



**Titre:** Nouvelle méthode de désassemblage virtuel pour la génération de gammes  
Title:

**Auteur:** Bogdan Alexandru Balasoiu  
Author:

**Date:** 2002

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Balasoiu, B. A. (2002). Nouvelle méthode de désassemblage virtuel pour la génération de gammes [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.  
Citation: <https://publications.polymtl.ca/57027/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/57027/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Christian Mascle  
Advisors:

**Programme:** Génie mécanique  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

NOUVELLE MÉTHODE DE DÉSASSEMBLAGE VIRTUEL  
POUR LA GÉNÉRATION DE GAMMES

BOGDAN ALEXANDRU BALASOIU  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE MÉCANIQUE)

JANVIER 2002

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

NOUVELLE MÉTHODE DE DÉSASSEMBLAGE VIRTUEL  
POUR LA GÉNÉRATION DE GAMMES

présenté par: BALASOIU Bogdan Alexandru

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

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

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., président

M. MASCLE Christian, Doctorat ès sciences, membre et directeur de recherche

M. BARON Luc, Ph.D., membre

*À ma famille*

## REMERCIEMENTS

D'abord, je voudrais remercier tout particulièrement mon directeur de recherche, le professeur Christian Mascle, et lui témoigner ma gratitude pour l'appui scientifique et financier, pour sa disponibilité ainsi que pour ses précieux conseils. La réalisation de cette recherche a été possible grâce à son aide continue ; je lui exprime mon entière reconnaissance.

Je remercie aussi mes professeurs du programme de maîtrise pour leurs conseils, leurs remarques, et leurs suggestions pertinentes.

Je remercie tout spécialement mes beaux-parents Taitza et Rinu pour toute l'aide qu'ils m'ont accordée ; ils sont toujours près de moi et de ma famille.

Je remercie mes parents, Georgeta et Victor, qui, d'outre-mer, m'ont aidé et m'ont encouragé constamment dans cette démarche.

De tout mon cœur, je remercie mon épouse, Lorela-Adriana, pour sa présence, son aide précieuse et ses conseils, ainsi que ma fille Maria-Alexandra pour son sourire lumineux. À notre prochain enfant qui viendra bientôt, je lui dois une raison supplémentaire d'être heureux.

Merci à tous.

## RÉSUMÉ

La présente recherche porte sur le désassemblage pour l'assemblage, la maintenance et le recyclage.

L'objectif de cette recherche consiste à déterminer la meilleure gamme de désassemblage pour un composant d'un sous-ensemble ; cela a de grandes implications, autant du point de vue de la maintenance que du recyclage et de la réutilisation. Pour y arriver, on a dû créer un algorithme pour déterminer une gamme ayant un nombre minimal de composants à désassembler en tenant compte des critères de stabilité, de la forme géométrique, des opérations pouvant être faites en parallèle et des opérations irréversibles.

Ensuite, nous avons programmé l'algorithme et vérifié sa pertinence dans le traitement de plusieurs exemples de produits.

Le premier chapitre est une revue critique de la littérature concernant le processus de désassemblage. Le deuxième chapitre de ce mémoire est une synthèse qui passe en revue et présente, de manière générale, le travail fait dans les chapitres 3, 4 et 5.

Le troisième chapitre est un article qui a été soumis pour publication ; on y présente une méthode de désassemblage par la propagation de vagues et on donne quelques exemples de l'utilisation de l'algorithme de la propagation de vagues.

Le quatrième chapitre donne un aperçu global des deux articles soumis pour publication dans des revues scientifiques. Nous trouvons les principales idées présentes dans les deux articles, en faisant un parallélisme entre les deux nouvelles approches.

Le cinquième chapitre présente une nouvelle méthode ainsi qu'un nouvel algorithme de désassemblage d'un composant donné d'un ensemble de composants, en utilisant la propagation de vagues. Cet algorithme donne uniquement les vagues de désassemblage absolument nécessaires pour extraire un composant donné. L'algorithme a été codé en langage de programmation Visual Basic, version 6, et j'ai développé un logiciel appelé *WaveDisassembly*. Vers la fin de ce chapitre, on applique ce nouvel algorithme à quelques exemples concrets.

L'objectif de l'algorithme de désassemblage par la propagation de vagues est de déterminer la meilleure gamme de désassemblage pour un composant donné d'un ensemble. Cette méthode de désassemblage est performante, facile, précise et respecte l'ordre du désassemblage voulu.

## ABSTRACT

This research treats about the disassembly for the assembly, the maintenance and the recycling.

The objective of this research is to determinate the best disassembly sequence for a component of a sub-assembly because this has big implications from the maintenance, recycling and re-using points of view. In order to do that, we created an algorithm to determine a sequence having a minimal number of components to disassemble, taking into account the criteria of stability, geometrical form, operations, which can be done, in parallel and irreversible operations.

Following that, we programmed the algorithm and verified its pertinence in the treatment of several examples of the product.

The first chapter it's a literature review concerning the disassembly process. The second chapter of this memory is a synthesis, which reviews and presents in a global manner, the work done in the chapters 3, 4, and 5.

The third chapter consists in an article, where we find a disassembly method by the wave propagation and several examples of the utilisation of the algorithm of the wave propagation.



The fourth chapter makes a transition between both articles sent to the journals. We find the main ideas of both articles, by making a parallel between the two new approaches.

The fifth chapter presents a new algorithm for the disassembly by the wave propagation of a given component of a sub-assembly components. This algorithm gives only the disassembly waves absolutely necessary to extract a given component of an assembly. In the Visual Basic programme language, I implanted the algorithm and I developed a software, named *WaveDisassembly*. Finally, in several examples, we can see the algorithm's new applications.

The objective of this disassembly algorithm by the wave propagation is to determine the best disassembly sequence for a given component of an assembly. This method is high-performance, easy and respects the disassembly order.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	v
RÉSUMÉ .....	vi
ABSTRACT .....	viii
TABLE DES MATIÈRES .....	x
LISTE DES TABLEAUX .....	xiv
LISTE DES FIGURES .....	xv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	xvii
LISTE DES ANNEXES .....	xviii
AVANT-PROPOS .....	xix
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE CRITIQUE DES MÉTHODES DE DÉSASSEMBLAGE .....	4
1.1 Le concept de cycle de vie d'un produit .....	4
1.2 Contrainte environnementale et impact sur le désassemblage .....	9
1.3 Diverses manières d'effectuer le désassemblage .....	12
1.4 Le désassemblage sélectif .....	22
CHAPITRE 2 SYNTHÈSE DU MÉMOIRE .....	24
2.1 Considérations générales concernant le processus de désassemblage .....	24

2.2 Synthèse du chapitre 3 .....	26
2.3 Synthèse du chapitre 4 .....	28
2.4 Synthèse du chapitre 5 .....	29

## CHAPITRE 3 DISASSEMBLY FOR ASSEMBLY, MAINTAINABILITY AND RECYCLABILITY .....

3.1 Abstract .....	31
3.2 Nomenclature .....	32
3.3 Introduction .....	33
3.4 State of the art .....	36
3.4.1 The life-cycle concept of a product .....	36
3.4.2 Environmental constraint .....	38
3.4.3 Desassemblability process planning and design for maintenance and recycling .....	40
3.4.4 Disassembly using the concept of wave propagation .....	47
3.5 Reversible and irreversible operations in disassembly process .....	49
3.6 New method for disassembly using the wave propagation concept .....	52
3.6.1 Application context of the algorithm proposed .....	52
3.6.2 The steps of the wave propagation algorithm .....	53
3.6.2.1 The initial matrix (the matrix $A$ ) .....	55
3.6.2.2 Construction of the matrix $B$ from the matrix $A$ (branch step) .....	56

3.6.2.3 Wave construction (bound step) .....	59
3.6.3 Comparison with a closed method: <i>PERT</i> .....	60
3.7 Results and discussions .....	61
3.8 Conclusion .....	69
3.9 Bibliography .....	71

## CHAPITRE 4 VERS UNE NOUVELLE APPROCHE DE DÉSASSEMBLAGE EN UTILISANT LA PROPAGATION DE VAGUES .....

79

4.1 Désassemblage par la propagation de vagues .....	79
4.2 Présentation d'un nouvel algorithme de désassemblage sélectif .....	81
4.3 Étapes de notre l'algorithme sélectif de désassemblage par vagues .....	82
4.4 Parallélisme entre les deux approches .....	86

## CHAPITRE 5 ALGORITHMIC SELECTION OF A DISASSEMBLY SEQUENCE OF A COMPONENT BY A WAVE PROPAGATION METHOD .....

88

5.1 Abstract .....	88
5.2 Nomenclature .....	89
5.3 Introduction.....	90
5.4 State of the art .....	91
5.4.1 Overview .....	91
5.4.2 Design for disassembly .....	91
5.4.3 Wave propagation approach .....	94

5.4.4 Summary .....	97
5.5 Solution Approach and Algorithms .....	98
5.5.1 Application context of the algorithm proposed .....	98
5.5.1.1 Non-symmetric assumption .....	98
5.5.1.2 Disassembly of only one component .....	98
5.5.1.3 Assembly versus disassembly .....	99
5.5.2 Notations and definitions .....	99
5.5.3 The algorithm basis .....	101
5.5.4 The case of non-symmetric matrix .....	105
5.5.5 Disassembly cases of different components in the same product ....	105
5.6 Numerical results obtained with the algorithm .....	106
5.7 Conclusion .....	114
5.8 References .....	115
CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE .....	119
CONCLUSION .....	124
BIBLIOGRAPHIE .....	127
ANNEXES .....	137

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 2.1	Étapes du processus de recyclage d'un produit .....	26
Tableau 3.1	Phases and strategies of product life-cycle .....	36
Tableau 5.1	Parts list for the power brake .....	109
Tableau 5.2	Parts list for the pump with sprocket wheels .....	112

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Plan du désassemblage et du recyclage .....	17
Figure 1.2	Assemblage d'un bloc et 2 vis .....	21
Figure 2.1	Éléments pris en considération dans le processus de désassemblage ....	25
Figure 3.1	Phases of product life cycle .....	34
Figure 3.2	Example of two disassembly sequences .....	49
Figure 3.3	Welded support .....	51
Figure 3.4	Example of two disassembly sequences containing irreversible operations .....	51
Figure 3.5	Matrix $A$ .....	56
Figure 3.6	Graph $A$ .....	56
Figure 3.7	Initial matrix $B$ .....	56
Figure 3.8	Intermediate matrix $B$ .....	57
Figure 3.9	The final matrix $B$ .....	58
Figure 3.10	Graph $B$ .....	58
Figure 3.11	Matrix $B'$ .....	59
Figure 3.12	Graph $B'$ .....	59
Figure 3.13	Matrix $B''$ .....	60
Figure 3.14	Graph $B''$ .....	60
Figure 3.15	Piston mechanism .....	62
Figure 3.16	Matrices $A$ and $B$ for the crank-arm body .....	63

Figure 3.17	Disassembly waves for crank-arm body .....	64
Figure 3.18	Electric motor .....	66
Figure 3.19	Matrices for the first disassembly sequence for the motor .....	67
Figure 3.20	Matrices of the second disassembly sequence for the motor .....	68
Figure 3.21	The disassembly waves of the motor .....	68
Figure 4.1	Graphe A .....	83
Figure 4.2	Graphe B .....	84
Figure 4.3	Graphe C .....	85
Figure 4.4	Graphe D .....	85
Figure 5.1	The results with Srinivasan's and Gadh's method .....	97
Figure 5.2	Matrices of the immediate predecessors .....	106
Figure 5.3	The disassembly waves .....	107
Figure 5.4	Exploded view drawing for the power brake .....	108
Figure 5.5	Matrix of the immediate predecessors for the power brake .....	110
Figure 5.6	The disassembly waves for power brake .....	110
Figure 5.7	The pump with sprocket wheels .....	111
Figure 5.8	Matrices of the immediate predecessors .....	113
Figure 5.9	The disassembly waves for the pump with sprocket wheels .....	113



## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

- $PV$  propagation de vagues
- $S$  sous-ensemble
- $C_x$  composant pour lequel on étudie  $PV$
- $C_i, C_j$  composants de sous-ensemble  $S$ , différents de  $C_x$
- $n_S$  nombre de composants à désassembler d'une gamme de désassemblage
- $\Delta$  désassemblabilité
- $MA_{C_j}$  composants adjacents avec lesquels  $C_j$  est en contact
- $RI_{C_i}^{C_j}$  influence de l'enlèvement ( $i \neq j$ )
- $IO_{C_i}^{C_j}$  opération irréversible ( $i \neq j$ )
- $t$  temps
- $\tau_i$  vague
- $n_S$  nombre de composants de la gamme de désassemblage
- $W$  composants sur toute la longueur du front de la vague pour  $t = a$
- $OS$  gamme optimale
- $n$  nombre de composants du sous-ensemble.
- $A$  matrice des prédécesseurs immédiats de type  $n \times n$   
 $A(i, j) = 1$  ssi immédiatement avant  $i$ , il faut désassembler  $j$
- $B$  sous-matrice de  $A$  contenant seulement les composants liés, de près ou de loin, au composant  $C_x$ , à désassembler.

**LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE I Liste des contributions originales .....137

ANNEXE II Guide d'utilisation du logiciel *WaveDisassembly* .....139

## AVANT – PROPOS

Dans l’histoire de l’humanité, « la révolution technique » est relativement récente, car elle n’a même pas deux siècles. De plus, à « l’intérieur de cette révolution technique », on constate un rythme d’évolution de plus en plus rapide.

Au XIX<sup>e</sup> siècle, on était préoccupé par la découverte de nouveaux produits. Au XX<sup>e</sup> siècle, la production dans les pays développés était caractérisée par la diversité et l’abondance.

Depuis une dizaine d’années, l’environnement a subi les effets négatifs majeurs générés par le développement vertigineux de l’industrie. Il est donc devenu une priorité de recycler le plus possible les produits. C’est un impératif de protéger notre terre, notre atmosphère, ... bref, c’est une question de protéger « notre vie et la vie de nos descendants ».

Les gouvernements de plusieurs pays (parmi lesquels le Canada) ont adopté de nouvelles lois pour protéger le milieu environnemental<sup>1</sup>. Plus précisément, de quoi s’agit-il ?

---

<sup>1</sup>Pour alléger la présentation de ce texte, nous utilisons l’expression « l’environnement » au lieu de « le milieu environnemental ».

On doit diminuer la pollution de l'environnement. On doit diminuer l'émission des gaz toxiques. Une des sources de pollution réside dans le processus de fabrication des produits ; ce processus peut être rendu moins polluant si on recycle davantage.

Trouver les moyens de rendre plus facile le processus de recyclage, et d'en diminuer les coûts est donc d'une importance capitale.

Actuellement, tant pour des raisons d'ordre économique que pour des raisons d'ordre environnemental, on se penche sur la prolongation du cycle de vie des produits complexes.

La méthode la plus facile est « la réparation ». Dans ce cas, on fabrique des pièces de rechange pour certaines parties du produit qui ont un coefficient d'usure plus grand que les autres parties ; si une pièce se brise ou arrive vers la fin du cycle de sa vie avant les autres, on remplace seulement cette pièce.

Dans le cas où la réparation n'est pas possible, on s'oriente vers le « reconditionnement », c'est-à-dire la « remise à neuf du produit ». En pratique, cette opération peut être relativement simple, complexe ou impossible à réaliser. À part le facteur de faisabilité du reconditionnement d'un produit, on doit tenir compte aussi des facteurs d'ordre économique. En fait, on est amené à trois variantes.

1. Si la remise à neuf est relativement facile à réaliser à un coût « raisonnable », on utilise le réconditionnement.
2. Si la remise à neuf est impossible, alors la seule manière de prendre soin de « notre » environnement, est d'envisager le recyclage. Si c'est possible de le réaliser à un coût raisonnable, on arrive à récupérer, dans une certaine mesure, une ou plusieurs matières premières qui ont été utilisées.
3. Si la remise à neuf est possible, mais est très difficile à réaliser et / ou le coût de cette opération est très élevé, alors il faut bien étudier les avantages et les inconvénients que présente l'opération de réconditionnement par rapport à l'opération de recyclage, lorsque cela est faisable.

Actuellement, les facteurs d'ordre environnemental s'imposent de plus en plus dans le processus de prise de décisions.

Il faut redéfinir le concept cycle de vie d'un produit ; il faut augmenter le plus possible sa durée, par une maintenance plus adéquate via les réparations. Par ailleurs, il faut recycler le plus possible. Pour réaliser ces objectifs, on doit accorder une attention accrue au processus de désassemblage. Ces dernières années, plusieurs chercheurs ont apporté leur contribution scientifique à ce nouveau domaine. Notre recherche s'inscrit, elle aussi, dans le même cadre.

Si le reconditionnement n'est pas retenu, on se trouve devant un produit complexe dont on ne sait pas quoi faire. Rarement, on garde ce produit pour des raisons particulières (expositions, souvenirs, etc.). Le plus souvent, il reste à déterminer les avantages et les inconvénients à le recycler ou à le jeter.

Avant 1990, quand la nécessité de protéger l'environnement n'avait pas l'ampleur qu'elle a maintenant, les décisions étaient prises en tenant compte surtout des facteurs d'ordre économique. Depuis, la situation a bien changé : aux facteurs d'ordre économique se sont ajoutés les facteurs d'ordre environnemental qui doivent être pris en compte avant de prendre des décisions importantes.

## INTRODUCTION

Ce mémoire de maîtrise est rédigé à partir d'articles. Ce mémoire est structuré en 5 chapitres. Dans le premier chapitre on a présenté une revue critique de la littérature pertinente concernant le désassemblage. Le deuxième chapitre contient une synthèse générale de tout le mémoire. Les chapitres 3 et 5, sont les versions originales des articles soumis à des journaux scientifiques spécialisés. Le chapitre 4 donne un aperçu global sur la problématique du désassemblage par la propagation de vagues, abordée dans le chapitre précédent et dans le chapitre suivant. Avant de finir ce mémoire par une conclusion, nous présentons une liste de nos contributions originales.

Nous voudrions avertir le lecteur que les chapitres 3 et 5, sont écrits en anglais et contiennent chacun leur bibliographie spécifique tels que nous les avons envoyés pour publication.

Le désassemblage des produits est un procédé utilisé depuis longtemps ; il est nécessaire pour effectuer la maintenance, la réutilisation, la réparation et le recyclage des produits ou de certaines de leurs composants. Depuis quelques années, les recherches s'orientent vers la prise en compte du désassemblage pour la maintenance ou pour le recyclage, depuis la phase de la conception même. Ainsi, les paramètres du coût, du matériel, du temps de désassemblage et des conditions de sûreté sont analysés avec rigueur avant de commencer le processus de désassemblage ; dans cette analyse on prend aussi en

considération les caractéristiques spécifiques des outillages et les machines utilisées lors du désassemblage.

On remarque que depuis quelques années, les ressources matérielles sont de plus en plus limitées et leur prix coûtant est de plus en plus élevé. Dans cette situation, on doit mettre l'accent sur la récupération des matériaux, ainsi que sur la conception du produit en tenant compte de l'ensemble de leur cycle de vie, de manière à obtenir une meilleure gamme de désassemblage pour la maintenance et pour le recyclage.

Lorsque le désassemblage et le recyclage sont pris en compte dès la phase de conception des produits, on peut réduire significativement les coûts reliés aux opérations qu'on doit effectuer à la fin de cycle de vie de ces produits. Pour y arriver, on doit étudier les différents scénarios possibles de recyclage. On doit aussi identifier les points faibles de la conception du produit considéré.

Nous présentons, dans la première partie de ce mémoire, une synthèse de ce mémoire. Nous continuons en développant la problématique associée au désassemblage pour l'assemblage, la maintenance et le recyclage. Plus précisément, dans ce mémoire nous nous sommes proposés les deux buts suivants :



1. Trouver plusieurs gammes de désassemblage pour un produit pour choisir ensuite, si possible, celle qui ne comporte pas de désassemblage irréversible ;
2. Trouver « la meilleure gamme de désassemblage », ayant un nombre minimal de composants à désassembler, en utilisant une méthode originale. Cette méthode présente quelques caractéristiques plus intéressantes que celles proposées dans la littérature.

Le chapitre 3, présente un article soumis au journal « *International Journal of Production Research* » (2001), dans lequel une nouvelle méthode de désassemblage par la propagation de vagues plus adaptée à la pratique courante du désassemblage est développée. L'article soumis au journal « *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* » (2002), est présenté dans le chapitre 5 ; il s'agit d'un nouvel algorithme de désassemblage par la propagation de vagues d'un composant donné faisant partie d'un ensemble de composants. L'algorithme a été codifié et un logiciel, appelé *WaveDiassembly*, développé ; le langage de programmation utilisé est le Visual Basic, Version 6.

Nous finissons ce mémoire avec une discussion générale, une conclusion et la bibliographie de cette recherche et la liste des contributions originales.

## **CHAPITRE 1**

### **REVUE CRITIQUE DES MÉTHODES DE DÉSASSEMBLAGE**

#### **1.1 Le concept de cycle de vie d'un produit**

Le cycle de vie d'un produit est établi dès la première phase de sa conception, quand on tient compte de l'hypothèse considérant que la plupart des matériaux peuvent être recyclés. Le problème qui se pose à la fin de la vie d'un produit consiste à réaliser un désassemblage le plus facilement possible, afin que le recyclage soit le plus complet ; cela implique aussi un tri des matériaux avec le reste du produit non réutilisable. On essaye de voir si c'est possible de réparer et de ré-usiner certaines composantes au lieu de les recycler. Dans ce cas, on doit s'assurer que les composantes réparées respectent les normes imposées concernant les qualités mécaniques, physique, qualitative, etc. Par ailleurs, on doit s'assurer que ces composantes soient en demande, avant de commencer ce processus.

Une conception adéquate d'un produit assure un désassemblage facile pour la maintenance, (ce qui aide à la prolongation de la durée de vie de ce produit), ou pour le recyclage sans broyage du produit. Cela implique plusieurs conditions telles : l'utilisation de certains matériaux facilement recyclables, qui ne perdent pas leurs qualités lors du processus de recyclage et un désassemblage facile. Beaucoup

d'informations se référant au « cycle de vie » apparaissent aussi sur la base d'une expérience dans le cadre du processus de conception et de fabrication.

Quand le produit arrive à la fin de sa vie, il existe plusieurs options dans le but de remettre en circulation des ressources matérielles, telles que la réutilisation, le recyclage et la refabrication. Une façon de diminuer le coût attaché à la dernière étape de fin de vie des produits est d'en tenir compte dès l'étape de la conception et d'effectuer un design qui permet un désassemblage facile pour la maintenance et pour le recyclage ; une bonne maintenance prolonge la durée de vie du produit.

Le concept du cycle de vie est considéré comme un processus important dans le cadre de l'opération de désassemblage. Selinger et al. (1998) présentent 5 critères qui influencent la durée de cycle de vie d'un produit. Il s'agit du prix du produit, de la période de vie du produit, de l'assurance de la qualité, de la maintenance, et des différentes utilisations du produit. En concluant cette recherche, les auteurs tiennent à souligner qu'une bonne maintenance prolonge la durée de vie du produit.

Johansen et al. (1997), ont présenté un modèle de cycle de vie d'un produit. L'objectif principal est d'évaluer la possibilité de réduire le volume total des déchets reliés à une production de masse et une consommation de masse. Les auteurs mentionnent qu'il y a plusieurs décennies, seule l'industrie a été considérée comme plus ou moins responsable pour les dommages environnementaux. Cependant, ce n'est pas l'industrie seule, mais la

société industrielle favorisant la production de masse qui crée la partie importante des dommages environnementaux. À cause du développement technologique, les consommateurs se sont vus fréquemment offrir des produits de meilleure qualité à un prix plus bas, basé sur des principes tels « le plus grand, le meilleur » ou « le plus, le meilleur ». Comme résultat de cette optique, la quantité de produits jetables s'est accrue rapidement. Les problèmes d'enfouissement sont causés principalement par les voitures, les biens électroniques et par les appareils électroménagers. Ces problèmes, couplés à une croissance attendue exponentielle dans le monde de la consommation nous force à réagir promptement.

Tomiyama (1997, 2000) a proposé une nouvelle méthodologie de conception du cycle de vie, en se préoccupant de la possibilité de fermeture du cycle de vie d'un produit. Les technologies s'améliorent de jour en jour et l'économie croît simultanément avec les technologies. La croyance en la croissance économique illimitée, basée sur la production de masse, la consommation de masse et les déchets de masse, ont commencé lorsque Henry Ford a introduit un système d'amélioration de la production dans la fabrication automobile. À moins de développer des technologies révolutionnaires, les limites environnementales et économiques vont sévèrement limiter la croissance économique. Pour résoudre ces problèmes, on a besoin de reconsidérer le paradigme courant de production de masse et poursuivre un paradigme nouveau de fabrication. Le nouveau paradigme devrait réduire ou limiter la production et la consommation (en volume) à une taille adéquate et contrôlable. Le volume de production devrait maintenir

un équilibre avec les contraintes naturelles et sociales. Les produits devraient avoir plus de valeur, en ajoutant largement de la connaissance et de la satisfaction dues au service rendu plutôt que des valeurs matérielles seulement. Cette dématérialisation requiert une connaissance du cycle de vie du produit qui devrait être accumulée, appliquée efficacement et avec flexibilité, afin de conduire un processus de développement acceptable. Un nouveau style d'ingénierie amène à généraliser un accroissement de la valeur ajoutée à chaque étape du cycle de vie du produit. Traditionnellement, la conception comprend seulement des concepts tels que la fonction, la forme, la tolérance, la performance, la fabrication, l'assemblage et le recyclage. Ces concepts, cependant, appartiennent seulement aux produits, mais pas à leur cycle de vie. La fermeture du cycle de vie du produit se fait par la refabrication, et par la réutilisation.

Nonomura et al. (1999a, 1999b) ont proposé une nouvelle méthode de conception du cycle de vie d'un produit et décrit un système de simulation du cycle de vie afin d'arriver au meilleur équilibre entre les facteurs économiques et les impacts environnementaux nocifs. Le but de la nouvelle tendance de conception du produit pour l'ensemble de son cycle de vie, est de bien équilibrer les facteurs économiques et les impacts environnementaux. Dû au développement technologique, les consommateurs se voient offrir de meilleurs produits à moindre prix qui sont ainsi rapidement consommés et jetés. Cela devient la source d'une variété de problèmes environnementaux, tels que le réchauffement global, les pluies acides et les déchets solides. Ainsi, on doit faire attention aux problèmes liés au cycle de vie du produit, incluant la conception, la

production, l'utilisation et l'élimination. Afin d'attaquer ces problèmes, il est nécessaire de rechercher des méthodes pour fermer le cycle de vie du produit, en considérant la faisabilité économique.

Rose et al. (1998) ont résumé les stratégies de fin de vie d'un produit, couramment utilisées en électronique et dans les industries, et ont identifié les caractéristiques du produit afin de guider les concepteurs dans la spécification des stratégies appropriées. Ce résumé indique que des caractéristiques du cycle de conception, du cycle de la technologie, la complexité fonctionnelle, le nombre de matériaux, le nombre des parties, etc. sont importants lors de la détermination de la stratégie de fin de vie. Les stratégies proposées pour la fin de vie d'un produit doivent inclure une combinaison de différentes options : la réutilisation, la re-fabrication, le recyclage primaire ou secondaire, l'incinération et l'enfouissement. Cette recherche propose une méthodologie qui guide les concepteurs de produits à choisir une stratégie optimale de fin de vie d'un produit ; pour les aider, les auteurs présentent un guide des stratégies de fin de vie spécifiques aux produits courants. Les études comparant des techniques variées de recyclage, de réutilisation et de re-fabrication de l'équipement électronique et des exemples d'applications dans différentes régions du monde, apportent aux concepteurs un excellent résumé des pratiques courantes. Les progrès rapides dans le développement de la technologie sont essentielles dans la réutilisation, la re-fabrication et le recyclage du matériel. Le désassemblage automatique des équipements électroniques montre des résultats prometteurs dans certaines applications. Les techniques manuelles de

désassemblage, utilisant un désassemblage innovateur des outils, montrent une amélioration substantielle dans les temps de désassemblage et préservent l'usage du produit. Comme les compagnies doivent supporter les coûts du traitement de fin de vie d'un produit, les leaders industriels doivent déterminer le coût et des schémas de récupération efficaces pour la dernière étape de la vie d'un produit.

## **1.2 Contrainte environnementale et impact sur le désassemblage**

Un produit ayant une conscience environnementale est le sujet provocateur présenté par Hattori et al. (1995). Depuis quelques années, les soucis de l'environnement sont devenus largement répandus. Les activités des industries semblent être responsables d'une variété de problèmes environnementaux, tels que la consommation de masse des matériaux et des ressources d'énergie, la génération de déchets, de substances toxiques, l'émission des gaz et le potentiel de destruction de l'ozone. En d'autres mots, une importante contribution afin de résoudre de tels problèmes environnementaux peut être faite en regardant les activités industrielles d'un point de vue plus environnemental. La norme technologique est de minimiser le fardeau écologique dans le système de production, le système de restauration et le marché, en satisfaisant des critères conventionnels, comme l'économie, la mise en marché et la productivité. L'importance de la réduction et de l'optimisation du fardeau environnemental d'un produit lors du cycle entier de vie (matériel – production – utilisation – recyclage – élimination) est aussi mis en relief et on met l'emphase sur ce point. Cette recherche a mis

principalement en évidence l'inventaire et le modèle, afin d'estimer le fardeau environnemental des produits présents et futurs. Comme la phase de conception est la première des étapes dans l'élaboration d'un produit, elle affecte le fardeau environnemental d'un produit. Il devient clair que « la conscience d'un produit environnemental » dépend principalement de la considération qui est donnée à des problèmes environnementaux depuis la phase de conception.

Hattori et al. (1999) ont développé les concepts énoncés en 1995. Pour un produit nouvellement conçu, les résultats de la sélection des parties qui peuvent être réutilisées et de celles qui seront jetées, peuvent aider un concepteur à reconsidérer sa sélection de matériaux ou la structure de la conception du produit. Dans cet article, les auteurs proposent une nouvelle sélection du modèle et du matériel recyclable en utilisant la programmation linéaire intégrée. Dans ce modèle, la tâche est de sélectionner des parties dans le but de maximiser le poids d'un matériel possiblement récupéré, tout en gardant un pourcentage désiré de pureté du matériel. Ce modèle a été modifié et étendu en additionnant de nouvelles contraintes comme la limite de la catégorie du matériel. Dans le but de réaliser la circulation des ressources, le système de restauration devrait être intégré au système de production. La considération coopérative entre la sélection matérielle et la conception de la structure peuvent donner une solution prometteuse afin de réaliser un recyclage avec une haute qualité du matériel. En d'autres mots, le recyclage devrait être réalisé dans le but d'avoir une circulation efficace des ressources. Le recyclage des matériaux doit être toujours une préoccupation, même si la



réutilisation doit être considérée en premier. Ces chercheurs ont développé une stratégie de conception pour la sélection des matériaux et la décision de structure pour les amener au recyclage. Dans ce système, les matériaux sont sélectionnés sur la base de la disponibilité commerciale, en résolvant les relations écologiques, fonctionnelles et économiques, critères qui aident le concepteur à faire son choix.

Boks et al. (1996) ont étudié des différences concernant les scénarios de fin de vie et la législation pour les produits électroniques. Dans le but de développer des produits, qui causent un minimum d'effets négatifs dans leur phase de fin de vie, les compagnies doivent établir les bonnes priorités de conception. Par exemple, il peut être étudié quel scénario de fin de vie du produit sera le plus approprié. Un autre facteur important est l'anticipation légale de la situation sur le marché de ce produit. Les différences lois internationales et régionales compliquent le problème. La composition courante des produits va probablement changer. Une augmentation va être observée dans le nombre des produits dans chaque catégorie de produits, de même que le nombre des différentes catégories. Les nouvelles technologies vont faire ressortir de meilleurs scénarios concernant la fin de vie des produits, même si une large variété de produits et le manque d'économies d'échelle peut construire d'importants obstacles pour l'implantation de telles technologies de fin de vie, tels que le désassemblage automatique et l'amélioration des technologies déjà utilisées.

Le concepteur devrait revoir et reprendre le travail de conception du produit, de telle manière que celui-ci soit facile à désassembler, que le processus de classification par catégories soit le plus facile possible et que les matériaux utilisés soient facilement recyclables. Ceci est le principale défi qu'on doit relever dans le processus moderne de conception d'un produit. C'est important de tenir compte dans le processus de désassemblage destructif de la possibilité d'apparition de destruction des arrêtes (bords, lignes d'intersections), ainsi que de la destruction de la face « visible » ; il peut y avoir même des destructions totales de quelques composantes ou la perte de la qualité d'une partie et, même, de la totalité d'un matériel.

### **1.3 Diverses manières d'effectuer le désassemblage**

Boothroyd (1987, 1992) est le créateur de la procédure de conception pour l'assemblage et le désassemblage. Il montre que envisager le désassemblage et le recyclage au stade de la conception va avoir de meilleurs bénéfices financiers à la fin du cycle de vie d'un produit.

Masui et al. (1999) ont proposé des stratégies utilisées couramment à la fin de vie d'un produit, dans les industries électroniques. Il existe deux caractéristiques principales qui servent de facteurs afin de catégoriser les produits appropriés en fin de vie : la durée de vie du produit et le cycle technologique. La conscience environnementale est maintenant un élément fondamental de la conception du produit dans plusieurs

industries. En ce moment, les compagnies réduisent les émissions toxiques, réduisent leur consommation d'énergie et éliminent des matériaux dangereux. En plus des effets environnementaux durant la fabrication et l'utilisation des produits, les compagnies doivent aussi assumer la responsabilité de retirer les produits à la fin de leur vie. Pour ces produits il y a des stratégies différentes de fin de vie, dépendant de leurs caractéristiques, comme l'usure de la vie du produit, le cycle technologique, les raisons qui font que ce produit soit désuet, le nombre de matériaux, la propreté du produit et le nombre de modules. Les stratégies de fin de vie peuvent inclure une combinaison de réutilisation, de refabrication, de recyclage (primaire ou secondaire), d'incinération et des options d'élimination. Afin de réaliser les stratégies idéales de fin de vie d'un produit et d'augmenter la recyclabilité, un désassemblage efficace est essentiel pour chacune des catégories des produits. Le but du désassemblage diffère dépendant de la catégorie de chaque produit ; cependant, un désassemblage efficace est la clé pour réaliser la stratégie idéale de fin de vie pour chacune des catégories des produits.

Touzanne et al. (1999) présentent une méthode utilisée pour la représentation du processus de désassemblage basée sur l'évaluation des temps du désassemblage. Ainsi, les auteurs développent cette méthode sur 3 niveaux, commençant par le niveau de production, continuant avec le niveau opérationnel et terminant avec le niveau du système tout entier. On insiste sur 2 aspects : la réutilisation des composantes et la revalorisation des matériaux (c'est-à-dire la réparation et le reconditionnement des matériaux afin de les réutiliser). Le processus de désassemblage est étudié du point de

vue de la séparation de composantes, qui devrait être bonne et facile, dans le but de réutiliser les composants encore en bon état et de recycler les autres. Il existe deux catégories de désassemblage : non-destructif et destructif. La manière non-destructive est celle utilisée lorsque que les opérations sont réversibles. Après la séparation, les composants réutilisables peuvent réintégrer le processus de production. Ainsi, le processus de désassemblage doit être clairement défini afin de savoir ce qui sera réutilisé, ce qui sera recyclé et éventuellement ce qui sera éliminé. Il faut tenir compte du processus de dégradation qui apparaît, par exemple : la corrosion, la rouille, la destruction de la forme géométrique, des parties qui disparaissent, ainsi que des changements de la qualité de chaque composante du produit, lors de sa période d'utilisation.

Les auteurs proposent une topologie du processus de désassemblage de la manière suivante : le processus de démontage de l'attachement, la séparation, la destruction de quelques-uns des composants (géométriques et physiques), le contrôle de la qualité des composants qui pourront être réutilisés, leur manipulation, leur emballage et leur entreposage. Le processus entier de désassemblage est représenté sur la base des diagrammes qui utilisent des symboles standardisés dans le processus du désassemblage. Ainsi, nous pouvons reconnaître tous les temps opérationnels et le cycle entier du processus de désassemblage.

Masclé (1990) a présenté une méthode de désassemblage pour un produit ; le modèle des liaisons fonctionnelles entre les parties aide à distinguer un simple contact d'un attachement, ainsi que les composants des sous-assemblages. L'auteur met l'accent sur la présence des nœuds d'attachement. Masclé (1998) dans sa recherche sur le désassemblage définit la différence entre un sous-ensemble et un sous-assemblage, et montre comment extraire un sous-assemblage a priori, a posteriori et à propos.

Woo et al. (1991, 1992) ont développé un algorithme pour désassembler les ensembles multiples et parallèles, générant une gamme pour le désassemblage et / ou l'assemblage, en utilisant un « arbre de désassemblage ». Ils ont effectué, une recherche extensive pour la génération de la gamme de désassemblage ainsi que pour la classification des ensembles en utilisant leur complexité géométrique.

Moore et al. (1998) ont présenté une approche basée sur un réseau Petri, afin de générer un désassemblage à partir des plans, pour le recyclage d'un produit. Une matrice géométrique basée sur les contraintes de précédence de désassemblage est créée. Ensuite, un algorithme est introduit, ce qui automatiquement génère un réseau de Petri de désassemblage d'une matrice de précédence de désassemblage.

D'après Lee (1998), la conception en vue du désassemblage est de plus en plus importante, pour la fin de vie du produit, mais aussi durant la période de vie, quand la maintenance doit être assurée. Ainsi, un produit doit être facilement réparable dans le

cadre d'une défection, pour pouvoir être réutilisé le plus tôt possible. Dans les sociétés modernes, on met de plus en plus l'accent sur le recyclage et l'environnement. L'auteur précise que durant les dernières années le prix des matériaux primaires a connu une croissance suffisante pour qu'on s'intéresse à la conception d'un produit de manière à effectuer un désassemblage facile et efficace.

Le désassemblage peut être classé de plusieurs manières :

1. désassemblage : total ou partiel ;
2. désassemblage : parallèle ou séquentiel ;
3. désassemblage : de formes géométriques standardisées connues ou non ;
4. désassemblage : destructif ou non-destructif.

L'opération de désassemblage peut être partiellement ou totalement destructive. Donc, en fonction de l'intérêt qu'on porte aux composantes, on choisit aussi la variante du désassemblage.

Kanai et al. (1999) proposent un modèle de représentation graphique (figure 1.1) du processus de désassemblage et de planification du recyclage pour les produits commerciaux.

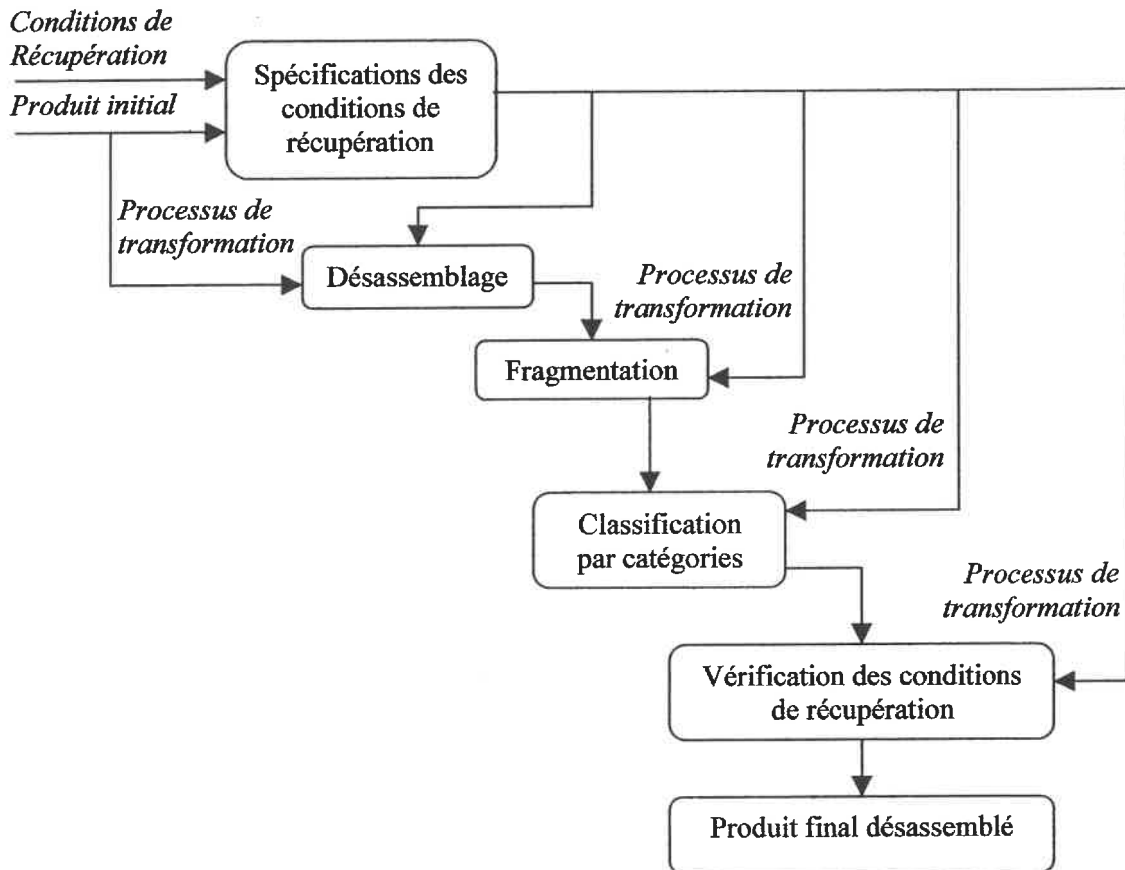


Figure 1.1 Plan du désassemblage et du recyclage

Le désassemblage destructif, la séparation en morceaux, en fragments et l'arrangement par catégories des matériaux est le principal thème que les auteurs proposent. Ainsi, ils développent une méthode constituée de 4 types de graphes de la manière suivante :

1. Un graphe pour les sous-ensembles ou les fragments (on considère qu'un sous-ensemble se « transforme » en fragments après que la fragmentation a été réalisée ; un

fragment contient des constituants fragmentés, chacun d'entre eux étant fait d'un seul matériel) ;

2. Un graphe de connexion des composants ou des fragments ; un fragment peut être formé d'un ou de plusieurs composants, tous étant faits du même genre du matériel.

3. Un graphe du processus de désassemblage, de démontage et d'arrangement par catégories ;

4. Un graphe pour les composants qui peuvent être récupérés (réutilisés ou recyclés) ; on sépare les composants qui peuvent être récupérés de ceux qui sont éliminés.

Les résultats des simulations de cycle de vie indiquent que le service de maintenance et les services de réutilisation, de refabrication et de recyclage sont la clé pour réduire la consommation des matériaux et d'énergie, sans diminuer les ventes des compagnies.

Selinger et al. (1999a) ont présenté l'importance du recyclage des matériaux au 21<sup>ème</sup> siècle. L'idée du recyclage est étudiée depuis la phase de la conception d'un produit ; ils ont cherché des méthodes de plus en plus faciles d'assemblage afin d'avoir un désassemblage facile à réaliser. Les auteurs présentent dans leurs travail un algorithme de désassemblage d'un produit pour le recyclage. Dans cet algorithme, les auteurs prennent en considération les caractéristiques thermiques et physiques de chaque



matériel. Sur cette base, ils font le triage des matériaux. Il existe aussi d'autres caractéristiques de tri d'après la densité, le ferromagnétisme et l'électrostatique. Toutes ces caractéristiques de triage sont introduites dans l'ordinateur et à l'aide d'un logiciel, ils réalisent un triage virtuel par ordinateur.

Selinger et al. (1999b) ont présenté deux méthodes pour assurer la réalisation d'un désassemblage permettant d'obtenir un recyclage efficace. La première méthode est la conception du produit pour un désassemblage facile et la deuxième méthode est une planification d'un système de désassemblage robuste pour favoriser le recyclage. Le problème qui se pose de plus en plus, est celui de réussir à assurer un recyclage du nombre le plus grand possible de produits, avec un processus de désassemblage facile à réaliser. Plus le désassemblage se réalise facilement, plus le processus de désassemblage est bon marché. Une autre idée est celle qui suppose le respect de la même ligne technologique pour la fabrication d'un produit, l'utilisation de méthodes de désassemblage connues et qui respectent les normes en vigueur. Les contraintes qui peuvent apparaître dans le processus de désassemblage sont : l'existence de composantes avec des substances toxiques et dangereuses, liquides, ou des composantes ayant subi la corrosion ou des déformations, etc. Toutes ces contraintes peuvent alourdir et, même dans quelques cas, empêcher la réalisation du désassemblage.

Laperrière (1992) dans sa recherche sur les processus de désassemblage a mis en relief les quatre critères suivants qui influencent ces processus :

### 1. Le nombre de réorientations

Le choix dans une série de séquences de désassemblage, de celle ayant un nombre minimum de réorientations, aide à la réduction du temps d'assemblage / désassemblage et permet de diminuer le nombre d'opérations, donc le coût. Ainsi, il est important d'éviter le design d'un assemblage complexe, nécessitant beaucoup d'outillages et d'accessoires. Il est important d'établir la position des pièces et la direction d'insertion dans le cadre du processus d'assemblage, afin d'avoir un nombre minimum de réorientations.

### 2. Opérations qui peuvent être effectuées en parallèle

On présente le rôle des opérations qui peuvent être effectuées en parallèle. Ainsi, on arrive à obtenir des réductions du temps de cycle dans le cadre du processus d'assemblage / désassemblage, mais un équipement additionnel est nécessaire ; avant de prendre la décision finale, il est important d'analyser le facteur économique (du point de vue de l'utilisation de l'équipement additionnel), pour la mise en pratique des opérations en parallèle.

### 3. La stabilité des sous-ensembles

Le choix d'une grande stabilité des sous-ensembles augmente la crédibilité des opérations d'assemblage / désassemblage. Ceci réduit le temps du cycle d'assemblage / désassemblage par la prévention des erreurs du temps d'exécution. De plus, une réduction de l'usage des outillages, des accessoires et des machines peut simplifier considérablement le processus d'assemblage / désassemblage.

### 4. Le regroupement des opérations similaires

Le quatrième critère utilisé est celui du regroupement des opérations similaires en opérations successives. Voici un exemple. Supposons qu'on a un cas relativement simple, dont la pièce à désassembler est formé d'un bloc et 2 vis (figure 1.2).

Il s'agit de la permutation de 3 pièces,  $P_3 = 3! = 1 \times 2 \times 3 = 6$ , donc il y a 6 possibilités d'effectuer ce désassemblage. Elles sont les suivantes :

1. vis 1, vis 2, bloc
2. vis 1, bloc, vis 2
3. vis 2, vis 1, bloc
4. vis 2, bloc, vis 1
5. bloc, vis 1, vis 2
6. bloc, vis 2, vis 1

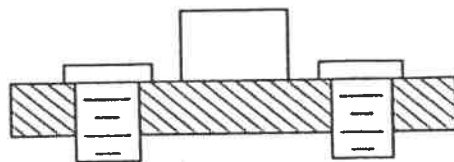


Figure 1.2 Assemblage d'un bloc et 2 vis

L'idéal serait que la personne ou le robot qui exécute l'opération de désassemblage ne change pas l'outil ou l'outillage avec lequel il exécute le désassemblage car ainsi, on gagne du temps. Parmi les 6 possibilités de désassemblage, c'est préférable de retenir les possibles variantes où les 2 vises sont désassembler successivement. On peut voir sans aucune difficulté, que la deuxième et la quatrième variante sont à éviter.

#### **1.4 Le désassemblage sélectif**

Lambert (1997, 1999) utilise le terme « désassemblage sélectif » qui, d'après lui, est un désassemblage réversible plus ou moins non-destructif, ou le « démontage » partiel des produits complexes en sous-ensembles et en composants. Ce procédé est performant car on sépare certains composants et certains matériaux, de ceux qu'on ne désire pas réutiliser. Les tendances économiques mondiales mettent de plus en plus d'accent sur le recyclage des produits, et sur la réutilisation des matériaux et des composantes dans la plus grande proportion possible.

Srinivasan et al. (1998a, 1998b) utilisent aussi le concept de désassemblage sélectif que représente le désassemblage d'un sous-ensemble ou d'une ou de plusieurs composants qui sont réparés ou remplacés. Ainsi, ils présentent le cas d'une défection sur un avion et ils expliquent que dans le cas d'une maintenance d'un sous-ensemble, c'est suffisant de désassembler seulement le sous-ensemble défectueux et non pas l'avion au complet. Donc l'idée est de déterminer la meilleure gamme de désassemblage pour un composant

ou un sous-ensemble. Les auteurs considèrent l'accessibilité d'un composant et ils déterminent ensuite quels sont les composants dépendants l'un de l'autre ; ils sélectionnent les composants du sous-ensemble à désassembler et, ainsi, choisissent « la meilleure gamme de désassemblage ». Parfois le désassemblage peut être réalisé assez difficilement et avec des coûts importants. De ce point de vue, lors du désassemblage dans le but d'effectuer la maintenance d'un sous-ensemble ou d'un composant, il est préférable de réaliser le remplacement des composants qui sont à côté, même s'ils sont encore en bon état ; c'est approprié dans le cas d'un désassemblage difficile et coûteux.

Srinivasan et al. (1999a, 1999b) présentent l'importance dans le processus de désassemblage de la séparation de certaines composantes sélectionnées du reste du sous-ensemble. Cette méthode s'applique avec succès dans le désassemblage pour la maintenance et le recyclage. Ils introduisent une nouvelle méthode de désassemblage appelée : méthode de désassemblage par la « propagation de vague ». La méthode de désassemblage par la « propagation de vague » se réalise en trois étapes : la première c'est l'identification des composants sélectionnés qui seront désassemblés à l'aide d'un logiciel ou du concepteur ; la deuxième c'est la détermination d'une meilleure gamme de désassemblage des composants sélectionnés, pour une réalisation facile du désassemblage, avec un nombre minimal de composants à désassembler et pour un prix minimum ; la troisième étape est celle de la réidentification optimale des composants qui seront désassemblés en respectant l'ordre du désassemblage.

## **CHAPITRE 2**

### **SYNTHÈSE DU MÉMOIRE**

#### **2.1 Considérations générales concernant le processus de désassemblage**

Le désassemblage efficace doit avoir comme objectif d'arriver à désassembler chaque ensemble et chaque composant d'un produit, le plus facilement possible, donc avec le plus petit nombre d'opérations. De cette manière, il ne sera pas nécessaire de désassembler le produit en entier, et on peut arriver à réaliser un désassemblage le moins destructif possible. Ainsi lors du désassemblage, il est important de commencer par choisir des composants ayant des formes géométriques et des surfaces qui puissent assurer un accès facile aux autres composants. Dans la figure 2.1 on précise les principaux éléments à prendre en considérations pour effectuer le processus de désassemblage d'un produit.

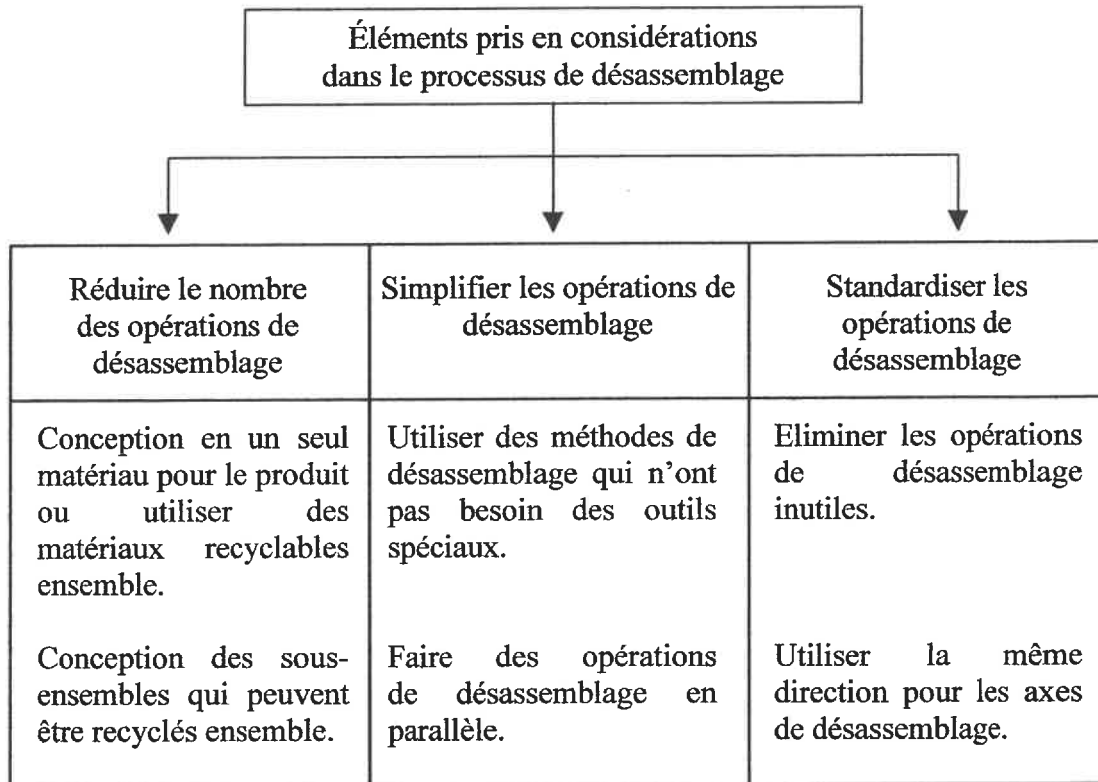


Figure 2.1 Éléments pris en considération dans le processus de désassemblage

L'opération de désassemblage peut être partiellement ou totalement destructive. Donc, en fonction de l'intérêt qu'on porte aux composants, on doit réaliser la variante du désassemblage la plus appropriée pour chaque cas concret. Une nouvelle préoccupation dans l'industrie, est celle de chercher des méthodes de plus en plus facile d'assemblage des produits, afin d'arriver à effectuer un désassemblage facile, pour réaliser la maintenance et le recyclage. Dans le tableau 2.1 on présente les étapes du processus de recyclage d'un produit.

Tableau 2.1 Étapes du processus de recyclage d'un produit

Préparation	Récupération	Traitement	
Enregistrement Collecte Transport	Désassemblage non destructif Tri	Nettoyage	Ré-usinage
		Analyse et tri	
		Traitement ultérieur	
Pré-tri Compactage	Désassemblage destructif Réduction de la dimension Tri	Matériel pour l'usinage	Matériaux récupérés
		Matériel pour la destruction	
		Énergie	

Dès la phase de conception d'un produit, on doit tenir compte de la possibilité d'effectuer, à la fin du cycle de vie du produit, un désassemblage facile à réaliser. Pour y arriver, on se propose d'avoir un nombre minimum de composants à désassembler et d'éviter le plus possible les opérations irréversibles.

## 2.2 Synthèse du chapitre 3

Dans le chapitre 3 on présente l'article intitulé « *Disassembly for assembly, maintainability and recyclability* » soumis à « *International Journal of Production Research* ». Dans ce chapitre nous présentons un algorithme de « propagation de vagues ». La propagation de vagues représente une méthode de recherche de la



séquence des vagues pour arriver à extraire un composant d'un produit complexe ; chaque vague contient les composants pouvant être extraits simultanément ou à une même étape chronologique. Concrètement, on se propose de déterminer le nombre optimal de composants qui doivent être désassemblés, tout en ayant l'assurance de rencontrer l'accessibilité géométrique nécessaire, afin de pouvoir s'assurer que le démontage est possible à réaliser.

Pour déterminer la gamme optimale du désassemblage d'un composant par la propagation de vagues (*PV*), on doit effectuer les étapes suivantes :

1. déterminer le minimum de composants à changer de place ;
2. déterminer les composants  $C_j \in A_{SS}$  pour pouvoir désassembler l'élément  $C_x$  choisi, avec un nombre minimal de composants à désassembler et de mouvements à effectuer ;
3. déterminer le nombre  $n_S$  de composants de  $A_{SS}$  qui sont à analyser pour la *PV*, pour le désassemblage du composant  $C_x$ . Pour alléger la présentation de ce texte nous utilisons la notation « PV » pour la « propagation de vagues ». Le nombre  $n_S$  varie entre 1 et  $n$ , dépendant de la position de  $C_x$  dans  $A_{SS}$ . Si  $C_x$  est vers une extrémité géométrique du sous-ensemble, il y a plus de chances que le nombre de composants analysés soit petit.

À partir de la méthode de désassemblage par la propagation de vagues présentée par Srinivasan et al. (1998a, 1998b), nous allons construire une autre méthode plus adaptée à la pratique courante du désassemblage, en tenant compte des prédécesseurs immédiats

pour chaque composante. Ainsi, nous proposons une extension de la méthode présentée auparavant, en tenant compte des opérations irréversibles lors du choix d'une gamme de désassemblage en introduisant la variable  $IO_{Ci}^{Cj}$ .

La structure du chapitre 3 est la suivante :

- l'introduction ;
- l'état de l'art ;
- les opérations réversibles et irréversibles dans le processus de désassemblage ;
- le désassemblage par le concept de propagation de vague ;
- la présentation de la nouvelle méthode de désassemblage utilisant un concept de propagation de vague modifié ;
- les résultats obtenus et une interprétation des résultats ;
- la conclusion.

### **2.3 Synthèse du chapitre 4**

Le chapitre 4, intitulé « *Vers une nouvelle approche de désassemblage en utilisant la propagation de vagues* », est un aperçu global sur la problématique abordée dans les chapitres 3 et 5. L'objectif que nous nous proposons dans ce chapitre est de mettre en relief les caractéristiques de cette nouvelle méthode présentée dans les chapitres 3 et 5. Ensuite, nous résumons les principales étapes de cette nouvelle méthode. Finalement,

nous présentons les principaux avantages de cette nouvelle méthode de désassemblage par la propagation de vagues.

## 2.4 Synthèse du chapitre 5

Le chapitre 5 est constitué de l'article intitulé « *Algorithmic selection of a disassembly sequence of a component by a wave propagation method* » soumis à « *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* ». Dans ce chapitre, nous présentons un nouvel algorithme de désassemblage d'un composant donné ; les seules données demandées sont les prédécesseurs immédiats de chaque composant.

On montre que la solution existe et qu'elle est unique dans les deux conditions suivantes :

1. la matrice binaire des prédécesseurs immédiats est non-symétrique ;
2. les données ne contiennent pas de cycle ; une méthode de dépistage des cycles dans les données est aussi proposée.

Le but de l'algorithme est de donner uniquement les vagues de désassemblage absolument nécessaires pour extraire un composant donné d'un ensemble. Par conséquent, plusieurs composants, non-absolument nécessaires pour extraire ce composant ne sont pas désassemblés ; l'algorithme peut être appliqué ensuite pour désassembler un autre composant parmi les composants restants. Il s'agit donc d'un

algorithme de désassemblage sélectif. C'est le cas rencontré en pratique : pour la récupération d'un composant donné (en recyclage par exemple), où on n'a pas besoin de désassembler tous les composants du produit considéré.

Le même algorithme peut être utilisé pour assembler un composant maître par vagues ; il suffit de considérer les vagues en ordre inverse. Il s'agit d'assembler un composant principal avec tous les composants qui lui sont attachés (de près ou de loin).

Le chapitre 5 est structuré comme suit :

- l'introduction contenant un état de l'art ;
- la description du problème et les approches de solutions ;
- le contexte d'application de l'algorithme proposé ;
- la description de l'algorithme proposé ;
- les résultats numériques obtenus avec l'algorithme présenté ;
- la comparaison avec les résultats obtenus auparavant.

L'algorithme a été codé en Visual Basic, Version 6, et il a été développé un logiciel appelé *WaveDiassembly*. L'utilisateur doit choisir le nombre de composants et compléter la matrice des prédécesseurs immédiats pour chaque composant. Il sera guidé à chaque étape de saisie de données. La solution apparaît sous forme de liste (une vague par ligne).

**CHAPITRE 3**  
**DISASSEMBLY FOR ASSEMBLY, MAINTAINABILITY**  
**AND RECYCLABILITY**

Soumis à *International Journal of Production Research*

Edition *Taylor & Francis Ltd.*

### **3.1 Abstract**

The determination of a good disassembly sequence for a component has considerable implications from the points of view assembly, maintenance, recycling and re-use.

In this paper an original “branch and bound” algorithm is presented for determining the best disassembly sequence for a component (a sub-assembly or a part). Input data introduced by the user or automatically by a computer aided assembly (CAA) system describes the immediate predecessors of each component. With this algorithm it is not necessary to break the graph of liaisons cycles if components in the cycle must not be disassemble.

The main contribution of the algorithm consists in the determination of a sequence which has the minimal number of components to disassemble after taking into consideration the irreversible operations and providing for disassembly of a large

number of components at the beginning of the sequence when the operators have a larger available work space.

**Key words:** wave propagation, irreversible operations, matrix of immediate predecessors.

### 3.2 Nomenclature

- $A_{SS}$  : the assembly or sub-assembly formed by the components studied
- $A$  : the matrix of the immediate predecessors; type  $n \times n$   
 $A(ij) = 1$  if and only if  $j$  must be disassembled immediately before  $i$
- $B$  : sub-matrix of  $A$ ; it contains *only* the components (near or far), that are linked to the component  $C_x$  to disassemble
- $C_x$  : the component for which we determine the wave propagation
- $C_i$  : a component of the  $A_{SS}$  sub-assembly
- $IO$  : irreversible operation
- $n_S$  : total number of the components in the disassembly sequence
- $OS$  : optimal sequence
- $\tau_i$  :  $i$ th wave front
- $W$  : components of front waves on the whole length of the waves

### 3.3 Introduction

Disassembly is generally achieved by removing individual components or subassemblies from a larger product. The disassembly of a product is a process used to carry out maintenance, repair, re-use, and recycling of products, but also has an influence on assembly. “Disassembly for assembly” is actually virtual disassembly for generation of the assembly sequence. Over the past several years research has increasingly taken into consideration disassembly for maintenance or recycling, even at the conception stage of the product design process. In doing so, parameters such as cost, material, disassembly time and safety are important. In this paper we propose tools for disassembly that meet the designer’s needs and facilitate decision making.

Whenever a module is broken, it needs to be replaced in a typical maintenance procedure. Recycling is the reclaiming of materials from a product that is worn out or no longer useful. The reuse process is represented as a path of components from the disassembly process to the manufacturing process. Some can be reused without requiring any additional work.

The objective of this research was to develop a new method for elaborating the “optimal disassembly sequence”, i.e. that sequence which has the minimum number of components to disassemble and has the advantage that a larger number of components

are disassembled at the beginning of the process. This new method should also prefer the choice of a sequence that does not contain irreversible operations.

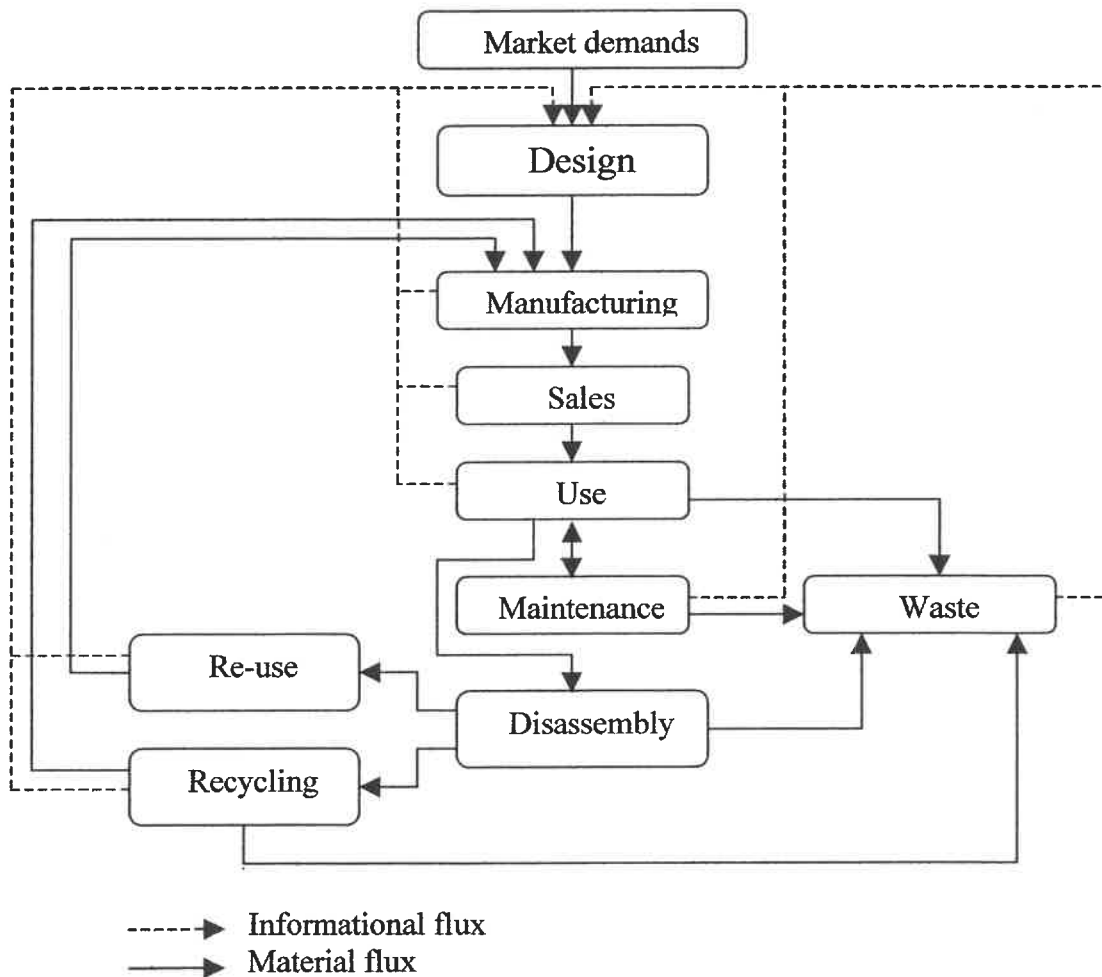


Figure 3.1 Phases of product life cycle

The life cycle of a product is established in the early design stages with the consideration that most materials can be recycled. The main phases of the life cycle of a product are presented in Figure 3.1.



In this closed loop life cycle the product is either maintained or dismissed for disassembly. From disassembly some parts will be reused and the rest go to recycling either as material or energy. Material and reusable parts are either sold or sent back to the manufacturing process. Some waste is always generated through wear, maintenance, disassembly and recycling processes. One of the objectives of this model is to try to reduce the volume of waste as much as possible.

The challenge as the product nears the end of its useful life is to assure the easiest possible disassembly and the most complete recycling. Further to this, in the case of material shortage, another objective is to repair or re-manufacture some components instead of recycling them. In that case we must be sure to respect the standards imposed on repaired components concerning mechanical and physical qualities.

The strategies most often pursued in life cycle design are listed in Table 3.1. These are listed under a headings indicating the life cycle phase they report to. Design strategy is taken in the broad sense of the term to include environmentally beneficial strategies not directly involving the product.

An adequate design assures easy disassembly for the maintenance, which helps to extend the lifetime of a product, and for the recycling without requiring study of the non-dismantled product. This implies some conditions such as the utilisation of easily recycled materials, that don't lose their qualities during the recycling process.

Information concerning the “life cycle” appears as experimentation is carried out during the design and manufacturing processes.

Table 3.1 Phases and strategies of product life-cycle

<b>Life cycle phases and strategies of a product</b>	
<i>The Pre-manufacture</i>	
1.	Utilisation of recycling and re-manufacturing materials;
2.	Decrease in energy for the fabrication of materials.
<i>The manufacturing</i>	
1.	Utilisation of manufacturing process that reduce the material consumption;
2.	Use of anti-pollution manufacturing process.
<i>The transport</i>	
1.	Smallest possible volume and weight for the materials;
2.	Utilisation of recycled packaging materials.
<i>The utilisation</i>	
1.	Low energy consummation;
2.	Design for maintenance (long life of the product).
<i>The elimination</i>	
1.	Disassembly design;
2.	Recuperation of several parts of the product (if possible).

### 3.4 State of the art

#### 3.4.1 The life-cycle concept of a product

According to Castaing et al. (1999), product components should not only be readily recycled and reused, but also easily repaired and modes of consumption evolve as a

consequence. By making producers responsible for their own waste, the technical-economic performance of a product is extended from its commercial success to its entire life cycle.

Rose et al. (1998) proposed a methodology that helps designers choose an optimal end-of-life strategy for a product. The authors present a guide of end-of-life strategies specific to current products. Their studies compare a variety of options for recycling, re-use and re-fabrication of electronic equipment and their application in different world regions. This work provides designers with an excellent summary of current practices. Automatic disassembly of electronic equipment shows promising results in some applications. Manual disassembly techniques using an innovative array of tools demonstrate substantial advantages relative to disassembly time and preservation of the purpose of the product. As more original equipment manufacturers are directed to support the end-of-life costs of their product, industrial leaders must determine these costs and an efficient recuperation scenario for the last stage of a product's life span.

Masui et al. (1999) proposed different approaches to specify end-of-life strategies, to elaborate a product design in accordance with the environment and to identify opportunities to develop new recycling techniques. The goal of the disassembly is different depending on the category of each product however an efficient disassembly is the key to realising ideal end-of-life strategies for each product category. The

fundamental idea is the separation of embedded accessories of a product during manufacturing and activating this during disassembly.

Selinger et al. (1997, 1998) presented five criteria which influence the duration of the life cycle: the cost of the product, the life period of the product, the safety aspect of the application, maintenance and the different uses of the product. The authors underline that good maintenance practices extend the life of the product.

Nonomura et al. (1999a,b), have proposed a new product life-cycle design. They consider an inverse fabrication concept in which design of the product for the whole life cycle plays a central role. A key in this concept of inverse fabrication is dematerialization in order to minimize the material consumed and energy consumption for economical growth. The authors discuss the conception of the life cycle of a product independent of the organisation or the administration of life-cycle development and selection of the components.

### **3.4.2 Environmental constraint**

Alting (1991, 1993), presented the role of the manufacturing industry in ensuring sustainable development; the message was that the use of raw materials and the impact on the external environment could be greatly reduced while at the same time preserving or improving the functionality of the products.

Hattori et al. (1999a,b), applied the concept of life cycle of a product, which they also used in 1995 (Hattori et al., 1995). For a newly designed product, application of a procedure for selection of the parts which can be re-used, can help a designer to reconsider his material selection and/or the structure of product design. In this article, use of an integrated linear program is proposed for selection of the model and recycling materials. The goal is to select parts with the intention of maximizing the weight of material that can be recuperated while retaining the targeted percentage of material purity. This model had been modified and extended to cover new constraints such as the upper limit of the materials. In order to ensure circulation of resources, a restoration system should be integrated into the production system. In another words, recycling should be in integral part of a program for efficient circulation of resources. Recycling of material must always be a preoccupation, even if re-use is the first priority.

According to Graedel et al. (1995), the advantage of life cycle assessment is that the environmental impact of a product can be measured throughout its life. It is therefore a unique tool for assessing the environmental and resource consequences of choices made in product development.

Environmental problems require a new fabrication paradigm. The existing notions were inevitably caused by special requirements encountered in mass fabrication, along with the associated rapid increase in material and the energy consumption. The conclusion by

Tomiyama et al. (1997, 2000), is that conducting maintenance and reclaim services can remarkably reduce the environmental impact without decreasing profit.

Kanai et al. (1999) proposed a model of graphical representation of a major part of the recycling chain including disassembly, dismantling, shredding, and sorting. The designer can use this as visualization tool and modify the product design, so that it will be easy to assemble. Category arrangement can be easily done and recyclable materials will be used wherever possible. This is the main key in the modern conception process of a product. In the destructive assembly process it is important to take into account the apparition of summit destruction (boards, intersection lines) for the visible face. Total destruction of some components can happen resulting in loss of quality for a part or even the totality of the material.

### **3.4.3 Disassemblability process planning and design for maintenance and recycling**

Lambert (1997) develops a quantitative method by creating a graph showing all possible disassembly strategies and associated cost and revenue values. This effectively converts the problem of optimum plan determination into a shortest path problem. Lambert (1999) introduced an optimal algorithm that can be used to determinate the disassembly sequence for combined material recycling and part re-use. This involved the application of mathematical programming to generate the optimal disassembly sequence. This process is outstanding because it separates out undesirable components and the

materials according to their utilisation. The trend in recent International policy is towards increasing emphasis on product recycling and the re-use of materials and components as much as possible.

To determine ideal end-of-life strategies and enhance recyclability, efficient disassembly is essential for every product category. Due to the importance of this, Boks et al. (1996) have stepped up the intensity of their investigations on disassembly evaluation and design for disassembly.

Touzanne et al. (1999) insist on two aspects: the re-use of the components and the material revalorization (repair and reconditioning of materials for re-use). The disassembly process is studied to facilitate separation of the components so that those that remain in good condition can be re-used, while the others can be recycled. The disassembly process must clearly define what will be re-used, what will be recycled, and eventually what will be eliminated.

Major ecological benefits may be realised through disassembly of complex products and re-use of their components. Ewers et al. (2001) presented the economic side of disassembly. Disassembly is also a promising strategy to minimise landfill disposal and to optimise the use of non-renewable resources.

Mascle (1990) presented a product disassembly method. Modelling of functional liaisons between parts helps to distinguish a simple contact from an attachment, subsets from subassemblies, and it also underlines the presence of parts nodes. Mascle (1998) defined the difference between a subassembly and a subset, and showed how to extract a subassembly a priori, a posteriori and appropriate.

Woo et al. (1991, 1992), developed an algorithm for disassembling multiple and parallel assemblies. By traversing a so-called “disassembly tree” generated by mapping the boundary representation to a tree structure he generates a minimum sequence of disassembly and/or assembly. Extensive research was completed on disassembly sequence generation and classification of assemblies by geometric complexity. Due to an increased environmental awareness and a shortage of natural resources, much research has been done that correlates design for disassembly technology with design for environment issues. A broader design paradigm than design for disassembly; design for environment can be approached from many different viewpoints. The examination was mostly concerned with the recyclability aspects of design for environment.

According to Lee (1998) taking the disassembly viewpoint during the realisation of a design is becoming more important both at the end-of-life of the product, and during its life period, when appropriate maintenance must be assured. Using this approach, the product must be easily repairable in the defection context, in order to be used again. The disassembly operation can be partially or totally destructive.



Selinger et al. (1997, 1998, 1999), presented the importance of material recycling in the 21<sup>st</sup> century. The recycling idea is studied from the conception phases of the product; they evaluated many disassembly methods and compared them based on ease of disassembly. Their objective was a standardised method of operations done for the disassembly of the product. An algorithm for recycling was presented that accounted for thermal, physical and others characteristics for each material. The researchers showed two methods, each of which assure disassembly for efficient recycling. The first method is based on conception of the product for easy disassembly and the second is a plan for a robust recycling disassembly system. The challenge is to succeed in recycling the largest possible number of products, while retaining the ease of disassembly. Disassembly becomes less expensive as it is made easier. The conception of a product must therefore provide for easy disassembly. Constraints on the development of the disassembly process include the presence of components made of toxic and dangerous substances, liquid or components that tend to corrode or deform, etc. A combination of these constraints can make the realization of disassembly cumbersome.

Moore et al. (1998) presented a Petri net based approach to generate plans of product recycling based on disassembly.. A geometric disassembly precedence matrix is created and an algorithm is introduced that automatically generates a disassembly Petri net from the disassembly precedence matrix. Cost functions are used to determine the optimal disassembly process plan.

The modelling approach adopted by Fernandez et al. (2001), consists in splitting the disassembly system into stations, each one having the same structure, represented by the same continuous Petri net.

Murayama et al. (2001) described a method for generating disassembly sequences for component replacement at maintenance stages. These are used for evaluating the ease of disassembly at product design stages. The proposed method has the advantage that separation of an assembly is evaluated by calculating the information entropy. This leads to the generation of disassembly sequences in which the target components are efficiently removed.

Laperrière (1992) in his research on assembly and disassembly processes put the accent on four criteria that influence the disassembly processes.

#### *1. The number of re-orientations*

In the disassembly sequence, a minimum number of re-orientations helps reduce assembly time and disassembly time. Therefore, it is important to avoid a complex design disassembly, which often requires more tools and accessories to achieve better performance in reorientation. It is important to establish the part position in the assembly process in order to have a minimum number of reorientations.

## *2. Operation which can be performed in parallel*

The idea of parallelism might be of the cycle-time assessment of the assembly-disassembly process, but this may necessitate additional equipment. It is important to analyze the economics involved in use of this additional equipment.

## *3. The stability of the sub-assembly*

The choice of stability for the sub-assembly brings up the credibility of the disassembly operation. This credibility reduces the cycle-times during assembly by preventing execution mistakes. Moreover it reduces the need for tooling, accessories and machines, which could considerably simplify the design and lower costs.

## *4. The grouping of similar operations*

The fourth criterion concerns grouping of similar successive operations. The ideal should be that the person or the robot that executes the disassembly does not need change the tool or tooling during the execution. In the contrary case, it is necessary to establish the order of the components for the disassembly such that all the identical components may be successively disassembled.

Fouda et al. (2001) presented a method to generate a precedence graph for a product family using a disassembly approach. This is performed using a multicriteria decision-aid method. The criteria taken into account are the number of contact constraints a

candidate part has with other components and the relative size and weight of the components.

Subramani et al. (1991) used a algorithm to elaborate a disassembly plan that minimizes disassembly costs. The method involves the identification of local constraints for the removal of component with respect to its disassembly direction and contacts with other components.

Boothroyd et al. (1987, 1992) are the creators of procedure-based design for assembly and disassembly. They show that consideration of disassemblability and recyclability at the design stage will provide financial benefits at the end of product life.

The selective disassembly method introduced by Lambert (1997), generates the optimal disassembly sequence based on economic criteria. The disassembly graph is written in a matrix and the resulting solutions can be easily checked. Srinivasan et al. (1998a,b, 1999a,b,c) presented a selective disassembly method, called “wave propagation”, which analyses the problem of removing of a assembly component, with the minimal number of components to disassemble and an assurance of a geometric accessibility for the disassembly.

Our objectives are to determine a good disassembly sequence for maintenance and re-using more possible components. Selective disassembly defined by Lambert (1997) is

an efficiency method to reach these objectives. State of the arts seems that Lambert focuses on end-of-life disassembly and Srinivasan et al. (1998a,b, 1999a,b,c) on disassembly for repair and maintenance. As we are looking for a method for optimising the selective disassembly process, the study of the “wave propagation” defined by Srinivasan et al. is needed.

#### **3.4.4 Disassembly using the concept of wave propagation**

Srinivasan et al. (1998a,b, 1999a,b,c) introduced the term “wave propagation” which helps to determinate the best disassembly sequence for an assembly. It determinates the minimum number of components to be disassembled and assures the necessary geometric accessibility for performing the disassembly (providing space for introducing the tool, the apparatus or the robot arm to execute disassembly only in the necessary areas).

The method has two steps:

1. Identify the components to be selectively disassembled with the help of a software program or a designer.
2. Determine an optimal disassembly sequence for the selected components; easy to carry out on a minimum number of components at minimal cost. After the study of both aspects an optimal re-identification of the components which will be disassembled must be done.

The main attributes for determining the optimal disassembly sequence are:

1. Displacing the least number of components;
2. Determination of the components  $C_j \in A_{SS}$  which must be displaced to disassemble the component  $C_x$  chosen with the minimum number of components;
3. The number of components of  $A_{SS}$  which are to be analyzed for the *WP* for the disassembly of an element  $C_x$ . This varies between 1 and  $n$ , depending on the position of  $C_x$  in  $A_{SS}$ . The more  $C_x$  is at an extremity of the sub-assembly, the more the analyzed component number is smaller than  $n$ .

The nodes of the graph of the sub-assembly  $A_{SS}$ , correspond to the  $C_i$  components which form the sub-assembly.

Figure 3.2 presents an example of two disassembly sequences illustrating the wave propagation method by Srinivasan et al. (1998a).

$\tau_0 = C_x = C_4$ , therefore  $\{C_2, C_3, C_5\} \in \tau_1$ . There are two disassembly possibilities:  $C_4 \rightarrow C_5$  or  $C_4 \rightarrow \{C_2, C_3\}$  because  $C_2 \rightarrow C_1$  and  $C_5 \rightarrow C_6 \rightarrow \{C_7, C_8\}$ . The first disassembly sequence is  $W_1 = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$  with  $n_S = 4$ , and the second is  $W_2 = \{(C_7, C_8), C_6, C_5, C_4\}$  with  $n_S = 5$ . Therefore the optimal sequence  $OS = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$  with  $n_S = 4$  minimal.

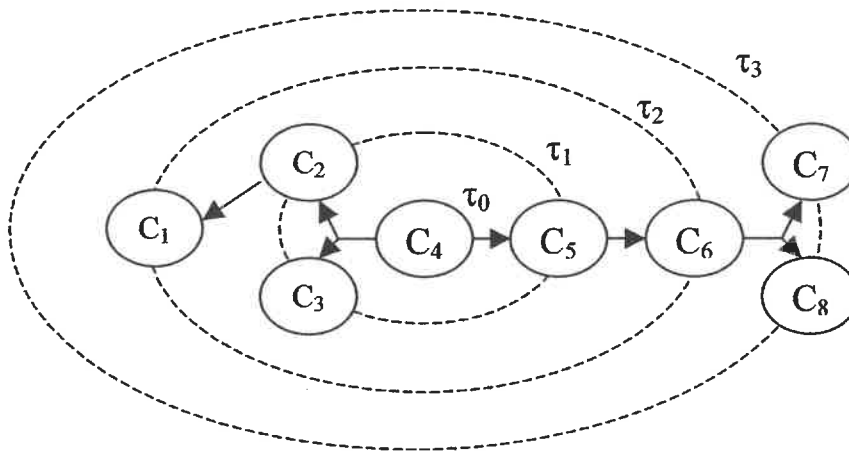


Figure 3.2 Example of two disassembly sequences

### 3.5 Reversible and irreversible operations in disassembly process

The disassembly process contains reversible and irreversible operations. The difference between both operations is defined by the disassembly process. In the case of reversible operations, one can assure the disassembly without destroying the sub-assembly components. This cannot be done in the case of irreversible operations. Some examples of reversible operations include screwing, riveting, and brazing. Welding, on the other hand, is an irreversible operation because the welds must be destroyed to disassemble these parts and for re-assembly both parts have to re-manufactured.

Brazing and welding are rather similar operations but they are in two different categories. In order to disassemble two brazed components it is sufficient to eliminate the material that effects the adhesion by diverse means (heat or abrasive, mechanical). The components that are fused together could be used again because their structures

have not been affected. In the welding case this is more difficult because the two welded components can be considered as one part. In order to disassemble a weld it must be cut. Component destruction appears during this cutting and in several cases the parts can no longer be used. The concept of reversible and irreversible operations is very important when considering disassembly, maintenance and recycling. For example, irreversible operations should be avoided for components requiring frequent maintenance. In general, irreversible operations are applied only for components that do not require maintenance and/or when these components don't influence the disassembly process (i.e. when disassembly of the sub-assembly is possible without operator intervention). In another example, a gearbox housing is assembled by reversible operations with the help of a screwdriver and in this way easy disassembly is provided for maintenance.

In the case of an assembly that has components that need irreversible operations for assembly, the preferred disassembly sequence is one which avoids disassembly of this attachment. An irreversible operation is only specified if it cannot be avoided.

Figure 3.3 presents an example of welded assembly.



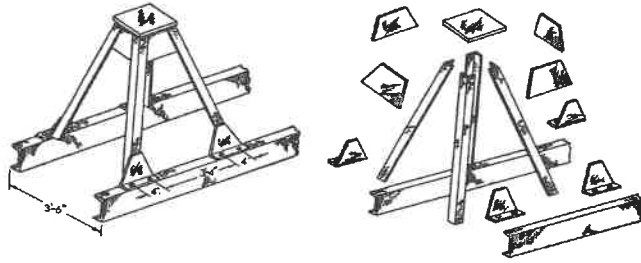


Figure 3.3 Welded support

In the recycling process, the concept of reversible and irreversible operations is not required. Destructive disassembly or the separation of parts in accordance with the composition of the materials is not important. This only requires consideration for the case of re-manufactured components (shafts, gears, etc).

In Figure 3.4, an example is presented where we find two on several disassembly sequences and irreversible operations.

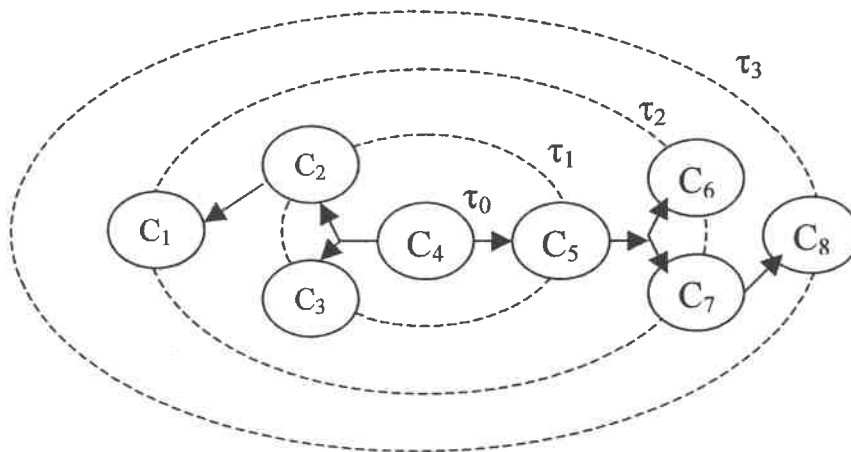


Figure 3.4 Example of two disassembly sequences containing irreversible operations

The first disassembly sequence is  $W_1 = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$  with  $n_{S1} = 4$  and  $IO_{C1}^{C2} = true$ , and the second is  $W_2 = \{C_4, C_5, (C_6, C_7), C_8\}$  with  $n_{S2} = 5$  and  $IO_{C_i}^{C_j} = false, \forall i$  and  $j$ . Therefore, the optimal sequence is  $W_2 = \{C_4, C_5, (C_6, C_7), C_8\}$ , because it doesn't have any irreversible operations. Even though  $n_{S2} = 5 > n_{S1} = 4$ , it is more important irreversible operations are avoided in this sequence.

### 3.6 New method for disassembly using the wave propagation concept

#### 3.6.1 Application context of the algorithm proposed

##### *Non-symmetric assumption*

The following constraint is imposed: if component  $C_i$  is an immediate predecessor  $C_j$  then inversely we must choose only one of the possibilities. This restriction can be avoided by applying the same algorithm several times or by choosing the relation of immediate predecessors depending on the required time for the disassembly.

If  $C_i \rightarrow C_j$  and  $C_j \rightarrow C_i$ ; this is a particular case known as a cycle. In this case the algorithm should be executed twice (one time with  $A(i,j) = 1$  and  $A(j,i) = 0$  and a second time with  $A(i,j) = 0$  and  $A(j,i) = 1$ ).

##### *Disassembly of one component*

The goal of this algorithm is to provide only the waves of the disassembly that are *absolutely necessary* to extract a component (part or subassembly) of an assembly. As a

consequence, several components that are not absolutely necessary to extract this component will not be disassembled; the algorithm can be applied afterwards to disassemble another component among those remained. This case is encountered in practice during the recuperation of a component (in recycling for example); we don't need to disassemble the whole assembly of components.

#### *Disassembly cases of different components in the same product*

The successive disassembly of several components can also be done also by successive applications of the same algorithm.

### **3.6.2 The steps of the wave propagation algorithm**

In this section, the steps of the “branch and bound” algorithm for extracting a component are presented. Numerous representation schemes describe the features or the mating relationship of a part in assembly using graphical structures. These representations typically store assembly components, either parts or subassemblies, as vertices in various types of graphs. The relationships between entities, such as connectivity, geometry, location, and functionality, are characterised as joining edges between graph vertices.

Disassembly begins with the removal of an attachment. This is achieved using an attachment part or an operation involving the input of energy; chemical (bonding),

thermal (flame welding, spot welding, etc.) or mechanical (inserting, distortion, ultrasonic welding, etc.). The liaisons described as simple edges between vertices must be modelled using physical modelling of liaisons (Masclé, 1998 and Jabbour et al., 1998). A liaison graph is a formal model that can be used for this purpose.  $G = (C, L)$  is the couple composed of:

1° A  $C$  set =  $\{c_1, c_2, \dots, c_n\} = \{c_i\}, i \in [1, \dots, n]$ , representing the set of all the product's components which corresponds to the vertices of the graph in a one-to-one relationship.

2° An  $L$  family =  $\{l_{ij} = (c_i, c_j)\}$  of elements derived from the Cartesian product  $C \times C = \{(c, d) \mid c \in C, d \in C\}$  representing the functional liaisons on the virtual locking liaison between the product components. A virtual locking liaison exists between two components  $c_i$  and  $c_j$  if component  $c_i$  collides with component  $c_j$  during the assembly trajectory.

The liaison graph is a hardly connected, undirected 1-graph of  $n$  order. During the search for establishing the immediate predecessors; matrix  $A$ , it becomes an oriented graph  $G(C, O)$  where  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\} = \{c_i\}, i \in [1, \dots, n]$ , representing the set of all the product's components in an assembled state corresponding to the nodes of the graph, and  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_{ij}\}$  represents the set of assembly operations corresponding to the arcs in the graph.  $o_i$  can represent an or several operation(s).

An assembly model presented in a previous paper (Jabbour et al., 1998) supports the automatic or aided determination of its disassembly or assembly sequences. A system called SCAP (Jabbour et al., 1998), implemented on the ACIS solid modeller, automatically deduces other features such as free and contact sub-faces, contacts, locking and prepositioning pseudomatrices and allows to the user to take into account several criteria: stability, geometrical form, operations done in parallel and irreversible operations.

#### **3.6.2.1 The initial matrix (the matrix $A$ )**

Matrix  $A$  is normally obtained from the data introduced by the user but it could be automatically introduced by the SCAP system (Jabbour et al., 1998), for the chosen component proposed for disassembly. The values 1 on the line  $i$  indicates the immediate predecessors of the component  $i$ . To alleviate the presentation of the matrix, cells with the value 0 are left blank. In Figure 3.5 and 3.6, the matrix and the graph corresponding to this example are presented.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								1
→ 4	1	1	1				1	
5		1	1					1
6		1						
7	1					1		1
8	1							

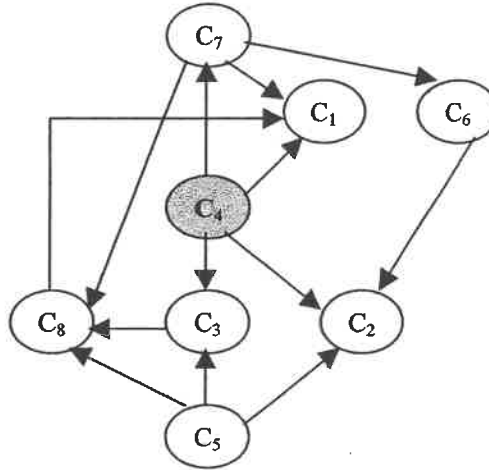
Figure 3.5 Matrix  $A$ 

Figure 3.6 Graph A

### 3.6.2.2 Construction of the matrix $B$ from the matrix $A$ (branch step)

Matrix  $B$  is the matrix of immediate predecessors for extraction of the component  $C_4$  only. First, the line of the component to disassemble is copied and its  $Flag = 1$ ; the initial matrix  $B$ , is obtained is shown in Figure 3.7.

	1	2	3	4	5	6	7	8	Flag
1									
2									
3									
→ 4	1	1	1				1		1
5									
6									
7									
8									

Figure 3.7 Initial matrix  $B$

<i>Construction method for matrix B</i>	
<b>a</b>	If $Flag(i)=1$ , then the component $i$ is necessary for disassembly. This component is a predecessor (although it may not be an immediate predecessor) of the chosen component.
<b>b</b>	All the predecessors of necessary components are also necessary.
<b>c</b>	If $Flag(i)=1$ , and $B(i,j)=1$ , then line $j$ of $A$ is copied in $B$ and $Flag(j)=1$ , because $j$ is an immediate predecessor of $i$ and since $i$ was necessary, $j$ is necessary; its $Flag=1$ .

This method applies to the initial matrix  $B$ : the  $Flag$  of the component  $C_4$  is equal to 1; in this case the lines 1,2,3 and 7 of  $A$  are copied in  $B$ . The  $Flag$  of a copied line is set at 1. The reasoning behind this is that components 1,2,3 and 7 are immediate predecessors; therefore matrix  $B$  must contain the line 4 and the line of the immediate predecessor. The intermediate matrix  $B$  obtained for this case is shown in Figure 3.8.

	1	2	3	4	5	6	7	8	Flag
1									1
2									1
3								1	1
→ 4	1	1	1				1		1
5									
6									
7	1					1	1		1
8									

Figure 3.8 Intermediate matrix  $B$

The same process is applied to obtain the final matrix  $B$ :

If  $Flag(i)=1$  and  $B(i,j)=1$ , then line  $j$  of  $A$  is copied in  $B$  and  $Flag(i)=1$ .

In this case, we have 5 lines where  $Flag = 1$ .

$Flag(3)=1$ , and  $B(3,8)=1$ , therefore line 8 must also be copied.

$Flag(4)=1$ , has already been studied.

$Flag(7)=1$ , lines 1,6 et 8 must be copied. Actually, only lines 8 and 6 remain because line 1 is already copied.

The final matrix  $B$  is presented in Figure 3.9.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								1
→ 4	1	1	1				1	
5								
6		1						
7	1					1		1
8	1							

Flag
1
1
1
1
1
1
1

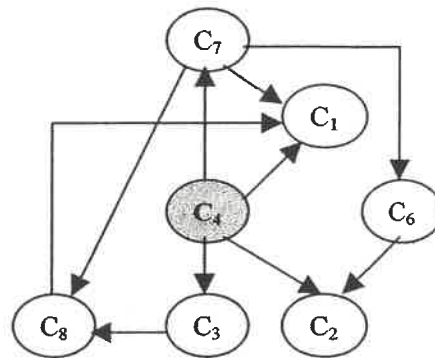


Figure 3.9 The final matrix  $B$

Figure 3.10 Graph  $B$

The process stops at this point because there are no more lines to add (the predecessors).

Reviewing:

$Flag(1)=1$  ; discussed above;

$Flag(2)=1$  ; discussed above;

$Flag(3)=1$  ; line 8 has been copied ;

$Flag(4)=1$  ; discussed above;

$Flag(5)=0$  ; in this case, there are no predecessors ;

$Flag(6)=1$  ; line 2 has been copied;

$Flag(7)=1$  ; lines 1,6,8 have been copied;

$Flag(8)=1$  ; line 2 has been copied.



In Figure 3.10, a graph of the final matrix  $B$  is presented. The necessary components to disassemble in order to arrive at component  $C_4$  are indicated by the *Flag* column. It can be seen that the component  $C_5$  is not necessary; it is not a predecessor, near or far, of the component  $C_4$ .

### 3.6.2.3 Wave construction (bound step)

wave 1 is composed of components with  $Flag = 1$  that don't have any predecessors (their lines in matrix  $B$  are empty). In our case this includes components  $C_1$  et  $C_2$ .

$$wave\ 1 = \{C_1, C_2\}$$

In next step, the value 1 in columns 1 and 2 is replaced by 0, and the  $Flag(1)$  and  $Flag(2)$  become 0 (Figure 3.11). On the graph (Figure 3.12) the nodes of  $B$  are eliminated, without the outgoing arrows (for nodes 1 and 2). The matrix and waves used for wave 2 are obtained.

	1	2	3	4	5	6	7	8	Flag
1									
2									
3								1	1
→ 4			1				1		1
5									
6									1
7						1		1	1
8									1

Figure 3.11 Matrix  $B'$

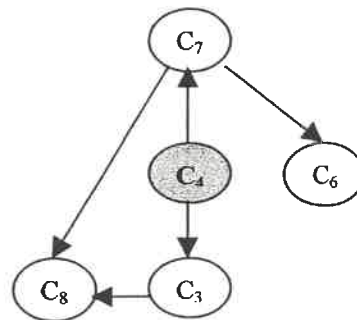


Figure 3.12 Graph  $B'$

The *wave 2* is formed by  $\{C_6, C_8\}$ , because for these components, the *Flag* = 1 and the corresponding lines are empty ( $C_6$  et  $C_8$  are necessary, but do not have immediate predecessors). Theirs *Flag*'s will be set to 0, and also those of columns 6 and 8 (Figures 3.13 and 3.14). The following matrix is obtained and will be used for construction of *wave 3*):

	1	2	3	4	5	6	7	8	Flag
1									
2									
3									1
→ 4			1				1		1
5									
6									
7									1
8									

Figure 3.13 Matrix B''

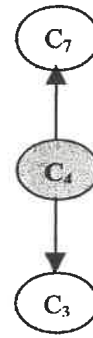


Figure 3.14 Graph B''

The *wave 3* is formed from components  $C_3$  and  $C_7$ . Columns 3 et 7 are set to 0. The *Flag* corresponding to line 7 will also be set to 0.

*wave 4* contains the component  $C_4$ .

The process of disassembly of component  $C_4$  is now complete. The *wave* sequence is:

*wave 1* =  $\{C_1, C_2\}$ ; *wave 2* =  $\{C_6, C_8\}$ ; *wave 3* =  $\{C_3, C_7\}$ ; *wave 4* =  $\{C_4\}$ .

### 3.6.3 Comparison with a closed method: PERT

Several methods use the notion of predecessors, but they are not all equivalent. *PERT* is a planning method for the realization of activities of a project (Nobert et al., 2001). It

can be used for selective disassembly only for special cases: when no cycles are presented and when all the components must be disassembled. The disadvantage of the *PERT* method is that it is not capable of determining only those components that are absolutely necessary for disassembly. The *PERT* method does not determine with exactitude the disassembly sequence because it can not eliminate the non-necessary components for disassembly of a component. The selective disassembly method introduced in this paper however, does not include components that are not necessary to disassembly. It can also account for cycles in the parts of components that are not necessary to disassembly. This method can therefore be applied in these cases which are beyond the capabilities of the *PERT* method.

### **3.7 Results and discussions**

The example presented below is a piston mechanism as shown in Figure 3.15. The proposed component to disassemble is the crank-arm body  $C_6$ . Figure 3.16 presents matrices  $A$  and  $B$  of the immediate predecessors for the components we have chosen to disassemble. The disassembly solution is determined using the described algorithm and is presented in Figure 3.17.

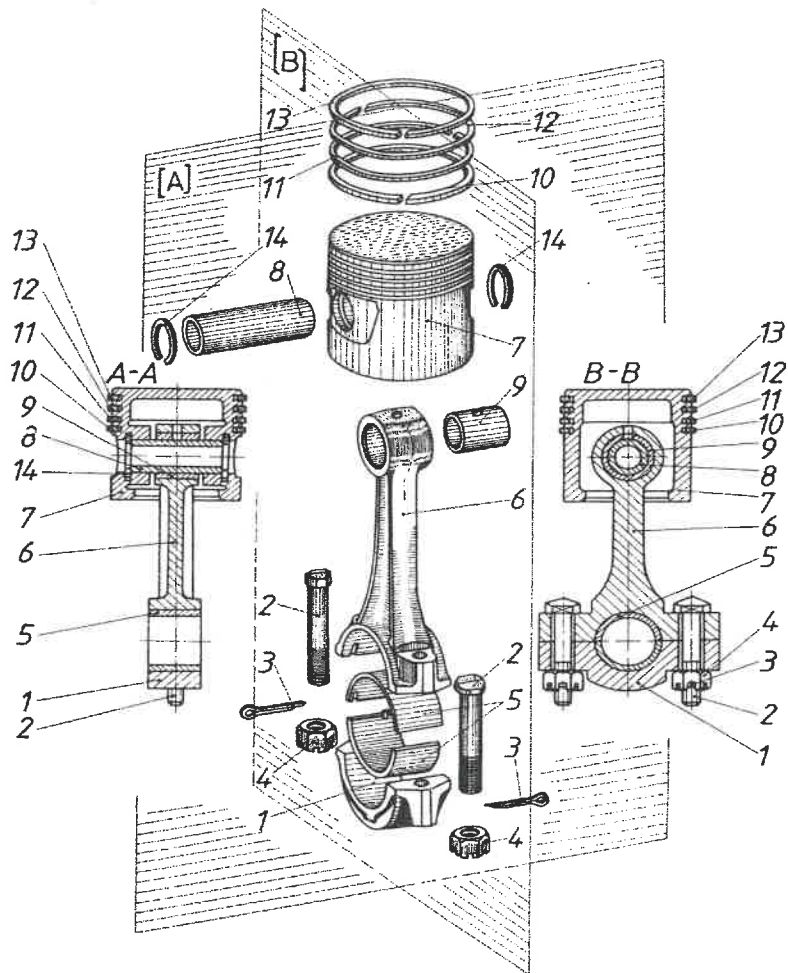


Figure 3.15 Piston mechanism

C<sub>1</sub> – lower body;

C<sub>2</sub> – screw;

C<sub>3</sub> – flexible blocking pin;

C<sub>4</sub> – nut;

C<sub>5</sub> – half-cylinder;

C<sub>6</sub> – crank-arm body;

C<sub>7</sub> – piston head;

C<sub>8</sub> – centre shaft;

C<sub>9</sub> – collar;

C<sub>10</sub> – seal snap ring;

C<sub>11</sub> – seal snap ring;

C<sub>12</sub> – seal snap ring;

C<sub>13</sub> – seal snap ring;

C<sub>14</sub> – blocking snap ring.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1		1		1		1								
2			1	1										
3														
4			1											
5	1					1								
→ 6		1					1		1					
7								1						1
8														1
9							1	1						
10														
11														
12														
13														
14														

a. Matrix  $A$ 

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Flag
1															
2			1	1											1
3															1
4			1												1
5															
→ 6		1					1		1						1
7								1						1	1
8														1	1
9							1	1							1
10															
11															
12															
13															
14															1

b. Matrix  $B$ Figure 3.16 Matrices  $A$  and  $B$  for the crank-arm body

$n_S = 8$ Wave No. 1 : 3 14 Wave No. 2 : 4 8 Wave No. 3 : 2 7 Wave No. 4 : 9 Wave No. 5 : 6
--

Figure 3.17 The disassembly waves for crank-arm body

Results obtained by the *PERT* method and by the method presented by Srinivasan et al. (1998a,b) can be compared with results obtained using the new method presented in this paper.

The disassembly waves obtained using the *PERT* method are:

$wave\ 1 = \{C_3, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}\}$ ;  $wave\ 2 = \{C_4, C_8\}$ ;  $wave\ 3 = \{C_2, C_7\}$ ;

$wave\ 4 = \{C_9\}$ ;  $wave\ 5 = \{C_6\}$  with  $n_S = 12$ .

For the realization of the disassembly of component  $C_6$  with the *PERT* method,  $n_S = 12$ , whereas  $n_S = 8$  using the new method presented in this paper. The disassembly waves obtained with the *PERT* method contain some components which are not necessary for disassembly. This is not the case using our new method.

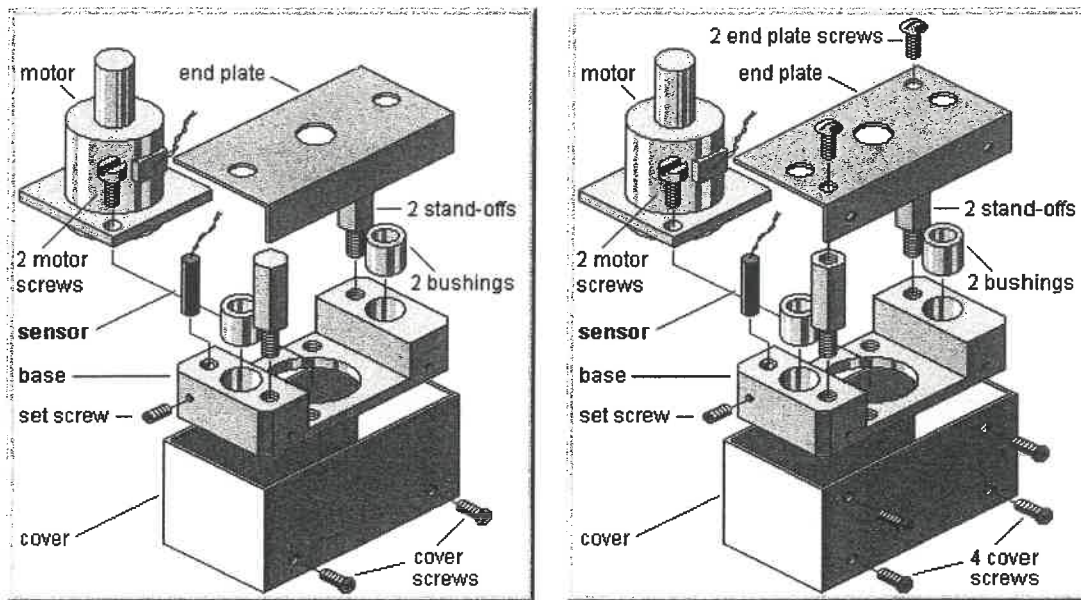
The disassembly waves obtained using the Srinivasan et al. method (1998a,b) are:

$wave\ 1 = \{C_{14}\}$ ;  $wave\ 2 = \{C_3, C_7\}$ ;  $wave\ 3 = \{C_2, C_4, C_8\}$ ;  $wave\ 4 = \{C_9\}$ ;

$wave\ 5 = \{C_6\}$  with  $n_S = 8$ .

It can be observed that the Srinivasan method obtains the same number of components for disassembly as the new method, that is  $n_S = 8$ . In this case, the advantage of the method presented in this paper is that the maximal number of components to disassemble is in the beginning waves, rather than in the ending waves as in the Srinivasan method. This represents an important practical advantage. It is preferable to begin disassembly starting with the maximum number of components than reduce the number of components as the process proceeds.

A second example with an electrical motor is presented in Figure 3.18a. The chosen component for disassembly is the motor (component  $C_6$ ).



Nomenclature		Units per Assy.
C <sub>1</sub>	Cover	1
C <sub>2</sub>	Base	1
C <sub>3</sub>	Stand-off	2
C <sub>4</sub>	Bushing	2
C <sub>5</sub>	Sensor	1
C <sub>6</sub>	Motor	1
C <sub>7</sub>	Motor Screw	2
C <sub>8</sub>	Cover Screw	2
C <sub>9</sub>	End Plate	1
C <sub>10</sub>	Set Screw	1

a

Nomenclature		Units per Assy.
C <sub>1</sub>	Cover	1
C <sub>2</sub>	Base	1
C <sub>3</sub>	Stand-off	2
C <sub>4</sub>	Bushing	2
C <sub>5</sub>	Sensor	1
C <sub>6</sub>	Motor	1
C <sub>7</sub>	Motor Screw	2
C <sub>8</sub>	Cover Screw	4
C <sub>9</sub>	End Plate	1
C <sub>10</sub>	Set Screw	1
C <sub>11</sub>	End Plate Screw	2

b

Figure 3.18 Electric motor

For disassembly of the motor, we determine the sequence  $W_1 = \{C_9, C_7, C_6\}$ , (Figures 3.18a, 3.19, 3.21a) which contains an irreversible operation (*IO*) between the end plate and the cover. In order to avoid this irreversible operation another design of the



assembly is proposed (Figures 3.18b, 3.20, 3.21b). In this case the end plate is assembled with the cover using screws  $C_8$  and  $C_{11}$ . The disassembly sequence will be as follows:  $W_2 = \{C_8, C_{11}, C_9, C_7, C_6\}$ .  $n_{S2} 5 > n_{S1} = 3$ , but the realisation of irreversible operations is avoided. In Figures 3.19 and 3.20 matrices  $A$  and  $B$  for the two disassembly sequences for the motors. The disassembly waves of the motor for the two disassembly sequences are shown in Figure 3.21.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2			1	1	1	1	1	1	1	
3									1	
4									1	
5	1								1	1
→ 6							1		1	
7									1	
8										
9										
10	1	1								

a. Matrix  $A$ 

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Flag
1											
2											
3											
4											
5											
→ 6							1		1		1
7									1		1
8											
9											1
10											

b. Matrix  $B$ 

Figure 3.19 Matrices for the first disassembly sequence for the motor

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2			1	1	1	1	1	1	1		1
3									1		
4									1		
5	1								1	1	
→ 6							1		1		
7									1		
8											
9								1			1
10	1	1									
11											

a. Matrix *A*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Flag
1												
2												
3												
4												
5												
→ 6							1		1			1
7									1			1
8												1
9								1			1	1
10												
11												1

b. Matrix *B*

Figure 3.20 Matrices of the second disassembly sequence for the motor

$n_s = 3$  $IO = 1$  Wave No. 1 : 9 Wave No. 2 : 7 Wave No. 3 : 6	$n_s = 5$  $IO = 0$  Wave No. 1 : 8 11 Wave No. 2 : 9 Wave No. 3 : 7 Wave No. 4 : 6
a	b

Figure 3.21 The disassembly waves of the motor

It can be seen that it is preferable to choose a disassembly sequence that has a larger number of components if dismantling of the components can be avoided.

A comparison between the results of the *PERT* method applied to this example with the results obtained by the new method has been made. The *PERT* method can not determine the disassembly wave because there is a cycle among the components  $C_2$ ,  $C_5$  and  $C_{10}$ , which are not absolutely necessary for disassembly. The new algorithm proposed in this paper eliminates components  $C_2$ ,  $C_5$  and  $C_{10}$  which are not necessary for disassembly and determines the disassembly sequence. The great advantage of the method introduced in this paper is the fact that it can account for cycles in component parts which are not necessary for disassembly.

The number of components for disassembly obtained using the Srinivasan et al. (1998a,b) method is the same as the new method, however the advantage of the method presented in this paper consists in the fact that the maximal number of components to disassemble is in the beginning, rather in the ending waves.

### **3.8 Conclusion**

The disassembly algorithm must be developed such that each assembly or component can be disassembled as easily as possible and with a minimum number of operations. In

this approach is applied it is not necessary to disassemble the whole product and this disassembly is the least destructive.

A new algorithm is proposed in this paper using wave propagation to determine the disassembly sequence depending on the immediate predecessors of the product components. This algorithm is capable of determining the disassembly sequence containing only absolutely necessary components to disassemble. In cases where the assembly must be done using irreversible operations, the best disassembly sequence is not necessarily the one that has the minimal number of components. In fact, if irreversible operations are present, dismantling of some components should occur.

The algorithm takes into consideration irreversible operations and determines the disassembly sequence that avoids them as much as possible. In the design phases of an assembly, this pursuit of the easiest possible product disassembly sequence allows the designer to make conscious decisions to avoid irreversible operations.

The great advantage of the algorithm presented in this paper is evident in the case where several disassembly sequences are possible and it is necessary to rapidly determine the optimal sequence with the minimum number of components to disassemble. For most sub-assemblies the algorithm can determine several disassembly sequences leaving the designer to choose that which best serves his requirements.

## Acknowledgement

This project is sponsored by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

## 3.9 Bibliography

ALTING, L. (1991). Life Cycle Design. Concurrent Engineering: Issues, Practice and Technology, 1, 6, 19-27.

ALTING, L. (1993). Designing for a Lifetime. Manufacturing Breakthrough, May/June edition, 29-33.

BOKS, C.B., BROUVERS, W.C.J., KROLL, E. and STEVELS, A.L.N. (1996). Disassembly Modelling: Two Applications to a Philips 21 Television Set. IEEE Int. Symp. Electronics and the Environment, Dallas, May, 224-229.

BOOTHROYD, G. (1987). Design for Assembly in Action. Assembly Engineering, 1, 1, 64-68.

BOOTHROYD, G. and ALTING, L. (1992). Design for Assembly and Disassembly. Annals of the CIRP, 42, 2, 625-636.

CASTAING, A. and BOURRIÈRES, J.P. (1999). A Reference Framework for Life-Cycle Design of Complex Products. Proceedings of the 1999 IEEE, International Symposium on Assembly and Task Planning, Porto, Portugal – July, 117-122.

EWERS, H.-J., SCHATZ, M., FLEISCHER, G. and DOSE, J. (2001). Disassembly Factories: Economic and Environmental Options. Proceedings of the 4<sup>th</sup> IEEE, International Symposium on Assembly and Task Planning, May 28-29, Fukuoka, Japan, 447-452.

FERNANDEZ, R. and ZERHOUNI, N. (2001). Modelling and analysis of disassembly systems using continuous Petri nets. Proceedings of the 4<sup>th</sup> IEEE, International Symposium on Assembly and Task Planning, May 28-29, Fukuoka, Japan, 232-237.

FOUDA, P., De LIT, P., REKIEK, B. and DELCHAMBRE, A. (2001). Generation of Precedence Graphs for a Product Family Using a Disassembly Approach. Proceedings of the 4<sup>th</sup> IEEE, International Symposium on Assembly and Task Planning, May 28-29, Fukuoka, Japan, 226-231.

GRAEDEL, T.E., ALLENBY, B.R. and COMNIE, P.R. (1995). Matrix Approaches to Abridged Life Cycle Assessment. Environmental Science and Technology, 29, 3, 134-139.

HATTORI, M., NOMURA, N., SOMMER, D. and INOUE, H. (1995). Fundamentals of Environmentally Conscious Product Design. International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing, 4, 1, 3-11.

HATTORI, M. and WAIDA, T. (1999a). Parts Selection for High Quality Material Recycling. 15<sup>th</sup> ISPE/IEE International Conference on CAD/CAM, Robotics, and Factories of the Future, Águas de Lindóia, SP, Brazil, 18-20 August.

HATTORI, M., INOUE, H. and NOMURA, N. (1999b). Design Strategy for Ecologically Conscious Product. Sustainable Product Development, part. III, 99-106.

JABBOUR, T., MASCLE, C. and MARANZANA, R. (1998). A database for the representation of Assembly Features in Mechanicals Products. International Journal of Computational Geometry & Applications, 8, 5&6, 483-507.

KANAI, S., SASAKI, R. and KISHINAMI, T. (1999). Representation of Product and Processes for Planning Disassembly, Shredding and Material Sorting based on Graphs. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP '99), July 22-24, Porto, Portugal, 123-128.

LAMBERT, A.J.D. (1997). Optimal disassembly of complex products. International Journal of Production Research, 35, 9, 2509-2523.

LAMBERT, A.J.D. (1999). Optimal disassembly sequence generation for combined material recycling and part reuse. 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP '99), July 22-24, Porto, Portugal, 146-151.

LAPERRIÈRE, L. (1992). Generative Assembly Process Planning. Thèse de doctorat, McMaster University, Canada.

LEE, K. (1998). Destructive Design for Disassembly. Thèse de Maîtrise, University of Wisconsin-Madison, U.S.A.

MASCLE, C. (1990). Approche méthodologique de détermination de gammes par le désassemblage. Thèse de doctorat ès Sciences, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse.

MASCLE, C. (1998). Automatic a priori, a posteriori or appropriate determination of subassemblies. International Journal of Production Research, 36, 4, 1001-1021.

MASUI, K., MIZUHARA, K., ISHII, K. and ROSE, C. (1999). Development of Products Embedded Disassembly Process Based on End-of-life Strategies. First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, EcoDesign '99, IEEE Computer Society, February 1-3, Tokyo, Japan.



MOORE, K., GUNGOR, A. and GUPTA, S. (1998). Disassembly Process planning using Petri nets. Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 88-93.

MURAYAMA, T., OBA, F., ABE, S. and YAMAMICHI, Y. (2001). Disassembly Sequence Generation using Information Entropy and Heuristics for Component replacement. Proceedings of the 4<sup>th</sup> IEEE, International Symposium on Assembly and Task Planning, May 28-29, Fukuoka, Japan, 208-213.

NOBERT, Y., OUELLET, R. and PARENT, R. (2001). La recherche opérationnelle, 3<sup>e</sup> édition. Edited by Gaëtan Morin Ltée., Boucherville, Canada, 428-435.

NONOMURA, A., TOMYIAMA, T. and UMEDA, Y. (1999a). Life Cycle Simulation for the Inverse Manufacturing. Proceedings of the First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, EcoDesign '99, IEEE Computer Society, February 1-3, Tokyo, 712-717.

NONOMURA, A., TOMYIAMA, T. and UMEDA, Y. (1999b). Life Cycle Simulation for the Inverse Manufacturing. Proceedings of the 6<sup>th</sup> CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering, June 21-23, Kingston, Canada, 304-313.

ROSE, C., BEITER, K.A., ISHII, K. and MASUI, K. (1998). Characterisation of product end-of-life strategies to enhance recyclability. Proceedings of DETC 98, 1998 ASME Design for Manufacturing Symposium, September 13-16, Atlanta, Georgia, 1-9.

SELINGER, G., KEIL, T., MÜLLER, K. and PERLEWITZ, H. (1997). More Use with fewer Resources – A Contribution towards Sustainable Development. Life Cycle Networks, London, Chapman & Hall.

SELINGER, G., GRUDZIEN, W. and MÜLLER, K. (1998). The acquiring and handling of devaluation. Proceedings of the Life Cycle Design'98, Stockholm, Sweden, 99-108.

SELINGER, G., MÜLLER, K. and PERLEWITZ, H. (1999). Product and Process Planning for Recycling. Proceedings of the First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Eco Design '99, IEEE Computer Society, February, Tokyo, Japan.

SRINIVASAN, H. and GADH, R. (1998a). A geometric algorithm for single selective disassembly using the wave propagation abstraction. Computer-Aided Design, 30, 8, 603-613.

SRINIVASAN, H. and GADH, R. (1998b). Complexity Reduction in Geometric Selective Disassembly, Using the Wave Propagation Abstraction. International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 16-21, Leuven, Belgium.

SRINIVASAN, H. and GADH, R. (1999a). Selective Disassembly : Representation and comparative Analysis of Wave Propagation Abstraction in Sequence Planning. 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP '99), July 22-24, Porto, Portugal, 129-134.

SRINIVASAN, H., FIGUEROA, R. and GADH, R. (1999b). Selective disassembly for virtual prototyping as applied to de-manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 15, 3, 231-245.

SRINIVASAN, H., MO, J., FIGUEROA, R. and GADH, R. (1999c). Virtual assembly and Disassembly, I-CARVE's A3D CAD Projects. Silicon Graphics World Magazine, June, 13-14.

SUBRAMANI, A.K. and DEWHURST, P. (1991). Automatic generation of product disassembly sequence. Annals of the CIRP, 40, 1, 115-118.

TOMIYAMA, T. (1997). A Manufacturing Paradigm Toward the 21<sup>st</sup> Century. Integrated Computer Aided Engineering, 4, 159-178.

TOMIYAMA, T. (2000). Knowledge Intensive Engineering towards Sustainable Products with High Knowledge and Service Contents. Third International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE 2000, April 18-20, Delft, the Netherlands, 55-67.

TOUZANNE, F. and PERRARD, O. (1999). Representation of Disassembly Processes in Order to allow time evaluation of their performances. 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP '99), July 22-24, Porto, Portugal, 135-140.

WOO, T.C., DUTTA, D. (1991). Automatic Disassembly and Total Ordering in Three Dimension. Journal of Engineering for Industry, 113.

WOO, T.C., DUTTA, D. (1992). Algorithms for Multiple Disassembly and Parallel Assemblies. Concurrent Engineering, ASME, 59.

## **CHAPITRE 4**

### **VERS UNE NOUVELLE APPROCHE DE DÉSASSEMBLAGE EN UTILISANT LA PROPAGATION DE VAGUES**

#### **4.1 Désassemblage par la propagation de vagues**

Souvent, dans la réalisation pratique du processus de désassemblage, pour isoler un sous-ensemble, on doit tenir compte que les composants qui doivent être désassemblés dépendent les uns des autres. Parfois le désassemblage se réalise assez difficilement et avec des coûts importants. De ce point de vue, lors du désassemblage, dans le but d'obtenir un sous-ensemble ou un composant, on peut réaliser le remplacement des composants qui sont à côté, même si ils sont encore en bon état ; cela est recommandé dans le but d'effectuer une maintenance préventive pour éviter d'arriver à un désassemblage difficile et coûteux.

La méthode de désassemblage par la propagation de vagues présentée dans ce mémoire, nous aide à déterminer la meilleure gamme de désassemblage pour les composants sélectionnés, pour une réalisation facile, avec un nombre optimal de composants à désassembler et pour un prix minimum. Cette méthode est performante, précise et respecte l'ordre du désassemblage.

L'algorithme de la propagation de vagues présenté, par Srinivasan et al. (1998a) avec les modifications qu'on a apporté, peut être résumé de la façon suivante :

Donnée : un composant  $C_x$  à désassembler.

L'objectif : Déterminer la meilleure gamme de désassemblage pour le composant  $C_x$  par l'algorithme de propagation de vagues.

1.  $\tau_0 = \{C_x\}$ .

2. Déterminer si  $C_x$  peut être désassemblé. Étudier la désassemblabilité  $\Delta$

Si  $\Delta C_x = \text{vrai} \Rightarrow$  la gamme de désassemblage est déterminée

Si  $\Delta C_x = \text{faux} \Rightarrow$  la gamme de désassemblage n'est pas encore déterminée.

3. Déterminer la multitude des composants adjacents  $MA_{C_x}$  avec lesquelles  $C_x$  est en contact.

4. Étudier l'influence de l'enlèvement  $RI$

Si  $RI_{C_x}^{C_j} = \text{vrai} \Rightarrow$  il est nécessaire de désassembler  $C_j$

Si  $RI_{C_x}^{C_j} = \text{faux} \Rightarrow$  il n'est pas nécessaire de désassembler  $C_j$ .

5. Calculer  $\Delta C_j$  pour les composants de la multitude  $MA_{C_x}$  pour lesquels  $RI_{C_x}^{C_j} = \text{vrai}$ .

Si  $\Delta C_j = \text{vrai} \Rightarrow$  la gamme de désassemblage est déterminée

Si  $\Delta C_j = \text{faux} \Rightarrow$  la gamme de désassemblage n'est pas encore déterminée.

6. Au  $t = t + 1$ , on répète le processus et on détermine le  $\tau_t$ .

7. Déterminer pour chaque gamme de désassemblage, le nombre d'opérations irréversibles  $IO_{Ci}^{Cj}$ .
8. À partir des gammes  $W$  trouvées, choisir celle qui a le nombre de composants  $n_s$  minimal, après avoir vérifié s'il y a des processus de désassemblage spéciaux, comme les opérations irréversibles. La gamme qui satisfait ces exigences, est la gamme optimale  $OS$ .
9. Analyser les séquences de désassemblage pour mettre en évidence les opérations qui peuvent être faites en parallèle, pour vérifier les problèmes de stabilité du sous-ensemble et pour évaluer l'influence de l'accessibilité ou de la forme géométrique.

#### **4.2 Présentation d'un nouvel algorithme de désassemblage sélectif**

Le désassemblage sélectif représente le désassemblage d'un sous-ensemble d'un, ou de plusieurs, composants qui seront réparés ou remplacés. Ainsi, dans le cas d'une défection sur un avion, on sait bien que pour la maintenance d'un sous-ensemble d'avion, il est suffisant de désassembler seulement le sous-ensemble défectueux et non pas l'avion au complet. Le désassemblage sélectif est très important dans le cas du démontage et surtout pour effectuer la maintenance et le recyclage.

Ces considérations nous amènent à déterminer la meilleure gamme de désassemblage pour chaque sous-ensemble. Pour y arriver, on doit déterminer quels sont les composants dépendants les uns des autres et ensuite préciser quels sont les composants

du sous-ensemble qui seront désassemblés par la suite. Ainsi, on sélectionne « la meilleure gamme de désassemblage ».

On va résumer l'algorithme de la propagation de vagues présenté dans ce mémoire, qui est utilisé pour sélectionner la meilleure gamme de désassemblage pour un composant.

### **4.3 Étapes de notre l'algorithme sélectif de désassemblage par vagues (illustration à l'aide d'un exemple)**

On présente ici les grandes étapes de notre algorithme qu'on propose pour le désassemblage par vagues pour extraire un composant donné. Cette présentation n'est pas formalisée, elle illustre seulement l'idée fondamentale de l'algorithme et elle est essentielle pour la compréhension de la formalisation mathématique de cet algorithme que l'on retrouve au chapitre 5 avec les justifications théoriques de notre algorithme.

Étape 1. Acquisition des données

$n$  – le nombre de composants ;

$x$  – le numéro du composant à extraire ( $1 \leq x \leq n$ ) ;

$A$  – la matrice non symétrique des prédécesseurs immédiats.



Pour notre exemple :  $n = 8$  ;  $x = 4$ .  $A(3,8) = 1$ , car juste avant  $C_3$  il faut extraire  $C_8$ . Sur le graphe A présenté à la figure 4.1, on trace une flèche de  $C_3$  vers  $C_8$ . De même,  $A(4,5) = 0$ , car on n'est pas obligé d'extraire  $C_5$  avant  $C_4$ .

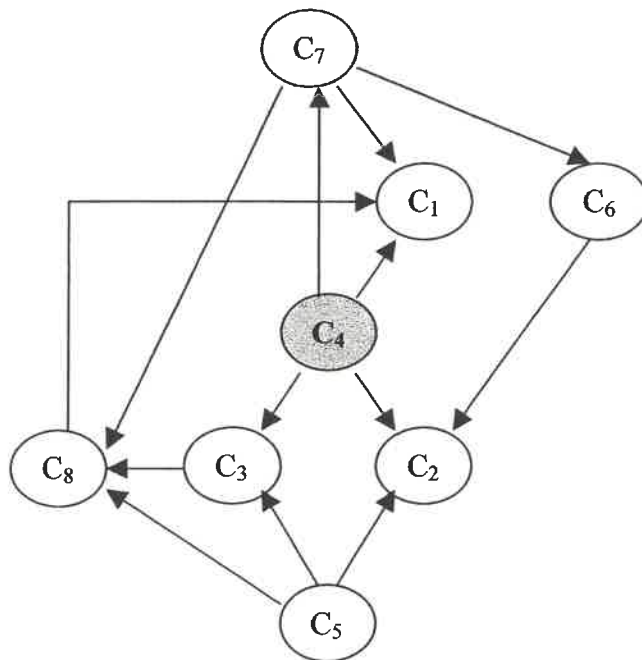


Figure 4.1 Graphe A

Étape 2. On élimine les liaisons inutiles pour l'extraction de  $C_x$  (ici,  $x = 4$ ). On obtient ainsi la matrice binaire (ou le graphe orienté) noté  $B$  présenté à la figure 4.2.

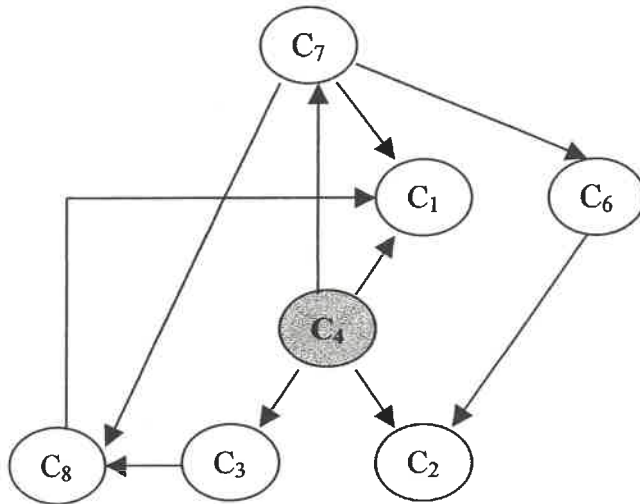


Figure 4.2 Graphe B

Étape 3. Construction des vagues successives pour extraire  $C_x$  ( $x = 4$ ).

*Vague 1* : donnée par la totalité des nœuds du graphe *B* sans flèches sortantes.

*Vague 1* =  $\{C_1, C_2\}$ .

*Vague 2* : on élimine du graphe *B* les nœuds de la *Vague 1* ainsi que les flèches qui y arrivent. On obtient ainsi le graphe *C* présenté à la figure 4.3.

*Vague 2* = les nœuds sans flèches sortantes.

*Vague 2* =  $\{C_6, C_8\}$ .

*Vague 3* : On élimine les nœuds 6 et 8 ainsi que les flèches qui y arrivent. On obtient le graphe *D* présenté à la figure 4.4.

*Vague 3* = les nœuds du graphe *D* sans flèches sortantes.

*Vague 3* =  $\{C_3, C_7\}$ .

*Vague 4* =  $\{C_4\}$ .

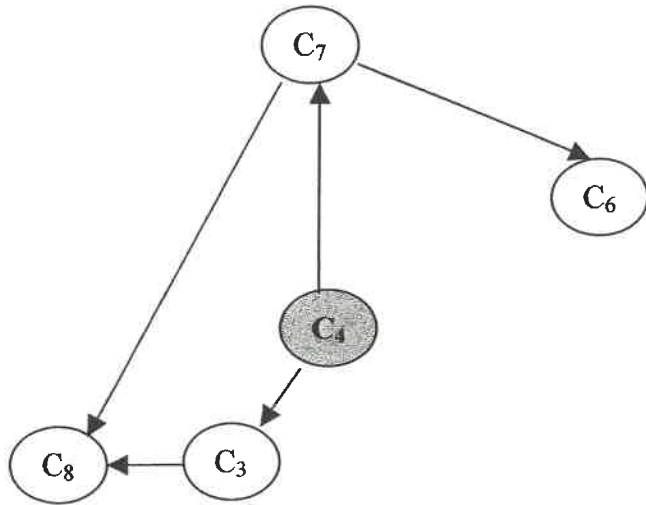


Figure 4.3 Graphe C

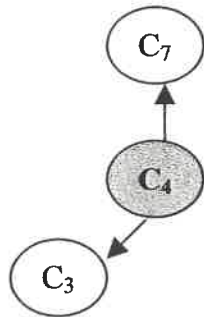


Figure 4.4 Graphe D

L'Annexe II présente un guide d'utilisation du logiciel, appelé *WaveDisassembly* (développé en Visual Basic, version 6).

#### 4.4 Parallélisme entre les deux approches

Dans ce mémoire, nous avons présenté une méthode de désassemblage, la propagation de vagues, à l'aide de laquelle nous déterminons la meilleure gamme de désassemblage pour un composant sélectionné. La spécificité de cette méthode est de réaliser un désassemblage facile, avec un nombre minimal de composants à désassembler.

Cette méthode utilise la notion de prédécesseur immédiat d'un composant ; elle permet à l'utilisateur de choisir la gamme de désassemblage désirée. En pratique, la gamme avec le nombre minimal de composants à désassembler est, en général, la meilleure. De plus, l'utilisateur n'a pas toujours le temps d'étudier toutes les gammes de désassemblage possibles. En général, il choisit la meilleure gamme de désassemblage parmi celles qui sont à sa disposition et qui lui conviennent le mieux. Cette méthode est rapide et facile à utiliser ; elle permet à l'utilisateur de choisir une gamme de désassemblage avec un nombre minimum de composants. L'utilisateur doit tenir compte de toutes les contraintes précisées auparavant ; il doit introduire dans la matrice des prédécesseurs immédiats, tous les prédécesseurs absolument nécessaires pour chaque composant, ensuite l'algorithme détermine automatiquement la meilleure gamme de désassemblage pour la situation respective.

L'avantage essentiel de notre méthode est qu'elle a, dans la vague la plus éloignée du composant à désassembler, un nombre maximal possible de composants, alors que dans

l'algorithme de Srinivasan et al. (1998a, 1999b) la vague la plus rapprochée du composant à désassembler contient un nombre maximal de composants. Nous considérons que dans le cas du désassemblage de grands ensembles, il est préférable, pour des raisons pratiques, de commencer à désassembler d'abord un nombre maximal de composants.

Notre algorithme permet une simulation interactive en choisissant les gammes les plus intéressantes et sans avoir besoin de calcul, on peut éliminer les gammes qui sont visiblement inutiles.

**CHAPITRE 5**  
**ALGORITHMIC SELECTION OF A DISASSEMBLY SEQUENCE OF A**  
**COMPONENT BY A WAVE PROPAGATION METHOD**

Soumis à *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*

Edition *Elsevier Science*

### **5.1 Abstract**

The design of a product for its entire life-cycle is becoming more and more important. Nowadays, a product is designed with significant considerations for its manufacturability, serviceability, its functionality and even for its disassemblability. This is due to the fact that the modern consumers demand products that are not only functional, but also reliable, easy to repair and also environmentally friendly.

For maintenance and re-use, the operation sequencing in disassembly process planning needs of reversible operation selection.

In this paper, we present a new wave propagation disassembly algorithm of the determined component of a product; the required data are the immediate predecessors of each component.

It is shown that the solution exists and it is unique if only if: the binary matrix of the immediate predecessors is non-symmetrical and the data does not contain a cycle. A tracked down cycle method in the data is also proposed.

**Key words:** wave propagation, disassembly, removal influence, irreversible operations, adjacent components, and matrix of the immediate predecessors.

## 5.2 Nomenclature

The nomenclature used in this present article is similar to the one of Srinivasan et al. (1999a, 1999b), i.e.:

- $A_{SS}$  : the assembly or sub-assembly formed by the components studied
- $A$  : the matrix of the immediate predecessors; type  $n \times n$   
 $A(i,j) = 1$  if and only if  $j$  must be disassembled immediately before  $i$
- $B$  : sub-matrix of  $A$ ; it contains *only* the components (near or far), that are linked to the component  $C_x$  to disassemble
- $C_x$  : the component for which we determine the wave propagation
- $C_i$  : a component of the  $A_{SS}$  sub-assembly
- $\Delta_i$  : disassembibility of a component  $C_i$
- $MA_{C_i}$  : the adjacent components with which  $C_i$  is in contact
- $n_S$  : total number of the components in the disassembly sequence
- $OS$  : optimal sequence

- $RI_{Ci}^{Cj}$  : removal influence ( $i \neq j$ )
- $t$  : time
- $\tau_i$  :  $i$ th wave front of a  $\tau$  wave
- $W$  : components of front waves on the whole length of the waves

### 5.3 Introduction

Disassembly is generally achieved by taking individual components, or subassembly, apart from a larger product. Disassembling a selected component, or a set of components, has many applications in engineering, such as for product maintenance, re-using and virtual assembling. Process planning is the act of preparing detailed operation instructions to transform an engineering design to a final product (Chang, 1990), but now it is also to transform a failed product to an operational product, on an end-of-life product to sorted components or materials.

In general, disassembly process planning consists of several or all of the following activities: selection of disassembling operations; sequencing of disassembling operations; selection of transferring and grasping tools; determining set-up requirements; calculations of cycle times; tool path planning and generation of robot programs; etc.



Among the process planning activities this paper considers the operations selections and sequencing at the same time. In others words, the problem considered here is to determine components to disassemble such that the resulting solution satisfies the precedence constraints among irreversible or reversible operations.

## **5.4 State of the art**

### **5.4.1 Overview**

Even though the area of design for disassembly research is relatively new, a lot of research activities are in progress with new ideas and approaches for building products that are easy to dismantle, and for maintenance or recycling purpose. Therefore, in the next section, a brief overview of some of the more significant publications in the field of the design for disassembly is presented.

### **5.4.2 Design for disassembly**

Most previous research articles consider the operation-sequencing problem only for reversible operation in disassembly planning.

Lambert (1999) used the term “selective disassembly” which is a reversible disassembly more or less destructive or the partial “dismantling” of complex products in sub-

assembly or components. This process is performing because of two elements: the separation of some components and the materials for their utilisation, from what we don't desire to use. The international economical tendencies to put more and more accents on the recycling of products and re-use of the materials and components in the largest possible proportion.

Boothroyd (1987, 1992) is the creator of the procedure-based design for assembly and disassembly. He shows that addressing disassemblability and recyclability at the design stage provides greater financial benefits at the end of product life.

Ishii (1993), introduces a life-cycle design methodology called "clumping". Here, clumping refers to a collection of components and/or subassemblies that share a physical relationship and some common characteristic based upon user intent. Ishii claims that clumping can be used to achieve increased product retirement values such as reuse, recycling and disposal by treating similar subassemblies of a design as one unit and calculating the cost of removing or accessing this unit or "clump" from the rest of the assembly.

Woo (1987) have done extensive research in disassembly sequence generation and classification of assemblies using their geometric complexity (Woo et al., 1991). They use strictly translation motion of a robot. By traversing a so-called "disassembly tree" generated by mapping the boundary representation to a tree structure, which generates a

minimal sequence of disassembly and/or assembly. Based on this idea, Woo also developed an algorithm for disassembling multiple and parallel assemblies (Woo et al., 1992).

Due to increased environmental awareness and the shortage of natural resources, much researches has been conducted that ties in design for disassembly technology with design for environment issues. A broader design paradigm than design for disassembly, design for environment can be approached from many different viewpoints. Here, mainly design for recyclability perspectives of the design for environment are examined.

Li et al. (1995) formulates a comprehensive economic model for disassembly analysis. A simulated algorithm is employed to find the optimal sequences that yield the maximum return value and to determine where the disassembly operation should stop. It ties this method as a potential tool for analysing the environmental friendliness of selecting product materials, assembly configurations and fastening methods.

Kirby et al. (1993) discuss the disassembly in a practical point of view. In their research, they define how such factors, as material selection process, fastening methods, etc., may affect recycling machine parts. They identify some of the knowledge-base information that a good disassembly tool could be made to take advantage of.

### 5.4.3 Wave propagation approach

An other interesting approach is presented by Srinivasan et al. (1998a,b 1999a,b). This approach uses an algorithm to determine the disassembly directions of a component of assembly, the directions in which each component part of the assembly can be removed without any obstruction during the disassembly process.

Srinivasan et al. (1999b) present the influence of the geometrical form on the disassembly. They use the “selective disassembly” term, which represents only the disassembly of a sub-assembly or a component, which has to be repaired or replaced. They present an airplane defection case and show that in the case of maintenance of an airplane sub-assembly, it is sufficient to disassemble only the defective sub-assembly according to the less expensive disassembly sequence in time and money.

The idea is to determine the best disassembly sequence for a sub-assembly. The authors set out the accessibility constraints, to define which components depend one on another, which will be after disassembled and finish by selectioning “the best disassembly sequence”.

The component disassembly in an assembly is defined as being a selective disassembly. This aspect is important for the maintenance, recycling and re-use applications. The idea is to determine in this way the minimum number of components that must be

disassembled. The authors use the expression of “wave propagation”, which is a step-by-step disassembly method. This method allows to determine the distance of the all components relative to the “impact” which represents the respective component and so the minimal number of the components which must be disassembled to extract the respective component. In order to do that, we have to determine the optimal number of the components that must be disassembled; we must assure ourselves that the geometrical accessibility is present in order to assure the disassembly. More precisely, we talk about the space and the available faces for the useful insertion, of the device or of the robot arm, which help to realise the disassembly.

Srinivasan et al. (1998a) present the sorting importance of one or several selected components from the sub-assembly. This method is appropriate to assure an easy maintenance, to effect the recycling, as well as for the assembly of one or several components.

The “selective disassembly” as proposed, has three steps:

1. The identification of the selected components which will be disassembled with the help of a program or the designer;
2. The determination of a better assembly sequence of the selected components for an easy realisation with a minimum number of components. So, after the study of these aspects, an optimal re-identification of the components which will be disassembled must be done.

3. A precise high-performance disassembly, which respects the order of the disassembly.

Sometimes, the disassembly is realised with difficulties and with important costs. If the disassembly for maintenance is done, sometimes, it is preferable to replace the component, which are in contact, even if they are still in a good condition. The selective disassembly is very important in the “de-manufacturing” case, especially for the maintenance and recycling realisation.

Srinivasan et al. (1998b) propose to determine the optimal number of components that must be disassembled, having the assurance of meeting the necessary geometrical accessibility in order to assure the dismantling.

For quick reference, shortly we present the results obtained by Srinivasan and Gadh (1998a) methods applied to the assembly  $A_{SS}$  as shown in the Figure 5.1a.

For  $t = 0$ ,  $\tau_0 = C_X = C_3$ , we have  $MA_3 = \{C_1, C_2, C_4\}$ , so for  $t = 1$ ,  $\{C_1, C_2, C_4\} \in \tau_1$ .

So, we can choose the wave  $\tau_1$ , the direction  $C_3 \rightarrow C_4$  or  $C_3 \rightarrow \{C_1, C_2\}$ . Fairly, we have on  $\tau_2$ , the components  $C_{11}$  and  $C_6$  (because  $C_2 \rightarrow C_{11}$  and  $C_4 \rightarrow C_6 \rightarrow \{C_7, C_8\}$ ).

We choose the disassembly sequence  $W_1 = \{C_{11}, C_1, C_2, C_3\}$  where  $n_S = 4$ , as an alternative to  $W_2 = \{(C_7, C_8), C_6, C_4, C_3\}$  where  $n_S = 5$ . So, the optimal sequence  $OS = \{C_{11}, C_1, C_2, C_3\}$ .

The schema at the Figure 5.1b illustrates this solution.

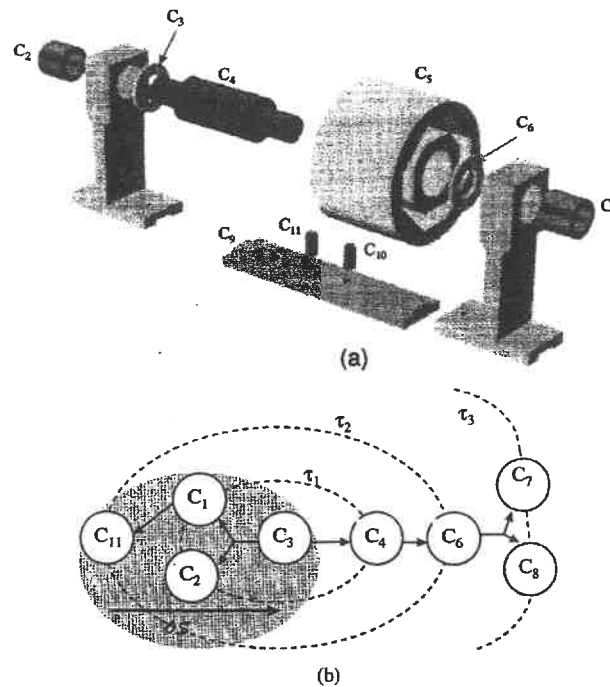


Figure 5.1 The results with Srinivasan's and Gadh's method

#### 5.4.4 Summary

Design for disassembly methods may come together to form interactive design tools and they will help to design the most disassembly-friendly products (Siddique et al., 1996). The design for disassembly research needs to focus on the near future and they will be one of the keys of technology.

All of these researchers focus on generating either motion or disassembly sequences, for removing components of an assembly. Also, most of them are based on some sort of a

geometric constraint or another. These methods assume that the components are readily removable. In real life scenarios, this is not always the case. This paper introduces a new algorithm, which help us to determine the most suitable sequence of disassembly for whatever product it may be along some assumptions that will be discussed later.

## **5.5 Solution Approach and Algorithms**

### **5.5.1 Application context of the algorithm proposed**

#### **5.5.1.1 Non-symmetric assumption**

We impose the following constraint: if the component  $i$  is an immediate predecessor of the  $j$  component, and inversely. Then, we must choose only one of the possibilities. This restriction can be avoid by applying the same algorithm several times or by choosing the relation of the immediate predecessors depending on the required time for the disassembly.

#### **5.5.1.2 Disassembly of only one component**

The goal of this algorithm is to give only the waves of the disassembly that are *absolutely necessary* to extract a component  $x$  of an assembly. In consequence, several components, non-absolutely necessary to extract this component will not be



disassembled; the algorithm can be applied a second time to disassemble another component among the remained components. So, this is a selective disassembly algorithm. This case is met in practice for the recuperation of a component  $x$  (in recycling for example); we don't need to disassemble the whole assembly of components.

### 5.5.1.3 Assembly versus disassembly

The same algorithm can be used to assemble a fitted component by waves. The waves are considered in inverse order. It is about assembly a fitted component with all components which are linked with it (near or far). For the non-symmetric constraint, the remarks, done for the disassembly, remain valid.

## 5.5.2 Notations and definitions

- *Disassembility*

Precise propriety for the binary variable which indicates if the  $C_j$  components is removable or not (so if  $WP$  is determinate or not).

If  $\Delta C_j = \text{true} \Rightarrow$  the  $WP$  is determinate

If  $\Delta C_j = \text{false} \Rightarrow$  the  $WP$  is not as yet determinate.

- *Adjacent links multitude*

Two components  $C_i$  and  $C_j$  ( $i \neq j$ ) are in contact, if they have one or several faces totally or partially in contact. Each existing link between components reduces the number of freedom degrees. We define  $MA_{C_i}$  as the multitude of adjacent links ( $MA$ ) of the  $C_j$  components which are in contact with  $C_i$ .

- *Disassembly direction*

Each disassembly direction is noted  $d_{i,j}$  and represents the chosed disassembly direction of the  $C_i$  component which is to be disassembled relatively to  $C_j$ .

- *The removal influence*

The removal influence  $RI_i^j$  is a binary variable which indicates if we can move away  $C_i$  in the absence of several components  $C_j \in MA_{C_i}$   $i \neq j$ .

If  $RI_{C_i}^{C_j} = \text{true} \Rightarrow$  it is necessary to disassemble  $C_j$ .

If  $RI_{C_i}^{C_j} = \text{false} \Rightarrow$  it is not necessary to disassemble  $C_j$ .

If we can disassemble a component by moving another component, we say that it is a removal influence on the disassembly.

Given  $C_1, C_2, \dots, C_n$  the set of components of a sub-assembly and  $C_x$  the component to extract ( $1 \leq x \leq n$ ). We note  $A$  the binary matrix definite by:  $A(i,j) = 1$ ,  $i \neq j$  only if  $C_j$  is an immediate predecessor of  $C_i$ . The relation  $A(i,j) = 1$  can be represented in a graph as  $C_i \rightarrow C_j$ . We say that matrix  $A$  is non-symmetric if  $A(i,j) + A(j,i) < 2$ ,  $\forall i$  and  $j$ . We

name *chain leaving from*  $C_{i_1}$ , *arriving in*  $C_{i_q}$  an assembly  $\{C_{i_1}, C_{i_2}, \dots, C_{i_q}\}$  of components as:  $C_{i_1} \rightarrow C_{i_2} \rightarrow \dots \rightarrow C_{i_q}$ .

We name *empty line* any line  $i$  having the condition  $A(i, k) = 0$ , for any values of  $k = 1, 2, \dots, n$  (meaning if  $\sum_{k=1}^n A(i, k) = 0$ ).

A chain  $\{C_{i_1}, C_{i_2}, \dots, C_{i_q}\}$  is cyclic if  $C_{i_q} \rightarrow C_{i_1}$ . We also say that, in this case, the matrix itself has a cycle.

The algorithm constructs the waves from a matrix  $B$  obtained from  $A$  in the following manner:  $B(i, j) = 1$  only if  $A(i, j) = 1$  and if it exists a chain leaving from  $C_x$  and arriving to  $C_i$  ( $C_x$  being the component to disassemble).

Otherwise said,  $B(i, j) = 1$  only if  $C_i \rightarrow C_j$  is a *link* of a chain leaving from  $C_x$  and arriving to  $C_j$  ( $C_x$  being the component to extract)

### 5.5.3 The algorithm basis

The algorithm determines automatically the total number of components  $n_S$  for the target component  $C_x$  in the manner that it satisfies the functional objective.

The main attributes of the wave propagation  $WP$  method to determine the optimal sequence of disassembly are:

1. Find the minimum components to disassemble;
2. Determine the components  $C_j \in A_{SS}$  to disassemble the  $C_x$  element, chosen with a minimal number of components and movements;
3. Determine the number of component of  $A_{SS}$  which will be analysed with  $WP$  method for the element  $C_x$  disassembly. The number varies between  $1$  and  $n$ , depending on the  $C_x$  position in  $A_{SS}$ . If  $C_x$  is at a geometrical extremity side of the sub-assembly, the number of analysed components is small.

The nodes of the graph of the sub-assembly  $A_{SS}$ , correspond at the  $C_i$  components which form the sub-assembly.

*Step 1 (to obtain the matrix B)*

The construction of the matrix  $B$  from  $A$  (by putting at  $0$  some values  $1$  of  $A$ ) has been realised with the help of a non-exhaustive algorithm of the “branch and bound” type. An illustration of a matrix  $B$  obtained from a matrix  $A$  ( $n = 11$ ) is given at the Figure 4.2b.

*Step 2 (wave construction)**Lemma 1*

If  $B$  doesn't have cycle, then it has at least one empty line  $i$  such  $\sum_{k=1}^n B(k, i) \geq 1$   
 (meaning that  $C_i$  doesn't have predecessor but  $C_i$  is connected to  $C_x$  by a chain).

*Remark:* The propriety  $\sum_{k=1}^n B(k, i) \geq 1$  is verified when  $C_i$  is connected to  $C_x$ .

An existing cycle is detected when it is impossible to find an empty line  $i$  such

$\sum_{k=1}^n B(k, i) \geq 1$  after  $n$  tries or more. In effect, if all components have a predecessor, this

last one will be, in its turn, a predecessor. We conclude that we obtain finally a cycle,

because the components number is finished.

*Wave no.1 construction*

The assembly of the lines of  $B$  verifying the condition of *Lemma 1* represents the first wave (meaning the assembly of components to disassemble at first if we want to extract  $C_x$ ). Indeed, these components don't have immediate predecessor and they must be disassembled before extracting  $C_x$ , so there is a chain connecting  $C_x$  to these components (by the definition of  $B$ ).

*Lemma 2* (construction of the following wave)

If  $B$  is non-symmetric and if the component set  $\{C_{i_1}, C_{i_2}, \dots, C_{i_q}\}$  represents a wave, so, by putting again at 0 all the elements  $B(k, i)$  where  $i = i_1, i_2, \dots, i_q$  and by eliminating the lines  $i_1, i_2, \dots, i_q$ , we obtain a matrix  $B'$  verifying *Lemma 1*.

*Justification*

As the component set  $\{C_1, C_2, \dots, C_q\}$  is a wave, by putting again to 0 the elements  $B(k, i)$  where  $i = i_1, \dots, i_q$  and  $k = 1, 2, \dots, n$ , we remove *the last link* of the chain leaving from  $C_x$ , arriving in  $C_1, C_2$ , and  $C_q$ , and so  $B'$  verifies the conditions of *Lemma 1*.

*Result:*

We can construct the following wave as being the first wave of the new matrix  $B'$ .

*Notice:*

The algorithm allows to find an unique solution when  $B$  is non-symmetric (cf. *Lemma 2*). The *Lemma 1* and *2* assure the existence and the unique solution.

#### 5.5.4 The case of non-symmetric matrix

If we have simultaneous  $C_i \rightarrow C_j$  and  $C_j \rightarrow C_i$ , in fact, this is a particular case of cycle.

In this case, the program should be executed twice (one time with  $A(i,j) = 1$  and  $A(j,i) = 0$  and another time with  $A(i,j) = 0$  and  $A(j,i) = 1$ ).

The choice between these two solutions implies to take into consideration others criteria (for example: minimising the asked disassembly time). This problem is resolved by choosing the symmetric elements as an alternative to the first diagonal in the way that the addition of the corresponding asked time be minimal (this can be done by applying algorithms of linear programming, for example). After that, we apply the algorithm already presented.

#### 5.5.5 Disassembly cases of different components in the same product

The disassembly cases of several components successively chosen can be done also by successive applications of the same algorithm.

## 5.6 Numerical results obtained with the algorithm

The algorithm has been implemented as a functional computer program called “*WaveDisassembly*”, using the programme language Visual Basic, Version 6. The user must choose the number of components and complete the matrix of immediate predecessors for each component. He is guided at each step of the data input. The interface is presented at Figure 5.2. The solution (Figure 5.3) appears as a list (a wave per line).

We tried the algorithm with the data given by the example used by Srinivasan et al. (1998a), and we obtained the same results; to compare these results, please see the Figures 5.1b, 5.2 and 5.3.

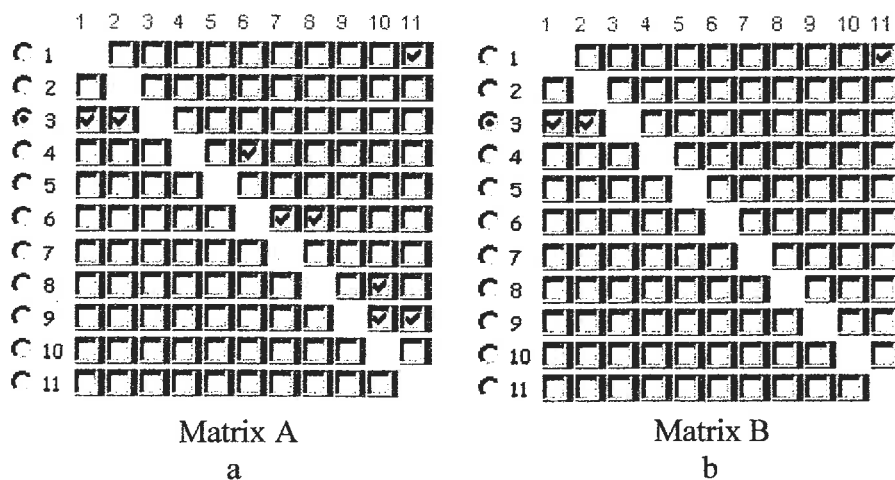


Figure 5.2 Matrices of the immediate predecessors



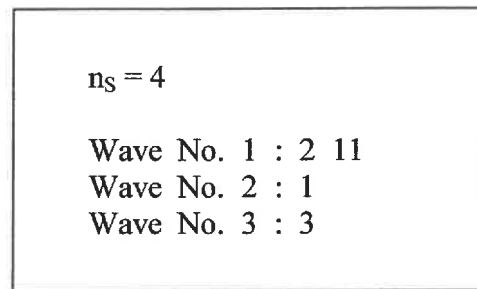


Figure 5.3 The disassembly waves

In Figure 5.2a, we have all the predecessors of the component  $C_x$ , and in Figure 5.2b, we have the matrix  $B$ , which contains only the necessary predecessors of the component  $C_x$ .

A more complex example with 30 components is presented at Figures 5.4 to 5.6. The Power Brake parts are presented in Figure 5.4 and they are listed in approximately disassembly order in the part list of Table 5.1.

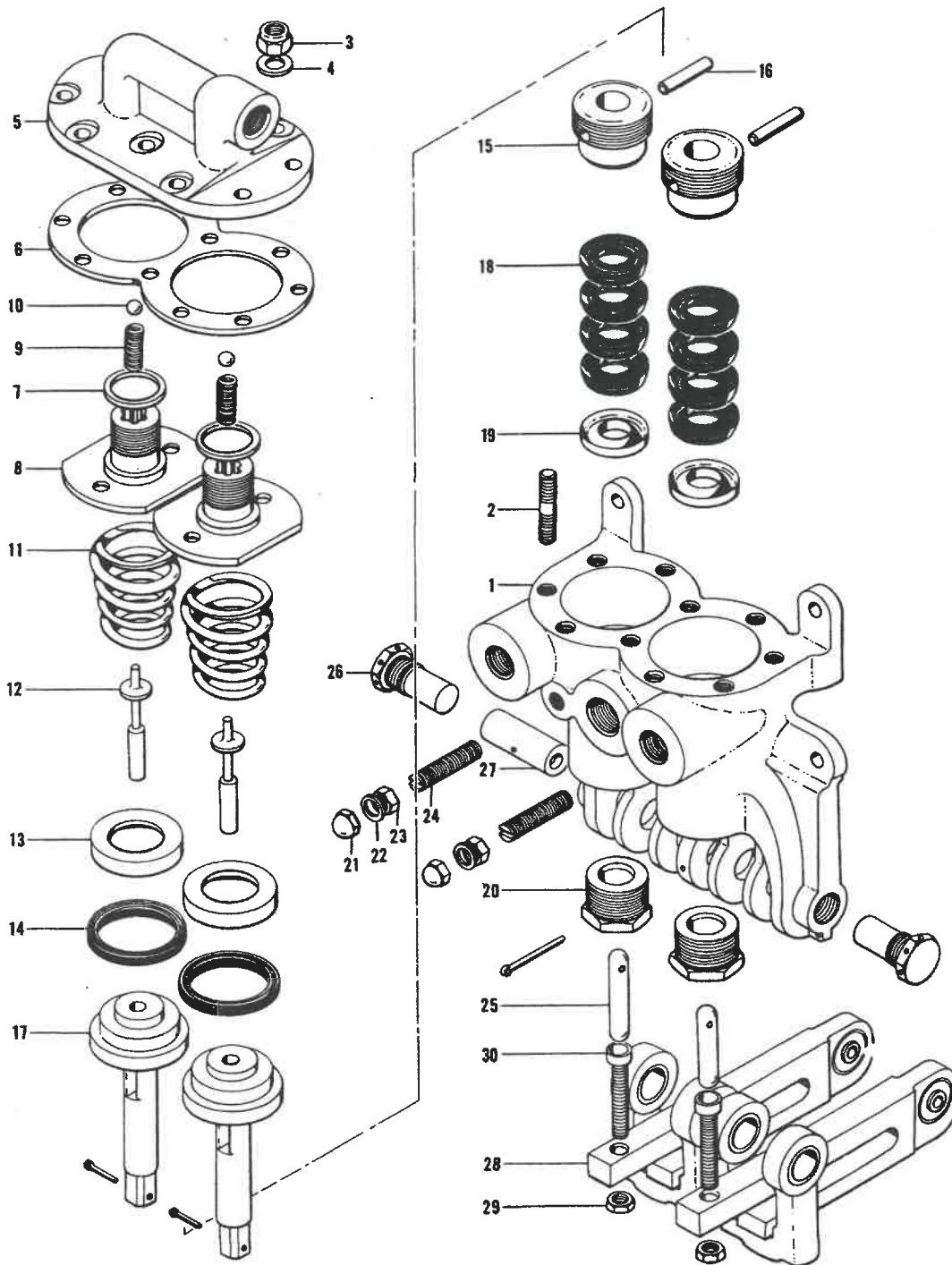


Figure 5.4 Exploded view drawing for the power brake

Table 5.1 Parts list for the power brake

<b>Fig. and Index No.</b>	<b>Nomenclature</b>	<b>Units per Assy.</b>
1	Housing	1
2	Stud 1/4"	10
3	Nut	10
4	Washer	10
5	Cover	1
6	Gasket	1
7	Washer	2
8	Seat	2
9	Spring	2
10	Ball 1/4" Dia.	2
11	Spring	2
12	Pin	2
13	Spacer 1 1/2 Dia.	2
14	Packing – Neoprene	2
15	Nut 1 1/8	2
16	Pin 3/8" Dia.	2
17	Piston	2
18	Packing – Neoprene	8
19	Spacer 1 1/8"	2
20	Nut 7/8" 14 NF	2
21	Cap nut	2
22	Washer	2
23	Nut 10 – 32 NF	2
24	Screw 1 – 32 NF	2
25	Link	2
26	Shaft 5/8" Nickel Steel	2
27	Shaft 9/11" Dia. Nickel Steel	2
28	Lever – Assembly	1
29	Nut 5/16	2
30	Screw 3/8 Dia. 5/16	2

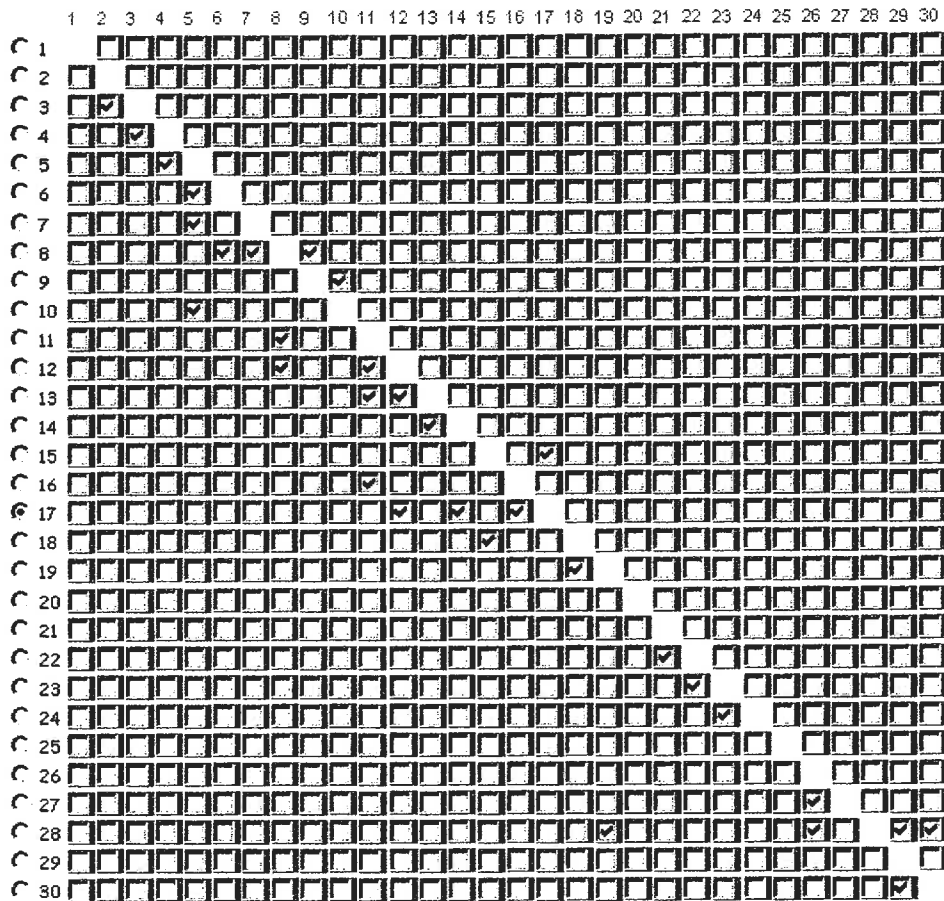


Figure 5.5 Matrix of the immediate predecessors for the power brake

$n_s = 14$  Wave No. 1 : 3 Wave No. 2 : 4 Wave No. 3 : 5 Wave No. 4 : 6 7 10 Wave No. 5 : 9 Wave No. 6 : 8 Wave No. 7 : 11 Wave No. 8 : 12 16 Wave No. 9 : 13 Wave No. 10 : 14 Wave No. 11 : 17
---

Figure 5.6 The disassembly waves for power brake

Most sub-assemblies can have several disassembly sequences. With the help of this algorithm, we determine several disassembly sequences. After that, we choose the most suitable. A simulation of all found sequences can be done and the algorithm will choose automatically the sequences with the minimal number of disassembly components.

At the Figure 5.7, we present a pump with sprocket wheels, which have the function of bringing the oil under pressure by the de-pressure created between the teeth of the sprockets. At the Table 5.2, we present the parts list for the pump with sprockets wheels. So, we propose to disassemble the ruling axle 11.

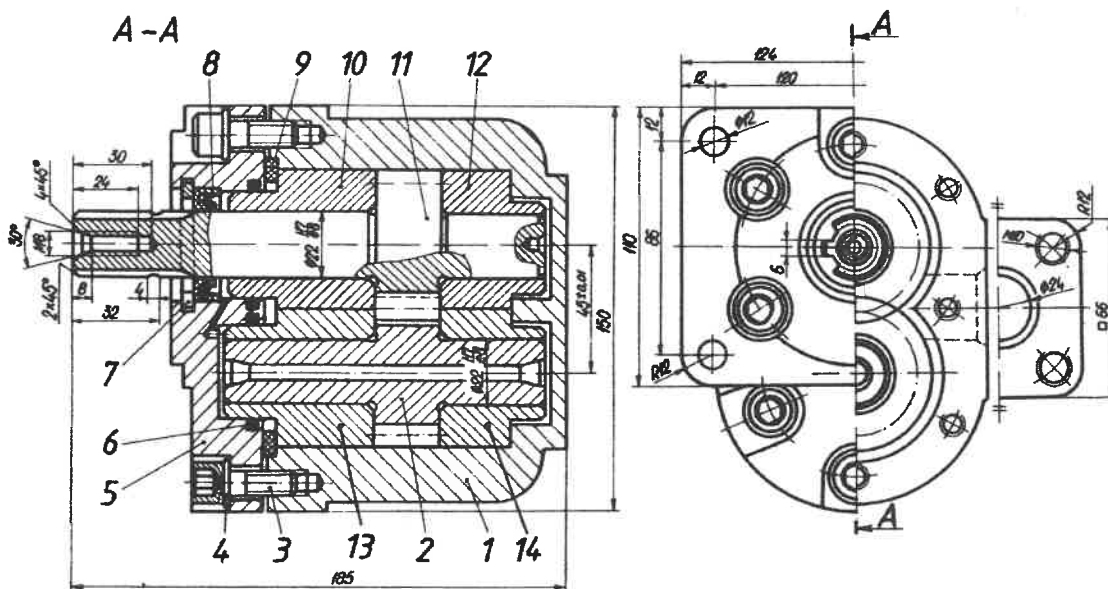


Figure 5.7 The pump with sprocket wheels

Table 5.2 Parts list for the pump with sprocket wheels

<b>Fig. and Index No.</b>	<b>Nomenclature</b>	<b>Units per Assy.</b>
1	Housing	1
2	Conducted axle	1
3	Screw	8
4	Washer	8
5	Cover	1
6	O' ring	2
7	Security ring	1
8	Simmering	1
9	Seal	1
10	Body #1 of the ruling axle	1
11	Ruling axle	1
12	Body #2 of the ruling axle	1
13	Body #1 of the conducted axle	1
14	Body #2 of the conducted axle	1

We have determine all possible disassembly sequences with our algorithm. The matrix of the immediate predecessors is shown in Figure 5.8. Then, the program determines automatically the disassembly sequences such as shown in Figure 5.9, respectively, for each matrix of the predecessor.

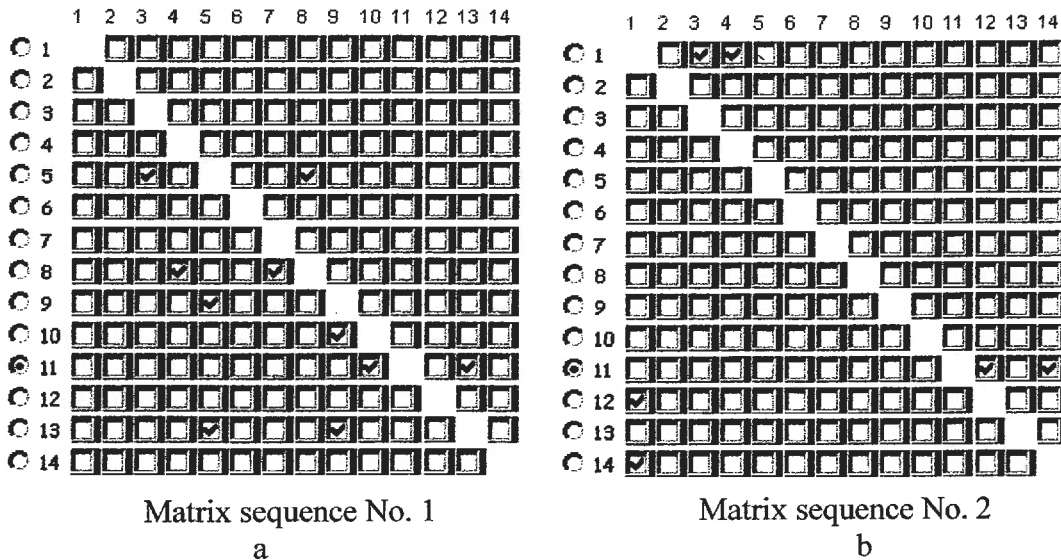


Figure 5.8 Matrices of the immediate predecessors

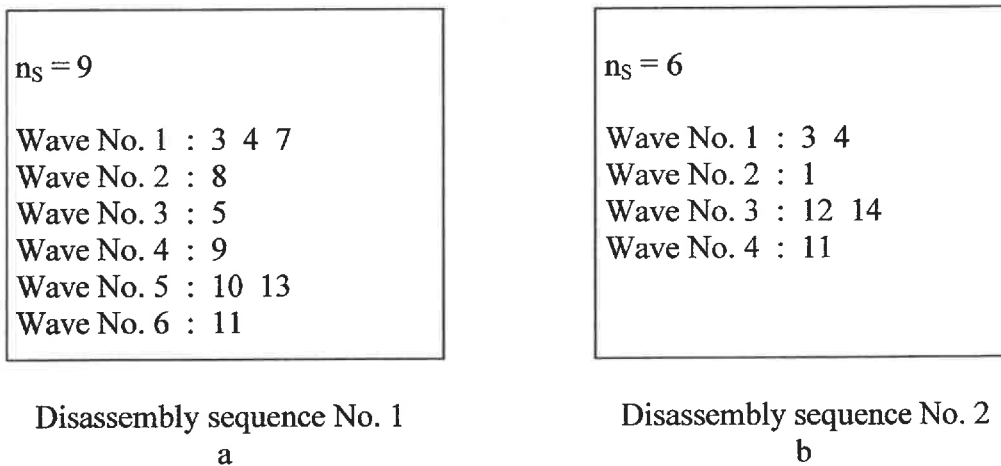


Figure 5.9 The disassembly waves for the pump with sprocket wheels

For this example, there is two possible disassembly sequences. The first one has nine components to disassemble, i.e.,  $n_S = 9$ , and the second one has,  $n_S = 6$ . Finally, the program does an optimisation, choosing automatically the disassembly sequence with  $n_S$  minimal ( $n_S = 6$ , in this case).

When several disassembly sequences exist and we want quickly to determine the optimal sequence with the minimal number of components to disassemble, this algorithm is greatly advantageous.

## 5.7 Conclusion

This paper considers the operation sequencing problem in disassembly process planning, which is an important problem for maintenance, recycling and re-using. We propose a new method of the wave propagation for a disassembly analysis. The advantage of our method is that it has, at the first wave of the component to disassemble, a maximal number of components, contrary on the other algorithm, which has at the nearest wave of the component to be disassembled, a maximum number of components. We consider that in the big assembly case, it is preferable to begin to disassemble first the maximal number of components for practical reasons (example: the disassembly of a component from an airplane).

The great advantage of the present algorithm, which we have created is in evidence in the case that we have several disassembly sequences to execute, and when we want to determine rapidly the optimal sequence, having a minimal number of components to disassemble. For most sub-assemblies, we can envisage several disassembly sequences. With the help of this algorithm, we can determine several disassembly sequences; then we can choose the most suitable disassembly sequences. Our algorithm allows realising



a simulation of all found disassembly sequences. Following that, it chooses automatically the sequence, which has the minimal number of components to disassemble. We can take the example with the pump with sprocket wheels. At the beginning we find two disassembly sequence and after optimisation we find the disassembly sequence having the  $n_S$  minimal. We can consider an example with thousand sequences and select one or several having the minimal  $n_S$ .

### **Acknowledgements**

This work was funded by the following grants: NSERC research grant (RGPIN150270-01).

### **5.8 References**

BOOTHROYD, G. (1987). Design for Assembly in Action. Assembly Engineering, 1, 1, 64-68.

BOOTHROYD, G. and ALTING, L. (1992). Design for Assembly and Disassembly. Annals of the CIRP, 42, 2, 625-636.

CHANG, T.-C. (1990). Expert Process Planning for Manufacturing. Addison-Wesley Publishing Company.

ISHII, K. (1993). Life-cycle Clumping of Product Designs for Ownership and Retirement, Design Theory and Methodology. American Society of Mechanical Engineers, DE, 53, 89-90.

LAMBERT, A.J.D. (1999). Optimal disassembly sequence generation for combined material recycling and part reuse. 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP '99). July 22-24, Porto, Portugal, 146-151.

LI, W., ZHANG, C. and WANG, H.-P. B., AWONIYI, S.A. (1995). Design for Disassembly Analysis for Environmentally Conscious Design and Manufacturing. ASME International ME Congress and Exhibition, Manufacturing Science & Engineering, 2.

SIDDIQUE, Z. and ROSE, D.W. (1996). An Approach to Virtual Prototyping for Product Disassembly. Proceedings of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference, Irvine, CA, Aug. 18-22.

SRINIVASAN, H., and GAHD, R. (1998a). A geometric algorithm for single selective disassembly using the wave propagation abstraction. Computer-Aided Design, 30, 8, 603-613.

SRINIVASAN, H., and GADH, R. (1998b). Complexity Reduction in Geometric Selective Disassembly, Using the Wave Propagation Abstraction. International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 16-21, Leuven, Belgium.

SRINIVASAN, H. and GADH, R. (1999a). Selective Disassembly: Representation and comparative Analysis of Wave Propagation Abstraction in Sequence Planning. 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP '99). July 22-24, Porto, Portugal, 129-134.

SRINIVASAN, H., FIGUEROA, R. and GADH, R. (1999b). Selective disassembly for virtual prototyping as applied to de-manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 15, 3, 231-245.

SRINIVASAN, H., MO, J., FIGUEROA, R. and GADH, R. (1999c). Virtual Assembly and Disassembly, I-CARVE's A3D Aid CAD Projects. Silicon Graphics World Magazine, June 1999, 13-14.

WOO, T.C. (1987). Automatic Disassembly and Total Ordering in Three Dimension. Concurrent Engineering, ASME, PED, 25, 291-303.

WOO, T.C. and DUTTA, D. (1991). Automatic Disassembly and Total Ordering in Three Dimension. Journal of Engineering for Industry, 113.

WOO, T.C. and DUTTA, D. (1992). Algorithms for Multiple Disassembly and Parallel Assemblies. Concurrent Engineering, ASME, PED, 59.

## CHAPITRE 6

### DISCUSSION GÉNÉRALE

Dès la phase de la conception d'un produit, on doit tenir compte de la possibilité de faciliter le désassemblage à la fin du cycle de vie du produit. Le désassemblage doit être vu comme une possibilité d'extraire d'un ensemble, des composantes et des sous-ensembles le plus facilement possible, en effectuant le plus petit nombre d'opérations. L'objectif est ici la réutilisation des éléments extraits et non la simple récupération des matériaux. De cette manière, il ne sera pas nécessaire de désassembler le produit en entier, et le désassemblage sera le moins destructif possible.

Dans le cadre du processus de désassemblage, il y a des opérations réversibles ou irréversibles. La différence entre ces deux types d'opérations consiste dans le fait que, dans le cadre du processus de désassemblage, les opérations réversibles assurent un désassemblage sans détruire les composantes d'un sous-ensemble ; ceci est impossible dans le cas des opérations irréversibles. Voici des exemples d'opérations réversibles : le vissage, le rivetage, et le brasage. Afin de désassembler deux composantes brasées, il est suffisant d'éliminer le matériel qui assure la liaison par divers procédés (brasage au chalumeau, au four). Le soudage est une opération irréversible, car si on désire désassembler 2 composantes soudées, il faut découper les parties de la pièce ; si on veut ensuite les réassembler comme auparavant, cette opération est impossible à réaliser avec les composantes initiales, car dans ce cas, on a modifié les composantes de base. Il faut

donc envisager la recharge, des recuits et un nouvel usinage. Apparemment le brasage et le soudage sont des opérations relativement semblables ; pourtant elles font partie de catégories différentes quant aux caractéristiques du désassemblage : par le brassage seul le matériel d'apport entre dans le bain de fusion, tandis que par le soudage, le matériel des composants de base participe au bain de fusion. En soudage, il y a donc affectation irréversible de la pièce de base. Ainsi, le choix entre l'utilisation des opérations réversibles ou des opérations irréversibles est très important, surtout dans le cadre du désassemblage pour la maintenance. En général, on applique des opérations irréversibles seulement aux composantes dont on ne doit pas assurer la maintenance, et quand ces composantes n'influencent pas le processus de désassemblage. D'habitude on préfère le choix d'une gamme de désassemblage qui évite les opérations irréversibles ; seulement dans le cas où cela n'est pas possible, on accepte d'effectuer des opérations irréversibles de désassemblage.

Les composantes qui doivent être désassemblées dépendent les unes des autres et parfois le désassemblage se réalise assez difficilement et avec des coûts importants. Lors du désassemblage dans le but de faire la maintenance, il est souvent préférable de remplacer des composantes proches, même si elles sont encore en bon état. Il s'agit alors de maintenance préventive. Le désassemblage sélectif est très important spécialement pour la réalisation de la maintenance et du recyclage. Ainsi, depuis les phases préliminaires de la conception d'un produit, on étudie aussi l'aspect du désassemblage sélectif pour la maintenance et le recyclage.

Lambert (1997, 1999), remarque qu'une bonne conception d'un produit est importante pour le désassemblage, qui devrait être effectué le plus facilement possible, pas seulement en ce qui concerne le recyclage, mais aussi du point de vue de la maintenance. Il est alors important de s'assurer de pouvoir effectuer le désassemblage sélectif le plus approprié.

Dans leurs recherches, Srinivasan et al. (1998b, 1999a) ont introduit le concept de « propagation de la vague ». La propagation de la vague représente une méthode de désassemblage d'un composant en plusieurs étapes successives, chaque étape contient des composants pouvant être désassemblés en parallèle comportant un nombre minimal de composants à désassembler. Concrètement, pour désassembler un composant ou un sous-ensemble, on se propose de déterminer le nombre optimal de composants qui doivent être désassemblés, tout en ayant l'assurance de rencontrer l'accessibilité géométrique nécessaire, afin de s'assurer que le démontage peut être réalisé.

Dans ce mémoire, on propose une nouvelle méthode de propagation de la vague pour réaliser le désassemblage. Cette nouvelle méthode de propagation de la vague détermine les solutions de désassemblage en deux étapes : dans la première étape, à l'aide d'un algorithme non-exhaustif de type « branch and bound », on élimine les composants qui ne sont pas nécessaire à désassembler ; l'algorithme est validé par deux lemmes qu'on a énoncé. Dans la deuxième étape, on construit les vagues de désassemblage.

L'avantage de notre méthode, par rapport aux méthodes de désassemblage en vagues déjà existantes, est qu'elle nous amène à avoir dans la vague la plus éloignée du composant à désassembler, un nombre maximal possible de composants, alors qu'en utilisant l'algorithme de Srinivasan et al (1998b, 1999a) c'est dans la vague la plus rapprochée du composant à désassembler, qu'on rencontre le nombre maximal de composants à désassembler. Il est facile de comprendre que dans le cas du désassemblage des grands ensembles, il est préférable de commencer à désassembler d'abord un nombre maximal de composants pour des raisons pratiques (exemple : désassemblage des moteurs d'avion et en parallèle des sièges de la cabine), ce qui est possible en utilisant notre algorithme.

Le but de l'algorithme de la propagation de vague présenté dans ce mémoire, est de donner les vagues de désassemblage pour extraire un composant donné d'un ensemble ; plusieurs composants non-absolument nécessaires pour extraire ce composant ne doivent pas être désassemblés. L'algorithme peut être appliqué ensuite pour désassembler un autre composant parmi les composants restants. Il s'agit donc d'un algorithme de désassemblage sélectif ; pour la récupération d'un composant donné, on n'a pas besoin de désassembler tout l'ensemble des composants.

Le même algorithme créé pour le désassemblage, peut être utilisé aussi pour effectuer l'assemblage d'un composant donné ; pour ce faire, il suffit de considérer les vagues en



ordre inverse. Il s'agit d'assembler un composant donné, avec tous les composants qui lui sont attachés.

En résumé, les contributions à la recherche développées dans ce mémoire sont :

1. Une procédure systématique pour aider le concepteur à choisir la gamme de désassemblage la plus convenable.
2. Un nouvel algorithme pour le désassemblage sélectif par la propagation de la vague et l'évaluation de la gamme optimale de désassemblage dans un prototype virtuel de désassemblage ;
3. Nouvelle méthode plus efficace pour réaliser un désassemblage sélectif.

## CONCLUSION

Les nouvelles contraintes d'ordre environnemental ont déterminé un développement sans précédent de l'étude et de la mise en pratique des nouveaux procédés de désassemblage pour la maintenance et / ou pour le recyclage. On constate que des progrès remarquables ont été réalisés dans ce sens ; pourtant, il reste encore beaucoup à faire !

L'apparition du concept de désassemblage sélectif constitue une étape importante dans l'évolution du processus du désassemblage pour l'assemblage, la maintenance et le recyclage.

Peu de temps après, un autre concept ouvre la voie d'une autre étape dans le processus du désassemblage : il s'agit du désassemblage par la propagation de vagues.

Dans le cadre du présent mémoire de maîtrise, nous nous sommes proposés de découvrir de nouvelles méthodes pour trouver « la meilleure gamme » de désassemblage. Mais d'après quel critère choisit-on « la meilleure gamme » de désassemblage ?

Les réponses à cette question sont multiples. Chaque variante ouvre la voie à une méthode spécifique.

Depuis l'année 1998, de plus en plus, on considère qu'un des paramètres privilégiés pour établir « la meilleure gamme » de désassemblage d'un composant d'un produit, est celui de réduire au minimum le nombre des autres composants qui doivent être désassemblés. Paradoxalement, apparemment bien simple, cette opération est en réalité très complexe.

Dans le cadre du présent mémoire de maîtrise, nous avons retenu deux volets qui, d'après notre avis, sont très importants. D'abord, nous avons tracé la voie d'une nouvelle méthode de désassemblage spécifique aux situations où nous devons éviter le désassemblage de certains composants, qui amène à des opérations irréversibles (dont à la destruction de certains éléments). Ensuite, nous avons trouvé une nouvelle méthode de désassemblage par la propagation des vagues, qui optimise la méthode déjà existante depuis 1998. L'amélioration réside dans le fait qu'en utilisant notre méthode durant le processus de désassemblage, dès la première vague, nous avons un grand nombre de composants à désassembler ; la méthode précédente nous amène à avoir un grand nombre de composants à désassembler sur la dernière vague. Des contraintes, d'ordre physique – notamment l'espace relatif restreint spécifique à la réalisation de la dernière vague de désassemblage, nous permettent de croire à la préférence que nous devons accorder à notre nouvelle méthode de désassemblage pour l'assemblage, la maintenance et le recyclage par la propagation de vagues.

Le grand avantage du présent algorithme que nous avons créé, est mis en évidence dans le cas où nous avons plusieurs gammes de désassemblage possibles, et lorsqu'on veut déterminer rapidement la gamme optimale ayant un nombre minimal de composants à désassembler. Pour la plupart des sous-ensembles on peut envisager plusieurs gammes de désassemblage. Avec l'aide de cet algorithme, on peut déterminer plusieurs gammes de désassemblage ; ensuite on peut choisir la gamme de désassemblage la plus convenable. Notre algorithme permet de réaliser une simulation de toutes les gammes de désassemblage trouvées, et ensuite, il choisit automatiquement la gamme ayant le nombre minimal de composants à désassembler. Prenons l'exemple cité au chapitre 4, la pompe avec des roues dentées, on désire désassembler l'axe conducteur *11*. Ainsi, on trouve deux gammes de désassemblage. La première a le nombre de composants à désassembler  $n_S = 9$ , et la seconde a  $n_S = 6$ . Finalement, le programme fait une optimisation, en choisissant automatiquement la gamme de désassemblage ayant le  $n_S$  minimal ( $n_S = 6$  dans ce cas).

Les objectifs de recherche que j'ai l'intention de faire dans l'avenir est de développer l'algorithme présenté dans ce mémoire. Plus précisément, il s'agit de développer un volet en considérant les temps de désassemblage des composants et ensuite, un volet spécifique au traitement des situations de désassemblage ayant la matrice des prédécesseurs symétrique par rapport à la diagonale.

**BIBLIOGRAPHIE**

ALTING, L. (1991). Life Cycle Design. Concurrent Engineering: Issues, Practice and Technology, 1, 6, 19-27.

ALTING, L. (1993). Designing for a Lifetime. Manufacturing Breakthrough, May/June edition, 29-33.

BOKS, C.B., BROUVERS, W.C.J., KROLL, E. et STEVELS, A.L.N. (1996). Disassembly Modelling: Two Applications to a Philips 21 Television Set. IEEE Int. Symp. Electronics and the Environment, Dallas, U.S.A., May, 224-229.

BOOTHROYD, G. (1987). Design for Assembly in Action. Assembly Engineering, 1, 1, 64-68.

BOOTHROYD, G. et ALTING, L. (1992). Design for Assembly and Disassembly. Annals of the CIRP, 42, 2, 625-636.

CASTAING, A. et BOURRIÈRES, J.P. (1999). A Reference Framework for Life-Cycle Design of Complex Products. Proceedings of the 1999 IEEE, International Symposium on Assembly and Task Planning, Porto, Portugal, July, 117-122.

CHANG, T.-C. (1990). Expert Process Planning for Manufacturing. Addison-Wesley Publishing Company.

EWERS, H.-J., SCHATZ, M., FLEISCHER, G. et DOSE, J. (2001). Disassembly Factories: Economic and Environmental Options. Proceedings of the 4<sup>th</sup> IEEE, International Symposium on Assembly and Task Planning, May 28-29, Fukuoka, Japan, 447-452.

FERNANDEZ, R. et ZERHOUNI, N. (2001). Modelling and analysis of disassembly systems using continuous Petri nets. Proceedings of the 4<sup>th</sup> IEEE, International Symposium on Assembly and Task Planning, May 28-29, Fukuoka, Japan, 232-237.

FOUDA, P., De LIT, P., REKIEK, B. et DELCHAMBRE, A. (2001). Generation of Precedence Graphs for a Product Family Using a Disassembly Approach. Proceedings of the 4<sup>th</sup> IEEE, International Symposium on Assembly and Task Planning, May 28-29, Fukuoka, Japan, 226-231.

GRAEDEL, T.E., ALLENBY, B.R. et COMNIE, P.R. (1995). Matrix Approaches to Abridged Life Cycle Assessment. Environmental Science and Technology, 29, 3, 134-139.

HATTORI, M., NOMURA, N., SOMMER, D. et INOUE, H. (1995). Fundamentals of Environmentally Conscious Product Design. International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing, 4, 1, 3-11.

HATTORI, M. et WAIDA, T. (1999a). Parts Selection for High Quality Material Recycling. 15<sup>th</sup> ISPE/IEE International Conference on CAD/CAM, Robotics, and Factories of the Future, Águas de Lindóia, SP, Brazil, 18-20 August.

HATTORI, M., INOUE, H. et NOMURA, N. (1999b). Design Strategy for Ecologically Conscious Product. Design Strategy for Ecologically Conscious Product, Sustainable Product Development, part. III, 99-106.

ISHII, K. (1993). Life-cycle Clumping of Product Designs for Ownership and Retirement. Design Theory and Methodology, American Society of Mechanical Engineers, DE, 53, 89-90.

JABBOUR, T., MASCLE, C. et MARANZANA, R. (1998). A database for the representation of Assembly Features in Mechanicals Products. International Journal of Computation Geometry & Applications, 8, 5&6, 483-507.

JOHANSEN, M., UMEDA, Y. et TOMIYAMA, T. (1997). Life Cycle Simulation for Verifying Sustainable Model of Products, in L.M. Camarinha (ed.). Re-Engineering for Sustainable Industrial Production, Chapman & Hall, London, 247-258.

KANAI, S., SASAKI, R. et KISHINAMI, T. (1999). Representation of Product and Processes for Planning Disassembly, Shredding and Material Sorting based on Graphs. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISAP '99). July 22-24, Porto, Portugal, 123-128.

LAMBERT, A.J.D. (1997). Optimal disassembly of complex products. International Journal of Production Research, 35, 9, 2509-2523.

LAMBERT, A.J.D. (1999). Optimal disassembly sequence generation for combined material recycling and part reuse. 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP '99), July 22-24, Porto, Portugal, 146-151.

LAPERRIÈRE, L. (1992). Generative Assembly Process Planning. Thèse de doctorat, McMaster University, Canada.

LEE, K. (1998). Destructive Design for Disassembly. Thèse de Maîtrise, University of Wisconsin-Madison, U.S.A.



LI, W., ZHANG, C., WANG, H.-P.B. et AWONIYI, S.A. (1995). Design for Disassembly Analysis for Environmentally Conscious Design and Manufacturing. ASME International ME Congress and Exhibition, Manufacturing Science & Engineering, 2.

MASCLE, C. (1990). Approche méthodologique de détermination de gammes par le désassemblage. Thèse de doctorat ès Sciences, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse.

MASCLE, C. (1998). Automatic a priori, a posteriori or appropriate determination of subassemblies. International Journal of Production Research, 36, 4, 1001-1021.

MASCLE, C. et BALASOIU, B.A. (2001). Disassembly for assembly, maintainability and recyclability. Soumis à International Journal of Production Research, Edition Taylor & Francis Ltd., soumis en octobre 2001.

MASCLE, C. et BALASOIU, B.A. (2002). Algorithmic selection of a disassembly sequence of a component by a wave propagation method. Soumis à Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Edition Elsevier Science, soumis en janvier 2002.

MASUI, K., MIZUHARA, K., ISHII, K. et ROSE C. (1999). Development of Products Embedded Disassembly Process Based on End-of-life Strategies. EcoDesign '99: First

International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, February 1-3, Tokyo, Japan.

MOORE, K., GUNGOR, A. et GUPTA, S. (1998). Disassembly Process planning using Petri nets. Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 88-93.

MURAYAMA, T., OBA, F., ABE, S. et YAMAMICHI, Y. (2001). Disassembly Sequence Generation using Information Entropy and Heuristics for Component replacement. Proceedings of the 4<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, May 28-29, Fukuoka, Japan, 208-213.

NOBERT, Y., OUELLET, R. et PARENT, R. (2001). La recherche opérationnelle, 3<sup>e</sup> édition. Gaëtan Morin Éditeur Ltée., Boucherville, Québec, 428-435.

NONOMURA, A., TOMYIAMA, T. et UMEDA, Y. (1999a). Life Cycle Simulation for the Inverse Manufacturing. Proceedings of the First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign '99), February 1-3, Tokyo, IEEE Computer Society, 712-717.

NONOMURA, A., TOMYIAMA, T. et UMEDA, Y. (1999b). Life Cycle Simulation for the Inverse Manufacturing. Proceedings of the 6<sup>th</sup> CIRP International Seminar on Life

Cycle Engineering, June 21-23, Department of Mechanical Engineering, Queen's University, Kingston, Canada, 304-313.

PERLEWITZ, H. et SELINGER, G. (2000). Disassembly & recycling of durable and consumer goods in Japan. Present Condition and Trends of R&D Activities.

ROSE, C., BEITER, K.A., ISHII, K. et MASUI, K. (1998). Characterisation of product end-of-life strategies to enhance recyclability. Proceedings of DETC 98, 1998 ASME Design for Manufacturing Symposium, September 13-16, Atlanta, U.S.A., 1-9.

SELINGER, G., KEIL, T., MÜLLER, K. et PERLEWITZ, H. (1997). More Use with fewer Resources – A Contribution towards Sustainable Development. Life Cycle Networks, London, Chapman & Hall.

SELINGER, G., GRUDZIEN, W. et MÜLLER, K (1998). The acquiring and handling of devaluation. Proceedings of the Life Cycle Design'98, Stockholm, Sweden, 99-108.

SELINGER, G., MÜLLER, K. et PERLEWITZ, H. (1999). Product and Process Planning for Recycling. Eco Design '99, IEEE Computer Society, Tokyo, Japan, February.

SIDDIQUE, Z. et ROSE, D.W. (1996). An Approach to Virtual Prototyping for Product Disassembly. Proceedings of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference, Irvine, U.S.A., Aug. 18-22.

SRINIVASAN, H. et GADH, R. (1998a). A geometric algorithm for single selective disassembly using the wave propagation abstraction. Computer-Aided Design, **30**, **8**, 603-613.

SRINIVASAN, H. et GADH, R. (1998b). Complexity Reduction in Geometric Selective Disassembly Using the Wave Propagation Abstraction. International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 16-21, Leuven, Belgium.

SRINIVASAN, H., FIGUEROA, R. et GADH, R. (1999a). Selective disassembly for virtual prototyping as applied to de-manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, **15**, **3**, 231-245.

SRINIVASAN, H., MO, J., FIGUEROA, R. et GADH, R. (1999b). Virtual assembly and Disassembly, I-CARVE's A3D CAD Projects. Silicon Graphics World Magazine, June, 13-14.

SRINIVASAN, H. et GADH, R. (1999c). Selective Disassembly : Representation and comparative Analysis of Wave Propagation Abstraction in Sequence Planning. 1999

IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP '99), July 22-24, Porto, Portugal, 129-134.

SUBRAMANI, A.K. et DEWHURST, P. (1991). Automatic generation of product disassembly sequence. Annals of the CIRP, 40, 1, 115-118.

TOMIYAMA, T. (1997a). A Manufacturing Paradigm Toward the 21<sup>st</sup> Century. Integrated Computer Aided Engineering, 4, 159-178.

TOMIYAMA, T. et UMEDA, Y. (1997b). Life Cycle Design for the Post Mass Production Paradigm. The Proceedings of the CIRP 1997 International Design Seminar on Multimedia Technologies for Collaborative Design and Manufacturing, October 8-9, Los Angeles, U.S.A., 117-125.

TOMIYAMA, T. (2000). Knowledge Intensive Engineering towards Sustainable Products with High Knowledge and Service Contents. Third International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE 2000, April 18-20, Delft, the Netherlands, Delft University Press, 55-67.

TOUZANNE, F. et PERRARD, O. (1999). Representation of Disassembly Processes in Order to allow time evaluation of their performances. 1999 IEEE International

Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP '99), July 22-24, Porto, Portugal, 135-140.

WOO, T.C. (1987). Automatic Disassembly and Total Ordering in Three Dimension. Concurrent Engineering, ASME, PED, 25, 291-303.

WOO, T.C. et DUTTA, D. (1991). Automatic Disassembly and Total Ordering in Three Dimension. Journal of Engineering for Industry, 113.

WOO, T.C. et DUTTA, D. (1992). Algorithms for Multiple Disassembly and Parallel Assemblies. Concurrent Engineering, ASME, PED, 59.

## ANNEXE I

### LISTE DES CONTRIBUTIONS ORIGINALES

#### 1. Nouvel algorithme de désassemblage sélectif de type propagation de vagues

Pour arriver à extraire un composant donné, nous proposons un algorithme de désassemblage par vagues. On démontre qu'il existe une solution. S'il n'y a pas de cycles, il existe toujours une solution (cf. chapitre 5). De plus, s'il n'y a pas de symétrie, la solution est unique ; le nombre maximal de composants est dans les premières vagues, plutôt que dans les dernières.

Notre algorithme privilégie les premières vagues à désassembler, cela représente un intérêt pratique important par rapport aux autres algorithmes : une équipe travaille mieux sur un nombre plus grand de composants que sur un nombre réduit de composants. Au fur et à mesure qu'on désassemble des composants, il devient possible de travailler avec un nombre de plus en plus restreint de personnes pour désassembler le composant cherché.

## 2. Création d'un logiciel de désassemblage par vagues

À partir de notre algorithme, nous avons créé un logiciel très convivial écrit en Visual Basic 6.

Le logiciel permet de stocker ou de retracer les anciennes données stockées dans une séance antérieure. Il permet aussi de faire des simulations en changeant seulement quelques-unes des cellules de la matrice initiale des prédécesseurs immédiats. Toutes ces simulations seront sauvegardées, et le logiciel retrace les séquences de vagues ayant le nombre minimal de composants à désassembler. L'utilisation de répertoires et de fichiers de travail est transparente pour l'utilisateur.

L'introduction des données est guidée en tout temps par des messages appropriés.

Le logiciel cherche aussi les cycles et s'il y en a il nous avertit ; le temps d'exécution est très intéressant. La solution apparaît sur une feuille à part ; elle peut être remplacée sur l'écran si nécessaire.



## ANNEXE II

### GUIDE D'UTILISATION DU LOGICIEL *WaveDisassembly*

1. On doit choisir entre recherche d'anciennes données et introduction de nouvelles données ;
2. Si nouvelles données, on doit choisir le nombre  $n$  de composants du sous-ensemble ;
3. On choisit le composant  $C_x$  qu'on désire désassembler ;
4. On va compléter la matrice des prédécesseurs immédiats  $A(i,j)$  pour chaque composant ;
5. On va déterminer le nombre des opérations irréversibles  $IO_{C_i}^{C_j}$  ;
6. Déterminer les vagues de désassemblage pour le composant choisie ;
7. On va enregistrer les données dans un fichier ;
8. On répète le procédé pour d'autres gammes de désassemblage et on sauvegarde les données dans les fichiers.

Ces fichiers vont avoir les noms suivants :

`simx_notot_nS.bob`

ou :  $no_{tot}$  – le nombre de composants ;

$n_S$  – le nombre de composants à désassembler ;

$x$  – le numéro de la simulation.

9. La simulation des gammes de désassemblage. Le logiciel va regrouper toutes les gammes de désassemblage dans deux dossiers, le premier contenant toutes les gammes de désassemblage et le deuxième contenant seulement les gammes de désassemblage ayant le nombre minimum de composants à désassembler.

Le logiciel guide l'utilisateur à chaque étape de saisie de données. La solution apparaît sous forme de liste (une vague par ligne).

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00292710 9