matériaux et des produits (Chevron, David, Binder, & Descotes-Genon, 2000).

1.2 Désassemblage

Différentes définitions du désassemblage sont proposées dans la littérature.

Le désassemblage est défini par (Brennan, Gupta, & Taleb, 1994) « *comme étant un processus de récupération de composants souhaités (désirables) constituant un produit* ». Kriwet, quant à lui, définit le désassemblage comme étant « *un processus de décomposition d'un système en sous-assemblages et composants tout en gardant les caractéristiques d'origine du produit* » (Kriwet, Zussman, & Seliger, 1995). Une autre définition du désassemblage qui nous paraît intéressante est celle de Gungor et Gupta. Ils définissent le désassemblage comme étant : « *un processus systématique qui favorise la récupération sélective des composants et/ou des sous assemblages réutilisables, recyclables ou polluants du produit* » (Gungor & Gupta, 1997).

Selon Lambert et Gupta (Lambert & Gupta, 2005), le désassemblage est *la séparation d'un assemblage en plusieurs sous-assemblages, ou bien la rupture d'une ou plusieurs connections entre différents composants*.

Il existe plusieurs raisons qui conduisent au désassemblage du produit. Notons certaines parmi les plus importantes :

- maintenance ;
- objectifs de fin de vie :
 - recyclage;
 - remanufacturing;
 - réutilisation.

1.2.1 Types d'actions de désassemblage

Les actions de désassemblage rassemblent les différentes opérations mécaniques de séparation, de déconnection et toute autre activité visant la formation de sous-assemblages ou pièces issues d'un produit « Parent ». Plusieurs types d'actions de désassemblage sont proposés. Citons à titre d'exemples ceux de (Torres, Puente, & Aracil, 2003) :

- Union de type joint : l'action consiste à défaire le joint et séparer les composants (Figure 13.a).
- Union de type contact :
 - Entre deux composants : l'action consiste en la séparation d'un composant de tous les autres (Figure 13.b).
 - Entre plus de deux composants : l'action consiste en la séparation des composants d'une des extrémités, jusqu'au nœud désiré (Figure 13.c).
- Assemblage sans relation de priorité entre les composants : dans ce cas il n'y a pas d'action envisagée (Figure 13.d).
- Union de type joint entre un élément de fixation (vis, écrou, etc....) et un sous-assemblage : dans ce cas l'élément de fixation doit être retiré (Figure 13.e).
- Union avec un élément de fixation entre des sous-assemblages et/ou composants : dans ce cas, l'élément de fixation doit être retiré et ainsi les sous assemblages et/ou composants qui étaient unis par l'élément de fixation sont séparés (Figure 13.f).

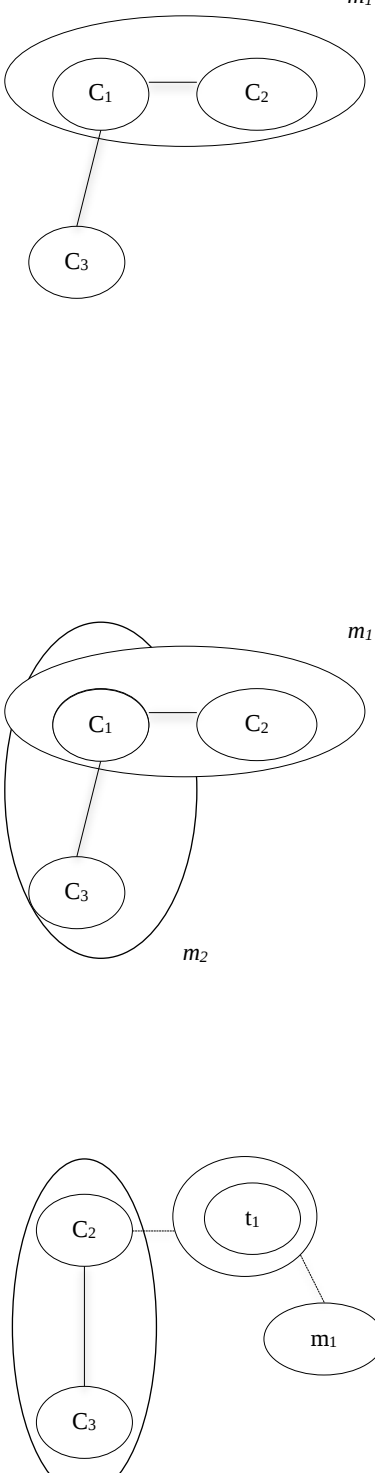
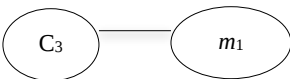
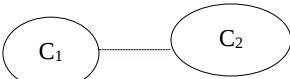
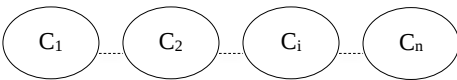
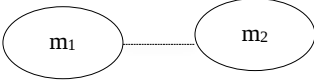
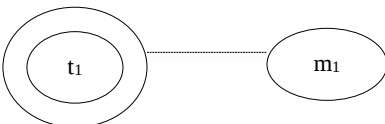
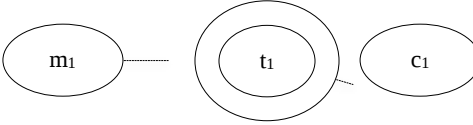
	(a) Représentation  (b) Représentation  (c) Représentation  (d) Représentation  (e) Représentation  (f) Représentation 	Action Défaire le joint et séparer C₃ et m₁ Action Séparer C₁ et C₂ Action Séparer les composants d'une des extrémités jusqu'au nœud ciblé Action Ne rien faire Action Défaire l'élément de fixation t₁ Action Retirer l'élément de fixation et séparer les sous assemblages et/ou composants
--	---	--

Figure 13 : Représentation et actions de désassemblage (Torres, Puente, & Aracil, 2003).

1.2.2 Classification du désassemblage

Différents types de classification du désassemblage sont proposés dans la littérature (Kang, 2005), (Touzanne, 2002), (Dong, Zhang, Tong, & Dong, 2006). Ils sont ainsi classés suivant la profondeur de désassemblage, les modes de désassemblage possibles, la nature des éléments désassemblés et le type de déplacement à chaque étape du plan de désassemblage. La distinction pour chaque classe se fait en fonction des points suivants :

- Profondeur de désassemblage
 - Désassemblage total : il consiste à séparer tous les composants et sous-ensembles du système en fin de vie.
 - Désassemblage partiel ou ciblé : par opposition au précédent, ce type de désassemblage consiste à désassembler une partie seulement des éléments du système. On peut ensuite distinguer dans cette catégorie le désassemblage *sélectif* et *ciblé* (Addouche, 2003). Tandis que le désassemblage sélectif vise à générer des composants élémentaires et des sous-ensembles, le désassemblage ciblé consiste à extraire un élément particulier du système.
- Les déplacements d'éléments
 - Désassemblage séquentiel : à chaque étape du plan, les déplacements d'éléments se font suivant la même direction (Kang, 2005). C'est-à-dire qu'à une étape donnée du plan, l'obtention d'un élément par déplacement de plusieurs autres dans des directions différentes n'est pas envisagée.
 - Désassemblage monotone : on considère un désassemblage comme étant monotone lorsque les déplacements intermédiaires ne sont pas envisagés lors de chaque étape du plan. Lorsqu'un élément est déplacé dans une position temporaire au cours d'une opération, le désassemblage est considéré comme non-monotone.
- Les modes de désassemblage
 - Désassemblage destructif : les éléments séparés sont partiellement détruits et perdent leurs fonctions d'origine. On cherche généralement par ce mode de désassemblage à récupérer la matière des éléments du système en fin de vie ou à récupérer un élément difficile d'accès de manière à diminuer le temps de désassemblage par rapport au mode non-destructif.

- Désassemblage non-destructif : les modes de désassemblage entrant dans cette catégorie préservent l'état et les fonctionnalités des éléments désassemblés. Notons que ce type de désassemblage est réversible, car les éléments généralement peuvent être réassemblés.
- La nature de désassemblage
 - Désassemblage linéaire : il consiste à ne désassembler qu'un seul composant élémentaire à chaque étape du plan.
 - Désassemblage parallèle : on considère dans ce cas le désassemblage de sous-ensembles (éventuellement des modules) en plus des composants élémentaires à chaque étape du plan.

1.2.3 Comparaison entre assemblage et désassemblage

Les problématiques d'assemblage et de désassemblage initiées par l'industrie ont suscité une vague de recherches académiques : des guides de conception DFA (Design For Assembly) et DFD (Design For Disassembly) ont été créés et des outils de conception CAO « Computer Aided Design » ont été développés. On constate que les méthodes pensées pour le désassemblage tirent généralement leurs fondements des méthodes antérieures développées pour l'assemblage, partant de l'hypothèse que le désassemblage est l'inverse de l'assemblage.

L'assemblage consiste en un ensemble d'opérations d'agrégation de composants pour l'obtention d'un produit final et ce, selon une multitude de configurations possibles. Il exige une grande précision, une représentation complexe de produits qui inclut les relations fonctionnelles/accouplements. L'état des composants est connu précisément, ils sont dans un état neuf ; et la probabilité de réussir chaque opération d'assemblage est proche de 1.

Le désassemblage est une action de séparation d'un produit en composants et/ou en sous-assemblages. Les opérations deviennent des opérations de désagrégation. Des incertitudes existent quant à la qualité et au nombre exact des composants pouvant être extraits suite au désassemblage. Le désassemblage d'un produit en fin de vie sera différent selon le scénario de fin de vie choisi : si les composants sont destinés à être réutilisés, un assemblage non destructif est réalisé, s'ils sont destinés à être retraités, le désassemblage peut être destructif.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, le désassemblage est souvent partiel (ciblé/sélectif) et ne concerne pas la totalité des composants (on parle alors de profondeur de désassemblage). Par ses caractéristiques, le désassemblage est souvent réalisé manuellement ou avec l'assistance des outils plutôt que par des lignes automatisées et/ou des robots comme c'est le cas en assemblage.

Pour les raisons citées ci-dessus et d'autres telles que les joints irréversibles, de la dégradation en cours d'utilisation, les modifications de la structure induits par la maintenance ou la mise à niveau, etc..., le processus de désassemblage diffère donc de l'assemblage et n'est pas exactement l'inverse du processus d'assemblage (Tableau 4).

Tableau 4 : Comparaison entre assemblage et désassemblage.

Assemblage	Désassemblage
Tous les composants élémentaires doivent être assemblés.	Le désassemblage d'un produit n'est pas nécessairement total (il est souvent partiel/sélectif) d'où l'introduction de la notion de profondeur de désassemblage. Certains sous-ensembles seront broyés pour permettre le tri et la récupération des matières qui les composent.
Les constituants sont dans un état neuf et la probabilité de réussir chaque opération est proche de 1.	Des incertitudes existent quant à la qualité et la quantité des composants pouvant être extraits suite au désassemblage.
La précision est primordiale.	L'imprécision est acceptable.
Connaissance de toutes les variantes d'une famille de produit assemblé.	Il y a méconnaissance de toutes les variantes d'une famille de produit.

1.3 Génération, représentation et évaluation des séquences de désassemblage

Divers travaux ont été conduits dans le domaine de DSP, proposant ainsi des méthodes exactes, méthodes approchées et des méthodes basées sur l'apprentissage pour résoudre ce problème. Lambert (Lambert A. J., 2003) a présenté une revue de la littérature sur les travaux de recherche concernant la génération des séquences de désassemblage. De ce fait, nous présentons ici quelques méthodes permettant la génération, la représentation des séquences de désassemblage ainsi qu'une partie des critères d'évaluation existants, à notre connaissance, permettant la sélection de la séquence de désassemblage optimale. Certaines de ces méthodes débutent à partir des informations relatives aux composants ainsi qu'à leurs relations

physiques et d'une modélisation de la structure du produit (souvent basées sur des modèles CAO-3D).

1.3.1 Modélisation de l'assemblage

- Graphe des liaisons (*Component Mating Graph, CMG*) : représente le produit au niveau des composants. Les nœuds et les arcs de ce graphe représentent, respectivement, les composants et les liaisons entre les composants (Zussman, Kriwet, & Seliger, 1994) (Murayama, Oba, Abe, & Yamamichi, 2001). Les liaisons peuvent être orientées ou non orientées. Les liaisons non orientées désignent l'existence d'une relation géométrique (contrainte de contact) entre deux composants tels que contact plan ou cylindrique mais aussi un contact causé par les différents types d'attachement tels vissage (screwing), ajustement par rupture (snap-fit), ajustement par pression (press fit). Les liaisons orientées, quant à elles désignent une information de précedence (contrainte de non contact) entre deux composants tels que les informations concernant l'accessibilité à une tâche de désassemblage (Li, Khoo, & Tor, 2002). Cette approche de modélisation est illustrée sur la Figure 14.

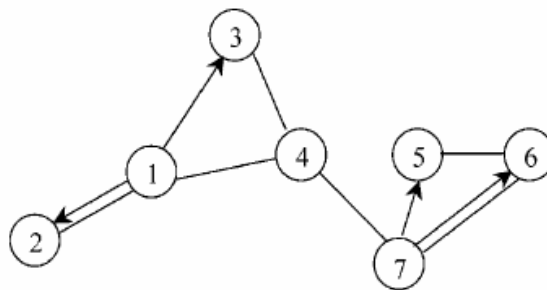


Figure 14 : Graphe des liaisons hybride (Li, Khoo, & Tor, 2002).

- Graphe des adjacences (Face Adjancy Graph, FAG) (Woo & Dutta, 1991) et (Dutta & Woo, 1995) : c'est une représentation du produit à un niveau inférieur. En effet, les nœuds et les arcs représentent, respectivement, les faces des composants et les relations d'adjacence entre les faces. Ce graphe est utilisé conjointement avec un graphe des liaisons pour détecter les composants ayant des faces atteignables.
- Sphères gaussiennes : représentation des composants par des sphères gaussiennes permettant de déterminer les directions de désassemblage des composants (Srinivasan

& Gadh, 1998). Des sphères gaussiennes sont aussi utilisées (Shyamsundar, Ashai, & Gadh, 1998) (Lambert & Gupta, 2005). Un composant totalement libre dans l'espace est représenté par une sphère complète. Elle est ensuite réduite en fonction des surfaces d'autres composants en contact avec celui analysé. Par exemple si la surface de contact est un plan, une demi-sphère seulement représentera les directions de désassemblage admissibles. D'autres auteurs proposent de réaliser des analyses de collision pour déterminer les directions de désassemblage possible (Gerner, 2001) (Pomares, Puente, Candelas, & Gil, 2004) à l'aide de prototypes virtuels ou de logiciels CAO.

- **Matrices** : Différents types de représentations matricielles sont proposées dans la littérature pour spécifier les relations de précédence entre les composants d'un produit. Dans (Huang & Huang, 2002), les auteurs proposent des notations différentes avec les matrices d'obstruction : les lignes caractérisent les composants, les colonnes les directions et les éléments de la matrice fixent les interférences entre les composants pour leur déplacement pour une direction donnée. Dans (Moore, Gungor, & Gupta, 2001), (Gungor & Gupta, 2001) et (Suh, 1995), les relations entre les composants sont synthétisées à l'aide de matrices de précédence. Les lignes et les colonnes caractérisent les composants et les éléments de la matrice définissent les relations de précédence entre les composants. Deux types de relations sont caractérisés dans les matrices de précédence :
 - Les relations ET : elles sont caractérisées par des valeurs 1 indiquant si le composant associé à une ligne doit être désassemblé avant le composant associé à une colonne (la matrice indique sur une colonne l'ensemble des éléments à désassembler avant le composant associé à cette colonne),
 - Les relations OU : deux composants sont impliqués dans une relation OU par rapport à un troisième si l'un ou l'autre doit être désassemblé avant le troisième ; l'élément de la matrice indique les directions de désassemblage des composants qui peuvent être désassemblés avant le troisième.
- **Nomenclature et Arborescence** : Elles caractérisent la composition du système en mettant en évidence des sous-ensembles et leurs composants. Dans (Dong, Zhang, Tong, & Dong, 2006), les auteurs proposent une modélisation de la structure du produit sous la forme de « *hierarchical attributed liaison graph* » (Figure 15). Les nœuds correspondent aux composants et ou super composants. Les super composants,

à l'exception des nœuds terminaux ont des enfants dans le niveau hiérarchique suivant. Ce graphe contient non seulement les caractéristiques géométriques impliquées dans le cadre du mécanisme d'accouplement et d'interconnexion entre une paire de composants ou super composants, mais aussi des connaissances dans les domaines de l'ingénierie, de conception et de manufacturing. Ces types de modélisation sont utilisés dans le cadre de la planification du désassemblage où les demandes en produits valorisables sont prises en compte dans la détermination de la profondeur de désassemblage (Lambert & Gupta, 2005) (Veerakamalmol & Gupta, 2002) (Zeid, Gupta, & Bardasz, 1997).

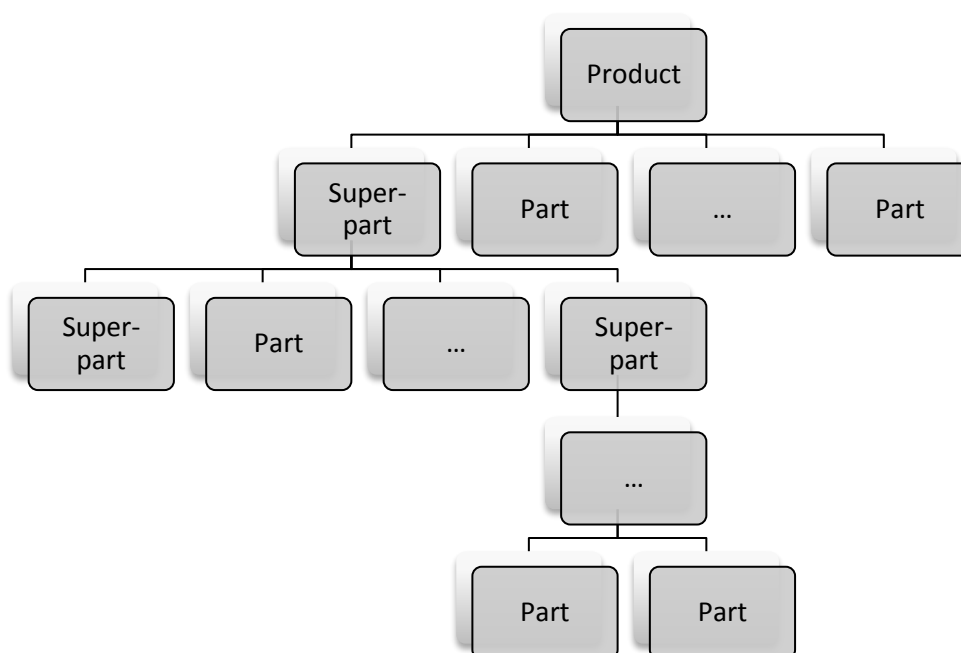


Figure 15 : Graphe hiérarchique (Dong, Zhang, Tong, & Dong, 2006).

1.3.2 Représentation des séquences de désassemblage

Une séquence de désassemblage peut être représentée par une liste ordonnée d'actions. Par conséquent cela peut devenir très lourd de représenter l'ensemble de toutes les séquences de désassemblage par un ensemble de listes, chacune correspondant à une séquence. Comme plusieurs séquences partagent des sous-ensembles communs, un certain nombre de représentations tente de rendre cet ensemble de séquences plus compact.

La représentation par *états de l'assemblage* est une représentation de l'enchaînement des opérations de désassemblage où un seul graphe de désassemblage rassemble tous les états dans lequel le produit peut se trouver (les nœuds de ce graphe correspondent aux états de l'assemblage). Ce graphe est construit en exploitant l'ensemble des toutes les liaisons pouvant être rompus à différents stades. Dans la théorie des graphes, ces ruptures sont appelées des coupes (*cut-sets*) du graphe des liaisons. L'inconvénient de cette méthode est que le nombre de nœuds devient trop important lorsque le système devient complexe (nombre de composants élevé). L'effort de modélisation est ainsi plus important par rapport aux autres méthodes. Cette approche est utilisée car elle permet de mettre en œuvre des méthodes d'optimisation plus efficaces. Ce diagramme a évolué vers le graphe **AND/OR**.

Les **graphes AND/OR** permettent de représenter l'enchaînement logique des opérations de désassemblage avec un nombre important de nœuds. Utilisés dans les domaines de l'intelligence artificielle et en robotique, l'application des graphes AND/OR aux problématiques de désassemblage est présentée dans (Homem de Mello & Sanderson, 1990). Dans ce type de modélisation, les nœuds représentent les sous-ensembles réalisables. Chaque arc du graphe représente une opération de désassemblage. Ce sont en fait des hyper-arcs constitués de deux arcs « simples » connectés qui vont d'un sous-ensemble parent vers ses composants traduisant une relation de types « AND » entre ces éléments. Lorsque plusieurs hyper-acs partent d'un même nœud, on a une relation de type « OR » entre les sous-ensembles et les composants associés à ces nœuds. La formalisation du processus de désassemblage sous cette forme permet notamment l'utilisation des méthodes d'optimisation sous forme de programmation mathématique.

Les **arbres de désassemblage** sont utilisés la plupart du temps pour représenter la séquence optimale de désassemblage retenue avec, éventuellement, quelques séquences alternatives pour faire face aux aléas du désassemblage. Les nœuds du graphe correspondent aux produits et les arcs représentent les opérations de désassemblage. D'autres auteurs ne prennent en compte sur l'arborescence que les composants finaux, les intersections d'arc indiquant les sous-ensembles intermédiaires. Des informations complémentaires sont alors associées aux arcs pour décrire plus en détail les opérations en définissant le mode de désassemblage, les ressources utilisées et le temps de l'opération.

Les **réseaux de Pétri** (RdP) sont aussi couramment utilisés pour représenter les processus de désassemblage. Les Réseaux de Pétri possèdent les mêmes fonctionnalités et avantages que les graphes AND/OR. Le process est en effet décrit par RdP à l'aide de places, de transitions et d'arcs correspondant, dans les graphes AND/OR, respectivement aux nœuds, aux hyper-arcs et aux arcs. L'utilisation des RdP présente plusieurs avantages :

- ils permettent de visualiser le comportement dynamique du process à l'aide des jetons ;
- ils fournissent une interface graphique conviviale à l'aide de méthodes et outils pour l'analyse hiérarchisée des systèmes ;
- ils permettent de représenter sur un même modèle l'enchaînement logique des opérations et des ressources nécessaires à leur réalisation ;
- ils facilitent la génération de programmes linéaires pour optimiser le séquençement et la profondeur de désassemblage.

1.3.3 Génération et optimisation des séquences de désassemblage

1.3.3.1 Les méthodes exactes

Les méthodes exactes sont utilisées pour résoudre les problèmes de génération des séquences de désassemblage de petite taille et pour lesquelles le nombre de combinaisons est suffisamment faible pour pouvoir explorer l'espace de solutions dans un temps raisonnable. Dans cette catégorie entrent les méthodes de recherche dans les graphes (graph search), les méthodes par séparation et évaluation (connue sous le nom *de branch and bound*), les méthodes par propagation des vagues...

1.3.3.1.1 Les méthodes de recherche dans le graphe

Ces approches utilisent comme leurs noms l'indiquent des représentations graphiques. Elles rassemblent différents types de graphes utiles à des problèmes d'assemblage et/ou de désassemblage avec des hypothèses spécifiques (graphe des liaisons, graphe des adjacences). Considéré comme le pionnier dans le domaine de la définition des gammes d'assemblage, Alain Bourjault a proposé une approche de détermination des gammes d'assemblage par la génération de toutes les séquences admissibles à partir de la définition détaillée du produit (Bourjault, 1984). Le produit est modélisé sous la forme d'un graphe des liaisons fonctionnelles.

Les informations fournies par le graphe des liaisons sont généralement traduites en matrices : la matrice des liaisons et la matrice de précédences de désassemblage. L'objectif est de déterminer les bipartitions admissibles du graphe suivant les contraintes « topologiques » et « géométriques » (Lambert & Gupta, 2005). Chaque bipartition (coupe) ou « cut-set » caractérise une opération de désassemblage du produit. Les deux graphes résultants sont ensuite analysés de la même manière. Le processus de partition se poursuit jusqu'à la séparation de tous les composants et chaque étape permet d'identifier les relations de précedence entre les opérations.

Kuo, Zhang et Huang ont proposé une approche basée sur l'analyse de la modularité en utilisant un graphe des liaisons (Figure 16) pour la génération des séquences de désassemblage (Kuo, Zhang, & Huang, 2000). La méthode consiste à obtenir une séquence de désassemblage en transformant le graphe des liaisons en un arbre de désassemblage (Figure 17). Cette transformation se fait en plusieurs étapes : la procédure de recherche cut-vertex est utilisée pour diviser le graphe en des sous-graphes représentant des sous-ensembles modulaires. Ils obtiennent ensuite une matrice de précédence de désassemblage. L'analyse de cette matrice permet d'obtenir l'arbre de désassemblage. Ainsi, ce dernier représente l'ordre selon lequel les différents éléments seront désassemblés. Le principal avantage de cette méthode est la réduction du temps de recherche des solutions de séquences de désassemblage et de trouver le scénario de fin de vie le plus rentable pour les produits électromécaniques en examinant toutes les séquences de désassemblage possibles.

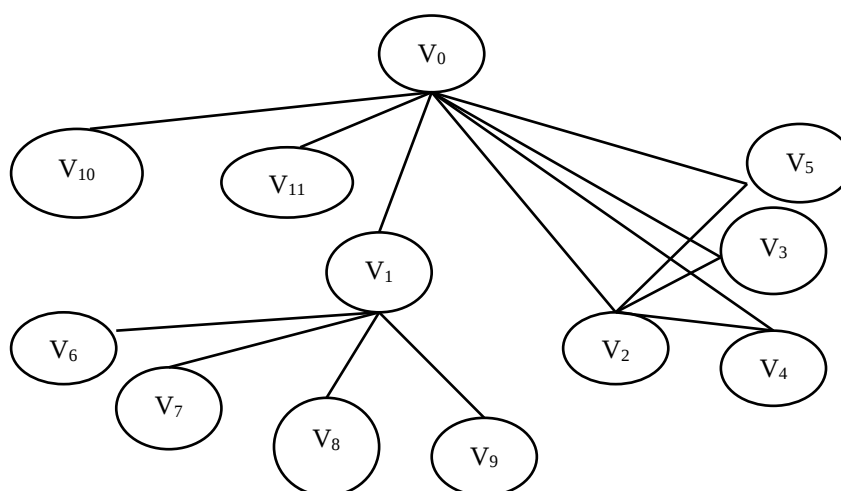


Figure 16 : Exemple de Graphe composant-liaison pour le désassemblage partiel d'un PC (Kuo, Zhang, & Huang, 2000).

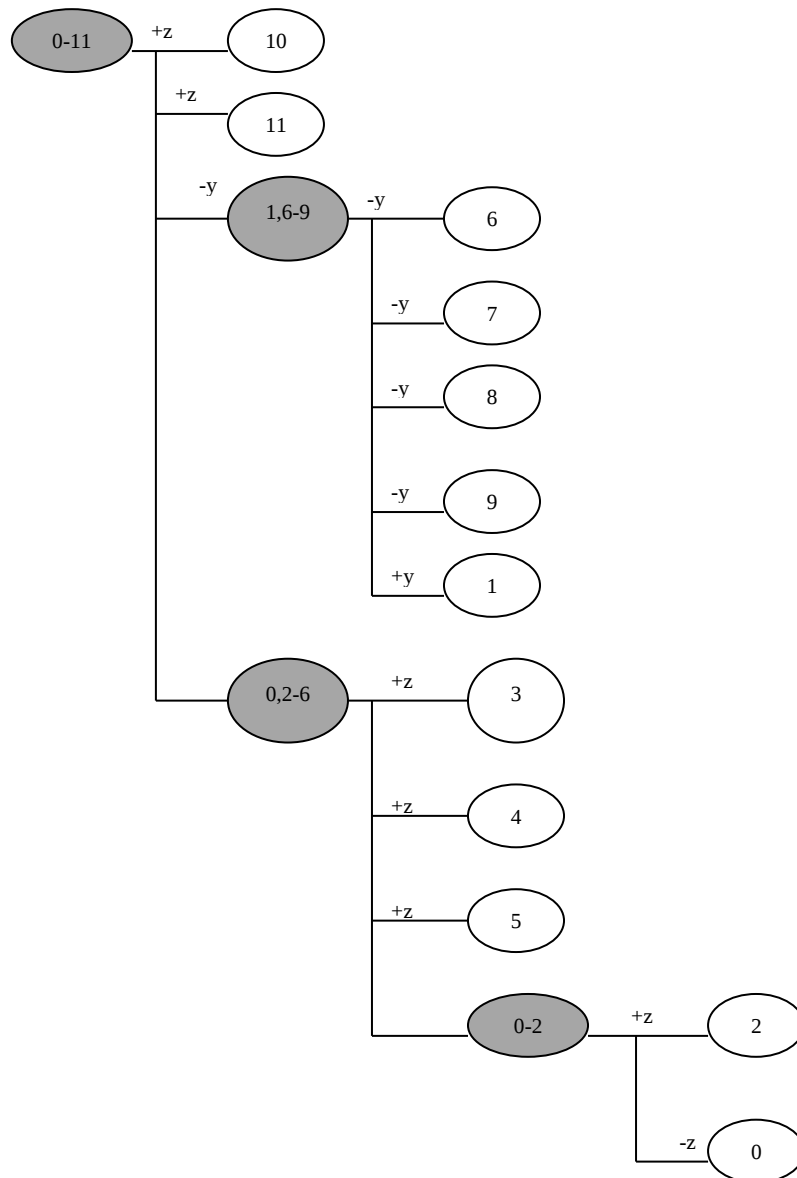


Figure 17 : Arbre de désassemblage complet (Kuo, Zhang, & Huang, 2000).

Pour la génération des séquences de désassemblage, Lee et Kumara ont proposé une approche basée sur les relations de précedence entre les composants (Lee & Kumana, 1992). En utilisant deux matrices : la « *matrice d'interférence* » et la « *table (matrice) de balayage* », ils introduisent les notions de degré de liberté et de degré d'interférence. La matrice d'interférence représente les degrés d'interférence de chaque composant du produit. Dans l'exemple de la Figure 18, les trois degrés d'interférence induits par le composant (b) (considéré comme fixe) pour l'extraction du composant (a) (considéré comme mobile) sont

dans les directions : vers le haut (H), vers la droite (D) et vers le bas (B) (cellule grisée dans le (Tableau 5).

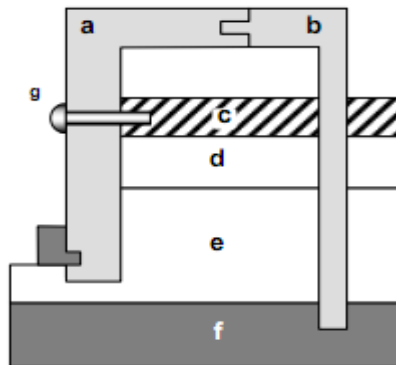


Figure 18 : Exemple de produit X pour l'étude de la méthode de Lee et Kumara (Lee & Kumana, 1992).

Tableau 5 : Matrice d'interférence de produit X (Lee & Kumana, 1992).

Composants	a	b	c	d	e	f	g	h
a		GHB	GH	GH	GHD	H	HDB	HDB
b	HDB		GHD	GHD	GHD	D	D	D
c	DB	GDB		H	H	H	HDB	
d	DB	GDB	B		H	H	B	
e	GDB	GDB	B	B		H	B	DB
f	B	GDB	B	B	B		B	B
g	GHB	G	GHB	H	H	H		H
h	GHB	G			GH	H	B	
B : Bas ; G : Gauche ; D : Droite ; H : Haut.								

La matrice de balayage est une réécriture de la matrice d'interférence dans le sens où elle indique l'ensemble des composants interférant sur le désassemblage d'un autre composant et pour une direction de désassemblage donnée (Tableau 6). Cette table de balayage sert de point de départ au processus de génération des séquences de désassemblage.

Tableau 6 : Matrice de balayage résiduelle du produit X (Lee & Kumana, 1992).

	a	b	c	d	e	f	g	h
H	bgh	a	abg	abcg	abcdgh	abcdegh	ac	ag
B	bcdefgh	acdef	defg	cf	f	.	acdefh	aef
G	egh	acdefgh	abg	ab	abh	b	.	.
D	bcde	cdef	b	b	ab	b	abc	abe

Les composants ayant un • désignent le composant directement désassemblé. La matrice est alors modifiée en effaçant les composants désassemblés. Des nouveaux composants à désassembler apparaissent dans la table résiduelle et le processus est répété. Lorsqu'il n'y a plus aucun composant désassemblable, la recherche s'arrête. La méthode a été proposée pour trois catégories de désassemblage :

- le désassemblage total : toutes les pièces dans le produit sont désassemblées ;
- le désassemblage ciblé : une pièce est désassemblée pour le but de remplacement ou de maintenance ;
- le désassemblage en groupe : un groupe de composants est désassemblé pour la maintenance ou l'entretien.

Le principal avantage de cette méthode est la réduction automatique des contraintes géométriques grâce aux notions de degrés de liberté et de degrés d'interférences. Cependant la méthode reste limitée car elle ne permet de traiter que les processus de désassemblage linéaire où la modélisation préalable des interférences est nécessaire.

Jabbour et Mascle (Jabbour & Mascle, 1998) proposent une méthode de détermination des gammes d'assemblage en introduisant des caractéristiques géométriques, technologiques et fonctionnelles associées aux composants et définies pas à pas dans le processus d'assemblage d'un produit. La méthode de Jabbour et Mascle trouve son originalité dans la considération des différents états du produit au cours de son assemblage.

Moore et son équipe (Moore, Gungor, & Gupta, 2001) ont développé une méthode de génération des séquences de désassemblage basée sur des relations de précédence complexes AND/OR et XOR entre les composants du produit considéré. Les relations de précédence sont regroupées en une matrice, dite matrice de précédence : $[b_{ij}]_{i,j=1,\dots,k}$ où k représente le nombre de composants dont est constitué le produit considéré. Les éléments de la matrice sont définis comme suit :

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ si le composant } i \text{ "ET précède" le composant } j \\ d, \text{ si le composant } i \text{ "OU précède" le composant } j \\ -1, \text{ si le composant } i \text{ "XOR précède" le composant } j \\ 0, \text{ sinon} \end{cases} \quad (4)$$

où d représente une direction parmi les directions de désassemblage considérées ($-x$, $+x$, $-y$, $+y$). À partir de cette matrice, Moore propose un algorithme permettant de générer automatiquement les séquences de désassemblage tout en faisant un certain nombre de remarques sur les relations de précédence et en appliquant un ensemble de règles de construction permettant d'obtenir un réseau de Pétri de désassemblage complet. Néanmoins la méthode est limitée, car uniquement deux directions de translation sont considérées sans mouvements de rotation possibles.

Torres, Puente et Aracil (Torres, Puente, & Aracil, 2003) ont proposé une méthode pour représenter les *relations entre les composants* et/ou entre les assemblages des produits. Ensuite, un algorithme est établi pour générer une séquence de désassemblage non destructif et partiel du produit. L'algorithme est basé sur les *relations entre les composants* et/ou entre les assemblages des produits. Cependant, la méthode reste limitée, car elle ne permet de traiter que des processus de désassemblage très restreints (c'est-à-dire qu'elle n'est pas valable pour les autres types de désassemblage comme séquentiel par exemple).

1.3.3.1.2 La méthode de Branch and Bound

L'algorithme de *branch and bound* (procédure par séparation et évaluation), est un des principaux outils de résolution des problèmes d'optimisation combinatoire de la classe *NP-difficiles*. La méthode permet l'exploration de l'ensemble des solutions admissibles par la construction d'une structure arborescente du problème qui se décompose en sous problèmes. Cette arborescence est explorée de façon à éviter les branches ne contenant pas des solutions réalisables et les branches n'amenant pas à des solutions meilleures que la solution courante.

Les travaux de recherche de Subramani ont été les premiers à utiliser une approche « *branch and bound* » pour la génération des séquences de désassemblage. Le coût opératoire de désassemblage est utilisé comme critère d'évaluation (Subramani & Dewhurst, 1991).

Quant à Gungor et Gupta, ils ont proposé une méthode basée sur l'algorithme de « *branch et bound* » pour résoudre le problème de génération d'une séquence de désassemblage proche de l'optimale pour un produit complexe (Gungor & Gupta, 2001). Leur méthode consiste à réduire la dimension d'un arbre de désassemblage obtenu à partir d'une matrice de précédence de désassemblage. La matrice de désassemblage est construite sur la base des

contraintes géométriques. Ils utilisent deux variables, notées w et v , permettant de contrôler la procédure de branching et de bounding respectivement et ainsi simplifier l'arbre de désassemblage. Ils proposent une fonction objective fu , pour la sélection de la séquence de désassemblage proche de l'optimal, qui incorpore quatre facteurs déterministes qui sont interprétés comme des pénalités basées sur le temps de changement d'outil, de direction de désassemblage, enlèvement des substances dangereuses et composants de valeurs.

Presque dix ans plus tard, bénéficiant des travaux réalisés par Gungor et Gupta (Gungor & Gupta, 2001) un algorithme branch et bound modifié est proposé par Zhang et Zhang (Zhang & Zhang, 2010). Cet algorithme est utilisé pour résoudre le problème de génération de séquence de désassemblage (cas de désassemblage non destructif complet coopérative (parallèle)). Ils construisent dans un premier temps un graphe hybride de désassemblage à partir du modèle 3D CAD du produit. Le graphe est traduit sous forme de matrice de contacts et de précédences de désassemblage. Ensuite, les auteurs construisent un arbre hybride de désassemblage parallèle qui représente les séquences de désassemblage en utilisant l'algorithme branch and bound modifié. Pour contrôler la dimension de l'arbre de désassemblage, ils définissent deux variables « $para$ = distance du parallélisme » et « w = nombre de branches ».

$$para = |\max(t_1, t_2, \dots, t_i) - \min(t_1, t_2, \dots, t_i)|_{i \in [1, k]} \quad (5)$$

Pour évaluer les séquences de désassemblage, ils proposent une fonction objective fu qui repose sur le temps de désassemblage.

$$fu = \min \sum_1^k \max((t_1, t_2, \dots, t_i)) \quad (6)$$

où t_i représente le temps de désassemblage associé au nœud i du graphe de désassemblage tandis que k est représentatif du nombre des opérateurs et m étant la longueur de la séquence de désassemblage.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de traiter les processus de désassemblage parallèle (deux composants sont désassemblés en même temps) ainsi réduisant le temps total de désassemblage. Néanmoins cette méthode est limitée uniquement pour le désassemblage de type parallèle non destructif complet et ne peut pas être utilisée lors de la planification des autres types de désassemblage. Le désassemblage partiel étant préféré au désassemblage

total, Zhang et Zhang (Zhang & Zhang, 2010) ne considère pas le temps de changement d'outil et de direction dans le calcul du temps opératoire total de désassemblage.

1.3.3.1.3 La méthode de propagation des vagues

L'algorithme appelé « Propagation des vagues de désassemblage » fonctionne sur un principe inspiré de la propagation des ondes dans le sol permettant de trouver un objet. Un algorithme basé sur le principe de « Propagation des vagues » dédié pour le désassemblage sélectif qui se prête aux activités de maintenance, de recyclage et de réutilisation a été proposé par Srinivasan et Gadh (Srinivasan & Gadh, 1998). L'approche permet d'obtenir une séquence avec un minimum de composants à extraire pour le désassemblage d'un composant cible.

Cet algorithme fonctionne avec quatre caractéristiques :

- Les contacts : La relation de contact entre deux composants C_i et C_j sont des surfaces, elles limitent les degrés de liberté pour les mouvements relatifs du composant C_i par rapport au composant C_j . Les auteurs définissent et rassemblent dans un ensemble appelé « Mating adjacent of C_i : MA_i » tous les composants qui sont en contact avec le composant C_i .
- L'accessibilité de C_i par rapport à C_j appartenant à l'ensemble MA_i (notée AC_i^j) est l'ensemble des directions le long de laquelle C_i peut se déplacer par rapport à C_j et est déterminée pour la zone de contact. Ils représentent l'ensemble des directions avec lequel un composant C_i peut être désassemblé par rapport à un composant C_j par une sphère gaussienne.
- La dés-assemblabilité du composant C_i est une variable avec une valeur binaire qui indique si le composant C_i est désassemblable.
- L'influence de désassemblage permet d'analyser l'influence de retrait d'un composant C_j appartenant à l'ensemble MA_i sur le désassemblage du composant C_i .

La constitution des vagues est basée sur le paramètre appelé « influence de désassemblage » qui indique si un composant n'est pas accessible mais le devient si le composant précédent est démonté. À partir du composant/ sous ensemble cible, une première onde est constituée de ses prédécesseurs immédiats (ceux qui devront être désassemblés avant le composant cible). La deuxième vague est constituée des prédécesseurs des composants de la première vague, et ainsi de suite.

Ainsi, l'approche définit les vagues de désassemblage pour structurer de façon topologique les composants qui influent sur l'ordre de désassemblage. Connaissant les vagues, il est possible de déterminer les séquences de désassemblage réalisables pour le composant cible. La complexité de l'algorithme varie selon que l'on est en présence de '1-dependent' ou 'd-dependent' composants : chaque composant est-il en contact avec au plus un composant par surface de contact ('1-dependent component'), ou plusieurs composants par surface de contact ('d-dependent component')? Pour chacun des cas, la complexité est évaluée en moyenne à $O(n)$ et $O(n^2)$ respectivement, avec n le nombre de composants dans l'assemblage.

Une approche pour le désassemblage sélectif de plusieurs composants dans un assemblage a été proposée par Srivivivasan et Gadh (Srinivasan & Gadh, 2000). Il s'agit de générer automatiquement une séquence de désassemblage d'un ensemble C de composants en minimisant le nombre d'opérations de retrait. Les auteurs montrent que l'élaboration de séquences de désassemblage de composants disjointes n'apporte pas une solution optimale pour le retrait de ces pièces en agrégeant les séquences obtenues individuellement. La méthode comporte désormais deux types de vagues, de types α et β . La création de ces deux types de vagues permet d'apporter conjointement à l'algorithme les séquences individuelles de retrait des composants cibles, ainsi que la séquence commune pour le retrait de l'ensemble C des composants. Globalement, l'élaboration d'une séquence de désassemblage optimale pour le retrait de l'ensemble C des composants, repose sur l'analyse de l'intersection des vagues des « Removal Influence Graph » des composants (une intersection est identifiée lorsque deux composants nécessitent au même instant t le retrait d'un même composant pour être accessible).

Deux ans plus tard, Srivivivasan et Gadh (Srinivasan & Gadh, 2002) ont abordé le désassemblage ciblé d'un composant en évaluant ses contraintes géométriques. Les deux types de contraintes considérées sont :

- les contraintes spatiales (interaction spatiale 3D entre les composants) incluant les contraintes qui résultent des contacts entre les composants ;
- les contraintes établies par l'utilisateur (la création d'un sous-assemblage de composants, de directions de désassemblage interdites et autres restrictions).

Il s'agit d'une méthode améliorée de la vague qui ne prend plus la forme d'une vague. L'objectif est de déterminer une séquence de désassemblage optimale d'un composant cible en privilégiant des retraits simultanés plutôt que séquentiels de composants et de minimiser les retraits simultanés. À la différence de la méthode de la « wave propagation » qui se base sur une analyse des contacts géométriques, les interférences globales entre les pièces d'un assemblage sont désormais prises en compte.

La méthode a ses limites, car les vagues de désassemblage utilisent une modélisation de l'accessibilité des composants à l'aide de mobilités réduites à des mouvements de translation uniquement, en utilisant l'intersection des directions de translation rattachées à chaque face pour valider ou non localement une opération de désassemblage. Notons que la complexité algorithmique du désassemblage sélectif est exponentielle en fonction du nombre de composants simultanément démontés d'un produit. A notre connaissance, aucune information technologique n'est utilisée pour réduire cette combinatoire.

1.3.3.2 Les méthodes méta heuristiques

Les approches méta heuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum non global, par échantillonnage d'une fonction objectif. Parmi les approches méta heuristiques utilisées dans la recherche d'une séquence de désassemblage proche de l'optimale, on distingue les méthodes basées sur :

- les algorithmes génétiques (Genetic Algorithms) ;
- les colonies de fourmis (Ant Colony) ;
- le recuit simulé (Simulated Annealing) ;
-

1.3.3.2.1 Les méthodes basées sur l'Algorithme Génétique

Les méthodes basées sur *l'Algorithme Génétique* consistent à générer aléatoirement une population initiale. Cette population correspond à un ensemble de nœuds, chaque nœud correspond à un chromosome. Chaque chromosome est représenté par une combinaison de nombres, alphabets et/ou d'autres caractères codés comme une chaîne de caractères (c'est le code génétique du nœud en question). Les individus de la population sont ensuite évalués sur la base d'une fonction d'adaptation. La population évolue de la génération k à la génération

$k+1$ à l'aide de trois opérateurs : opérateur de sélection, opérateur de croisement, opérateur de mutation (Figure 19).

Lors de l'opération de croisement, deux chromosomes parents s'échangent des parties de leurs chaînes, pour donner des nouveaux chromosomes. La probabilité de croisement varie entre 0 et 1. L'opération de mutation assure la diversification du voisinage. Lors de cette opération, de façon aléatoire, un gène peut, au sein d'un chromosome, être substitué à un autre. Le taux de mutation lors des changements de population est généralement compris entre 0.001 et 0.01.

Nous exposerons, ci-dessous, les divers travaux de recherche, à notre connaissance, dans ce domaine.

Seo, Park et Jang ont proposé une approche basée sur l'algorithme génétique pour la recherche d'une séquence de désassemblage optimale (Seo, Park, & Jang, 2001). Pour l'évaluation des séquences de désassemblage, ils considèrent des critères économiques et environnementaux.

Dans la méthode proposée par Kongar et Gupta (Kongar & Gupta, 2001) pour la planification des séquences de désassemblage, basée sur l'algorithme génétique, le chromosome est composé de trois parties (gènes) de longueur égale :

- la séquence de désassemblage des composants ;
- la direction de désassemblage (+x, -x, +y, -y, +z, -z) ;
- la méthode de désassemblage (destructif/non destructif).

Cette méthode de codage des composants est aussi utilisée plus tard par Kongar et Gupta (Kongar & Gupta, 2006). Une petite différence par rapport à la méthode Kongar et Gupta (Kongar & Gupta, 2001) concerne la représentation du chromosome. Ce dernier est constitué de cinq parties de longueur égale. Le codage du chromosome est constitué comme dans le cas de la méthode de Kongar et Gupta (Kongar & Gupta, 2001), mais complété par le type de demande (un composant peut ou ne peut être demandé). Dans le cas où il n'est pas demandé, il est représenté par 0. S'il est demandé, trois possibilités existent : demande pour la réutilisation dans ce cas il est représenté par 1, demande pour le recyclage dans ce cas il est représenté par 2 et le type de matière pour chaque composant (plastic, steel, aluminium). La

population initiale est générée de telle sorte que toutes les contraintes de précédence ainsi que les autres contraintes imposées par la structure du produit soient satisfaites.

Afin d'évaluer une séquence de désassemblage, plusieurs critères sont mis en évidence permettant ainsi de formuler la fonction objectif :

- le temps opératoire de désassemblage pour chaque composant, il est exprimé en secondes;
- pénalité pour chaque changement de direction pour chaque composant j de la séquence de désassemblage; 0 si aucun changement de direction n'est effectué, 1 si un changement de 90° est effectué et 2 s'il s'agit de 180° ;
- pénalité pour le changement de méthode de désassemblage : 0 si la méthode ne change pas et 1 si la méthode change.

Giudice et Fargione présentent aussi une méthode basée sur les algorithmes génétiques pour la génération de la séquence de désassemblage proche de l'optimale (Giudice & Fargione, 2007). Ils développent deux algorithmes différents : l'un permettant d'obtenir la séquence de désassemblage optimale des produits pour la maintenance; l'autre pour la récupération : ils cherchent pour la fin de vie du produit à le désassembler complètement ou partiellement en fonction des scénarios de fin de vie (réutilisation, remanufacturing,...). Ces deux algorithmes très classiques dans leur déroulement présentent des résultats utilisant comme critère de comparaison le coût et le temps de désassemblage. Leur approche reste limitée car elle ne considère que le désassemblage sélectif et partiel.

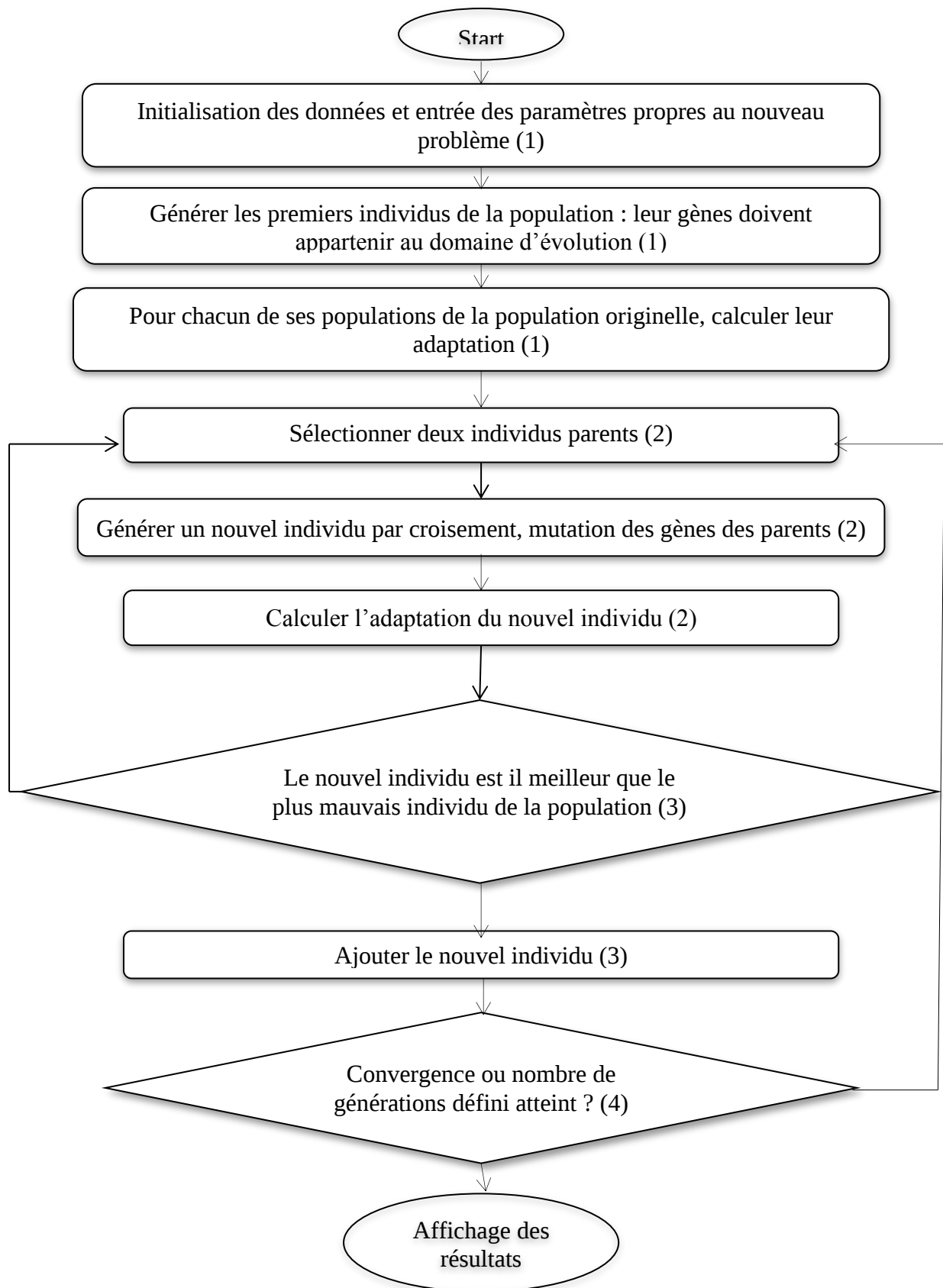


Figure 19 : Exemple d'Algorithme Génétique-Logigramme.

Tseng, Kao et Huang ont proposé une méthode intégrée permettant d'obtenir tant une séquence d'assemblage qu'une séquence de désassemblage en utilisant les algorithmes génétiques (Tseng, Kao, & Huang, 2009). Pour cela, ils établissent tout d'abord un graphe de précédence d'assemblage et un graphe de précédence de désassemblage. Ces deux graphes sont ensuite transformés en matrices de précédence respectivement d'assemblage et de désassemblage. Ensuite une méthode, à deux boucles, basée sur les algorithmes génétiques est utilisée pour générer et évaluer les séquences d'assemblage et de désassemblage. La boucle externe de l'algorithme se charge de la génération de la séquence d'assemblage, tandis que la boucle interne en utilisant la séquence d'assemblage lue à l'envers se charge de générer la séquence de désassemblage. Ainsi, des critères (coût opératoire, d'accessibilité, d'instabilité, changement d'outil) sont mis en évidence pour formuler les fonctions objectives afin d'évaluer les séquences d'assemblage et de désassemblage. Les fonctions objectives optimisent les coûts d'assemblage et de désassemblage. À notre connaissance ce travail est l'un des rares proposant à la fois une approche relevant de la planification des séquences d'assemblage et de désassemblage.

1.3.3.2.2 Les méthodes basées sur l'Algorithme de Colonies de Fourmis

Les méthodes basées sur les algorithmes colonies de fourmis sont aussi utilisées pour résoudre les problèmes combinatoires liés à la génération des séquences de désassemblage. L'algorithme de fourmi ou méthode de colonisation est un algorithme d'optimisation inspiré du comportement social des fourmis. Ces dernières malgré leur intelligence pour le moins limitée savent trouver collectivement le chemin le plus court menant à une source de nourriture : le chemin le plus emprunté est toujours le plus court.

Dans (Xue, Qian, & Zhang, 2010), les auteurs proposent un algorithme d'optimisation « ant colony » pour la génération de séquences de désassemblage. Ils établissent une matrice d'interférence de désassemblage qui exprime les relations de précédence entre les composants d'un assemblage mécanique. Basée sur cette matrice, un algorithme ACO- Ant Colony Optimisation est proposé permettant d'obtenir les séquences de désassemblage optimales. Le processus de construction de solutions par les fourmis est complété par la sélection possible étape par étape à partir de nœuds du graphe de gauche à droite. Chaque étape de construction d'une solution est une décision probabiliste sur la façon d'étendre la solution partielle courante. A chacune de ces étapes de la construction, les composants de la

solution sont en concurrence les uns avec les autres. De ce point de vue, la dynamique d'un algorithme ACO peut être décrite comme la concurrence entre les différents composants de la solution. Cette concurrence doit être bien entendue aussi équitable que possible. Les critères qui sont mis en évidence pour formuler la fonction objective afin d'évaluer la séquence de désassemblage sont : pénalité pour chaque changement d'orientation de direction et d'outils de désassemblage.

Failli et Dini (Failli & Dini, 2001) ont appliqué l'algorithme des fourmis au problème de génération de séquences de désassemblage. Wang dans (Wang, Liu, Li, & Zhong, 2003) a implémenté ce principe pour l'appliquer à des exemples de la littérature et a pu déterminer des séquences de désassemblage optimales.

Tripathi, Agrawal, Pandey, Shankar et Tiwari proposent une évolution de cet algorithme en utilisant entre chaque pas de l'algorithme, un modèle probabiliste à même de faciliter le choix des chemins les plus susceptibles d'être la séquence de désassemblage idéale (Tripathi, Agrawal, Pandey, Shankar, & Tiwari, 2009). Ainsi, ce modèle donne des résultats plus rapides qu'un algorithme de colonie de fourmis classique et aussi précis que ceux obtenus par un algorithme génétique.

Il faut noter que ces techniques nécessitent un travail d'ajustement des paramètres de l'algorithme souvent long et aux résultats aléatoires. Ainsi, on constate que les colonies de fourmis sont utilisées pour résoudre des problèmes combinatoires liés à l'allocation de ressources à la séquence de désassemblage (équilibrage de la ligne de désassemblage).

1.4 Bilan et positionnement

La phase de génération des séquences de désassemblage a engendré également des nombreux travaux de recherche au cours de ces deux dernières décennies. L'échantillon ci-dessus de ce qui se fait en termes de génération des séquences de désassemblage indique clairement que la totalité des méthodes repose principalement sur une compréhension du produit à travers ses composants et les relations impliquées comme données d'entrée (modèles CAO 3D).

Les travaux présentés montrent que la phase de génération et d'optimisation des séquences de désassemblage est d'autant plus robuste que les informations sur le produit sont riches. Les

modèles les plus simples sont ceux qui font appel à un modèle basé uniquement sur les relations de contact.

Dans la mesure où l'objectif est de déterminer une solution optimale, les chercheurs ont tenté d'utiliser divers algorithmes méta heuristiques telles que les algorithmes génétiques, colonies de fourmis,... pour générer les séquences de désassemblage. Différents critères, tels que : coût opératoire de désassemblage, temps opératoire de désassemblage sont considérés pour évaluer les séquences de désassemblage.

Avant évaluation, il est important de réduire l'ensemble des solutions admissibles. Étant donné le gain en termes de temps de traitement procuré par les approches méta heuristiques, nous constatons une évolution des méthodes exactes vers ces méthodes méta heuristiques.

Bien que, ces dernières années, les chercheurs aient tenté d'utiliser divers algorithmes pour générer et optimiser les séquences de désassemblage, ces approches souffrent des défauts suivants :

- elles sont spécifiques à un problème, les algorithmes sont souvent spécialement créés pour l'application à un type de problème particulier créé par l'auteur ou à un schéma de représentation ;
- les critères d'optimisation et les contraintes sont limitées souvent au coût et bénéfice et il n'est pas facile de considérer d'autres contraintes et leurs effets sur l'espace des solutions ;
- elles ont besoin d'une bonne solution de départ ou estimation initiale ;
- elles sont des techniques autonomes qui ne peuvent pas facilement être incorporés dans plusieurs cadres généraux d'ingénierie de conception telles que la CAO - ces méthodes sont essentielles dans la conception de désassemblage (DFD), à la phase de conception conceptuel. A ce stade, un concepteur veut, un système rapide et facile qui peut être utilisé aux côtés des outils existants ;

L'inconvénient le plus commun des travaux sur la génération et l'optimisation des séquences de désassemblage, dont une partie a été présentée, est que l'état du produit, en termes de valeurs en fin de vie (EOF) d'un assemblage, sous-ensembles et composants et le coût des opérations de désassemblage, sont supposés connus a priori.

Chapitre 3. Vers un modèle de produit intégrant le désassemblage

Comme nous l'avons déjà mentionné, concernant le processus de conception modulaire des produits, nous nous intéressons à l'étude en phase de conception préliminaire des meilleures façons de désassembler un produit modulaire manufacturé, en fin de vie, de manière sécuritaire et efficace tout en s'assurant de préserver au mieux la valeur de ses composants et de respecter les normes environnementales.

L'intégration des contraintes de désassemblage dans la conception modulaire des produits manufacturés implique une réflexion sur la représentation des informations de définition de produits et de leurs séquences de désassemblage.

Nous proposons d'identifier d'abord les parties prenantes impliquées dans la conception modulaire orientée désassemblage. Nous utilisons ensuite les règles standards provenant des approches de Design For Disassembly (DFD) afin d'identifier, pour chaque acteur métier, les informations et contraintes qui sont manipulées dans les domaines « produit » et « processus de désassemblage ».

Nous proposons une modélisation de chaque concept indépendamment des autres. Ensuite un modèle global multi-vue mettant en exergue les concepts manipulés et leurs relations dans les domaines du « produit » et du « processus de désassemblage » est proposé afin de pouvoir l'exploiter dans une approche intégrée et proactive.

1.1 Définition des parties prenantes et de leurs rôles

Les différents rôles identifiés afin d'orienter les phases préliminaires de conception modulaire vers les questions de désassemblage et les associer à des parties prenantes formant une équipe multifonctionnelle et multidisciplinaire, sont les suivants :

- l'architecte produit : il a pour objectif de choisir les solutions technologiques en cohérence avec les fonctions techniques et les exigences fonctionnelles issues du cahier des charges, de gérer la structure du produit et ses différentes configurations ainsi que de spécifier le contexte de conception/modélisation pour les concepteurs ;
- le concepteur : il a pour objectif de spécifier et définir la géométrie du produit selon les exigences fonctionnelles ainsi que de prendre en compte les contraintes des métiers situés en aval du processus de développement (dans notre cas les contraintes de l'expert désassemblage) ;
- l'ingénieur process/expert métier de désassemblage : il a pour objectif de définir et valider les informations et connaissances relatives au désassemblage, amenant des spécifications et des contraintes sur les géométries d'interface du produit ; il a pour objectif de formaliser les différentes informations métier, telles que les règles métier ainsi que les paramètres géométriques, mettant en lien les paramètres issus du cahier des charges fonctionnelles (CDCF) et le modèle géométrique. Il doit veiller également à ce que le produit reste démontable/dés-assemblable au fur et à mesure que la conception avance. Il devra donner ses contraintes au concepteur afin que ce dernier les prenne en compte dans son propre référentiel qui est celui de la conception des fonctions de service du produit ;
- l'industrialiseur : il a pour objectif de définir et de planifier la gamme de désassemblage par la définition des séquences de désassemblage, et des ressources humaines et matérielles associées.

On différencie partie prenante et acteur, puisqu'au cours d'un même projet, les acteurs peuvent changer. Cependant les parties prenantes sont requises pour le bon déroulement du projet, elles représentent un point de vue stable tout au long du projet indépendamment des personnes qui exercent les fonctions.

1.2 Identification des points de vues

Nous centrons notre recherche sur l'intégration des contraintes des savoirs du métier de « *désassemblage* » afin de favoriser l'émergence des solutions technologiques et donc la définition de produits modulaires sur la base des spécifications fonctionnelles issues du cahier de charges. À cette fin, les règles standards provenant des approches de DFD pour identifier les informations et contraintes relatives aux points de vue à gérer dans les domaines « *produit* » et « *processus de désassemblage* » sont listées.

Le Tableau 7 énonce quinze règles de DFD impliquant les quatre acteurs métiers identifiés précédemment et permet de définir leurs responsabilités. Les points de vue définis en fonction des rôles, responsabilités et entités manipulées sont réunis dans le Tableau 8.

1.3 Structuration des concepts

Pour décrire le modèle, nous choisissons les conventions d'écriture UML (Unified Modelling Language) via l'outil StarUML où :

- un concept est représenté par une classe (Class) ;
- une classe peut être caractérisée par des attributs (Attribute), de type entier, chaîne, date ... ;
- les classes sont connectées entre elles par des associations représentées par une ligne continue. Les associations possèdent un nom qui les qualifie :
 - dans le cas particulier d'une composition (ou agrégation), l'association est représentée par un losange plein accolé à la classe composite,
 - une association entre classes se caractérise par une multiplicité qui précise le nombre d'instances qui peuvent être liées à une même instance par l'association. La multiplicité « plusieurs » est symbolisée par « 1..* » ou « * ».

Le modèle est destiné à regrouper et à représenter les idées des acteurs ainsi que toutes les informations caractérisant et définissant le produit à concevoir et sa séquence de désassemblage. Ainsi au modèle sont associés, deux domaines, à savoir le domaine du « *Produit* » et celui du « *Processus de désassemblage* ». Ces domaines intègrent des vues spécifiques et conformes aux points de vue, qui sont définis en fonction des rôles, préoccupations et entités métiers manipulées par chacun des acteurs métiers impliqués.

Tableau 7 : Identification des responsabilités des acteurs métiers via les règles de DFD d'après (Dowie T. A., 1995) (Simon, Mc Laren, & Dowie, 1996).

	N o	Règles de DFD	Architecte produit	Concepteur	Expert métier désassemblage	Industriel
Matériau	1	Minimiser le nombre de matériaux différents		X		
	2	Réaliser les parties inséparables dans le même matériau, ou dans des matériaux compatibles		X	X	
	3	Marquer tous les plastiques pour permettre une identification aisée	X	X		
	4	Éliminer les étiquettes incompatibles sur les parties plastiques	X	X		
	5	Marquer clairement les éléments contenant des substances dangereuses ou polluantes et faciliter leurs extractions	X	X		
Architecture produit	6	Minimiser le nombre de sous-ensembles/ composants	X	X		
	7	Faciliter l'accès aux fixations		X		
	8	Rendre la conception la plus modulaire possible		X		
	9	Maximiser les directions d'accessibilité	X	X		X
Fixation	10	Indiquer les instructions permettant un désassemblage non destructif			X	
	11	Minimiser le nombre de fixations	X		X	
	12	Minimiser le nombre de fixations de différents types	X	X	X	
	13	Permettre un démontage facile des fixations	X	X		
	14	Permettre le désassemblage facile de deux parties des matériaux non compatibles	X	X		
	15	Éviter l'utilisation d'adhésif, de colle ou de soudure		X	X	

Tableau 8 : Points de vues des parties prenantes identifiées.

Acteurs métiers	Architecte produit	Concepteur	Expert métier désassemblage	Industrialiseur
Rôle/ objectif	Définir l'architecture du produit	Concevoir et définir la géométrie du produit	Définir et valider les informations et connaissances liées au métier de désassemblage	Définir les gammes de désassemblage
Préoccupations	Comment préparer et délivrer une structure produit aux concepteurs ? Comment gérer les différentes interfaces entre sous-ensembles ?	Comment avoir un produit se prêtant aux besoins des différents métiers et disciplines ?	Comment garantir des conditions pour une technologie d'assemblage ?	Comment définir une séquence de désassemblage optimale ? Comment allouer les stations de désassemblage ?
Entités manipulées/ Concepts	Exigences fonctionnelles Sous ensemble Composant Liaisons Fonctions	Caractéristiques géométriques Sous-ensemble Composant Liaisons physiques	Station Outillage Coût Compétences Expérience	Prévision de la demande Temps opératoire de désassemblage Contraintes de précedence, Séquence de désassemblage Opérations de désassemblage
Méthode	Prendre en compte les exigences fonctionnelles et géométriques et les informations issues de la séquence de désassemblage. Définir une structure produit support à la conception/ modélisation des informations associées au produit.	Modéliser la géométrie en s'appuyant sur les exigences géométriques et les caractéristiques de désassemblage.	Définir les accessibilités pour les opérations. Définir la géométrie d'interface.	Définir les contraintes de désassemblage entre les opérations de désassemblage. Définir une séquence de désassemblage Allouer les stations à la séquence de désassemblage.

Les vues spécifiques au domaine du « *Produit* » sont :

- la vue fonctionnelle ;
- la vue comportementale ;

- la vue structurelle ;
- la vue contextuelle ;
- la vue technologique.

Les vues spécifiques au domaine du Processus de désassemblage sont :

- la vue comportementale ;
- la vue structurelle ;
- la vue technologique ;
- la vue contextuelle.

Chaque vue rassemble des concepts, eux même caractérisés par des attributs, et liés par des associations. Les concepts et leurs attributs sont décrits par une sémantique explicitée en langage naturel.

1.3.1 La vue fonctionnelle Produit

Pour satisfaire un besoin, une ou plusieurs fonctions sont définies. La norme En1325 donne une définition normalisée de la notion de fonction : il s'agit de l'action d'un produit (Artefact) ou de l'un de ses constituants. Trois types de fonctions peuvent être distingués :

- les fonctions de service qui regroupent les *fonctions d'usage* et les *fonctions d'estime*. Elles expriment "ce que fait" le produit pour répondre à un besoin d'utilisateurs. Elles traduisent les rapports du produit avec son environnement. Par exemple, "dépoussiérer un local" est l'une des fonctions d'un aspirateur. Plusieurs fonctions de service peuvent être nécessaires pour satisfaire un même besoin;
- les fonctions techniques : il s'agit des fonctions internes au produit exprimant "*comment le produit fait ce qu'il fait*" ou encore comment font ses composants pour assurer les fonctions de service. Par exemple la fonction "*aspirer l'air à l'aide d'une pompe*" pour un aspirateur. Les fonctions techniques d'un constituant du produit peuvent être vues par le concepteur comme les fonctions de service de ce constituant. Les fonctions de service sont déclinées en fonctions techniques ;
- les fonctions contraintes : elles caractérisent les fonctions issues des phases du cycle de vie du produit excepté la phase d'usage.

Le modèle des fonctions (Figure 20) est composé des classes « *Fonction* », « *Flux* »,

« *FonctionTransfertFlux* », « *Condition* », et « *Contrainte* ».

La classe « *Fonction* » caractérise un des aspects de ce que l'artefact est censé faire. En général, les fonctions d'un artefact répondent suffisamment aux exigences des clients. Elles sont représentées par les attributs suivants :

- un identifiant ;
- un nom ;
- un type précis de famille de fonction (par exemple, de la famille « *établissement de contact électrique* ») ;
- une description, un lien vers l'artefact qui effectue cette fonction.

La classe « *Flux* » représente l'ensemble des flux susceptibles d'être employés pour la réalisation d'une fonction d'un artefact. Elle est représentée par les attributs :

- un identifiant ;
- un nom ;
- un type (par exemple, énergétique, fluide, etc...) ;
- une nature (informationnel, physique, chimique, etc.) ;
- une description.

Chaque flux peut être transformé en un autre, par exemple la conversion d'un flux électrique en un flux de rotation ou la conversion d'un flux liquide en un flux électrique. La classe « *FonctionTransfertFlux* » répond à ces cas de transformation. Elle est une spécialisation de la classe « *Fonction* » et définit la manière d'effectuer la transformation. Elle est représentée par les attributs : le flux d'entrée qui subit la transformation, le flux de sortie qui résulte de cette transformation, le type de transformation (par exemple, de type « *conversion* »).

La classe « *Condition* », quant à elle, représente les conditions d'exécution utilisées pour l'analyse postérieure des fonctions. La classe « *Contrainte* » représente les restrictions liées à ces fonctions. Les classes « *Condition* » et « *Contrainte* » sont représentées par les attributs :

- un identifiant ;
- un nom ;
- un type ;
- une description.

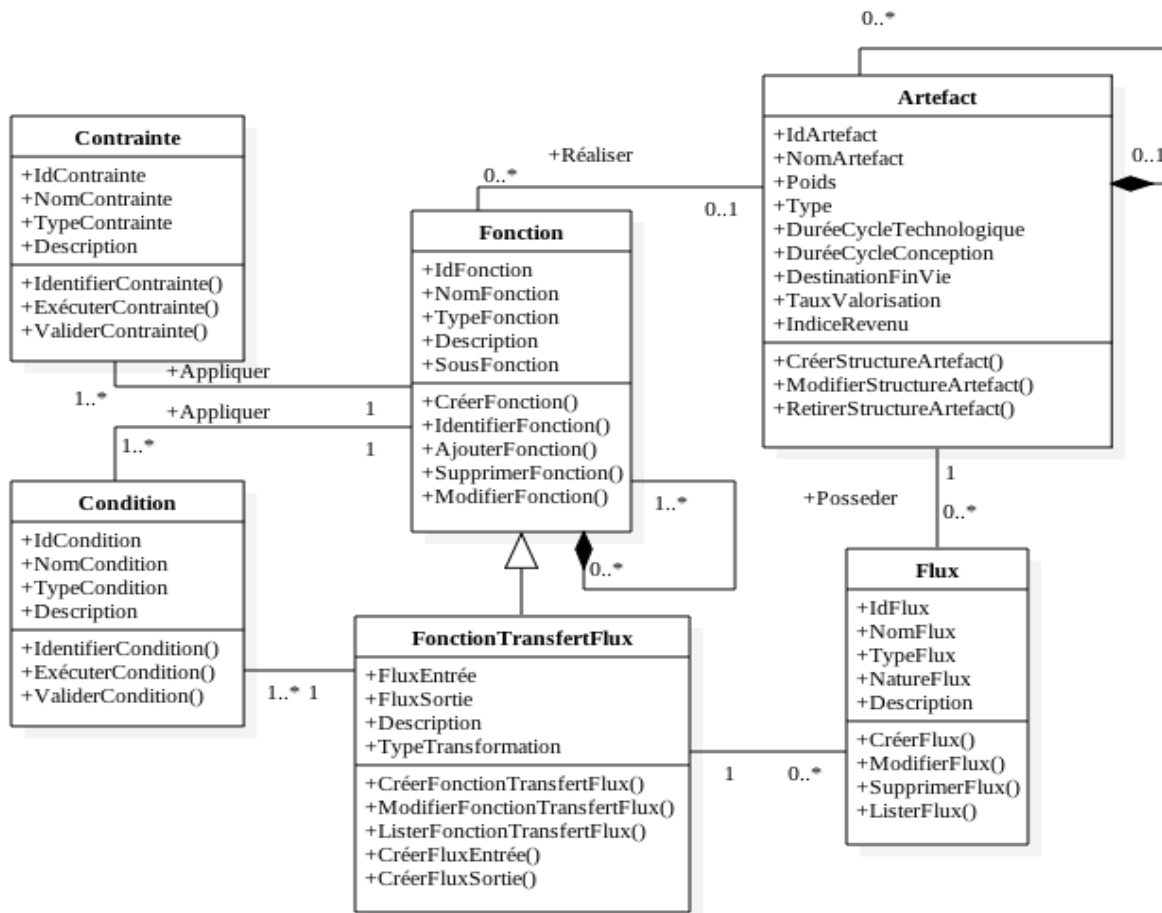


Figure 20 : La vue fonctionnelle Produit.

1.3.2 La vue comportementale Produit

Le modèle considère le produit dans son comportement lié à son cycle de vie, le comportement du produit étant le pont entre sa structure et sa fonction. C'est le résultat d'interaction entre la structure de l'objet et son environnement. Le modèle des comportements (Figure 21) répond à la question « *Comment le produit réalise-t-il les fonctions qui lui sont associées ?* ». Il est constitué de la classe « Comportement » qui a pour attributs :

- un identifiant ;
- un nom ;
- un type ;
- un sous comportement.

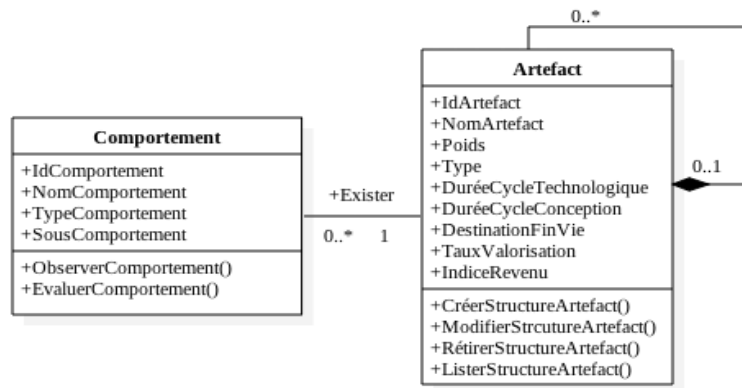


Figure 21 : La vue comportementale Produit.

1.3.3 La vue structurelle Produit

Le modèle de la vue structurelle produit (Figure 22) représente la description physique du produit. Les différentes classes constituant le modèle de structure, résultante de la conception, sont : « *Artefact* », « *Forme* », « *Géométrie* », « *Matériau* ».

La classe « *Artefact* » représente une entité distincte du produit, qui peut être un composant, sous assemblage ou un assemblage. Un artefact peut avoir des caractéristiques de conception, des caractéristiques d'analyse, des caractéristiques de fabrication, des caractéristiques de désassemblage... Les attributs qui caractérisent la classe « *Artefact* » sont :

- un identifiant (sous forme numérique permet de retrouver automatiquement l'artefact, un nom (l'artefact est décrit sous forme littérale) ;
- un poids (décrit par un nombre réel) ;
- un type ;
- une durée de cycle de conception ;
- une durée de cycle technologique ;
- une destination de fin de vie (un ensemble d'options est proposé auxquelles chaque artefact peut être affecté) ;
- un taux de valorisation (il correspond au pourcentage de la masse de l'Artefact valorisé par rapport aux options de valorisation proposées), un indice de revenu (cet indice est donné pour chaque *couple Artefact/ Option de fin de vie* afin de calculer les revenus qui peuvent être générés par la valorisation).

La classe « *Forme* » établit la relation entre le produit et sa représentation. Cette classe permet l'indépendance entre la structure du produit et sa représentation de forme, ce qui permet d'avoir de multiples représentations de la forme pour un même produit. Elle permet également de décrire les informations sur le traitement des surfaces et les tolérances. Les attributs qui caractérisent la classe « *Forme* » sont :

- un identifiant ;
- un nom ;
- un type.

La classe « *Géométrie* » définit les modèles géométriques intégrés dans la définition globale de la forme d'un produit. Les représentations géométriques peuvent être structurées en relation avec d'autres géométries ou d'autres formes. Les attributs qui caractérisent la classe « *Géométrie* » sont :

- un identifiant ;
- un nom ;
- un type.

La classe « *Matériau* » définit les informations sur les matières utilisées pour la réalisation physique des formes. Les attributs qui caractérisent la classe « *Matériau* » sont :

- un identifiant ;
- un nom ;
- un type (un ensemble de matières types est proposé et, pour chaque artefact, un pourcentage indique la composition de l'artefact pour chaque type de matériau).

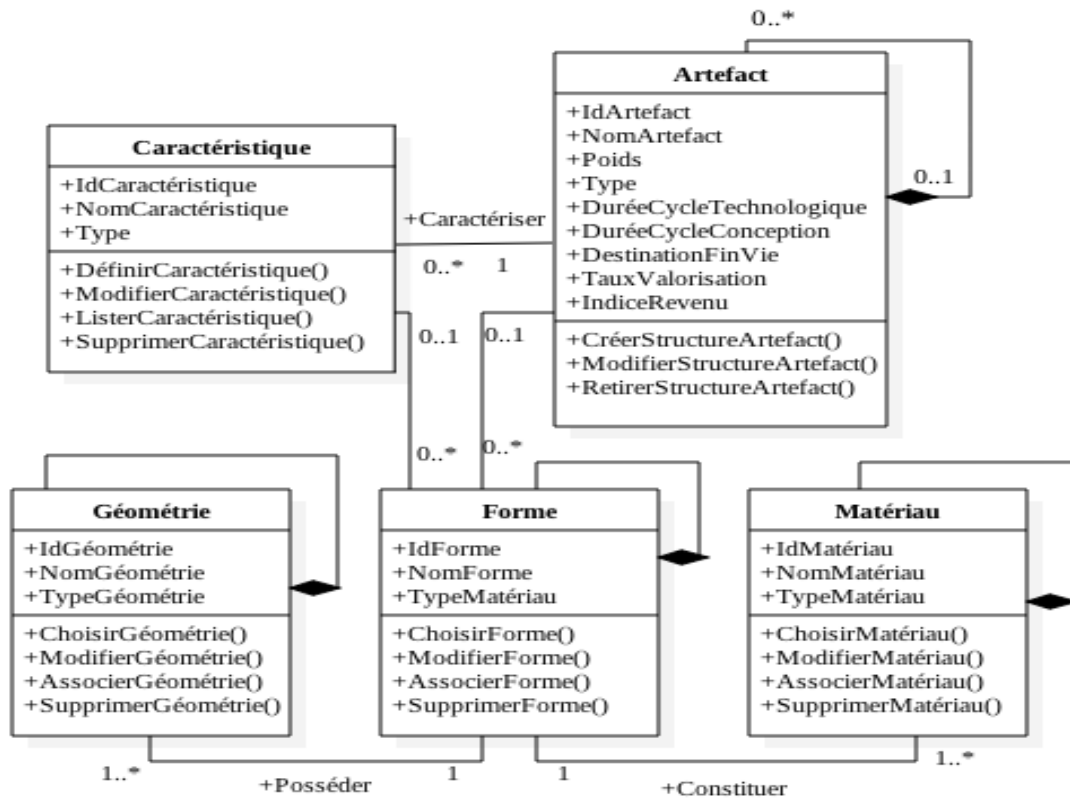


Figure 22 : La vue structurelle Produit.

1.3.4 La vue contextuelle Produit

Le modèle de la vue contextuelle produit (Figure 23) considère la représentation des liaisons entre les différents composants de l'artefact. Une liaison peut être :

- une liaison de *contact* : décrivant une connexion physique entre deux composants de l'artefact. Elle suscite une désunion dès la désolidarisation des composants du couple ;
- une liaison *technologique* : décrivant la technologie employée pour le positionnement et le maintien de la liaison de contact. Elle correspond à la relation entre un composant d'attachement et une pièce ou à une caractérisation d'un contact direct entre deux composants par un ajustement. De plus, cette relation intègre les moyens mis en œuvre pour désassembler, tels que l'extraction du composant. Cette relation permet d'apporter une information supplémentaire sur un contact direct ;
- une liaison *ordonnancement* : apportant un ordre logique de désassemblage ou un ordre de positionnement entre deux composants ayant un contact direct ainsi que deux composants n'ayant aucun contact direct. L'introduction d'une relation de précedence

pour des composants n'ayant aucun contact physique entre eux, est justifiée dans le cadre d'une inclusion amenant une interférence dans le futur désassemblage ;

- une liaison *cinématique* décrivant une relation entre deux composants en contact direct par la restriction des mobilités, et donc de l'espace de degrés de liberté. Une matrice décrivant trois translations et trois rotations possibles dans un repère orthonormé direct est associée à chaque type de liaison cinématique.

Les attributs décrivant une liaison sont :

- un identifiant ;
- un nom ;
- un type de liaison (matérielle, géométrique) ;
- une accessibilité qui décrit la direction suivant un ensemble de situations types (quatre facteurs pour une évaluation poussée de la facilité d'accès : degré de liberté de la liaison, les possibilités angulaires pour avoir prise, l'espace pour soutenir la pièce pendant son retrait et l'angle de retrait), les composants impliqués (ils sont indiqués par leur identifiant).

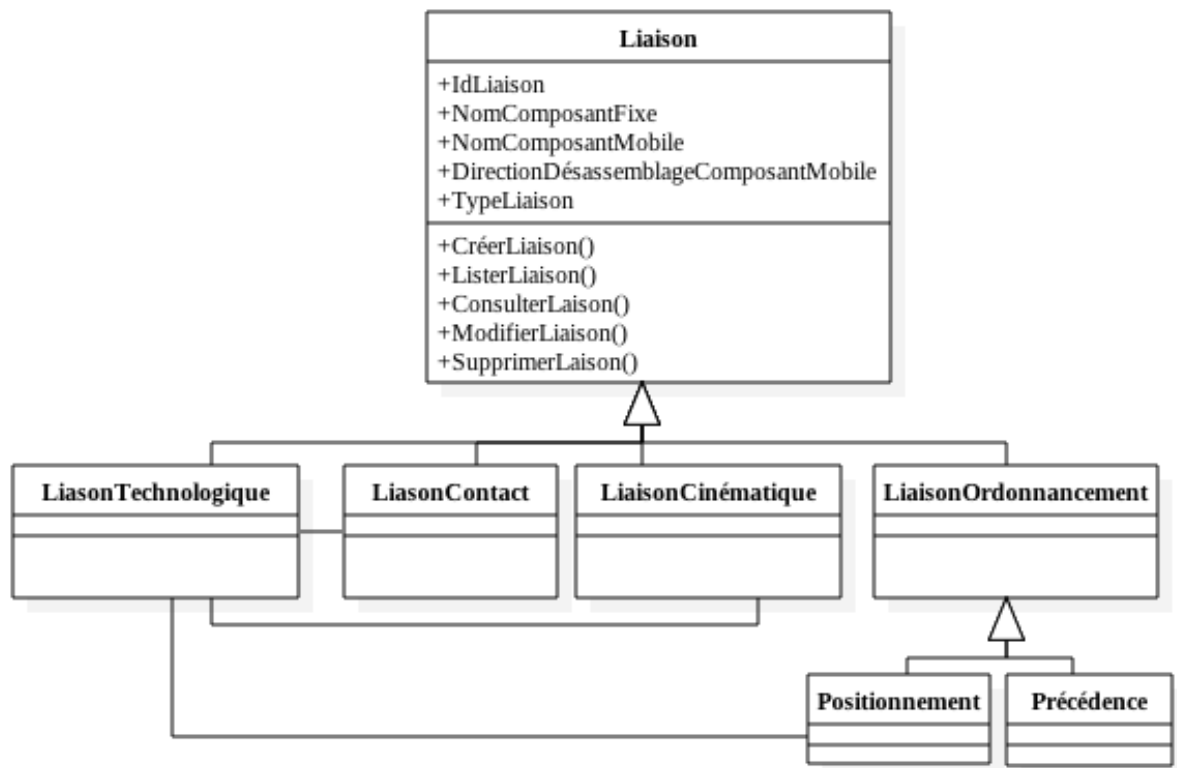


Figure 23 : La vue contextuelle Produit.

1.3.5 La vue technologique Produit

Le modèle de la vue technologique produit (Figure 24) décrit la technologie employée pour le positionnement et le maintien de la liaison de contact. Elle est souvent la cause de l'échec en matière de désassemblage, de détériorations de composants, de la mise au rebut des composants. Elle apporte donc une information sur la démontabilité ou la non démontabilité de l'artefact.

Les attributs décrivant les liaisons technologiques sont :

- un identifiant ;
- un nom ;
- un type de liaison technologique.

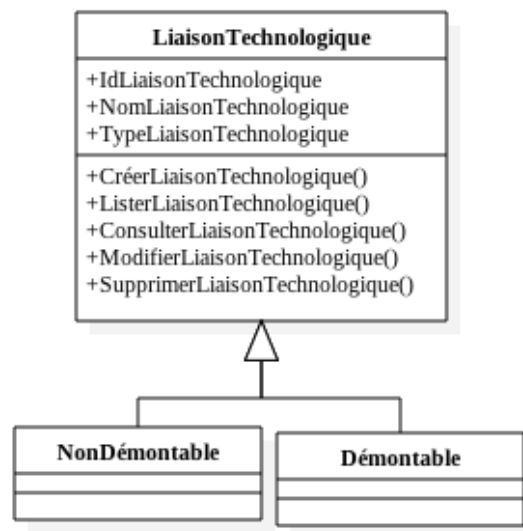


Figure 24 : La vue technologique Produit.

1.3.6 La vue comportementale Process

Le modèle de la vue comportementale process (Figure 25) considère la classification de séquences de désassemblage. Elles sont classées suivant :

- les déplacements d'éléments : ce type de classe regroupe le désassemblage séquentiel et monotone ;
- la profondeur de désassemblage : ce type de classe regroupe le désassemblage total et partiel ou ciblé ;

- le mode de désassemblage : ce type de classe regroupe le désassemblage destructif et non destructif ;
- la nature de désassemblage : ce type de classe regroupe le désassemblage linéaire et parallèle.

Les attributs décrivant une séquence de désassemblage sont :

- un identifiant ;
- un nom ;
- un coût ;
- une durée ;
- un profit.

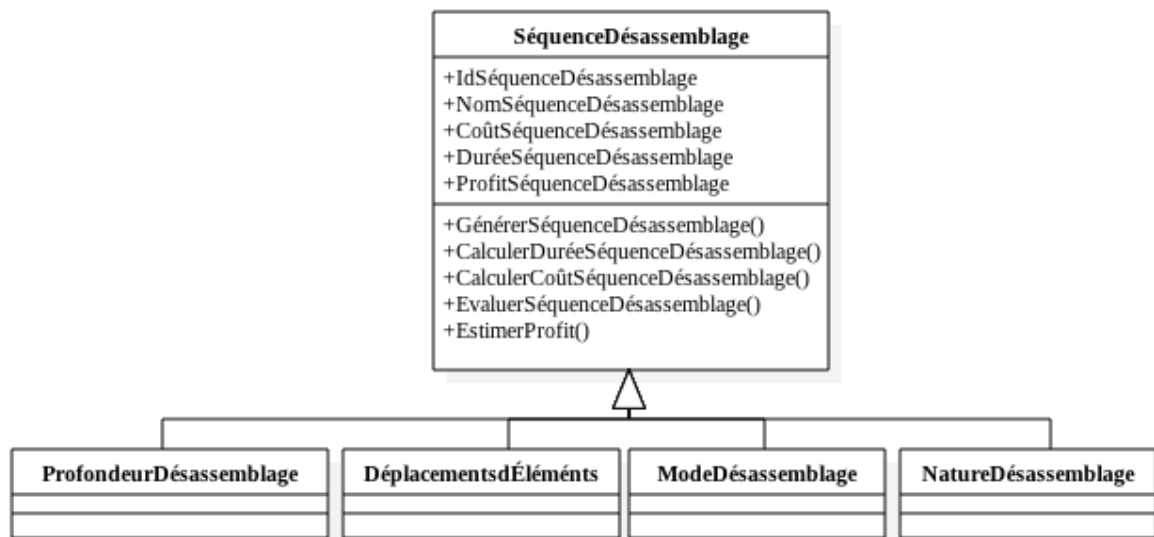


Figure 25 : La vue comportementale Process.

1.3.7 La vue structurelle Process

Le modèle de la vue structurelle process (Figure 26) considère les tâches que l'on trouve dans une opération de désassemblage. Ces opérations sont généralement :

- le maintien en position de l'élément désassemblé ;
- le changement d'outil requis pour la manipulation ;
- l'orientation de l'artefact ;
- l'orientation de l'outil ;

- la désolidarisation des éléments ;
- la fixation de l'élément mobile séparé ;
- le déplacement de l'élément mobile ;
- la libération de l'élément fixe ;
-

D'autres opérations de test des produits peuvent aussi être introduites entre chaque opération afin d'évaluer leur faisabilité. Les variations de temps entre différents enchaînements d'opérations sont dues, la plupart du temps, à la présence ou non d'une ou plusieurs tâches élémentaires (changement d'outil, réorientation de l'artefact et des outils,...).

L'analyse d'une opération de désassemblage vise à déterminer son coût de réalisation. Le coût d'une opération de désassemblage dépend de la ressource matérielle qu'elle nécessite et des moyens humains qu'elle mobilise. Chaque ressource matérielle a un coût d'exploitation par heure qui dépend de sa technologie, de son âge, des consommables qu'elle nécessite et du nombre d'opérateurs qui la maintiennent opérationnellement. Par ailleurs, l'expérience et l'efficacité de l'opérateur qui exécute cette opération, sont des paramètres décisifs dans l'estimation de la durée opératoire et donc de son coût.

L'utilisation des différentes ressources lors d'une opération est généralement caractérisée d'un point de vue économique par un coût horaire d'utilisation qui est une fonction de différents paramètres tels que les compétences d'un opérateur ou la spécificité d'un matériel.

Les attributs décrivant une opération de désassemblage sont :

- un identifiant ;
- un nom ;
- un type ;
- un nombre ;
- une durée ;
- un coût.

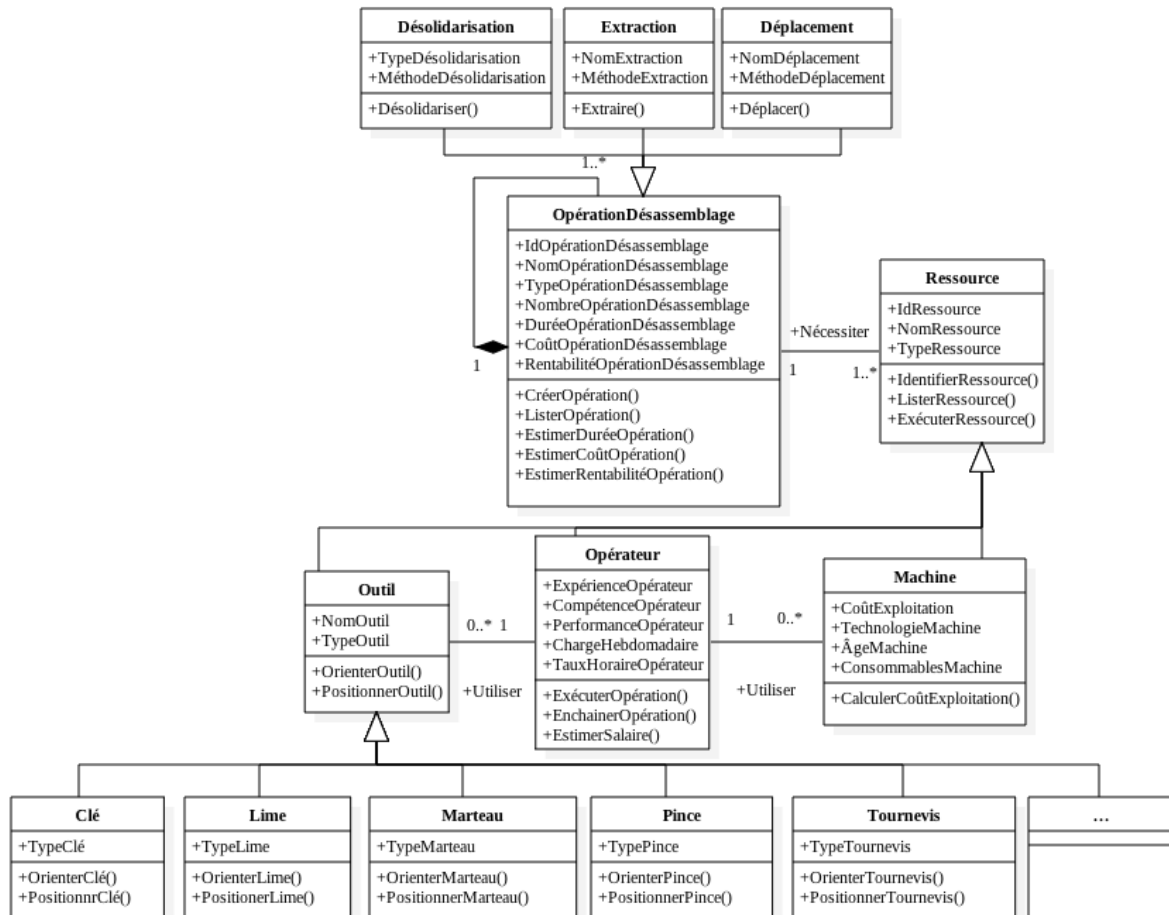


Figure 26 : La vue structurelle Process.

1.3.8 La vue contextuelle Process

Le modèle de la vue contextuelle process (Figure 27) considère les conditions de désassemblage de l'artefact.

Les attributs décrivant une opération de désassemblage sont :

- un identifiant ;
- un nom ;
- un type ;
- un volume de demande.

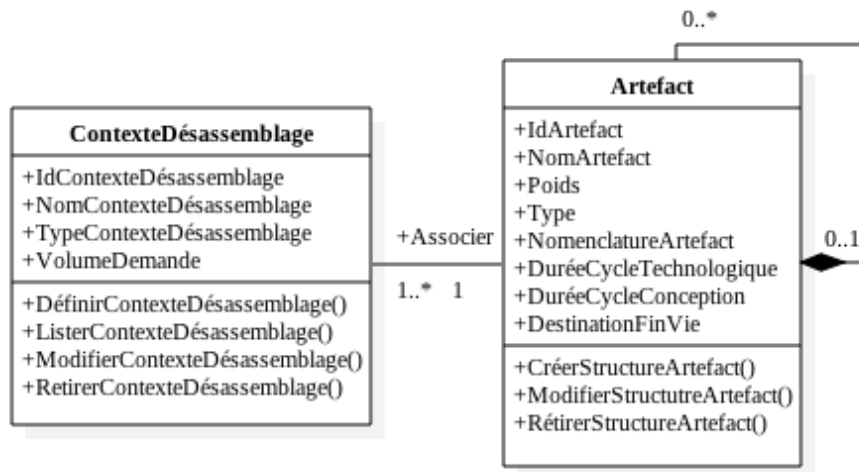


Figure 27 : La vue contextuelle Process.

1.3.9 La vue technologique Process

L'identification des liaisons de contact, cinématiques et d'ordonnancement entre les composants de l'artefact entraîne l'identification de tous les types de liaison technologique (Figure 28) jugés utilisables pour réaliser la liaison considérée (vis à tête standard, vis à tête spécifique, vis/écrou, rivets, goupilles, soudure, etc,...). La liaison technologique doit être nécessairement supprimée avant l'extraction et le déplacement d'un composant.

L'énergie requise pour démonter chaque liaison technologique permet d'évaluer le désassemblage. L'utilisation de l'entropie apparaît aussi très utile pour obtenir une mesure quantifiée de la complexité des opérations liées à la démontabilité des liaisons technologiques.

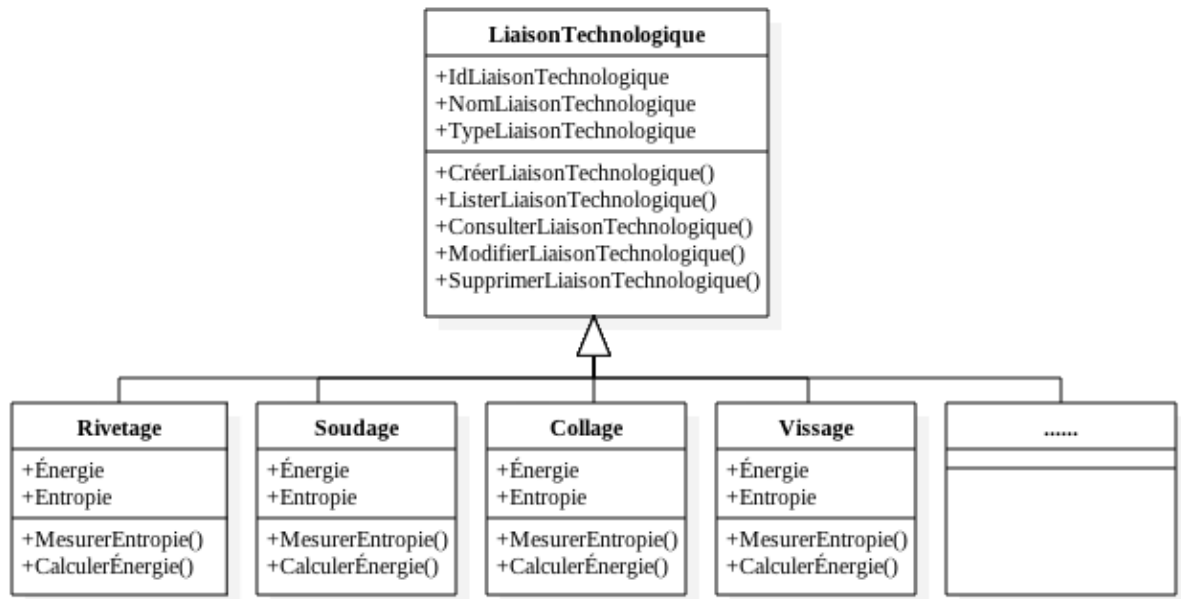


Figure 28 : La vue technologique Process.

1.4 Modèle Multi-Vues orienté désassemblage

La Figure 29 met en évidence les entités manipulées et leurs relations dans les domaines du « produit » et du « processus de désassemblage ». L'objectif de ce modèle est de cartographier les concepts et les structures associées, afin de pouvoir les exploiter dans une approche intégrée et proactive. L'intégration des contraintes de désassemblage en phase de conception préliminaire nécessite de pouvoir prendre des décisions avec des données et informations préliminaires. De ce fait, le modèle proposé donne une description des concepts à différents niveaux d'abstraction.

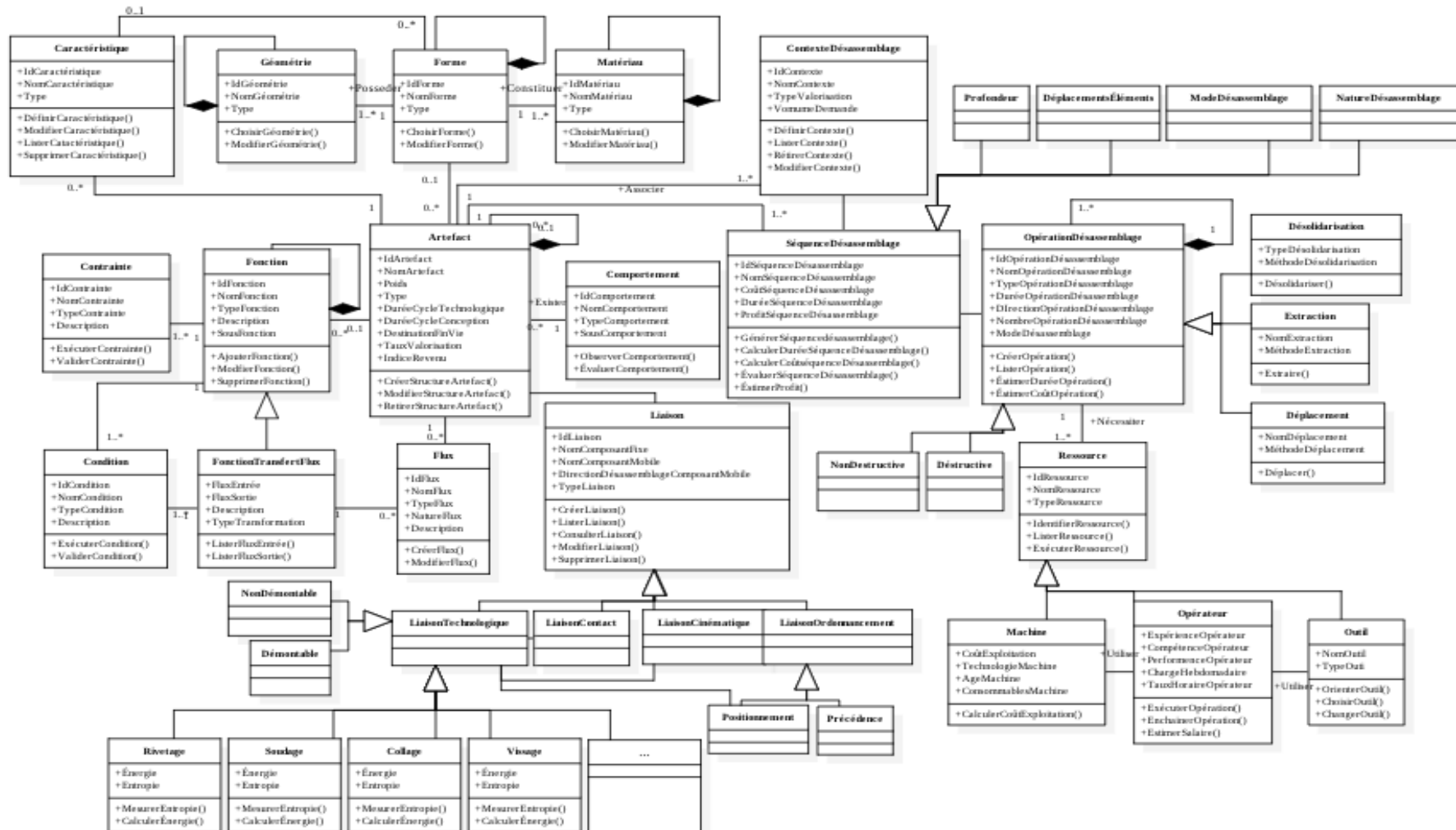


Figure 29 : Modèle Multi-Vues orienté désassemblage.

Chapitre 4. Cadre méthodologique de conception de conception modulaire orientée désassemblage

Le cadre méthodologique DOMDE (Disassembly Oriented Modular Design) vise à promouvoir une approche de conception modulaire des produits manufacturés intégrant, dans la phase préliminaire de conception, les contraintes liées au désassemblage.

Les objectifs du cadre méthodologique DOMDE sont :

- faire intervenir les différents acteurs concernés par les problématiques du désassemblage au moment le plus opportun et en particulier lors de la phase de conception préliminaire ;*
- définir un indice d'évaluation de la complexité du désassemblage ;*
- définir une méthode de conception modulaire des produits manufacturés ;*
- générer des séquences de désassemblage en phase préliminaire de conception ;*

Ce cadre méthodologique est composé d'un ensemble d'étapes qui feront l'objet d'une description plus détaillée dans les prochaines sections de ce chapitre. L'ensemble de la méthodologie est conçu pour être appliqué au contexte spécifique « processus de conception modulaire des produits orientée désassemblage ». Basé sur le modèle Multi-Vues orienté désassemblage (Figure 29) et sur les objectifs cités précédemment, le cadre méthodologique DOMDE permet de définir, d'une manière détaillée, une séquence de désassemblage pour un produit modulaire, tout en vérifiant la correspondance avec les fonctions du produit.

Nous partons de la définition du concept et des fonctions techniques d'un produit pour aboutir à ses séquences de désassemblage ordonnées et admissibles, respectant son architecture (Figure 30).

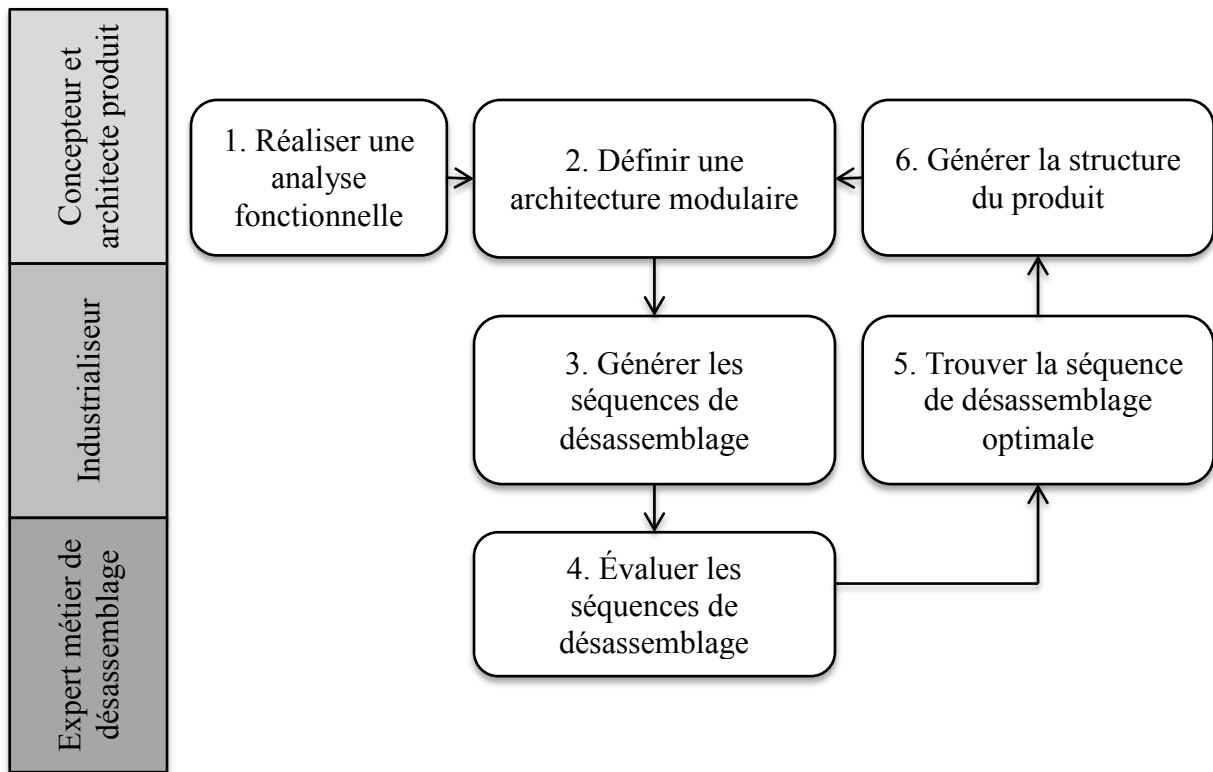


Figure 30 : Description du cadre méthodologique DOMDE.

1.1 Méthode d'évaluation de la complexité de désassemblage

Les différents composants d'un produit possèdent différentes fins de vie allant de leur mise en décharge jusqu'à leur remise en état et leur réutilisation. Suivant les choix de fin de vie qui ont été faits, le produit peut être désassemblé complètement ou partiellement afin de ne récupérer que les composants qui présentent le plus d'intérêt. Différentes techniques de désassemblage sont également possibles (désassemblage destructif, désassemblage semi-destructif, désassemblage non destructif).

L'outil d'évaluation de la complexité de désassemblage d'un produit modulaire que nous proposons, représente le désassemblage non destructif. Il est utilisable en phase de conception préliminaire d'un produit, et utilise les premiers éléments de sa représentation fonctionnelle (composants principaux, solidarisations,...).

1.1.1 Paramètres représentant le désassemblage non destructif

Basés sur les règles de conception pour le désassemblage, les paramètres qui affectent le désassemblage d'un produit sont de deux types : les paramètres inhérents au produit lui-même (paramètres intrinsèques) et ceux inhérents à son milieu d'exploitation (paramètres extrinsèques). Nous allons dresser une liste des paramètres permettant de représenter au mieux toutes les facettes du désassemblage non destructif d'un produit et pouvant être utilisés dans sa phase de conception préliminaire. La liste est la suivante :

- types des contacts ;
- types des combinaisons ;
- outils de désassemblage ;
- nombre de directions de désassemblage ;
- qualifications des opérateurs ;
- équipements requis ;

Une échelle de valeurs a été créée pour chacun des paramètres permettant de calculer la complexité de désassemblage. Les différentes valeurs permettent de représenter les principales possibilités et de les classer de la plus intéressante à la plus contraignante. Nous allons voir en détail ces échelles et décrire chacune des valeurs. Pour choisir ces échelles de

valeurs, nous nous sommes principalement appuyés sur trois articles (Das, Yedlarajiah, & Narendra, 2000); (Kroll & Carver, 1999) ; (Kroll & Hanft, 1998).

1.1.1.1 Types des contacts

Les contacts représentent la relation physique entre deux composants. Deux composants C_1 , C_2 sont en contact si : $\exists S M_{1i} \in C_1, S M_{2l} \in C_2$, telle que $S M_{2i}$ coïncide avec $S M_{2l}$. Cette relation est créée par le contact d'une surface associée au composant C_1 sur une surface associée au composant C_2 dites *surfaces fonctionnelles*. Ces surfaces sont de nature différente (plane, cylindrique, sphérique, conique,...). Par conséquent, la zone de contact dépend des surfaces en contact. La zone de contact peut être : surfacique, linéique, ponctuelle ou toute combinaison entre ces éléments selon la position relative de ces surfaces et leurs caractéristiques. La méthode utilisée pour détecter les contacts entre les composants, consiste à comparer chaque surface d'un composant avec les autres surfaces des autres composants. L'existence d'au moins un contact entre les surfaces de deux composants, entraîne un contact entre les deux composants en question. Le type de contact entre deux composants C_1 et C_2 est modélisé par la méthode ***noteTypeContact (Composant C_1 , Composant C_2)***. Le Tableau 9 représente l'échelle de valeur créée pour les types des contacts.

Tableau 9 : Types des contacts.

Types des contacts	Échelle de valeur
Aucun contact	1
Ponctuel	2
Linéaire	3
Surfacique	4
Multi point contact	5
Multi surface contact	6

1.1.1.2 Types des combinaisons

Les combinaisons représentent les éléments qui mettent une énergie de cohésion destinée à pérenniser certains contacts. Ces énergies de cohésion se matérialisent par des éléments solides ou liquides mais aussi par des actions chimiques, mécaniques.

Le type de combinaison entre deux composants C_1 et C_2 est modélisé par la méthode ***noteTypeCombinaison (Composant C_1 , Composant C_2)*** qui utilise une échelle de valeur qui augmente avec la difficulté à rompre la solidarisation considérée (Tableau 10).

Tableau 10 : Types des combinaisons.

Type des combinaisons	Échelle de valeur
Mettre	1
Insertion, rivetage	2
Tourner	3
Combiner	4
Collage, soudage	5

1.1.1.3 Outils de désassemblage

Les informations concernant les outils utilisés pour rompre une solidarisation entre deux composants C_1 et C_2 considèrent les difficultés pour les outils opératoires lors du désassemblage. Bien évidemment, cela dépend du type de solidarisation et de sa complexité. Une valeur importante de type d'outil correspondante à une solidarisation signifie qu'il est coûteux ou plus compliqué de désassembler deux composants reliés par cette solidarisation. L'idéal étant de pouvoir désassembler sans outil. L'outillage requis par le désassemblage d'une solidarisation entre deux composants C_1 et C_2 est mesuré par la méthode ***noteOutilDésassemblage (Composant C_1 , Composant C_2)***. Ce système est largement utilisé dans la littérature : par exemple (Desai & Mital, 2003) proposent deux échelles pour les outils servant à exercer une force ou un moment. Le Tableau 11 représente l'échelle de valeur créée pour les types d'outil.

1.1.1.4 Directions de désassemblage

Un composant peut être facilement désassemblé, mais s'il n'est pas ou difficilement accessible, le temps de désassemblage va fortement augmenter. Contrairement à l'assemblage durant lequel les composants sont assemblés les uns après les autres, lors du désassemblage il n'est pas rare de s'intéresser à un composant spécifique. Il sera alors difficile de positionner l'outil pour opérer le désassemblage. Le nombre de direction de désassemblage entre deux composants C_1 et C_2 est mesuré par la méthode ***noteNombreDirectionDésassemblage***

(*Composant C₁*, *Composant C₂*). Le Tableau 12 représente l'échelle de valeur créée pour les directions de désassemblage.

Tableau 11 : Outils de désassemblage.

Outils de désassemblage	Échelle de valeur
Aucun	1
Outil à air comprimé	2
Outillage mécanique	3
Fourni par le fabricant	4
Spécifique	5
Improvisé	6

Tableau 12 : Nombre des directions de désassemblage.

Nombre des directions de désassemblage	Échelle de valeur
5 angles	1
4 angles	2
3 angles	3
2 angles	4
1 angles	5
Sans visibilité	6

1.1.1.5 Qualification des opérateurs

La qualification des opérateurs comprend non seulement les éventuelles formations nécessaires pour utiliser un outil ou une machine, mais également le temps nécessaire pour prendre connaissance des informations relatives au produit destiné au désassemblage. La qualification des opérateurs est mesurée par la méthode *noteQualificationOpérateurs* (*Composant C₁*, *Composant C₂*). Le Tableau 13 représente l'échelle de valeur créée pour la qualification des opérateurs.

Tableau 13 : Qualification des opérateurs.

Qualifications des opérateurs	Échelle de valeur
Aucune	1
10 à 20 secondes	2
Plus de 30 secondes	3
Discussion	4
Formation	5

1.1.1.6 Équipements requis

Suivant le produit désassemblé, les outils utilisés... différents équipements peuvent être requis. Dans la majeure partie des cas, des gants suffisent, cependant si le produit contient des matières toxiques ou si des opérations de sciage sont effectuées d'autres protections sont nécessaires pour garantir la sécurité des opérateurs. Le Tableau 14 représente l'échelle de valeur créée pour les équipements requis.

Tableau 14 : Équipements requis.

Équipements requis	Échelle de valeur
Aucun	1
Gants	2
Masques	3
Protection anti-feu	4
Filtration de l'air	5
Combinaison intégrale	6

1.1.2 Pondération des paramètres de désassemblage

Nous avons étudié différentes méthodes traitant du désassemblage afin de déterminer une pondération pour les paramètres cités précédemment et de voir lesquels sont les plus influents (Das, Yedlarajiah, & Narendra, 2000). Pondérer les paramètres correspond à donner plus ou moins d'importance à un paramètre. La somme des pondérations est égale à 100. Les différentes alternatives seront donc classées sur une échelle de 0 à 100 et plus le score sera

élevé, plus le désassemblage sera considéré comme complexe. Les pondérations appliquées aux paramètres sont présentées dans le Tableau 15.

La pondération la plus importante a été donnée aux nombres des directions et aux outils de désassemblage, car ils jouent un rôle important dans la complexité de désassemblage car des outils complexes et certaines directions de désassemblage peuvent être très contraignants et limiter l'intérêt d'un désassemblage. La qualification des opérateurs et les équipements requis ont reçu des pondérations moins importantes, car ces deux paramètres ont moins des conséquences sur la difficulté de désassemblage et les coûts associés en comparaison des autres paramètres.

Tableau 15: Pondérations des paramètres de désassemblage.

Paramètres	Pondération
Nombre de directions de désassemblage	30
Outils de désassemblage	25
Types des contacts	20
Types des combinaisons	15
Qualifications des opérateurs	5
Équipements requis	5

1.1.3 Indice de complexité de désassemblage

L'outil d'évaluation de la complexité de désassemblage d'un produit proposé est un paramètre global. Il est calculé comme une somme pondérée des paramètres permettant de représenter le désassemblage.

$$ID = \frac{\sum_1^j c_i I_i}{\sum_1^j c_i} \quad (7)$$

avec :

- ID : indice d'évaluation de la complexité de désassemblage ;
- I_i : paramètre représentant le désassemblage ;
- P_i : pondération pour le paramètre I_i ;
- j : nombre des paramètres utilisés ;

1.1.4 Processus de prise en compte du désassemblage en phase de conception

Une fois l'indice d'évaluation de la complexité de désassemblage calculée, les étapes à suivre en conception préliminaire pour valider la dés-assemblabilité d'un produit. La Figure 31 est une modélisation du processus des étapes à suivre pour la validation de la dés-assemblabilité. Ce processus se décompose en 3 étapes :

- collecte des données ;
- évaluation de la dés-assemblabilité ;
- analyse des résultats de l'évaluation.

L'étape « collecte des données » consiste à recueillir toutes les informations requises pour l'évaluation d'une solution. Ces données proviennent du modèle CAO, de la solution et des sources externes à la CAO.

Une fois ces données recueillies, la solution est évaluée par rapport aux indicateurs proposés. Si la solution satisfait le seuil de dés-assemblabilité, elle est stockée dans une base de solutions éligibles. Dans le cas contraire, on passe à l'étape d'analyse des résultats de l'évaluation

L'étape d'analyse des résultats consiste à identifier les composants pénalisant la solution. Le concepteur doit décider s'il doit abandonner ou modifier la solution. S'il opte pour l'abandon de la solution, elle est stockée dans une base des solutions abandonnées. Dans le cas contraire, si le concepteur décide de modifier la solution, elle rentre à nouveau dans le processus de conception ou elle est modifiée et stockée dans une base des solutions à modifier, en attente d'une nouvelle évaluation.

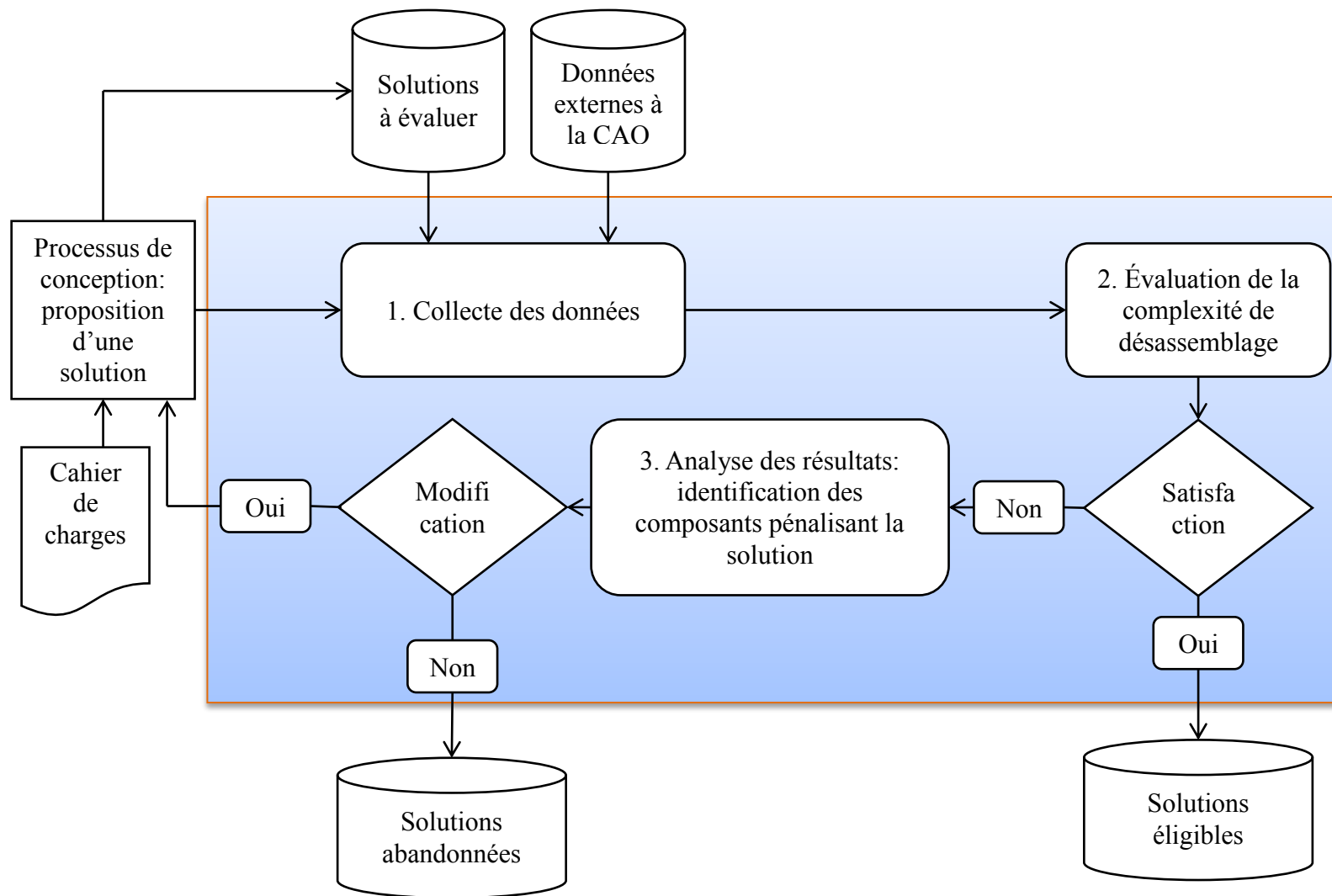


Figure 31 : Processus de prise en compte de la dés-assemblabilité.

1.2 Méthode de conception modulaire

Un point essentiel dans la conception modulaire est l'identification des modules. D'une façon générale, l'identification d'une architecture modulaire est un problème de décision multicritère. Un produit, défini comme un ensemble de composants et un ensemble de liaisons, est souvent représenté par un dessin en CAO (maquette numérique). Il n'est pas exploitable tel quel par les algorithmes de clustering. Pour appliquer la méthode d'identification des modules d'un produit par un algorithme de clustering, une matrice de relations modélisant les relations entre les composants d'un produit est proposée.

1.2.1 Modélisation du produit

Les composants du produit et leurs relations sont représentés par un graphe de liaisons, $G = (C, R)$ où chaque sommet représente un composant, et chaque couple de deux composants appelé « arc » représente les informations liées aux relations.

Soit $C = (C_1, C_2, C_3, \dots, C_n)$ l'ensemble de tous les composants du produit de cardinalité n .

Soit $R = (R_1, R_2, R_3, \dots, R_m)$ l'ensemble de toutes les relations entre les composants du produit de cardinalité m .

Pour chaque couple de composants du graphe, nous lui attribuons une valeur qui est la somme des paramètres représentant le désassemblage. Ainsi le résultat sera présenté sous la forme d'une matrice de relation. On définit la matrice de relation par un élément c_{ij} tel que :

$$c_{ij} = \begin{cases} \sum_1^n (TC + TCO + OD + NDD + QO + ER), & \text{si } C_i \text{ et } C_j \text{ ont une relation} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (8)$$

avec :

- TC : Types des Contacts ;
- TCO : Types des Combinaisons ;
- OD : Outils de désassemblage ;
- NDD : Nombre de Direction de Désassemblage ;
- QO : Qualifications des opérateurs ;
- ER : Équipements requis.

1.2.2 Algorithme de clustering

L'algorithme de clustering proposé, permet de réorganiser consécutivement les lignes et les colonnes de la matrice modélisant les relations entre les composants d'un produit, selon un indice de similarité jusqu'à l'obtention des blocs diagonaux. Ainsi tous les composants qui sont en interaction minimal sont regroupés ensemble pour former des modules.

Pour trouver le nombre des modules NM , nous utilisons la formule proposée par (Ericsson & Erixon, 1999) :

$$0.5\sqrt{\text{nombre de composant}} \leq NM \leq \sqrt{\text{nombre de composant}} \quad (9)$$

$$\frac{NCP}{NMACM} \leq NCM \leq \frac{NCP}{NMICM} \quad (10)$$

avec :

- NCP: Nombre de Composant du produit
- NMACM : Nombre maximum de Composant dans un Module
- NCM : Nombre de composants dans un module
- NMCM : Nombre minimum de Composant dans un Module

Ce regroupement se fait en plusieurs étapes :

1. Générer un nombre de modules possibles, d'après l'équation 9.
2. Additionner les entrées de chaque colonne de la matrice des relations.
3. Choisir des composants avec les plus fortes intensités de liaisons et assigner les à un module.
4. Choisir une colonne parmi celles qui correspondent aux composants de l'étape précédente et tracer une ligne verticale.
5. Pour chaque entrée (valeur) différente de 0 coupées par la ligne verticale, tracer une ligne horizontale.
6. Assigner les composants au module auquel appartient le composant de la colonne choisie de sorte à maximiser les relations des composants du même module et à minimiser les relations entre les composants de modules différents.
7. Transformer la matrice en supprimant les composants assignés à un module.

8. Répéter les étapes 6 à 7 jusqu'à ce que chaque composant soit assigné à un module.

1.3 Définition des séquences de désassemblage

La séquence de désassemblage générée par l'algorithme que nous proposons met en évidence l'ordre de désassemblage des modules du produit, puis les composants d'un module. Pour la génération de la séquence de désassemblage, trois données d'entrée sont nécessaires :

- les directions de désassemblage des modules ;
- la matrice de précédence entre les modules ;
- la matrice de précédence entre les composants ;

La matrice de précédence entre les composants est définie à partir du graphe des liaisons et de l'architecture modulaire du produit. Un élément P_{ij} de la matrice est tel que :

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si le composant } i \text{ est désassemblé avant le composant } j \\ 0, & \text{si le composant } i \text{ ne peut pas être désassemblé avant le composant } j \\ x, & \text{si aucune contrainte de précédence existe entre les composants } i \text{ et } j. \end{cases} \quad (11)$$

Cette notation peut prendre la valeur 0 ou 1

Les entrées de la diagonale principale de la matrice de précédence sont égales à 0. À partir de cette matrice nous pouvons déduire, dans sa dernière ligne et colonne, les niveaux d'accessibilité suivant les deux sens de la direction de désassemblage. Ces niveaux d'accessibilité sont caractérisés par le nombre de composants qui précèdent les composants à désassembler.

Finalement, la séquence de désassemblage résultante peut être représentée selon différentes façons. Nous proposons de la représenter sous forme d'arbre de désassemblage, associé à un graphe non orienté.

1.4 Conclusion

Durant la phase de conception préliminaire, le concepteur a beaucoup d'influence sur le choix de conception. Ce qui n'est pas le cas pendant les dernières étapes de la conception où des modifications sur les choix de conception engendrent des coûts et délais supplémentaires.

Dans ce contexte, nous avons donc proposé une méthode de conception modulaire qui s'appuie sur l'évaluation de la complexité de désassemblage d'un produit à l'aide des

paramètres pour aider les concepteurs à prendre en compte les contraintes de désassemblage durant la phase de conception préliminaire. Ces indicateurs sont élaborés à l'issue des règles DFD et requièrent un système de CAO enrichi, par un système de gestion des données techniques.

Nous avons présenté également, dans ce chapitre, les différentes étapes pour la définition d'une séquence de désassemblage. Le graphe des liaisons requis pour le modèle de génération de la séquence de désassemblage est obtenu à partir de la structure du produit. Dans le chapitre suivant, nous présentons deux exemples d'application du cadre méthodologique proposé.

Chapitre 5. Application du modèle et du cadre méthodologique à des études de cas

Ce chapitre illustre la mise en application de la démarche de conception de produit modulaire intégrant les contraintes de désassemblage, proposée dans le chapitre précédent, sur deux produits (agrafeuse, lampe de bureau).

1.1 Premier cas d'application

Dans cet exemple, nous allons nous intéresser à une agrafeuse. En effet, la distribution ou l'archivage de plusieurs documents est grandement facilité lorsque les divers documents sont liés les uns aux autres. Pour éviter d'égarer des documents, il est nécessaire de pouvoir les solidariser les uns aux autres par l'intermédiaire d'agrafes ce qui évite des feuilles volantes qui sont évidemment plus facilement perdues. La création d'un diagramme de pieuvre (Figure 32) en phase d'utilisation de l'agrafeuse, permet d'identifier les milieux extérieurs au produit et de formuler les fonctions de services (Tableau 16) qu'elle doit satisfaire.

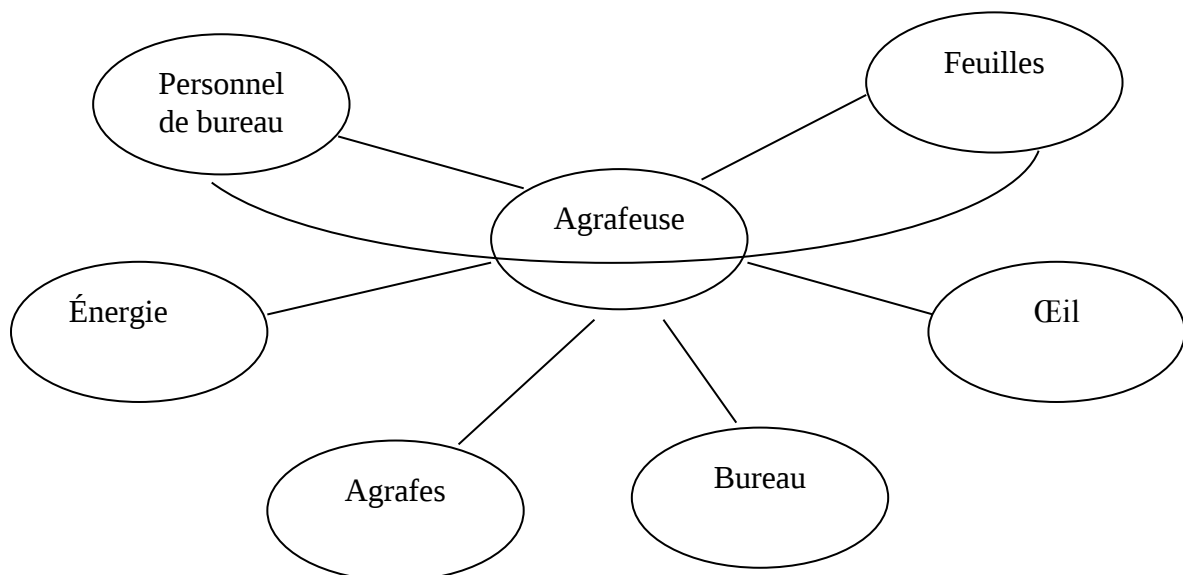


Figure 32 : Diagramme de pieuvre de l'agrafeuse en phase d'utilisation.

Tableau 16 : Fonctions de services.

FP1	Permettre au personnel de bureau d'agrafer plusieurs feuilles d'une seule main
FC1	Être agréable à l'œil
FC	Permettre une accessibilité des feuilles
FC	S'adapter à la source d'énergie
FC	Être capable d'accueillir un type donné d'agrafes
FC	S'adapter à l'utilisateur
FC	Être utilisable dans un bureau

Rappelons que *FP* est la fonction principale et que *FC* est la fonction complémentaire. Suite à l'analyse fonctionnelle, basée sur le FAST (Function Analysis System Technique) (Figure 33) nous avons identifié les différentes fonctions techniques permettant de réaliser la fonction de service : « *permettre au personnel de bureau d'agrafer des feuilles de papier* ». Nous avons retenu les fonctions techniques :

- Déposer,
- Extraire,
- Plier,
- Alimenter.

En effet la fonction agrafer est réalisée, car les agrafes *stockées* dans le magasin sont *extraites* et *pliées* par la base. La base est alimentée en énergie musculaire.

1.1.1 Identification des différents composants du produit

Les fonctions techniques et sous-fonctions techniques nous ont permis de détailler les solutions technologiques. L'agrafeuse est constituée de 18 composants tels que listés dans le Tableau 17. La Figure 34 représente une illustration du produit décrivant une solution en vue éclatée.

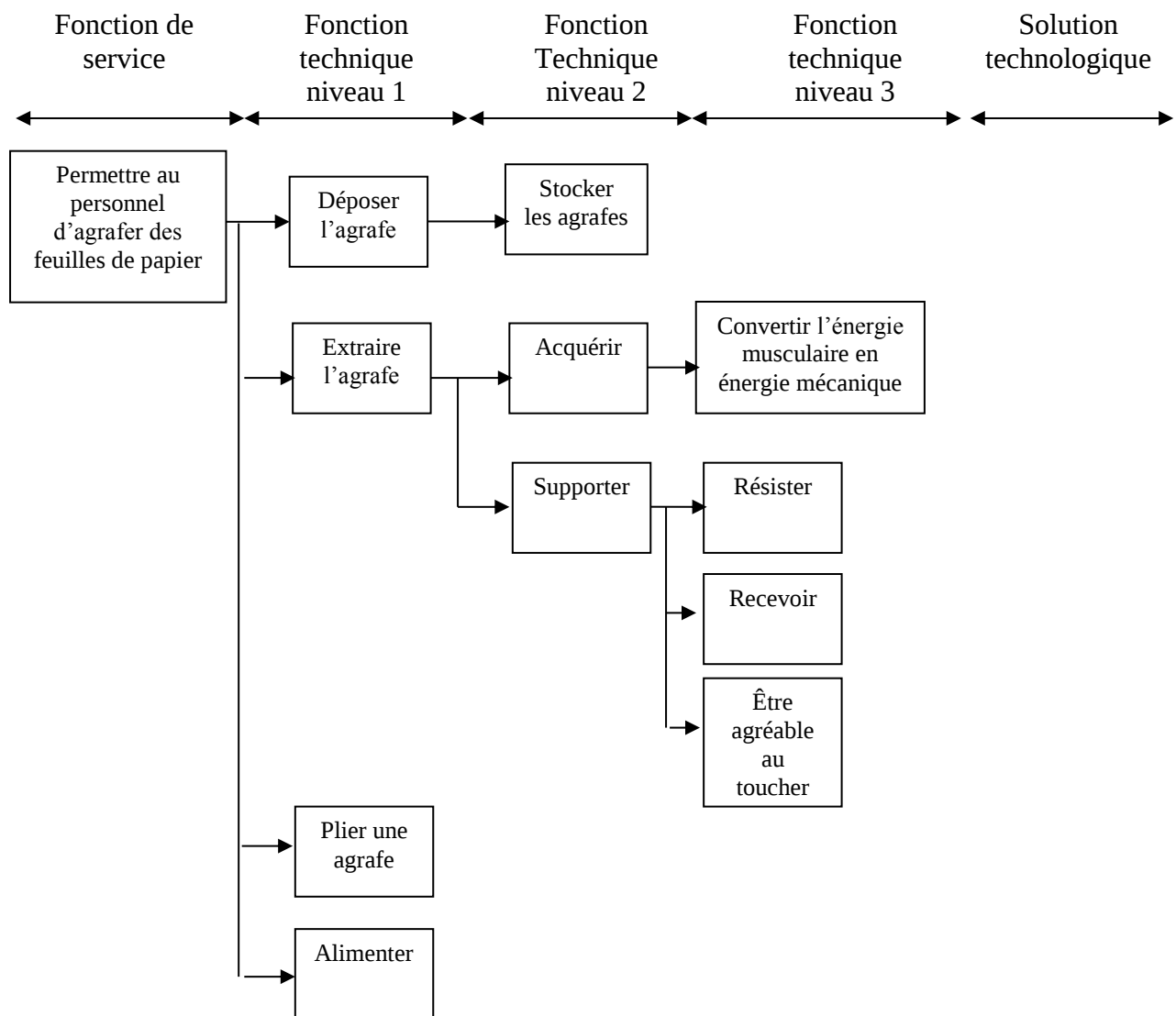


Figure 33: Le FAST relative à la fonction agrafer.

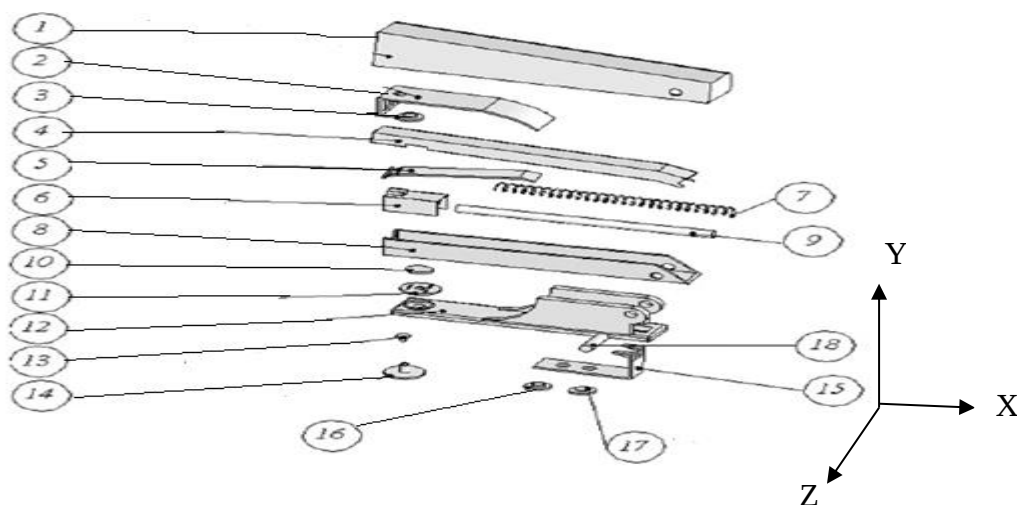


Figure 34 : Vue éclatée de la solution et nomenclature associée.

Tableau 17 : Composants et poids des composants.

No	Nom Composants	Poids (kg)	No	Nom Composants	Poids (kg)
1	Couvercle	0.015	10	Rivet 2	0.003
2	Support de ressort	0.005	11	Enclume	0.002
3	Rivet 1	0.003	12	Base	0.012
4	Capuchon	0.008	13	Ressort	0.0009
5	Ressort pivot	0.0025	14	Rivet base	0.0021
6	Glissière	0.003	15	Composant d'attache	0.025
7	Agrafe	0.00125	16	Rivet 3	0.003
8	Magasin	0.006	17	Rivet 4	0.003
9	Tige de guidage	0.002	18	Axe	0.004

1.1.2 Modélisation du produit à l'aide de graphes des liaisons

La structure du produit permet de construire le graphe des liaisons présenté à la Figure 35.

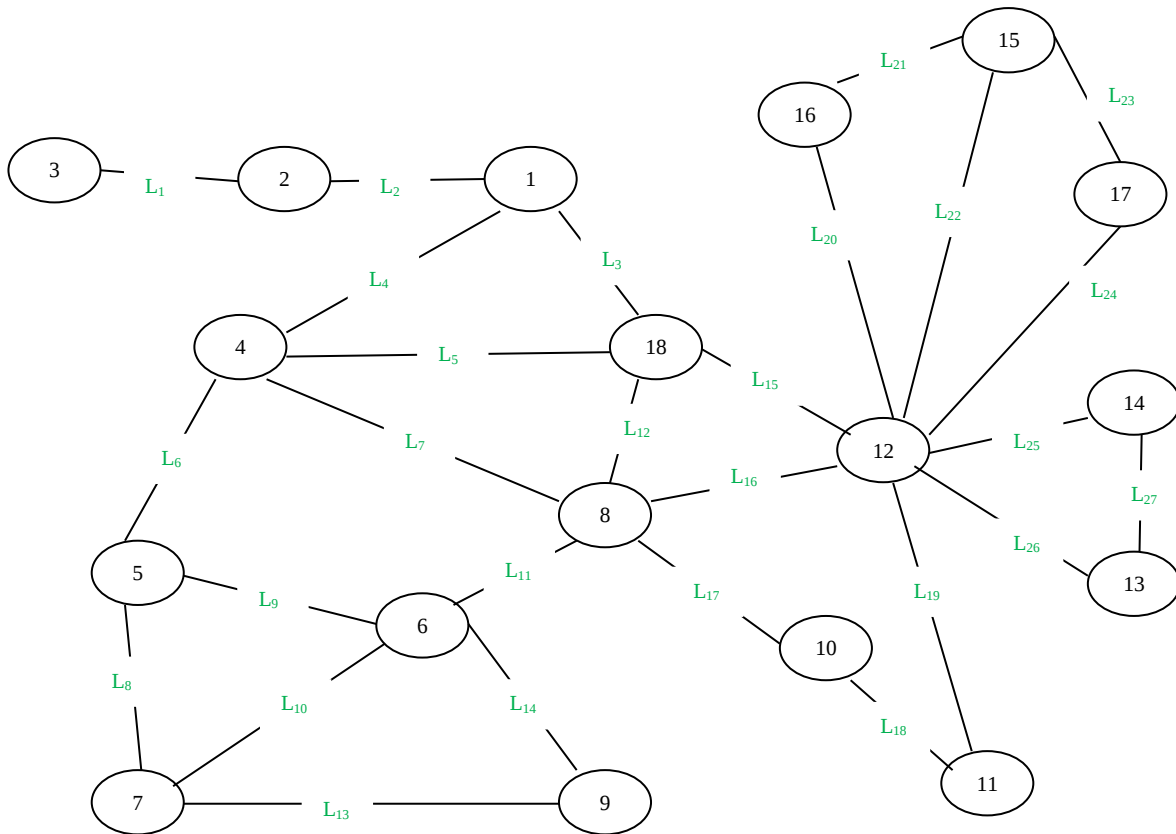


Figure 35 : Graphe des liaisons de l'agrafeuse.

1.1.3 Évaluation de la complexité de désassemblage

Comme mentionnée dans le chapitre précédent (§ 1.1.3), un indice ID (équation 7) est choisi comme indicateur en conception afin d'évaluer la complexité de désassemblage d'une

solution générée par le concepteur. Cet indice est calculé comme une moyenne pondérée des paramètres représentant le désassemblage d'un produit avec pour coefficients de pondération C_i .

La complexité de désassemblage de l'agrafeuse est évaluée à partir de six paramètres proposés pour trois solutions dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Solution 1 : l'agrafeuse est constituée de trois parties. La partie supérieure est composée des composants 1, 2, 4 et 5. L'intérieur de l'agrafeuse est composé des composants 6, 7 et 9. La partie inférieure est composée des composants 8, 11, 12, 13, 15 et 18. L'assemblage entre ces trois parties est assuré par rivetage.
- Solution 2 : cette solution est similaire à la précédente, nous proposons d'utiliser un rivet au lieu de deux rivets pour solidariser les composants 12 et 15. Ainsi nous retenons le composant 17 et de ce fait les liaisons 20 et 21 sont supprimées.
- Solution 3 : cette solution est similaire à la solution 1, seuls les matériaux constitutifs du produit changent. Ainsi, au lieu de l'aluminium matériau constitutif des composants 6 et 11 (enclume et glissière), nous proposons d'utiliser l'acier.

Le calcul se trouve dans les Tableau 18 et Tableau 19.

Tableau 18 : Évaluation des liaisons entre les composants.

Liaisons	TC	TO	NDD	TCO	QO	ER	Valeur
2-3	2	1	1	2	1	1	8
1-2	4	1	1	1	1	1	9
1-18	3	1	1	2	1	1	9
1-4	1	1	4	1	1	1	9
4-18	6	1	1	2	1	1	12
4-5	6	2	4	3	1	1	17
4-8	4	1	4	1	1	1	12
5-7	2	1	4	1	1	1	10
5-6	4	1	3	1	1	1	11
6-7	2	1	4	2	1	1	11
6-8	6	1	3	1	1	1	13
8-18	3	1	4	2	1	1	12
7-9	5	1	5	2	1	1	15
6-9	3	2	4	1	1	1	12
12-18	3	1	5	2	1	1	13
8-12	6	1	3	1	1	1	13
8-10	2	2	3	2	1	1	11
10-11	4	3	5	1	1	1	15
11-12	4	2	4	2	1	1	14
12-16	2	3	5	2	1	1	14
15-16	2	3	5	2	1	1	14
12-15	6	1	1	3	1	1	13
15-17	2	3	5	2	1	1	9
12-17	2	3	5	2	,1	,1	9
12-14	2	3	5	2	1	1	9
12-13	2	2	4	2	1	1	12
13-14	5	1	4	2	1	1	13

Tableau 19: Bilan de l'évaluation.

<i>Agrafeuse</i>	<i>Solution 1</i>	<i>Solution 2</i>	<i>Solution 3</i>
<i>ID</i>	0,55574417	0,5561337	0,57426268

D'après le Tableau 19, les indices de désassemblabilité obtenus pour les trois solutions proposées sont de l'ordre de 55,57 % pour la solution 1, de 55, 61 % pour la solution 2 et 57,42 % pour la solution 3. Les trois solutions appartiennent à l'intervalle [50%, 75%] qui traduit une solution satisfaisante. Mais la solution 3 présente l'indice de désassemblabilité le plus élevé, elle est alors jugée comme la solution de conception la plus respectueuse des contraintes de désassemblage en fin de vie que les solutions 1 et 2.

1.1.4 Conception modulaire

L'application de la formule de Ericsson et Erixon (Ericsson & Erixon, 1999) permettant de calculer le nombre des modules possibles nous a permis d'obtenir que le nombre de modules que l'on peut former est de 4.

$$NMP \leq \sqrt{18} \quad (12)$$

Les composants de l'agrafeuse sont regroupés en modules Figure 36, en appliquant l'algorithme de regroupement des composants en modules proposé dans la section 1.2.2 du chapitre 4. L'addition des entrées de chaque colonne de la matrice des relations, a permis de constater que les composants 7, 12, 15 et 18 ont des intensités de liaisons les plus élevées. Nous les assignons à un module chacun. Ensuite nous assignons le reste des composants à un module, de telle façon à maximiser les interactions entre les composants d'un même module et en minimisant les interactions entre les composants de modules différents.

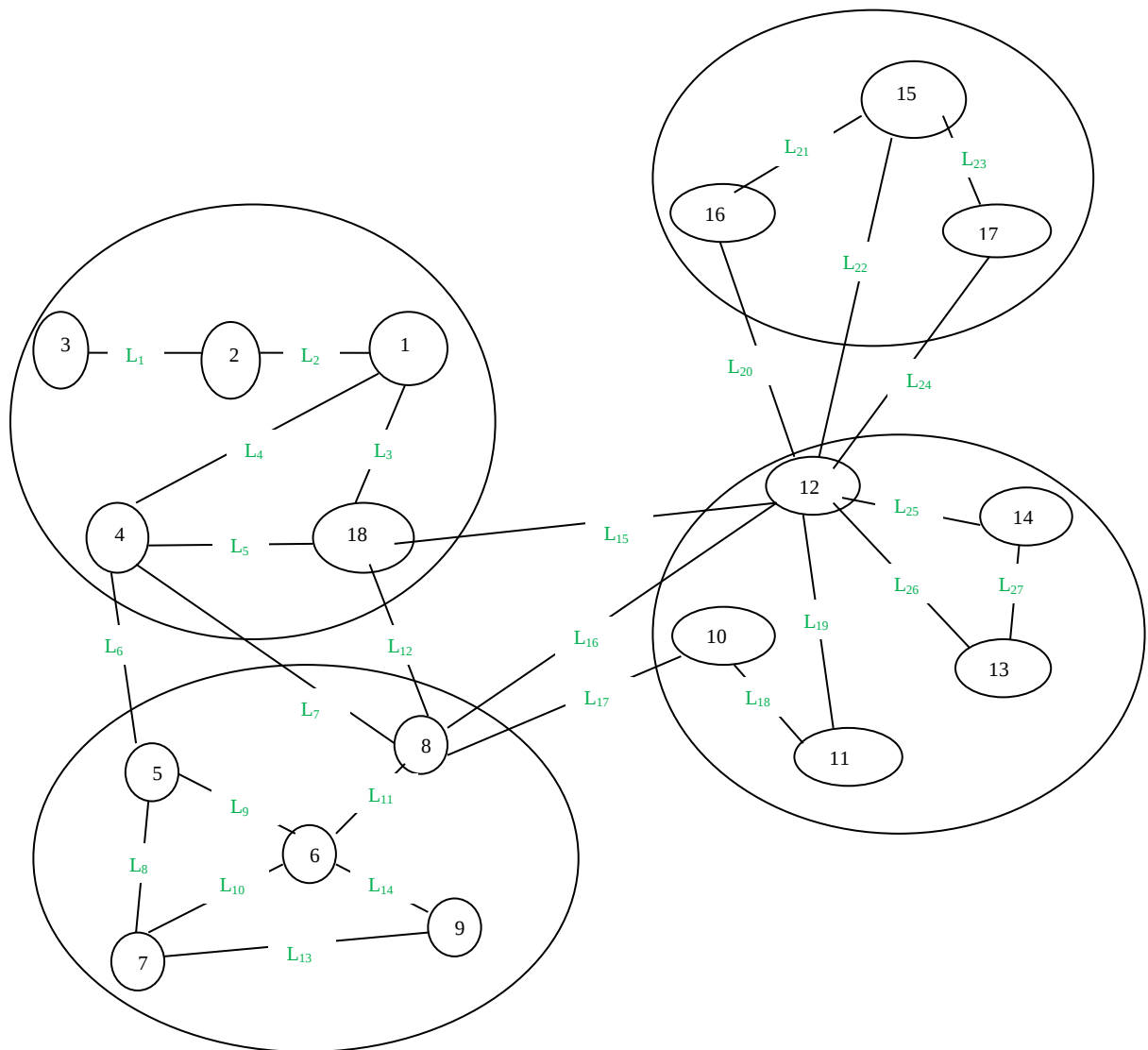


Figure 36 : Décomposition du produit en modules.

1.1.5 Génération de la séquence de désassemblage des modules

1.1.5.1 Matrice de précedence des composants

Nous illustrons via la Figure 37 la matrice de précedence pour l'agrafeuse. Afin de construire cette matrice, l'ensemble des composants qui doivent être désassemblés avant chaque composant de l'agrafeuse est déterminé. L'ensemble est déterminé à partir du graphe des liaisons de la structure pour permettre son désassemblage. Rappelons qu'un élément P_{ij} de la matrice est tel que :

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si le composant } i \text{ est désassemblé avant le composant } j \\ 0, & \text{si le composant } i \text{ ne peut pas être désassemblé avant le composant } j \\ x, & \text{si aucune contrainte de précédence existe entre les composants } i \text{ et } j. \end{cases} \quad (13)$$

Cette notation peut prendre la valeur 0 ou 1

Les éléments (entrées) de la diagonale principale de la matrice de précédence sont égaux à 0.

	18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
M_1	18	0	1	1	X	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2	0	1	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	3	X	1	1	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	4	0	1	1	1	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X
P_{18}	5	1	X	1	X	0	0	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X
	6	1	X	1	X	0	0	0	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X
	7	1	X	1	X	0	0	0	0	1	1	X	X	X	X	X	X	X
	8	1	X	X	X	X	0	0	0	0	1	X	X	X	X	X	X	X
	9	1	X	X	X	X	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X
M_3	10	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	1	1	1	X	X	X
	11	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	1	0	0	X	X
	12	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0
	13	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	1	1	0	0	X	X
	14	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	1	1	0	X	X
M_4	15	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	X	X	0	0
	16	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	X	X	1	0
	17	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	X	X	1	X

Figure 37: Matrice de précédence des composants.

1.1.5.2 Génération de l'arbre de désassemblage

Du fait que des composants appartiennent au même module, la valeur 0 est attribuée aux entrées de chaque module de valeur égal à 1. Ainsi la matrice de précédence, Figure 38 devient :

		18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
M_1	18	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	3	X	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
$P_{18} =$	4	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5	1	X	1	X	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X
	6	1	X	1	X	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X
	7	1	X	1	X	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X
M_2	8	1	X	X	X	X	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X
	9	1	X	X	X	X	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X
	10	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0	X	X	X	X
	11	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0	0	X	X	X
M_3	12	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0	0	X	X	X
	14	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0	X	X	X
	15	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	X	X	0	0	0
M_4	16	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	X	X	0	0	X
	17	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	X	X	0	X	0

Figure 38 : Matrice de précédence modifiée.

En considérant les sous- modules et les relations existant entre eux, nous obtenons la matrice simplifiée de la Figure 39.

$$\begin{array}{c}
 M_1 \quad M_2 \quad M_3 \quad M_4 \quad \text{Niveau} \\
 \\
 M_{ij} = \begin{array}{l}
 M_1 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} 0 \\
 M_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & X & X \end{bmatrix} 1 \\
 M_3 \begin{bmatrix} 1 & X & 0 & X \end{bmatrix} 1 \\
 M_4 \begin{bmatrix} 1 & X & 1 & 0 \end{bmatrix} 2
 \end{array}
 \end{array}$$

Figure 39 : Matrice de précédence des modules.

La combinaison des résultats de l'analyse hiérarchique des modules constituant l'agrafeuse et de la matrice de précedence des composants qui les constituent permet de générer l'arbre de désassemblage (Figure 40).

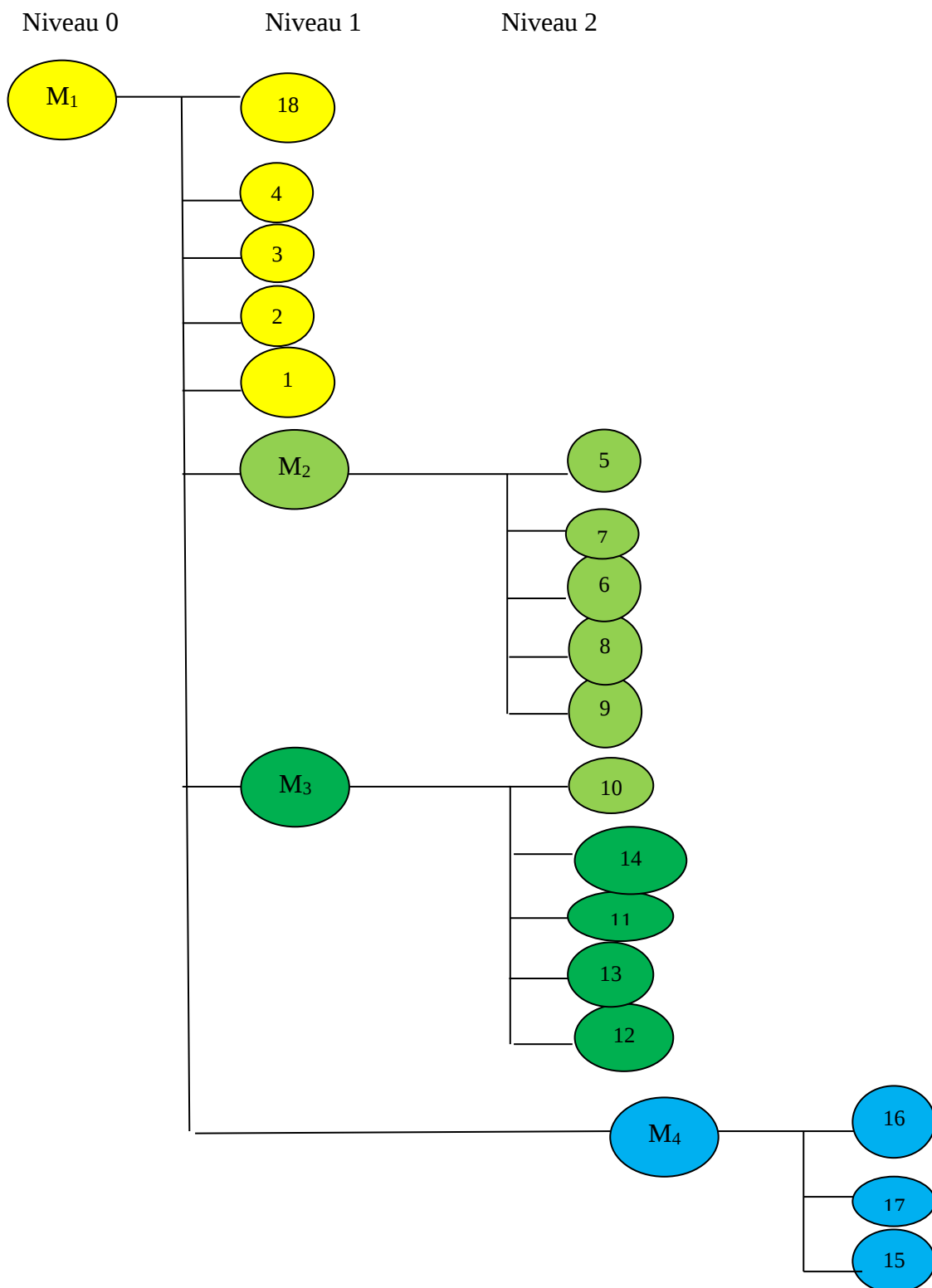


Figure 40 : Arbre de désassemblage de l'agrafeuse.

Ce dernier arbre présente les étapes à suivre pour le désassemblage du produit. La décomposition du produit en modules permet de procéder au désassemblage des composants ou bien des modules en parallèle, comme montré pour le niveau 1 les composants 18, 1, 2, 3, 4 et les modules 2 et 3 sont récupérés en parallèle. Au niveau 2, les composants 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 et le module 4 sont récupérés en parallèle.

1.2 Deuxième cas d'application

Dans cet exemple, nous allons nous intéresser à une lampe de bureau. La vue éclatée du produit permet de donner une vue globale sur la structure du produit et ces différents composants ainsi que les liaisons entre eux. La définition géométrique du produit (lampe de table) facilite la tâche pour analyser les différents composants et les liaisons entre eux comme mentionnée plus haut.

1.2.1 Les différents composants du produit

A la suite de l'étude de la structure géométrique du produit, on identifie les différents composants. Au total 22 composants sont identifiés repartis entre composants électroniques et mécaniques. Les éléments de l'exemple lampe de bureau sont dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Liste des composants.

No	Nom Composants	No	Nom Composants
1	Cache 1	12	Le fusible 1
2	Cache 2	13	Le fusible 2
3	La lampe	14	La prise de courant
4	Le support 1	15	Vis 1
5	Le support 2	16	Vis 2
6	Le contact	17	Vis 3
7	La tige en plastique	18	Vis 4
8	La tige souple	19	Vis 5
9	L'interrupteur	20	Vis 6
10	La base	21	Vis 7
11	Le transformateur	22	Vis 8

1.2.2 Modélisation du produit à l'aide de graphe des liaisons

La structure du produit permet de construire le graphe des liaisons présenté à la Figure 41.

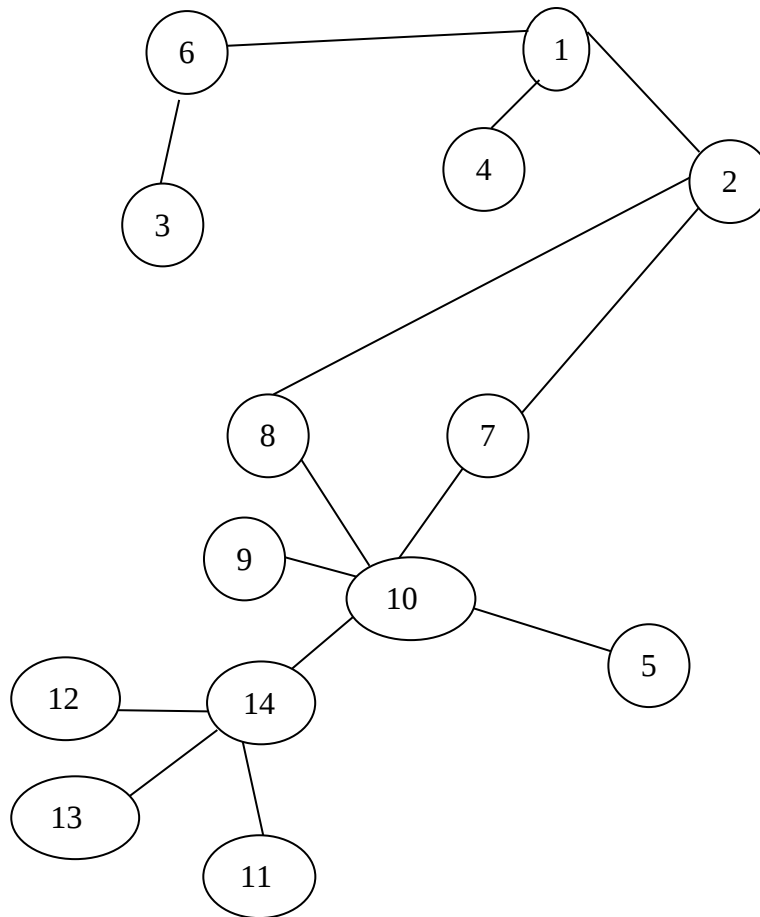


Figure 41: Graphe des liaisons de la lampe de bureau.

1.2.3 Évaluation de la complexité de désassemblage

A partir de la représentation géométrique et de la structure physique du produit ainsi que des fonctions réalisées par les différents composants, on traduit la structure du produit en graphe représentant les différents composants par des nœuds et les liaisons entre eux par des arrêtes. Ensuite on évalue chaque liaison selon les paramètres déjà mentionnés (Tableau 21).

Tableau 21 : Évaluation des liaisons entre les composants.

Liaisons	TC	TO	TCO	QO	ER	Valeur
1-2	4	2	1	1	1	9
1-4	4	1	2	1	1	9
1-6	4	2	1	1	1	9
2-7	3	1	1	1	1	7
2-8	3	1	2	1	1	7
3-6	6	1	2	1	1	11
5-10	4	2	1	1	1	9
7-10	3	1	1	1	1	7
8-10	3	1	2	1	1	8
9-10	5	1	2	1	1	10
10-14	2	1	2	1	1	7
11-14	2	2	1	1	1	7
12-14	2	1	3	1	1	8
13-14	2	1	3	1	1	8

1.2.4 Conception modulaire

Les composants de la lampe de bureau sont regroupés en modules (Figure 42), en appliquant l'algorithme de regroupement des composants en module proposé dans la section 1.2.2 du chapitre 4.

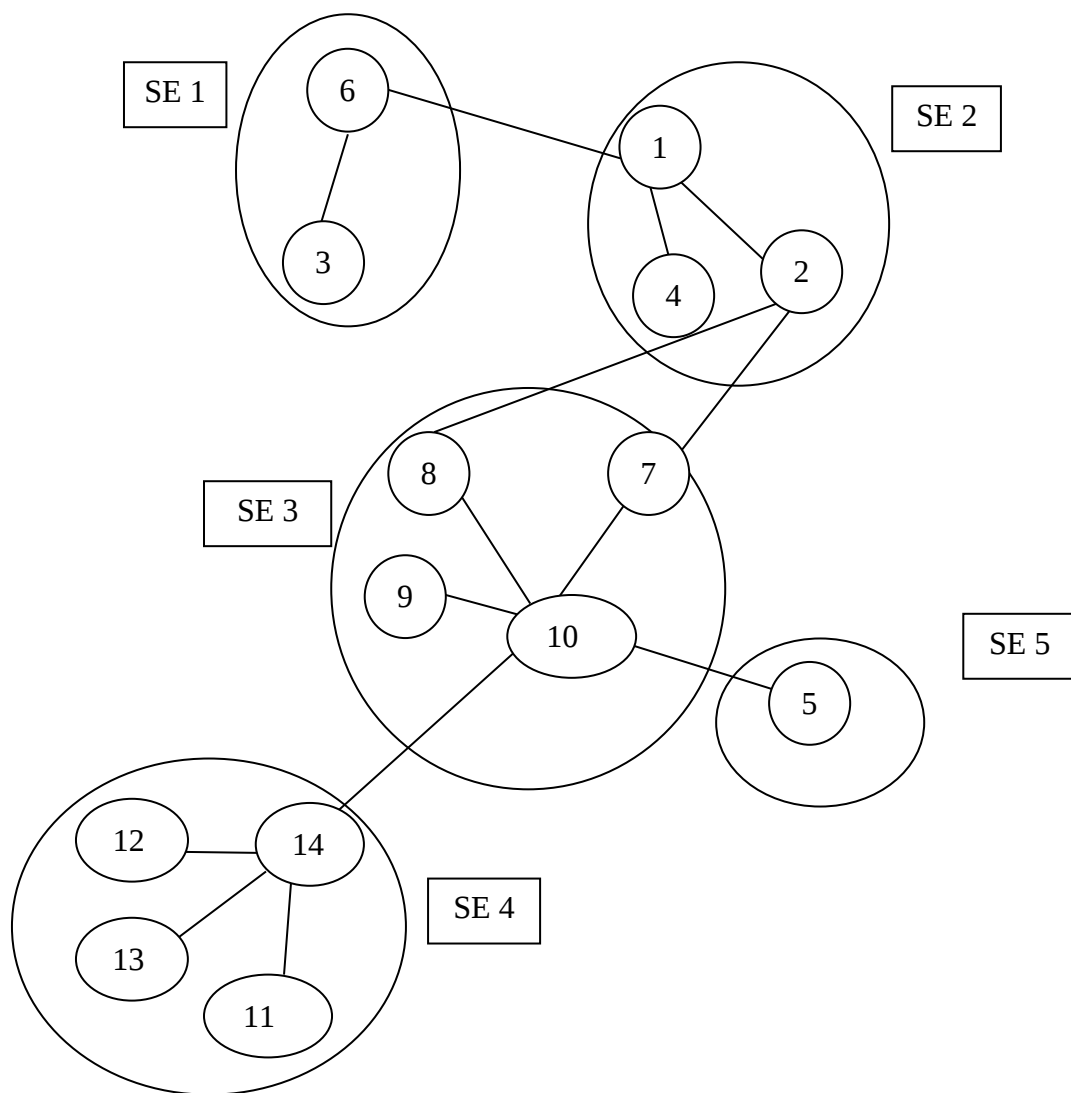


Figure 42: Décomposition du produit en modules.

1.2.5 Génération des séquences de désassemblage

1.2.5.1 Matrice de précedence des composants

La matrice de précedence des composants est comme suit (Figure 43):

		SE 1		SE 2			SE 3				SE 4				SE 5
		3	6	1	4	2	7	8	9	10	14	11	12	13	5
SE 1	3	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	1	x	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SE 2	1	1	1	x	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	1	1	0	x	1	1	0	0	0	0	0	0	0
SE 3	7	0	0	0	0	1	x	0	0	1	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	1	1	1	x	0	1	0	1	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	1	1	1	1	x	1	0	0	0	0
SE 4	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	1	1	1
	11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	x	1	1	1
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	x	0	1
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	x	1
SE 5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x

Figure 43 : Matrice de précédence des composants.

Ensuite on exploite la matrice de précédence des composants pour en tirer les niveaux de désassemblage afin de construire l'arbre de désassemblage. Du fait que des composants appartiennent au même sous-ensemble, on affecte la valeur 0 au lieu de 1. Par exemple pour le sous-ensemble SE 4, on obtient :

x	0	1	1
1	x	1	1
0	1	x	0
1	1	0	x

→

0	0	0	0
0	x	0	0
0	1	x	0
0	0	0	x

Ainsi la matrice de précédence devient (Figure 44) :

		SE 1		SE 2			SE 3				SE 4				SE 5
		3	6	1	4	2	7	8	9	10	14	11	12	13	5
SE 1	3	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	x	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SE 2	1	1	1	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	1	0	0	x	1	1	0	0	0	0	0	0	0
SE 3	7	0	0	0	0	1	x	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	1	1	0	x	0	0	0	1	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	1	0	0	0	x	1	0	0	0	0
SE 4	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	1
	11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	x	0	0	1
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	1
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	1
SE 5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x

Figure 44: Matrice de précédence des modules.

En considérant les modules et les relations de précédence entre eux la matrice peut être simplifiée comme suit (Figure 45):

	SE 1	SE 2	SE 3	SE 4	SE 5	Niveau
SE 1	0	1	0	0	0	1
SE 2	1	0	1	0	0	2
SE 3	0	1	0	1	1	3
SE 4	0	0	1	0	1	2
SE 5	0	0	0	0	0	0

Figure 45 : Matrice de précédence pour les modules.

1.2.5.2 Génération de l'arbre de désassemblage

La matrice de précedence pour les modules nous permet de déterminer la séquence de désassemblage à l'aide des niveaux de désassemblage par la construction de l'arbre de désassemblage présenté en Figure 46.

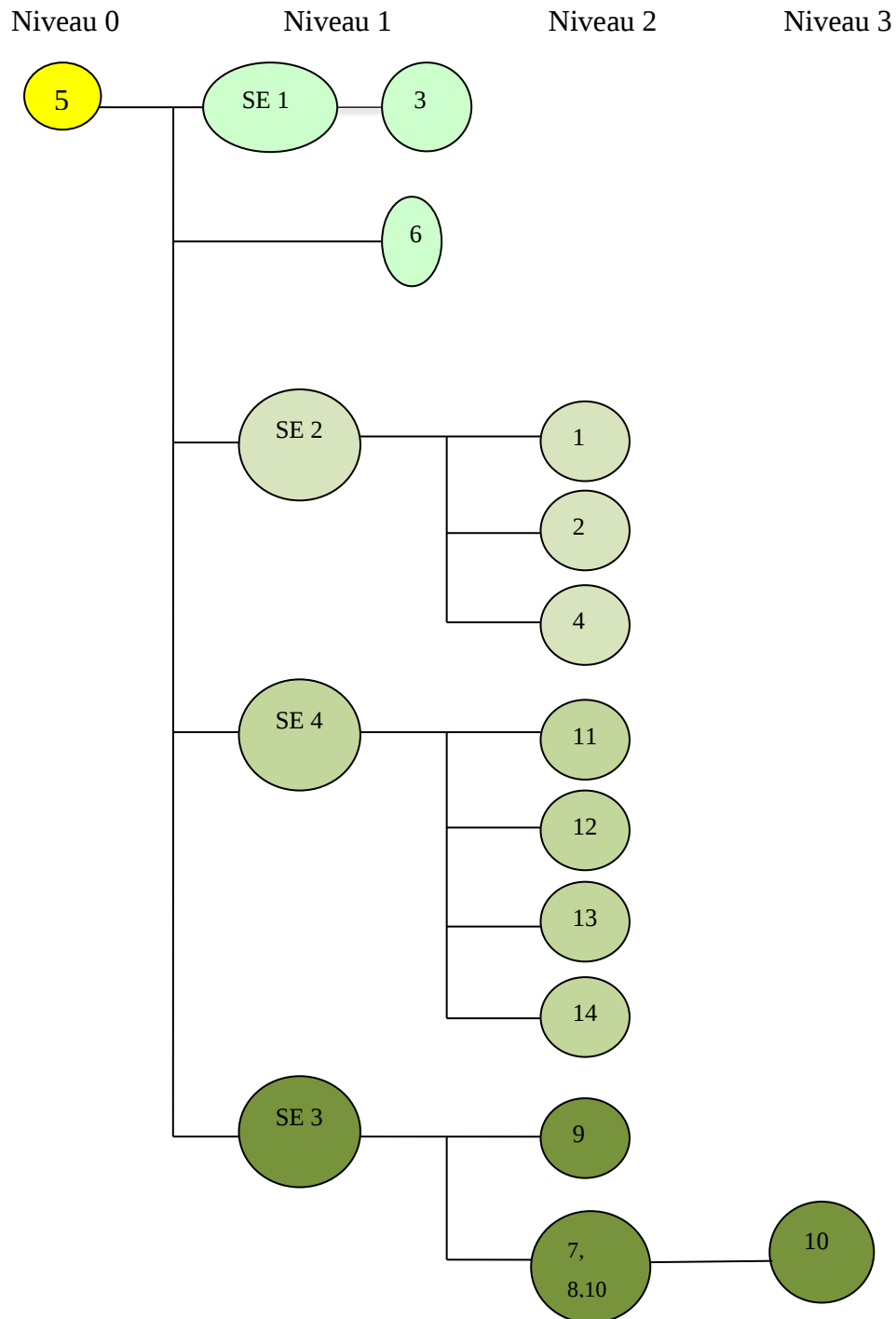


Figure 46 : Arbre de désassemblage.

1.3 Conclusion

Cette partie a été consacrée à l'application de la méthodologie proposée concernant l'intégration du désassemblage en fin de vie durant la phase de conception préliminaire. Une évaluation des solutions de conception d'une agrafeuse et d'une lampe de bureau a été présentée et leurs séquences de désassemblage ont été définies.

Conclusion et perspectives

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressées aux domaines de la conception modulaire pour le désassemblage et de la génération des séquences de désassemblage. L'intégration des problématiques de désassemblage du produit dans le processus de conception préliminaire est importante car ayant un impact non négligeable sur les différents aspects du produit : aspects fonctionnel, structurel, contextuel...

C'est la raison pour laquelle, l'objectif de notre travail de recherche a été de proposer une méthode de conception modulaire intégrant les problématiques de désassemblage dans le processus de conception préliminaire.

Dès lors, l'introduction générale a présenté le contexte scientifique qui nous a permis de définir la problématique de notre travail de recherche et les objectifs à poursuivre

Dans l'état de l'art, constitué de deux chapitres, nous avons présenté une étude bibliographique des travaux scientifiques déjà réalisés relatifs aux domaines de la conception intégrée, de la conception pour le désassemblage et de la définition/génération de séquences de désassemblage. Cet état de l'art nous a permis de nous situer, de manière précise par rapport aux travaux majeurs dans les domaines concernés. Il en résulte des besoins en modèle et une méthodologie de conception intégrée du couple produit/processus de désassemblage.

Dans la partie contribution scientifique, nous avons exposé dans le chapitre 3 un modèle permettant la représentation des informations associées aux domaines du produit et du processus de désassemblage a été défini. Puis un cadre méthodologique de conception modulaire proactive orienté désassemblage qui vise à définir la séquence de désassemblage optimale en phase préliminaire du processus de conception du produit afin d'apporter un contexte de désassemblage à l'architecte produit et aux concepteurs est présenté dans le chapitre 4. Ce cadre méthodologique peut être décomposé en plusieurs approches. Une approche de conception modulaire. Une approche basée sur un algorithme de définition des séquences de désassemblage admissibles du produit.

Dans le chapitre 5, le modèle et le cadre méthodologique sont validés par l'expérimentation sur différents produits. À titre d'exemple, ils sont illustrés sur la conception modulaire d'une agrafeuse et d'une lampe de bureau

En perspective, une approche permettant la définition d'un contexte de désassemblage qui servira de support aux concepteurs pour définir la géométrie des composants du produit sera étudié. Cette approche permet de considérer les informations relationnelles et les informations issues de la séquence de désassemblage pour la définition d'un contexte de désassemblage.

Les perspectives qui peuvent être envisagées sont multiples, tant dans le domaine de la conception orientée désassemblage que dans le domaine de définition/planification de séquences de désassemblage.

Nous proposons de considérer les contraintes des métiers situés dans les différentes phases du cycle de vie des produits (maintenance, remanufacturing...), en conception conceptuelle, ainsi que dans la définition/planification de séquences de désassemblage.

Nous proposons également de développer un outil informatique comme support de la méthodologie proposée (évaluation du désassemblage et génération de séquence de désassemblage) et de l'intégrer dans le cadre d'une « *application métier* » aux systèmes classiques de CAO existants, contribuant ainsi à l'insertion de la modélisation des opérations de désassemblage dans le processus de développement du produit (PDP).

Bibliographie

Addouche, S. (2003). *Thèse de doctorat : Contribution à une démarche de conception optimisée des processus de désassemblage*. Franche-Comté: Université de Franche-Comté.

Agard, B. (2002). *Thèse de doctorat : Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité*. Institut National Polytechnique de Grenoble.

Agard, B., & Tollenaere, M. (2002). Conception d'assemblages pour la customisation de masse. *Mécanique & Industrie* , 3 (2), 113-119.

Arthur, C. (2014). *Mémoire de Maitrise : Commerce illégal des déchets: une approche exploratoire pour identifier ses facteurs déterminants*. École Polytechnique de Montréal.

Baldwin, C. Y., & Clark, K. B. (2000). Design Rules: The Power of Modularity Design. Dans *ISBN 0262024667* (p. pp.471). MIT Press.

Bourjault, A. (1984). *Thèse d'État: Contribution d'une approche méthodologique de l'assemblage automatisé: élaboration automatique des séquences opératoires*. Université de Franche-Comté.

Brennan, L., Gupta, S., & Taleb, K. (1994). Operations Planning Issues in an Assembly/Disassembly Environment. *International Journal of Operations & Production Management* , 14 (9), 57-67.

Chevron, D., David, B., Binder, Z., & Descotes-Genon, B. (2000). *La conception du processus de désassemblage du produit selon le scénario de fin de vie*. Chambéry: Journée PRIMECA.

Das, S. K., & Naik, S. K. (2002). Process planning for product disassembly. *International Journal of Production Research* , 40 (6), 1335-1355.

Das, S. K., Yedlarajiah, P., & Narendra, R. (2000). An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost. *International Journal of Production Research* , 38 (3), 657-673.

Desai, A., & Mital, A. (2003). Evaluation of disassemblability to enable design for disassembly in mass production. *International Journal of Industrial Ergonomics* , 32 (4), 265-281.

Dong, T., Zhang, L., Tong, R., & Dong, J. (2006). A hierarchical approach to disassembly sequence planning for mechanical product. *International Journal Advanced Manufacturing Technology* , 30 (5-6), 507-520.

Dowie, T. A. (1995). *PhD thesis : A disassembly planning and optimisation methodology for design*. Manchester: Department of mechanical Engineering, Design and Manufacture the Manchester Metropolitan University,.

Dowie, T. A., & Simon, M. (1994). *Guidelines for designing for disassembly and recycling*. Manchester Metropolitan University.

Dutta, D., & Woo, T. (1995). Algorithm for multiple disassembly and parallel assemblies. *Journal of Engineering for Industry* , 117 (1), 102-109.

Ericsson, A., & Erixon, G. (1999). Controlling design variants: Modular product platforms. (p. pp145). New York: ASME press.

Erixon, G. (1996, June 3-4). Modular Function Deployment (MFD), Support for Good Product Structure Creation. *2nd WDK Workshop on Product Structuring* .

Failli, F., & Dini, G. (2001). Optimization of disassembly sequences for recycling of end-of-life products by using a colony of ant-like agents. *Engineering of Intelligent Systems* , 2070, 632-639.

Gerner, S. (2001). *Thèse de doctorat : Génération du processus de désassemblage automatisé à l'aide d'un logiciel de CFAO et évaluation du recyclage d'un produit en fin de vie*. Grenoble: Institut National Polytechnique de Grenoble.

- Giudice, F., & Fargione, G. (2007). Disassembly planning of mechanical systems for service and recovery: A genetic algorithm based approach. *Journal of Intelligent Manufacturing* , 18 (3), 313-329.
- Gungor, A., & Gupta, S. (1997). An evaluation methodology for disassembly process. *Computers & Industrial Engineering* , 33 (1-2), 329-332.
- Gungor, A., & Gupta, S. (2001). Disassembly sequence plan generation using a branch-and-bound algorithm. *International Journal of Production Research* , 39 (3), 481-509.
- Heissel, H., & Meye-krahmer, K. (1995). Auf dem Weg zueiner okologischen Stoffwirtschaft. *Gaia – Ecological Perspectives in Science, Humanities, and Economics* , 4 (2).
- Homem de Mello, L. S., & Sanderson, A. C. (1990). AND/OR Graph Representation of Assembly Plans. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* , 6 (2), 188-199.
- Huang, Y., & Huang, C. (2002). Disassembly matrix for disassembly processes of products. *International Journal of Production Research* , 40 (2), 255-273.
- Jabbour, T., & Mascle, C. (1998). A Database for the representation of assembly features in mechanical products. *International Journal Of Computational Geometry & Applications* , 8 (5-6).
- Jeanet, A. (1998). Les objets intermédiaires dans la conception - Eléments pour une sociologie des processus de conception. *Sociologie du Travail* , 40 (3), 291-319.
- José Flores, A., & Tollenaere, M. (2005). Modular and Platform methods for product family design: Literature analysis. 16 (3).
- Kang, J. (2005). *PhD thesis : Non-linear disassembly planning for increasing the end-of-life value of products*. Lausanne: École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Kongar, E., & Gupta, S. (2006). Disassembly sequencing using genetic algorithm. *International Journal Advanced Manufacturing Technology* , 30 (5-6), 497-506.

- Kongar, E., & Gupta, S. (2001). Genetic algorithm for disassembly process planning. Dans *Proceedings of the SPIE International Conference on Environmentally Conscious Manufacturing II* (pp. 54-62). Newton, Massachusetts.
- Kriwet, A., Zussman, E., & Seliger, G. (1995). Systematic integration of design-for-recycling into product design. *International Journal of production economics* , 38 (1), 15-22.
- Kroll, E., & Carver, B. S. (1999). Disassembly analysis through time estimation and other metrics. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* , 15 (3), 191-200.
- Kroll, E., & Hanft, T. A. (1998). Quantitative evaluation of product disassembly for recycling. *Research in Engineering Design* , 10 (1), 1-14.
- Kroll, E., Beadsley, B., & Parulian, A. (1996). A methodology to evaluate ease of disassembly for product recycling. *IIE Transactions* , 28 (10), 837-845.
- Kuo, T., Zhang, H. C., & Huang, S. (2000). Disassembly analysis for electromechanical products: a graph-based heuristic approach. *International Journal of Production Research* , 38 (5), 993-1007.
- Lambert, A. J. (2003). Disassembly sequencing: A survey. *International Journal of Production Research* , 41 (16), 3721-3759.
- Lambert, A., & Gupta, S. (2005). *Disassembly modelling for assembly, maintenance, reuse, and recycling* (éd. CRC Press).
- Lee, K., & Gadh, R. (1998). Destructive disassembly to support virtual prototyping. *IIE Transactions* , 30 (10), 959-972.
- Lee, Y. Q., & Kumana, S. (1992). Individual and group disassembly sequence generation through freedom and interference spaces. *Journal of Design and Manufacturing* , 2, 143-154.
- Li, J. R., Khoo, L. P., & Tor, S. B. (2002). A Novel Representation Scheme for Disassembly Sequence Planning. *International Journal Advanced Manufacturing Technology* , 20 (8), 621-630.

- Moore, K. E., Gungor, A., & Gupta, S. (2001). Petri net approach to disassembly process planning for products with complex AND/OR precedence relationships. *European Journal of Operational Research* , 135 (2), 428-449.
- Murayama, T., Oba, F., Abe, S., & Yamamichi, Y. (2001). Disassembly Sequence Generation using Information Entropy and Heuristics for Component Replacement. *Proceedings of the IEEE International Symposium* , 208-213.
- Pahl, G., & Beitz, W. (1996). *Engineering Design: a Systematic Approach* (éd. 2nd édition). London: Springer-Verlag.
- Pomares, J., Puente, S. T., Candelas, F., & Gil, P. (2004). Virtual disassembly of products based on geometric models. *Computers in Industry* , 55 (1), 1-14.
- Sabaghi, S., Mascle, C., & Baptiste, P. (2016). Evaluation of products at design phase for an efficient disassembly at end-of-life. *Journal of Cleaner Production* , 116, 177-186.
- Seo, K.-K., Park, J.-H., & Jang, D.-S. (2001). Optimal Disassembly Sequence Using Genetic Algorithms Considering Economic and Environmental Aspects. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , 18 (5), 371-380.
- Shyamsundar, N., Ashai, Z., & Gadh, R. (1998). Geometry-based metric formulation and methodology to support virtual design for disassembly. *Engineering Design & Automation* , 4 (1), 13-26.
- Simon, M., Mc Laren, J., & Dowie, T. A. (1996). *Rapport technique : Feasibility of a common indexing system for recycling of electronic products*. Manchester, Royaume-Uni: Manchester Metropolitan University.
- Srinivasan, H., & Gadh, R. (1998). A geometric algorithm for single selective disassembly using wave propagation abstraction. *Computer-Aided Design* , 30 (8), 603-613.
- Srinivasan, H., & Gadh, R. (2002). A non-interfering selective disassembly sequence for components with geometric constraints. *IIE Transactions* , 34, 349-361.

Srinivasan, H., & Gadh, R. (2000). Efficient geometric disassembly of multiple components from an assembly using wave propagation. *Journal of Mechanical Design* , 122 (2), 179-184.

Stone, R. B., Wood, K. L., & Crawford, R. H. (2000). A heuristic method for identifying modules for product architectures. *Design Studies* , 21 (1), 5-31.

Stone, R. W. (1998). *Heuristic Method to Identify Modules from a Functional Description of a Product*. Atlanta, GA: Proceedings of DETC98 DETC98/DTM -5642.

Subramani, A. K., & Dewhurst, P. (1991). Automatic Generation of Product Disassembly Sequences. *CIRP Annals- Manufacturing Tehnology* , 40 (1), 115-118.

Suh, N. P. (1995). Axiomatic Design of Mechanical Systems. *Journal of Mechanical Design* , 117 (B), 2-10.

Tianwang, D., Ling, Z., Ruofeng, T., & Jinxiang, D. (2006). A hierarchical approach to disassembly sequence planning for mechanical product. *International Journal Advanced Manufacturing Technology* , 30 (5-6), 507-520.

Tichkiewitch, S., Chapa, E., & Belloy, P. (1995). Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée. *Congrès International de Génie Industriel*. Montréal.

Torres, F., Puente, S. T., & Aracil, R. (2003). Disassembly Planning Based on Precedence Relations among Assemblies. *International Journal Advanced Manufacturing Technology* , 21 (5), 317-327.

Touzanne, F. (2002). *Thèse de doctorat : Contribution à la méthode de conception des systèmes de désassemblage des produits en fin de vie*. Franche-comté: Université de Franche-Comté.

Tripathi, M., Agrawal, S., Pandeyc, M., Shankar, R., & Tiwari, M. (2009). Real world disassembly modeling and sequencing problem: Optimization by Algorithm of Self-Guided Ants (ASGA). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* , 25 (3), 483-496.

Tseng, Y., Kao, H.-T., & Huang, F.-Y. (2009). Integrated assembly and disassembly sequence planning using a GA approach. *International Journal of Production Research* , 48 (20), 1-23.

- Veerakamalmol, P., & Gupta, S. M. (2002). A case-based reasoning approach for automating disassembly process planning. *Journal of Intelligent Manufacturing* , 13 (1), 47-60.
- Wang, J. F., Liu, J. H., Li, S. Q., & Zhong, Y. F. (2003). Intelligent selective disassembly using the ant colony algorithm. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM* , 17 (4-5), 325-333.
- Woo, T. C., & Dutta, D. (1991). Automatic disassembly and total ordering in three dimensions. *Journal of engineering for industry* , 113 (2), 207-213.
- Xue, J., Qian, S., & Zhang, Y. (2010). Disassembly sequence planning based on ant colony optimization algorithm. *IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications* , 1125-1129.
- Zeid, I., Gupta, S., & Bardasz, T. (1997). A case-based reasoning approach to planning for disassembly. *Journal of Intelligent Manufacturing* , 8 (2), 97-106.
- Zhang, X., & Zhang, S. Y. (2010). Product cooperative disassembly sequence planning based on branch-and-bound algorithm. *International Journal Advanced Manufacturing Technology* , 51 (9-12), 1139-1147.
- Zussman, E., Kriwet, A., & Seliger, G. (1994). Disassembly oriented assessment methodology to support design for recycling. *Annals of the CIRP* , 43 (1), 9-14.