UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MÉTHODE INTERACTIVE DE DÉTERMINATION DE GAMMES EN RESPECTANT LES CONTRAINTES DE GÉOMÉTRIE ET DE PROCÉDURE

JOSÉ AGUILAR
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)
DÉCEMBRE 1996

© José Aguilar, 1996.

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

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

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

0-612-26447-5

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

MÉTHODE INTERACTIVE DE DÉTERMINATION

DE GAMMES EN RESPECTANT LES CONTRAINTES

DE GÉOMÉTRIE ET DE PROCÉDURE

présenté par: AGUILAR José

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

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

M. ALSENE Éric, Ph.D., président

M. GHOSH Kalyan, D.Eng., membre et directeur de recherche

M. LAPERRIÈRE Luc, Ph.D., membre

À ma famille.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

Je tiens particulièrement à remercier M. Kalyan Ghosh, D.Eng, mon directeur de recherche, pour son aide et son soutien tout au long de ce projet. Sa générosité et ses conseils ont permis que je finisse ce mémoire.

Je voudrais aussi remercier de façon spéciale mon épouse et mes enfants pour leur soutien moral et leur patience tout au long de mes études.

Finalement, je tiens à remercier, le chef du service de génie industriel de l'entreprise qui m'a permis de mettre en pratique la méthodologie développée durant ce travail de recherche.

RÉSUMÉ

Pour faire face à un marché international très compétitif, les entreprises doivent optimiser la production de façon à offrir des produits de haute qualité à un coût convenable. Souvent, l'étape la plus coûteuse du processus productif est l'assemblage des composants individuels et, si l'on considère la nature intégrative de l'assemblage, il est clair que l'amélioration de l'assemblage est prioritaire. L'une des façons les plus efficaces pour réduire le coût d'assemblage et pour améliorer sa flexibilité est de réaliser la planification de l'assemblage de façon à intégrer la conception du produit et la conception du système d'assemblage correspondant. Dans notre travail, nous présentons une méthodologie pour la planification de l'assemblage, laquelle contient des concepts pratiques propres au génie industriel et des concepts mathématiques pertinents à notre domaine. Cette combinaison de concepts rend la méthodologie capable de gérer des produits d'une haute complexité.

L'objectif de ce travail est de donner aux équipes d'ingénierie simultanée un moyen de développer des plans d'assemblage de façon systématique, avec des outils informatiques interactifs pour les aider dans les étapes où le calcul est lourd. Une méthodologie générale pour la génération de séquences d'assemblage respectant les contraintes géométriques et topologiques du produit ainsi que les contraintes technologiques et de procédure du processus d'assemblage est présentée. La méthodologie contient quatre étapes: la modélisation modulaire du produit, la génération

des séquences d'assemblage, l'évaluation des séquences générées et la sélection de la séquence à implanter, et la conception du système d'assemblage en fonction de la séquence choisie. Dans la première étape, le produit est divisé en modules indépendants pour rendre l'assemblage plus facile et logique. Ensuite, nous représentons les relations de précédence entre les composants de chaque module en utilisant les fonctions de contact et de translation. L'étape de la génération des séquences d'assemblage est basée sur la modélisation antérieure et, en se servant d'un algorithme utilisant l'algèbre booléenne. Nous avons intégré un module d'imposition de contraintes dans cet algorithme afin de diriger la génération vers des séquences d'assemblage souhaitables et, de cette façon, empêcher l'explosion combinatoire de résultats. L'étape d'évaluation est faite quantitativement avec le logiciel DFMA de Boothroyd et Dewhurst, et aussi de façon qualitative en imposant des contraintes technologiques et de procédure. À la fin du processus d'évaluation, une séquence est choisie et tout le système d'assemblage est conçu en accord avec cette séquence et en s'assurant que ce système soit capable de fournir le taux de production prévu.

L'assemblage des composants qui suivent une trajectoire selon un repère cylindrique et la génération de séquences d'assemblage pour une famille de produits sont aussi étudiés dans ce travail. Ces deux cas ont été adaptés à l'algorithme de génération de séquences d'assemblage, le premier cas au moyen du concept de la rotation des axes cartésiens et le deuxième cas grâce à l'inclusion d'un critère d'évaluation additionnel, c'est - à - dire la recherche de la séquence plus standard contenant la flexibilité minimale

qui permet l'assemblage de tous les modèles du produit.

Finalement, nous présentons trois applications qui montrent l'efficacité de la méthodologie pour gérer des différentes sortes de produits industriels.

ABSTRACT

To survive in the competetive international market, it is necessary for organisations to optimize production functions to give highest quality at lowest cost with flexibility in production. Often, the most expensive part of the production process is the assembly of the individual components. One of the better ways to reduce assembly costs and improve assembly flexibility is the assembly planning by integrating product design and its assembly system design. In our work, we present a methodology for assembly planning that includes practical concepts of industrial engineering and mathematical concepts pertinent to our area of work.

The objective of this work is to develop assembly plans systematically to help product design and assembly system design teams with interactive tools. A generalized methodology for assembly sequence generation satisfying the geometrical and topological constraints of the product as well as the assembly process constraints has been presented. The methodology consists of four phases, namely: modular modeling, generation of assembly sequences, evaluation of assembly sequences and the selection of the best sequence, and design of the assembly system based on the selected sequence. In the first phase, the product is divided into independent modules for easier and logical assembly process. Then, contact and translation functions are used to represent the precedence knowledge in each module. The assembly sequence generation is based on the product modeling using an algorithm based on Boolean algebra. In this phase, a module of constraints imposition is integrated into the algorithm to filter the sequences and to obtain only desirable sequences. In this way, the combinatorial explosion of assembly sequences is prevented. The evaluation of each assembly sequence is done quantitatively, with the

DFMA methodology of Boothroyd and Dewhurst, and also qualitatively imposing technological and process constraints. At the end of the evaluation process a sequence is selected and the assembly system is developed based on this sequence and for a given production rate.

The assembly of components with a cylindrical trajectory and the assembly sequences generation for a family of products are also addressed in the present work. Both cases were adapted to the assembly sequence generation algorithm, the first using the axes rotation concept. The assembly sequence generation for a family of products includes an additional evaluation measure in terms of the search for the most standard assembly sequence, having the minimal flexibility to allow the assembly of all models of the product family.

Finally, three case studies that show the application of the methodology to different kinds of industrial products are presented.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vi

ABSTRACT ix

TABLE DES MATIÈRES xi

LISTE DES TABLEAUX xxv

LISTE DES FIGURES xxviii

LISTE DES ANNEXES xxxii

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE 7

1.1 Introduction 7

1.2 Classification 8

1.2.1 Classification basée sur la représentation et le moyen d'obtention des relations de précédence et la méthode de génération des séquences d'assemblage 9

1.2.1.1 Méthodes basées sur le diagramme de liaisons 9

1.2.1.2 Méthodes basées sur systèmes de base de connaissances 18

1.2.1.3 Méthodes basées sur la théorie de graphe 25

1.2.1.4 Méthodes basées sur CAO 29

1.2.1.5 Méthodes basées sur la modélisation mathématique 34

1.2.2 Classification basée sur l'approche de génération de séquences 37

1.2.2.1 Génération automatique de toutes les séquences d'assemblage faisables 37

1.2.2.2 Génération dirigée de séquences d'assemblage souhaitables 42

1.3 Planification de l'assemblage d'une famille de produits 48

CHAPITRE 2 : OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE 54

2.1 Introduction 54

2.2 Objectif de la recherche 54

2.3 Méthodologie de la recherche 55

2.4 Aperçu de la méthodologie proposée 58

2.4.1 Modélisation du produit 58

2.4.2 Génération des séquences d'assemblage 59

2.4.3 Définition des séquences d'assemblage détaillées 60

2.4.4 Évaluation quantitative des séquences générées 60

2.4.5 Évaluation qualitative des séquences générées 61

2.4.6 Définition de la cellule d'assemblage 61

CHAPITRE 3 : DÉFINITIONS 62

3.1 Introduction 62

3.2 Produit 63

3.2.1 L'organisation hiérarchique dans un produit 63

3.3 Module 67

3.3.1 Classification des modules 68

3.3.1.1 Modules secondaires 68

3.3.1.2 Modules principaux 69

3.4 Composant 71

3.4.1 Classification des composants 71

3.4.1.1 Classification selon le niveau de complexité atteint dans l'arbre de hiérarchie du produit 72

3.4.1.2 Classification selon la fonction qu'accomplit le composant 75

3.4.1.3 Classification selon la trajectoire suivie par le composant pour être assemblé 76

3.5 Assemblage 81

3.6 Procédure d'assemblage 82

3.6.1 Assemblage linéaire 83

3.6.2 Assemblage modulaire 84

CHAPITRE 4 : MÉTHODE PROPOSÉE POUR LA MODÉLISATION DE L'ASSEMBLAGE 87

4.1 Introduction 87

4.2 Approches pour la modélisation de l'assemblage 87

4.2.1 Représentation par langage 88

4.2.2 Représentation graphique 88

4.2.3 Base de données intelligentes 89

4.3 Problèmes des approches actuelles 90

4.4 Conception pour un assemblage facile 92

4.4.1 Assemblage modulaire 93

4.5 Méthode proposée pour la modularisation selon le type de produit analysé 95

4.5.1 Produits modulaires par nature 95

4.5.2 Produits complexes susceptibles d'être modularisés 97

4.5.3 Produits non modularisables 100

4.6 Modélisation pour la génération des séquences d'assemblage 104

4.6.1 Fonction de contact 104

4.6.2 Fonction de translation 106

4.6.3 Modèle de Ghosh pour la génération de séquences d'assemblage 108

4.7 modèle proposée pour la représentation des composants assemblés sur un repère cylindrique 112

4.7.1 Produits avec des composants de trajectoire cylindrique en contact avec une même base centrale 113

4.7.2 Produits avec des composants cartésiens et composants non cartésiens 119

4.8 Méthode de modélisation pour représenter l'assemblage de produits complexes 124

CHAPITRE 5 : MÉTHODE PROPOSÉ POUR LA GÉNÉRATION DES SÉQUENCES D'ASSEMBLAGE 131

5.1 Introduction 131

5.2 Algorithme de génération de séquences d'assemblage 133

5.2.1 Imposition de contraintes initiales 137

5.2.2 Initiation de la génération de séquences: sous-assemblage de deux composants 139

5.2.3 Génération de sous-assemblages d'ordre supérieur 140

5.2.4 Imposition de contraintes technologiques et de procédure 144

5.3 Traitement des composants non cartésiens 150

5.3.1 Cas n°1: composants non cartésiens distribués symétriquement et en contact avec une base 150

5.3.2 Cas n°2: composants non cartésiens distribués asymétriquement et en contact avec une base 156

5.3.3 Cas n°3: Assemblage des composants cartésiens et des composants non cartésiens 158

CHAPITRE 6 : FAMILLES DE PRODUITS 165

6.1 Introduction 165

6.2 Définition d'une famille de produits 165

6.3 Conception d'un système d'assemblage multimodèle 166

6.4 Conception d'une ligne d'assemblage à production mélangée 167

6.5 Approche pour la modélisation d'un système d'assemblage mixte 168

6.5.1 Classification des composants et standardisation dans une famille de produits 169

6.5.2 Modularisation de l'assemblage pour une famille de produits 173

6.6 Génération de séquences d'assemblage pour une famille de produits 175

CHAPITRE 7 : ÉVALUATION PROPOSÉE POUR LES SÉQUENCES D'ASSEMBLAGE, ET LA SÉLECTION ET L'IMPLANTATION DE LASÉQUENCE CHOISIE 176

7.1 Introduction 176

7.2 Définition des séquences d'assemblage détaillées 177

7.2.1 Opérations complémentaires 178

7.2.2 Séquence d'assemblage détaillée 181

7.3 Évaluation quantitative 183

7.4 Évaluation qualitative des séquences économiquement souhaitables 185

CHAPITRE 8 : APPROCHE PROPOSÉE POUR LA PLANIFICATION DES SYSTÈMES D'ASSEMBLAGE AVEC L'AIDE DES ORDINATEURS 187

8.1 Introduction 187

8.2 Structure de l'approche proposée 188

8.3 Modularisation du produit 190

8.4 Obtention des données géométriques et topologiques 191

8.5 Imposition de contraintes initiales 194

8.6 Génération des séquences d'assemblage 196

8.7 Imposition de contraintes technologiques et de procédure 197

8.8 Inclusion des opérations complémentaires reliées aux opérations

d'assemblage fonctionnelles 199

8.9 Évaluation économique des séquences générées 202

8.10 Évaluation qualitative des séquences générées 204

CHAPITRE 9 : APPLICATION DE LA MÉTHODE SUR UN PRODUIT DE MODÈLE UNIQUE ET MODULAIRE PAR NATURE: UNE STATION BUREAUTIQUE 207

9.1 Introduction 207

9.2 Liste de composants de la station de travail bureautique 209

9.3 Modularisation de la station de travail bureautique 211

9.4 Relation de précédence des composants par module 213

9.5 Génération des séquences d'assemblage par module 215

9.5.1 Module porte 215

9.5.1.1 Contraintes initiales 216

9.5.1.2 Génération des séquences d'assemblage du module porte 216

9.5.1.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module porte 217

9.5.2 Module table 218

9.5.2.1 Contraintes initiales 218

9.5.2.2 Génération des séquences d'assemblage du

module table 219

9.5.2.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module table 219

9.5.3 Module étagère 222

9.5.3.1 Contraintes initiales 222

9.5.3.2 Génération des séquences d'assemblage du module étagère 223

9.5.3.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module étagère 224

9.5.4 Module meuble 227

9.5.4.1 Contraintes initiales 227

9.5.4.2 Génération des séquences d'assemblage du module meuble 228

9.5.4.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module meuble 229

9.5.5 Module station 230

9.5.5.1 Contraintes initiales 230

9.5.5.2 Génération des séquences d'assemblage du module station 231

9.5.5.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module station 231

9.6 Évaluation qualitative par module 232

9.6.1 Module table 233

9.6.2 Module étagère 234

9.6.3 Module meuble 234

9.7 Opérations complémentaires 235

9.7.1 Module table 236

9.7.2 Module étagère 236

9.7.3 Module meuble 237

9.7.4 Module porte 238

9.7.5 Module station 238

9.8 Évaluation économique des séquences par module 239

9.8.1 Module porte 239

9.8.2 Module table 239

9.8.3 Module étagère 240

9.8.4 Module meuble 240

9.8.5 Module station 240

9.9 Équilibrage de ligne pour l'assemblage de la station de travail bureautique 240

9.9.1 Analyse pour l'équilibrage de ligne 243

9.10 Solution pour les cellules d'assemblage de la station de travail bureautique 245

CHAPITRE 10 : APPLICATION DE LA MÉTHODE SUR UN PRODUIT À MODÈLE UNIQUE ET SUSCEPTIBLE À LA MODULARISATION : UN ALTERNATEUR ÉLECTRIQUE 260

10.1 Introduction 260

10.2 Liste des composants de l'alternateur 261

10.3 Modularisation de l'alternateur 264

10.4 Relation de précédence des composants par modules 265

10.5 Génération des séquences d'assemblage par module 266

10.5.1 Module couvercle frontal 266

10.5.1.1 Contraintes initiales 266

10.5.1.2 Génération de séquences d'assemblage du module couvercle frontal 267

10.5.2 Module couvercle postérieur 268

10.5.2.1 Contraintes initiales 268

10.5.2.2 Génération des séquences d'assemblage du module couvercle postérieur 269

10.5.2.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module couvercle postérieur 269

10.5.3 Module alternateur 271

10.5.3.1 Contraintes initiales 272

10.5.3.2 Génération des séquences d'assemblage du module alternateur 273

10.5.3.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module alternateur 273

10.6 Évaluation qualitative des séquences générées 275

10.6.1 Module couvercle postérieur 275

10.6.2 Module alternateur 276

10.7 Opérations complémentaires 278

10.7.1 Module couvercle frontal 278

10.7.2 Module couvercle postérieur 278

10.7.3 Module alternateur 279

10.8 Évaluation économique des séquences trouvées par module 279

10.8.1 Couvercle frontal 280

10.8.2 Couvercle postérieur 280

10.8.3 Alternateur 280

10.9 Équilibrage de ligne pour l'assemblage de l'alternateur 281

10.9.1 Analyse pour l'équilibrage de ligne 285

10.10 Solution pour les cellules d'assemblage de l'alternateur 287

CHAPITRE 11 : APPLICATION DE LA MÉTHODE SUR UN PRODUIT À MODÈLES MULTIPLES : UNE TURBINE HYDRAULIQUE 293

11.1 Introduction 293

11.2 Présentation du produit 293

11.3 Classification des composants 296

11.3.1 Pompe 297

11.3.2 Venturi 299

11.4 Modularisation de l'assemblage 300

11.5 Relation de précédence des composants par module 303

11.6 Génération des séquences d'assemblage par module 303

11.6.1 Sous-assemblage du couvercle (S-couvercle) 303

11.6.2 Pompe 304

11.6.2.1 Contraintes initiales 304

11.6.2.2 Génération des séquences d'assemblage 306

11.6.2.3 Contraintes technologiques et de procédure 307

11.6.3 Turbine 309

11.6.3.1 Contraintes initiales 310

11.6.3.2 Génération des séquences d'assemblage 311

11.6.3.3 Contraintes technologiques et de procédure pour la turbine 313

11.7 Opérations complémentaires 314

11.8 Évaluation économique des séquences générées par module 318

11.8.1 Sous-assemblage du couvercle 318

11.8.2 Pompe 318

11.8.3 Turbine 320

11.9 Équilibrage de la ligne pour la cellule d'assemblage de turbines 321

11.9.1 Analyse pour le équilibrage de ligne 322

11.10 Solution pour un système d'assemblage aléatoire pour la famille de turbines hydrauliques 325

11.10.1 Résumé de la solution proposée 336

11.11 Procédure de contrôle des composants variables 338

11.11.1 Étiquette d'identification 339

11.11.2 Procédure 341

CONCLUSION 344

RÉFÉRENCES 351

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Fonction de contact pour des composants cartésiens 110

Tableau 4.2 Fonction de translation pour des composants cartésiens 111

Tableau 4.3 Fonctions de contact et de translation pour des composants de trajectoire cylindrique et de symétrie angulaire 115

Tableau 4.4 Fonctions de contact et de translation pour des composants de trajectoire cylindrique et asymétrie angulaire 118

Tableau 4.5 Fonctions de contact et de translation pour un produit avec des composants cartésiens et non cartésiens 122

Tableau 5.1 Fonctions de contact et de translation pour l'assemblage modulaire du stylo à bille 136

Tableau 5.2 Liste de composants de la porte de four 147

Tableau 5.3 Séquences d'assemblage finales pour la porte de four 149

Tableau 6.1 Classification des composants d'une famille de produits 172

Tableau 9.1 Séquences d'assemblage pour le module porte 217

Tableau 9.2 Séquences d'assemblage pour le module table 221

Tableau 9.3 Séquences résultantes du module étagère 226

Tableau 9.4 Séquences résultantes du module meuble 229

Tableau 9.5 Séquences résultantes du module station 232

Tableau 9.6 Séquences choisies pour le module table 233

Tableau 9.7 Séquences choisies pour le module étagère 234

Tableau 9.8 Séquences choisies pour le module meuble 235

Tableau 9.9 Nombre de séquences faisables et souhaitables après l'évaluation qualitative 235

Tableau 9.10 Temps d'assemblage par module de la station de travail bureautique 243

Tableau 9.11 Temps d'assemblage de la station bureautique avec les portes intégrées aux modules respectifs 244

Tableau 9.12 Temps d'assemblage des cellules à former pour accomplir le taux de production prévu 245

Tableau 9.13 Temps et personnel par cellule pour l'assemblage de la station bureautique 258

Tableau 10.1 Séquences d'assemblage du module couvercle frontal 268

Tableau 10.2 Séquences d'assemblage du module couvercle postérieur 271

Tableau 10.3 Séquences d'assemblage du module alternateur 274

Tableau 10.4 Séquences d'assemblage choisies pour le module couvercle postérieur 276

Tableau 10.5 Séquences d'assemblage choisies pour le module alternateur 277

Tableau 10.6 Temps d'opération de la machine de preuve électronique 285

Tableau 10.7 Temps d'assemblage manuel des modules 286

Tableau 10.8 Résumé des temps assignés par travailleur 292

Tableau 11.1 Séquences d'assemblage pour le module S-couvercle 304

Tableau 11.2 Séquences d'assemblage du module pompe 309

Tableau 11.3 Séquences d'assemblage du module turbine 314

Tableau 11.4 Séquences d'assemblage choisies pour le module pompe 320

Tableau 11.5 Temps d'opération des machines de la cellule d'assemblage de turbines 322

Tableau 11.6 Résumé des temps d'opération assignés par travailleur 337

LISTE DE FIGURES

Figure 1.1 Diagramme de liaisons d'un stylo à bille 10

Figure 1.2 Détection erronée de collision entre deux composants 24

Figure 1.3 Méthode de désassemblage de Hoffman 32

Figure 3.1 Organisation hiérarchique d'un produit 66

Figure 3.2 Organisation de modules sur une branche 69

Figure 3.3 Pièce élémentaire comme composant 72

Figure 3.4 Module comme composant 73

Figure 3.5 Éléments et composants élémentaires 74

Figure 3.6 Système cartésien de trois dimensions 77

Figure 3.7 Assemblage de composants cartésiens dans un repère 3D 78

Figure 3.8 Trajectoire des composants non cartésiens 79

Figure 3.9 Composants cartésiens dans un repère 2D 80

Figure 3.10 Séquence d'assemblage linéaire pour un stylo à bille 84

Figure 3.11 Séquence d'assemblage modulaire pour un stylo à bille 85

Figure 4.1 Modularisation d'un produit modulaire par nature 97

Figure 4.2 Modularisation d'un produit complexe susceptible d'être modularisé 99

Figure 4.3 Vue explosée d'une porte de four électrique (21) 101

Figure 4.4 Assemblage d'un produit linéaire 103

Figure 4.5 Définition des relations de contact 105

Figure 4.6 Exemple de génération des séquences d'assemblage 109

Figure 4.7 Composants de trajectoire cylindrique et symétrie angulaire 114

Figure 4.8 Composants de trajectoire cylindrique et asymétrie angulaire 117

Figure 4.9 Produit avec composants cartésiens (A,B) et non cartésiens (C,D) 120

Figure 4.10 Vue de plan d'un produit avec composants cartésie et non cartésiens 121

Figure 4.11 Structure hiérarchique d'un produit générique avec des modules et des composants élémentaires 125

Figure 5.1 Représentation graphique d'un stylo à bille 133

Figure 5.2 Première décomposition du stylo à bille 133

Figure 5.3 Arbre hiérarchique d'assemblage du stylo après la première décomposition 134

Figure 5.4 Deuxième décomposition du stylo à bille 134

Figure 5.5 Arbre hiérarchique d'assemblage du stylo après la deuxième décomposition 135

Figure 6.1 Modularisation d'une famille de produits 174

Figure 8.1 Structure de l'approche proposée 189

Figure 8.2 Diagramme logique du module de modularisation du produit 191

Figure 8.3 Diagramme logique du module d'obtention de données 193

Figure 8.4 Diagramme logique du module d'imposition des contraintes initiales 195

Figure 8.5 Diagramme logique du module de génération de séquences d'assemblage 197

Figure 8.6 Diagramme logique du module d'imposition des contraintes de procédure 199

Figure 8.7 Diagramme logique du processus d'inclusion des opérations complémentaires 201

Figure 8.8 Diagramme logique du module d'évaluation économique 203

Figure 8.9 Diagramme logique du module d'évaluation qualitative des séquences générées 205

Figure 9.1 Station de travail bureautique 208

Figure 9.2 Modularisation de la station de travail bureautique 212

Figure 9.3 Configuration des cellules d'assemblage pour la station de travail bureautique 259

Figure 10.1 Alternateur électrique 260

Figure 10.2 Première décomposition de l'alternateur 261

Figure 10.3 Décomposition du module n°1 262

Figure 10.4 Décomposition de module n°2 263

Figure 10.5 Modularisation de l'alternateur 264

Figure 10.6 Configuration des cellules d'assemblage pour l'alternateur 292

Figure 11.1 Turbine hydraulique générique 295

Figure 11.2 Méthode de fixer le venturi avec le carter 296

Figure 11.3 Modularisation des turbines en plastiques 301

Figure 11.4 Modularisation des turbines métalliques 302

Figure 11.5 Position non cartésienne des logements d'écrou 312

Figure 11.6 Configuration de la cellule d'assemblage pour la turbine hydraulique 337

Figure 11.7 Étiquette générique d'identification 341

Figure 11.8 Gabarit pour les couvercles 342

LISTE DES ANNEXES

Annexe I Fonctions de contact et de translation par module de la station bureautique 362

Annexe II Évaluation quantitative par module de la station bureautique (DFMA) 377

Annexe III Fonctions de contact et de translation par module de l'alternateur 394

Annexe IV Évaluation quantitative par module de l'alternateur 405

Annexe V Fonctions de contact et de translation par module de la famille de turbines hydrauliques 415

Annexe VI Évaluation quantitative par module de la famille de turbines hydrauliques 426

INTRODUCTION

L'assemblage est une des activités les plus importantes dans le processus de fabrication d'un produit étant donné sa nature intégrative. Des composants qui ont été conçus séparément pour atteindre certaines spécifications et qui ont été fabriqués dans la même entreprise ou achetés ailleurs sont mis ensemble pour obtenir un produit qui accomplit les fonctions pour lesquelles il a été conçu.

Dans le passé, les exigences du marché ont conduit les chercheurs et les ingénieurs à développer de nouvelles méthodologies de production dirigées à la fabrication de produits standards en grande quantité. À partir de ce moment, l'automatisation a commencé à gagner de l'importance dans l'industrie, mais surtout dans le domaine de la manufacture des composants individuels. On a commencé à utiliser des lignes de transfert, des machines à commande numérique, des systèmes automatiques pour le traitement de feuilles métalliques, etc. Malgré cette évolution, l'assemblage est demeuré principalement une activité manuelle.

De nos jours, le marché a encore évolué. Il n'exige plus une grande quantité de produits identiques. À cause de la compétitivité existante, il exige plutôt une variété de modèles d'un cycle de vie très court. Ce changement du marché a encore obligé les entreprises à moderniser leurs installations et leurs méthodes de production cependant les méthodes d'assemblage sont restées presque les mêmes. Le problème est plus évident

lorsqu'on considère l'assemblage d'une famille de produits. Pour qu'une entreprise reste compétitive, elle doit être capable d'offrir toute une gamme de produits au bon moment et être aussi capable de changer ses modèles selon la dynamique du marché. Étant donné que l'assemblage est un des facteurs les plus coûteux du processus productif, il est fondamental de réduire le coût d'assemblage pour obtenir une réduction significative du coût de production, ce qui permet à l'entreprise de continuer dans le marché. L'une des façons d'arriver à la réduction du coût d'assemblage est l'amélioration du processus de planification de l'assemblage et son intégration au processus de conception du produit, de façon à tenir compte les contraintes d'assemblage dès le début et, de cette manière, arriver à une conception du produit en harmonie avec la ligne d'assemblage qui sera utilisée. Les améliorations faites au plan d'assemblage dans l'étape de conception du produit ont un grand impact sur le coût total de production. La philosophie de l'ingénierie simultanée, qui prône l'intégration du processus de conception du produit, de la planification de sa fabrication et de son assemblage, devient très populaire dans l'industrie d'aujourd'hui.

La détermination de la séquence d'assemblage est la base du plan d'assemblage. En effet, celle-ci joue un rôle très important dans ce plan, puisqu'elle influe sur la définition des sous-assemblages, la sélection des équipements, les supports de travail nécessaires, etc. Traditionnellement, la génération des séquences d'assemblage était faite manuellement et on confiait cette tâche à un ingénieur manufacturier qui connaissait le produit. Cet ingénieur, en se basant sur sa propre expérience et en utilisant des diagrammes de précédence, définissait quelques séquences parmi lesquelles il choisissait

celle qui lui semblait la meilleure. Cependant, cette manière de définir la séquence d'assemblage est loin d'être la meilleure. Beaucoup d'ingénieurs industriels très expérimentés ont de la difficulté à concevoir le meilleur plan d'assemblage, et le problème s'accentue lorsqu'on travaille avec des produits complexes pour lesquels le nombre de séquences faisables est de l'ordre de milliers.

Étant donné la complexité de la procédure de génération de séquences d'assemblage et de la conception de produits pour un assemblage facile, l'automatisation de tout le processus de planification de l'assemblage n'est pas encore possible. L'intervention d'un usager qui connaît le produit est encore nécessaire. L'objectif d'informatiser la génération de séquences d'assemblage doit consister à trouver une procédure systématique pour aider l'équipe d'ingénierie simultanée à définir les séquences d'assemblage faisables et souhaitables pour le produit analysé, sans tomber dans l'explosion combinatoire de résultats. Jusqu'à maintenant, la génération de séquences d'assemblage est étudiée comme un problème théorique; les générateurs tiennent compte seulement des relations géométriques des composants, ce qui a pour résultat la génération de milliers de séquences. Les séquences ainsi générées doivent être ensuite triées en utilisant des contraintes appelées stratégiques afin de réduire le nombre de séquences et de pouvoir les évaluer de façon quantitative. Dans la pratique, nous avons constaté que cette approche ne fonctionne pas bien avec des produits industriels réels, qui sont complexes dans la plupart de cas et qui génèrent de milliers de séquences (peut-être plus), ce qui rend les

évaluations postérieures presque impossibles. Pour réussir à définir la meilleure séquence d'assemblage, il faut franchir les étapes suivantes:

- la modélisation de l'assemblage du produit,
- la génération des séquences d'assemblage, et
- l'évaluation des séquences d'assemblage.

La modélisation de l'assemblage est l'étape où on représente le produit et les relations de précédence de ses composants dans un format qui nous permet de générer les séquences d'assemblage du produit.

La génération de séquences d'assemblage est l'étape principale de l'élaboration des plans d'assemblage. Dans cet étape il est nécessaire de considérer les contraintes géométriques et topologiques propres du produit ainsi que les contraintes technologiques et de procédure qui permettent de trier les séquences et de conserver seulement celles qui sont en accord avec nos besoins.

Finalement, l'évaluation des séquences d'assemblage nous permet de choisir quelle séquence nous devons implanter en fonction du coût et du temps d'assemblage et des considérations qualitatives. De cette façon, on est sûr de choisir la séquence la plus économique et qui est en accord à notre environnement d'assemblage et au taux de production prévu. Cette méthodologie a été d'abord utilisée pour des produits complexes

à un seul modèle, mais elle peut être également employée pour l'analyse de familles de produits si nous ajoutons les concepts propres à ce type de produit

Pour pouvoir présenter les travaux réalisés dans ce mémoire de façon organisée, nous avons divisé celui-ci en huit chapitres théoriques et trois chapitres d'application pratique.

Le Chapitre 1 examine les travaux importants sur la génération des séquences d'assemblage qui ont été publiés par des différents chercheurs. Nous avons commenté chaque approche présentée.

Le Chapitre 2 présente les objectif de la recherche et la méthodologie que nous avons suivie.

Le Chapitre 3 précise la terminologie que nous utilisons tout au long du mémoire afin d'avoir une compréhension maximale entre l'auteur et le lecteur.

Le Chapitre 4 montre la modélisation des produits en deux étapes que nous proposons.

Le Chapitre 5 décrit la procédure interactive d'obtention de données pour la génération des séquences d'assemblage ainsi que l'algorithme de génération de séquences.

Le Chapitre 6 présente la méthodologie pour gérer la génération des séquences d'assemblage pour une famille de produits.

Le Chapitre 7 montre l'évaluation quantitative et l'évaluation qualitative faites aux séquences générées.

Le Chapitre 8 illustre les différents modules développés pour la planification de l'assemblage à l'aide des ordinateurs.

Le Chapitre 9 décrit l'application pratique de l'approche proposée pour un produit industriel de nature modulaire et prend pour exemple une station de travail bureautique.

Le Chapitre 10 décrit l'application pratique de l'approche proposée sur un produit industriel susceptible d'être modularisé, l'exemple utilisé est un alternateur électrique.

Le Chapitre 11 montre l'application pratique de l'approche pour une famille de produits en utilisant les différents modèles de turbines hydrauliques pour des petits bateaux.

Finalement, nous présentons nos conclusions et les nouvelles voies de recherche qu'il serait nécessaire d'étudier pour avoir une meilleure compréhension de la planification de l'assemblage et de la génération de séquences en particulier.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 INTRODUCTION

La planification de l'assemblage est un processus dans lequel on spécifie d'une façon détaillée le mode de travail à chaque niveau de l'assemblage, selon le système choisi, soit un système d'assemblage manuel, robotisé ou automatique. Étant donné la complexité du processus, l'analyse pour la planification de l'assemblage est faite par étapes et de façon hiérarchique. Par exemple, dans l'assemblage robotisé, Wolter (61) distingue quatre niveaux hiérarchiques de planification:

- la définition des opérations d'assemblage;
- la planification au niveau des tâches d'assemblage;
- la planification au niveau de la manipulation;
- la planification au niveau des articulations.

Plusieurs chercheurs étudient les niveaux de planification de tâches d'assemblage, les manipulations et les mouvements correspondants des articulations. Dans ce groupe, on peut citer les auteurs suivants: Jentsch et Kaden (31), Chang et Wee (10), Chen et Wichman (12), Liberman et Wesley (42). Tous ces travaux supposent que la séquence d'assemblage est définie par du personnel qualifié et expérimenté. Donc, le point de

départ est la séquence d'assemblage à partir de laquelle les niveaux de planification de l'assemblage robotisé sont déduits. Pour l'assemblage manuel, la planification de l'assemblage a été habituellement confiée à un expert, ce qui rendait ce processus entièrement subjectif. Malgré cette lacune dans la planification de l'assemblage, ce n'est que depuis environ une dizaine d'années que les chercheurs ont commencé à donner de l'importance à la définition de la séquence d'assemblage dans le processus global de planification. Parmi les chercheurs les plus connus dans ce domaine, on peut citer: Bourjault (8), Henrioud, Bonneville et Bourjault (23), De Fazio et Whitney (14), Sanderson et Homem de Mello (51), Sekiguchi et al. (52), Mascle et Figour (43) et Wolter(61). Ces mêmes auteurs et plusieurs autres continuent la recherche dans ce domaine (2, 4, 5, 11, 17, 19, 20, 21, 22, 27, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 47).

1.2 CLASSIFICATION

Depuis les premiers travaux sur la planification des séquences d'assemblage et les méthodes de génération de séquences, la littérature reliée à ce sujet s'est accrue et les approches sont très variées. Pour faciliter l'étude de la littérature, nous allons classifier les publications techniques en utilisant deux méthodes. La première est basée sur la représentation et le moyen d'obtention des relations de précédence et la méthode de génération des séquences d'assemblage (21). La deuxième méthode de classification est basée sur l'approche de l'algorithme de génération de séquences.

1.2.1 Classification basée sur la représentation et le moyen d'obtention des relations de précédence et la méthode de génération des séquences d'assemblage

Dans cette classification, on trouve cinq groupes principaux :

- les méthodes basées sur le diagramme de liaisons;
- les méthodes basées sur les systèmes de base de connaissances;
- les méthodes basées sur la théorie de graphes;
- les méthodes basées sur la CAO (Conception assistée par ordinateur); et
- les méthodes basées sur la modélisation mathématique.

1.2.1.1 Méthodes basées sur le diagramme de liaisons

La première méthode de génération de séquences basée sur le diagramme de liaison a été développée par **Bourjault** (8). Cette méthode débute avec la création d'un diagramme qui représente les relations liant les différents composants du produit analysé. Ce diagramme est appelé «Diagramme de liaisons». Pour créer ce diagramme, on utilise l'information obtenue dans la liste des composants et des dessins d'assemblage.

À titre d'exemple, on montre à la figure 1.1 le diagramme de liaison que Bourjault a utilisé, lors de son premier travail dans ce domaine, pour représenter l'assemblage d'un stylo à bille.

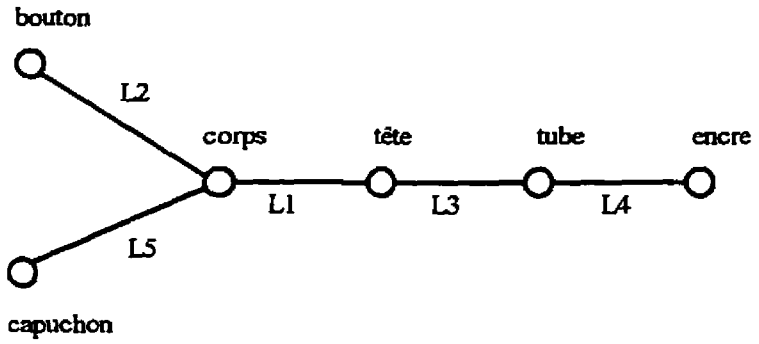


Figure 1.1 Diagramme de liaisons d'un stylo à bille

Dans le diagramme, chaque noeud représente un composant du stylo et la ligne entre deux noeuds représente une certaine relation définie par l'usager et qui existe entre les composants impliqués. Cette relation est appelée «liaison» et, pour le cas de l'assemblage de produits, elle représente généralement une relation de contact ou de proximité importante. Chaque liaison doit avoir un numéro unique assigné afin de l'utiliser ensuite dans la génération de séquences d'assemblage. La différence la plus importante entre les différents auteurs qui utilisent cette approche dans leur recherche est la méthode d'obtention des relations de précédence entre les composants pour la génération des séquences d'assemblage.

Bourjault obtient les relations de précédence à partir de deux questions posées à chaque liaison:

Q1: Est-ce qu'il est vrai que la liaison ℓ_i ne peut pas être établie après avoir établi les liaisons $(\ell_j, \ell_k, \ldots)$?

Q2: Est-ce qu'il est vrai que la liaison ℓ_i ne peut pas être établie si les liaisons $(\ell_j, \ell_k, \ldots)$ ne sont pas encore établies ?

Ces questions sont posées à l'usager jusqu'à ce que les relations de précédence soient complétées. Le nombre de questions (Q) auxquelles il faut répondre dans cette approche est:

$$\ell \; 2^{\ell} > Q \geq 2 \; (\ell^2 + \ell) \qquad (1.1)$$

où:

ℓ = est le nombre de liaisons existantes.

L'algorithme génère toutes les séquences géométriquement et topologiquement faisables. Celles-ci sont présentées sur un graphique d'arbre inversé où les composants détachés sont situés dans la partie inférieure du graphique. Chaque niveau du graphique contient les liaisons qui doivent être accomplies à ce niveau et ce processus continue jusqu'à la formation complète du produit, qui est représenté au niveau le plus haut du graphique.

De Fazio et Whitney (14) ont simplifié la méthode de Bourjault en réduisant le nombre de questions qu'il faut poser à l'usager pour compléter les relations nécessaires à la génération de toutes les séquences géométriquement et topologiquement faisables. Pour y arriver, ces auteurs ont changé la structure des questions à poser. Elles sont toujours au nombre de deux pour chaque liaison, mais elles sont formulées de la façon suivante :

Q1: Quelles liaisons faut-il établir pour permettre la réalisation de la liaison ℓ ?

Q2: Quelles liaisons ne devraient pas être établies pour permettre la réalisation de la liaison ℓ ?

À la différence de la méthode de Bourjault, les réponses doivent être exprimées sous forme de relations de précédence entre les liaisons ou entre une combinaison logique de liaisons. Ainsi, les réponses qu'il faut donner aux deux questions ont la forme suivante :

A1: $(\ell_j \text{ ou } (\ell_k \text{ et } \ell_n)) \rightarrow \ell_i$ (1.2)

A2: $\ell_i \rightarrow (\ell_s \text{ ou } (\ell_t \text{ et } \ell_u))$ (1.3)

où:

$\rightarrow$ veut dire: «doit précéder»

Le nombre de questions auxquelles il faut répondre est de 2ℓ (où ℓ est le nombre de liaisons). En répondant à toutes ces questions, l'usager définit toutes les relations nécessaires pour la génération de toutes les séquences faisables de l'assemblage, lesquelles sont représentées dans un graphique nommé «graphique des séquences de liaisons».

Les deux approches expliquées sont les plus connues dans le domaine de la génération de séquences d'assemblage en utilisant des diagrammes de liaisons, mais leur utilisation dans un milieu réel est très difficile parce que les questions auxquelles il faut répondre sont complexes. En effet, il devient de plus en plus compliqué d'y répondre au fur et à mesure que le nombre de liaisons s'accroît. Il est vrai que De Fazio et Whitney ont diminué de beaucoup le nombre de questions auxquelles l'usager doit répondre, mais il est vrai aussi que cette simplification a été possible grâce à l'augmentation du degré de difficulté des questions posées. Dans les deux cas, pour des problèmes d'assemblage complexes, la probabilité d'erreur devient assez élevée. Donc, les résultats obtenus ont aussi une probabilité élevée de contenir des erreurs, lesquelles ne sont pas facilement détectables à cause de l'immense quantité de résultats. Malgré ces inconvénients, ces deux approches ont servi de base théorique à plusieurs autres auteurs qui ont utilisé les diagrammes de liaisons pour la génération de séquences d'assemblage. Dernièrement, les auteur ont informatisé leur approche en utilisant le programme de dessin SUNDRAW, pour la représentation graphique de l'assemblage du produit et un algorithme graphique de génération de séquences, toujours en se basant sur le graphique de séquences de

liaisons, et un module qui permet de trier les séquences en imposant des contraintes. Ce travail est présenté en (26).

Ghosh (19) présente une méthode pour générer toutes les séquences qui respectent les contraintes géométriques et topologiques lors de l'assemblage d'un produit. Un système de codage numérique est utilisé pour représenter les liaisons et les mobilités des composants. La méthode commence avec l'examen de chaque paire de composants dans un produit, et la présence ou l'absence de contact est représentée par une fonction de contact, qui est un vecteur de six chiffres. La mobilité d'un composant par rapport à un autre selon les coordonnées cartésiennes est aussi représentée par un vecteur de six chiffres. En partant avec ces données pour toutes les paires de composants, des opérations logiques sont réalisées d'abord pour l'assemblage de trois composants, et tous les ensembles de trois composants sont identifiés. Ce processus continue en ajoutant toujours plus de composants à ces ensembles et en examinant leur faisabilité. Ce processus aboutit en donnant comme résultat toutes les séquences pour l'assemblage du produit, qui respectent les contraintes géométriques et topologiques. Un avantage important de cette méthode est que l'algorithme peut être facilement informatisé, ainsi permettant une certaine automatisation du processus de planification de l'assemblage. Cette méthode est discutée de façon détaillé dans le Chapitre 4.

Mascle et Figour (43) proposent une approche pour déterminer quelques bonnes séquences, mais pas nécessairement toutes les séquences acceptables. Pour analyser les

séquences opérationnelles, ils utilisent la méthode indirecte selon laquelle on commence l'analyse du produit final et on cherche des stratégies pour le désassembler. Cette méthode est inductive et a pour but de contrôler l'explosion combinatoire de solutions. Les auteurs partent de l'hypothèse que les séquences d'assemblage sont inverses aux séquences de désassemblage.

La procédure commence avec la construction d'un diagramme de liaisons et d'une enveloppe à six faces qui est placée sur les dessins de l'assemblage, de façon à séparer les composants en deux groupes:

1. les composants qui sont directement accessibles à ce niveau, et
2. les composants qui seront accessibles à un autre niveau.

L'analyse de désassemblage est faite de façon itérative seulement pour les composants qui sont directement accessibles à ce niveau de la procédure. Les auteurs introduisent le concept de degré de liaison et les liaisons montrées dans le diagramme sont exprimées par des matrices de moitié de degré de liaison pour chacune. Les noeuds principaux sont classifiés en fonction du degré de liaison. Le composant avec la moindre valeur de moitié de degré de liaison est désassemblé et les matrices sont mises à jour. Le processus continue jusqu'à ce que le désassemblage soit fini.

Un module logique a été développé pour l'évaluation de l'efficacité de l'algorithme. Ce module fait partie du logiciel nommé AUTOGAM, lequel vérifie la possibilité de désassemblage et donne comme résultat les différentes séquences en fonction de certains règles. Ce dernier travail est intéressant, car même si les auteurs utilisent les diagrammes de liaisons comme base d'analyse, l'objectif de la génération de séquences n'est pas d'obtenir toutes les séquences, comme c'était l'objectif initial. Maintenant, ils cherchent plutôt à éviter l'explosion combinatoire de résultats en dirigeant la génération vers des séquences souhaitables. Dans ce cas, on perd une bonne partie des séquences faisables, mais il est aussi vrai que, pour une grande partie des produits, une séquence d'assemblage dérivée d'une séquence de désassemblage est la meilleure et peut-être la même que l'on trouverait après le tirage de toutes les séquences faisables.

D'autres travaux basés sur des diagrammes de liaisons poursuivent le même but d'éviter l'explosion combinatoire de solutions qui est amenée par la génération de toutes les séquences faisables.

Lee et Shin (40) (26) présentent une méthode pour la détermination automatique de séquences partielles d'assemblage, à partir d'un diagramme de liaisons et au moyen de la définition des sous-assemblages souhaitables. La détermination des séquences partielles d'assemblage est basée sur une définition récursive des sous-assemblages souhaitables, celle-ci étant faite avec une vérification de la facilité de désassemblage de chaque sous-assemblage défini. Pour ces auteurs, un sous-assemblage souhaitable est un groupe de

composants qui peuvent être désassemblés du produit de façon naturelle et facile et dont le coût d'assemblage est minimal.

Le processus commence avec la définition du diagramme de liaisons représentatif de l'assemblage du produit. À partir de ce diagramme et de certaines définitions, les noeuds représentatifs des composants sont regroupés pour former des sous-assemblages préliminaires. Ce processus est fait de façon itérative avec une évaluation de la facilité de désassemblage, de la stabilité des sous-assemblages tentatives et du coût, et permet de générer un plan d'assemblage basé sur les sous-assemblages. Les résultats sont présentés dans un graphique hiérarchique qui montre les séquences partielles générées pendant le processus.

La complexité de l'algorithme utilisé limite son utilisation à la planification de l'assemblage de produits d'environ 15 composants. Mais, ce travail représente un effort sérieux pour éviter l'explosion combinatoire de résultats. Il nous donne aussi une base théorique pour la recherche des méthodes de génération de séquences permettant l'obtention de plans d'assemblage qui considèrent nécessaire l'assemblage parallèle des sous-assemblages pour maximiser la performance d'un système dans un contexte d'assemblage flexible avec plusieurs postes de travail.

Dans le même groupe de travaux qui utilisent des diagrammes de liaisons, on trouve aussi le travail de **Klein** (34) qui modifie la représentation du diagramme de liaisons pour

ajouter des opérations d'assemblage qui ne soient pas des liaisons composant à composant. De plus, il ajoute un nouveau type de noeud qu'il appelle le noeud fantôme.

1.2.1.2 Méthodes basées sur systèmes de base de connaissances

Étant donné qu'il n'est pas possible de trouver de façon directe un plan d'assemblage optimal en utilisant des algorithmes, des chercheurs ont étudié la génération des séquences d'assemblage à partir d'une base de connaissances. Dans la plupart des cas, les méthodes s'appuyant sur des bases de connaissances sont dirigées vers l'étude de l'assemblage automatisé. Dans cette approche, des règles sont formulées à partir de la configuration des composants dans l'espace et des caractéristiques propres de la procédure d'assemblage. En fonction de ces règles, le système fait le raisonnement nécessaire pour la formation de séquences ou de sous-assemblages valides. Le système trouve la séquence résultante, par l'application itérative des règles dans l'analyse du composant ou du sous-assemblage à ajouter aux séquences, jusqu'à la séquence finale.

Seow et Denvanathan (53) introduisent une structure basée sur la logique temporelle pour la modélisation, la spécification et la génération de séquences, et pour leur vérification. Les auteurs utilisent le langage *Linear Time Temporal Logic* pour le raisonnement des états des séquences générés par niveau. Ce langage contient des opérateurs logiques et temporels permettant une grande flexibilité dans la dérivation de connaissances, à partir des contraintes géométriques de procédure et stratégiques imposées par le produit, par l'usager et par la façon dont chaque composant est fixé dans

l'ensemble. L'état des séquences générées à chaque niveau est le résultat logique dérivé de la condition de chaque opération à ce niveau. Cette condition a une représentation binaire qui indique si l'opération respective est «faite» ou «n'est pas faite». À la fin, le système donne comme résultat une liste des séquences qui ont accompli toutes les contraintes imposées.

Huang et Lee (30) présentent une structure de base de connaissances pour la génération automatique de plans d'assemblage en se basant sur un modèle CAO de l'assemblage comme donnée de départ. Les connaissances sur la structure de l'assemblage, les contraintes de précédence et de ressources sont représentées en utilisant le *Predicate Calculus*, avec lequel une base statique de connaissance est formée. Le système obtient les relations de précédence de façon automatique au moyen de deux algorithmes qui définissent la pré-condition et la post-condition de l'état de l'assemblage à chaque niveau. Ces deux algorithmes, le *Find-Pre-Condition* et le *Find-Post-Condition*, obtiennent les données de manière systématique, à partir d'un graphique qui représente les caractéristiques des opérations de liaison des composants (*Feature Mating Operation Graph*) qui est généré par les données CAO du produit. La génération des plans d'assemblage est contrôlée par des règles de production et le plan optimal est obtenu par l'itération des algorithmes de conditions PRE et POST.

Occèña et Chin (47) décrivent la façon de construire une base de connaissances de l'assemblage d'un produit pour s'en servir dans la planification de l'assemblage et pour

valider des modèles et des plans d'assemblage déjà générés. Pour chaque produit, deux sortes de données sont disponibles: les données de conception du produit, de la façon qu'elles sont comprises par le concepteur du produit, et les données d'assemblage, de la façon qu'elles sont comprises par l'ingénieur de méthodes ou le responsable direct de la conception du système d'assemblage. Le groupe de données acquis peut servir à la génération de plans d'assemblage ou pour valider des plans d'assemblage générés par d'autres moyens. Les caractéristiques de la base de connaissances proposée sont les suivantes:

- La modularité: La base de données et la structure de contrôle sont séparées, ce qui permet l'utilisation de la même base de données pour une grande quantité de produits, avec la même structure de contrôle.

- La procédure symbolique: La base travaille avec des chaînes de caractères qui sont plus compréhensibles pour l'usager. La procédure symbolique élimine la nécessité de traduire chaque information en code numérique.

- Représentation déclarative et déduction logique: Les objets sont représentés par des relations qui nous permettent d'en tirer une conclusion.

Le résultat est une liste ordonnée de chaque composant avec l'opération qu'il faut effectuer, la méthode, les instructions d'assemblage, l'outil nécessaire et la machine à utiliser s'il y a lieu.

Chen et Wichman (12) présentent un système automatique qui intègre la conception du produit et la planification de l'assemblage robotisé pour produits mécaniques. Le système intègre un réseau neuronal informatisé qui prend les caractéristiques de conception définies et les traduit dans une représentation physique 3-D en utilisant les B-reps (*Boundary-representation*). Une fois que le B-rep est défini, un autre module du système (*module préprocesseur*) détermine les directions possibles d'assemblage pour chaque composant de l'assemblage. Pour la planification, le système utilise le système expert CLIPS qui sert à la génération de séquences d'assemblage et qui inclut les changements d'outils et réorientations des sous-assemblages. Le module de détection des liaisons détermine un des trois types de liaisons entre deux composants :

- insertion,
- attachement,
- contact.

Le résultat de ce module est un graphique du produit dans lequel sont ajoutées des liaisons physiques entre les composants qui ont été détectés dans la liste *Clips fact-list.*

Le module de détection de collisions utilise un algorithme pour générer les relations de précédence entre les composants du produit.

Finalement, la construction du plan d'assemblage est effectuée par le module de formulation de plans. Ce module obtient le plan d'assemblage en renversant la séquence de désassemblage trouvée. Le plan de désassemblage est obtenu avec l'utilisation itérative de deux règles pour chaque niveau :

1. minimisation dans le changement d'outils, et
2. uniformité dans la direction des actions successives de désassemblage.

Il est nécessaire de dire que le plan généré est conçu pour un poste de travail avec un seul robot d'assemblage et ne permet pas de sous-assemblages faits de façon parallèle.

Sekiguchi et al (52) analysent d'abord les relations de connexité qui existent entre chaque paire de composants. Ces relations sont ensuite regroupées en deux: *fit* et *contact*. Ensuite, chaque groupe est sous-divisé en fonction du degré de difficulté pour le désassembler. Ce degré de difficulté est calculé grâce à la combinaison de la liberté de mouvement et la force nécessaire pour changer la position relative des composants dans l'ensemble. Les relations trouvées sont introduites dans le système par des expressions matricielles qui représentent toutes les caractéristiques des relations de connexité pour chaque paire de composants. La séquence est définie d'abord par les règles de priorité

d'assemblage des composants de chaque groupe et cette procédure est faite de façon algorithmique. Finalement, un module de simulation vérifie la séquence. Dans cette approche, l'interactivité usager-système exige une certaine connaissance du produit et ses relations de connexité pour pouvoir classer les types de connexion. Par contre, les auteurs partent du fait que le degré de difficulté est le même pour désassembler deux composants que pour les assembler, ce qui n'est pas vrai dans tous les cas.

Delchambre (17) présente une approche pour générer des plans d'assemblage en déterminant d'abord les contraintes de précédence en fonction des données géométriques. Un système conçu en Prolog détermine un graphique du produit dans lequel les lignes reliant les noeuds représentent les liaisons de façon similaire à un diagramme de liaisons. De la même manière, le système représente chaque composant par une enveloppe de trois dimensions qui a ses faces parallèles aux axes cartésiens. L'algorithme de détection de collisions du système utilise l'information de cette modélisation simplifiée de composants pour déterminer les directions de collisions des composants. Dans certains cas, cette modélisation peut amener à la définition de relations de précédence erronées, ce qui est montré à la figure 1.2.

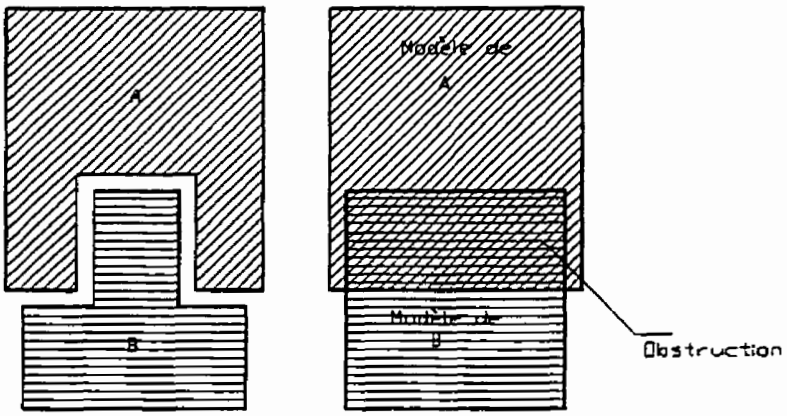


Figure 1.2 Détection erronée de collisions entre deux composants

À la figure 1.2, les composants A et B peuvent être bougés librement pour leur désassemblage, puisqu'il n'y pas de contacts entre eux dans la direction perpendiculaire à la page. Cependant, lorsqu'ils sont modélisés par des parallélépipèdes, il existe une obstruction entre eux dans cette direction. Cette erreur amène une défaillance dans le système et la génération d'au moins un plan d'assemblage erroné.

Finalement, on peut citer **Chang et Wee** (10) qui ont conçu un système pour la planification de l'assemblage robotisé en utilisant une base de connaissances. Les auteurs définissent un modèle hiérarchique de l'assemblage, de manière à ce que la détermination des séquences d'assemblage soit divisée en sous-problèmes. D'abord, ils trouvent la séquence d'assemblage de chaque sous-assemblage et, ensuite, ils génèrent les séquences d'assemblage des sous-assemblages qui sont au même niveau dans l'arbre de hiérarchie

pour enfin arriver au niveau le plus élevé de l'arbre. La procédure de génération de séquences est basée sur des règles heuristiques.

Les systèmes de base de connaissances adaptés à la génération de plans d'assemblage sont principalement dirigés vers l'assemblage automatisé. Ils focalisent donc l'analyse dans la génération de la séquence d'assemblage qui peut être faite dans un poste robotisé spécifique avec des outils définis. Les critères nécessaires à ces systèmes afin de trouver la séquence optimale sont reliés à un environnement d'assemblage automatisé ou robotisé. Ainsi, l'un des critères les plus communs est la minimisation des changements dans la direction de l'assemblage effectué par le robot. Ces critères n'ont pas la même importance pour la plupart des produits assemblés manuellement ou dans un environnement multi-poste. En effet, des critères comme la possibilité de sous-assemblage parallèle (modularité), la stabilité de l'ensemble à chaque niveau de l'assemblage, le coût minimal, l'assemblage facile, etc. doivent être pris en considération pour arriver à l'obtention d'une séquence d'assemblage qui soit faisable et souhaitable dans la pratique.

1.2.1.3 Méthodes basées sur la théorie de graphes

Certains chercheurs ont étudié la manière de générer les séquences d'assemblage par l'énumération des séquences d'assemblage faisables. Les approches de ce groupe donnent plus d'importance au processus d'assemblage lui-même qu'aux détails des composants ou des opérations d'assemblage. Les représentations graphiques sont nombreuses et

incluent, entre autres, les graphiques directes, les graphiques AND/OR de Homen de Mello et Sanderson (27) (ceux-ci font d'ailleurs une analyse plus approfondie de leur approche en (26)), les graphiques de connexité de Shpitalni, Elber et Lenz (55), les graphiques d'interférence de Floriani et Nagy (15) et les graphiques de contraintes de Wolter (61).

Les techniques graphiques incluent toujours un algorithme qui cherche les séquences d'assemblage sur la représentation graphique en utilisant des heuristiques et quelques critères d'évaluation. Une fois que le produit est désassemblé, la séquence d'assemblage est obtenue à l'inverse de la séquence de désassemblage.

Homem de Mello et Sanderson (26) (27) présentent un algorithme pour la génération de toutes les séquences d'assemblage, à partir de la génération des séquences de désassemblage. Il est supposé que l'inverse des tâches de désassemblage sont des tâches d'assemblage faisables. La conversion des séquences de désassemblage en séquences d'assemblage amène la décomposition du problème total de désassemblages en différents sous-problèmes. Chacun de ces sous-problèmes est le désassemblage d'un sous-assemblage. L'approche de Homem de Mello et Sanderson est basée sur les hypothèses suivantes :

- deux composants ou sous-assemblages sont liés chaque fois,
- lorsque deux composants ou sous-assemblages sont assemblés, tous les contacts sont établis.

Il est toujours possible de déterminer de façon correcte les sous-assemblages qui seront assemblés en fonction de critères géométriques et physiques. L'approche utilise un modèle relationnel pour représenter l'assemblage à analyser, et ce modèle inclut trois types d'entités: composants, contacts et attachements. Aussi, le modèle inclut un groupe de relations entre ces entités. Le modèle relationnel de l'assemblage est représenté par un graphique avec les fonctions d'attributs associées. Dans ce graphique, les noeuds correspondent aux entités et les composants sont représentés par des rectangles, les contacts par des cercles et les attachements par des triangles. Les lignes reliant deux entités représentent les relations qui existent entre ces deux entités. Comme nous l'avons dit, cette approche est basée sur la méthode de désassemblage. Donc, pour arriver à générer les séquences de désassemblage, on commence par le produit au complet et on le désassemble niveau par niveau jusqu'à ses composants élémentaires. Toutes les séquences de désassemblage sont trouvées et représentées sur un diagramme AND/OR. La méthode de génération de séquences utilise deux algorithmes :

- *Get-Feasible-Decomposition,* lequel décompose le diagramme relationnel du produit en sous-graphiques, en découpant le diagramme en sous-assemblages qui doivent respecter certaines règles. Une fois que tous les

sous-graphiques sont définis, les algorithmes vérifient chaque sous-graphique pour déterminer s'il est faisable et ainsi former la liste «fsbl-dec»;

- *Generate-And-Or-Graph*, qui est l'algorithme qui représente les séquences d'assemblage générées sur un graphique AND/OR, en fonction du diagramme relationnel et la liste «fsbl-dec».

L'algorithme de De Mello et Sanderson est correct et complet. On peut trouver la preuve des affirmations antérieures en (28). Le graphique AND/OR utilise moins de noeuds que le graphique direct, au fur et à mesure que les composants augmentent. Cette approche permet la génération de plans d'assemblage dans lesquels on peut faire des sous-assemblages de façon parallèle. D'un autre côté, le graphique AND/OR peut être très chargé et difficile à analyser, en fonction des composants et du nombre de sous-assemblages faisables. Aussi le temps de génération informatisé du graphique AND/OR est-il très long, si on le compare avec les représentations finales des autres approches. Les auteurs ont fait une mise à jour de leur approche en (26).

Wolter (61) (26) présente un système dans lequel un plan à niveau de tâches est généré du modèle de l'assemblage de façon directe. La méthode prend ses données d'entrée d'un modèle de l'assemblage semblable aux données produites par un système CAO, auxquelles s'ajoute de l'information additionnelle liée à la procédure d'assemblage. La sortie du système est un plan d'assemblage qui indique l'ordre dans lequel les

composants doivent être assemblés et les trajectoires que chacun des composants doit suivre lors de l'assemblage.

Pour la génération de la séquence d'assemblage, Wolter utilise l'approche qui consiste à générer des séquences de désassemblage pour trouver la séquence d'assemblage. Il propose la résolution du problème de génération en trois étapes:

1. proposer des trajectoires d'insertion qui semblent utiles pour chaque composant,
2. construire le graphique de contraintes pour le produit dans lequel on exprime les contraintes de trajectoire pour chaque composant, et
3. sélectionner les plans que ne violent pas les contraintes exprimées dans le graphique.

Le problème de cette approche est qu'elle ne peut gérer que des assemblages linéaires et monotones. De plus, cette approche ne peut pas non plus travailler avec des sous-assemblages.

1.2.1.4 Méthodes basées sur CAO

De nos jours, les systèmes de modélisation géométrique remplacent rapidement les techniques de dessin manuel. Ces systèmes deviennent de plus en plus puissants, au point qu'ils peuvent aujourd'hui servir à intégrer les travaux de conception et de planification de

l'assemblage. Les approches cherchant à générer des séquences d'assemblage d'un produit, à partir de la base de données d'un modèle CAO, ont pour objectif d'utiliser la base de données CAO pour définir les relations de précédence soit sur un format graphique ou sur des tableaux. À partir de la définition des relations de précédence, le système est capable de générer les séquences d'assemblage du produit.

Khosla et Mattikali (32) ont développé une méthodologie qui détermine la séquence d'assemblage d'un produit à partir de la description de l'assemblage extraite d'un système de modélisation solide du produit. La méthode commence avec la création des modèles géométriques des composants élémentaires. Cette création est faite par l'usager en utilisant les fonctions fournies par un système de modélisation 3-D intitulé NOODLES. La localisation et l'orientation des composants sont définies de façon interactive par l'usager qui utilise des opérateurs de mouvement et d'orientation fournis par NOODLES.

Après que les liaisons entre les composants ont été définies de manière automatique, l'information des contacts des composants est enregistrée dans le graphique des composants. L'ordre dans lequel les contacts ont été établis (la séquence d'assemblage) est déduit en faisant le désassemblage du produit. Finalement, un système de raisonnement définit une liste d'opérations de désassemblage à partir du modèle géométrique et cette liste est enregistrée comme un graphique AND/OR. Cet arbre représente la hiérarchie des composants et des sous-assemblages. Le système de raisonnement, celui qui génère la hiérarchie des composants, est relié à une procédure

répétitive de vérification des degrés de liberté pour chaque composant du modèle avec tous les calculs que cette procédure peut amener.

Hoffman (25) a développé une technique qui utilise la construction géométrique (CSG) de solides pour représenter les composants d'un produit. Cette représentation, liée aux positions relatives des composants dans leur état assemblé, permet à la méthodologie de l'auteur de définir des chemins de désassemblage pour les composants. Hoffman part de l'hypothèse que l'inverse d'une opération de désassemblage nous donne l'opération d'assemblage correspondante. Le processus de désassemblage d'un produit au moyen de cette approche est divisé en deux étapes :

1. La détection de collisions. Si les positions des composants sont connues, ce module fournit l'information sur les chemins que chaque composant peut suivre jusqu'à ce qu'il rencontre un autre composant.

2. La stratégie de recherche. Avec l'information fournie par la routine de détection de collisions, ce module trouve le meilleur chemin de désassemblage pour chaque composant jusqu'à ce que le processus de désassemblage soit terminé.

Le processus inverse donne la séquence d'assemblage du produit. La figure 1.3 montre comment fonctionne la méthode, lors du désassemblage d'un produit.

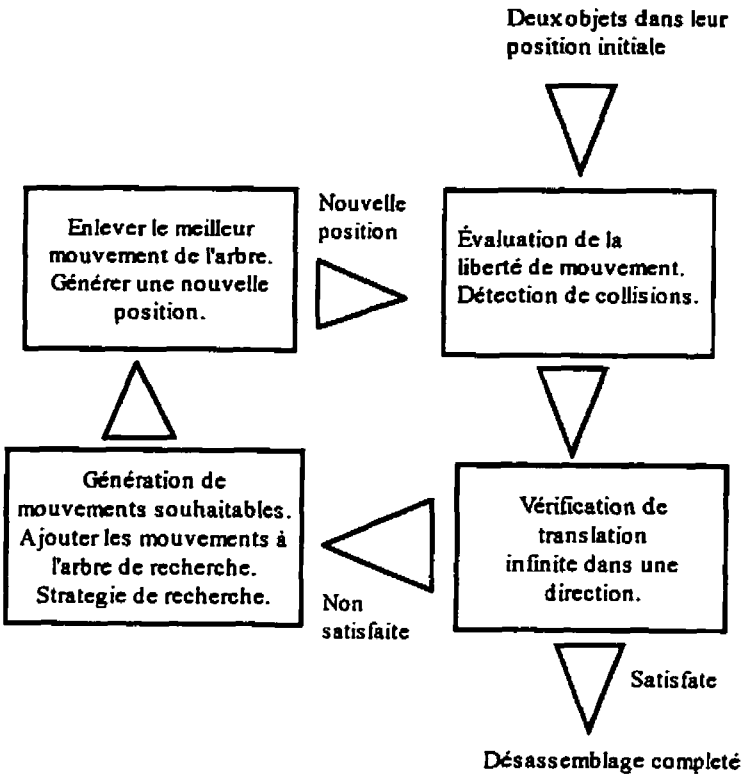


Figure 1.3 Méthode de désassemblage de Hoffman

Laperrière et ElMaraghy (37) ont développé un planificateur capable de générer des séquences pour l'assemblage robotisé. L'approche s'appuie sur une base de données qui représente les caractéristiques du produit. Cette base de données est créée de façon interactive avec le système de modélisation solide PADL-2. Les relations d'assemblage qui existent entre les composants sont modélisées interactivement dans des diagrammes relationnels. Les diagrammes relationnels, initial et final, décrivent respectivement l'état initial et l'état final de l'assemblage. La validité des connexions physiques définies dans le diagramme final est vérifiée par l'analyse de l'information de la base de données des

caractéristiques du produit. Pour faire cette analyse, on utilise des règles de validation préétablies. Le résultat est la génération automatique d'une séquence pour l'assemblage robotisé.

Gottipolu et Ghosh (20) présentent la suite d'un travail de recherche à partir de la modélisation d'un produit pour l'obtention de ses relations de précédence de manière automatique. Les chercheurs, dans cette approche, présentent d'abord la modélisation solide du produit créée dans le système de modélisation PADL-2. Dans ce même logiciel, les relations de précédence sont extraites en utilisant les fonctions du logiciel pour la détection d'interférence entre composants permettant d'identifier la présence de relations de contact entre eux et de définir les chemins sans collisions qui peuvent parcourir chaque composant. Ils obtiennent ainsi deux fonctions, la fonction contact et la fonction translation, qui sont des vecteurs à six entrées binaires (une entrée pour chaque demi-axe cartésien). Chaque paire de composants a une fonction contact et une fonction translation.

Une fois que toutes les fonctions ont été définies, l'approche utilise un algorithme de génération de séquences qui est capable de générer toutes les séquences faisables d'assemblage (séquences linéaires et séquences avec sous-assemblages) en utilisant le concept de couples additifs décrit par Ben-Arieh et Kramer (4) et l'algèbre booléenne, pour vérifier la faisabilité de l'assemblage. L'algorithme tient compte de deux types de contraintes: de connexité et de précédence. Les résultats sont montrés sur un graphique

appelé graphique de séquences d'assemblage (ASG), qui regroupe les meilleures caractéristiques du diagramme des états transitoires d'assemblage (ASTD), du graphique de séquences des liaisons développé par De Fazio et Whitney (14), et du graphique AND/OR, de Homem de Mello et Sanderson (28). Le graphique ASG est un graphique très compact et il est capable de montrer de façon explicite toutes les séquences d'assemblage qui ont été générées.

Enfin, des contraintes stratégiques sont imposées aux séquences afin de les trier et d'identifier quelques bonnes séquences. Ces séquences sont examinées en détail et de manière quantitative avec le logiciel *Design for Assembly Toolkit* de Boothroyd et Dewhurst, qui évalue le temps d'assemblage et le coût du produit pour chaque séquence. On choisit la séquence qui donne le temps et le coût minimaux.

1.2.1.5 Méthodes basées sur la modélisation mathématique

Jusqu'à maintenant, l'algorithme de *Traveling Salesman* est le seul modèle mathématique standard qui sert à la génération des séquences d'assemblage, mais d'autres chercheurs ont aussi essayé de générer la séquence optimale d'assemblage en utilisant la programmation dynamique.

Klein et Rhee (33) ont développé une approche qui a pour objectif l'évaluation des temps d'opération et la sélection de la séquence d'assemblage optimale. La méthodologie proposée commence avec l'analyse d'une vue explosée du produit et la détermination, de

la part de l'usager, des relations d'antériorité entre les composants et les contraintes géométriques existantes. Une fois que cette information est définie, la procédure continue avec les étapes suivantes :

- la division de l'assemblage en sous-assemblage,
- la création d'un graphique des contacts entre les composants,
- la mesure des temps d'opération d'assemblage,
- la définition de toutes les séquences nécessaires pour la création de la fonction de difficulté,
- la mesure du degré de difficulté des opérations, et
- l'utilisation de la programmation dynamique pour la sélection de la séquence optimale.

Ces chercheurs suggèrent l'utilisation de la programmation dynamique pour trouver la séquence avec le temps d'assemblage minimal, lorsque le produit analysé possède de trois à sept composants. Pour les produits avec plus de composants, ils suggèrent une méthode heuristique qui combine la programmation dynamique et la réduction du domaine de la fonction difficulté au moyen de l'imposition de contraintes. Plus la contrainte posée est rigide, plus le domaine de la fonction difficulté diminue. La procédure pour trouver la séquence optimale est utilisée sur chaque sous-assemblage défini. La séquence optimale définitive est le résultat de la combinaison des sous-assemblages.

Chen (11) propose une méthode pour la génération des séquences d'assemblage des produits avec un nombre élevé de composants. Cette méthode extrait les relations de précédence par une procédure dérivée du problème du *Traveling Salesman* avec des contraintes pour les états intermédiaires. Pour arriver à obtenir toutes les relations de précédence nécessaires, il faut répondre à une question pour chaque liaison.

Q : Si la liaison ℓ n'est pas faite, quelles liaisons combinées ne peuvent pas être faites et quelles liaisons combinées peut-on faire?

Évidemment, le nombre de questions est moindre que les questions requises dans les approches de Bourjault et de De Fazio. Cependant, chaque fois qu'on diminue le nombre de questions à poser pour définir les relations de précédence, les questions deviennent de plus en plus complexes et il est difficile d'y répondre pour l'usager, ce qui a pour effet d'augmenter la probabilité d'erreur.

Une fois que les relations de précédence ont été établies, elles sont représentées dans un graphique appelé l'arbre d'expansion des états et des espaces (*State Space Expansion Tree*). Dans cet arbre, chaque noeud est un état d'assemblage et l'application d'un opérateur sur celui-ci transforme cet état en un autre état d'assemblage plus avancé. L'inverse de chaque chemin de l'état final (produit assemblé) à l'état initial est une séquence d'assemblage. La recherche des chemins dans l'arbre d'expansion est faite par l'algorithme PM (*Pattern Matching Algorithm)*.

1.2.2 Classification basée sur l'approche de l'algorithme de génération de séquences

Les travaux classifiés dans la section précédente peuvent être regroupés en fonction de l'approche que les chercheurs utilisent lors de la création de l'algorithme de génération de séquences. L'approche utilisée peut être la génération de toutes les séquences d'assemblage faisables d'un point de vue géométrique et topologique ou le cheminement de la génération de séquences, de façon à éviter l'explosion combinatoire de résultats qu'amène la première approche. Le cheminement de la génération de séquences peut être fait par un moyen algorithmique qui tient seulement compte des caractéristiques des composants et leurs relations d'assemblage ou par le moyen de l'imposition de contraintes de procédure propres à l'environnement d'assemblage où le produit sera assemblé. Cette classification est indépendante de la méthodologie générale dans laquelle l'algorithme est utilisé.

1.2.2.1 Génération automatique de toutes les séquences d'assemblage faisables

Les travaux étudiés dans la section précédente confirment que des chercheurs qui basent leur travaux sur des approches différentes utilisent ce type de générateur de séquences. Parmi les plus importants, on y trouve :

- Bourjault (8), Klein (34) et De Fazio et Whitney (14), qui travaillent sur des diagrammes de liaisons,

- Homem de Mello et Sanderson (27), qui travaillent dans le cadre de la théorie de graphes,
- Ghosh (19), et Gottipolu et Ghosh (20), qui présentent une approche pour la génération automatique des séquences d'assemblage basée sur une représentation binaire des relations de précédence.

Tous les travaux de ces auteurs ont déjà été discutés dans la section précédente. Ici, cependant, on veut mettre en évidence le fait que même s'ils ont une façon différente d'aborder le problème de la planification de l'assemblage, leur générateur de séquences fonctionne sur le même principe, en tenant compte seulement des contraintes géométriques et topologiques lors de la génération, pour avoir la totalité de séquences d'assemblage. On introduit ensuite les autres types de contraintes dans le but de réduire le grand nombre de séquences générées (de l'ordre de quelques milliers).

Pour terminer la présentation des travaux des auteurs qui suivent cette approche, nous présentons un des derniers travaux de Bourjault, qu'il a effectué en collaboration avec Henrioud. Nous résumons aussi l'approche de Ben-Arieh et Kramer.

Henrioud et Bourjault (24) ajoutent, dans ce travail, des opérations propres du processus d'assemblage à la génération de séquences d'assemblage. Ils classifient les opérations en deux:

- les opérations dédiées (spécifiques au produit),
- les opérations de positionnement (spécifiques au processus d'assemblage).

Henrioud et Bourjault utilisent toujours un générateur de séquences basé uniquement sur des contraintes géométriques et topologiques pour générer ce qu'ils appellent des arbres d'assemblage. Les auteurs ajoutent cependant une deuxième étape dans la méthode afin d'imposer des contraintes et de pouvoir réduire les milliers de séquences générées.

Il est intéressant d'analyser l'évolution du travail de Bourjault puisque, dans cet article, il confirme que le grand problème n'est pas la génération des séquences d'assemblage, mais ce qu'il faut faire avec l'énorme quantité d'information générée par un algorithme contenant seulement des contraintes géométriques. La deuxième étape présentée dans cet article montre l'effort pour solutionner ce problème. D'abord, étant donné les caractéristiques propres de chaque assemblage, les chercheurs concluent que les contraintes autres que géométriques doivent être posées par du personnel qualifié et expérimenté. Ces auteurs analysent de façon approfondie le type de contraintes qu'il faut poser pour être plus près d'un système d'assemblage réel. Ils ont défini les contraintes suivantes:

- les contraintes de matériel,
- les contraintes de stabilité de l'assemblage dans ses états intermédiaires,
- les sous-assemblages souhaitables,
- les contraintes imposées par des groupes de composants qui peuvent être assemblés seulement dans une séquence (*stacks*),
- les contraintes imposées par des groupes de composants qui n'ont pas de relation de précédence entre eux (*layers*).

C'est seulement après cette étape d'imposition de contraintes que les auteurs présentent la liste des séquences d'assemblage valides. Finalement, les séquences résultantes sont vérifiées au moyen de la simulation.

Ben-Arieh et Kramer (4) utilisent la méthode qui consiste à trouver les séquences d'assemblage de façon directe, au contraire de la plupart de chercheurs qui utilisent la méthode de définition de séquences d'assemblage à partir du processus de désassemblage du produit. Une des caractéristiques principales de cette méthode est l'inclusion des sous-assemblages dans la génération automatique de toutes les séquences d'assemblage géométriquement faisables. La méthodologie utilise comme entrée les données suivantes:

- une liste de composants,
- une liste des relations des contacts entre les composants,

- une liste des contraintes de précédence,
- une liste de contraintes technologiques qui est faite lorsqu'il y a des composants avec plusieurs relations de contact valables.

La relation de précédence technologique est une relation de précédence qui recommande une séquence particulière d'assemblage, lorsqu'il y a plusieurs possibilités. Avec cette information, les diagrammes de séquences faisables par composant sont définis. Chaque diagramme a pour racine un composant du produit et on prolonge l'arbre avec un algorithme qui utilise les relations de contact. Évidemment, à chaque étape, les contraintes de précédence sont vérifiées. À la fin de cette étape, nous avons un arbre de séquences faisables pour chaque composant.

Dans la deuxième étape de la méthodologie, un module est chargé de générer les sous-assemblages qui peuvent être présents à chaque niveau de chaque arbre d'assemblage. La construction des sous-assemblages est automatique et est basée sur le concept de couples additifs. L'inclusion des sous-assemblages dans les arbres d'assemblage est aussi vérifiée avec les listes de contact, de précédence et de contraintes technologiques s'il y a lieu. À la fin de ces deux étapes, nous avons un arbre qui inclut les séquences d'assemblage faisables en ajoutant le sous-assemblage pour chaque composant. Ce qui est intéressant dans cette approche, c'est l'inclusion dans l'algorithme de génération de séquences d'une contrainte liée au processus d'assemblage qui recommande un chemin d'assemblage pour arriver à un certain état, lorsqu'il y a plusieurs choix.

Finalement, les auteurs ajoutent une dernière étape qui n'est pas automatique et qui a pour objectif de réduire le nombre de séquences faisables au moyen de contraintes qui sont liées au processus d'assemblage. Ces contraintes, qui répondent à des considérations pratiques de l'assemblage, varient selon le produit. Les chercheurs font référence à deux points :

- la disponibilité d'équipement d'assemblage, et
- la nécessité de supports de travail.

Nous avons voulu présenter en détail ces deux approches correspondant à ce groupe, parce qu'elles reflètent une évolution des premiers travaux destinés seulement à la génération automatique de séquences d'assemblage, la compréhension du problème de l'explosion combinatoire de résultats et la nécessité d'utiliser des contraintes non reliées au produit comme moyen de réduire le nombre des séquences à analyser. La planification de l'assemblage doit être faite en la dirigeant plutôt vers la façon de formaliser les contraintes technologiques ou de procédure afin de les intégrer à l'algorithme de génération et d'obtenir un nombre raisonnable de séquences d'assemblage valides, sans le risque de perdre la meilleure séquence pendant le processus de triage de l'algorithme.

1.2.2.2 Génération dirigée de séquences d'assemblage souhaitables

Dans le premier groupe, nous avons présenté deux travaux dans lesquels on constate déjà l'intérêt des chercheurs pour le problème que représente l'énorme quantité de

séquences d'assemblage automatiquement générées, si on tient seulement compte des caractéristiques des composants et de leurs relations. Dans le deuxième groupe, nous présentons les travaux des chercheurs qui ont essayé de résoudre le même problème, mais avec l'intégration de contraintes autres que celles du produit, intégrées dans la méthode de génération de séquences.

D'abord, un groupe de chercheurs, utilisant des approches qui s'appuient sur des bases de connaissances, travaille pour la génération d'une seule séquence d'assemblage qui puisse être utilisée dans un poste robotisé déjà spécifié. Donc, le travail est d'adapter l'assemblage d'un produit à un environnement déjà défini. C'est le cas des travaux de Huang et Lee (30), Occeña et Chin (47) Chen et Wichman (12), Sekiguchi et al (52) et Delchambre (17).

Il existe aussi un autre groupe qui travaille dans un autre contexte, mais avec le même objectif de trouver une séquence unique à être utilisée dans un poste déjà défini. Ces chercheurs basent leurs travaux sur des systèmes de modélisation CAO et le résultat est, dans la plupart des cas, dirigé vers la solution d'un problème d'assemblage robotisé. Dans ce groupe, nous avons étudié Laperrière et Elmaraghy (37), Khosla et Mattikali (32), Hoffman (25) et Wolter (61).

Finalement, parmi les groupes qui cherchent la génération d'une seule séquence d'assemblage, il existe un groupe qui utilise la modélisation mathématique pour la

génération de la séquence d'assemblage optimale. Parmi eux, nous avons étudié Klein (34), Chen (11) et Chang et Wee (10). Ces trois approches tentent d'obtenir une seule séquence d'assemblage par produit en fonction des caractéristiques des composants, de leurs relations et de la définition d'un poste d'assemblage particulier.

D'autres chercheurs étudient la génération des séquences d'assemblage de façon générale, sans la restriction d'un poste de travail déjà défini. Ceux-ci ne recherchent pas la génération d'une seule séquence, mais d'un groupe de séquences valides et souhaitables, obtenues par l'imposition systématique de contraintes propres du produit et/ou du processus d'assemblage, ou par la définition de sous-assemblages souhaitables avant de commencer la génération de séquences. Parmi les auteurs qui suivent cette approche, on peut citer Lee et Shin (40), que nous avons déjà étudiés dans une section précédente, Boneschanscher et Heemskerk (5) et Kroll (36).

Boneschanscher et Heemskerk (5) présentent une méthode qui regroupe des composants pour réduire la complexité de la planification des séquences d'assemblage. Ces groupes de composants sont appelés *Clusters* et ils nous permettent de travailler avec des composants fictifs qui représentent des groupes de composants. Cette action de grouper les composants permet aussi de générer les séquences par étapes avec des représentations moins complexes. Évidemment, on ne peut pas regrouper n'importe quel composant. C'est pour cette raison que les auteurs définissent d'abord ce qu'est un *cluster*.

Le *cluster* contient des composants qui partagent des caractéristiques d'assemblage leur permettant d'être assemblés comme un groupe, de façon logique. Le point sur lequel est basée la formation d'un *cluster* est que la séquence d'assemblage dans un groupe ne peut pas être interrompue par des composants qui ne font pas partie du groupe. Les *clusters* définis par les auteurs sont de trois types :

- *sorts* (classes),
- *stacks* (piles), et
- *layers* (couches).

Le *cluster* de type *sort* est un groupe de composants qui a une forme similaire ou identique, lesquels ont souvent les mêmes spécifications fonctionnelles. De manière normale, ces composants sont manipulés par un seul outil. L'idéal est donc que ces composants puissent s'assembler l'un après l'autre, mais il faut que la séquence d'assemblage de ces composants ne soit pas interrompue par un autre composant du produit. Le *cluster* de type *stack* est formé par des composants qui ont une seule séquence d'assemblage parce qu'ils doivent être assemblés de façon empilée. Le *cluster* de type *layer* est formé par un groupe de composants qui forment une couche entre deux autres composants. Les auteurs ont aussi développé un algorithme qui distingue les *clusters* de ces trois types. Une fois que les *clusters* sont détectés, le produit et ses *clusters* sont représentés par des diagrammes LAST-D (*Layered Assembly State Transition Diagram*) d'où les séquences sont obtenues.

Kroll (36) présente une procédure automatique pour la génération de séquences pour des produits qui ont une seule direction d'assemblage; même si l'approche est limitée, elle est intéressante. L'auteur part d'une description géométrique et topologique complète du produit avec laquelle une base de connaissance est générée. Une fois que cette base a été formée, la procédure est divisée en deux étapes :

1) la construction d'une vue explosée du produit avec des informations supplémentaires qui évitent les ambiguïtés, lors de l'interprétation des relations de contact (externes et internes) entre les composants. L'auteur utilise ce qu'il appelle des graphiques *Above* qui représentent chaque étape d'un assemblage linéaire d'une seule direction. Le graphique *Above* final est converti en une vue explosée du produit;

2) la génération de séquences d'assemblage à partir du graphique explosé du produit.

Pour cet auteur, la génération algorithmique de toutes les séquences d'assemblage théoriquement faisables par la combinaison des composants individuels et de leurs sous-assemblages n'est pas le moyen adéquat pour solutionner le problème de la planification des séquences d'assemblage. Il suggère que la solution de ce problème, pour ne pas provoquer une explosion combinatoire des résultats, doit être basée sur la formation de sous-assemblages. Kroll a développé un algorithme qui est capable de diviser le

graphique présentant le produit en vue explosée en sous-assemblages individuels qui accomplissent certains règles de base. Cet algorithme fonctionne de façon interactive pour générer les séquences souhaitables. L'usager doit introduire des contraintes s'il est possible de le faire. Les contraintes que Kroll suggère sont: l'accessibilité, la définition du premier composant de l'assemblage, du dernier composant de l'assemblage et même la difficulté de l'opération. Le résultat est la génération d'une séquence qui comporte des sous-assemblages indépendants et qui tient compte des contraintes d'ordre pratique.

On peut conclure, de la présentation que l'on vient de faire de certains travaux, que leurs auteurs sont d'accord sur le fait que, pour arriver à contrôler la génération des séquences d'assemblage, il est nécessaire de décomposer le produit final en groupes de composants qui puissent être analysés de façon indépendante. Chacun utilise différents chemins pour regrouper les composants, mais les objectifs sont très clairs:

- éviter l'explosion combinatoire de résultats qui est toujours amenée par la génération algorithmique des séquences,
- réduire la difficulté du triage postérieur qu'il faut effectuer lorsqu'on génère des séquences d'assemblage théoriquement faisables,
- diviser le produit en modules qui peuvent être assemblés de façon indépendante; de cette manière, on donne un certain degré de flexibilité au processus et on rend possible l'assemblage en parallèle,

- diriger l'assemblage vers des séquences souhaitables, mais sans perdre la meilleure séquence qui répond à nos besoins.

1.3 PLANIFICATION DE L'ASSEMBLAGE D'UNE FAMILLE DE PRODUITS

Pour terminer ce chapitre, nous avons cru nécessaire de discuter certains nouveaux travaux sur la génération de séquences d'assemblage pour une famille de produits. Depuis le premier travail de Bourjault sur la génération automatique de séquences d'assemblage pour des produits à modèle unique, les travaux de recherche se sont continués et l'on prenait toujours comme base d'analyse un produit à modèle unique. De nos jours, ce type de produit ne satisfait plus le marché, ce dernier a tendance aujourd'hui à exiger des produits d'une grande variété de modèles avec un cycle de vie très court. Ce changement dans le marché a créé un nouveau domaine de recherche: la planification de l'assemblage d'une famille de produits.

Djemel, Lutz et Bourjault (16) présentent une méthode pour la modélisation d'une famille de produits. Ils proposent l'utilisation des diagrammes génériques de liaisons combinés avec une représentation qui utilise la grammaire WEB (introduite par Pkaltz et Rosenfeld). Dans ce premier travail, le groupe de Bourjault donne des définitions de base pour des travaux postérieurs.

La famille de produits est définie comme un groupe de produits fabriqués dans la même entreprise et qui accomplissent les mêmes fonctions principales. Aussi, ces

chercheurs font une classification des composants des différents produits d'une famille sur la base de la fonction qu'a le composant. Cette classification est la suivante:

- les composants communs,
- les composants pseudo-variants,
- les composants variants,
- les composants optionnels.

Les composants communs forment le coeur de la famille de produits, et ils sont présents dans toutes les modèles du produit. Ces définitions, nous permettent de construire un graphique générique de liaisons dans lequel les noeuds représentent les composants et les lignes les relations entre eux. La grammaire WEB est utilisée pour représenter les changements de composants d'une famille à une autre.

Stadzisz et Henrioud (56) se basent sur les concepts définis par Djmel, Lutz et Bourjault, mais présentent comme contribution l'inclusion du concept de minimisation de la flexibilité requise, concept développé par Massip (44) dans son livre *La Fabrica flexible*. L'objectif du travail est d'introduire l'utilisation du facteur RF (*Required Flexibility*) comme l'un des critères principaux, lors de la conception d'une famille de produits et de leur système d'assemblage. La modélisation de la famille est toujours faite en utilisant la grammaire WEB et, pour la génération des plans d'assemblage, ces chercheurs utilisent une variation du logiciel LEGA adapté pour traiter des familles de

produits. L'algorithme prend comme donnée d'entrée la représentation de la famille et donne comme résultat le groupe de tous les plans génériques faisables, chacun présenté sur le format de la grammaire WEB.

Ce travail est le premier essai en vue de générer des séquences d'assemblage pour une famille de produits et, pour cette raison, il reste très théorique et utilisable seulement au niveau de la recherche. Sa contribution la plus importante est l'inclusion du concept de flexibilité minimale requise comme critère de conception d'une famille et de son système d'assemblage.

Stadzisz et Henrioud (57) parlent de la minimisation de la flexibilité requise pour l'assemblage d'une famille de produits et de la manière de la mesurer afin d'évaluer les différents plans d'assemblage générés pour cette famille. Ils partent de l'hypothèse que ni la demande d'un produit ni son cycle de vie ne justifient un système d'assemblage dédié. Donc, le système d'assemblage idéal est celui qui est commun pour toute la famille. Par contre, cette situation est rare. Normalement, la variabilité des produits d'une famille impose des différences dans le processus d'assemblage. Face à cette réalité, l'objectif du travail est de concevoir un système d'assemblage qui minimise les différences entre les ressources et procédures requises. Les étapes de la méthodologie présentée, pour la minimisation de la flexibilité nécessaire d'un système d'assemblage pour une famille de produits, sont les suivantes :

- La modélisation de la famille de produits. Les auteurs utilisent toujours la représentation de la famille de produits au moyen d'un graphique de liaisons générique et d'une description de chaque membre de la famille en utilisant la grammaire WEB. Jusqu'à ce jour, il semble que ce type de représentation est le plus recommandable au niveau de la recherche.

- La génération de séquences. Elle est faite au moyen du logiciel LEGA adapté pour l'analyse de familles de produits, comme les auteurs l'ont expliqué en (56).

- La minimisation de la flexibilité requise. Lorsqu'on développe un système d'assemblage multi-produit, il y a toujours un degré de flexibilité qu'il faut donner au système pour arriver à l'assemblage de toute la famille.

- L'évaluation de la RF est effectuée après la génération des plans d'assemblage au moyen d'une procédure itérative consistant en deux étapes:

  - l'évaluation de la RF qui est associée à chaque plan d'assemblage faisable,
  - la re-conception du plan en fonction du facteur RF.

À la fin du processus, le résultat est le plan de production pour une famille de produits avec le facteur RF plus petit, c'est-à-dire avec la flexibilité minimale requise pour

assembler tous les produits de la famille. La formule d'évaluation du facteur RF proposée est :

$$
\begin{aligned}
&RF(AP_i) = \\
&[\,RF\_Support(AP_i) \cdot \alpha_1\,] + \\
&[\,RF\_Prehension(AP_i) \cdot \alpha_2\,] + \\
&[\,RF\_Positionnement(AP_i) \cdot \alpha_3\,]
\end{aligned}
\tag{1.4}
$$

où:

$RF\_Support\,(AP_i)$ = la flexibilité requise dans les supports dans le plan d'assemblage i;

$RF\_Prehension\,(AP_i)$ = la flexibilité requise dans les manipulateurs de composants dans le plan d'assemblage i;

$RF\_Positionnement(AP_i)$ = la flexibilité requise pour le positionnement des composants dans le plan d'assemblage i,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ = les poids relatifs des trois tâches en fonction de l'investissement.

Comme on peut l'observer, ce travail est la suite du premier travail que Stadzisz et Henrioud avaient présenté. De plus, sa contribution consiste en la quantification du facteur RF, ce qui est très important pour des futurs travaux de maximisation de la productivité et de minimisation du coût dans les systèmes d'assemblage d'une famille de produits.

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux types de classification des travaux concernant la génération de séquences d'assemblage. La première classification nous

permis de donner une idée des approches les plus utilisées et de voir sur quelles bases elles ont été formées. La deuxième classification présentée nous montre comment les travaux sur la génération de séquences ont évolué, à partir de l'approche de la génération de toutes les séquences faisables jusqu'à plus récentes approches qui tentent de générer les séquences faisables et souhaitables, de façon à éviter l'explosion combinatoire de résultats qu'amène la première approche, et à obtenir des séquences dirigées vers des solutions qui peuvent être appliquées à notre réalité. La dernière partie du chapitre a été consacrée aux études des chercheurs concernant la planification de l'assemblage pour des familles de produits. Dans cette partie, nous avons constaté le niveau encore théorique de ce domaine, ce qui est normal étant donné la nouveauté du sujet.

Pour conclure, il faut dire que la plupart des travaux que nous avons étudiés ont pour but la génération automatique des séquences d'assemblage et laissent de côté l'information qu'un expert peut apporter au processus. Ce n'est que récemment que les chercheurs se sont rendu compte que le problème de la planification de séquences n'est pas la génération, mais la sélection des séquences générées. À partir de ce moment, les chercheurs ont commencé à inclure des heuristiques et des contraintes intégrées aux algorithmes de génération pour avoir, de cette manière, une certain contrôle sur les séquences qui sont générées.

CHAPITRE 2

OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

2.1 INTRODUCTION

L'analyse de la littérature existante sur la génération de plans d'assemblage démontre que la plupart de ces travaux sont très théoriques, et qu'ils traitent la génération de plans d'assemblage comme un problème strictement mathématique. Ce point de vue donne comme résultat des approches incomplètes, parfaites du côté mathématique, mais d'une utilisation pratique difficile. En effet, ces approches théoriques représentent un très bon point de départ, mais elles ne permettent que de gérer des produits très simples car elles ne considèrent pas les concepts de l'ingénierie de l'assemblage qui pourraient augmenter leur puissance. Dans l'approche proposée dans ce travail de recherche, le processus de génération de plans d'assemblage est intégré avec les approches propres au génie industriel de façon à pouvoir trouver des solutions aux problèmes réels d'assemblage posés par les produits complexes actuels.

2.2 OBJECTIF DE LA RECHERCHE

L'objectif global de ce travail est de donner aux équipes d'ingénierie un moyen de développer des plans d'assemblage pour des produits complexes d'une façon systématique, avec un effort raisonnable et dans un temps convenable. La méthode proposée empêche l'explosion combinatoire de résultats qui est commune dans la

génération de séquences d'assemblage. La méthode proposée utilise des outils informatiques interactifs pour aider l'usager dans les étapes où le calcul est lourd. Un usager qui connait bien le produit peut contribuer d'une façon efficace avec son expertise au développement de plans d'assemblage et il peut confier à l'ordinateur le soin de faire les calculs longs et laborieux.

2.3 MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

L'analyse de la littérature sur la génération de séquences d'assemblage présentée au chapitre 1 démontre la présence de lacunes dans les approches existantes. Le champ d'application de ces approches est académique et leur adaptation à un contexte industriel pratique est très difficile. Ces lacunes et l'expérience industrielle de l'auteur dans la génération manuelle de séquences d'assemblage pour produits complexes ont démontré qu'il fallait lier les approches théoriques avec les méthodes pratiques du génie industriel. Les problèmes que nous avons repérés dans les travaux actuels sont: la modélisation du produit sans tenir compte d'une structure d'assemblage pour laplanification d'un assemblage facile, l'explosion combinatoire de résultats, l'impossibilité d'analyser des produits contenant un nombre élevé de composants, et des relations complexes entre leurs composants. Pour arriver à résoudre ces problèmes, notre conclusion était d'harmoniser les concepts de la génération de séquences d'assemblage, la planification pour un assemblage facile, et l'intégration de la conception d'un produit avec celle du système d'assemblage selon les principes de l'ingénierie simultanée. Finalement, les travaux suivants ont été choisis comme la base de notre approche:

- l'approche de Ghosh (19) pour la modélisation des relations entre composants et pour la génération des séquences d'assemblage, cette sélection a été faite parce que l'approche s'adapte facilement à l'analyse de différents types de produits;
- le concept de Durand (18) sur l'existence d'une division hiérarchique dans la structure des systèmes complexes, puisque ce concept est très utile dans les analyses systémiques;
- l'approche d'Andreasen, Kähler et al (1) sur l'assemblage au moyen de blocs de construction (*building blocks*) pour arriver à la planification d'un assemblage facile;
- le concept de Masip (44) sur la conception de cellules d'assemblage pour des familles de produits;
- le logiciel d'évaluation économique de séquences d'assemblage de Boothroyd et Dewhurst (6).

Les concepts d'une structure hiérarchique dans les systèmes complexes et d'une méthode d'assemblage au moyen de blocs de construction forment la base de notre modélisation de la structure de l'assemblage. Ce type de modélisation est appelé «modularisation». Ce modèle effectue une division hiérarchique du produit en modules d'assemblage indépendants, ce que permet la distribution de la complexité de l'assemblage parmi les modules définis et l'analyse indépendante de l'assemblage de chaque module. Ces caractéristiques rendent possible l'analyse de produits complexes. De plus, la modularisation permet d'éviter l'explosion combinatoire de résultats.

L'approche de base de notre modèle de représentation des relations entre composants d'un produit est le modèle binaire de Ghosh. Pour povoir éliminer l'explosion combinatoire de résultats, ce modèle a été modifié de façon à l'adapter à un système d'assemblage modulaire plutôt que linéaire. Deuxièmement, le modèle initial a été adapté de façon à pouvoir représenter des composants qui suivent une trajectoire cartésienne ou une trajectoire cylindrique lors de leur assemblage. Un modèle avec ces caractéristiques est capable de représenter la plupart des produits industriels actuels. Troisièmement, des modules interactifs d'imposition de contraintes avant et après la génération de séquences ont été intégrés dans l'algorithme de Ghosh. De cette façon, l'usager peut éviter l'explosion combinatoire de résultats et guider la génération vers des séquences utiles.

L'évaluation quantitative des séquences est faite avec le logiciel de Boothoyrd et Dewhurst. Ce logiciel a été choisi parce que l'évaluation est faite de façon hiérarchique, ce qui s'adapte très bien à la structure d'assemblage modulaire. L'évaluation qualitative est utilisée comme un moyen de trier les séquences et d'arriver à choisir la séquence la plus convenable pour le produit, et cette étape est laissée comme une procédure manuelle. Cette approche est basée sur les travaux de Ben-Arieh (3), Laperrière et ElMaraghy (38) et l'expérience pratique de l'auteur

La validité de la méthodologie proposée est testée en réalisant l'analyse de trois produits différents. Le premier produit est un meuble qui sert de station de travail bureautique et qui est un produit modulaire par nature. Le deuxième produit analysé est

un alternateur, un produit susceptible d'être modularisé. Finalement, le troisième produit analysé est une turbine hydraulique composée de seize modèles différents, et ce cas représente une famille de produits susceptibles d'être modularisée. Ce produit est actuellement fabriqué dans une usine, et les temps d'assemblage, les opérations complémentaires, les contraintes technologiques et les contraintes de procédure sont réels.

2.4 APERÇU DE LA MÉTHODE PROPOSÉE

La méthodologie proposée pour la génération de séquences d'assemblage satisfait les contraintes géométriques et topologiques du produit ainsi que les contraintes technologiques et de procédure du processus d'assemblage. L'utilisation d'une méthode d'évaluation quantitative et qualitative permet de choisir la séquence d'assemblage la plus appropriée pour le produit analysé. Dans cette section, un aperçu de la méthode proposée est présenté.

2.4.1 Modélisation du produit

La modélisation proposée dans ce travail est divisée en deux étapes. La première étape, appelée la modularisation, a comme but l'encadrement de la modélisation du produit dans le concept de la planification pour un assemblage facile. La modularisation d'un produit permet de diviser le produit en modules indépendants et de façon hiérarchique, ce qui distribue la complexité de l'assemblage parmi les modules définis à différents niveaux. Dans la deuxième étape, les relations de contact et d'antériorité entre

les composants du produit sont définies. Cette partie de la modélisation est basée sur la représentation binaire de l'approche de Ghosh, qui est modifiée de façon à pouvoir gérer des composants qui suivent une trajectoire cylindrique lors de leur assemblage. Cette amélioration permet d'utiliser la méthode de façon plus générale, et dans l'analyse de produits plus complexes. De plus, pour maintenir la compatibilité entre les deux étapes de la modélisation, la représentation binaire des relations entre les composants est faite à l'intérieur de chaque module de produit (façon modulaire).

2.4.2 Génération des séquences d'assemblage

Cette étape de la méthodologie a comme but la définition des séquences d'assemblage pour produits complexes dans un temps raisonnable et en évitant l'explosion combinatoire de séquences d'assemblage résultantes. Pour atteindre cet objectif, un logiciel de génération de séquences d'assemblage est développé, qui travaille avec l'algorithme de Ghosh, adapté à l'assemblage modulaire. Étant donné la difficulté d'avoir à disposition un logiciel pour lier avec des systèmes de conception assistée par ordinateur (CAO), un module interactif est ajouté au programme de génération de séquences d'assemblage. Ce module permet à l'usager d'introduire facilement les données requises sur le produit analysé. De plus, l'usager peut imposer trois des plus communes contraintes de procédure, à savoir le composant initial, le composant final, et les liaisons qui sont capables de commencer l'assemblage. L'imposition de ces contraintes est faite avant le processus de génération de séquences. Finalement, après le module de génération de séquences d'assemblage, le programme inclut un module interactif d'imposition de

contraintes technologiques et de procédure. Ces contraintes sont plus spécifiques que celles imposées avant la génération. Le résultat est un groupe de séquences d'assemblage faisables et souhaitables qui satisfont toutes nos contraintes, et qui sont moins nombreuses, ce que permet une évaluation approfondie de chaque séquence.

2.4.3 Définition des séquences d'assemblage détaillées

Les séquences d'assemblage obtenues par moyen algorithmique présentent seulement les opérations de liaison des composants fonctionnels. Cependant, en réalité, l'assemblage d'un produit est un ensemble d'opérations de liaison et d'opérations complémentaires reliées aux liaisons fonctionnelles. Dans ce travail de recherche, il est proposé d'inclure les opérations complémentaires nécessaires dans chaque séquence générée, de façon à obtenir une représentation réelle de l'assemblage du produit, ce qui permet une évaluation exacte de chaque séquence générée.

2.4.4 Évaluation quantitative des séquences générées

La méthodologie proposée considère une première évaluation basée sur des critères quantitatifs mesurables. Les critères de base sont le temps et le coût d'assemblage. Chaque séquence détaillée est évaluée opération par opération. Si le résultat de l'évaluation est une seule séquence d'assemblage avec le coût et le temps d'assemblage minimaux, cette séquence sera celle qui sera choisie. L'évaluation quantitative des séquences d'assemblage est faite avec le logiciel DFMA de Boothroyd et Dewhurst(6).

2.4.5 Évaluation qualitative des séquences générées

Si, dans l'étape d'évaluation quantitative, plusieurs séquences donnent le même coût et temps minimaux, la méthodologie propose une évaluation qualitative. Cette évaluation est un processus itératif d'imposition de contraintes de procédure à chaque fois plus restrictives et basées sur des considérations plus spécifiques qui sont remarquées lors de l'analyse des séquences détaillées d'assemblage. La dernière contrainte à poser est le niveau de production requis. Cette contrainte servira finalement à identifier la séquence qui s'adapte le mieux aux besoins.

2.4.6 Définition de la cellule d'assemblage

En utilisant la modularisation initiale, la séquence choisie par chaque module et les différents outils de génie industriel, la méthodologie proposée permettra de définir les cellules d'assemblage qui s'adaptent le mieux au niveau de production visé. La définition des cellules et leur équilibrage seront faits en tenant compte d'une assignation de tâches d'assemblage complètes et d'une suite logique à chaque poste de travail. La modularisation fournit la flexibilité nécessaire pour grouper des modules dans une même poste d'assemblage ou pour définir des postes d'assemblage parallèles si les besoins de production ainsi l'exigent.

CHAPITRE 3

DÉFINITIONS

3.1 INTRODUCTION

La conception pour un assemblage facile, la génération automatique des séquences d'assemblage, la planification de l'assemblage avec l'aide des ordinateurs (Computer - Aided Assembly Planning : C.A.A.P.), etc., sont des concepts relativement nouveaux qui viennent enrichir le monde des sciences et de la gestion. Puisque ces concepts sont nouveaux, certains chercheurs se sont adaptés aux définitions existantes. D'autres chercheurs cependant ont dû proposer de nouvelles définitions pour expliquer leur approche.

Avant d'aborder de façon détaillée la modélisation de l'assemblage que l'on propose, la méthode de génération de séquences à utiliser, la représentation des séquences, leur évaluation, etc., nous avons cru bon d'ajouter ce chapitre de définitions, dans lequel nous tenterons d'exposer le plus clairement possible ce que représente pour nous un concept nouveau ou déjà connu. Pour les nouvelles définitions, nous donnons une explication très détaillée du concept que l'on veut exprimer. Ainsi, le lecteur sera déjà familiarisé avec l'expression lorsqu'il la rencontrera pendant la lecture. Pour les définitions déjà existantes, utilisées de façon générale et presque automatique dans la vie quotidienne, nous les avons précisées. De cette façon, nous nous assurons de transmettre clairement

chaque concept au lecteur, afin qu'il en ait une bonne compréhension dans le contexte de ce travail.

3.2 PRODUIT

Le produit consiste en un ensemble de composants, élémentaires et/ou modulaires, qui sont unis par différents moyens, jusqu'à devenir un système capable d'accomplir la ou les fonctions pour laquelle ou lesquelles il a été conçu. Le produit est avant tout une forme globale dans laquelle ses composants sont liés par un ensemble de relations.

Le produit possède des caractéristiques différentes de celles de ses composants. Cette notion de «qualités émergentes» conduit à une autre notion, celle d'une véritable hiérarchie dans un système ayant des caractéristiques de plus en plus complexes au fur et à mesure que l'on monte dans cette hiérarchie. Le degré de complexité d'un produit dépend à la fois du nombre de composants, du nombre et du type de relations qui lient ces composants dans un module et du nombre et du type de relations qui lient ces modules.

3.2.1 L'organisation hiérarchique dans un produit

Du point de vue physique, on peut dire que tout produit peut être décomposé de façon hiérarchique en sous-systèmes que nous appellerons ***modules***. Daniel Durand (18) a constaté que même si l'on fait une analyse fonctionnelle d'un système complexe (un produit par exemple), le fonctionnement est aussi de nature hiérarchique. En vérité,

l'organisation hiérarchique des composants d'un produit est ce qui donne une singularité à chaque produit. En se basant sur cette caractéristique de hiérarchie, on peut classer les produits en deux catégories:

- **Produit modulaire par nature**: Ce sont tous les produits qui peuvent être décomposés en modules, qui sont en général, faciles à détecter et ce, de façon logique.

- **Produit susceptible d'être modularisé** : Ce sont tous les produits qui ne présentent pas de modules à simple vue. Dans ce type de produit si l'on tient compte de considérations autres que physiques ou fonctionnelles, on arrive dans la plupart des cas à former des modules. Si un produit ne peut être décomposé en modules, il est appelé produit intégral ou linéaire.

L'organisation hiérarchique des produits est représentée dans la Figure 3.1 par un arbre où la racine est le produit et les feuilles sont les composants. Parmi les composants, on peut distinguer les composants modulaires, lesquels sont représentés par des rectangles, et les composants élémentaires fonctionnels, qui sont représentés par des entrées linéaires. Dans cette Figure 3.1, les composants modulaires ou élémentaires sont nommés par une lettre avec deux indices. Le premier indice représente le niveau auquel le composant appartient et le deuxième indice représente la position du composant à un certain niveau. Dans la pratique, on utilise plutôt les noms réels des composants. Dans

l'arbre de hiérarchie d'un produit, on ne représente pas les composants de fixation. Ces types de composants servent seulement à fixer les composants qui accomplissent une fonction dans le produit et, souvent, après avoir fait une analyse pour faciliter l'assemblage, ils peuvent être changés, modifiés ou encore éliminés.

Cette représentation du produit en forme d'arbre permet de s'assurer que l'on utilise la décomposition du produit à partir du niveau le plus complexe d'assemblage jusqu'au niveau élémentaire afin d'exprimer les relations existantes parmi les composants. De manière simplifiée, on peut dire que les produits sont formés par des modules et que les modules sont constitués par des composants élémentaires. En vérité, dans un arbre de hiérarchie, on trouvera des modules formés par d'autres modules combinés à des composants élémentaires. Même dans le niveau principal, on trouvera des modules et certains composants élémentaires nécessaires pour constituer le produit.

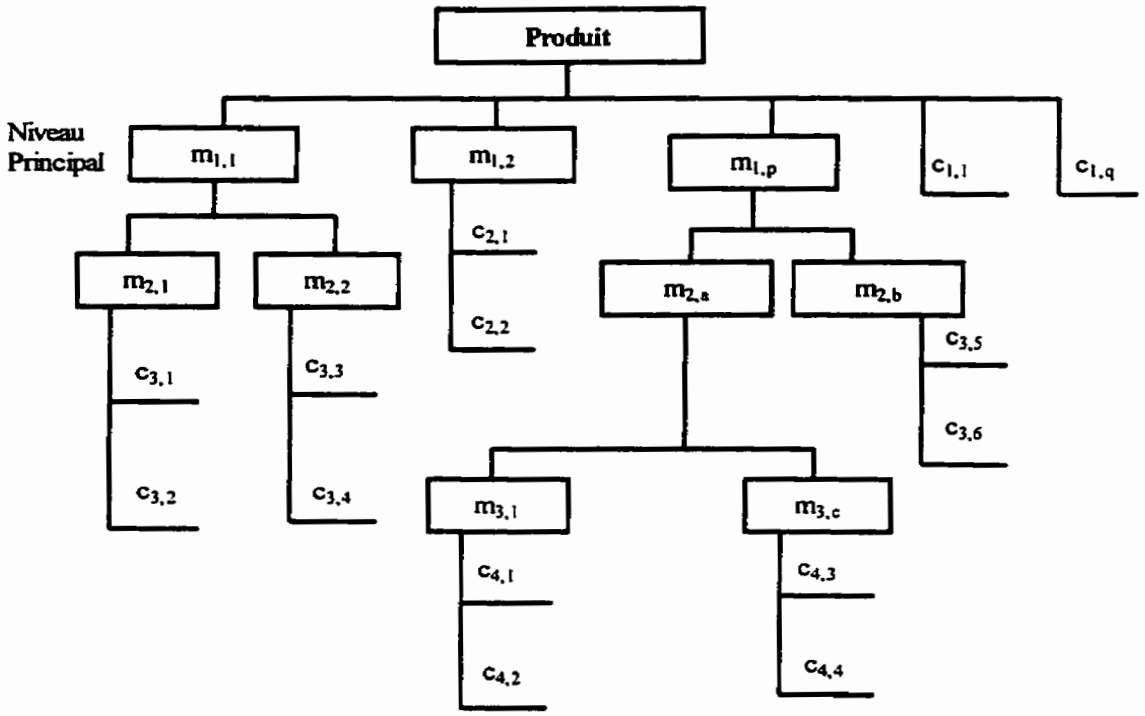


Figure 3.1 Organisation hiérarchique d'un produit

À la Figure 3.1, on peut aussi observer que, lorsqu'un module est assemblé, il devient un composant pour le niveau supérieur de la même branche. Évidement, lorsqu'un module devient un composant, il acquiert toutes les caractéristiques d'un composant.

Le nombre maximal de combinaisons possibles pour l'assemblage principal d'un produit est donné par:

$$\left(\sum_{i=1}^{p} \textbf{module}\,(1,i) + \sum_{k=1}^{q} \textbf{composant}\,(1,k)\right)! \qquad (3.1)$$

où

p = le nombre de modules dans le niveau d'assemblage n° 1 (niveau principal),

q = le nombre de composants élémentaires dans le niveau principal.

Le nombre de combinaisons possibles pour chaque module principal dépend de la quantité de modules intermédiaires nécessaires pour leur assemblage.

3.3 MODULE

Le module, comme le produit, est un ensemble de composants muni d'une organisation physique et fonctionnelle préétablie. Cette organisation va lui permettre de contribuer à augmenter le degré de complexité du module du niveau supérieur duquel il est composant, ou de servir de base à ce module plus complexe jusqu'à ce qu'il arrive au niveau de plus haute hiérarchie d'assemblage sur sa branche. Les modules finaux de chaque branche sont les modules les plus complexes du produit. Chacun contribue de façon directe à l'accomplissement de la ou des fonctions pour lesquelles le produit a été conçu. L'assemblage de modules de chaque branche est indépendant.

Dans son approche, Kroll (36) met en évidence que pour être considéré un module, le sous-assemblage formé par deux composants ou plus doit pouvoir être manipulé et même tourné à l'envers sans que ses composants tombent. De la même façon, aucun autre

composant ne peut être inséré dans le module, lorsqu'il est complet, avant qu'il monte de niveau de hiérarchie.

Bref, un module est assemblé de façon indépendante aux autres modules du même niveau et peut être emmagasiné et transporté de façon sécuritaire. Un module pourra recevoir d'autres composants seulement lorsqu'il monte de niveau dans l'arbre de hiérarchie d'assemblage.

3.3.1 Classification des modules

Il y a deux catégories de modules :

- les modules secondaires,
- les modules principaux.

3.3.1.1 Modules secondaires

Les modules secondaires sont évidemment ceux qui ne se trouvent pas dans le niveau principal. Le rôle de ce type de module est d'augmenter la complexité de la branche à laquelle il appartient dans l'arbre de hiérarchie, jusqu'à l'atteinte du niveau principal où le module principal de la branche est formé.

3.3.1.2 Modules principaux

Comme leur nom l'indique, les modules principaux sont ceux qui se trouvent dans le niveau principal. Ils sont le résultat de la somme de complexités ajoutées par chaque module secondaire d'une branche dans son niveau respectif. L'organisation hiérarchique des modules sur une même branche est représentée dans la Figure 3.2; cette organisation prend la même forme hiérarchique que lorsqu'on représente un produit. Donc, on utilise encore un arbre dans lequel les rectangles représentent les modules et les entrées linéaires des composants élémentaires. On continue à utiliser la même notation pour indiquer le niveau et le nombre des composants. De plus, il faut dire que, dans la pratique, on utilise plutôt les noms réels des composants. Toutes les autres considérations que nous avions définies pour l'arbre du produit sont valables pour l'arbre du module de la Figure 3.2.

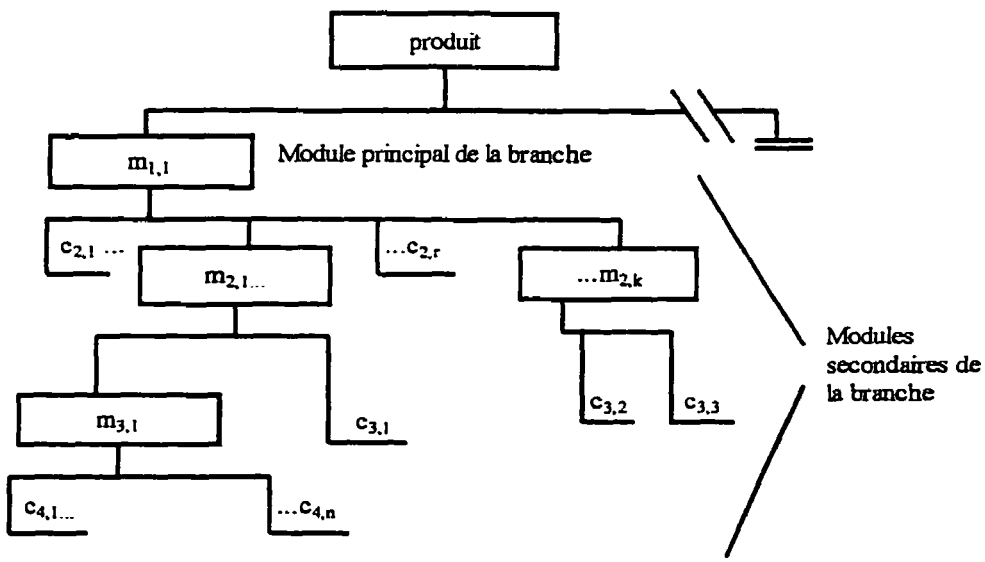


Figure 3.2 Organisation de modules sur une branche

Comme on le voit dans la Figure 3.2, à chaque niveau on peut trouver un nombre différent de modules secondaires et/ou de composants élémentaires sur une même branche. Par exemple, dans le niveau 2, on a «k» modules et «r» composants élémentaires. Le module principal de cette branche est la somme des composants modulaires et élémentaires assemblés d'une certain façon dans les niveaux précédents. Le principe est le même pour tout module qui appartient à l'arbre. Le nombre de composants d'un module dans un niveau «j» est donné par:

$$\mathbf{x}_j = \sum_{i=1}^{k} \mathbf{module}_{j,i} + \sum_{i=1}^{r} \mathbf{composant}_{j,i} \qquad (3.2)$$

où

X = le nombre de composants (modulaires et élémentaires),

j = le niveau dans l'arbre de hiérarchie où l'on fait l'analyse,

i = le nombre de composants, soit modulaires soit élémentaires dans le niveau j.

Le nombre de combinaisons maximales pour le module formé par les composants du niveau «j» est de **X(j)!**. Comme nous l'avons expliqué auparavant, ce nombre de combinaisons est réduit à cause de contraintes géométriques et de procédure. Le nombre de combinaisons pour chaque module du niveau principal est donné par la multiplication des combinaisons possibles, pour former leurs modules intermédiaires.

À titre d'exemple, si l'on prend le module $\mathbf{m}_{1,1}$ de la Figure 3.2, on obtient :

2! . 2! . 2! . 4! = 192 possibilités d'assemblage avec sept composants élémentaires comme base. Au contraire, si l'on utilise l'approche binaire, qui essaie de trouver toutes les relations possibles, on obtient pour la même situation : **7! = 5040** possibilités.

3.4 COMPOSANT

La définition la plus répandue du mot composant est celle de «constituant élémentaire d'une machine, d'un appareil, etc.», bref une partie élémentaire d'un produit. Évidemment, la définition d'un composant dans le contexte de l'assemblage d'un produit est plus complexe. C'est pour cette raison que, dans le présent travail, nous procédons à une analyse plus détaillée des composants, afin de bien préciser les définitions pour les différents types de composants que l'on reconnaît.

3.4.1 Classification des composants

Dans ce travail, nous reconnaissons trois types de classification des composants :

- la classification selon le niveau de complexité atteint dans l'arbre de hiérarchie du produit,
- la classification selon la fonction qu'accomplit le composant,
- la classification selon la trajectoire suivie par le composant pour être assemblé dans un module.

3.4.1.1 Classification selon le niveau de complexité atteint dans l'arbre de hiérarchie du produit

Dans cette classification, il y a deux catégories de composants :

1) les composants modulaires,
2) les composants élémentaires.

Un composant modulaire est un ensemble de composants élémentaires et modulaires, assemblés dans un niveau de hiérarchie donné, qui deviennent un composant pour un module plus complexe appartenant au niveau suivant de la même branche de l'arbre de hiérarchie du produit. Le concept est montré à la Figure 3.3 et à la Figure 3.4.

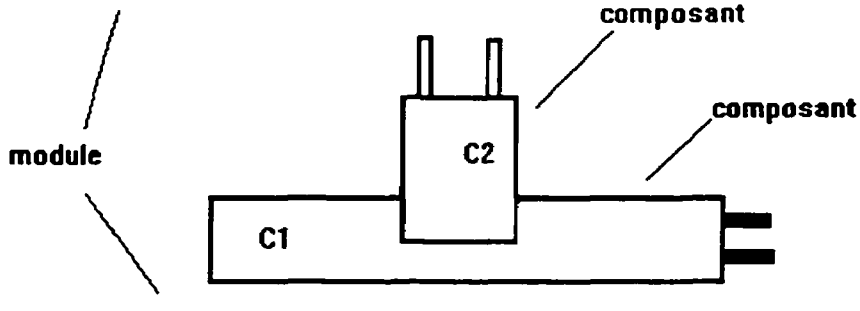


Figure 3.3 Pièce élémentaire comme composant

À la Figure 3.3, on a deux composants élémentaires qui sont assemblés de façon stable afin de former un module qui, dans notre cas, sera un composant modulaire d'un autre module plus complexe situé à un niveau de hiérarchie plus élevé dans l'arbre d'assemblage du produit.

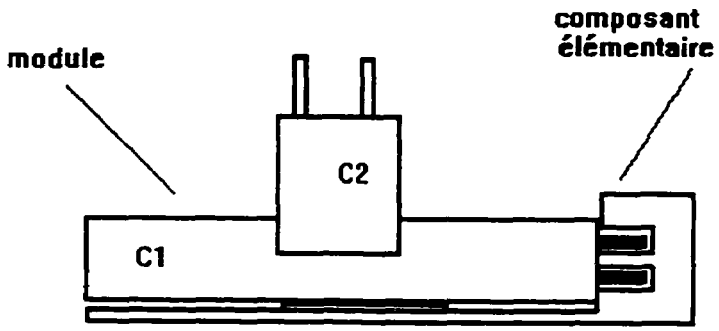


Figure 3.4 Module comme composant

Dans la Figure 3.4, on présente le module formé dans la Figure 3.3, mais dans son rôle de composant modulaire. Ce module est assemblé à un composant élémentaire, et ces deux composants, modulaire et élémentaire, forment un autre module plus complexe. De cette manière, on monte de niveau de hiérarchie d'assemblage jusqu'à ce qu'on arrive au niveau principal où se trouvent les modules plus complexes de chaque branche, prêts à être assemblés pour former le produit voulu.

Le composant élémentaire est défini dans le même sens qu'on lui donne habituellement: un constituant élémentaire d'un produit. Dans ce cas, il faut remarquer la différence entre composant élémentaire et élément. On parle d'un élément lorsqu'il fait partie d'un groupe de pièces parmi lesquelles on en choisira une pour l'assemblage. Au contraire, on parle de composant élémentaire lorsque l'élément a été déjà choisi et fait partie de l'ensemble. Pour bien comprendre la différence entre des éléments et des composants élémentaires, nous en montrons un exemple à la Figure 3.5.

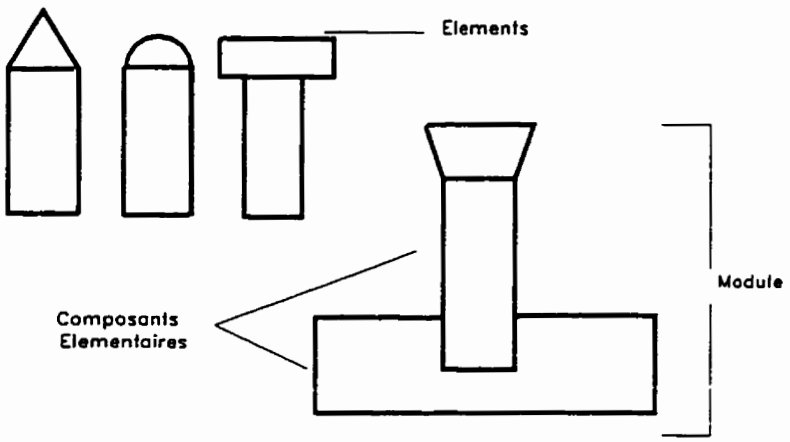


Figure 3.5 Éléments et composants élémentaires

Dans cet exemple, on représente un produit qui a quatre modèles différenciés par un seul composant. Nous avions un groupe de quatre éléments parmi lesquels nous en avons choisi un pour le modèle en cours d'assemblage. Lorsqu'on fait ce choix et qu'on assemble l'élément dans son module respectif, cet élément devient un composant élémentaire pour ce module. Le reste des pièces qui n'ont pas été pas choisies conservent

le statut d'éléments et deviendront des composants élémentaires pour les modules auxquels elles appartiennent.

3.4.1.2 Classification selon la fonction qu'accomplit le composant

Du point de vue de la fonctionnalité, les composants élémentaires peuvent être classifiés comme suit:

- les composants fonctionnels,
- les composants de fixation.

Les composants fonctionnels sont ceux qui donnent de la valeur aux produits (43). Les composants de fixation, au contraire, sont utilisés seulement pour tenir en place les composants fonctionnels. La division des composants, qui est due à leur fonction, est applicable seulement aux composants élémentaires, parce qu'un composant modulaire est fonctionnel par définition.

Finalement, on doit préciser que, dans certains cas, un composant élémentaire ou modulaire peut avoir des propriétés fonctionnelles et de fixation, par exemple, un arbre avec filetage (composant élémentaire) vissé à une hélice avec filetage (composant élémentaire), ou une carte électronique (composant modulaire) insérée à une autre carte plus complexe (composant modulaire). Dans ces cas, les composants sont considérés comme étant fonctionnels. La propriété de fixation est comprise dans la conception du

composant pour faciliter l'assemblage ou pour diminuer le nombre de composants de fixation.

3.4.1.3 Classification selon la trajectoire suivie par le composant pour être assemblé

Les composants sont classés de la façon suivante :

- le composant cartésien,
- le composant non cartésien.

Un composant cartésien est celui qui suit une trajectoire parallèle aux axes d'un repère cartésien de trois dimensions au moment d'être assemblé à un module. Pour être compatible avec le système de génération de séquences d'assemblage que nous allons utiliser, le sens et la direction des axes sont définis à la Figure 3.6 (21).

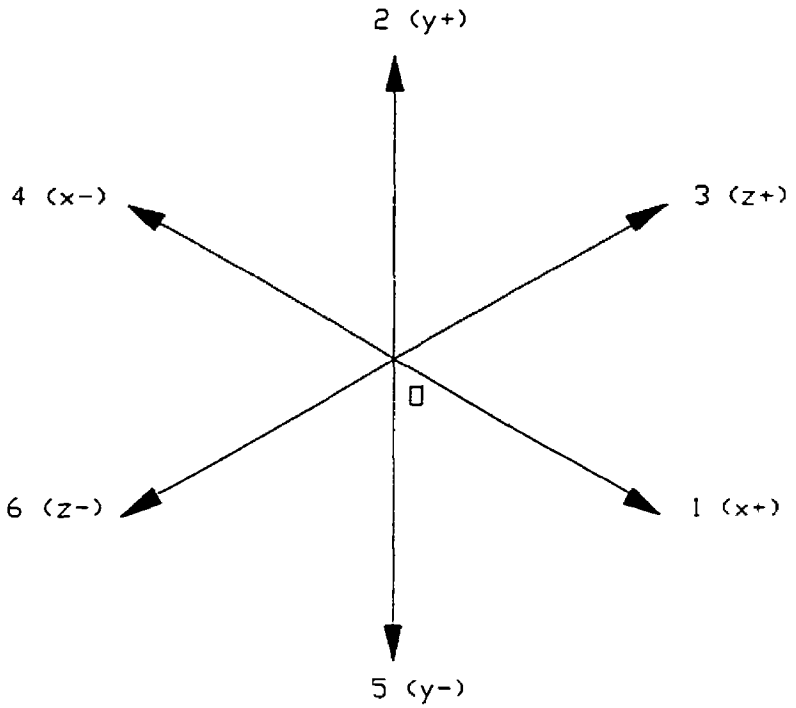


Figure 3.6 Système cartésien de trois dimensions

Dans cette figure, les directions 1, 2 et 3 représentent respectivement le sens positif des axes X, Y, et Z, (X+, Y+, Z+). De la même façon, les directions 4, 5 et 6 représentent le sens négatif des axes X, Y et Z, (X-, Y-, Z-).

Comme nous l'avons expliqué, tous les composants nommés cartésiens suivent une direction parallèle à l'un des axes cartésiens dans un repère à trois dimensions. Ils sont donc assemblés en suivant la direction X, Y ou Z. La Figure 3.7, nous montre l'exemple d'un assemblage dans lequel trois composants sont montés sur le composant élémentaire de base, suivant des trajectoires cartésiennes.

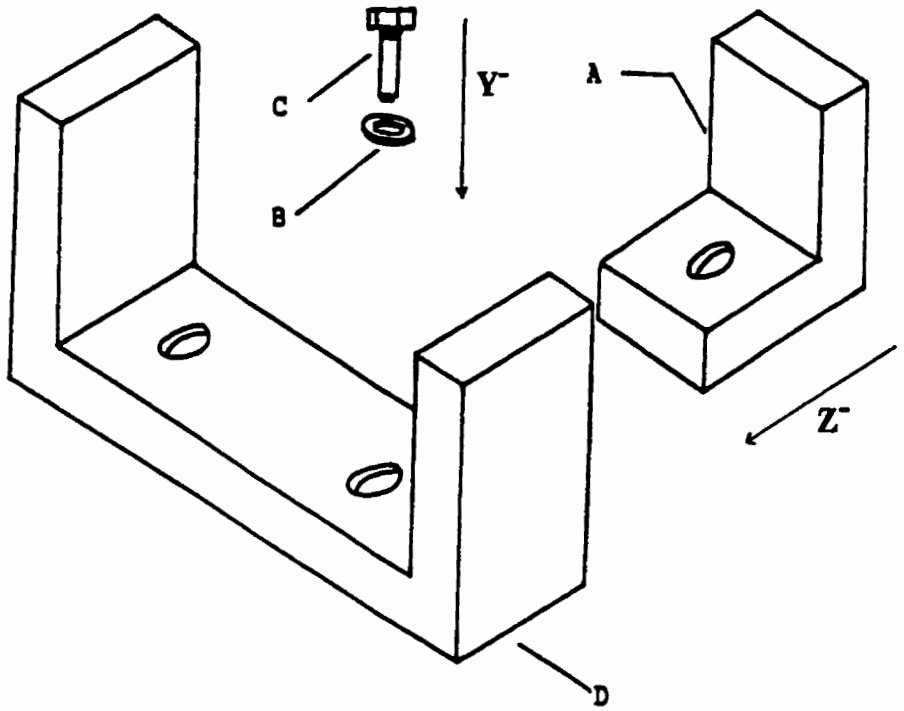


Figure 3.7 Assemblage des composants cartésiens dans un repère 3-D

Dans cette figure, l'assemblage des composants est fait en suivant une direction parallèle à l'un des axes cartésiens. Ainsi, si nous prenons le composant **A**, il est assemblé suivant une direction Z avec un sens négatif (Z-). De la même manière, les composants **B** et **C** sont assemblés suivant une direction Y avec un sens négatif (Y-).

Les composants non cartésiens sont ceux dont la direction d'assemblage forme un certain angle avec l'un des axes cartésiens. Dans ce travail, nous effectuons seulement

l'étude des composants non cartésiens qui suivent des trajectoires d'assemblage cadrées dans un repère cylindrique (trajectoire d'assemblage parallèle au plan X-Z). Nous avons constaté que les composants qui suivent des trajectoires d'assemblage définies dans un repère sphérique sont très rares. De plus, les concepteurs évitent de les utiliser parce qu'ils sont difficiles d'adapter à un système d'assemblage robotisé ou automatisé. La Figure 3.8 montre les types de composants non cartésiens qui sont considérés dans ce travail.

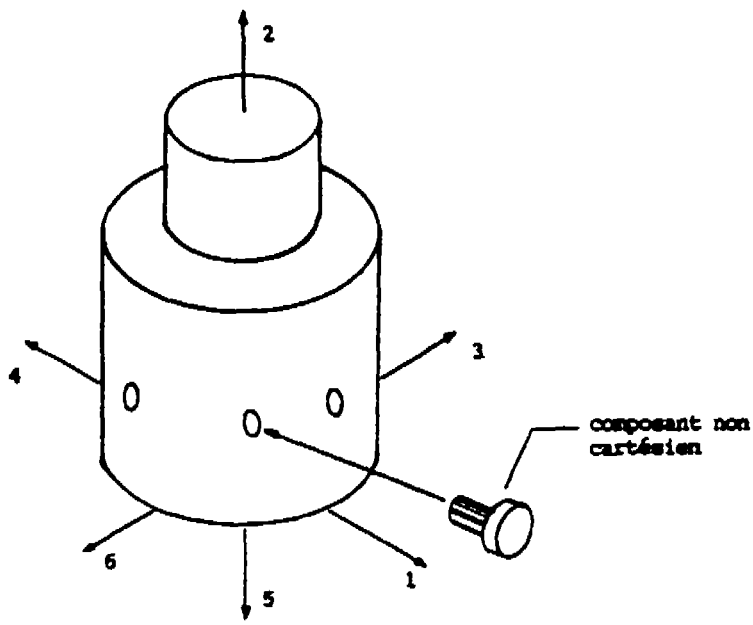


Figure 3.8 Trajectoire des composants non cartésiens

Dans cette figure, nous montrons des composants de fixation qui sont assemblés dans un composant modulaire suivant une trajectoire qui fait un angle α avec un des axes X ou

Z (sens 1, 3, 4 et 6). L'angle α peut être le même pour tous les composants non cartésiens ou peut être différent pour chaque composant.

Au contraire des composants cartésiens, la visualisation de l'angle que le composant forme avec l'un des axes est difficile à observer dans un système 3D. Pour solutionner ce problème, l'analyse des composants non cartésiens est faite sur un repère 2D, comme il est montré à la Figure 3.9.

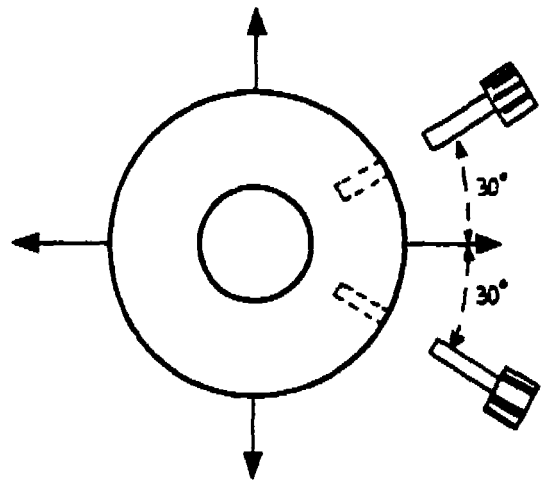


Figure 3.9 Composants cartésiens dans un repère 2D

Dans cette figure, on profite du parallélisme entre le plan X-Z et les trajectoires d'assemblage pour simplifier la visualisation en utilisant un repère 2D plutôt qu'un repère 3D. Comme on le verra dans le Chapitre 4, au moment de la modélisation de

l'assemblage, cette caractéristique de parallélisme et la possibilité d'utiliser un repère 2D dans l'analyse des composants non cartésiens seront d'une grande aide.

3.5 ASSEMBLAGE

L'assemblage est défini comme toute liaison d'un composant avec un autre composant. On prend la définition de liaison de Bourjault (8) pour sa flexibilité; une liaison peut définir toutes sortes de liens entre les composants que l'on va assembler. Évidemment, ce lien peut être physique, et d'ailleurs il l'est dans la plupart des cas. Cette flexibilité dans la définition de liaison permet de décider, cas par cas, ce qui constitue une liaison pour l'analyste, lorsqu'il définit un assemblage. De toute façon, si l'on encadre notre définition de liaison dans un contexte d'assemblage industriel, cette liaison inclut presque toujours une relation de contact physique entre les composants.

Homem de Mello et Sanderson (27) ont essayé de normaliser les types de contacts que l'on peut trouver dans un assemblage mécanique. Ils ont aussi développé un algorithme qui tient compte des contacts qu'il peut y avoir entre les surfaces suivantes :

- une surface plate avec une autre surface plate,
- une tige cylindrique et un trou cylindrique,
- une tige polyédrique et un trou polyédrique,
- une tige cylindrique filetée et un trou cylindrique fileté.

De la même façon, ces deux chercheurs ont essayé de définir les types d'attachement que l'on peut trouver dans un assemblage mécanique. La liste qu'ils ont obtenue est la suivante:

- fixation par collage,
- fixation par pression,
- fixation par brides,
- fixation par visage (vis/boulon - écrou).

On peut certainement trouver d'autres moyens de fixation comme la soudure, l'agrafage, etc. Un travail comme celui-ci est intéressant puisqu'il essaie de normaliser les opérations de fixation. Cependant, une expérimentation plus poussée est nécessaire pour donner une application industrielle à cette approche.

Si l'on approfondit le concept d'assemblage, on peut remarquer qu'il est formé par deux actions: l'action de positionnement, dans laquelle un composant est acheminé et placé juste à l'endroit où il sera fixé (pour accomplir cette action, il faut respecter les contraintes géométriques et topologiques des composants), et l'action de fixation, dans laquelle un composant est attaché à un autre de façon stable et permanente au moins jusqu'à la fin de l'assemblage du produit. Dans l'action de fixation, on utilise de l'énergie.

3.6 PROCÉDURE D'ASSEMBLAGE

Dans le cadre de ce travail, la procédure d'assemblage et définie comme la méthode que l'on utilise pour assembler les composants d'un produit. Il est important de souligner

la définition de la procédure d'assemblage et de la différencier de celle de système d'assemblage, laquelle fait plutôt référence aux ressources que l'on va utiliser pour faire l'assemblage (humain, robots, machines dédiées, etc.).

3.6.1 Assemblage linéaire

On dit qu'un assemblage est linéaire lorsque chaque composant est lié à un autre de façon séquentielle jusqu'à atteindre le produit final. Pour pouvoir utiliser cette structure d'assemblage de manière productive, il faut que le produit ait les caractéristiques suivantes:

- être formé par un seul module,
- le module doit être fait seulement de composants élémentaires.

Il est très difficile de trouver un produit avec ces caractéristiques, surtout aujourd'hui, car les produits sont de plus en plus complexes. L'assemblage linéaire de façon manuelle est possible pour beaucoup de produits, mais il devient de plus en plus coûteux au fur et à mesure que le nombre de composants, leurs relations et la complexité de ces relations augmentent. Le travailleur prendra plus de temps pour assembler un produit en fonction des facteurs ci-dessus.

L'assemblage linéaire d'un produit qui contient plus d'un module amène beaucoup de difficulté ou l'impossibilité de vérifier l'état du produit pendant le processus. De plus, si

l'on fait tout l'assemblage d'un produit polymodulaire sur une même ligne, on perd presque tout degré de flexibilité. Pour illustrer ce concept, on va utiliser l'exemple du stylo que Bourjault utilise pour expliquer son approche (8), (9). Ce stylo n'est pas très complexe, mais par contre, il contient un module qu'on appelle **le rechange**. Une des séquences linéaires possibles est montrée dans la Figure 3.10

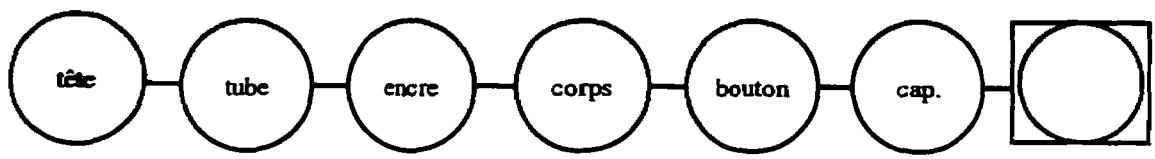


Figure 3.10 Séquence d'assemblage linéaire pour un stylo à bille

Cette méthode d'assemblage rend plus difficile la production d'une famille de stylos différenciés par leur couleur d'encre. De plus, le contrôle de la qualité de l'assemblage peut être fait seulement lorsque le produit est fini. Si le produit est défectueux, il faut refaire tout l'assemblage. L'assemblage linéaire est conseillé dans les niveaux les plus bas de la hiérarchie d'assemblage d'un produit, afin de former les premiers modules de base, et dans le niveau le plus élevé, pour assembler les modules principaux.

3.6.2. Assemblage modulaire

On dit qu'un assemblage est modulaire lorsqu'on assemble des modules qui augmentent de plus en plus en complexité au fur et à mesure qu'ils montent dans l'arbre

de hiérarchie, laissant l'assemblage linéaire pour les niveaux où l'on forme les modules de base. Une structure de ce type permet l'assemblage de familles de produits de façon aléatoire, ainsi qu'une réponse plus rapide aux fluctuations du marché et un contrôle de qualité efficace. Pour le même cas du stylo, l'une des séquences d'assemblage modularisé serait celle qui est montrée à la Figure 3.11.

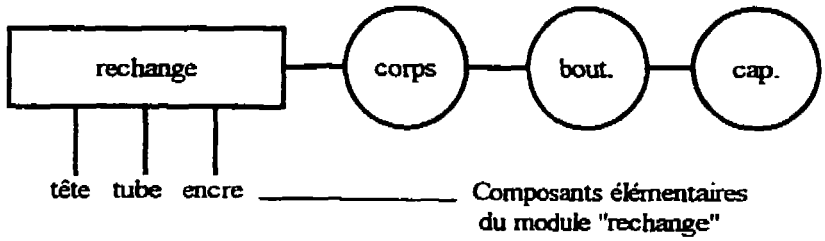


Figure 3.11 Séquence d'assemblage modulaire pour un stylo à bille

Avec une structure d'assemblage comme celle qui est montrée dans cette figure, on peut former des stocks de rechanges de différentes couleurs. On peut aussi inspecter les rechanges avant qu'ils entrent dans la partie linéaire de l'assemblage final.

Lors de l'assemblage modulaire, on fait des assemblages linéaires à chaque niveau de hiérarchie pour obtenir des modules qui vont monter sur leur branche respective jusqu'à atteindre leur module principal. Finalement, les modules principaux sont aussi assemblés de façon linéaire. Pour mieux en exprimer l'idée, on peut faire une analogie avec les

procédures de programmation dans le domaine de l'informatique. Nous pouvons effectuer la programmation soit de façon linéaire, soit de façon modulaire.

Dans le premier cas, la complexité est très élevée et elle croît en fonction du nombre d'énoncés et des relations qui existent entre eux. Même si l'on veut vérifier seulement une partie du programme, on doit malheureusement procéder à la vérification du programme au complet. Si le degré de complexité du programme est important, il ne sera pas possible de le vérifier. De plus, si l'on veut modifier le programme, il sera plus facile de tout refaire le programme.

D'un autre côté, avec la programmation modularisée, on programme par module et la complexité est répartie parmi les différents modules. On peut vérifier chaque module séparément, selon ce qu'on veut vérifier. Si l'on a besoin de changer une caractéristique, il suffit de faire le changement seulement dans le ou les modules impliqués et non dans tout le programme. Les même règles sont valides pour l'assemblage, dans lequel les énoncés sont substitués par des composants et le programme par le produit final.

CHAPITRE 4

MÉTHODE PROPOSÉE POUR LA MODÉLISATION DE L'ASSEMBLAGE

4.1 INTRODUCTION

Dans le Chapitre 3, nous avons défini l'assemblage comme étant un système de composants unis par des liaisons. Une liaison est faisable seulement si elle satisfait les contraintes géométriques et topologiques imposées par les composants impliqués. L'abstraction que l'on fait de l'assemblage doit alors tenir compte des contacts qui existent entre les composants dans un contexte 3D et les chemins que chaque composant doit parcourir pour arriver à faire les liaisons définies. L'efficacité avec laquelle on peut analyser un assemblage dépend du modèle avec lequel on le représente. C'est pour cette raison qu'il est important de comprendre la nature des dépendances qui existent entre les composants d'un produit avant de commencer la modélisation.

4.2 APPROCHES POUR LA MODÉLISATION DE L'ASSEMBLAGE

L'objectif de cette section n'est pas de donner une explication détaillée des différentes approches qui existent dans le domaine de la modélisation de l'assemblage. Par contre, il est pertinent de résumer brièvement les trois approches les plus connues.

4.2.1 Représentation par langage

Dans cette approche, on utilise une représentation basée sur des langages. Elle est orientée vers la représentation des composants d'un produit ainsi que sur les opérations nécessaires pour l'assembler. Les langages les plus représentatifs de cette approche sont AUTOPASS (42) et GDP (60).

4.2.2. Représentation graphique

Dans cette approche, on utilise des représentations graphiques avec l'intention de s'en servir pour l'analyse de l'assemblage et la dérivation d'information plus détaillée. On s'occupe plus de la procédure d'assemblage que des propriétés des composants ou des détails des opérations d'assemblage. Parmi les représentations graphiques les plus connues, on peut nommer :

- les graphiques AND/OR de Hommen de Mello et Sanderson (27), (28), (29),
- les graphiques basés sur l'extraction de sous-assemblages de Lee and Shin (40),
- les diagrammes de liaisons de Bourjault (8), et De Fazio et Whitney (14),
- les diagrammes de précédence de Prenting et Bataglin (49),et
- les graphiques avec contraintes d'assemblage de Wolter (61).

Toutes les représentations schématiques extraient usuellement leur information d'une source de plus bas niveau comme les bases de données CAD ou de l'information fournie directement par l'usager.

4.2.3 Base de données intelligentes

Ce type de représentation a comme objectif une analyse intelligente de l'assemblage. La structure de données est conçue de façon spéciale pour avoir une vision plus compréhensible de l'assemblage, et pour donner aussi de l'information supplémentaire sur les composants du produit et sur la manière dont ils sont liés dans l'assemblage. Lee et Gossard (41) utilisent une représentation hiérarchique et structurée des données, laquelle inclut ce qu'ils appellent les ***liens virtuels*** «virtual links» qui sont des entités entre toute paire de composants qui ont au moins un contact. Chaque lien virtuel contient toute l'information du ou des contacts et les degrés de liberté du mouvement relatif que présente la paire de composants en question. Cette approche a évolué de façon à inclure chaque fois plus de conditions de contact entre les surfaces. Rocheleau et Lee (50) suggèrent aussi d'ajouter des conditions de contact comme les ajustages sphériques, et les fixations par vis. Ils parlent aussi de contacts de type engrenage, et de contacts de type pignon et crémaillère.

Pour sa part, Turner (59) classifie sa structure de données en utilisant deux opérations de position :

a) contact entre deux plans + attachement,

b) contact coaxial + attachement.

Chacun des contacts peut fonctionner comme une contrainte de six degrés de liberté. Finalement, on peut citer des auteurs comme Morris et Hayes (45) qui décrivent jusqu'à vingt types de contact différents.

4.3 PROBLÈMES DES APPROCHES ACTUELLES

Dans la section précédente, nous avons donné un résumé des approches principales qui existent dans le domaine de la modélisation de l'assemblage. À la suite de la lecture des travaux des auteurs cités, nous concluons que toutes les approches ont été élaborées d'un point de vue théorique, chacune avec ses points forts et faibles et des objectifs différents.

L'omission la plus visible que l'on constate, c'est qu'aucune de ces travaux ne tiennent compte du problème de l'assemblage dans un contexte pratique d'ingénierie, comme la conception pour un assemblage facile (Design for Ease of Assembly) ou l'ingénierie simultanée. Tous les auteurs font la modélisation de l'assemblage de façon à ce que le modèle résultant serve à analyser les séquences possibles d'assemblage, mais dans le but de trouver une solution à un problème théorique. Ils n'envisagent pas de relier leur recherche à des concepts propres de l'ingénierie comme ceux que nous avons

nommés et à chercher des solutions à des problèmes réels qui sont présents dans le domaine de l'ingénierie.

Ce mur qui sépare ces deux sources de recherche empêche de trouver une solution intégrale qui soit pratique pour faire face aux problèmes d'assemblage des produits industriels. Dans tous les articles où l'on parle de la modélisation de l'assemblage d'un point de vue théorique, on fait toujours référence à des produits de 10 à 12 composants au maximum et avec des relations fonctionnelles simples. Au contraire, dans l'industrie, la plupart des produits sont plus complexes, avec une grande variété de modèles et ils comptent facilement 20 composants ou plus, avec des relations aussi complexes. Jusqu'à ce jour, il n'existe pas encore de modèle basé purement sur les mathématiques et qui puisse analyser les séquences d'assemblage d'un produit industriel complexe dans un temps raisonnable, un coût convenable et encore moins de façon entièrement automatique.

Dans l'approche que nous proposons, nous essayons de créer un pont entre les approches entièrement théoriques et les approches propres à l'ingénierie industrielle, de façon à pouvoir trouver des solutions aux problèmes réels d'assemblage que nous posent les produits complexes actuels.

4.4 CONCEPTION POUR UN ASSEMBLAGE FACILE

Il y a deux principes de base desquels l'équipe de conception doit tenir compte, lors de la conception d'un produit:

1) la structure du produit doit être simple; un produit ayant moins de composants nécessite moins d'opérations d'assemblage;
2) la conception doit être claire et précise de façon à ce que l'assemblage et d'éventuels ajustements puissent être faits sans ambiguïté.

Selon Andreasen et al. (1), lorsque l'équipe de conception définit la structure d'un produit et la nécessité des composants détachés, il doit tenir compte des points suivants:

1) les degrés de liberté nécessaires des composants,
2) si les composants en question doivent être faits en matériels différents,
3) les considérations de production; par exemple, il est parfois plus facile de faire la production par morceau, les morceaux étant ensuite assemblés,
4) la maintenance; le composant doit être conçu de façon à pouvoir être enlevé en cas de nécessité de maintenance du produit principal,
5) les conditions particulières de fonctionnement; un composant peut requérir un degré élevé d'accessibilité ou de facilité d'inspection, etc., qui crée la nécessité d'avoir des composants indépendants,

6) la considération de la conception, de l'esthétique, etc.

Les critères que nous avons énumérés s'appliquent à tout type d'assemblage. Si l'on concentre notre étude sur les produits complexes, on doit tenir compte de la nécessité d'un assemblage structuré par modules indépendants. De plus, ces modules deviennent la clé d'un assemblage facile, point sur lequel plusieurs auteurs, comme Andreasen et al. (1) et Kroll (36), sont d'accord.

4.4.1 Assemblage modulaire

Entre des chercheurs reliés à l'industrie, comme Andreasen et al (1), Nevins et Whitney (46), et d'autres comme Durand (18), qui étudient les systèmes complexes d'un point de vue systémique, on peut trouver des liens existant entre l'approche purement théorique de la génération des séquences d'assemblage et celle de la conception pour un assemblage facile, proposée par l'ingénierie simultanée. Tous les auteurs cités auparavant sont d'accord sur le fait que pour pouvoir réussir à bien comprendre un produit complexe, il faut d'abord diviser le produit en modules principaux: «building blocks» pour Andreasen, sous-systèmes pour Durand, «major modules» pour Nevins et Whitney. Il faut ensuite descendre de manière hiérarchique afin de former des modules de moins en moins complexes. Évidemment, la définition de modules dépend aussi d'autres considérations, comme ce que l'on va assembler et ce que l'on va acheter, ou encore des variations qui vont différencier les modèles d'un produit. Bref, les facteurs reliés à la fonction du produit ainsi que ceux reliés à la facilité de l'assemblage ou à sa flexibilité

vont influencer la décision d'accepter ou non un module comme tel. Finalement, il faut remarquer que plus un produit est complexe, plus il est facile à modulariser.

La division d'un produit en modules donne des avantages dont on peut en énumérer quelques-uns.

1) La diminution de la complexité de l'assemblage; étant donné que l'on divise un produit complexe en modules chaque fois moins complexes, selon leur niveau dans la hiérarchie d'assemblage, les tâches d'assemblage deviennent plus faciles.

2) Nous avons la possibilité d'accroître la flexibilité du systèmed'assemblage selon nos besoins, soit avec des postes variables, soit avec des postes d'assemblage en parallèle.

3) Le contrôle de la qualité de l'assemblage à plusieurs niveaux devient possible, puisqu'on peut vérifier les modules d'un produit avant qu'ils soient assemblés dans le niveau suivant de la hiérarchie.

4) On peut utiliser des algorithmes pour la génération des séquences d'assemblage dans chaque module et sur les composants (modulaires ou élémentaires) du niveau principal. Cet avantage permet d'analyser les

relations qui existent entre les composants des modules de chaque branche de l'arbre de hiérarchie et ensuite de relationner les modules sur le niveau plus élevé de l'arbre. Grâce à la modularisation, il est possible de gérer une grande quantité de composants avec des relations complexes. Cette façon de travailler permet l'utilisation des algorithmes de génération de séquences sur des produits industriels complexes.

4.5 MÉTHODE PROPOSÉE POUR LA MODULARISATION SELON LE TYPE DE PRODUIT ANALYSÉ

Avant de modulariser un produit, il est nécessaire de vérifier de quelle sorte de produit il s'agit. On peut classer les produits du point de vue de leur modularisation en trois catégories expliquées ci-dessous.

4.5.1 Produits modulaires par nature

Ces produits sont facilement modularisables, et il n'y a pas de problème pour identifier ses modules à la première analyse. La caractéristique principale de ce type de produit est que leurs modules sont liés entre eux seulement par des composants de fixation (vis, colle, goupilles, brides, etc.), et que chaque module principal accomplit une fonction propre sans interaction des autres modules une fois que le produit est complet. Alors, pour modulariser l'assemblage de ce type de produit, il suffit de détacher chaque module de ses composants de fixation pour avoir les modules principaux qui nous servirons de base pour bâtir chaque branche de l'arbre de hiérarchie de l'assemblage et

ce, au fur et à mesure que l'on divise ces modules principaux en modules chaque fois moins complexes. Un produit modulaire par nature serait, par exemple, une station de travail bureautique (voir Figure 9.1). Cette station comprend une table, une étagère sur la table, un petit meuble pour l'imprimante et une tablette d'union entre la table et le meuble pour l'imprimante. Cette tablette fait tourner le meuble d'imprimante de 90° par rapport la table et rend ainsi plus facile le travail de l'usager. Les modules principaux de ce produit seraient bien sûr la table, l'étagère et le meuble à imprimante. Comme nous l'avons dit dans sa définition, chaque module principal de ce type de produit accomplit une fonction spécifique par lui-même. Si l'on modularise le produit décrit, son arbre de hiérarchie ressemblerait à celui présenté à la Figure 4.1. Dans le Chapitre 9, nous reviendront à l'analyse de la station de travail bureautique, laquelle est faite en détail.

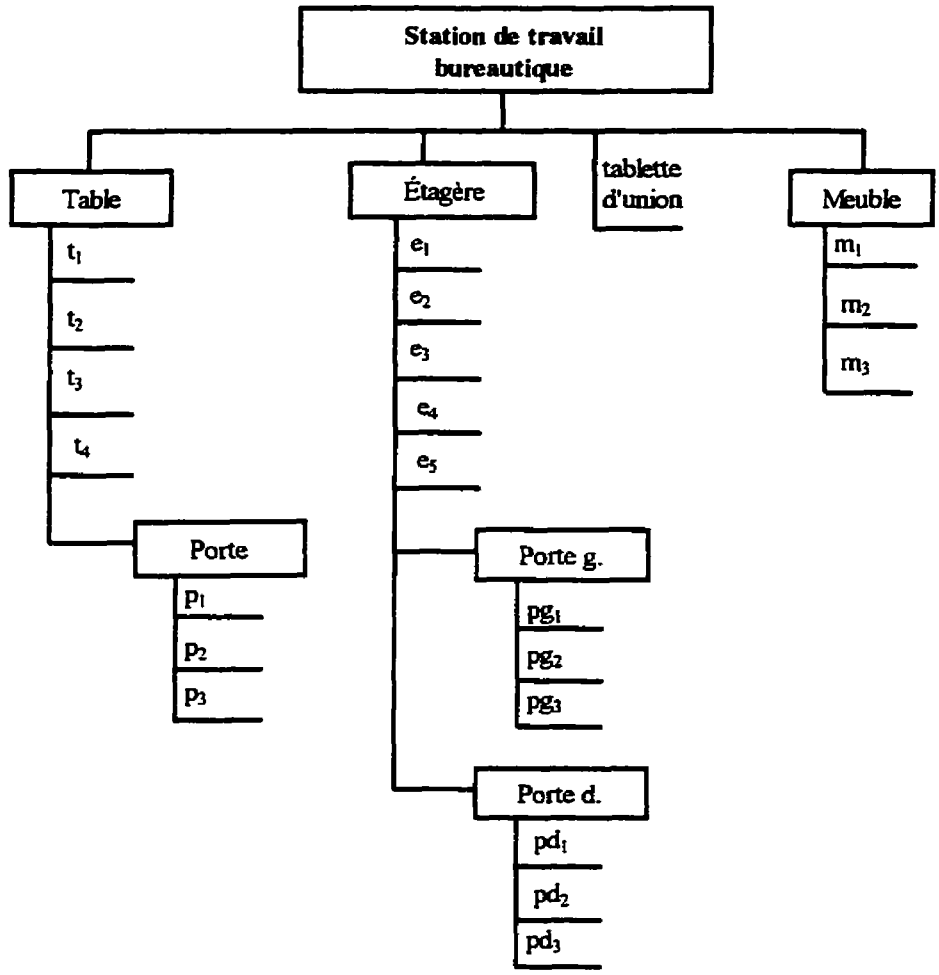


Figure 4.1 Modularisation d'un produit modulaire par nature

4.5.2 Produits complexes susceptibles d'être modularisés

Ce type de produit est celui que l'on peut modulariser, malgré qu'il ne soit pas formé de modules à première vue. La plupart des produits industriels entrent dans cette catégorie. Comme nous l'avons déjà dit, plus complexe est le produit, plus il est modularisable. Pour définir les modules dans ce type de produit, on imagine des

enveloppes à six faces pour envelopper l'ensemble à chaque niveau d'assemblage et trouver, de cette manière, les modules qu'on peut extraire à chaque niveau. Le processus est arrêté lorsqu'on enveloppe un module et qu'on trouve seulement des composants élémentaires. Les produits complexes, qui ne sont pas modularisables par nature, peuvent être modularisés en fonction des relations fonctionnelles, structurelles, etc., de façon à rendre plus facile leur assemblage.

Un alternateur électrique de voiture est un exemple de produit modularisable (voir Figures 10.1, 10.2, 10.3, et 10.4). Ce produit n'est pas formé par des modules que l'on puisse détacher, et si l'on trouve des modules dans sa structure, aucun d'entre eux n'a une fonction principale propre lorsque le produit est fini. Au contraire, ces modules contribuent à ce que le produit complet exécute la ou les fonctions principales et secondaires pour lesquelles il a été conçu.

L'alternateur électrique n'est pas modulaire à première vue, mais on peut le modulariser pour rendre son assemblage plus facile et ainsi accomplir une partie de notre objectif. Pour modulariser ce type de produit, on utilise l'approche de désassemblage et l'idée des enveloppes pour isoler les modules à chaque niveau dans l'arbre de hiérarchie d'assemblage du produit. L'enveloppe est le prisme rectangulaire le plus petit que peut renfermer un produit ou un module. On utilise des enveloppes à chaque niveau jusqu'à ce que l'on trouve seulement des composants élémentaires.

Dans le cas de l'alternateur, si on l'enveloppe et qu'on détache les composants de fixation à ce niveau par une des faces du prisme, on trouve certains composants de fixation, quelques composants élémentaires qui appartiennent au niveau principal de la hiérarchie d'assemblage du produit et deux modules, à savoir le couvercle frontal et le couvercle postérieur. Dans le niveau suivant, on enveloppe chaque module trouvé et on enlève les composants de fixation. Le résultat dans le couvercle frontal montre seulement des composants élémentaires; l'analyse est donc terminée sur cette branche. Aussi, dans le couvercle postérieur, on trouve seulement des composants élémentaires, donc l'analyse de cette branche est aussi terminée. La modularisation de l'alternateur expliquée ci-dessus est représentée de façon générale à la Figure 4.2. Dans le Chapitre 10, nous reviendrons à l'étude détaillée de l'alternateur électrique.

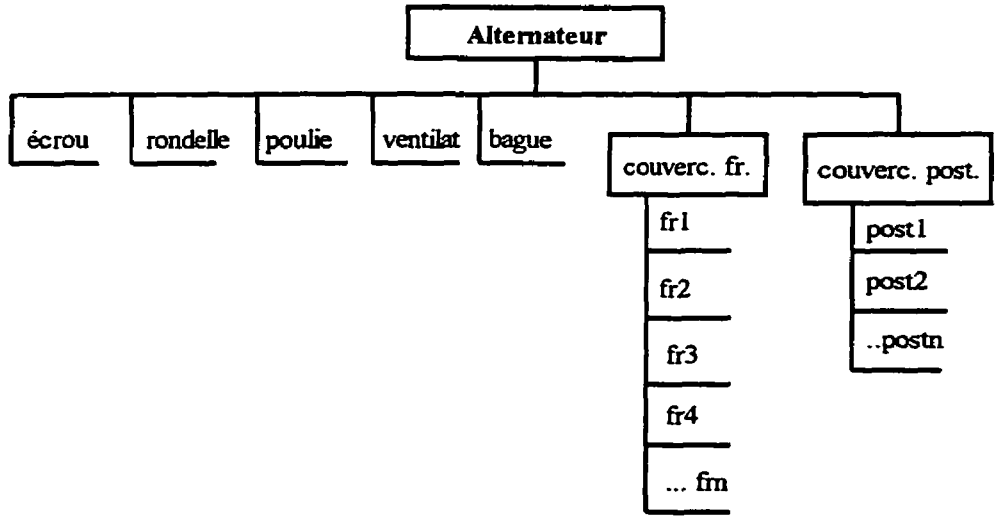


Figure 4.2 Modularisation d'un produit complexe susceptible d'être modularisé

4.5.3 Produits non modularisables

Ce type de produit présente une structure qui ne permet pas la modularisation, à cause de son bas niveau de complexité ou à cause des relations structurales ou fonctionnelles particulières de ces composants. Ils sont aussi appelés intégraux et ils sont assemblés de façon linéaire. Lorsqu'on trouve un produit intégral, il faut toujours examiner la possibilité de faciliter l'assemblage. Les considérations suivantes sont importantes.

- Il faut utiliser un composant qui sert de base d'assemblage où les autres composants doivent être assemblés suivant une seule direction de mouvement, si possible vertical du haut vers le bas. Cette configuration permet d'éliminer des supports de travail.

- Il est convenable de savoir à l'avance quel sera le dernier composant, d'habitude un couvercle ou un composant qui sert à protéger les composants internes contre les agents de l'extérieur.

Nous suggérons cette façon d'agir avec un produit intégral parce que, de cette manière, nous pouvons éliminer un grand nombre de séquences possibles d'assemblage qui ne nous conviennent pas et ainsi épargner beaucoup de temps, soit d'ordinateur pour générer les séquences, soit d'analyse parce qu'il y aura beaucoup moins de séquences à

analyser. On pourra ainsi consacrer notre temps aux solutions qui s'accordent vraiment à la réalité et à nos besoins.

La porte d'un four électrique (21) est un exemple de produit linéaire ou intégral, et elle est présentée à la Figure 4.3.

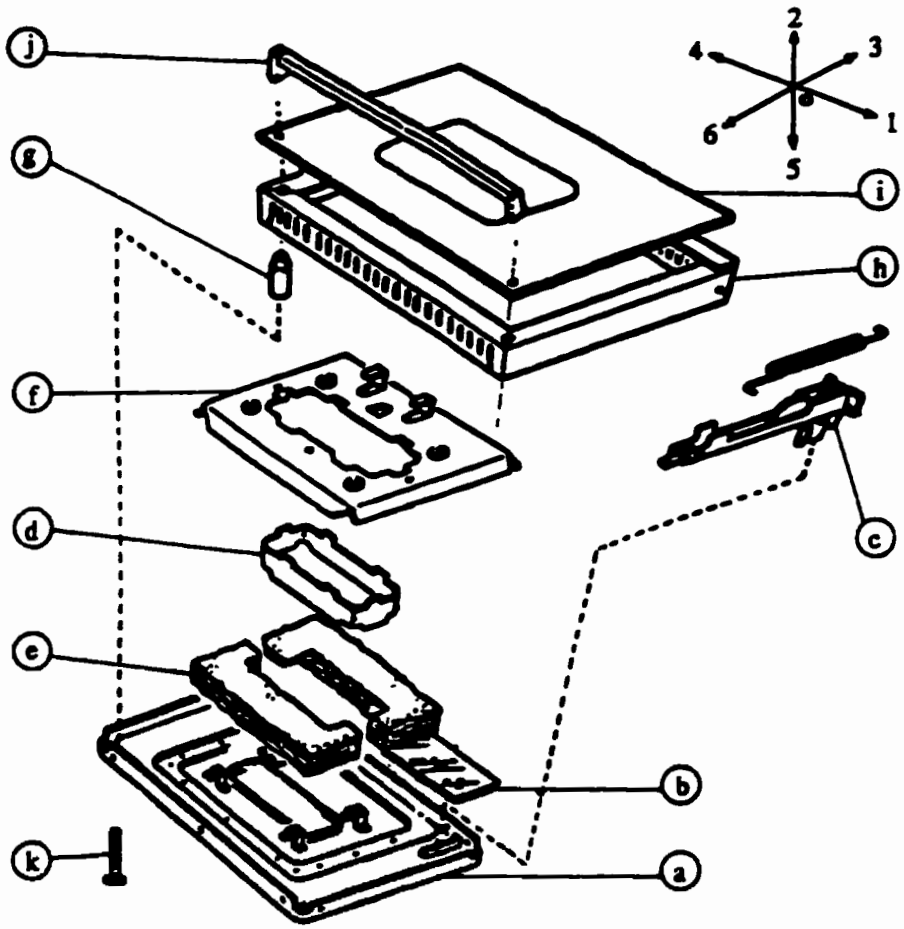


Figure 4.3 Vue explosée d'une porte de four électrique (21)

Dès que l'on enveloppe ce produit et qu'on enlève les composants de fixation, on trouve uniquement des composants élémentaires. On ne peut donc pas former des modules d'assemblage.

Dans cet exemple, une fois qu'on a fait la première enveloppe et enlevé les composants de fixation, on se retrouve avec les composants élémentaires suivants:

j : La poignée,

i : La vitre extérieure,

h : Le cadre,

g : L'entretoise,

f : Le panneau,

e : L'isolation,

d : La pièce de retenue,

c : Les charnières,

b : La vitre intérieure, et

a : La base.

La modularisation est impossible et l'assemblage prend une forme linéaire comme nous le montrons à la Figure 4.4.

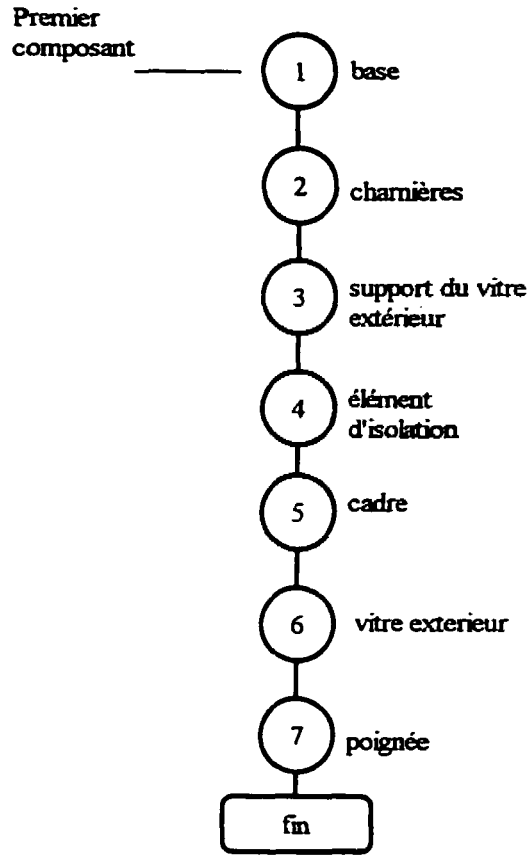


Figure 4.4 Assemblage d'un produit linéaire

Dans la séquence précédente, on a posé comme contrainte que l'assemblage commence avec **la base** et finisse avec **la poignée**. Évidemment, il existe plusieurs autres séquences.

4.6 MODÉLISATION POUR LA GÉNÉRATION DES SÉQUENCES D'ASSEMBLAGE

Il y a plusieurs approches pour modéliser un assemblage de manière à ce qu'il soit utile à la génération des séquences d'assemblage. Le fait de modéliser l'assemblage d'un produit pour s'en servir dans la génération de séquences d'assemblage demande d'obtenir les données nécessaires pour établir les relations géométriques et topologiques qui existent parmi les composants d'un produit. Ces données nous permettrons, dans l'étape de l'analyse, de définir les séquences réalisables d'assemblage. Parmi les multiples méthodes de modélisation, nous avons décidé d'utiliser celle qui est définie dans la méthode de génération des séquences d'assemblage de Ghosh (19). Elle a été choisie pour sa capacité d'adaptation et sa simplicité. La modélisation de Ghosh est basée sur deux fonctions: la fonction de contact et la fonction de translation. Les deux fonctions utilisent une représentation binaire pour définir les relations entre les composants et l'algèbre booléenne pour la génération des séquences d'assemblage.

4.6.1 Fonction de contact

Cette fonction permet d'établir si une relation de contact existe entre deux composants. On dit que deux composants sont en contact s'ils se touchent tout au long d'une surface, d'une ligne ou d'un point. Si l'on place un produit sur un repère cartésien 3D, la fonction de contact d'une paire de composants **p** et **q** est définie comme un vecteur de six entrées (une entrée pour chaque semi-axe du repère cartésien).

$$C(p,q) = Cpq = (C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6) \qquad (4.1)$$

où:

$$C(p,q) : Ci \rightarrow \{0,1\} \quad i = [1,6]$$

Ci = 1, indique qu'il y a un contact entre les deux composants dans la direction i,

Ci = 0, indique qu'il n'y a pas de contact entre les deux composants dans la direction i.

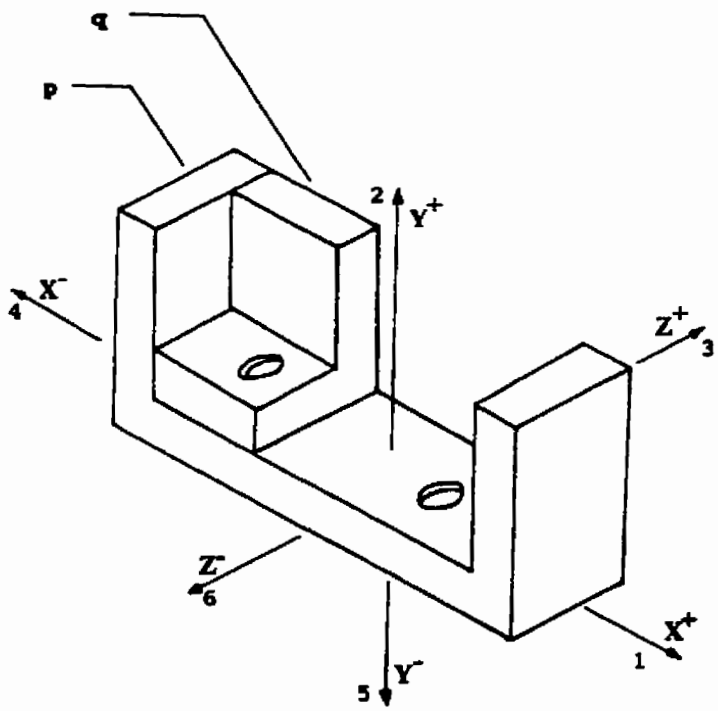


Figure 4.5 Définition des relations de contact

Dans l'expression **C(p,q)**, le premier composant **p** est fixe et le deuxième **q** est celui qui bouge. Alors, pour la figure ci-dessus, on a la fonction de contact **C(p,q) = (0, 0, 0, 1, 1, 0)**

Cette fonction indique que les composants **p** et **q** ont des contacts dans les direction 4 et 5, (X^- et Y^-). La définition de la fonction de contact doit être faite pour chaque paire de composants d'un produit. Évidemment, il y aura des paires qui présenteront des fonctions de contacts égales à (0, 0, 0, 0, 0, 0), ce qui veut dire que ses deux composants ne se touchent pas dans l'assemblage. Cependant, de toute façon, il est nécessaire d'obtenir toute cette information, parce qu'elle sera subséquemment utilisée pour générer les séquences d'assemblage.

4.6.2 Fonction de translation

La fonction de contact nous donne l'information concernant les composants qui sont en contact dans l'assemblage. Cependant, il nous manque de l'information pour savoir si, dans un état donné de l'assemblage, un composant a le chemin libre pour entrer en contact avec un autre composant avec lequel la fonction de contact est positive (égal à 1). En d'autres mots, il nous manque les données pour définir les relations de précédence.

Par définition, la fonction de translation représente les directions vers lesquelles un composant peut être désassemblé d'un autre. Il faut noter que, pour désassembler un composant, il est nécessaire qu'il existe au moins un chemin libre. La fonction de translation d'une paire de composants p et q est définie comme suit:

$$T(p,q) = Tpq = (T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6) \qquad (4.2)$$

où:

$$T(p,q) : Ti \rightarrow \{0,1\} \qquad i = [1,6]$$

Ti = 1, indique que le composant **q** a un chemin libre pour être séparé du composant **p** dans la direction i,

Ti = 0, indique qu'il n'y a pas de chemin libre pour pouvoir séparer le composant **q** du composant **p** dans la direction i.

Ensuite, l'algorithme de génération de séquences utilisera ces chemins de désassemblage pour trouver des chemins d'assemblage. Nous utilisons la Figure 4.5 pour expliquer la procédure.

Nous allons définir **T(p,q)** avec un composant **p** fixe, en essayant de séparer le composant **q** du composant **p**, suivant les directions des axes cartésiens. L'espace à travers lequel on doit essayer de bouger librement le composant **q** est égale à la longueur de chaque côté du prisme rectangulaire le plus petit et qui peut contenir le produit au

complet. S'il n'y a pas d'interférence dans le chemin de désassemblage, la fonction **T(p,q)** pour cette direction (axe) est = 1, sinon, elle est = 0.

Dans la Figure 4.5, si l'on bouge le composant **q** vers la direction 1, le composant va entrer en collision avec **p**, donc : $\mathbf{T(p,q)_1 = 0}$. Si l'on bouge maintenant le composant **q** vers la direction 2, le chemin est libre, alors : $\mathbf{T(p,q)_2 = 1}$. De l'application de cette procédure dans la Figure 4.5, on obtient : **T(p,q) = (0, 1, 1, 0, 0,1)**.

4.6.3 Modèle de Ghosh pour la génération de séquences d'assemblage

Si l'on complète la Figure 4.5 en ajoutant les composants manquants et que l'on génère les fonctions de contact et de translation correspondantes, en appliquant les concepts donnés dans les sections précédentes, on aura une bonne idée de la facilité, de la simplicité et de la puissance de ce type de modèle binaire. Le produit au complet qui servira pour la génération des séquences d'assemblage est montré à la Figure 4.6.

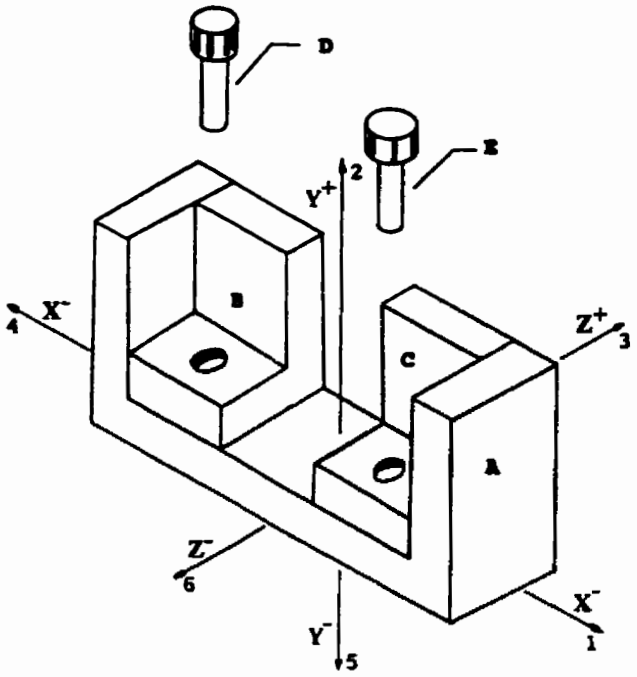


Figure 4.6 Exemple de génération des séquences d'assemblage

Si l'on a n composants, on aura :

$$\mathbf{m} = \frac{\mathbf{n!}}{(\mathbf{n} - \mathbf{r})!} \tag{4.3}$$

où:

m = est le nombre des fonctions de contact et de translations de l'assemblage,

n = est le nombre de composants,

r = 2 (nombre de composants dans une paire).

Pour le produit de la Figure 4.6, le nombre d'entrées de chaque fonction est:

$$\mathbf{m} = \frac{5!}{(5-2)!} = 20$$

Les fonctions de contact de la Figure 4.5 sont :

Tableau 4.1 Fonction de contact pour des composants cartésiens

Cab = (0, 0, 0, 1, 1, 0)	Cba = (1, 1, 0, 0, 0, 0)
Cac = (1, 0, 0, 0, 1, 0)	Cca = (0, 1, 0, 1, 0, 0)
Cad = (1, 0, 1, 1, 0 1)	Cda = (1, 0, 1, 1, 0, 1)
Cae = (1, 0, 1, 1, 0, 1)	Cca = (1, 0, 1, 1, 0, 1)
Cbc = (0, 0, 0, 0, 0, 0)	Ccb = (0, 0, 0, 0, 0, 0)
Cbd = (1, 0, 1, 1, 1, 1)	Cdb = (1, 1, 1, 1, 0, 1)
Cbe = (0, 0, 0, 0, 0, 0)	Ceb = (0, 0, 0, 0, 0, 0)
Ccd = (0, 0, 0, 0, 0, 0)	Cdc = (0, 0, 0, 0, 0, 0)
Cce = (1, 0, 1, 1, 1, 1)	Cec = (1, 1, 1, 1, 0, 1)
Cde = (0, 0, 0, 0, 0, 0)	Ced = (0, 0, 0, 0, 0, 0)

Comme prévu, si l'on prend une paire de composants **pq**, la fonction de contact **C(q,p)** est l'inverse de la fonction de contact **C(q,p)**. Les fonctions de translation de la Figure 4.5 sont présentées au tableau ci-dessous:

Tableau 4.2 Fonction de translation pour des composants cartésiens

Tab = (0, 1, 1, 0, 0, 1)	Tba = (0, 0, 1, 0, 1, 1)
Tac = (0, 1, 1, 0, 0, 1)	Tca = (0, 0, 1, 0, 1, 1)
Tad = (0, 1, 0, 0, 0, 0)	Tda = (0, 0, 0, 0, 1, 0)
Tae = (0, 1, 0, 0, 0, 0)	Tea = (0, 0, 0, 0, 1, 0)
Tbc = (1, 1, 1, 0, 1, 1)	Tcb = (0, 1, 1, 1, 1, 1)
Tbd = (0, 1, 0, 0, 0, 0)	Tdb = (0, 0, 0, 0, 1, 0)
Tbe = (1, 1, 1, 0, 1, 1)	Teb = (0, 1, 1, 1, 1, 1)
Tcd = (0, 1, 1, 1, 1, 1)	Tdc = (1, 1, 1, 0, 1, 1)
Tce = (0, 1, 0, 0, 0, 0)	Tec = (0, 0, 0, 0, 1, 0)
Tde = (1, 1, 1, 0, 1, 1)	Ted = (0, 1, 1, 1, 1, 1)

De la même façon que pour la fonction de contact, la fonction de translation pour une paire de composants **pq**, **T(p,q)** est l'inverse de la fonction de translation **T(q,p)**. Avec ces données de base et en utilisant l'algèbre booléenne, l'algorithme de Ghosh est capable de générer toutes les séquences faisables d'assemblage.

Dans la méthode originale de Ghosh, les données pour établir les fonctions de contact et de translation ont été obtenues manuellement tel qu'expliqué ci-dessus. Postérieurement Gottipolu et Ghosh (20) ont présenté une méthode directe pour l'extraction de données à partir d'un modèle solide construit en utilisant le logiciel PADL-2. Une sous-routine en Fortran est utilisée comme interface entre PADL-2 et le générateur de séquences pour extraire les fonctions de contact et de translation de PADL-2 et générer automatiquement les séquences faisables d'assemblage en respectant les contraintes géométriques et topologiques.

Finalement, il faut dire que cette méthode est basée sur certaines hypothèses pour réduire la complexité du problème, lesquelles sont décrites par Gottipolu (21). L'une des hypothèses les plus restrictives consiste à ce que les composants à assembler doivent suivre une trajectoire linéaire parallèle à l'un des axes cartésiens. Malgré les hypothèses sur lesquelles la méthode est basée, théoriquement elle peut être utilisée dans beaucoup de cas dans l'industrie.

4.7 MODÈLE PROPOSÉE POUR LA REPRÉSENTATION DES COMPOSANTS ASSEMBLÉS SUR UN REPÈRE CYLINDRIQUE

Dans la Section 4.6.3, nous avons montré le modèle pour la génération des séquences d'assemblage de Ghosh. Nous avons dit qu'une de ses hypothèses les plus restrictives est la trajectoire linéaire parallèle à l'un des axes cartésiens que les composants doivent suivre pour que l'algorithme de génération fonctionne. Après avoir étudié le problème, nous avons décidé de chercher un moyen de représenter l'assemblage des composants dont la trajectoire d'assemblage n'est pas parallèle aux axes cartésiens et, de cette façon, rendre notre méthodologie plus générale. Pour arriver à notre objectif, sans trop changer la méthode originale, nous avons modifiée les fonctions de contact et de translation originales pour les rendre capables de représenter des composants qui suivent des trajectoires selon les axes cylindriques au moment de leur assemblage.

Le principe de base du travail est la rotation d'axes, de telle manière que le composant non cartésien qui bouge se trouve toujours sur un axe tourné. Pour avoir des

angles positifs, on fait toujours la rotation dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Pour avoir toujours des angles qui mesurent moins de 90°, on fait la rotation dans la direction positive de l'axe qui est le plus proche du composant qui va bouger. Étant donné que les trajectoires cylindriques sont toujours parallèles au plan XZ, on fait l'analyse de la rotation d'axes d'assemblage sur une vue 2D. Pour le traitement des composants de trajectoire cylindrique de façon compatible à la méthode de Ghosh, il faut différencier deux cas:

4.7.1 Produits avec des composants de trajectoire cylindrique en contact avec une même base centrale

Dans ce cas, la symétrie angulaire des composants par rapport aux axes n'a pas d'importance. La fonction de translation **T(p,q)** continue à être l'inverse de la fonction **T(q,p)** et l'axe tourné pour la relation **pq** est l'inverse de **qp**. Par contre, l'angle de rotation continue d'être le même pour les deux cas. La Figure 4.7 montre le cas des composants de trajectoire cylindrique qui ont des positions d'assemblage qui gardent une symétrie angulaire.

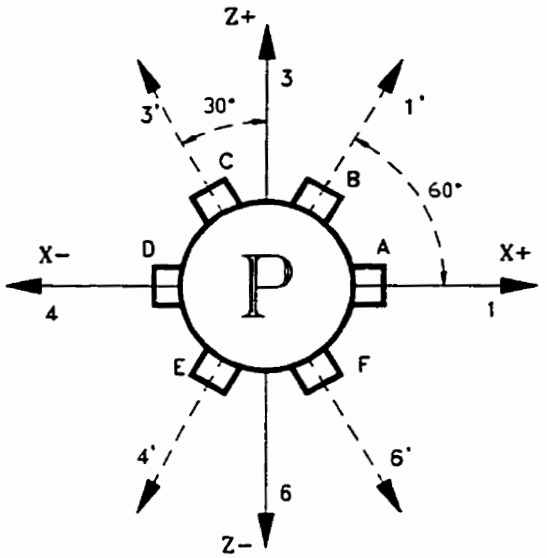


Figure 4.7 Composants de trajectoire cylindrique et symétrie angulaire

Les fonctions de contact et de translation, pour le cas des composants de trajectoire cylindrique et symétrique angulaire, sont montrées au Tableau 4.1.

Tableau 4.3 Fonctions de contact et de translation pour des composants de trajectoire cylindrique et de symétrie angulaire

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	Fonction contact	Fonction translation
PA	1	0	1	100000
PB	1	60	1	100000
PC	3	30	1	001000
PD	4	0	1	000100
PE	4	60	1	000100
PF	6	30	1	000001
AB	1	60	0	111111
AC	3	30	0	111111
AD	4	0	0	011111
AE	4	60	0	111111
AF	6	30	0	111111
BC	3	30	0	111111
BD	4	0	0	111111
BE	4	60	0	011111
BF	6	30	0	111111
CD	4	0	0	111111
CE	4	60	0	111111
CF	6	30	0	110111
DE	4	60	0	111111
DF	6	30	0	111111
EF	6	30	0	111111

Pour calculer les entrées inverses de la fonction de translation des composants de trajectoire cylindrique et symétrie angulaire, il faut tenir compte du fait que la fonction **T(p,q)** continue à être l'inverse de la fonction **(Tq,p)** et que l'axe de tournage reste le même pour les deux cas.

Soit **T(p,q)** où **q** est un composant de trajectoire cylindrique qui a un contact avec la base **p**. On peut dire que:

$$\mathbf{T(p,q)} = \mathbf{Tpq} = (\ \mathbf{T}_1\ ,\ \mathbf{T}_2\ ,\ \mathbf{T}_3\ ,\ \mathbf{T}_4\ ,\ \mathbf{T}_5\ ,\ \mathbf{T}_6\ )\ ,\ \mathbf{rot}_i = a^\circ \qquad (4.4)$$

où :

$\mathbf{i} \rightarrow [\mathbf{1,6}]$ est l'axe qui tourne.

$$\mathbf{T(q,p)} = \mathbf{T(p,q)} = (\ \mathbf{T}_4\ ,\ \mathbf{T}_5\ ,\ \mathbf{T}_6\ ,\ \mathbf{T}_1\ ,\ \mathbf{T}_2\ ,\ \mathbf{T}_3\ )\ ,\ \mathbf{rot}_i = a^\circ \qquad (4.5)$$

où:

$\mathbf{j = i + 3}$ **si** $\mathbf{i \leq 3}$, où $\mathbf{j = i - 3}$ **si** $\mathbf{i \geq 4}$

et :

$\mathbf{j} = [\mathbf{1,6}]$: est l'axe qui tourne.

Avec l'information ci-dessus, on trouve les entrées inverses d'une paire de composants de la façon suivante:

1. **T(P,B) = (1, 0, 0, 0, 0, 0) axe = 1 , rot = 60°**

   T(B,P) = (0, 0, 0, 1, 0, 0) axe = 4 , rot = 60°

2. **T(P,C) = (0, 0, 1, 0, 0, 0) axe = 3 , rot = 30°**

T(C,P) = (0, 0, 0, 0, 0, 1) axe = 6 , rot = 30°

Une fois que les fonctions de contact et de translation sont identifiées, on peut utiliser l'algorithme original de génération des séquences d'assemblage de Ghosh. Comme on l'a déjà dit, lorsque tous les composants suivent des trajectoires cylindriques pour être assemblés sur une même base, la symétrie angulaire des composants n'affecte pas lors de la définition des fonctions de contact et de translation. C'est le cas que nous montrons à la Figure 4.8, où l'on peut voir des composants non cartésiens qui suivent des trajectoires cylindriques d'assemblage ne gardant pas de symétrie par rapport aux axes cartésiens.

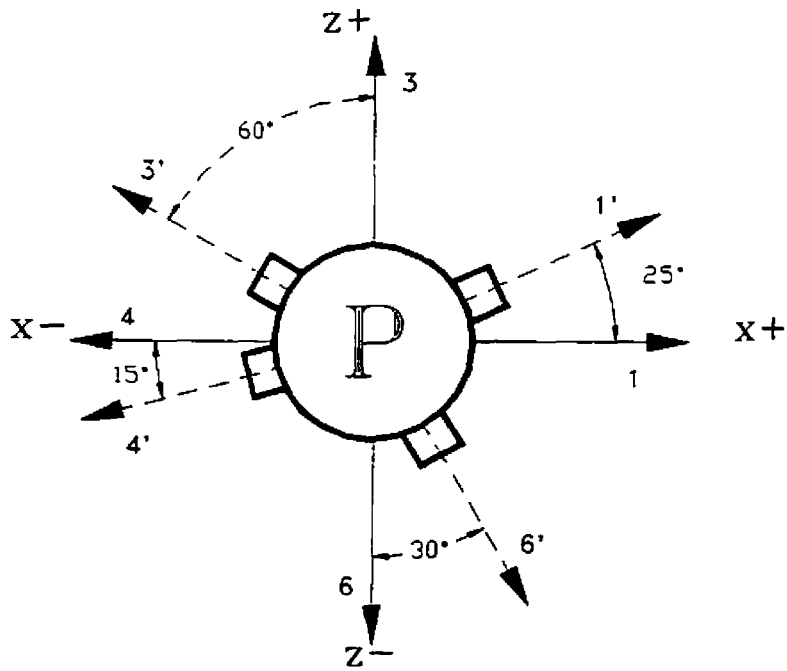


Figure 4.8 Composants de trajectoire cylindrique et asymétrie angulaire

Les fonctions de contact et de translation, pour ce cas, sont calculées de la même manière que pour le premier cas. Le Tableau 4.2 montre les fonctions de contact et de translation correspondantes.

Tableau 4.4 Fonctions de contact et de translation pour des composants de trajectoire cylindrique et asymétrie angulaire

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	Fonction contact	Fonction translation
PA	1	25	1	100000
PB	3	60	1	001000
PC	4	15	1	000100
PD	6	30	1	000001
AB	3	60	0	111111
AC	4	15	0	111111
AD	6	30	0	111111
BC	4	15	0	111111
BD	6	30	0	111111
CD	6	30	0	111111

Le calcul des fonctions de translation inverses, à partir des fonctions déjà calculées, est fait de la même manière que pour le cas précédent.

1. **T(P,B) = (0, 0, 1, 0, 0, 0) axe = 3 , rot = 60°**

   T(B,P) = (0, 0, 0, 0, 0, 1) axe = 6 , rot = 60°

2. **T(P,C) = (0, 0, 0, 1, 0, 0) axe = 4 , rot = 15°**

   T(C,P) = (1, 0, 0, 0, 0, 0) axe = 1 , rot = 15°

et ainsi de suite. L'algorithme de génération des séquences d'assemblage de Ghosh est utilisé de la même manière que dans le cas antérieur.

4.7.2 Produits avec des composants cartésiens et composants non cartésiens

Si deux composants de différents types sont en contact, on revient au cas antérieur. Par contre si deux composants de différents types ne sont pas en contact, la fonction de translation **T(p,q)**, où **q** est un composant non cartésien et **p** est un composant cartésien, n'est plus l'inverse du **T(q,p)**. Le même cas est donné lorsque la paire est formée par deux composants non cartésiens qui n'ont pas de contact.

L'explication est simple. Dans la relation **T(p,q)**, c'est le composant **q** (non cartésien) qui bouge. On fait alors une rotation d'axes pour trouver les relations de la fonction de translation correspondante. Les composants **p** et **q** ne sont pas en contact, mais de toute façon, on définit les entrées de la fonction de translation pour la détermination de la trajectoire d'assemblage. Par contre, lorsqu'on définit la fonction de translation pour la paire inverse **T(q,p)**, c'est **p** qui bouge et il est un composant cartésien qui n'a pas de contact avec **q**. Donc, on n'a pas besoin de faire une rotation d'axes pour trouver les entrées de la fonction **T(q,p)**. Aussi, elle n'est pas l'inverse de **T(p,q)** et on doit, pour cette raison, calculer directement ses valeurs. La Figure 4.9 montre un produit avec des composants cartésiens et des composants non cartésiens.

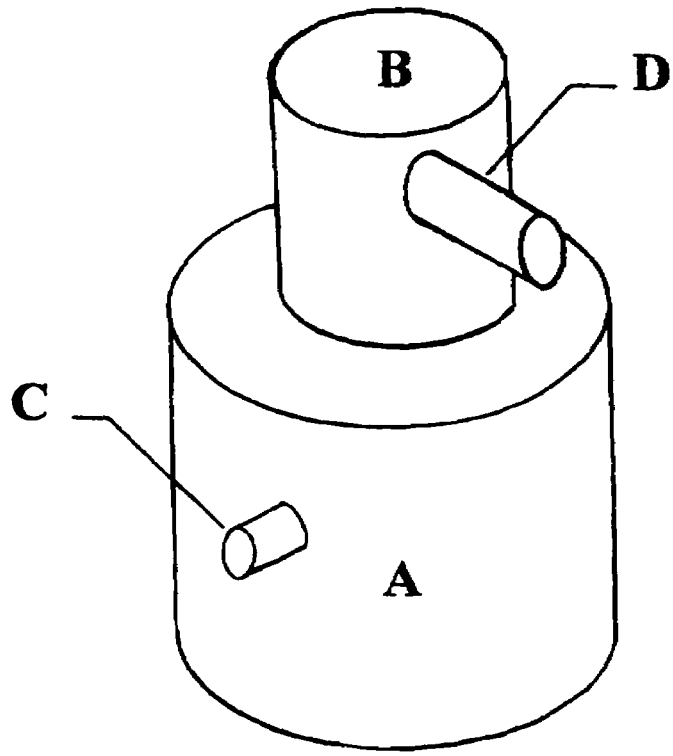


Figure 4.9 Produit avec composants cartésiens (A,B) et non cartésiens (C,D)

Puisque les composants non cartésiens considérés suivent une trajectoire cylindrique (parallèle au plan XZ); Pour analyser les relations de contact et de translation qui existent entre les différents composants, on utilise une vue de plan en 2D. La vue 2D du produit antérieur est montrée à la Figure 4.10.

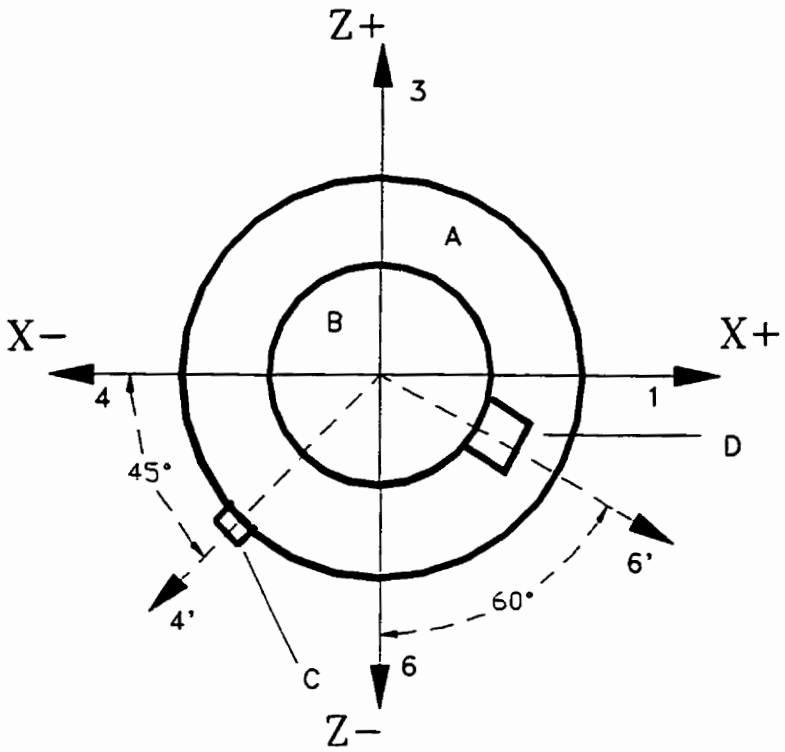


Figure 4.10 Vue de plan d'un produit avec composants cartésiens et non cartésiens

Après l'analyse de trajectoires de désassemblage et les rotations d'axes nécessaires, nous avons défini les fonctions de contact et de translation du produit présenté à la Figure 4.9. Les résultats sont présentés au Tableau 4.3.

Tableau 4.5 Fonctions de contact et de translation pour un produit avec des composants cartésiens et non cartésiens

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	Fonction contact	Fonction translation
AB	--	--	1	111101
A(C)	4	45	1	000100
A(D)	6	60	0	111101
B(C)	4	45	0	111111
B(D)	6	60	1	000001
(C)(D)	6	60	0	111111
BA	--	--	1	101111
(C)A	4	45	1	100000
(D)A	--	--	0	101111
(C)B	--	--	0	111111
(D)B	6	60	1	001000
(D)(C)	4	45	0	111111

Dans le tableau ci-dessus, les composants non cartésiens sont présentés entre parenthèses. Le composant qui est à droite de chaque paire est toujours celui qui bouge.

Dans cet exemple, nous avons défini les fonctions de translation des paires de composants qui n'ont pas de contact et qui ne sont pas cartésiens, ou que l'un d'entre eux n'est pas cartésien. L'objectif est de démontrer que, dans ces cas seulement, la fonction de translation d'une paire de composants quelconques **pq** n'est pas l'inverse de la fonction de translation de la paire **qp** et que, pour cette raison, il est nécessaire de définir chacune des fonctions séparément. Pour trouver la fonction de translation de la paire non cartésienne (C)(D), qui est montrée dans le tableau 4.3, on a tourné l'axe cartésien n° 6

de 60°. Par contre, pour trouver la fonction de translation de la paire (D)(C), c'est l'axe cartésien n° 4 qui a été tourné de 45°. Pour le cas d'une paire de composants avec un composant non cartésien et avec une fonction de contact = 0, on observe dans le Tableau 4.3 que, pour la paire B(C), afin de définir sa fonction de translation, on a tourné l'axe 4 de 45°. Par contre, pour définir la fonction de translation de la paire (C)B, il n'était pas nécessaire de tourner d'axe. Après la définition des fonctions de translation, l'algorithme de génération des séquences d'assemblage de Ghosh est capable de faire ses calculs pour la génération des séquences de façon normale, avec des produits qui contiennent des composants cartésiens et des composants cylindriques.

On conclut donc que la différence entre les composants cartésiens et les composants cylindriques, lors de la génération des séquences d'assemblage, est la définition de la fonction de translation. Si un composant cylindrique est en contact avec un composant cartésien ou encore avec un autre composant cylindrique, le problème est solutionné avec une rotation d'axes en fonction du composant qui bouge. Si le composant qui bouge est cylindrique, on fait la rotation adéquate. Si le composant qui bouge est cartésien, on ne fait pas de rotation d'axes. Dans le cas où le contact entre composants existe, la fonction de translation de la paire inverse est l'inverse de la fonction de translation de la paire initiale. Au contraire, si un composant cylindrique n'a pas de relation de contact avec un composant cartésien ou cylindrique, on doit définir les fonctions de translation pour la paire en question et sa paire inverse et ce, de façon séparée. Après la définition de toutes

les fonctions de translation avec la méthode expliquée, l'algorithme de génération des séquences d'assemblage de Ghosh peut travailler avec des produits qui contiennent des composants cartésiens et des composants cylindriques. Nous analyserons en détail le fonctionnement de l'algorithme au Chapitre 5.

4.8 MÉTHODE DE MODÉLISATION POUR REPRÉSENTER L'ASSEMBLAGE DE PRODUITS COMPLEXES

Dans le présent travail, nous proposons l'utilisation du modèle de Ghosh dans un contexte CAAP (Computer Aided Assembly Planning) relié à un modèle d'assemblage hiérarchique pour la conception d'un système d'assemblage facile pour produits complexes. Ce modèle hiérarchique suit l'approche de désassemblage et il est développé à partir d'une vue explosée du produit à modéliser ou d'un prototype. Nous proposons un tel modèle parce que, présentement, toutes les méthodes de génération des séquences d'assemblage suivent une approche théorique pour essayer de solutionner le problème et elles n'arrivent qu'à gérer des produits avec une petite quantité de composants, ce qui ne correspond pas à la réalité en industrie. En fonction de ce que nous avons expliqué dans les sections précédentes, nous proposons de modéliser l'assemblage d'un produit en deux étapes.

La première étape comprend la structure de l'assemblage. On modélise cette structure de façon à la modulariser afin de rendre l'assemblage plus facile et logique. Cette étape définit les modules principaux qui vont nous servir de base pour développer

l'arbre de hiérarchie de l'assemblage. Chacun d'eux forme un branche dans l'arbre puisqu'ils sont indépendants. Cette première étape de modélisation nous permet de choisir d'abord les modules qui doivent former le produit et, de cette manière, commencer déjà avec une structure adaptée à la philosophie de la conception pour un assemblage facile. On présente, à la Figure 4.11, une structure hiérarchique pour un produit générique.

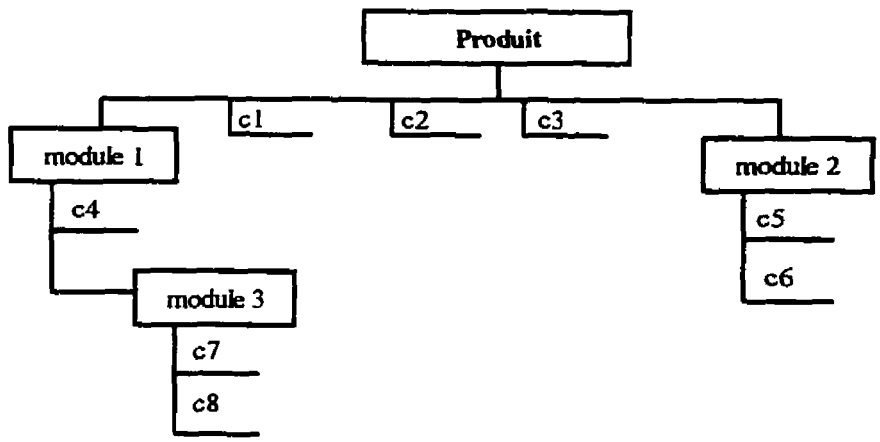


Figure 4.11 Structure hiérarchique d'un produit générique avec des modules et des composants élémentaires

Des auteurs comme Kroll (36) s'accordent pour dire qu'étant donné la complexité de la plupart des produits, il est nécessaire de structurer d'abord l'assemblage pour l'analyser. Kroll effectue sa modélisation en divisant l'assemblage en ce qu'il appelle des sous-assemblages indépendants. Pour lui, la solution pour la génération des séquences

d'assemblage, dans un contexte d'ingénierie simultanée, est de gérer ces sous-assemblages indépendants (appelés modules dans notre approche).

La deuxième étape comprend la modélisation pour la génération des séquences d'assemblage. Dans cette étape, on utilise le modèle de Ghosh pour représenter les relations entre les composants, mais adapté à la modularisation effectuée dans la première étape. D'un autre côté, comme l'algorithme de génération de séquences d'assemblage a seulement besoin de savoir s'il existe ou non au moins une relation de contact entre deux composants, mais n'a pas besoin de connaître la direction du contact, nous avons décidé de simplifier la fonction de contact originale de façon à utiliser un vecteur binaire d'une seule entrée.

$$\mathbf{C(p,q) = Cpq = (C)} \tag{4.6}$$

où :

$$\mathbf{C(p,q) = Cpq = C \rightarrow \{0,1\}}$$

$\mathbf{C}$ = 1, indique qu'il existe un contact entre deux composants,

$\mathbf{C}$ = 0, indique qu'il n'existe pas de contact entre ces deux composants.

Dans l'arbre présenté à la Figure 4.11, on doit définir les fonctions de contact et de translation pour les composants qui appartiennent à chaque module. On commence par le niveau le plus bas de la hiérarchie d'assemblage pour enfin définir les fonctions de contact

et de translation des composants modulaires ou élémentaires du niveau le plus élevé de la hiérarchie.

Les fonctions de contact et de translation que l'on doit définir pour l'arbre de hiérarchie montré à la Figure 4.11 sont:

<u>Module 3</u> : mod3

C (c7,c8)	**T (c7,c8)**
C (c8,c7)	**T (c8,c7)**

<u>Module 1</u> : mod1

C (mod3,c4)	**T (mod3,c4)**
C (c4,mod3)	**T (c4,mod3)**

<u>Module 2</u> : mod2

C (c5,c6)	**T (c5,c6)**
C (c6,c5)	**T (c6,c5)**

<u>Produit</u>

C (mod1,c1)	**T (mod1,c1)**	**C (c1,mod1)**	**T (c1,mod1)**
C (mod1,c2)	**T (mod1,c2)**	**C (c2,mod1)**	**T (c2,mod1)**
C (mod1,c3)	**T (mod1,c3)**	**C (c3,mod1)**	**T (c3,mod1)**

C (mod1,mod2)	**T (mod1,mod2)**	**C (mod2,mod1)**	**T (mod2,mod1)**
C (c1,c2)	**T (c1,c2)**	**C (c2,c1)**	**T (c2,c1)**
C (c1,c3)	**T (c1,c3)**	**C (c3,c1)**	**T (c3,c1)**
C (c1,mod2)	**T (c1,mod2)**	**C (mod2,c1)**	**T (mod2,c1)**
C (c2,c3)	**T (c2,c3)**	**C (c3,c2)**	**T (c3,c2)**
C (c2,mod2)	**T (c2,mod2)**	**C (mod2,c2)**	**T (mod2,c2)**
C (c3,mod2)	**T (c3,mod2)**	**C (mod2,c3)**	**T (mod2,c3)**

Si, pour l'exemple à la Figure 4.11, on utilise l'approche binaire pour trouver les relations qui existent entre tous les composants, sans tenir en compte la modularisation effectuée, on doit définir, pour cet exemple de huit composants:

$\mathbf{n} = \frac{8!}{(8-2)!} = \frac{8!}{6!} = 56$ fonctions de chaque type, ce qui donne: **56 * 2 = 112 fonctions.**

Au contraire, si l'on calcule les données nécessaires pour le même produit, dans un cadre d'assemblage modularisé où l'on a déjà défini les modules principaux d'assemblage, il nous faut:

$\mathbf{mod3 = 2\ composants} = \frac{2!}{0!} = 2,$

$$\textbf{mod1} = \textbf{2 composants} = \frac{2!}{0!} = 2,$$

$$\textbf{mod2} = \textbf{2 composants} = \frac{2!}{0!} = 2,$$

$$\textbf{Produit} = \textbf{5 composants} = \frac{5!}{3!} = 20$$

ce qui représente 26 fonctions de chaque type. On a donc besoin au total de définir : **26 * 2 = 52 fonctions.** Si l'on fait la comparaison entre les deux méthodes on trouve une différence de:

$$\frac{112-52}{112} = 53\% \text{ de moins.}$$

Ce chiffre de 53 % de moins veut dire que l'effort pour représenter les relations dans un modèle a diminué dans cette proportion. De la même manière, l'analyse est plus facile; moins on définit de relations, moins l'ordinateur fera de calculs et moins on aura de séquences à analyser. Les défenseurs de l'approche qui cherche à trouver la totalité de séquences d'assemblage d'un produit peuvent reprocher à cette modélisation d'être incomplète, puisqu'elle ne tient pas compte de toutes les relations possibles. En fait, ce n'est pas le cas, puisque comme De Fazio et Whitney (14), et Kroll (36) l'ont constaté;

avec un algorithme de génération totale, en moyenne 818 séquences théoriques d'assemblage sont générées pour un produit de 11 composants. Après avoir imposé quelques contraintes propres à la procédure d'assemblage ou à son environnement, les séquences valides tombent à deux.

Notre point de vue est de définir à l'avance et de façon systématique, les modules principaux, ce qui permet d'abord de modulariser l'assemblage afin que le modèle résultant facilite la conception d'un système pour un assemblage facile. Aussi, la modularisation permet seulement la génération des séquences d'assemblage des modules que nous avons définis et, de cette manière, d'avoir une liste de séquences d'assemblage qui soit plus en accord avec nos besoins. L'ingénieur manufacturier ou le groupe d'ingénierie simultanée formé pour l'analyse des séquences d'assemblage peut ainsi focaliser l'analyse sur les séquences qui vraiment leur conviennent.

CHAPITRE 5

MÉTHODE PROPOSÉE POUR LA GÉNÉRATION DES SÉQUENCES D'ASSEMBLAGE

5.1 INTRODUCTION

La modélisation présentée dans le chapitre précédent est une étape qui sert de base pour la génération de séquences d'assemblage. Elle représente les contraintes de précédence géométriques et topologiques du produit et la structure que l'on va utiliser dans son assemblage. Le présent chapitre explique comment il est possible, grâce au modèle binaire qui représente les relations de précédence des composants d'un produit, à l'arbre hiérarchique d'assemblage modulaire, à l'algorithme de génération de séquences d'assemblage de Ghosh, au logiciel développé et à l'interactivité entre l'usager et l'ordinateur que l'on propose, de construire des séquences d'assemblage pour produits complexes dans un temps raisonnable.

Dans cette approche, une fois que les modules sont établis, on commence à construire les séquences d'assemblage en utilisant l'algorithme de génération de séquences, d'abord pour les modules du niveau le plus bas jusqu'à atteindre le niveau le plus élevé de l'arbre de hiérarchie. Une fois que l'on y est arrivé, on fait l'assemblage des modules finaux de chaque branche avec les composants élémentaires qui appartiennent à ce niveau. On utilise encore l'algorithme de Ghosh. À l'origine, l'algorithme de Ghosh a deux

procédures. Dans la première, toutes les paires faisables du produit sont formées. Dans la deuxième, l'algorithme fait la génération de toutes les séquences possibles à partir des données de la première procédure. Les deux procédures considèrent toujours des contraintes de connectivité et d'précédence que l'on a définies dans l'étape de la modélisation au moyen des fonctions de contact et de translation. La méthode proposée modifie la façon d'utiliser les données du modèle. De plus, on y ajoute la possibilité d'analyser des composants non cartésiens.

Dans la première procédure, on additionne interactivement des données au modèle, de façon à commencer la génération de séquences seulement avec les paires (liaisons) qui, pour nous, peuvent vraiment commencer l'assemblage en tenant compte d'autres considérations que les considérations géométriques et topologiques. De cette façon, on élimine à l'avance beaucoup de séquences que l'algorithme aurait rejetées ensuite. On sauve ainsi un temps considérable d'utilisation d'ordinateur et il est possible de gérer des produits qui possèdent plus de composants qu'avec la procédure originale. Dans la deuxième procédure, une fois que l'algorithme a généré toutes les séquences faisables qui respectent nos contraintes initiales, on ajoute encore des contraintes, cette fois de précédence, reliées à des considérations technologiques d'assemblage du produit analysé. À la fin, on obtient un groupe de séquences facilement faisables du point de vue géométrique, topologique et technologique (but de la modularisation initiale).

5.2 ALGORITHME DE GÉNÉRATION DE SÉQUENCES D'ASSEMBLAGE

Pour expliquer la façon d'utiliser l'algorithme de Ghosh pour la génération de séquences d'un produit modulaire, nous allons utiliser comme exemple le stylo illustré à la Figure 5.1. Ce même produit a été analysé par Bourjault (8).

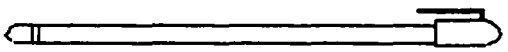


Figure 5.1 Représentation graphique d'un stylo à bille

En utilisant les concepts de modularisation et la méthode de décomposition d'un produit en composants, on décompose le stylo une première fois. Le résultat de la décomposition du stylo est montré à la Figure 5.2.

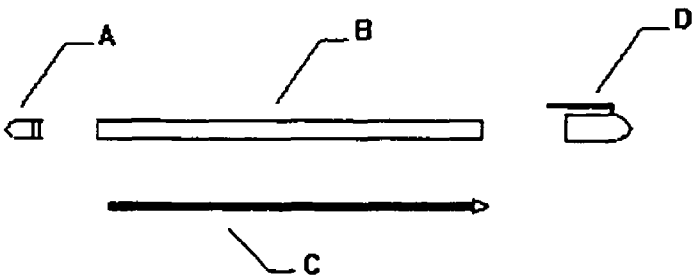


Figure 5.2 Première décomposition du stylo à bille

où:

A = bouton,

B = corps,

C = rechange,

D = capuchon.

L'arbre hiérarchique correspondant à cette étape est présenté à la Figure 5.3.

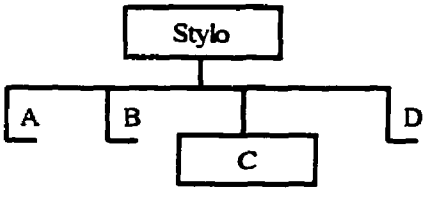


Figure 5.3 Arbre hiérarchique d'assemblage du stylo après la première décomposition

On continue la décomposition puisqu'il reste encore un module qui n'a pas été décomposé. La Figure 5.4 montre cette deuxième décomposition.

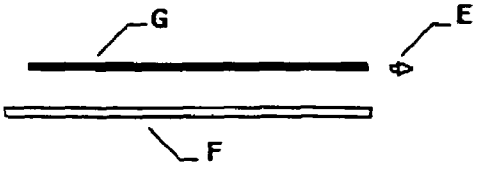


Figure 5.4 Deuxième décomposition du stylo à bille

où:

E = tête,

F = tube,

G = encre.

L'arbre de hiérarchie final, qui représente la décomposition du produit de manière modularisée, est présenté à la Figure 5.5.

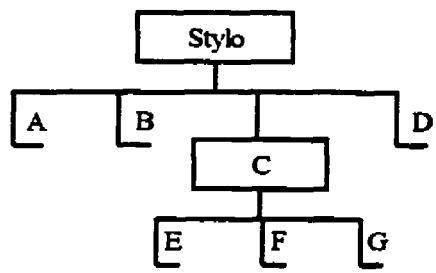


Figure 5.5 Arbre hiérarchique d'assemblage du stylo après la deuxième décomposition

Les fonctions de contact (f(c)) et les fonctions de translation (f(t)) pour le module **C** [rechange], et le produit [stylo], sont montrées au Tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Fonction de contact et de translation pour l'assemblage modulaire du stylo à bille

Module C: Rechange

	Fonction de contact	Fonction de translation
Pair	f(c)	f(t)
tête - tube	1	000100
tête - encre	1	000100
tube - encre	1	100100
tube - tête	1	100000
encre - tête	1	100000
encre - tube	1	100100

Produit: Stylo

Pair	f(c)	f(t)
bouton - corps	1	100000
bouton - rechange	0	111011
bouton - capuchon	0	111011
corps - rechange	1	100000
corps - capuchon	1	100000
rechange - capuchon	0	100000
corps - bouton	1	000100
rechange - bouton	0	011111
capuchon - bouton	0	011111
rechange - corps	1	000100
capuchon - corps	1	000100
capuchon - rechange	0	000100

5.2.1 Imposition de contraintes initiales

Avant de commencer la génération de séquences d'assemblage, notre méthode impose des contraintes à respecter, lors de la génération, afin d'éviter une explosion combinatoire de résultats. Les contraintes que le logiciel pose, avant de commencer la génération, sont les suivantes.

- **Composant initial**

Dans la pratique, presque tous les produits ont un composant avec lequel il est convenable de commencer l'assemblage. Ce composant peut être choisi parce qu'il est le plus encombrant, parce que le reste de composants est fixé sur lui, ou peut-être parce que ce composant est celui qu'on peut le mieux soutenir avec un support de travail pour commencer l'assemblage, etc. Si l'on est capable de fournir un composant de base pour la génération des séquences d'assemblage, on introduit une contrainte très puissante qui diminue de beaucoup le temps de calcul, empêche l'explosion de séquences et permet d'acheminer la génération de séquences vers des séquences souhaitables.

- **Composant final**

De la même façon que dans le cas précédent, la plupart des produits finissent leur assemblage avec un composant en particulier. Ce composant peut être un bouchon, un couvercle, une pièce fragile ou encore un composant ornemental, etc. Si l'on est capable d'introduire cette contrainte, on diminue encore plus le temps de calcul de l'algorithme,

l'explosion de séquences et nous fixons des marges plus étroites pour la génération de séquences d'assemblage souhaitables.

- **Premières liaisons possibles**

Dans cette étape, l'algorithme demande si toutes les liaisons qui ont été définies peuvent commencer l'assemblage. L'objectif est toujours le même: diminuer le temps de calcul et focaliser l'analyse de l'assemblage sur des séquences faisables et souhaitables dès le début. Si l'on regarde les liaisons du Tableau 5.1, de toute évidence, les liaisons «tête-encre», «tube-encre» et leurs inverses ne peuvent pas commencer l'assemblage du module C [rechange]. Également, pour le produit stylo, on voit que la liaison «corps-capuchon» et son inverse ne peuvent pas commencer l'assemblage à ce niveau. Avec cette information, l'algorithme prend seulement les liaisons qui peuvent commencer l'assemblage de chaque module et rejette les autres. De cette manière, il sauve beaucoup de temps de calcul inutile et focalise l'analyse sur la génération de séquences qui sont faisables et souhaitables. Évidemment, si l'on ne pose pas de contraintes initiales, il y aura une explosion combinatoire des résultats. De plus, si l'on ne spécifie pas les liaisons qui peuvent commencer l'assemblage, le logiciel fera le triage de liaisons jusqu'à ce qu'il trouve les liaisons de base, mais en utilisant beaucoup plus de temps de calcul pour rien. Ce problème existe dans toutes les méthodes exhaustives de génération de séquences connues jusqu'à aujourd'hui, lesquelles génèrent d'abord toutes les séquences possibles et font ensuite le triage au moyen de l'imposition de contraintes pour diminuer les milliers de

solutions trouvées. Avec la méthode proposée, ce problème est éliminé, ce qui nous permet de gérer des produits plus complexes.

Dans l'exemple du stylo, pour commencer l'assemblage du module **C**, on établit seulement la liaison 1 «tête-tube», comme celle étant capable de débuter l'assemblage. Une fois que les séquences d'assemblage du module rechange ont été définies, on commence l'analyse du module Stylo (le produit). Les liaisons qui peuvent commencer l'assemblage sont 1 «bouton-corps» et 2 «corps-rechange».

5.2.2 Initiation de la génération de séquences: sous-assemblage de deux composants

Pour la génération des sous-assemblages de base (les premiers deux composants), l'algorithme évalue seulement la fonction de contact de toutes les paires et considère qu'une paire qui a une f(c)=1 est un candidat valable pour débuter l'assemblage. L'algorithme n'évalue pas la fonction de translation à ce niveau, parce que si deux composants ont au moins une relation de contact et sont capables de commencer l'assemblage, il va toujours exister un chemin pour les unir. Si l'on considère les données du Tableau 5.1 pour le module **C** (rechange), selon la première étape de l'algorithme, toutes les paires sont capables de commencer l'assemblage de ce module, étant donné que toutes ont une fonction de contact positive (f(c) = 1).

5.2.3 Génération de sous-assemblages d'ordre supérieur

Pour continuer l'assemblage, une fois que les liaisons de base ont été définies, l'algorithme évalue la possibilité d'ajouter chaque fois un composant au sous-assemblage déjà fait. L'algorithme utilise l'algèbre boolienne pour établir d'abord si le nouveau composant a au moins un contact défini avec un des composants du sous-assemblage auquel on veut l'ajouter. Si le résultat est négatif, le composant reste en liste d'attente et l'algorithme essaie un autre composant jusqu'à ce qu'il en trouve un qui accomplisse la condition de contact. Une fois que l'algorithme trouve le composant, l'analyse continue pour savoir s'il y a un chemin libre afin de pouvoir assembler le nouveau composant.

S'il y a un chemin possible, le composant est ajouté et éliminé de la liste d'attente. Par contre, s'il y a pas de chemin possible, le composant reste sur la liste d'attente et l'algorithme fait l'essai avec le composant suivant sur la liste.

Cette procédure est répétitive. L'algorithme cherche, trouve et ajoute un composant. L'assemblage monte d'un niveau. L'algorithme élimine le composant ajouté de la liste d'attente et recommence jusqu'à que tous les composants soient assemblés.

Dans notre exemple du stylo, l'algorithme commence pour le module C (le niveau le plus bas dans l'arbre de hiérarchie). On a vu que la seule liaison que peut commencer l'assemblage est la n°1 «tête - tube». Suivant la procédure expliquée, on obtient:

[tête - tube] ∧ encre = [tête - encre] ∧ [tube - encre]

PAIRE	f(c)	f(t)
tête - encre	1	000100
tube - encre	1	100100
		000100

On s'assure que le composant «encre» ait des contacts avec les composants du sous- assemblage de base. On continue alors l'analyse. Dans la fonction de translation, il faut que la direction du chemin libre soit la même pour toutes les relations. Dans ce cas, c'est la direction 4 qui est libre. Vers cette direction, on peut donc enlever le composant de l'ensemble. La direction inverse (1) est la direction d'assemblage. L'assemblage final du module [rechange] est: [[tête - tube] encre]. Comme on l'a expliqué auparavant, il n'existe pas d'autre solution pour le module **C** [rechange]. Dans la section précédente, nous avons montré qu'il y a deux possibilités pour les liaisons de base dans le cas du stylo. Si l'on suit la même procédure pour l'assemblage de ce module, les calculs à faire sont:

Liaisons de base:

1. bouton - corps
2. corps - rechange

Sous-assemblages d'ordre supérieur:

Cas n°1 :

[bouton - corps] ∧ rechange = [bouton - rechange] ∧ [corps - rechange]

PAIRE	f(c)	f(t)
bouton - rechange	0	111011
corps - rechange	1	100000
		100000

Le rechange a un contact avec l'un des composants du sous-assemblage de base. On continue alors avec la fonction de translation. Le fait que dans la f(t) résultante, il y a la chiffre 1 à la première position indique qu'il existe une possibilité de sous- assemblage vers la direction 1. Donc, il existe une possibilité d'assemblage vers la direction inverse 4.

L'assemblage du stylo a maintenant trois composants: [[bouton - corps] - rechange]. On cherche quel est le composant suivant sur la liste, c'est-à-dire le capuchon. On utilise encore la notation logique et l'algèbre boolienne pour vérifier la possibilité d'assemblage:

[bouton - corps - rechange] Λ capuchon =

[bouton - capuchon] Λ [corps - capuchon] Λ [rechange - capuchon]

PAIRE	**f(c)**	**f(t)**
bouton - capuchon	0	111011
corps - capuchon	1	100000
rechange - capuchon	0	100000
		100000

Il y a au moins un contact entre les composants. On passe donc à la fonction de translation. La chiffre1 dans la direction 1 indique qu'il existe un chemin pour désassembler le capuchon vers la direction 1. La direction inverse 4 est la direction d'assemblage. Comme il n'y a plus de composant sur la liste d'attente, l'algorithme arrête et on obtient une des séquences faisables d'assemblage:

1.

bouton - corps

rechange

capuchon

Si l'on utilise l'algorithme pour évaluer toutes les possibilités d'assemblage pour le stylo, on obtient deux séquences de plus:

2.

corps - rechange

bouton

capuchon

3.

corps - rechange

capuchon

bouton

5.2.4 Imposition des contraintes technologiques et de procédure

Jusqu'à cette section, nous avons modularisé notre produit pour rendre l'assemblage plus facile et flexible. De plus, nous avons généré les séquences qui respectent les contraintes géométriques, topologiques et certaines contraintes de procédure (le premier et le dernier composant de l'assemblage) dans chaque module et dans le niveau plus élevé de la hiérarchie d' assemblage qui représente l'assemblage du produit au complet. Une fois que toutes les séquences d'assemblage qui accomplissent ces contraintes ont été générées, on introduit des restrictions technologiques et de procédure plus précises,

propres au système et dans l'environnement d'assemblage du produit analysé. Les contraintes les plus communes à considérer sont présentées ci-dessous.

- Stabilité

Une condition importante dont il faut tenir en compte est la stabilité de l'ensemble pendant chaque étape de son assemblage. L'imposition de cette contrainte empêche d'avoir des étapes d'assemblage non stables qui amènent des complications et l'utilisation de supports de travail coûteux. La stabilité de l'assemblage, à chaque étape, est une caractéristique importante qu'il faut rechercher dans les séquences générées, pour arriver à la conception d'un assemblage facile et à l'élimination de supports de travail compliqués.

- Composants avec un ordre d'assemblage spécifique

Cette contrainte représente la définition de l'ordre d'assemblage qui doit suivre un composant en particulier (ou des composants). Ce composant est additionné à l'ensemble dans un ordre arbitraire qui est décidé par l'usager en fonction des considérations différentes des contraintes géométriques et topologiques. Par exemple, on peut penser à un composant fragile que l'on préfère assembler vers la fin du processus. D'un autre côté, il y a des composants qu'il faut placer dans un ordre déjà défini, parce que, dans le cas contraire, le composant déjà assemblé empêche l'exécution d'une opération complémentaire à l'assemblage. Aussi, certains ordres d'assemblage peuvent réduire le degré d'habilité requis ou faciliter l'automatisation de la tâche.

- **Pile de composants**

Cette condition est donnée lorsque le produit présente des composants qui sont assemblés l'un sur l'autre et fixés tous ensemble au moyen des mêmes composants de fixation.

Les contraintes montrées sont les plus générales et compatibles avec n'importe quel système d'assemblage (manuel, robotisé ou dédié). Évidemment, chaque système d'assemblage a aussi ses propres contraintes. Par exemple, le changement d'outils est une contrainte importante pour un assemblage robotisé. Il appartient à l'usager de définir les contraintes à imposer afin de réduire le nombre de séquences d'assemblage et conserver celles qui sont faisables et souhaitables.

Les contraintes technologiques et de procédure sont fournies au programme en forme de contraintes de précédence. Le programme inclut un module interactif qui permet d'introduire les contraintes de façon itérative On peut exprimer ces contraintes de précédence de deux façons:

1) un composant doit être assemblé avant un autre, mais pas nécessairement de manière consécutive,
2) un composant doit être assemblé avant un autre de manière consécutive.

Pour bien comprendre cette étape de la méthode, on prend comme exemple la porte de four électrique domestique (voir Figure 4.3) qui a été analysée par Gottipolu (21). D'abord, il faut dire que la porte de four n'est pas un produit que l'on peut modulariser, mais elle possède des caractéristiques qui montrent très bien comment cette étape d'imposition de contraintes technologiques sert à focaliser encore plus l'analyse vers des séquences faisables et souhaitables.

Tableau 5.2 Liste de composants de la porte de four

1. Base,
2. Vitre intérieure,
3. Charnière,
4. Pièce de retenue,
5. Isolation,
6. Panneau,
7. Entretoise,
8. Cadre,
9. Vitre extérieure,
10. poignée,
11. Vis de fixation.

Pour ce produit, nous avons introduit les restrictions initiales suivantes:

a) la base (1) est considérée comme le premier composant,

b) la vis (11) est considéré comme le dernier composant,

c) nous avons éliminé des liaisons qui ne peuvent pas commencer l'assemblage et, à la fin, il n'est resté que deux liaisons possibles sur cinq:

[base - vitre intérieure]

[base - charnière]

L'algorithme a calculé 110 séquences pour cet assemblage. Jusqu'ici, l'algorithme a seulement considéré des contraintes géométriques et topologiques et les trois contraintes de procédure indiquées ci-dessus, et elles ont réduit l'ampleur des calculs et le nombre de séquences résultantes. Cependant, ce nombre de 110 séquences est encore trop élevé pour une analyse approfondie de chacune des séquences. Il faut donc réduire encore plus les possibilités avec des contraintes valables. C'est ici que les contraintes de précédence technologiques viennent en aide à l'usager. Pour notre exemple, nous avons utilisé deux restrictions technologiques.

1) Le panneau doit être assemblé avant le cadre, sinon cette pièce empêcherait de souffler de l'air comprimé sur le panneau. Il n'est pas nécessaire que les deux opérations soient consécutives. Avec cette nouvelle donnée, le logiciel refait le calcul et le nombre des séquences tombe à 50.

2) L'entretoise doit être assemblée avant le cadre, et celui-ci doit être assemblé de façon consécutive à l'entretoise, sinon cette entretoise tomberait puisqu'elle n'a pas de stabilité jusqu'à ce que le cadre soit posé. Cette nouvelle restriction technologique de précédence consécutive fait tomber le nombre de séquences d'assemblage à 10. Les résultats de cette génération sont présentés dans le Tableau 5.3.

Tableau 5.3 Séquences d'assemblage finales pour la porte de four

base	base	base
vitre intérieure	vitre intérieure	vitre intérieure
charnière	charnière	pièce de retenue
pièce de retenue	isolation	charnière
isolation	pièce de retenue	isolation
panneau	panneau	panneau
entretoise	entretoise	entretoise
cadre	cadre	cadre
vitre extérieure	vitre extérieure	vitre extérieure
poignée	poignée	poignée
vis de fixation	vis de fixation	vis de fixation
base	base	base
vitre intérieure	vitre intérieure	vitre intérieure
pièce de retenue	pièce de retenue	isolation
isolation	isolation	charnière
charnière	panneau	pièce de retenue
panneau	charnière	panneau
entretoise	entretoise	entretoise
cadre	cadre	cadre
vitre extérieure	vitre extérieure	vitre extérieure
poignée	poignée	poignée
vis de fixation	vis de fixation	vis de fixation
base	base	base
vitre intérieure	vitre intérieure	charnière
isolation	isolation	vitre intérieure
pièce de retenue	pièce de retenue	pièce de retenue
charnière	panneau	isolation
panneau	charnière	panneau
entretoise	entretoise	entretoise
cadre	cadre	cadre
vitre extérieure	vitre extérieure	vitre extérieure
poignée	poignée	poignée
vis de fixation	vis de fixation	vis de fixation

base
charnière
vitre intérieure
isolation
pièce de retenue
panneau
entretoise
cadre
vitre extérieure
poignée
vis de fixation

5.3 TRAITEMENT DES COMPOSANTS NON CARTÉSIENS

À la Section 4.7 du chapitre précédent, nous avons montré la façon dont les assemblages comportant des composants non cartésiens doivent être modélisés pour pouvoir utiliser l'algorithme de génération de séquences d'assemblage de Ghosh. Aussi, nous avons représenté trois assemblages à titre d'exemples pour montrer la méthodologie à suivre lors de la modélisation. Dans la présente section, nous allons utiliser les mêmes exemples pour montrer comment, avec les modèles réalisés et l'algorithme de génération de séquences, on atteint le but qui est de générer des séquences d'assemblage de produits comportant de composants non cartésiens.

5.3.1 Cas n° 1 : Composants non cartésiens distribués symétriquement et en contact avec une base

Au Tableau 4.1 on peut voir que ce type de produit peut débuter avec n'importe quelle liaison où **P** est présent. Pour la démonstration de la méthodologie à suivre pour la génération des sous-assemblages d'ordre supérieur, nous allons commencer par la liaison

PA. On pourrait commencer par n'importe quelle liaison et les résultats seraient toujours les mêmes. Les données sont aussi montrées au Tableau 4.1 et à la Figure 4.6.

[PA] ∧ B = PB ∧ AB

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
PB	1	60	1	100000
AB	1	60	0	111111

On observe que l'axe qui tourne et l'angle de rotation sont les mêmes pour les deux paires. Le repère est alors le même et on peut utiliser l'algèbre boolienne.

Comme il existe un contact entre [PA] et **B**, on passe à la f(t):

T(PB)	100000	Axe1 = 60°
T(AB)	111111	Axe1 = 60°
	100000	

B peut être assemblé de **PA** suivant une trajectoire de 60° par rapport à l'axe n° 1, ce qui veut dire que l'assemblage de **B** à [PA] se fait suivant la direction inverse à l'axe 1 tourné de 60°.La séquence résultante est [PAB]

[PAB] ∧ C = PC ∧ AC ∧ BC

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
PC	3	30	1	001000
AC	3	30	0	111111
BC	3	30	0	111111

L'axe qui tourne et l'angle de rotation sont les mêmes pour les trois paires. Le repère est le même et il y a au moins une relation de contact. On analyse donc f(t):

T(PC)	011000	Axe3 = 30°
T(AC)	111111	Axe3 = 30°
T(BC)	111111	Axe3 = 30°
	001000	

C est désassemblé vers la direction de l'axe 3 tourné de 30°. Donc, pour l'assembler, on utilise la direction de l'axe inverse (6), toujours dans un repère tourné de 30°, ce qui veut dire que C est assemblé suivant une trajectoire de 90° + 30° = 120°, par rapport à l'axe 1. La séquence résultante est [PABC].

[PABC] ∧ D = PD ∧ AD ∧ BD ∧ CD

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
PD	4	0	1	000100
AD	4	0	0	011111
BD	4	0	0	111111
CD	4	0	0	111111

Suivant la même procédure, on obtient:

T(PD)	000100	Axe4 = 0°
T(AD)	011111	Axe4 = 0°
T(BD)	111111	Axe4 = 0°
T(CD)	111111	Axe4 = 0°
	000100	

D est assemblé à [PABC] avec une trajectoire de 180° + 0° = 180° par rapport à l'axe 1. La séquence résultante est [PABCD].

[PABCD] ∧ E = PE ∧ AE ∧ BE ∧ CE ∧ DE

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
PE	4	60	1	000100
AE	4	60	0	111111
BE	4	60	0	011111
CE	4	60	0	111111
DE	4	60	0	111111

Suivant toujours la même procédure, on obtient:

T(PE)	000100	Axe4 = 60°
T(AE)	111111	Axe4 = 60°
T(BE)	011111	Axe4 = 60°
T(CE)	111111	Axe4 = 60°
T(DE)	111111	Axe4 = 60°
	000100	

E est assemblé suivant une trajectoire de 180° + 60° = 240° par rapport à l'axe 1. La séquence résultante est [PABCD]; Pour finir l'assemblage du produit, on a besoin d'y ajouter le composant **F** :

[PABCDE] ∧ F = PF ∧ AF ∧ BF ∧ CF ∧ DF ∧ EF

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
PF	6	30	1	000001
AF	6	30	0	111111
BF	6	30	0	111111
CF	6	30	0	110111
DF	6	30	0	111111
EF	6	30	0	111111

En appliquant l'algèbre boolienne, on obtient:

T(PF)	000001	Axe6 = 30°
T(AF)	111111	Axe6 = 30°
T(BF)	111111	Axe6 = 30°
T(CF)	110111	Axe6 = 30°
T(DF)	111111	Axe6 = 30°
T(EF)	111111	Axe6 = 30°
	000001	

Le composant **F** est assemblé à [PABCDE] suivant une trajectoire de 270° + 30° = 300° par rapport à l'axe 1, et la séquence final d'assemblage est [PABCDEF]. Comme on peut le remarquer dans ce premier cas, lorsqu'on ajoute un nouveau composant à un sous-assemblage déjà fait, l'axe et l'angle de rotation sont conservés parce que c'est toujours le même composant non cartésien qui bouge pour être assemblé.

5.3.2 Cas n° 2 : Composants non cartésiens distribués asymétriquement et en contact avec une base

Pour l'explication de ce cas, on prend les données du Tableau 4.2 et de la Figure 4.7.

[PA] ∧ B = PB ∧ AB

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
PB	3	60	1	001000
AB	3	60	0	111111

T(PB)	001000	Axe3 = 60°
T(AB)	<u>111111</u>	Axe3 = 60°
	001000	

Le composant **B** est assemblé à [PA] suivant une trajectoire de 90° + 60° = 150° par rapport à l'axe 1. La séquence résultante est [PAB].

[PAB] ∧ C = PC ∧ AC ∧ BC

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
PC	4	15	1	000100
AC	4	15	0	111111
BC	4	15	0	111111

T(PC)	000100	Axe4 = 15°
T(AC)	111111	Axe4 = 15°
T(BC)	111111	Axe4 = 15°
	000100	

Le composant **C** est assemblé à [PAB] suivant une trajectoire de 180° + 15° = 195° par rapport à l'axe 1. La séquence résultante est [PABC].

[PABC] ∧ D = PD ∧ AD ∧ BD ∧ CD

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
PD	6	30	1	000001
AD	6	30	0	111111
BD	6	30	0	111111
CD	6	30	0	111111

Le composant **D** est assemblé avec une trajectoire de 270° + 30° = 300° par rapport à l'axe 1. La séquence résultante est [PABCD].

Comme on peut le voir, la symétrie angulaire des composants n'est pas importante si tous les composants sont assemblés sur une même base.

5.3.3 Cas n° 3 : Assemblage avec des composants cartésiens et des composants non cartésiens

Les données se trouvent dans les Figures 4.8 et 4.9, et au Tableau 4.3.

[AB] ∧ C = AC ∧ BC

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
AC	4	45	1	000100
BC	4	45	0	111111

T(AC)	000100	Axe4 = 45°
T(BC)	111111	Axe4 = 45°
	000100	

Le composant **C** est ajouté à [AB] avec une trajectoire de 180° + 45° = 225° par rapport à l'axe 1. La séquence résultante est [ABC].

[ABC] ∧ D = AD ∧ BD ∧ CD

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
AD	6	60	0	111101
BD	6	60	1	000001
CD	6	60	0	111111

T(AD)	111101	Axe6 = 60°
T(BD)	000001	Axe6 = 60°
T(CD)	111111	Axe6 = 60°
	000001	

Le composant **D** est ajouté, suivant une trajectoire de 270° + 60° = 320° par rapport à l'axe 1. La séquence résultante est [ABCD].

Si l'on commence l'assemblage avec la liaison [AC], on obtient :

[AC] ∧ B = AB ∧ CB

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
AB	--	--	1	111101
CB	--	--	0	111111

T(AB)	111101	sans rotation
T(CB)	111111	sans rotation
	111101	

Le composant **B** peut être ajouté à [AC], suivant toutes les trajectoires cartésiennes, excepté la direction parallèle à l'axe 2 (inverse de l'axe 5). La séquence résultante est [ACB].

[ACB] ∧ D = AD ∧ CD ∧ BD

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
AD	6	60	0	111101
CD	6	60	0	111111
BD	6	60	1	000001

T(AD)	111101	Axe6 = 60°
T(CD)	111111	Axe6 = 60°
T(BD)	000001	Axe6 = 60°
	000001	

Le composant **D** est ajouté, suivant une trajectoire de 270° + 60° = 330° par rapport à l'axe 1. La Séquence résultante est [ACBD].

Finalement, on prend la dernière possibilité, c'est-à-dire la liaison [BD] comme liaison de base :

[BD] ∧ C = BC ∧ DC

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)
BC	4	45	0
DC	4	45	0

Comme il n'y a pas de fonction de contact positive, on ne peut pas ajouter le composant **C** à [BD] dans ce niveau. On va alors essayer de le faire avec le composant **A**.

[BD] ∧ A = BA ∧ DA

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
BA	--	--	1	101111
DA	--	--	0	101111

T(BA)	101111	sans rotation
T(DA)	<u>101111</u>	sans rotation
	101111	

Le composant **A** peut être assemblé à [BD], suivant des trajectoires de direction cartésienne, excepté la direction de l'axe 5 (inverse de l'axe 2). La séquence résultante est [BDA].

[BDA] ∧ C = BC ∧ DC ∧ AC

Paire	Axe tourné	Angle de rotation	f(c)	f(t)
BC	4	45	0	111111
DC	4	45	0	111111
AC	4	45	1	000100

T(BC)	111111	Axe4 = 45°
T(DC)	111111	Axe4 = 45°
T(AC)	000100	Axe4 = 45°
	000100	

Le composant **C** est ajouté à [BDA], suivant une trajectoire de 180° + 45° = 225° par rapport à l'axe 1. La séquence résultante est [BDAC]

Après ces trois exemples, nous pouvons conclure que le déroulement de l'algorithme est presque le même pour les assemblages qui contiennent seulement des composants

cartésiens et les assemblages qui contiennent des composants cartésiens et non cartésiens. La différence est donnée au moment de la modélisation, où l'on a besoin de deux données de plus pour le traitement des composants non cartésiens, c'est-à-dire l'axe qui sert de référence et l'angle nécessaire pour faire tourner cet axe.

CHAPITRE 6

FAMILLES DE PRODUITS

6.1 INTRODUCTION

Dans les Chapitres 4 et 5 de ce mémoire, nous avons parlé de manière explicite de la modélisation et de la génération des séquences d'assemblage pour un système d'assemblage de type monoproduit, une ligne ou une cellule où l'on assemble un produit à modèle unique. La plupart des autres travaux d'analyse des séquences d'assemblage agissent dans la même façon. De nos jours, un tel système ne convient plus à une grande partie de produits industriels. Les consommateurs d'aujourd'hui exigent des modèles de plus en plus variés. Les tendances actuelles rendent donc évidente la nécessité de répondre aux demandes diversifiées du marché et de modifier les systèmes de production afin de demeurer compétitif. Selon K. Suzaki (58), le défi consiste à concevoir les moyens de faire face à un marché orienté vers une diversification de produits sans cesse croissante, au sein duquel le cycle de vie des produits est chaque fois plus petit. On fait face à ce défi avec la conception de systèmes capables d'assembler tous les produits d'une famille à un coût et dans un temps minimaux.

6.2 DÉFINITION D'UNE FAMILLE DE PRODUITS

En accord avec la définition de Djemel, Lutz et Bourjault (16), une famille de produits est un groupe de produits qui accomplissent les mêmes fonctions principales, ce

qui veut dire que les produits qui appartiennent à une famille représentent les différentes versions d'un même produit fonctionnel. La formation d'une famille de produits peut avoir lieu dans l'un des deux cas suivants:

- Le produit de base doit changer de procédure d'assemblage pour chaque modèle. Ici, la famille présente des séries de produits qui ont chacune une technologie différente, ainsi que des fonctions et des composants optionnels.

- On doit ajouter des opérations et des composants supplémentaires au produit de base. La famille présente un groupe d'opérations et de composants communs à tous les membres de la famille, ainsi que des composants et des opérations que l'on a ajoutés au produit principal pour obtenir la diversité exigée par le marché (56).

6.3 CONCEPTION D'UN SYSTÈME D'ASSEMBLAGE MULTIMODÈLE

Lorsqu'on analyse l'implémentation d'un système d'assemblage multiproduit, l'objectif est de développer des cellules ou des lignes capables d'assembler tous les produits qui appartiennent à une famille. Dans certains cas, la conception d'un tel système ne requiert pas d'adaptations spéciales pour chaque modèle. Cependant, ce n'est pas le cas le plus commun. D'habitude, une variabilité des caractéristiques, dans les différents modèles d'une famille, amène la nécessité de modifier quelques opérations, l'implantation de nouvelles opérations et l'utilisation de nouveaux composants spécifiques à certains

modèles de la famille. Donc, lorsqu'on parle d'une cellule ou d'une ligne capable de produire une famille de produits, on parle de «flexibiliser» la cellule ou la ligne.

6.4 CONCEPTION D'UNE LIGNE D'ASSEMBLAGE À PRODUCTION MÉLANGÉE

L'objectif de la conception d'un système d'assemblage mélangé est de pouvoir assembler tous les membres d'une famille de produits dans une même cellule mais de façon aléatoire. Pour arriver à un système ayant ces caractéristiques, il est nécessaire d'assembler par petits lots. L'assemblage par petits lots a comme limite la production mixte ou mélangée qui, selon S. Shingo (54), présente les avantages suivants:

- elle peut réduire de façon maximale les stocks de produits,
- elle permet de niveler la charge du processus amont.

On peut aussi ajouter qu'avec une production mixte, on produit ce que l'on a besoin au moment où l'on en a besoin, de manière à ce que la courbe de demande des modèles et la courbe de production de modèles soient presque les mêmes. Lorsqu'on parle d'un système d'assemblage mixte, on parle de la nécessité de standardiser les opérations d'assemblage pour rendre possibles des changements de modèles sans gaspillage de temps dans des opérations de préparation.

6.5 APPROCHE POUR LA MODÉLISATION D'UN SYSTÈME D'ASSEMBLAGE MIXTE

D'après ce que l'on a abordé dans les deux dernières sections, on peut conclure que d'un côté, si l'on veut établir un système multiproduit, il est nécessaire d'adapter la cellule d'assemblage aux différents modèles de la famille. Par conséquent, il faut ajouter de la flexibilité. D'un autre côté, si l'on veut établir un système d'assemblage mixte (aléatoire), il faut standardiser de façon maximale les opérations afin d'obtenir un système efficace.

Masip (44) introduit un concept qui est très intéressant et qui permet de mettre en harmonie les deux contraintes. Dans son travail, il parle de la flexibilité minimale requise pour une cellule d'assemblage. Selon cette approche, lorsqu'on fait la conception d'un système multiproduit, le but principal est de profiter des ressemblances qui existent parmi les produits membres d'une famille. Ainsi, lors de l'implémentation du système, on peut partager les mêmes ressources entre les différents modèles de produits que l'on assemble dans la cellule. Le meilleur système est celui qui minimise la différence de la procédure d'assemblage entre les différents modèles (maximisation de la standardisation de procédure d'assemblage). Évidemment, un tel système réduit les investissements, le temps de mise en cours, la complexité des contrôles, le coût de production et simplifie les tâches d'assemblage, tout en réduisant les erreurs et en augmentant la productivité. Donc, l'idéal est d'avoir un système complètement rigide pour toute la famille de produits.

Dans la réalité, pour faire face aux différences des modèles, on a besoin d'une flexibilité dans le système d'assemblage, mais comme Masip l'indique, la flexibilité n'est pas un objectif en soi, mais un moyen pour obtenir des produits de façon profitable. Henrioud et Stadzisz (57) concluent que, dans le cas d'un système multiproduit, il faut concevoir un système le plus rigide possible avec la flexibilité strictement nécessaire.

Dans la pratique, le premier pas pour réduire la flexibilité requise dans un système d'assemblage est la diminution des variations entre les modèles d'un produit pendant la conception. Le but principal, lorsqu'on introduit des variations dans une famille est d'obtenir certaines caractéristiques fonctionnelles. Donc, au moment de la conception d'une famille de produits, il faut considérer la standardisation maximale des composants qui puissent accomplir les exigences fonctionnelles.

6.5.1 Classification des composants et standardisation dans une famille de produits

Pour classer les différents composants de chaque produit membre d'une famille, on examine la fonction que chaque composant accomplit dans le produit auquel il appartient et on fait la classification en fonction de cette caractéristique. Ainsi, on forme des groupes de composants équivalents. Une fois que l'on a classé tous les composants, chaque groupe équivalent peut être considéré comme un composant générique, représenté par un composant fictif qui appartient à toute une série de produits membres de la famille. Chaque série de produits membres de la famille devient elle aussi un produit générique fictif.

Pour la classification des composants fonctionnels dans des groupes équivalents, nous allons utiliser la classification que Djemel, Lutz et Bourjault (16) et Stadzisz et Henrioud (56) donnent à ce qu'ils appellent ***les composants fondamentaux.***

- **Composants communs:** Ce sont tous les composants qui sont identiques dans tous les produits membres d'une famille et qui accomplissent la même fonction.

- **Composants pseudo-variables:** Ce sont des composants qui accomplissent la même fonction et qui sont présents dans tous les produits d'une famille, mais qui ne sont pas identiques entre eux. Par contre, les différences que l'on trouve parmi les composants de ce groupe n'ont pas d'influence sur la procédure d'assemblage (par exemple, la différence de couleur, de matériel, de géométrie).

- **Composants variables:** Ce sont des composants qui sont aussi présents dans tous les produits d'une famille et qui accomplissent la même fonction dans le produit auquel ils appartiennent. Cependant, ce type de composant possède des caractéristiques physiques différentes exigeant des changements dans la procédure d'assemblage en fonction du modèle assemblé.

- **Composants optionnels:** Ce sont des composants qui sont présents seulement dans quelques produits membres de sa famille.

Pour mieux comprendre l'utilisation des nouveaux concepts, on présente l'exemple suivant :

- nombre de modèles du produit : 4,
- nombre de composants par modèle : 8,
- le composant **G** varie complètement dans tous les modèles,
- composants communs : **A**, **F**, **H**,
- composants pseudo-variables : **B**, **C**, **E**,
- composants optionnels : **D**.

Pour les conditions précédentes, on présente ci-dessous le tableau relationnel qui les illustre.

Tableau 6.1 Classification des composants d'une famille de produits

Composant	Produit 1	Produit 2	Produit 3	Produit 4	Classification
1	A	A	A	A	commun
2	B1	B2	B1	B2	pseudo
3	C1	C1	C2	C2	pseudo
4	--	--	D1	D2	optionnel
5	E1	E2	E3	E4	pseudo
6	F	F	F	F	commun
7	G1	G2	G3	G4	variable
8	H	H	H	H	commun

Dans ce tableau, on peut observer une série formée par les produits **1** et **2**, que l'on appellera le produit générique **S1**, avec les composants génériques **A**, **B**, **E**, **F**, **G**, **H**. Aussi, on peut voir que le produit **3** est le même que **S1**, mais cette fois avec le composant optionnel **D1**. Le produit **4** a, lui aussi, la même structure que **S1**, mais cette fois avec le composant optionnel **D2**. On peut représenter les sous-familles de la famille de produits de l'exemple de la façon suivante :

$$\textbf{S1, et [S1 + (groupe générique optionnel D)] = S1, S2} \qquad (6.1)$$

où:

S1 : est la structure de base qui représente les produits 1 et 2 au complet,

S2 : représente la structure des produits **3** et **4**: **S1** + [D1] et **S1** + [D2],

et où:

D1 et **D2** sont des composants optionnels qui appartiennent aux produits **3** et **4** respectivement.

Pour maximiser la standardisation d'un système d'assemblage multiproduit, l'idéal est de regrouper d'abord les opérations reliées aux composants communs et pseudo-variables. Ensuite, en fonction des caractéristiques physiques et le degré de flexibilité exigé, on peut ajouter les composants variables, laissant pour la fin les opérations reliées aux composants optionnels qui vont exiger de toute façon un certain degré de flexibilité. Un système conçu de cette manière assure une standardisation maximale de celui-ci en gardant toujours la flexibilité minimale requise pour assembler tous les produits de la famille.

6.5.2 Modularisation de l'assemblage pour une famille de produits

Une fois que les produits génériques et leurs composants ont été définis, la prochaine étape dans la modélisation est la modularisation de la structure d'assemblage de chaque produit générique trouvé dans la famille. La méthodologie pour modulariser les produits génériques est la même que l'on utilise pour le cas de la modularisation des produits à modèle unique, mais en ajoutant la contrainte de former autant que possible des modules

communs à tous les produits génériques de la famille. Ces modules doivent être les plus grands possible pour assurer une standardisation maximale. De la même façon, les composants variables (en fonction du degré de flexibilité qu'ils exigent) et les composants optionnels doivent idéalement être placés dans le premier niveau de hiérarchie du produit pour assurer la flexibilité minimale nécessaire à l'assemblage de toute la famille de produits et ce, toujours en respectant les contraintes géométriques et topologiques de chaque produit membre de la famille.

Si l'on suppose que les contraintes géométriques et topologiques sont connues pour l'exemple précédent, la modularisation des produits génériques pourrait être :

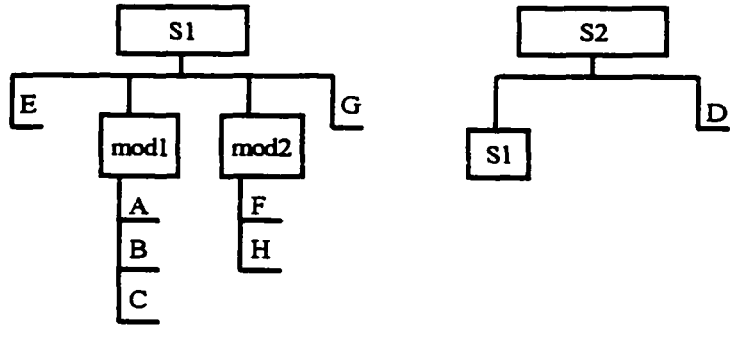


Figure 6.1 Modularisation d'une famille de produits

Comme on peut l'observer dans la modularisation du produit de base **S1**, on a modularisé celui-ci de manière à avoir des opérations standards dans ces deux modules. Pour y arriver, nous les avons définis avec des composants communs ou pseudo-

variables. Ensuite, dans le niveau principal de hiérarchie de l'assemblage, nous avons placé le composant générique **G**, qui est variable et qui exige un certain degré de flexibilité. Pour le produit générique **S2**, nous avons utilisé le produit **S1** comme module et nous avons ajouté le composant générique optionnel **D** dans le niveau principal de hiérarchie. La modularisation présentée nous assure que la plus grande partie de la cellule d'assemblage ait des opérations rigides, ce qui garantit la standardisation maximale de l'assemblage. Cette modularisation garantit aussi l'ajout de la flexibilité nécessaire, mais seulement à la fin de la cellule où les produits seront différenciés.

6.6 GÉNÉRATION DE SÉQUENCES D'ASSEMBLAGE POUR UNE FAMILLE DE PRODUITS

Pour la génération des séquences d'assemblage d'une famille de produits, on utilise la même méthodologie que pour les produits du modèle unique. Cependant, il faut maintenant générer des séquences d'assemblage pour chaque produit générique. Dans notre exemple, nous faisons d'abord la génération de séquences d'assemblage pour le produit générique **S1** qui représente une série de produits. Ensuite, on fait la génération des séquences d'assemblage pour le produit générique **S2** qui représente les produits restants. Il faut noter que, lors de la génération de **S2**, on considère **S1** comme un composant.

CHAPITRE 7

ÉVALUATION PROPOSÉE POUR LES SÉQUENCES D'ASSEMBLAGE, ET LA SÉLECTION ET L'IMPLANTATION DE LA SÉQUENCE CHOISIE

7.1 INTRODUCTION

Jusqu'à ce jour, les chercheurs n'ont pas trouvé une méthodologie standard pour évaluer les séquences générées. Quelques auteurs ont publié des travaux dans ce domaine, comme Ben Arieh (3), Henrioud, Bonneville et Bourjault (23), Laperrière et ElMaraghy (38), entre autres. Cependant, étant donné la complexité du problème, il n'est pas encore possible de concevoir cette méthodologie d'évaluation standard. De toute façon, il y a un point sur lequel tous les chercheurs sont d'accord; c'est la nécessité d'utiliser des évaluations qualitatives des séquences, puisque c'est le seul moyen d'arriver à sélectionner la meilleure séquence d'assemblage possible. Le problème est la définition des restrictions à considérer et leur modélisation pour réaliser cette évaluation.

La méthodologie proposée, pour la génération des plans d'assemblage de produits complexes, dirige le processus de génération depuis le début afin d'obtenir comme résultat seulement les séquences d'assemblage faisables et souhaitables, en accord avec notre réalité et l'environnement d'assemblage. Comme tous les problèmes réels, la génération de séquences d'assemblage est un problème complexe dans lequel il y a beaucoup de variables dont il faut tenir compte; pour cette raison, il est très rare d'arriver

à une seule séquence comme résultat de la génération. Même si l'on impose des contraintes pour réduire le nombre de séquences résultantes, il reste habituellement entre 5 et 20 séquences faisables et souhaitables qui satisfont toutes les contraintes imposées. Ces séquences doivent être évaluées afin de choisir la meilleure.

La méthode d'évaluation proposée pour sélectionner la séquence qui sera choisie est une combinaison d'analyse quantitative et qualitative. Nous avons opté pour cette approche, parce que nous avons constaté que l'application d'un seul type d'analyse n'est pas suffisante pour trouver la solution du problème. L'analyse qualitative est faite de façon itérative et chaque fois de manière plus fine en imposant des contraintes plus spécifiques. L'analyse quantitative est faite en considérant deux caractéristiques mesurables: le temps et le coût d'assemblage.

7.2 DÉFINITION DES SÉQUENCES D'ASSEMBLAGE DÉTAILLÉES

Dans les chapitres précédents, nous avons parlé de séquences d'assemblage formées seulement par des opérations d'assemblage des composants solides fonctionnels. Cependant, dans la réalité, l'assemblage de la plupart des produits complexes est beaucoup plus que la fixation des composants fonctionnels. D'habitude, des opérations complémentaires liées aux opérations de fixation des composants fonctionnels sont nécessaires pour compléter l'assemblage. Donc, une séquence d'assemblage détaillée est définie comme étant l'ensemble des opérations fonctionnelles et des opérations complémentaires nécessaires pour la réalisation du produit.

7.2.1 Opérations complémentaires

Les opérations complémentaires sont celles qui complètent l'action effectuée pour les opérations fonctionnelles. Dans l'assemblage d'un produit réel et complexe, on peut observer que beaucoup d'opérations fonctionnelles doivent avoir des opérations antécédentes ou/et des opérations postérieures qui sont nécessaires pour compléter leur action et pour qu'on puisse considérer l'ensemble des opérations comme une tâche complète d'assemblage. Ces opérations nommées complémentaires sont toujours liées aux opérations fonctionnelles lesquelles sont antécédentes ou postérieures. Si l'on prend l'assemblage d'un produit mécanique complexe, on trouve des opérations complémentaires comme:

- poser un composant élémentaire ou modulaire sur un support de travail,
- appliquer de la graisse,
- remplir d'huile un composant élémentaire ou modulaire,
- contrôler le fonctionnement d'un sous-système fonctionnel,
- appliquer un certain couple de serrage à un composant mécanique,
- réorienter un composant pour continuer l'assemblage.

Certaines opérations complémentaires sont inhérentes à l'assemblage et on ne peut pas obtenir le produit si l'on n'accomplit pas ces opérations. C'est le cas pour:

- poser un composant sur un support de travail,
- appliquer de la graisse,
- remplir d'huile un composant,
- appliquer un certain couple de serrage à un composant mécanique.

Chaque opération complémentaire qui est inhérente à l'assemblage est liée à une opération fonctionnelle pour ainsi accomplir des tâches complètes. Les autres opérations ne sont pas inhérentes à l'assemblage, mais on les utilise pour assurer le bon fonctionnement des sous-systèmes ou des modules fonctionnels qui forment le produit. Ces types d'opérations sont aussi appelés opérations de contrôle. C'est le cas de l'opération: «contrôler le fonctionnement de certains sous-systèmes ou module fonctionnel».

Finalement, il y a un dernier type d'opération complémentaire qui est présent en fonction de la génération des séquences d'assemblage. Ce type d'opération peut être présent dans une séquence et ne pas exister dans une autre séquence générée pour le même produit. L'exemple le plus commun est la réorientation d'un composant ou d'un module. Dans certaines séquences générées, la réorientation doit avoir lieu pour pouvoir assembler un composant. Par contre, dans d'autres séquences, cette opération de réorientation n'est pas nécessaire.

De l'explication précédente, on peut conclure que les opérations complémentaires peuvent être classées en trois catégories :

- complémentaires inhérentes à l'assemblage,
- complémentaires de contrôle,
- complémentaires circonstancielles.

Les opérations complémentaires ne donnent pas de la valeur ajoutée au produit, mais dans la plupart des cas, elles sont nécessaires dans un assemblage réel. Les opérations complémentaires inhérentes à l'assemblage dépendent de la conception du produit et de l'environnement d'assemblage. Même si elles ne donnent pas de la valeur ajoutée au produit, elles contribuent de façon directe à ce que les opérations fonctionnelles puissent augmenter la valeur du produit. Les opérations complémentaires de contrôle ne donnent pas non plus de valeur ajoutée au produit, mais selon le produit, et selon sa complexité et la fiabilité qu'il faut conserver, elles sont quelquefois nécessaires. Les opérations complémentaires circonstancielles ne contribuent pas à incrémenter la valeur ajoutée d'un produit, ni à vérifier le bon fonctionnement d'un sous-assemblage ou d'un module fonctionnel. Elles sont donc des opérations qui n'amènent que du gaspillage de temps et d'argent. Il faut bien analyser les séquences d'assemblage qui ont besoin de ce type d'opération, puisque plus elles sont présentes, plus la séquence est inefficace.

7.2.2 Séquence d'assemblage détaillée

Avant de commencer une évaluation quantitative des séquences d'assemblage générées, il faut détailler chacune des séquences. La modélisation et la méthodologie de génération de séquences d'assemblage considèrent seulement l'assemblage des composants fonctionnels, lesquels, comme on l'a déjà expliqué, sont ceux qui ajoutent de la valeur au produit. Une fois que l'on a obtenu les séquences d'assemblage faisables et souhaitables, on doit compléter chaque séquence en ajoutant les opérations complémentaires nécessaires. De cette façon, chaque séquence générée devient une liste séquentielle détaillée des opérations qu'il faut effectuer pour arriver à l'obtention du produit voulu.

Il est d'abord nécessaire d'ajouter les opérations complémentaires inhérentes à l'assemblage et les lier aux opérations fonctionnelles avec lesquelles elles forment des tâches complètes d'assemblage. Voyons, par exemple, les trois opérations suivantes:

1) poser le carter dans la presse (opération complémentaire inhérente),
2) positionner le roulement dans le carter et presser (opération fonctionnelle),
3) enlever le carter et le transporter à la station suivante (opération complémentaire inhérente).

D'abord, on a ajouté deux opérations complémentaires inhérentes à l'assemblage (n°1 et n°3) et nous les avons liées avec une opération fonctionnelle (n°2) pour avoir une

tâche d'assemblage complète. Deuxièmement, selon le produit et la modularisation que l'on fait, il est aussi nécessaire d'ajouter les opérations de contrôle aux bons endroits dans les séquences, de façon à ce que ces opérations assurent le niveau de fiabilité que l'on veut atteindre pour le produit.

Par exemple, l'opération complémentaire de contrôle de l'étanchéité d'un carter après l'avoir rempli d'huile doit être faite lorsque l'opération de presser le dispositif d'étanchéité dans le carter est déjà faite et que le carter est déjà rempli d'huile, mais avant de fixer le bouchon qui terminera l'assemblage de ce module.

L'exemple précédent montre les contraintes que l'on a pour placer une opération complémentaire de contrôle dans une séquence donnée. La plupart des contraintes sont déjà prises en considération, lors de la modélisation de l'assemblage du produit où l'on établit une structure modulaire du produit constituée par des modules fonctionnels. Selon le module assemblé, il peut être nécessaire d'ajouter, à la fin, une opération complémentaire de contrôle.

Finalement, on doit ajouter les opérations complémentaires circonstancielles et propres à chaque séquence générée. Comme on l'a déjà dit, ce type d'opérations ne fait que créer du gaspillage et elle est le reflet d'une séquence qui peut être est faisable et souhaitable parce qu'elle satisfait toutes les contraintes qu'impose notre réalité. Cependant, au moment de l'évaluation quantitative, il est sûr que plus une séquence a des

opérations complémentaires circonstancielles, moins elle a de chances d'être choisie comme la séquence à implanter. Voyons, par exemple, pour les cinq opérations suivantes:

1) poser le roulement n°2 dans la partie postérieure du carter,
2) tourner le carter (opération complémentaire circonstancielle),
3) presser le roulement n°1 dans la partie frontale du carter,
4) tourner le carter (opération complémentaire circonstancielle),
5) presser le dispositif d'étanchéité dans la partie postérieure du carter.

Il est évident qu'au moins une opération de tournage de carter devrait être éliminée dans le cas précédent.

Une séquence formée dans la manière décrite dans cette section représente l'assemblage d'un produit de façon détaillée. L'évaluation quantitative que nous présentons à la section 7.3 pour choisir la meilleure séquence est donc plus réaliste et nous donne une idée plus exacte du coût de l'assemblage.

7.3 ÉVALUATION QUANTITATIVE

Pour sélectionner la séquence d'assemblage qui sera implantée, on utilise une évaluation basée sur des critères quantitatifs mesurables. Les critères considérés pour l'évaluation quantitative des séquences sont le temps et le coût d'assemblage. Chaque

séquence détaillée est évaluée opération par opération. La séquence à implémenter est celle dont le coût et le temps d'assemblage sont les moins élevés. Cette approche a été recommandée par Ghosh (19a).

Le coût et le temps d'assemblage de chaque opération de la séquence évaluée peuvent être obtenus de deux façons, selon les données qui sont disponibles. Si le produit analysé se trouve dans la phase de conception, on utilise les évaluations du temps et du coût d'assemblage, qui ont été calculés par le logiciel DFMA TOOLKIT (6). Dans ce cas, le logiciel évalue le coût d'assemblage de chaque composant en fonction de ses caractéristiques physiques et le degré de difficulté qu'il présente lors de l'assemblage. Les opérations complémentaires sont ajoutées à chaque séquence au moyen d'une fonction du logiciel qui permet d'ajouter ce qu'on appelle des opérations spéciales. Les temps de ces opérations complémentaires doivent être évalués en utilisant l'une des différentes méthodes que le génie industriel met à notre disposition (temps prédéterminé, par exemple).

Au contraire, si le produit est déjà en phase de production et que l'analyse est faite pour l'amélioration du système d'assemblage existant, on utilise les données de temps et de coût d'assemblage réels pour les opérations d'assemblage fonctionnelles et pour les opérations complémentaires. Dans ce deuxième cas, l'utilisation du logiciel DFMA est optionnelle, mais recommandable parce qu'il facilite de beaucoup les calculs à faire. L'utilisation de ce logiciel et l'utilisation de l'une des deux méthodes d'obtention de

données amènent la sélection de la séquence ou des séquences avec le temps et le coût d'assemblage minimaux.

7.4 ÉVALUATION QUALITATIVE DES SÉQUENCES ÉCONOMIQUEMENT SOUHAITABLES

Après l'évaluation quantitative, on peut obtenir deux résultats: une seule séquence avec un coût et un temps d'assemblage minimaux ou plus d'une séquence avec les mêmes coût et temps minimaux. S'il y a seulement une séquence avec le coût et le temps minimaux, on doit simplement réaliser l'équilibrage de ligne qui permette l'obtention du niveau de production voulu. Par contre, si plusieurs séquences ont les mêmes coût et temps minimaux, nous devons continuer l'évaluation de façon qualitative. Comme nous l'avons dit, l'évaluation qualitative est un processus itératif d'imposition de contraintes de procédure plus restrictives, basées sur de considérations plus spécifiques qui sont trouvées lors de l'analyse des séquences détaillées d'assemblage. La dernière contrainte à poser est le niveau de production requis. Cette contrainte sert finalement à choisir quelle séquence s'adaptera le mieux à nos besoins. Ici encore, il faut distinguer entre l'analyse d'un produit dans sa phase de conception et un produit déjà en production. Dans le premier cas, lorsque l'équilibrage de ligne est faite pour un niveau de production donné, le critère principal d'évaluation est la logique de la répartition des tâches d'assemblage, la fluidité et l'efficacité que chaque séquence permet pour le niveau de production voulu. Dans le deuxième cas, il faut évaluer quel équilibrage de ligne peut atteindre le niveau de

production dont on a besoin tout en respectant le critère précédent, mais avec le moins de changements possible dans la ligne existante. La raison en est qu'à ce niveau, toutes les séquences ont les mêmes coût et temps d'assemblage, donc la meilleure séquence est celle qui permet d'atteindre le niveau de production voulu et qui exige le moins de changement possible (investissements) dans la ligne existante. Puisque les séquences d'assemblage sont déjà définies, nous ne pouvons pas utiliser les algorithmes classiques d'agroupation d'opérations pour l'équilibrage de ligne qui sont présentées par Chow (13). Le processus d'équilibrage de ligne nécessaire est limité à regrouper les opérations en respectant les critères précédents et en utilisant les différentes techniques que nous offre le génie industriel.

Pour le cas des produits multimodèles, la méthodologie est la même. Cependant, on travaille avec des produits génériques qui représentent une série de modèles. Des autres objectifs s'ajoutent comme, par exemple, celui d'obtenir une ligne capable d'assembler tous les modèles de la famille de façon aléatoire, mais en gardant une standardisation des opérations d'assemblage maximale et une flexibilité minimale.

CHAPITRE 8

APPROCHE PROPOSÉE POUR LA PLANIFICATION DES SYSTÈMES D'ASSEMBLAGEAVEC L'AIDE DES ORDINATEURS

8.1 INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons expliqué les différentes procédures qui sont utilisées dans l'approche proposée pour la planification de système d'assemblage. Cette approche est basée sur les concepts du CAPP (Computer Aided Process Planning). Elle utilise la connaissance, l'expérience et le savoir-faire de l'usager par rapport au produit analysé et son environnement d'assemblage pour modéliser le produit de façon à obtenir un modèle compatible à toutes les exigences imposées par les différentes parties responsables dans la conception du produit, la production et le service après-vente. Aussi, l'approche utilise des algorithmes informatisés qui aident l'usager à choisir la meilleure séquence d'assemblage adaptée à sa réalité. Il faut remarquer que, lorsqu'on parle de l'usager, on fait référence à un groupe multidisciplinaire qui travaille dans un environnement d'ingénierie simultanée.

Dans ce chapitre nous utilisons le mot ***module*** dans deux sens: premièrement, nous l'utilisons pour faire référence à un groupe de composants assemblés selon la définition donnée au Chapitre 3. Deuxièmement, nous utilisons ce mot pour représenter une partie

d'un programme informatique structuré. Le lecteur peut comprendre le sens du mot par le contexte dans lequel nous l'utilisons.

8.2 STRUCTURE DE L'APPROCHE PROPOSÉE

La méthodologie que l'on propose repose sur huit modules, chacun ayant un but différent mais complémentaire. Ces modules sont présentés dans la Figure 8.1. Toutes les activités ne sont pas informatisées entièrement; l'objectif est plutôt d'utiliser les méthodes informatiques pour augmenter la productivité de l'ingénieur spécialiste.

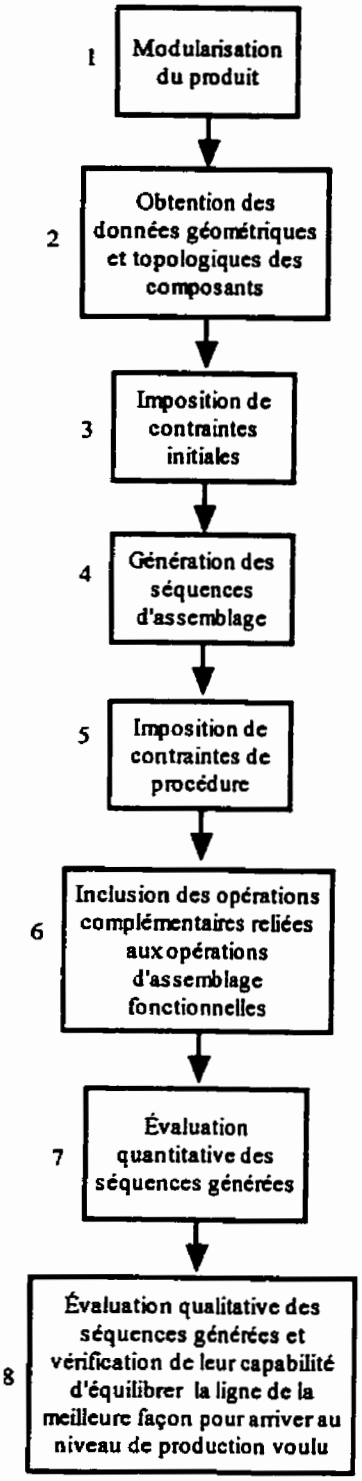


Figure 8.1 Structure de l'approche proposée

8.3 MODULARISATION DU PRODUIT

Ce module a pour objectif de diviser le produit en modules fonctionnels distribués sur un arbre hiérarchique, de façon à rendre l'assemblage plus logique et à éliminer le danger d'une explosion de solutions, lors de la génération de séquences d'assemblage. Cette modularisation permet de répartir la complexité du produit entre les modules fonctionnels définis, lesquels sont indépendants les uns des autres du point de vue de l'assemblage.

La modularisation d'un produit n'est pas informatisée et elle est basée sur l'analyse que le groupe responsable fait, dans un contexte d'ingénierie simultanée, et l'application de la méthodologie expliquée dans le Chapitre 4. Le diagramme logique de ce module est présenté à la Figure 8.2.

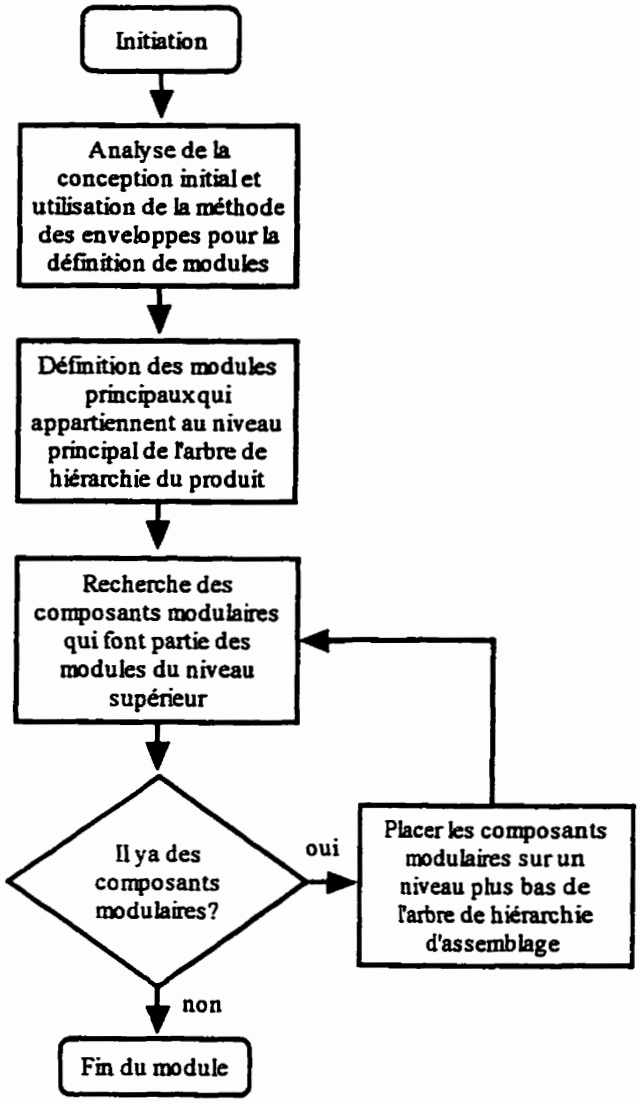


Figure 8.2 Diagramme logique du module de modularisation de produit

8.4 OBTENTION DES DONNÉES GÉOMÉTRIQUES ET TOPOLOGIQUES

L'approche prévoit l'obtention des données géométriques et topologiques par module. Ainsi, le nombre de fonctions contact et translation que l'on doit fournir au logiciel pour

la génération de séquences d'assemblage diminue de façon considérable, puisqu'on relationne seulement les composants qui appartiennent à un même module et non tous les composants, comme il est suggéré dans les approches binaires.

La plupart des entreprises ne travaillent pas avec le logiciel de conception PADL-2, duquel l'algorithme de génération de séquences d'assemblage conçu par Ghosh (19) peut extraire les données de façon automatique au moyen d'un programme FORTRAN d'interaction développé par Gottipolu (21). Aussi, jusqu'à présent, nous ne sommes pas en mesure d'extraire les données des autres logiciels de CAO. Ainsi, le module d'obtention de données géométriques et topologiques, qui est compris dans le logiciel de génération de séquence d'assemblage développé, prévoit l'obtention de ces données de façon interactive. Chaque écran présenté par le logiciel possède une fenêtre d'interaction à travers laquelle le programme demande les données dont il a besoin et les réponses sont ensuite visualisées sur la fenêtre principale. Il faut dire que, dans ce module, nous avons simplifié la fonction contact en éliminant cinq des six entrées de chaque vecteur de la fonction. C'est possible de le faire parce que l'algorithme a simplement besoin de savoir s'il y a ou non une relation de contact entre les composants analysés. Cette information peut être fournie avec un vecteur d'une seule entrée binaire pour chaque paire de composants. Le diagramme logique du module d'obtention de données est présenté à la Figure 8.3.

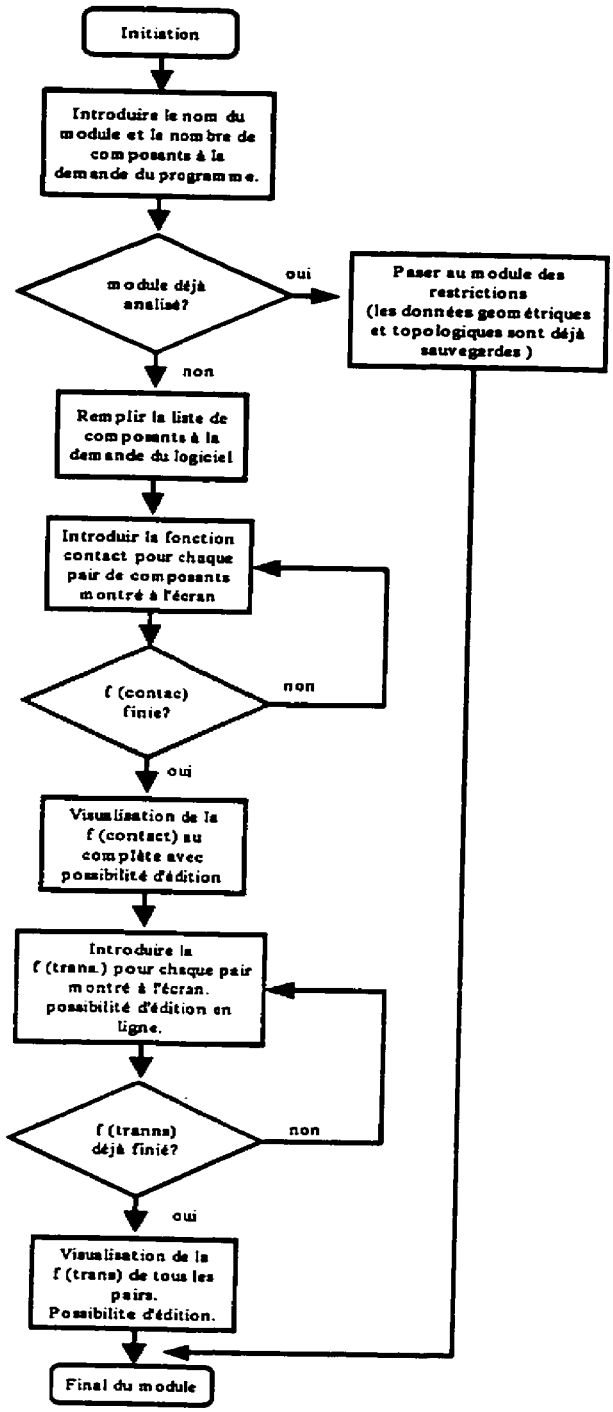


Figure 8.3 Diagramme logique du module d'obtention de données

8.5 IMPOSITION DE CONTRAINTES INITIALES

Le module de contraintes initiales a pour but de réduire le grand nombre de solutions qui sont obtenues si la génération de séquences d'assemblage est faite directement à partir du module d'obtention de données. Aussi, ce module épargne beaucoup de temps de calcul d'ordinateur, puisque l'utilisateur dirige le processus de la génération de séquences d'assemblage dans une direction désirée. Les contraintes initiales que l'on pose avant le module de génération d'assemblage ont été déjà présentées dans la Section 5.2.1. Le diagramme logique du module est présenté à la figure 8.4.

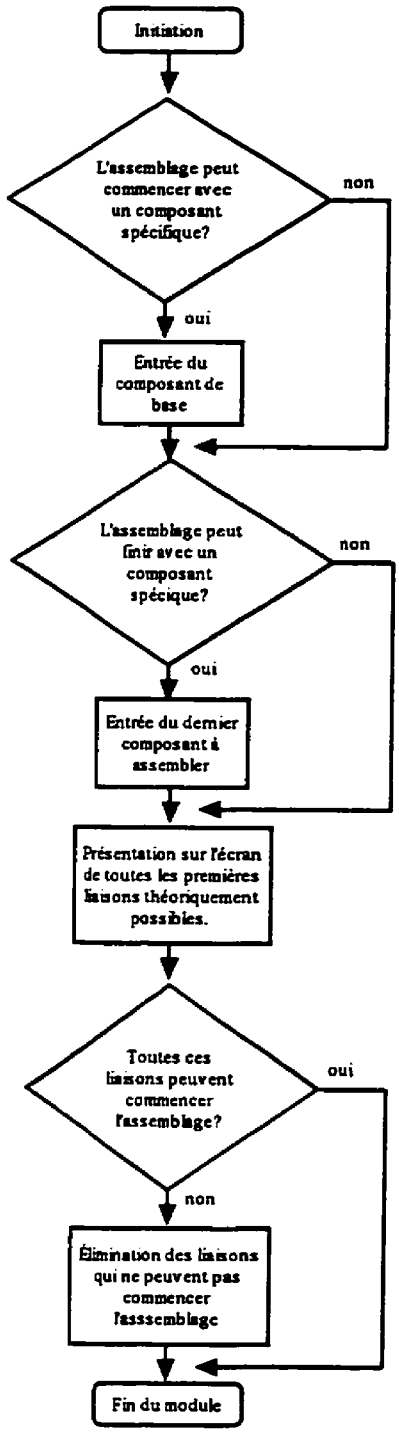


Figure 8.4 Diagramme logique du module d'imposition des contraintes initiales

8.6 GÉNÉRATION DES SÉQUENCES D'ASSEMBLAGE

Le module de génération de séquences d'assemblage a pour objectif de générer toutes les séquences d'assemblage possibles qui satisfont les contraintes des modules 2 et 3. La génération de séquences est une procédure automatique réalisée par ordinateur. Le résultat de ce module est une liste qui présente le nombre de séquences d'assemblage trouvées à chaque niveau durant le processus d'assemblage. Aussi, le programme nous demande au moyen de la fenêtre d'interaction, s'il y a des contraintes de précédence qui doivent être ajoutées à cause de la procédure d'assemblage ou si l'analyse se termine à ce point. Si l'on n'a pas de contrainte de procédure à imposer, le programme affiche sur l'écran chaque séquence trouvée pour l'assemblage. Au contraire, si l'on a des contraintes à poser, le programme affiche sur l'écran la liste de composants et il passe au module d'imposition de contraintes de procédure.

En fait, ce module et le module d'imposition de contraintes de procédure travaillent de façon conjointe, mais pour rendre l'explication plus systématique, les deux modules sont présentés séparément. Le diagramme logique du module de génération de séquences d'assemblage est présenté à la Figure 8.5.

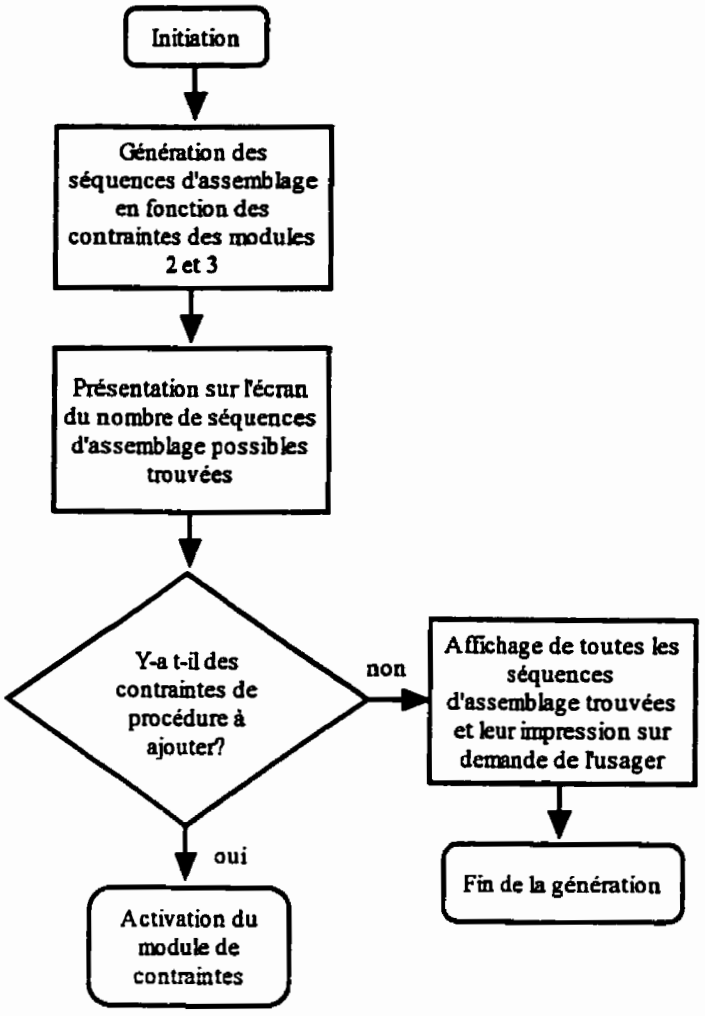


Figure 8.5 Diagramme logique du module de génération de séquences d'assemblage

8.7 IMPOSITION DE CONTRAINTES TECHNOLOGIQUES ET DE PROCÉDURE

Ce module a pour but de diminuer la quantité de séquences d'assemblage générées, en gardant seulement celles qui s'adaptent ou qui peuvent s'adapter à notre environnement d'assemblage. Ainsi, on peut visualiser ce module comme un filtre. Les contraintes de

procédure sont demandées par le programme à la fenêtre d'interaction en forme de restrictions de précédence. Ensuite, le module fait un filtrage encore plus fin en demandant toujours sur la fenêtre d'interaction si la restriction de précédence à respecter est de caractère consécutif. Les séquences résultantes de ce filtrage sont vraiment celles qui accomplissent les contraintes géométriques et technologiques et qui sont aussi en accord avec la procédure désirée. Ici, il faut noter qu'on ne doit pas hésiter à imposer des contraintes de procédure parce qu'elles peuvent être répétées. Si c'est le cas, le programme ne tiendra simplement pas compte de la contrainte. Le diagramme logique de ce module est présenté à la Figure 8.6.

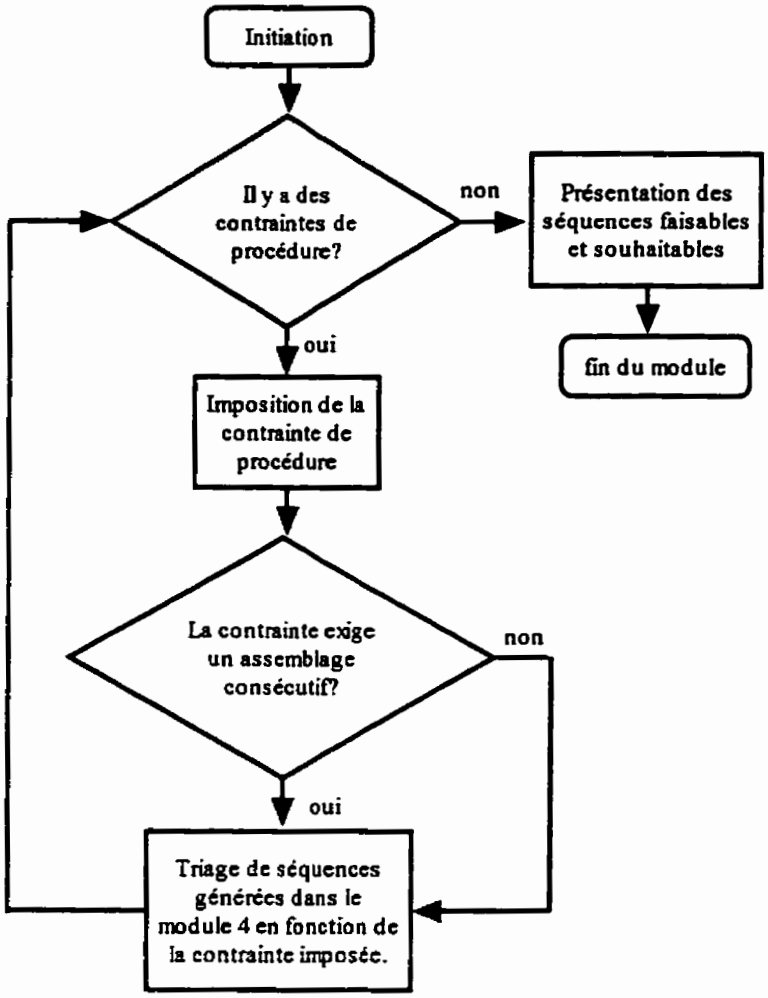


Figure 8.6 Diagramme logique du module d'imposition des contraintes de procédure

8.8 INCLUSION DES OPÉRATIONS COMPLÉMENTAIRES RELIÉES AUX OPÉRATIONS D'ASSEMBLAGE FONCTIONNELLES

Ce sixième module est réalisé de façon analytique et de manière conjointe entre les membres du groupe de génie simultané impliqués. Le module d'inclusion des opérations complémentaires consiste à analyser chaque opération d'assemblage fonctionnelle et à

définir les opérations complémentaires inhérentes à l'assemblage, les opérations complémentaires de contrôle et les opérations circonstancielles qui doivent être ajoutées à une opération fonctionnelle pour obtenir une tâche complète d'assemblage. L'objectif est d'avoir des séquences détaillées d'assemblage avant de les évaluer dans le module d'évaluation économique. Le diagramme logique est présenté à la Figure 8.7.

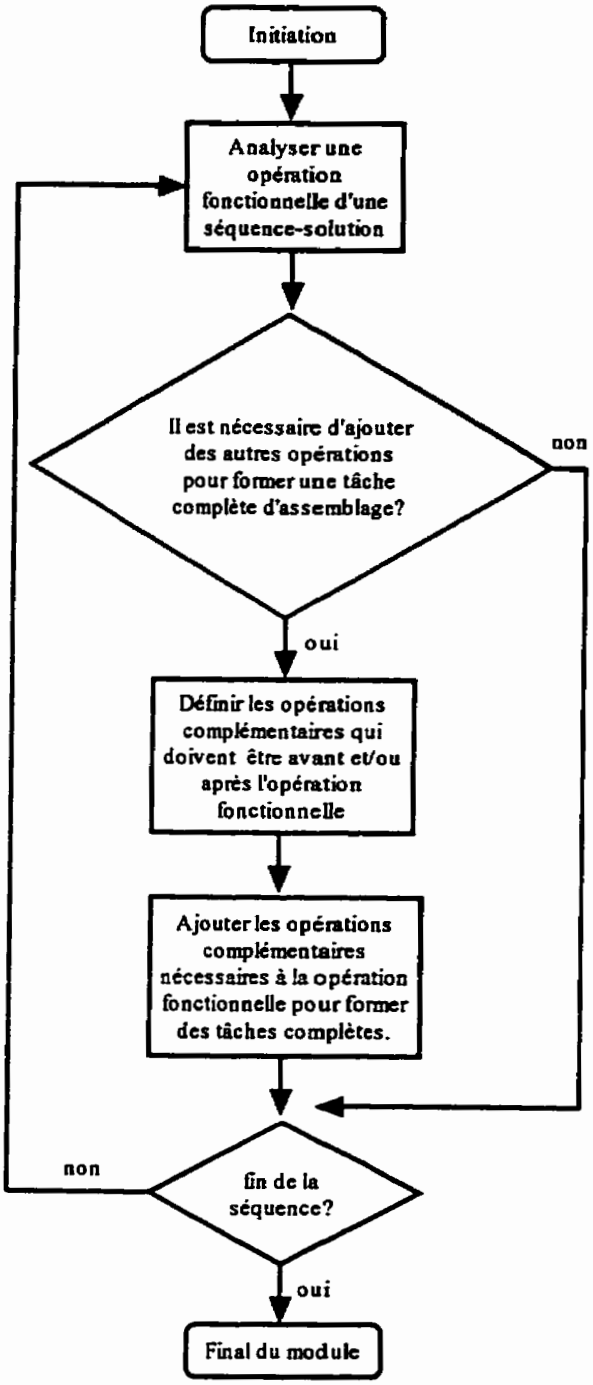


Figure 8.7 Diagramme logique du processus d'inclusion des opérations complémentaires

8.9 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES SÉQUENCES GÉNÉRÉES

L'évaluation économique des séquences d'assemblage complètes par l'inclusion des opérations complémentaires est faite avec le logiciel DFMA (Design for Manufacture and Assembly) de Boothroyd et Dewhurst (6). Pour cette évaluation, on tient compte de deux facteurs principaux: le coût d'assemblage et le temps total d'assemblage. Comme on l'a expliqué au Chapitre 7, les données de temps utilisées dans l'évaluation économique dépend de la phase de développement où se trouve le produit. Si le produit est dans sa phase de conception, les données à utiliser sont : les temps calculés par le logiciel DFMA pour les opérations d'assemblage fonctionnelles selon les caractéristiques géométriques des composants involucrés, et les temps prédéterminés des opérations complémentaires que l'on a ajoutées. Au contraire, si le produit est dans la phase de production ou de prototype, les temps à utiliser seront les temps réels.

Ce module donne comme résultat le temps et le coût total de chaque séquence qui accomplit les contraintes géométriques, topologiques et de procédure. On choisit la ou les séquences qui présentent le coût le moins élevé. Le diagramme logique du module est présenté à la Figure 8.8.

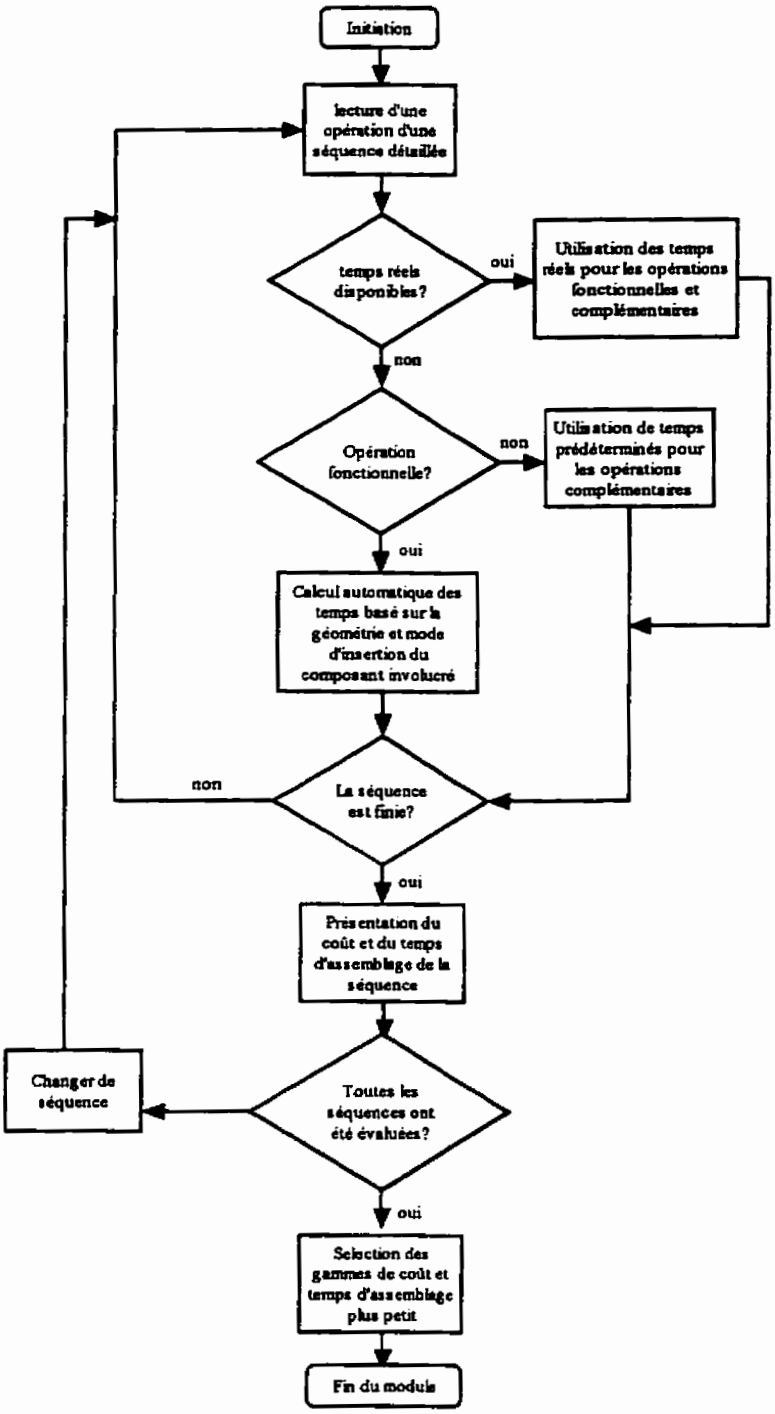


Figure 8.8 Diagramme logique du Module d'évaluation économique

8.10 ÉVALUATION QUALITATIVE DES SÉQUENCES GÉNÉRÉES

Ce module fait la dernière évaluation des séquences sélectionnées dans l'étape d'évaluation économique. L'évaluation faite est de nature itérative et impose des contraintes de procédure chaque fois plus restrictives. À la fin, s'il y a plus d'une séquence solution, on utilise le niveau de production comme la dernière contrainte. Cette contrainte tient compte de la capacité d'équilibrer la ligne de manière convenable. On examine la capacité de la séquence de permettre une distribution logique des opérations avec l'assignation de tâches complètes aux travailleurs, lors de l'équilibrage de la ligne pour ainsi arriver au niveau de production voulu. Si l'on analyse un produit dans sa phase de conception, les facteurs expliqués sont suffisants. Au contraire, si l'on analyse un produit qui est déjà dans sa phase de production, il faut ajouter aux facteurs considérés la capacité de la séquence d'arriver au niveau de production voulu avec un changement physique minimal de la ligne d'assemblage déjà existante. Puisque les séquences sont déjà définies, l'équilibrage de la ligne est limité au regroupement des opérations, selon le temps de cycle et le choix de la séquence qui s'adapte le mieux aux besoins. Le diagramme logique du module est présenté à la Figure 8.9.

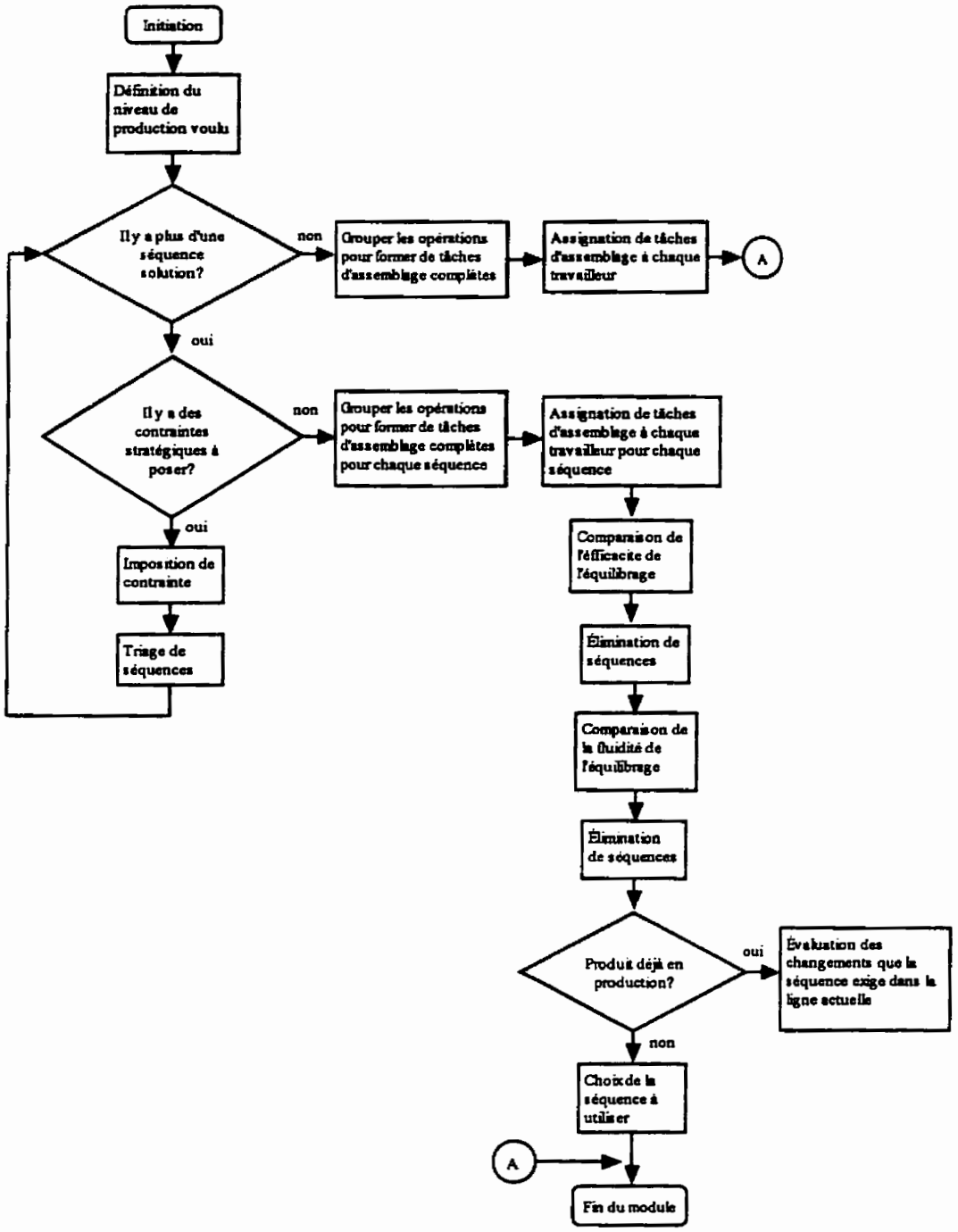


Figure 8.9 Diagramme logique du module d'évaluation qualitative des séquences générées

La méthode proposée, pour la planification de systèmes d'assemblage, permet la sélection de la séquence d'assemblage qui s'adapte le mieux à nos besoins et à notre réalité. La façon dont elle a été conçue empêche l'explosion de solutions. La modularisation du produit divise la complexité de l'assemblage entre les différents modules définis, ce qui nous permet de travailler par étape. De cette manière, on peut gérer un nombre plus grand de composants qu'avec l'approche binaire de génération de séquences d'assemblage.

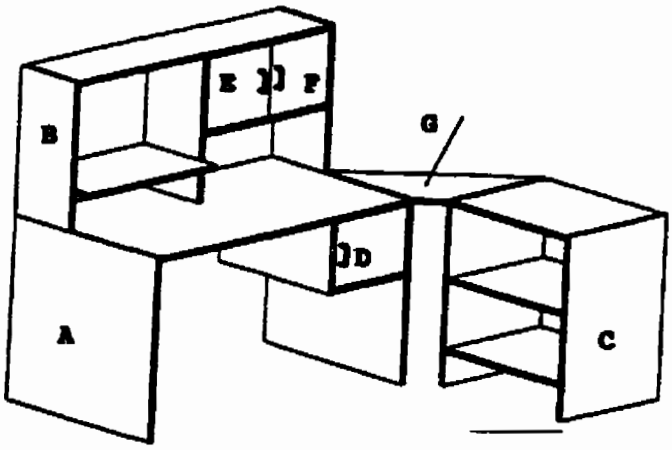
CHAPITRE 9

APPLICATION DE LA MÉTHODE SUR UN PRODUIT DE MODÈLE UNIQUE ET MODULAIRE PAR NATURE: UNE STATION BUREAUTIQUE

9.1 INTRODUCTION

Dans les deux prochains chapitres, nous présentons deux applications de la méthodologie proposée pour la planification d'un système d'assemblage, soit une station de travail bureautique et un alternateur électrique. Ces exemples sont des produits complexes à modèle unique dont nous nous sommes déjà servis pour expliquer des concepts de modélisation dans la Section 4.5, intitulée «Méthode de modularisation selon le produit analysé».

La station de travail bureautique est classée comme un «produit modulaire par nature» selon la définition donnée à la Section 4.5.1. Dans ce type de produit, il est facile d'identifier les modules principaux. Il suffit d'enlever les composants de fixation qui attachent les modules pour séparer les modules principaux qui forment les produits. La station de travail bureautique est présentée à la Figure 9.1. Certains produits de ce genre sont vendus de façon non-assemblés, mais ici nous considérons le cas où l'assemblage est réalisé dans l'usine. Nous appliquons notre méthodologie pour planifier les cellules d'assemblage dans lesquelles les diverses tâches ont été distribuées



A : Module TABLE,

C : Module MEUBLE,

D : Module PORTE,

E : Module PORTE GAUCHE,

F : Module PORTE DROITE,

G : Tablette d'union.

Figure 9.1 Station de travail bureautique

9.2 LISTE DE COMPOSANTS DE LA STATION DE TRAVAIL BUREAUTIQUE

Ce produit est formé par 32 composants distribués dans six modules comme le montre la liste ci-dessous. Les mesures de chaque composant sont présentés en mm., et entre parenthèses.

a) Module : TABLE

1. Panneau gauche (750 * 600 * 15)
2. Panneau droit (750 * 600 * 15)
3. Dessus (1040 * 600 * 15)
4. Panneau arrière (720 * 240 * 15)
5. Côté du tiroir (600 * 300 * 15)
6. Base du tiroir (600 * 300 * 15)
7. Carton postérieur (300 * 300 * 2)
8. $Porte (300 * 300 * 50)

b) Module: ÉTAGÈRE

1. Panneau gauche (600 * 240 * 15)
2. Panneau droit (600 * 240 * 15)
3. Tablette du milieu (580 *240 * 15)
4. Tablette supérieure (1040 * 240 * 15)

5. Tablette du moniteur (510 * 240 * 15)
6. Base du tiroir (510 * 240 * 15)
7. Carton postérieur (600 * 530 * 2)
8. $Porte gauche (300 * 300 * 50)
9. $Porte droite (300 * 300 * 50)

c) Module: MEUBLE POUR L'IMPRIMANTE

1. Panneau gauche (750 * 400* 15)
2. Panneau droit (750 * 400 * 15)
3. Tablette supérieure (480 * 400 * 15)
4. Tablette du milieu (480 * 400 * 15)
5. Tablette inférieure (480 * 400 * 15)

d) Module: PORTE

1. Charnière supérieure (25 * 15 * 5)
2. Charnière inférieure (25 * 15 * 5)
3. Poignée (80 * 30 * 2)
4. Panneau (300 * 270 * 2)

e) Module: PORTE GAUCHE

1. Charnière supérieure (25 * 15 * 5)
2. Charnière inférieure (25 * 15 * 5)
3. Poignée (80 * 30 * 2)
4. Panneau (300 * 270 * 2)

f) Module: PORTE DROITE

1. Charnière supérieure (25 * 15 * 5)
2. Charnière inférieure (25 * 15 * 5)
3. Poignée (80 * 30 * 2)
4. Panneau (300 * 270 * 2)

g) Tablette d'union (750 * 290 * 15)

Note : le signe «$» avant un nom indique que ce composant est modulaire.

9.3 MODULARISATION DE LA STATION DE TRAVAIL BUREAUTIQUE

La modularisation de la station de travail bureautique est montrée à la Figure 9.2.

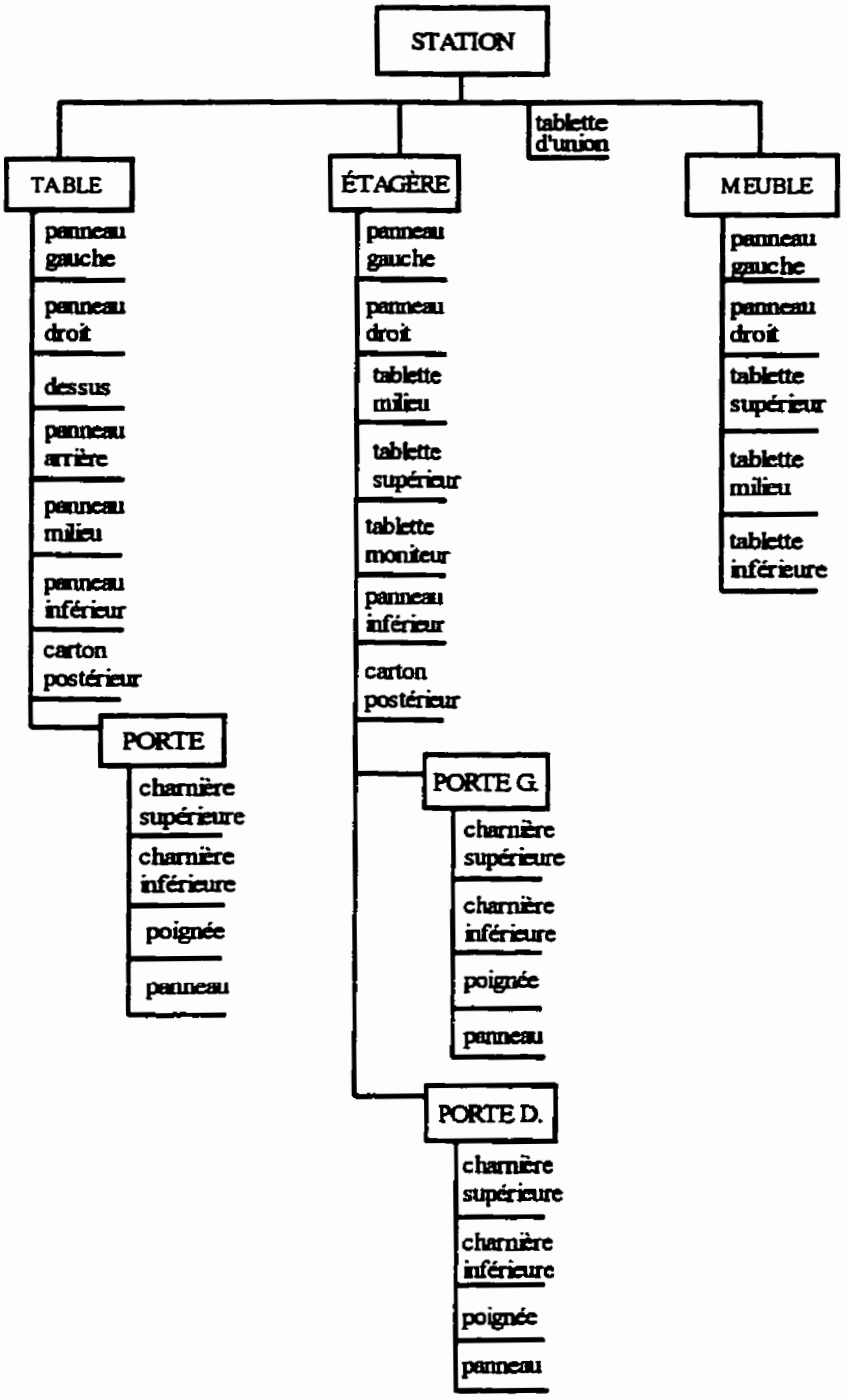


Figure 9.2 Modularisation de la station de travail bureautique

Dans cette figure, on peut observer que le produit analysé a trois modules principaux et un composant élémentaire dans le niveau plus élevé de sa hiérarchie d'assemblage. Chaque module principal est indépendant lors de l'assemblage, donc chacun peut donner lieu à une cellule d'assemblage. Cette caractéristique d'indépendance d'assemblage entre modules permet la génération de séquences d'assemblage de chaque module de manière indépendante. Dans le cas où un module contient un autre module, comme dans les modules TABLE et ÉTAGÈRE, la génération commence pour les modules qui sont au niveau le plus bas dans la hiérarchie d'assemblage de chaque module principal. Pour cette raison, on commence la génération de séquences d'assemblage du module PORTE, lequel est ensuite considéré comme un composant élémentaire du module TABLE, lors de la génération de séquences d'assemblage de ce module principal. De la même façon, on fait la génération de séquences d'assemblage des modules PORTE GAUCHE et PORTE DROITE avant de générer les séquences du module ÉTAGÈRE.

9.4 RELATION DE PRÉCÉDENCE DES COMPOSANTS PAR MODULE

Une fois que la modularisation a été faite, il est nécessaire de définir les relations de précédence entre les composants d'un module. Les fonctions de contact et de translation accomplissent cette tâche. Ces deux fonctions sont montrées pour chaque modèle en Annexe I. Dans ce cas-ci, il est intéressant de comparer le nombre d'entrées de la fonction de contact et de la fonction de translation avec la méthode de génération de séquences d'assemblage, basée sur une analyse binaire des composants, et le nombre d'entrées nécessaire avec la méthode de génération de séquences d'assemblage par

module que l'on propose. Dans le premier cas, pour le produit de 32 composants que l'on analyse, le nombre de combinaison possibles des paires de composants est:

$$p_r^n = \frac{n!}{(n-r)!} = \frac{32!}{(32-2)!} = 992$$

Il faut donc définir 992 entrées pour la fonction de contact et 992 autres entrées pour la fonction de translation. Dans le deuxième cas, le nombre d'entrées dont nous avons besoin est:

TABLE :	8 * 7 = 56
PORTE :	4 * 3 = 12
ÉTAGÈRE :	9 * 8 = 72
PORTE GAUCHE :	4 * 3 = 12
PORTE DROITE :	4 * 3 = 12
MEUBLE :	5 * 4 = 20
STATION :	4 * 3 = 12

TOTAL : 196 pour chaque fonction

Ainsi, avec la méthode proposée, nous avons besoin de seulement 196 entrées pour la fonction de contact et le même nombre pour la fonction de translation, ce qui représente 80,2 % de moins. Dans la pratique, lorsqu'on utilise le logiciel de génération de séquences, il suffit d'introduire la moitié de données (98) dans chaque fonction, étant

donné que la moitié des valeurs de chaque fonction est l'inverse de l'autre moitié. Par conséquent, elles sont calculées de façon automatique par le logiciel.

On peut conclure que la modularisation et la génération des séquences d'assemblage par module diminuent énormément les données dont le programme a besoin pour générer les séquences. Cette méthodologie empêche aussi une explosion combinatoire des résultats dont la plupart, même s'ils accomplissent les contraintes géométriques et topologiques du produit, ne sont pas souhaitables ou encore ne sont pas pratiquement faisables. La modularisation est donc le premier pas pour empêcher l'explosion combinatoire de résultats.

9.5 GÉNÉRATION DES SÉQUENCES D'ASSEMBLAGE PAR MODULE

Dans cette étape, on génère les séquences d'assemblage pour les différents modules avec la méthode expliquée dans le Chapitre 6. Afin d'éviter une explosion combinatoire des séquences générées, on a d'abord posé certaines contraintes à l'assemblage.

9.5.1 Module Porte

Le module PORTE consiste en quatre composants élémentaires. Même si ce module est assez simple, il doit être assemblé séparément du module TABLE, parce que leurs bases d'assemblage sont différentes.

9.5.1.1 Contraintes initiales

Les contraintes initiales sont des contraintes qu'on donne au module PORTE avant de commencer la génération de séquences afin de focaliser les résultats sur des séquences souhaitables. Les contraintes posées au module PORTE sont les suivantes.

A Premier composant

On choisit **le panneau** parce que tous les autres composants du module sont assemblés sur lui.

B Dernier composant

Pour le module PORTE, le dernier composant est **la poignée** parce qu'elle est le composant le plus fragile et on peut l'abîmer lors de l'assemblage.

C Premières liaisons possibles

Les liaisons avec lesquelles on peut commencer l'assemblage du module sont:

- Panneau - Charnière supérieure,
- Panneau - Charnière inférieure.

9.5.1.2 Génération des séquences d'assemblage du module porte

Avec ses modules d'analyse géométrique et topologique et à l'aide des contraintes imposées au début, le logiciel génère le nombre de séquences suivantes par niveau d'assemblage:

Niveau	Nombre de séquences
2	2
3	2
4	2

9.5.1.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module porte

La génération des séquences d'assemblage du module PORTE donne deux séquences après les contraintes initiales. Après l'analyse des composants et des séquences générées, on conclut qu'il n'y a pas de contraintes de procédure à ajouter. Les deux séquences générées sont donc acceptées pour continuer une analyse plus approfondie. Les deux séquences résultantes sont présentées au Tableau 9.1.

Tableau 9.1 Séquences d'assemblage pour le module porte

panneau	panneau
charnière supérieure	charnière inférieure
charnière inférieure	charnière supérieure
poignée	poignée

Étant donné que les modules PORTE, PORTE GAUCHE et PORTE DROITE sont égaux, l'analyse ainsi que les conclusions obtenues sont valides pour les trois modules.

9.5.2 Module table

Le module TABLE contient sept composants élémentaires et un composant modulaire.

9.5.2.1 Contraintes initiales

Ce module est composé par plusieurs composants (huit) qui, dans le pire des cas, peuvent donner 8! séquences différentes. Pour cette raison, on impose des contraintes au début de la procédure de génération des séquences.

A) Premier composant

Pour le module TABLE, le premier composant est **le dessus**. Celui-ci est le composant le plus encombrante du module et, de plus, on doit le soutenir avec un support adéquat pour garder la stabilité de l'ensemble pendant l'assemblage.

B) Dernier composant

Le dernier composant est le composant modulaire PORTE. Ce choix a été fait d'abord parce que la porte est un composant fragile, à cause principalement de la poignée, et aussi parce que l'assemblage de la porte est plus facile après la réorientation du module TABLE qui contiendra déjà les composants qui seront en contact avec la porte. L'assemblage commence avec un module en position horizontal et il est ensuite réorienté de façon à le mettre debout et à pouvoir assembler le carton postérieur et la porte.

C) Premières liaisons

Les premières liaisons possibles sont:

- Dessus - Panneau gauche,
- Dessus - Panneau droit,
- Dessus - Côté du tiroir.

9.5.2.2 Génération des séquences d'assemblage du module table

Le nombre de séquences d'assemblage par niveau du module TABLE, après avoir posé les contraintes initiales, est:

Niveau	Nombre de séquences
2	3
3	13
4	49
5	145
6	290
7	290
8	290

9.5.2.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module table

Comme on peut l'observer au tableau de la section précédente, malgré les contraintes imposées au début, le nombre de séquences est trop élevé pour une analyse économique. Par conséquent, pour le module TABLE, nous avons imposé les contraintes suivantes.

a) Le panneau arrière doit être assemblé après le panneau gauche et du côté du tiroir. De cette façon, on conserve la stabilité de l'ensemble. Les séquences réalisables diminuent ensuite à 148.

b) La base du tiroir doit être assemblée après le côté du tiroir et du panneau droit. Cette contrainte répond au même objectif que la première. Les séquences réalisables sont réduites à 80.

c) Le carton postérieur doit être fixé (cloué) après le dessus, le côté du tiroir, le panneau droit et la base du tiroir. On pose cette contrainte parce qu'il est préférable d'avoir déjà assemblé tous les composants avec lesquels le carton a des contacts avant de commencer à clouer le carton. Cette contrainte permet de diminuer le nombre de séquences réalisables à 26.

d) Le carton postérieur doit être assemblé après le panneau arrière. Cette condition est nécessaire parce que, dans le cas contraire, il faudrait faire deux réorientations de l'ensemble; la première pour assembler le carton et la deuxième pour retourner l'ensemble à sa position originale et pour pouvoir assembler le panneau arrière. Les séquences résultantes sont réduites à 16.

La liste de ces séquences résultantes est présentée au Tableau 9.2.

Tableau 9.2 Séquences d'assemblage pour le module table

dessus	dessus	dessus
panneau gauche	panneau gauche	panneau gauche
panneau droit	panneau droit	côté tiroir
côté tiroir	côté tiroir	panneau droit
panneau arrière	base tiroir	panneau arrière
base tiroir	panneau arrière	base tiroir
carton postérieur	carton postérieur	carton postérieur
$porte	$porte	$porte
dessus	dessus	dessus
panneau gauche	panneau gauche	panneau droit
côté tiroir	côté tiroir	panneau gauche
panneau droit	panneau arrière	côté tiroir
base tiroir	panneau droit	panneau arrière
panneau arrière	base tiroir	base tiroir
carton postérieur	carton postérieur	carton postérieur
$porte	$porte	$porte
dessus	dessus	dessus
panneau droit	panneau droit	panneau droit
panneau gauche	côté tiroir	côté tiroir
côté tiroir	panneau gauche	panneau gauche
base tiroir	panneau arrière	base tiroir
panneau arrière	base tiroir	panneau arrière
carton postérieur	carton postérieur	carton postérieur
$porte	$porte	$porte
dessus	dessus	dessus
panneau droit	côté tiroir	côté tiroir
côté tiroir	panneau gauche	panneau gauche
base tiroir	panneau droit	panneau droit
panneau gauche	panneau arrière	base tiroir
panneau arrière	base tiroir	panneau arrière
carton postérieur	carton postérieur	carton postérieur
$porte	$porte	$porte

dessus	dessus	dessus
côté tiroir	côté tiroir	côté tiroir
panneau gauche	panneau droit	panneau droit
panneau arrière	panneau gauche	panneau gauche
panneau droit	panneau arrière	base tiroir
base tiroir	base tiroir	panneau arrière
carton postérieur	carton postérieur	carton postérieur
$porte	$porte	$porte

dessus
côté tiroir
panneau droit
base tiroir
panneau gauche
panneau arrière
carton postérieur
$porte

Note : Le signe «$» avant un nom indique que le composant est modulaire.

9.5.3 Module Étagère

Le module ÉTAGÈRE contient sept composants élémentaires et deux composants modulaires.

9.5.3.1 Contraintes initiales

Étant donné que le nombre maximal de séquences que l'on peut avoir dans la génération est 9!, on pose des contraintes initiales avant de commencer la procédure de génération de séquences.

A) Premier composant

On a choisi **la tablette supérieure** pour des considérations de stabilité. Cette tablette supérieure du module ÉTAGÈRE est celle qui permet de garder la stabilité de l'ensemble pendant l'assemblage, une fois qu'elle est fixé à un support de travail adéquat.

B) Dernier composant

Étant donné que les modules PORTE GAUCHE et PORTE DROITE sont égaux, le dernier composant pouvait être l'un des deux. Dans ce travail, nous avons choisi la PORTE DROITE comme dernier composant. Les considérations dont nous avons tenu compte pour le choix sont les mêmes que celles expliquées pour le cas du dernier composant du module TABLE.

C) Première liaisons possibles

Les liaisons avec lesquelles on peut commencer l'assemblage de l'étagère sont:

- Tablette supérieure - Panneau gauche,
- Tablette supérieure - Panneau droit,
- Tablette supérieure -tablette du milieu.

9.5.3.2 Génération des séquences d'assemblage du module étagère

Le nombre de séquences d'assemblage par niveau est présenté au tableau ci-dessous.

Niveau	Séquences
2	3
3	14
4	61
5	227
6	653
7	1278
8	1278
9	1278

9.5.3.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module étagère

Pour diminuer le nombre de séquences générées et rendre possible une analyse économique postérieure sur des séquences souhaitables, on pose les contraintes de procédure suivantes:

a) La tablette de moniteur doit être assemblée après le panneau gauche et la tablette du milieu. Cette contrainte est posée pour maintenir la stabilité de l'ensemble pendant l'assemblage. Le nombre de séquences résultantes est de 710.

b) La base du tiroir doit être assemblée après la tablette du milieu et le panneau droit. L'objectif de cette contrainte est de conserver la stabilité de l'ensemble pendant l'assemblage. Les séquences restantes sont au nombre de 396.

c) La porte gauche et la porte droite doivent être assemblées à la fin et de façon consécutive. Étant donné que les deux portes sont égales, dans les contraintes initiales, nous avons défini la porte droite comme dernier composant. On pose ensuite comme contrainte que les deux portes soient assemblées de façon consécutive, parce que l'assemblage des portes est plus facile s'il est fait après que tous les composants avec lesquels les portes ont des contacts sont déjà assemblés. Cela permet d'éviter une réorientation additionnelle. Le nombre de séquences résultantes est de 80.

d) Les deux portes doivent être assemblées après le carton postérieur. La contrainte est posée pour éviter des réorientations inutiles puisque, pour l'assemblage du carton, il faut réorienter l'ensemble et c'est d'ailleurs dans cette nouvelle position du module que l'assemblage des portes est plus facile. Le nombre de séquences finales est de 16.

La liste de séquences résultantes pour le module ÉTAGÈRE est présentée au Tableau 9.3.

Tableau 9.3 Séquences résultantes du module étagère

tablette supérieure	tablette supérieure	tablette supérieure
panneau gauche	panneau gauche	panneau gauche
panneau droit	panneau droit	tablette milieu
tablette milieu	tablette milieu	tablette milieu
tablette moniteur	base tiroir	panneau droit
base tiroir	tablette moniteur	tablette moniteur
carton postérieur	carton postérieur	base tiroir
$porte gauche	$porte gauche	$porte gauche
$porte droite	$porte droite	$porte droite
tablette supérieure	tablette supérieure	tablette supérieure
panneau gauche	panneau gauche	panneau droit
tablette milieu	tablette milieu	panneau gauche
panneau droit	tablette moniteur	tablette milieu
base tiroir	panneau droit	tablette moniteur
tablette moniteur	base tiroir	base tiroir
carton postérieur	carton postérieur	carton postérieur
$porte gauche	$porte gauche	$porte gauche
$porte droite	$porte droite	$porte droite
tablette supérieure	tablette supérieure	tablette supérieure
panneau droit	panneau droit	panneau droit
panneau gauche	tablette milieu	tablette milieu
tablette milieu	panneau gauche	panneau gauche
base tiroir	tablette moniteur	base tiroir
tablette moniteur	base tiroir	tablette moniteur
carton postérieur	carton postérieur	carton postérieur
$porte gauche	$porte gauche	$porte gauche
$porte droite	$porte droite	$porte droite

tablette supérieure
panneau droit
tablette milieu
base tiroir
panneau gauche
tablette moniteur
carton postérieur
$porte gauche
$porte droite

tablette supérieure
tablette milieu
panneau gauche
panneau droit
tablette moniteur
base tiroir
carton postérieur
$porte gauche
$porte droite

tablette supérieure
tablette milieu
panneau gauche
panneau droit
base tiroir
tablette moniteur
carton postérieur
$porte gauche
$porte droite

tablette supérieure
tablette milieu
panneau gauche
tablette moniteur
panneau droit
base tiroir
carton postérieur
$porte gauche
$porte droite

tablette supérieure
tablette milieu
panneau droit
panneau gauche
tablette moniteur
base tiroir
carton postérieur
$porte gauche
$porte droite

tablette supérieure
tablette milieu
panneau droit
panneau gauche
base tiroir
tablette moniteur
carton postérieur
$porte gauche
$porte droite

tablette supérieure
tablette milieu
panneau droit
base tiroir
panneau gauche
tablette moniteur
carton postérieur
$porte gauche
$porte droite

9.5.4 Module meuble

Le module MEUBLE contient cinq composants élémentaires.

9.5.4.1 Contraintes initiales

Les contraintes initiales que l'on a posées au module meuble sont les suivantes.

A) Premier composant

La tablette supérieure a été choisie comme premier composant pour les mêmes considérations de stabilité expliquées dans les cas du module TABLE et du module ÉTAGÈRE.

B) Dernier composant

Il n'existe pas de restriction pour le dernier composant. De l'analyse des composants du module, on conclut que n'importe quel composant peut terminer l'assemblage sauf la tablette supérieure.

C) Premières liaisons possibles

Dans ce cas, les deux liaisons possibles pour commencer l'assemblage d'un point de vue géométrique et topologique sont acceptables.

- Tablette supérieure - Panneau gauche,
- Tablette supérieure - Panneau droit.

9.5.4.2 Génération des séquences d'assemblage du module meuble

Le nombre de séquences d'assemblage par niveau que l'on obtient, avec l'utilisation du logiciel de génération de séquences, est présenté au tableau ci-dessous.

Niveau	Séquences
2	2
3	6
4	12
5	12

9.5.4.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module meuble

Après l'analyse des composants et des séquences générées, on conclut qu'il n'y a pas de contraintes de procédure à poser. La liste de séquences résultantes est montrée au Tableau 9.4.

Tableau 9.4 Séquences résultantes du module meuble

tablette supérieure	tablette supérieure	tablette supérieure
panneau gauche	panneau gauche	panneau gauche
panneau droit	panneau droit	tablette milieu
tablette milieu	tablette inférieure	panneau droit
tablette inférieure	tablette milieu	tablette inférieure
tablette supérieure	tablette supérieure	tablette supérieure
panneau gauche	panneau gauche	panneau gauche
tablette milieu	tablette inférieure	tablette inférieure
tablette inférieure	panneau droit	tablette milieu
panneau droit	tablette milieu	panneau droit
tablette supérieure	tablette supérieure	tablette supérieure
panneau droit	panneau droit	panneau droit
panneau gauche	panneau gauche	tablette milieu
tablette milieu	tablette inférieure	panneau gauche
tablette inférieure	tablette milieu	tablette inférieure

tablette supérieure	tablette supérieure	tablette supérieure
panneau droit	panneau droit	panneau droit
tablette milieu	tablette inférieure	tablette inférieure
tablette inférieure	panneau gauche	tablette milieu
panneau gauche	tablette milieu	panneau gauche

9.5.5 Module Station

Le module STATION représente le produit au complet et il est formé de trois composants modulaires et d'un composant élémentaire qui sont situés au niveau le plus élevé de la hiérarchie d'assemblage.

9.5.5.1 Contraintes initiales

Les contraintes que l'on a posées à l'assemblage du module STATION sont les suivantes.

A) Premier composant

La table a été choisie comme le premier composant à être assemblé. Ce composant est le plus encombrant et il est aussi le composant modulaire avec lequel la plupart des composants du produit ont une relation de contact.

B) Dernier composant

Il n'y a pas de restriction pour le dernier composant à assembler. Après l'analyse des composants qui sont présents dans le niveau principal d'assemblage du produit, on conclut qu'il n'existe pas un composant spécifique qui doit terminer l'assemblage.

C) Premières liaisons possibles

Ces liaisons sont les suivantes:

- Table - Étagère,
- Table - Tablette d'union.

9.5.5.2 Génération des séquences d'assemblage du module station

Après l'utilisation du logiciel de génération de séquences d'assemblage, en tenant compte des contraintes initiales, le nombre de séquences par niveau est présenté ci-dessous.

Niveau	Séquences
2	2
2	3
2	3

9.5.5.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module station

Il n'y a pas de contraintes de procédure à ajouter. La liste de séquences résultantes est montrée au Tableau 9.5.

Tableau 9.5 Séquences résultantes du module station

$table	$table	$table
$étagère	Tablette d'union	Tablette d'union
Tablette d'union	$étagère	$meuble
$meuble	$meuble	$étagère

9.6 ÉVALUATION QUALITATIVE PAR MODULE

Si l'on fait une liste des solutions trouvées par module, on peut constater qu'il y a encore des modules qui présentent trop de solutions pour faire une analyse approfondie de chacune de celles-ci. Le nombre de solutions faisables et souhaitables par module est montré ci-dessous:

module	nombre
Porte	2
Table	16
Étagère	16
Meuble	12
Station	3

Les modules TABLE, ÉTAGÈRE et MEUBLE sont ceux qui présentent encore trop de séquences, même si toutes ces solutions sont possibles et souhaitables, en accord avec les contraintes imposées. Pour cette raison, nous avons décidé d'analyser encore ces modules pour diminuer, si possible, le nombre de solutions trouvées avant de passer à l'étape d'évaluation économique.

9.6.1 Module Table

Chacune de seize solutions possibles nécessitent une seule réorientation pendant l'assemblage. En fait, le seul facteur qui fait la différence entre les séquences trouvées est le degré de stabilité de l'ensemble pendant le processus d'assemblage. Des seize solutions, douze présentent des séquences qui assemblent d'abord les composants verticaux et ensuite les composants horizontaux. Seulement quatre des solutions assemblent les composants verticaux et horizontaux de façon alternée, ce qui rend l'ensemble plus robuste à chaque étape de l'assemblage. Pour notre analyse, nous choisissons ces quatre séquences, qui s'adaptent le mieux à nos besoins, telles que montrées au Tableau 9.6.

Tableau 9.6 Séquences choisies pour le module table

Dessus	Dessus	Dessus	Dessus
Panneau gauche	Panneau droit	Côté du tiroir	Côté du tiroir
Côté du tiroir	Côté du tiroir	Panneau gauche	Panneau droit
Panneau arrière	Base de tiroir	Panneau arrière	Base de tiroir
Panneau droit	Panneau gauche	Panneau droit	Panneau gauche
Base de tiroir	Panneau arrière	Base de tiroir	Panneau arrière
Carton postérieur	Carton postérieur	Carton postérieur	Carton postérieur
$porte	$porte	$porte	$porte

Ces séquences nécessitent un seul support de travail pour **le dessus**. Le reste de l'assemblage est toujours stable grâce à la façon alternée d'assembler les composants de direction verticale et ceux de direction horizontale.

9.6.2 Module Étagère

De la même façon que le module TABLE, ce module présente seize solutions qui se différencient par le degré de stabilité du module pendant l'assemblage. Pour les mêmes raisons expliquées dans le cas du module TABLE, dans ce module on choisit les quatre séquences qui rendent l'assemblage plus stable étape par étape. Les séquences choisies par le module étagère sont donc présentées au Tableau 9.7.

Tableau 9.7 Séquences choisies pour le module étagère

Tablette supérieure	Tablette supérieure	Tablette supérieure	Tablette supérieure
Panneau gauche	Panneau droit	Tablette du milieu	Tablette du milieu
Tablette du milieu	Tablette du milieu	Panneau gauche	Panneau droit
Tablette moniteur	Base de tiroir	Tablette moniteur	Base de tiroir
Panneau droit	Panneau gauche	Panneau droit	Panneau gauche
Base de tiroir	Tablette moniteur	Base de tiroir	Tablette moniteur
Carton postérieur	Carton postérieur	Carton postérieur	Carton postérieur
$porte gauche	$porte gauche	$porte gauche	$porte gauche
$porte droite	$porte droite	$porte droite	$porte droite

9.6.3 Module meuble

Pour l'analyse des solutions de ce module, nous avons tenu encore compte du degré de stabilité que chaque séquence présente pendant le processus d'assemblage. Les séquences qui rendent l'assemblage plus stable sont montrées au Tableau 9.8.

Tableau 9.8 Séquences choisies pour le module meuble

Tablette supérieure	Tablette supérieure	Tablette supérieure	Tablette supérieure
Panneau gauche	Panneau gauche	Panneau droit	Panneau droit
Panneau droit	Panneau droit	Panneau gauche	Panneau gauche
Tablette milieu	Tablette inférieure	Tablette milieu	Tablette inférieure
Tablette inférieure	Tablette milieu	Tablette inférieure	Tablette milieu

Après ce dernier triage, le nombre de séquences faisables et souhaitables par module qui seront évaluées économiquement est montré au Tableau 9.9.

Tableau 9.9 Nombre de séquences faisables et souhaitables après l'évaluation qualitative

Porte	2
Table	4
Étagère	4
Meuble	4
Station	3

9.7 OPÉRATIONS COMPLÉMENTAIRES

Avant d'évaluer du point de vue économique chaque séquence de la liste des solutions, il est préférable de les détailler, en ajoutant les opérations complémentaires nécessaires pour former des tâches d'assemblage complètes afin d'arriver à l'assemblage du produit. Pour les opérations complémentaires de fixation, les temps sont calculés par le logiciel DFMA de Boothroyd et Dewhurst (6). Pour les autres opérations complémentaires, on utilise des temps prédéterminés du système M.T.M.(48).

9.7.1 Module table

1. Visser le panneau gauche au-dessus (2 vis).
2. Introduire deux boulons de came dans les trous du dessus.
3. Insérer deux cames de serrure dans les trous du côté tiroir.
4. Visser les cames du côté tiroir.
5. Visser le panneau arrière au panneau gauche (2 vis).
6. Visser le panneau arrière au côté tiroir (2 vis).
7. Visser le panneau droit au-dessus.
8. Visser la base du tiroir au côté du tiroir (2 vis).
9. Visser la base de tiroir au panneau droit (2 vis).
10. Mettre la table debout.
11. Clouer le carton postérieur (10 clous).
12. Visser la porte à la porte (4 vis).
13. Mettre du ruban sur la porte.
14. Transporter la table à la zone de stockage.

9.7.2 Module étagère

1. Visser le panneau gauche et la tablette supérieure (2 vis).
2. Visser la tablette du milieu et la tablette supérieure (2 vis).
3. Visser la tablette du moniteur et le panneau gauche (2 vis).
4. Visser la tablette du moniteur et la tablette du milieu (2 vis).

5. Visser le panneau droit à la tablette supérieure (2 vis).
6. Visser la base de tiroir et la tablette du milieu (2 vis).
7. Visser la base de tiroir et le panneau droit (2 vis).
8. Mettre l'étagère debout.
9. Clouer le carton postérieur (13 clous).
10. Visser la porte gauche à l'étagère (4 vis).
11. Visser la porte droite à l'étagère (4 vis).
12. Mettre du ruban sur les portes.
13. Transporter l'étagère à la zone de stockage.

9.7.3 Module meuble

1. Visser le panneau gauche et la tablette supérieure (2 vis).
2. Visser le panneau droit et la tablette supérieure (2 vis).
3. Visser la tablette inférieure et le panneau gauche (2 vis).
4. Visser la tablette inférieure et le panneau droit (2 vis).
5. Visser la tablette du milieu et le panneau gauche (2 vis).
6. Visser la tablette milieu et le panneau droit (2 vis).
7. Transporter le meuble à la zone de stockage.

9.7.4 Module Porte

1. Visser la charnière supérieure et le panneau (2 vis).
2. Visser la charnière inférieure et le panneau (2 vis).
3. Visser la poignée et le tableau (2 vis).
4. Transporter à la zone de stockage.

Note : Les opérations complémentaires du module PORTE, PORTE GAUCHE et PORTE DROITE sont les mêmes.

9.7.5 Module station

1. Introduire deux goujons de bois dans le bord droit de la table.
2. Introduire deux goujons de bois dans le bord gauche de la table.
3. Visser la table et l'étagère.
4. Introduire deux boulons de came dans le panneau droit de la table.
5. Introduire deux cames de serrure au côté gauche de la tablette d'union.
6. Fixer la tablette d'union et la table.
7. Introduire deux boulons de came dans le panneau gauche du meuble.
8. Introduire deux cames de serrure au côte droit de la tablette d'union.
9. Fixer le meuble et la tablette d'union.
10. Transporter à la zone de stockage.

9.8 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES SÉQUENCES PAR MODULE

Après avoir fait une évaluation qualitative des séquences générées, nous avons évalué chaque séquence résultante en utilisant le logiciel DFMA de Boothroyd et Dewhurst. Le coût de chaque séquence par module est le même, ce qui était prévisible puisque les séquences résultantes de la dernière analyse se différencient seulement par l'ordre d'assemblage de certains composants, ce qui n'a pas d'influence sur la stabilité de l'ensemble durant son assemblage. Le détail de l'évaluation est présenté en Annexe II. Le résumé des résultats obtenus par module est présenté ci-dessous.

9.8.1 Module porte

Coût total de l'assemblage:	0,63 $
Temps total d'assemblage:	76 s
Nombre total d'opérations:	11

9.8.2 Module table

Coût total de l'assemblage:	2,14 $
Temps total d'assemblage:	257 s
Nombre total d'opérations:	31

9.8.3 Module étagère

Coût total de l'assemblage:	2,50 $
Temps total d'assemblage:	300 s
Nombre total d'opérations:	35

9.8.4 Module meuble

Coût total de l'assemblage:	1,18 $
Temps total d'assemblage:	142 s
Nombre total d'opérations:	17

9.8.5 Module station

Coût total de l'assemblage:	1,10 $
Temps total d'assemblage:	132 s
Nombre total d'opérations:	15

9.9 ÉQUILIBRAGE DE LIGNE POUR L'ASSEMBLAGE DE LA STATION DE TRAVAIL BUREAUTIQUE

Après l'évaluation économique, il est resté le même nombre de solutions qu'au Tableau 9.9. Ces séquences accomplissent nos contraintes imposées initialement et nos contraintes de procédure. De plus, ces séquences répondent à notre évaluation qualitative, dans laquelle nous avons analysé le degré de stabilité pendant leur

assemblage. Finalement, l'évaluation quantitative a démontré que les séquences ont le même coût d'assemblage. Il est évident que nous pouvons choisir n'importe quelle séquence pour essayer l'équilibrage de ligne, à moins d'avoir une séquence qui s'adapte mieux à notre contexte d'assemblage ou à la façon de travailler des opérateurs de l'usine. Pour l'équilibrage, nous avons les contraintes suivantes à respecter:

- le taux de production prévu est de 100 produits/quart,
- le temps disponible est de 450 min/quart (7,5 h),
- la charge de travail de chaque travailleur ne doit pas dépasser 90 % du temps disponible.

Pour l'équilibrage de la ligne, nous avons l'objectif d'assigner des opérations à chaque travailleur de façon logique et que celles-ci représentent des tâches d'assemblage complètes. Dans ce travail, nous avons choisi les séquences présentées ci-dessous.

A) Porte

Il y a deux séquences qui se différencient seulement par l'ordre de fixation des charnières. Nous avons choisi la première séquence.

B) Table

Nous avons choisi la première séquence, puisqu'elle permet aux travailleurs d'assembler le module de gauche à droite, ce qui est la façon la plus commune de fonctionner pour la plupart des travailleurs.

C) Étagère

Nous avons choisi encore la première séquence de la liste de solutions, pour les mêmes considérations expliquées au point **B** précédent.

D) Meuble

La séquence n°1 a été choisie parce qu'elle permet de travailler de gauche à droite et de haut en bas, ce qui est la façon la plus logique de faire.

E) Station

Dans ce module, c'est encore la séquence n°1 qui a été choisie parce qu'elle est la seule dans laquelle l'assemblage de l'étagère sur la table est considéré, avant de fixer la tablette d'union. Cette différence est très importante du point de vue de la facilité de l'assemblage, puisqu'une fois que la tablette d'union est fixée à la table, il est très difficile d'aligner la table et l'étagère. La tablette empêche le travailleur de se placer du côté droit de la table pour pouvoir faire l'alignement des deux composants comme il se doit.

Encore est-il nécessaire de dire que toutes les autres séquences de chaque module sont également faisables et souhaitables. Il est très probable que, dans un contexte particulier, nous aurions pu choisir d'autres séquences pour chaque module.

9.9.1 Analyse pour l'équilibrage de ligne

Avant de passer à l'équilibrage des cellules d'assemblage, il est préférable de calculer le nombre de cellules qui seront nécessaires pour arriver à la production requise en respectant les contraintes que nous avons.

$$\textbf{Temps. disp/ station} = \frac{450}{100} = 4.5\,\textbf{min} = 270\,\textbf{sec.}$$

Les temps d'assemblage par module sont présentés au Tableau 9.10.

Tableau 9.10 Temps d'assemblage par module de la station de travail bureautique

Module	Temps (s)
Porte	76
Table	256
Étagère	300
Meuble	142
Station	132

En tenant compte des conditions montrées ci-dessus, nous avons deux possibilités: la première est de former une cellule d'assemblage dédiée aux portes (trois portes par station), et la deuxième est d'intégrer l'assemblage des portes aux modules auxquels elles appartiennent et de former une cellule pour l'ensemble (table + 1 porte et étagère + 2 portes). Dans le premier cas, nous avons besoin de cinq cellules d'assemblage et une manutention sera nécessaire entre la cellule des portes et les cellules des tables et des étagères. Dans le deuxième cas, nous avons besoin seulement de quatre cellules et on élimine le transit des portes vers les cellules des tables et des étagères. Pour ces raisons, nous avons choisi la deuxième solution. Les temps requis des cellules ainsi formées sont présentés au Tableau 9.11.

Tableau 9.11 Temps d'assemblage de la station bureautique avec les portes intégrées aux modules respectifs

Module	Temps (s)	T. des portes (s)	T. Total (s)
Table	256	76	332
Étagère	300	152	452
Meuble	142	-	142
Station	132	-	132

D'un autre côté, en ce qui concerne la cellule où nous allons assembler le module station, lequel regroupe tous les modules pour former le produit final, deux travailleurs sont nécessaires indépendamment du niveau de production, étant donné que les

composants qu'ils vont manipuler sont encombrantes et lourds. Ainsi, pour n'avoir pas trop de temps mort dans les cellules dédiées à l'assemblage de meubles et de stations, on regroupe les deux cellules pour en faire une seule avec un temps de 274 s. Les temps d'assemblage finaux pour les cellules à former sont présentés au Tableau 9.12.

Tableau 9.12 Temps d'assemblage des cellules à former pour accomplir le taux de production prévu

Module	Temps (s)
Table	332
Étagère	452
Meuble - Station	274

9.10 SOLUTION POUR LES CELLULES D'ASSEMBLAGE DE LA STATION DE TRAVAIL BUREAUTIQUE

Théoriquement, on peut arriver à assembler les 100 stations de travail avec le personnel montré ci-dessous (le taux de charge de travail est toujours moindre que 90 % du temps disponible).

$$\textbf{Table : } \frac{332}{0.9 * 270} = 1.4 \approx 2 \textbf{ opérateurs}$$

$$\textbf{Étagère : } \frac{452}{0.9 * 270} = 1.8 \approx 2 \textbf{ opérateurs}$$

$$\textbf{Meuble-Station : } \frac{274}{0.9 * 270} = 1.12 \approx 2 \textbf{ opérateurs}$$

Si l'on conçoit la cellule d'assemblage de meubles de façon séparée, on aurait besoin d'un opérateur de plus. La solution trouvée utilise six personnes qui travaillent selon la séquence n°1 de chaque module. La liste des opérations assignées à chaque travailleur et leur temps d'assemblage en secondes est présentée ci-dessous.

A Module: Table

Travailleur 1

Placer le dessus dans le support de travail	4,5
Placer le panneau gauche et retenir	8,5
Visser le panneau gauche et le dessus	16,0
Introduire deux boulons de came au-dessus	10,0
Introduire deux cames de serrure au côté du tiroir	8,0
Placer le côté de tiroir	4,0
Visser les cames	8,0
Placer le panneau arrière et retenir	11,0
Visser le panneau gauche et le panneau arrière	16,0
Visser le côté tiroir et le panneau arrière	16,0

Placer le panneau droit et retenir	8.5
Visser le panneau droit et le dessus	16,0
Placer la base du tiroir et retenir	10,8
Visser la base du tiroir et le côté de tiroir	16,0
Visser la base du tiroir et le panneau droit	16,0
Mettre la table debout (avec l'autre travailleur)	2,8
Placer le carton postérieur	3,6
Clouer le carton postérieur	20,0
Transporter la table à la zone de stockage (avec l'autre travailleur)	7,5

Total: 203,2 s

Travailleur 2

a) Assemblage de la porte

Placer le panneau supérieur au support de travail	3,3
Placer la charnière supérieure et retenir	7,5
Visser la charnière supérieure	16,0
Placer la charnière inférieure et retenir	7,5
Visse la charnière inférieure	16,0
Placer la poignée et retenir	7,3
Visser la poignée	16,0

Transporter la porte à la zone de stockage	2,5

b) Assemblage de la table

Aider à mettre la table debout	2,7
Poser la porte et retenir	7,5
Visser la porte à la table	29,0
Mettre du ruban sur la porte	7,0
Aider à transporter la table à la zone de stockage	7,5
	Total: 129,7 s

La manière dont les deux travailleurs partagent le travail est montrée au diagramme suivant.

Temps (s)	Homme 1	Homme 2
76,0	Travail manuel avec la table en position horizontal (169,3)	Assemblage de la porte (76,0)
169,3		Attente (93,3)
172,1	Mettre la table debout	Mettre la table debout
195,6	Clouer le carton postérieur	Poser la porte et le ruban
215,5	Attente	
223,0	Transporter la table à stockage	Transporter la table à stockage

Le résumé des temps est montré ci-dessous.

	T. individuel (s)	T. partagé (s)	Attente (s)	Total (s)
Travailleur 1	192,9	10,2	19,9	223,0
Travailleur 2	119,5	10,2	93,3	223,0

B Module Étagère

Travailleur 3

Placer la tablette supérieure dans le support de travail	3,5
Placer le panneau gauche et retenir	10,8
Visser le panneau gauche et la tablette supérieure	16,0
Poser la tablette du milieu et retenir	10,8
Visser la tablette du milieu et la tablette supérieure	16,0
Poser la tablette du moniteur et retenir	10,8
Visser la tablette du moniteur et le panneau gauche	16,0
Visser la tablette du moniteur et la tablette du milieu	16,0
Placer le panneau droit et retenir	8,3
Visser le panneau droit et la tablette supérieure	16,0
Placer la base du tiroir et retenir	10,8
Visser la base du tiroir et la tablette du milieu	16,0
Visser la base du tiroir et le panneau droit	16,0
Mettre l'étagère debout (avec l'autre travailleur)	3,0
Poser le carton postérieur et retenir	7,9
Clouer le carton postérieur	24,0
Transporter l'étagère à la zone de stockage	7,5

Total: 209,4 s

Travailleur 4

a) Assemblage des deux portes (Toutes les opérations sont faites deux fois.)

Placer le panneau dans le support de travail	6,4
Placer la charnière supérieure et retenir	15,0
Visser la charnière supérieure	32,0
Placer la charnière inférieure et retenir	15,0
Visser la charnière inférieure	32,0
Placer la poignée et retenir	14,6
Visser la poignée	32,0
Transporter les portes à la zone de stockage	5,0

b) Assemblage de l'étagère

Mettre l'étagère debout (avec l'autre travailleur)	3,0
Poser la porte gauche et retenir	7,5
Visser la porte gauche	29,0
Poser la porte droite et retenir	7,5
Visser la porte droite	29,0
Mettre du ruban sur les portes (pour les empêcher de s'ouvrir soit au moment de l'assemblage ou pendant une opération de manutention)	7,0

Transporter l'étagère à la zone de stockage	
(avec l'autre travailleur)	7,5
	Total: 242,5 s

La manière dont les opérations sont partagées entre les deux travailleurs est présentée dans le diagramme ci-dessous.

Temps (s)	Homme 1	Homme 2
152,0	Travail avec l'étagère en position horizontale (167,0)	Assemblage des deux portes (152,0)
167,0		Attente
170,0	Mettre l'étagère debout	Mettre l'étagère debout
201,9	poser et Clouer le carton postérieur (31,9)	Poser et fixer les deux portes.
250,0	Attente (48,1)	Mettre du ruban (80,0)
257,5	Transporter l'étagère à stockage	Transporter l'étagère à stockage

Le résumé du diagramme précédent est présenté au tableau suivant:

	T. individuel (s)	T. partagé (s)	Attente (s)	Total (s)
Travailleur 1	198,9	10,5	48,1	257,5
Travailleur 2	232,0	10,5	15,0	257,5

C Module Meuble - Station

Travailleur 5

a) Meuble

Placer la tablette supérieure dans le support de travail	3,3
Placer le panneau gauche et retenir	10,5
Visser le panneau gauche et la tablette supérieure	16,0
Placer la tablette du milieu et retenir	10,8
Visser la tablette du milieu et le panneau gauche	16,0
Visser la tablette inférieure et le panneau gauche	16,0

b) Assemblage de la station

Placer la table (deux travailleurs)	5,3
Introduire deux goujons de bois au côté gauche de la table	10,0
Poser l'étagère sur la table (avec l'autre travailleur)	5,2

Introduire deux boulons de came au côté droit de la table	10,0
Introduire deux cames de serrure au côté gauche de la table d'union	8,0
Introduire deux cames de serrure au côté droit de la tablette d'union	8,0
Poser la tablette d'union	3,5
Visser deux cames du côté de la table	8,0
Transporter la station à la zone de stockage	7,5

Total: 138,1 s

Travailleur 6

a) Assemblage du meuble

Poser le panneau droit et retenir	10,5
Visser le panneau droit et la tablette supérieure	16,0
Visser la tablette du milieu au panneau droit	16,0
Poser la tablette inférieure et retenir	10,8
Visser la tablette inférieure au panneau droit	16,0

b) Assemblage de la station

Placer la table (deux travailleurs)	5,2

Introduire deux goujons de bois au côté droit de la table	10,0
Poser l'étagère sur la table	5,3
Visser l'étagère et la table	16,0
Introduire deux boulons de came au côté droit du meuble	10,0
Poser le meuble	4,5
Visser les cames	8,0
Transporter la station à la zone de stockage (deux travailleurs)	7,5
	Total: 135,8 s

Le diagramme qui montre comment les travailleurs partagent les opérations est présenté ci-dessous.

Temps (s)	Homme 1	Homme 2
69,3	Travail à la gauche du meuble (72,6)	Travail à la droite du meuble (69,3)
72,6		Attente
77,9	Placer la table	Placer la table
87,9	Insérer les goujons gauches	Insérer les goujons droits
93,1	poser l'étagère sur la table	poser l'étagère sur la table
109,1	Fixer la table et la tablette d'union (37,5)	Viser l'étagère à la table
130,6		Fixer le meuble et la tablette d'union (22,5)
131,6	Attente	
139,1	Transporter la station à stockage	Transporter la station à stockage

Le résumé des temps du diagramme précédent est montré ci-dessous.

	T. individuel (s)	T. partagé (s)	Attente (s)	Total (s)
Travailleur 1	120,1	18,0	1,0	139,1
Travailleur 2	117,8	18,0	3,3	139,1

Finalement, au Tableau 9.13, nous présentons les temps et les travailleurs que chaque cellule nécessite pour assembler le module correspondant.

Tableau 9.13 Temps et personnel par cellule pour l'assemblage de la station bureautique

Cellule	Temps (s)	Travailleurs
Table	223,0	2
Étagère	257,5	2
Meuble-Station	139,1	2

L'usine assemblera une station de travail bureautique à chaque 257,5 s, ce qui représente 100 produits/quart. Évidemment, la cellule Meuble-Station aura un temps mort de 118,4 s à chaque cycle, mais il faut tenir compte que, étant donné le volume et le poids des composants qui y sont assemblés, la présence de deux travailleurs est nécessaire, sans tenir compte du taux de production. Si la production requise augmente, il serait possible d'augmenter les cellules parallèles pour les tables et les étagères, de façon à diminuer le temps mort que la dernier cellule présente pour un taux de production de 100 unités/quart. La configuration des cellules est présentée à la Figure 9.3.

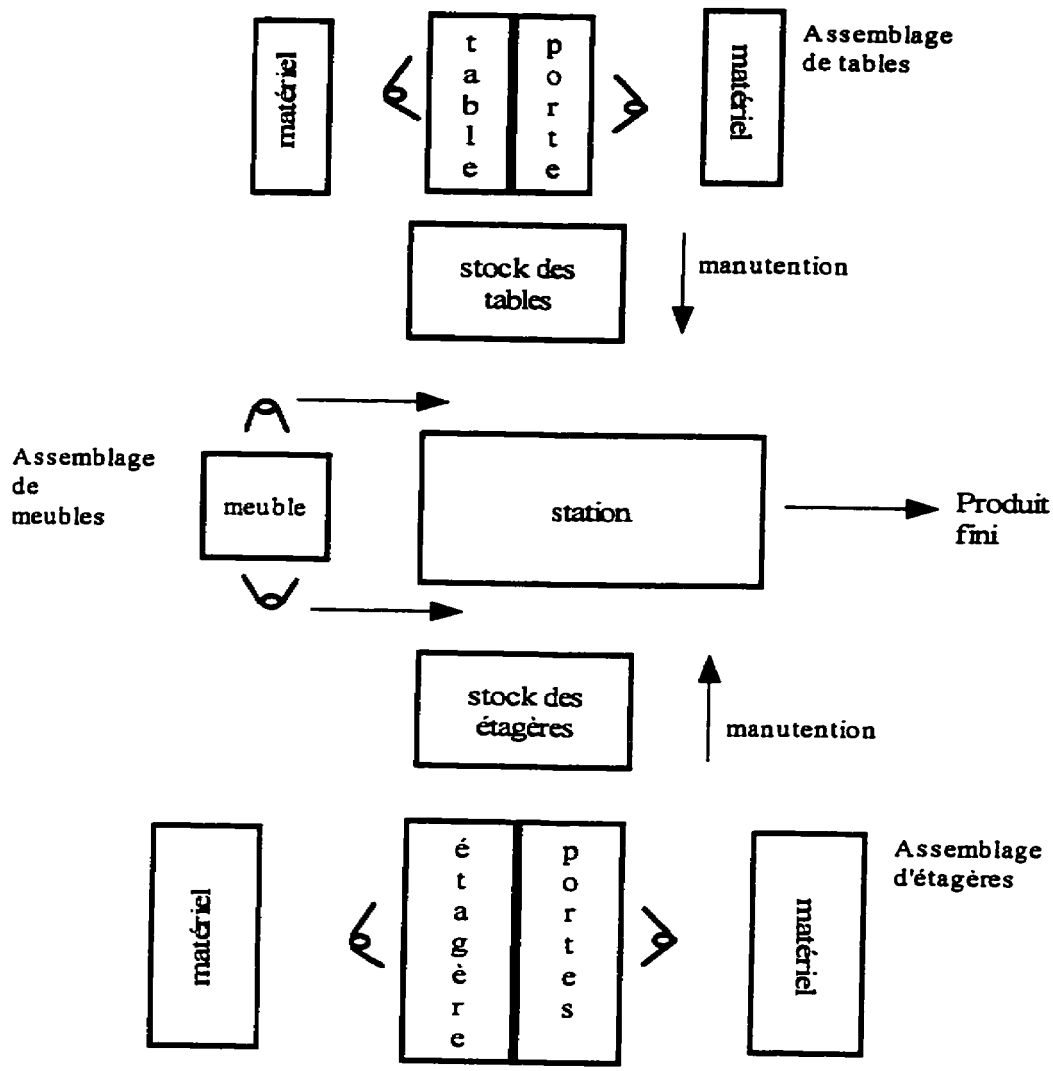


Figure 9.3 Configuration des cellules d'assemblage pour la station de travail bureautique

CHAPITRE 10

APPLICATION DE LA MÉTHODE SUR UN PRODUIT À MODÈLE UNIQUE ET SUSCEPTIBLE À LA MODULARISATION: UN ALTERNATEUR ÉLECTRIQUE

10.1 INTRODUCTION

Comme nous l'avons mentionné au Chapitre 9, nous présentons ici l'exemple de l'alternateur électrique et ce, de la même façon que la station de travail bureautique a été déjà présentée dans le Chapitre 4, lors de l'explication du concept de la modularisation. Ce produit a été classé comme un produit complexe susceptible à la modularisation, ce qui veut dire que ce produit, comme la plupart des produits industriels, n'est pas modulaire à première vue. On peut cependant le modulariser pour répartir la complexité du produit entre ses modules et rendre ainsi l'assemblage plus facile. L'alternateur est présenté à la Figure 10.1.

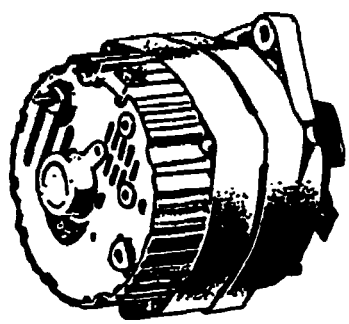
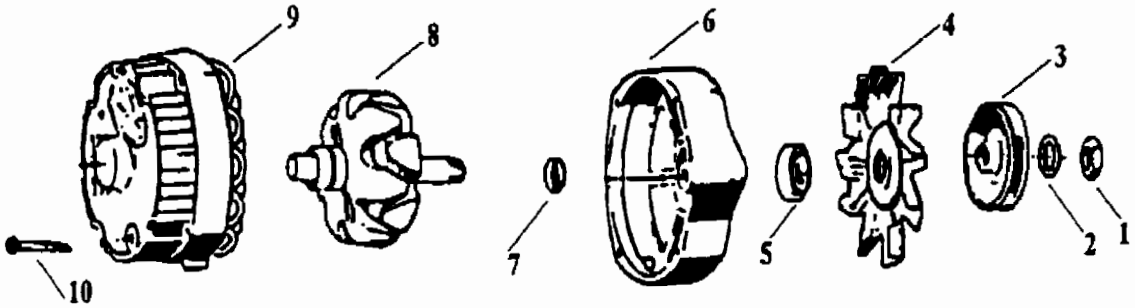


Figure 10.1 Alternateur électrique

10.2 LISTE DES COMPOSANTS DE L'ALTERNATEUR

Si l'on suit la méthodologie des enveloppes expliquée à la Section 4.5.2, le résultat obtenu, après avoir enlevé les composants de fixation dans la première enveloppe, est montré à la Figure 10.2.

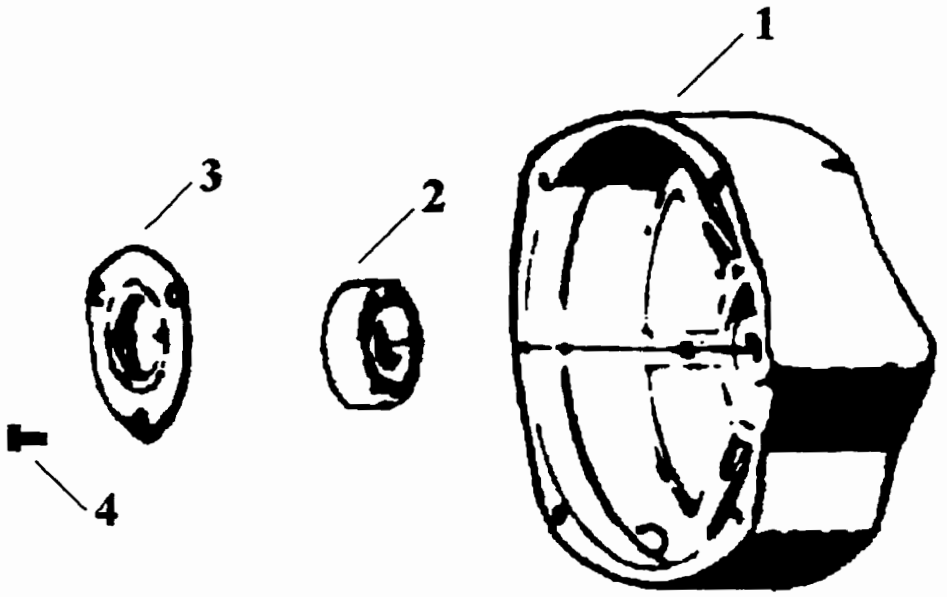


1)	écrou,	6)	couvercle frontal (module 1),
2)	rondelle,	7)	bague 2,
3)	poulie,	8)	rotor,
4)	ventilateur,	9)	couvercle postérieur (module 2),
5)	bague 1,	10)	boulons (4).

Figure 10.2 Première décomposition de l'alternateur

Si l'on examine la Figure 10.2, on observe qu'il y a deux modules à ce niveau de désassemblage. Comme il est le premier niveau de désassemblage, ces deux modules sont

des modules principaux. Dans le niveau suivant, On enveloppe chaque module trouvé et on enlève les composants de fixation. Le décomposition du premier module est présenté à la Figure 10.3.



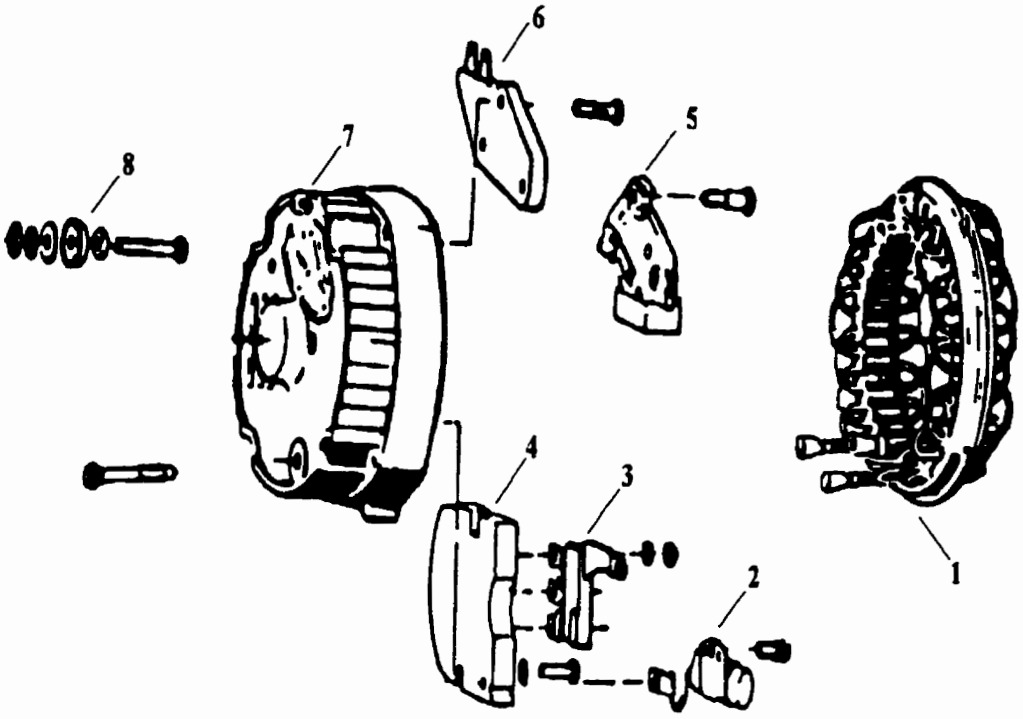
1) Couvercle frontal, 2) Roulement,

3) Plaquette de fixation, 4) Vis.

Figure 10.3 Décomposition du module n°1

Tous les composants montrés dans cette figure sont des composants élémentaires. L'analyse de cette branche est donc terminée à ce niveau.

La décomposition du deuxième module est présenté à la Figure 10.4.



1)	Stator,	2)	Capaciteur,
3)	Diode,	4)	Pont de rectification,
5)	Ensemble de brosses,	6)	Régulateur,
7)	Couvercle postérieur,	8)	Ensemble - terminal.

Figure 10.4 Décomposition du module n°2

Tous les composants montrés dans cette figure sont des composants élémentaires. L'analyse de cette branche se termine donc à ce niveau.

10.3 MODULARISATION DE L'ALTERNATEUR

Après avoir utilisé la méthodologie des enveloppes pour trouver les modules qui forment l'alternateur, la modularisation résultante est montrée à la Figure 10.5.

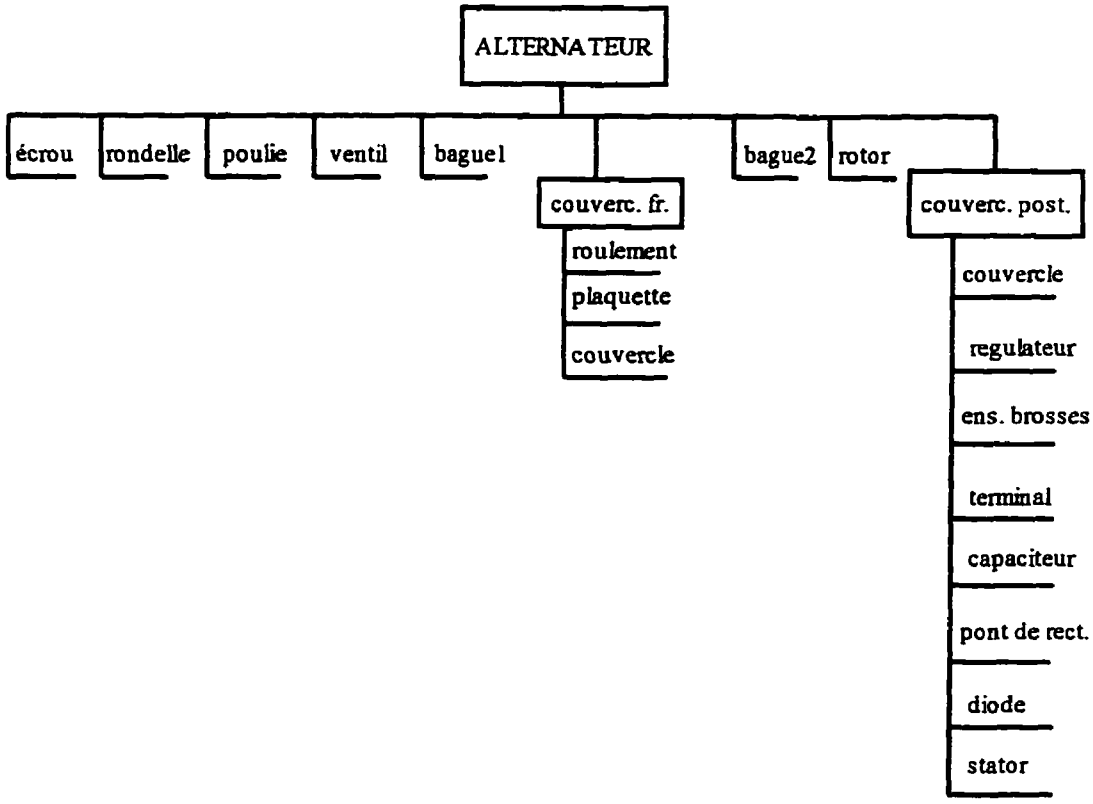


Figure 10.5 Modularisation de l'alternateur

Comme nous l'avons expliqué, chaque module a un assemblage indépendant. Étant donné que nous avons deux composants modulaires, on a deux choix pour la conception de la méthode d'assemblage. Nous pouvons concevoir une ligne principale pour l'assemblage final du produit et une cellule de sous assemblage pour chaque composant modulaire. Aussi nous pouvons penser à la conception d'une ligne principale pour l'assemblage d'un des modules et une seule cellule de sous assemblage pour l'autre module; cette cellule fournira la ligne principale pour y compléter le produit. Cette dernière option est possible seulement si les temps d'assemblage le permettent.

10.4 RELATION DE PRÉCÉDENCE DES COMPOSANTS PAR MODULE

Une fois que les modules ont été définis, il faut déterminer les relations de précédence qui existent entre les composants du même module. On définit donc les fonctions de contact et de translation pour chaque module qui forme le produit. La liste des fonctions de contact et de translation pour les trois modules est présentée en Annexe III.

Comme pour le premier exemple, à titre d'information, on compare le nombre d'entrées que la fonction de contact et la fonction de translation nécessitent avec l'analyse binaire des composants et le nombre d'entrées nécessaires avec la méthode d'assemblage modularisé proposée. Dans le premier cas, comme le produit a 20 composants, le nombre d'entrées pour chaque fonction est de 380. Par contre, avec la méthode de modularisation, on a besoin de seulement 134 entrées de données, ce qui représente 64,7 % de moins. Puisque l'alternateur ne contient pas de composants de trajectoire

cylindrique d'assemblage, le nombre d'entrées à définir, est de 67. La moitié des valeurs de chaque fonction est l'inverse de l'autre moitié et ces valeurs sont calculées de façon automatique par le logiciel de génération des séquences d'assemblage.

10.5 GÉNÉRATION DES SÉQUENCES D'ASSEMBLAGE PAR MODULE

Dans cette étape, on fait la génération des séquences d'assemblage pour chaque module défini dans l'étape de modularisation. Puisque le produit possède seulement deux composants modulaires au même niveau, il est nécessaire de générer les séquences d'assemblage pour le module couvercle frontal, pour le module couvercle postérieur et pour le produit au complet. Avant de commencer la génération et afin d'éviter l'explosion combinatoire de solutions, on impose certaines conditions à l'assemblage.

10.5.1 Module couvercle frontal

Ce module est fait de trois composants élémentaires fonctionnels. Le couvercle est la base d'assemblage où le reste des composants est fixé.

10.5.1.1 Contraintes initiales

Les contraintes initiales sont celles dont le logiciel tient compte, lors de la génération des séquences d'assemblage.

A) Premier composant

Le premier composant est **le couvercle**. Il est la base d'assemblage de ce module.

B) Dernier composant

Pour le module couvercle frontal, le dernier composant est **la plaque de fixation**. C'est le composant qui tiendra en place le roulement lorsqu'il sera fixé au couvercle.

C) Première liaison

La seule liaison qui peut être la première est la liaison «couvercle-roulement».

10.5.1.2 Génération des séquences d'assemblage du module couvercle frontal

Le logiciel de génération de séquences génère le nombre de séquences d'assemblage par niveau, ce qui est montré ci-dessous.

Niveau	Séquences
2	1
3	1

Étant donné qu'il n'existe qu'une seule séquence faisable et souhaitable, l'analyse s'arrête à ce niveau. La séquence d'assemblage résultante est présentée au Tableau 10.1.

Tableau 10.1 Séquences d'assemblage du module couvercle frontal

SÉQUENCE 1

Couvercle
Roulement
Plaquette de fixation

10.5.2 Module couvercle postérieur

Ce module contient huit composants élémentaires fonctionnels, parmi lesquels le couvercle est la base d'assemblage. Tous les autres composants du module y sont fixés.

10.5.2.1 Contraintes initiales

A) Premier composant

Comme la base d'assemblage est **le couvercle**, il devient le premier composant logique.

B) Dernier composant

Le stator est le dernier composant que l'on préfère assembler. La raison de ce choix est que le stator, une fois assemblé, réduit l'accessibilité aux endroits où les autres composants doivent être assemblés, ce qui rendrait l'assemblage beaucoup plus difficile.

C) Premières liaisons possibles

Couvercle postérieur-régulateur

Couvercle postérieur-pont de rectification

Couvercle postérieur-capaciteur

10.5.2.2 Génération des séquences d'assemblage du module couvercle postérieur

Le nombre de séquences par niveau est présenté ci-dessous:

Niveau	Séquences
2	3
3	10
4	28
5	60
6	81
7	45
8	45

10.5.2.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module couvercle postérieur

Même si l'on a imposé des contraintes initiales avant la génération de séquences, le nombre de séquences obtenues est trop élevé pour pouvoir faire une analyse économique de chacune des séquences. C'est pour cette raison qu'on impose les contraintes de procédure suivantes.

A) La diode doit être assemblée après l'ensemble de brosses et ce, de façon consécutive. Cette condition permet que le groupe de composants: Le régulateur, l'ensemble de brosses et la diode soient stables pendant l'assemblage, puisqu'ils utilisent les mêmes composants de fixation. Les séquences faisables son réduites à 20.

B) L'ensemble-terminal doit être assemblé après le pont de rectification. On pose cette contrainte parce que l'ensemble-terminal passe à travers celui-ci pour y être fixé grâce à un écrou. Les séquences faisables et souhaitables sont au nombre de 18.

C) Le stator doit être assemblé après la diode et ce, de façon consécutive. Cette contrainte est nécessaire parce que le stator et la diode utilisent les mêmes composants de fixation. Les séquences résultantes sont réduites à 8.

La liste de séquences résultantes est présentée au Tableau 10.2.

Tableau 10.2 Séquences d'assemblage du module couvercle postérieur

Couvercle postérieur	Couvercle postérieur	Couvercle post
Régulateur	Régulateur	Pont de rectification
Pont de rectification	Pont de rectification	Ensemble terminal
Ensemble terminal	Capaciteur	Régulateur
Capaciteur	Ensemble terminal	Capaciteur
Ensemble brosses	Ensemble brosses	Ensemble brosses
Diode	Diode	Diode
Stator	Stator	Stator
Couvercle postérieur	Couvercle postérieur	Couvercle postérieur
Pont de rectification	Pont de rectification	Pont de rectification
Ensemble terminal	Régulateur	Régulateur
Capaciteur	Ensemble terminal	Capaciteur
Régulateur	Capaciteur	Ensemble terminal
Ensemble brosses	Ensemble brosses	Ensemble brosses
Diode	Diode	Diode
Stator	Stator	Stator
Couvercle postérieur	Couvercle postérieur	
Pont de rectification	Pont de rectification	
Capaciteur	Capaciteur	
Ensemble terminal	Régulateur	
Régulateur	Ensemble terminal	
Ensemble brosses	Ensemble brosses	
Diode	Diode	
Stator	Stator	

10.5.3 Module alternateur

Le module alternateur représente le produit final, et il est composé de sept composants élémentaires fonctionnels et de deux composants modulaires.

10.5.3.1 Contraintes initiales

Avant la génération des séquences d'assemblage du module alternateur, on impose les contraintes initiales expliquées ci-dessous.

A) Premier composant

Dans ce module, il n'existe pas un composant qui soit l'unique composant de base possible. Il n'y a donc pas de contrainte pour le premier composant.

B) Dernier composant

Suivant la même logique que pour le cas précédent, on conclut qu'il n'existe pas une seule dernière composante possible. Il n'y a donc pas non plus de contrainte pour le dernier composant.

C) Les premières liaisons

Les premières liaisons qui sont faisables entre toutes les liaisons possibles que montre le logiciel sont:

- Écrou-rondelle,
- Rotor-bague 2,
- Rotor-$couvercle postérieur,

Note : «$» représente un composant modulaire.

10.5.3.2 Génération des séquences d'assemblage du module l'alternateur

Le nombre de séquences généré par niveau pour ce module est montré ci-dessous:

Niveau	Séquences
2	3
3	16
4	51
5	103
6	133
7	106
8	47
9	9

10.5.3.3 Contraintes technologiques et de procédure pour le module alternateur

Dans le niveau le plus élevé de la hiérarchie d'assemblage de l'alternateur, l'assemblage est pratiquement linéaire, ce qui veut dire qu'il dépend principalement des caractéristiques géométriques et topologiques des composants. Pour cette raison, on ne pose pas de contraintes technologiques ni de procédure à l'assemblage de ce module. La liste des séquences résultantes de la génération est montrée au Tableau 10.3.

Tableau 10.3 Séquences résultantes du module alternateur

SÉQUENCE 1	SÉQUENCE 2	SÉQUENCE 3
Écrou	Rotor	Rotor
Rondelle	Bague2	Bague2
Poulie	$Couvercle frontal	$Couvercle frontal
Ventilateur	Bague1	Bague1
Bague1	Ventilateur	Ventilateur
$Couvercle frontal	Poulie	Poulie
Bague2	Rondelle	Rondelle
Rotor	Écrou	$couvercle postérieur
$Couvercle postérieur	$couvercle postérieur	Écrou
Rotor	Rotor	Rotor
Bague2	Bague2	Bague2
$couvercle frontal	$couvercle frontal	$couvercle frontal
Bague1	Bague1	Bague1
Ventilateur	Ventilateur	$couvercle postérieur
Poulie	$couvercle postérieur	Ventilateur
$couvercle postérieur	Poulie	Poulie
Rondelle	Rondelle	Rondelle
Écrou	Écrou	Écrou
Rotor	Rotor	$couvercle postérieur
Bague2	Bague2	Rotor
$couvercle frontal	$couvercle postérieur	Bague2
$couvercle postérieur	$couvercle frontal	$couvercle frontal
Bague1	Bague1	Bague1
Ventilateur	Ventilateur	Ventilateur
Poulie	Poulie	Poulie
Rondelle	Rondelle	Rondelle
Écrou	Écrou	Écrou

10.6 Évaluation qualitative des séquences générées

Le nombre de séquences générées par module est relativement élevé pour le cas du module couvercle postérieur (huit séquences) et du module alternateur (neuf séquences). Avant de faire une évaluation économique de chaque séquence, nous allons effectuer une évaluation qualitative en tenant compte, comme base, la stabilité de l'ensemble pendant le processus d'assemblage.

10.6.1 Module couvercle postérieur

Le couvercle postérieur possède huit composants dont le régulateur, l'ensemble de brosses et la diode qui sont fixés au couvercle avec les mêmes composants de fixation. Il faut donc que les trois soient d'abord placés pour pouvoir les fixer.

Pour assembler l'ensemble-terminal, il est nécessaire de tourner le couvercle, d'introduire le composant par l'extérieur et de le fixer par l'intérieur. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire que tous les composants présents soient déjà fixés dans le couvercle avant l'opération de tournage. Dans le cas contraire, le processus d'assemblage devient instable dans l'une ou l'autre des étapes.

Des huit séquences trouvées comme solution, il y en a seulement trois qui accomplissent cette condition de stabilité. Dans les autres séquences, le tournage du couvercle pour assembler l'ensemble-terminal est fait avec au moins un composant qui

n'est pas fixé à l'intérieur du couvercle. Les trois séquences qui accomplissent la condition de stabilité sont montrées au Tableau 10.4.

Tableau 10.4 Séquences d'assemblage choisies pour le module couvercle postérieur

Couvercle postérieur	Couvercle postérieur	Couvercle postérieur
Pont de rectification	Pont de rectification	Pont de rectification
Ensemble-terminal	Ensemble-terminal	Capaciteur
Régulateur	Capaciteur	Ensemble-terminal
Capaciteur	Régulateur	Régulateur
Ensemble-brosses	Ensemble-brosses	Ensemble-brosses
Diode	Diode	Diode
Stator	Stator	Stator

10.6.2 Module alternateur

L'assemblage de l'alternateur, dans son niveau de hiérarchie le plus élevé, est linéaire et comporte des contraintes principalement géométriques et topologiques. Pour cette raison, nous n'avons posé aucune contrainte initiale (définition du premier et du dernier composant), ni aucune contrainte de procédure, lors de la génération des séquences d'assemblage. Avant de passer à l'étape d'évaluation économique, il est préférable de vérifier la faisabilité de l'ensemble pendant l'assemblage.

L'alternateur présente des composants de fixation dans les deux directions possibles d'assemblage, celles-ci étant en plus opposées. Dans une direction, nous avons l'écrou qui fixe tous les composants externes qui sont traversés par le rotor et, dans l'autre direction, nous avons les quatre boulons qui servent à fixer les deux couvercles de

l'alternateur. Il est évident que si l'on commence l'assemblage pour le couvercle frontal, le rotor et les composants externes, il faut que l'écrou soit présent pour pouvoir tourner l'ensemble et ensuite continuer le travail de l'autre bout. Dans le cas contraire, l'assemblage devient instable dans l'une ou l'autre des étapes et n'est pratiquement pas réalisable. Des neuf séquences générées par le module alternateur, cinq séquences accomplissent cette contrainte. Les séquences restantes ne sont pas faisables. La liste des séquences qui accomplissent la contrainte de stabilité est montrée au Tableau 10.5.

Tableau 10.5 Séquences d'assemblage choisies pour le module alternateur

Écrou	Rotor	Rotor	Rotor	$couvercle postérieur
Rondelle	Bague2	Bague2	Bague2	Rotor
Poulie	$couvercle frontal	$couvercle frontal	$couvercle postérieur	Bague 2
Ventilateur	Bague 1	$couvercle postérieur	$couvercle frontal	$couvercle frontal
Bague 1	Ventilateur	Bague 1	Bague 1	Bague 1
$couvercle frontal	Poulie	Ventilateur	Ventilateur	Ventilateur
Bague 2	Rondelle	Poulie	Poulie	Poulie
Rotor	Écrou	Rondelle	Rondelle	Rondelle
$couvercle postérieur	$couvercle postérieur	Écrou	Écrou	Écrou

Note : «$» représente un composant modulaire.

Après cette évaluation qualitative, les séquences faisables et souhaitables par module que nous allons évaluer du point de vue économique sont présentée ci-dessous:

Module	N° séquence
couvercle frontal	1
couvercle postérieur	3
alternateur	5

10.7 OPÉRATIONS COMPLÉMENTAIRES

Les opérations qui complètent les tâches d'assemblage par chaque module sont les suivantes.

10.7.1 Module couvercle frontal

1) Graisser le roulement du couvercle frontal
2) Presser le roulement du couvercle frontal
3) Fixer la plaquette du couvercle frontal (3 vis)

10.7.2 Module couvercle postérieur

1) Graisser le roulement du couvercle postérieur
2) Fixer le capaciteur au couvercle (1 vis) et au pont de rectification (1 vis)
3) Fixer le pont de rectification au couvercle postérieur (2 vis)
4) Fixer l'ensemble-terminal (l'écrou)

5) Enlever l'écrou de l'ensemble terminal

6) Fixer le régulateur, l'ensemble de brosses et la diode ensemble (3 vis)

7) Fixer le stator (3 écrous et 3 rondelles)

8) Enlever la tige de sécurité de l'ensemble de brosses

9) Tourner l'ensemble

10.7.3 Module alternateur

10) Fixer l'écrou et l rotor

11) Donner le couple à l'écrou

12) Fixer les deux couvercles (4 vis)

13) Faire la preuve électronique (couple de moteur, vitesse et courant)

14) Faire tourner l'alternateur

Les temps des opérations complémentaires de fixation sont calculés par le logiciel DFMA de Boothroyd et Dewhurst. Pour les autres opérations complémentaires, on utilise des temps prédéterminés du système MTM-2 (48).

10.8 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES SÉQUENCES TROUVÉES PAR MODULE

Après l'évaluation qualitative, on fait une évaluation économique des séquences d'assemblage par module sur les séquences finales détaillées, en utilisant le logiciel

DFMA, de Boothroyd et Dewhurst. Les résultats obtenus par module sont montrés ci-dessous.

10.8.1 Couvercle frontal

Le couvercle frontal présente une seule séquence d'assemblage, laquelle est présentée en Annexe IV et résumée ci-dessous:

Coût total d'assemblage: 0,25 $

Temps total d'assemblage: 30 s

Nombre total d'opérations: 8

10.8.2 Couvercle postérieur

Après avoir analysé, du point de vue économique, les trois séquences finales d'assemblage pour ce module et qui sont présentées en Annexe IV, les résultats trouvés sont les mêmes et sont présentés ci-dessous:

Coût total d'assemblage: 0,72 $

Temps total d'assemblage: 86 s

Nombre total d'opérations: 23

10.8.3 Alternateur

L'analyse économique, faite avec le logiciel DFMA à chaque séquence finale du module alternateur, donne les résultats suivants:

Séquences 1, 2 et 5 :

Coût total d'assemblage: 0,66 $

Temps total d'assemblage: 79 s

Nombre total d'opérations: 16

Séquence 3 :

Coût total d'assemblage: 0,75 $

Temps total d'assemblage: 90 s

Nombre total d'opérations: 17

Séquence 4:

Coût total d'assemblage: 0,80 $

Temps total d'assemblage: 96 s

Nombre total d'opérations: 18

Les séquences détaillées et l'analyse faite par le logiciel DFMA sont présentées en Annexe IV.

10.9 ÉQUILIBRAGE DE LIGNE POUR L'ASSEMBLAGE DE L'ALTERNATEUR

Après l'évaluation économique, le nombre de séquences d'assemblage par module qui accomplissent toutes nos conditions sont présentées ci-dessous.

Module	Nombre
couvercle frontal	1
couvercle postérieur	3
alternateur	3

La séquence n°1 du module couvercle frontal, les trois séquences du module postérieur et les séquences n°1, 2 et 5 du module alternateur satisfont toutes les contraintes imposées. De plus, on obtient, pour ces séquences, le coût le plus bas comparé avec les autres séquences du même module. Théoriquement, on peut choisir n'importe quelle de ces séquences pour l'analyse de l'équilibrage de ligne, à moins qu'une de celles-ci s'adapte plus convenablement que les autres à notre contexte particulier d'assemblage (façon de travailler, supports existants, machinerie, etc.). Pour l'équilibrage de ligne, nous avons considéré les contraintes suivantes:

- Taux de production prévue: 450 alternateurs/quart,
- Temps disponible/quart: 7,50 h.
- La politique de l'entreprise ne permet pas que la charge de travail de chaque travailleur dépasse 95 % du temps disponible.

L'équilibrage de ligne que nous voulons concevoir doit accomplir le taux de production prévu et deux autres objectifs, peut-être plus qualitatifs mais tout aussi importants; c'est-à-dire que les opérations assignées à chaque travailleur doivent suivre un

ordre logique et, de plus, elles doivent représenter des tâches d'assemblage complètes. Dans ce travail, nous avons choisi les séquences présentées ci-dessous.

A) Couvercle frontal

Il y a seulement une séquence d'assemblage faisable et souhaitable et nous allons l'utiliser pour l'équilibrage des opérations du couvercle frontal.

B) Couvercle postérieur

Les trois séquences d'assemblage du couvercle postérieur peuvent être utilisées pour l'équilibrage de ligne. La seule différence entre les trois séquences est l'ordre de fixation des composants élémentaires sur la même base et, après toutes les contraintes imposées, cet ordre n'a d'impact ni sur la conception d'un système d'assemblage ni sur le coût d'assemblage.

Pour notre travail, nous choisissons la séquence d'assemblage n°2, qui est une séquence stable dans chaque étape d'assemblage et qui suit un ordre d'assemblage très logique.

C) Alternateur

Après l'évaluation économique de l'alternateur, il est resté trois séquences: n°1, 2 et 5 du Tableau 10.5, qui sont détaillées en Annexe IV. Ces trois séquences requièrent chacune une opération de tournage et deux supports de travail.

La séquence n°1 a pour base d'assemblage l'écrou et elle a besoin d'un support de travail plus sophistiqué que les autres séquences pour la première partie de l'assemblage (avant de tourner l'ensemble). La séquence n°2 a pour base d'assemblage le rotor. On utilise un premier support de travail pour assembler toute la partie frontale de l'alternateur et on fait tourner l'ensemble afin d'assembler le couvercle postérieur et fixer les quatre vis respectives. Finalement, la séquence n°5 a pour base d'assemblage le couvercle postérieur sur lequel sont assemblés tous les composants fonctionnels. On tourne l'ensemble pour fixer les quatre vis qui attachent les couvercles frontal et postérieur.

Dans ce point-ci, même si l'on n'a pas toutes les données nécessaires, notre choix reste à faire entre les séquences n°2 et 5. On élimine la séquence n°1 parce qu'elle a besoin d'un support très sophistiqué pour l'assemblage final. De plus, cette séquence fait que tout l'ensemble repose sur l'écrou et que rien n'attache les composants jusqu'à la fixation des quatre vis du couvercle postérieur à la fin du processus, ce qui nous donne un contexte d'assemblage instable.

Il faut remarquer que, selon les caractéristiques particulières à chaque environnement d'assemblage, nous aurions pu choisir d'autres séquences.

10.9.1 Analyse pour l'Équilibrage de ligne

Le temps disponible pour assembler un alternateur, en tenant compte d'un taux de production de 450 alternateurs/quart, est:

$$7.5\frac{\mathbf{h}}{\mathbf{quart}} * 60\frac{\mathbf{min}}{\mathbf{h}} * \frac{1}{450}\frac{\mathbf{quart}}{\mathbf{altern}} * 0.95 = 0.95\frac{\mathbf{min}}{\mathbf{altern}} = 57\frac{\mathbf{s}}{\mathbf{altern}}$$

Il faut d'abord calculer combien de machines pour réaliser la vérification électronique sont nécessaires pour atteindre le niveau de production prévu. Le Tableau 10.6 montre les temps d'opération de la machine.

Tableau 10.6 Temps d'opération de la machine de preuve électronique

Description	T. de mise en marche (s)	T. machine (s)	TOTAL (s)
Machine de preuve électronique	8.4	40	48.4

On peut dire qu'une seule machine de preuve électronique est capable de fournir la production prévue. Les temps d'assemblage manuel des modules sont présentés au Tableau 10.7.

Tableau 10.7 Temps d'assemblage manuel des modules

MODULE	TEMPS (s)
Couvercle frontal	30,0
Couvercle postérieur	86,0
Alternateur	79,0

Étant donné que l'on ne peut pas demander plus de 57 s/travailleur et si l'on utilise une cellule d'assemblage pour chaque module, on a donc besoin de cinq travailleurs. C'est pour cette raison qu'il est convenable de regrouper le module couvercle frontal et le module principal alternateur sur une même cellule d'assemblage. De cette façon, les temps d'assemblage de chaque cellule sont:

Module	Cellule n° 1	Cellule n° 2	
couvercle postérieur	86,0 s	--	
Couvercle frontal	--	30,0 s	
Alternateur	--	79,0 s	
Total	86,0 s	109,0 s	195,0 s

Avec cette disposition, on a donc théoriquement besoin de quatre travailleurs.

10.10 SOLUTION POUR LES CELLULES D'ASSEMBLAGE DE L'ALTERNATEUR

Nous avons décidé d'essayer une solution avec deux modules séparés:

Couvercle postérieur: 86 s

Couvercle frontal et alternateur: 109 s

Pour faciliter la lecture du texte, on appellera «ligne principale» le groupe de modules couvercle frontal et l'alternateur. Théoriquement, on peut arriver à assembler les 450 alternateurs avec le personnel montré ci-dessous.

Couvercle postérieur : $\frac{86}{57} = 1.51 \approx 2$ **opérateurs**

Ligne principale : $\frac{109}{57} = 1.91 \approx 2$ **opérateurs**

La liste des opérations assignées à chaque opérateur et son temps de travail total sont présentés ci-dessous.

Module: Couvercle postérieur

<u>Travailleur n° 1</u>

Placer le couvercle postérieur dans le support de travail 3,5

Graisser le roulement	6,0
Placer le pont de rectification	3,5
Fixer le pont de rectification	7,0
Placer le capaciteur	3,5
Fixer le capaciteur au pont de rectification et au couvercle	7,0
Enlever l'écrou de l'ensemble-terminal	4,0
Placer l'ensemble-terminal	3,0
Fixer l'ensemble-terminal avec l'écrou	5,0
	Total 42,5 s

Travailleur n° 2

Placer le régulateur	3,5
Placer l'ensemble-brosses	3,5
Placer la diode	3,5
Fixer les trois composants précédents	9,0
Placer le stator	3,5
Fixer le stator	9,0
Tourner l'ensemble	4,0
Enlever la tige de sécurité de l'ensemble-brosses	8,0
	Total 44,0 s

Dans la ligne principale, il est nécessaire que le premier travailleur assemble le couvercle frontal et ensuite commencer l'assemblage final. Sinon, il doit arrêter l'assemblage final pour assembler le module couvercle frontal et pour pouvoir l'ajouter à l'assemblage final, ce qui n'est pas logique ni pratique.

Avec cette contrainte, on a fait l'équilibrage de la ligne principale en utilisant les deux séquences possibles. On a constaté que la séquence d'assemblage n°5 permet une meilleure répartition du temps manuel d'assemblage.

	Séquence n°5 (s)	**Séquence n°2 (s)**
Travailleur 3	54,0	50,5
Travailleur 4	55,0	58,5

L'équilibrage de ligne avec les deux séquences a été fait en tenant toujours compte d'une répartition logique des opérations et de l'assignation de tâches complètes à chaque travailleur. Étant donné les résultats obtenus, on choisit la séquence n°5. La liste des opérations assignées à chaque travailleur de la ligne principale est montrée ci-dessous.

Module: Ligne principale

Travailleur n° 3

Couvercle frontal:

placer le couvercle frontal en support de travail 3,0

Placer le roulement	4,0
Presser le roulement	4,0
Graisser le roulement	6,0
Placer la plaquette	3,9
Fixer la plaquette au couvercle	9,0

Alternateur:

Placer le couvercle postérieur en support de travail	3,5
Placer le rotor	3,0
Placer le bague 2	2,6
Placer le couvercle frontal	3,5
Placer le bague 1	2,6
Placer le ventilateur	3,0
Placer la poulie	2,6
Placer la rondelle	3,2

Total 54,0 s

<u>Travailleur n° 4</u>

Placer l'écrou et le fixer	7,1
Donner le couple à l'écrou	4,0

Tourner l'ensemble	6,5
Fixer les deux couvercles	29,0
Faire la preuve électronique	8,4
	Total 55,0 s

Le diagramme homme-machine suivant montre l'interaction entre le travailleur n° 4 et la machine de preuve électronique qu'il doit gérer.

Temps (s)	**Homme**	**Machine de preuve électronique**
8,40	Décharge Charge	Décharge Charge
48,40	Travail manuel indépendant (46,60)	Travail Automatique (40,00)
55,00		Attente (6,60)

Le résumé des temps assignés aux travailleurs est montré au Tableau 10.8.

Tableau 10.8 Résumé des temps assignés par travailleur

Module	Travailleur	Temps (s)
couvercle postérieur	1	42,5
	2	44,0
ligne principal	3	54,0
	4	55,0

Le temps de cycle réel de la ligne est donné par le travailleur n°4 avec 55 s/alternateur. L'usine assemblera un alternateur chaque 55 s, ce qui permet d'arriver à la production prévue avec une efficacité de 92 %. La configuration des cellules est présentée à la Figure 10.6.

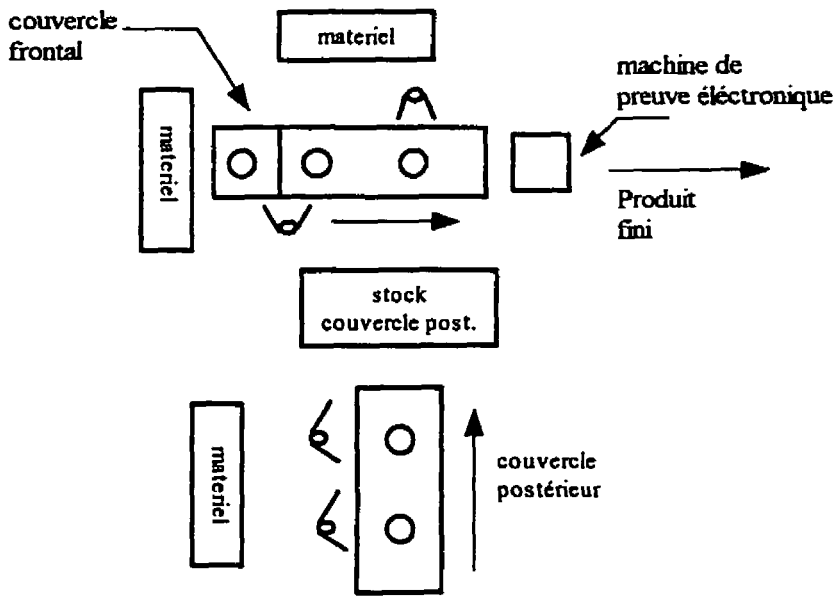


Figure 10.6 Configuration des cellules d'assemblage pour l'alternateur

CHAPITRE 11

APPLICATION DE LA MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE SUR UN PRODUIT À MODÈLES MULTIPLES : UNE TURBINE HYDRAULIQUE

11.1 INTRODUCTION

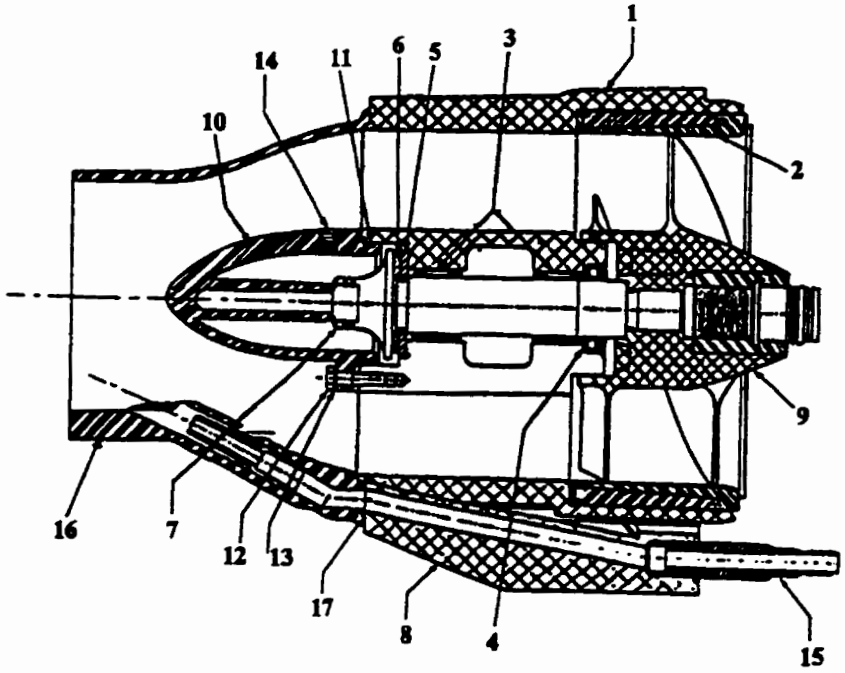
Dans ce chapitre, nous montrons l'utilité de la méthodologie proposée dans la planification d'un système d'assemblage pour une famille de produits. Le produit à modèles multiples qui a été analysé est une turbine hydraulique utilisée pour la propulsion de petits bateaux. L'objectif est de concevoir une ligne d'assemblage capable de produire les différents modèles de turbines de manière aléatoire (système d'assemblage à modèles mélangés) et cette installation doit fonctionner avec un haut rendement. Après leur assemblage, les turbines sont envoyés à une autre ligne où elles sont montées sur les bateaux. Pour arriver à planifier l'assemblage de ce type de produit, on doit utiliser la méthodologie proposée avec les concepts expliqués dans le Chapitre 7, dans lequel on parle de la conception de systèmes d'assemblage pour des familles de produits.

11.2 PRÉSENTATION DU PRODUIT

La famille de turbines hydrauliques que l'on a analysée est formée par deux sous-familles de turbines: la sous-famille de turbines hydrauliques de carter en plastique et la sous-famille de turbines hydrauliques de carter métallique. Pour ne pas alourdir le texte, nous parlerons de ***produit*** lorsque nous ferons référence à la famille de turbines au

complet. Nous parlerons de ***turbines en plastique*** quand nous ferons référence à la sous-famille de turbines de carter en plastique et, enfin, de ***turbines métalliques*** lorsque nous ferons référence à la sous-famille de turbines de carter en métal. Pour les turbines en métal, l'assemblage du venturi n'est pas fait dans la cellule de turbines puisque, d'abord, la pompe métallique doit être peinturée et, ensuite, on doit assembler le venturi dans la ligne d'assemblage principale; Pour éviter ce problème de production, la conception de la ligne doit tenir compte du remplacement graduel des turbines métalliques par des turbines équivalentes en plastique.

La turbine représentative de la famille de produits est présentée à la Figure 11.1. La méthode de fixation entre le venturi et le carter est montrée à la Figure 11.2.



1 : Carter,

2 : Bague d'usure,

3 : Roulement à aiguilles (2),

4 : Dispositif d'étanchéité,

5 : Rondelle de butée,

6 : Palier de butée,

7 : Arbre,

9 : Hélice,

11 : Joint torique de couvercle

12 : Vis hex M5x20 (3),

13 : Rondelle plate M5 (3),

14 : Bouchon,

15 : Raccords,

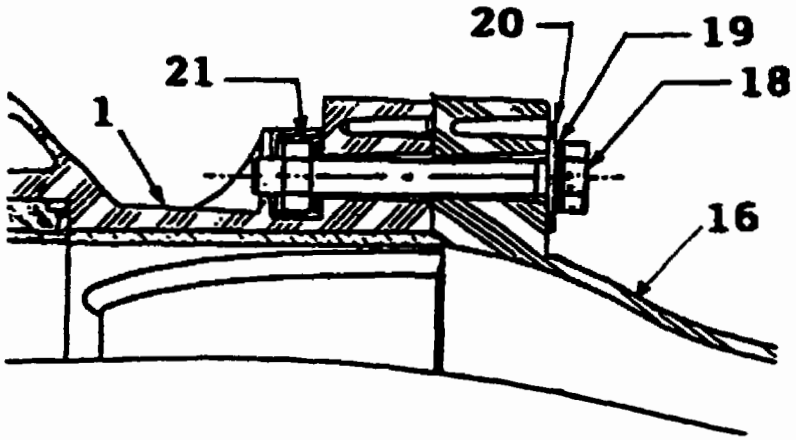
16 : Venturi,

17 : Joint torique (2),

8 : Sortie d'eau,

10 : Couvercle,

Figure 11.1 Turbine hydraulique générique



1 : Carter,

16 : Venturi,

18 : Vis hex M8 (4),

19 : Rondelle de sécurité (4),

20 : Rondelle plate (4),

21 : Logement d'écrou (4).

Figure 11.2 Méthode de fixer le venturi avec le carter

11.3 CLASSIFICATION DES COMPOSANTS

Nous examinons un cas où le produit est fabriqué en dix modèles différents. Les modèles qui appartiennent à la sous-famille de turbines en plastique sont les suivants: E, I, D, J, G, C et F; par contre, A, B et H sont de modèles de turbines métalliques. Pour chaque modèle du produit, nous avons classifié les composants nommés à la Figure 11.1 en trois catégories suivantes: communs, variables et spécifiques. Ainsi, on peut définir

quels modèles appartiennent à chacune des sous-familles, selon la méthodologie expliquée dans la Section 6.5.1.

Comme nous l'avons dit à la Section 11.2, dans les turbines de carter en plastique, il est nécessaire d'assembler la pompe et le venturi (avec ses composants supplémentaires). Par contre, dans les turbines de carter métallique, on assemble seulement la pompe. Cette différence est fondamentale pour la définition des deux sous-familles. La classification des composants selon les trois catégories définies est présenté ci-dessous.

11.3.1 Pompe

1) carter			
1.1 carter en plastique	(1)	fonctionnel	variable
1.2 carter métallique	(1)	fonctionnel	variable
2) Bague d'usure	(1)	fonctionnel	commun
3) Roulement à aiguilles	(2)	fonctionnel	commun
4) Dispositif d'étanchéité	(1)	fonctionnel	commun
5) Rondelle de butée	(1)	fonctionnel	commun
6) Palier de butée	(1)	fonctionnel	commun
7) Arbre	(1)	fonctionnel	commun
8) Sortie d'eau	(1)	fonctionnel	spécifique
9) Hélice	(1)	fonctionnel	variable

10) Couvercle	(1)	fonctionnel	variable
11) Joint torique(de couvercle)	(1)	fonctionnel	commun
12) Vis hex M5x20 (couvercle)	(3)	de fixation	commun
13) Rondelle plate M5 (couvercle)	(3)	de fixation	commun
14) Bouchon d'entrée de l'huile	(1)	fonctionnel	commun
15) Raccord écoupeur	(2)	fonctionnel	spécifique
16) Raccord de pompe	(1)	fonctionnel	spécifique

Les chiffres entre parenthèses, à côté de chaque composant, indiquent la quantité du composant que l'on utilise dans le produit. La variation des composants entre les deux sous-familles relève davantage du matériel que de la forme. L'équipement nécessaire pour les deux familles est donc le même, mais l'inconvénient de cette situation est que la reconnaissance du bon composant pour un certain modèle de la part du travailleur est plus difficile, surtout dans le cas des hélices.

Tous les composants spécifiques de la pompe appartiennent aux turbines de carter en plastique. Dans le cas de la sortie d'eau, celle-ci peut être assemblée de façon à ce que l'on puisse maintenir le niveau de standardisation de la ligne d'assemblage. Il serait cependant souhaitable que le fournisseur envoie chaque carter avec la sortie d'eau déjà assemblée, ce qui permettrait l'élimination d'une opération et d'un item de la liste de matériel. Pour le cas des raccords, on peut dire qu'ils sont identiques pour les turbines métalliques et pour les turbines en plastique, mais dans le cas des turbines métalliques, les

raccords doivent être posés après de peinturer le carter, donc sur la ligne principale d'assemblage. Puisque notre étude est limitée à la cellule d'assemblage de turbines, nous avons considéré ces raccords comme des composants spécifiques pour les turbines en plastique; cependant, afin de standardiser l'opération d'assemblage des raccords et étant donné que, dans la ligne principale, il y a plus de temps disponible et la manutention peut être faite plus facilement, l'assemblage des raccords sera fait à cet endroit pour tous les modèles.

11.3.2 Venturi

1) venturi	(1)	fonctionnel	spécifique
2) joint torique	(2)	fonctionnel	spécifique
3) vis hex M8	(4)	de fixation	spécifique
4) rondelle plate M8	(4)	de fixation	spécifique
5) rondelle de sécurité	(4)	de fixation	spécifique
6) logement d'écrou	(4)	de fixation	spécifique

Tous les composants du venturi sont spécifiques aux turbines en plastique. Il est alors logique que l'assemblage de ces composants soit fait dans une station dédiée aux turbines en plastique. De cette façon, la ligne reste standard pour la partie où la pompe est assemblée et on donne de la flexibilité à la ligne seulement dans la dernière station de travail, qui est dédiée aux turbines en plastique.

11.4 MODULARISATION DE L'ASSEMBLAGE

En se basant sur la classification des composants, sur l'équipement existant et sur les sous-familles définies, nous avons modularisé l'assemblage de chaque sous-famille. La modularisation de l'assemblage pour les turbines en plastique est montré à la Figure 11.2.

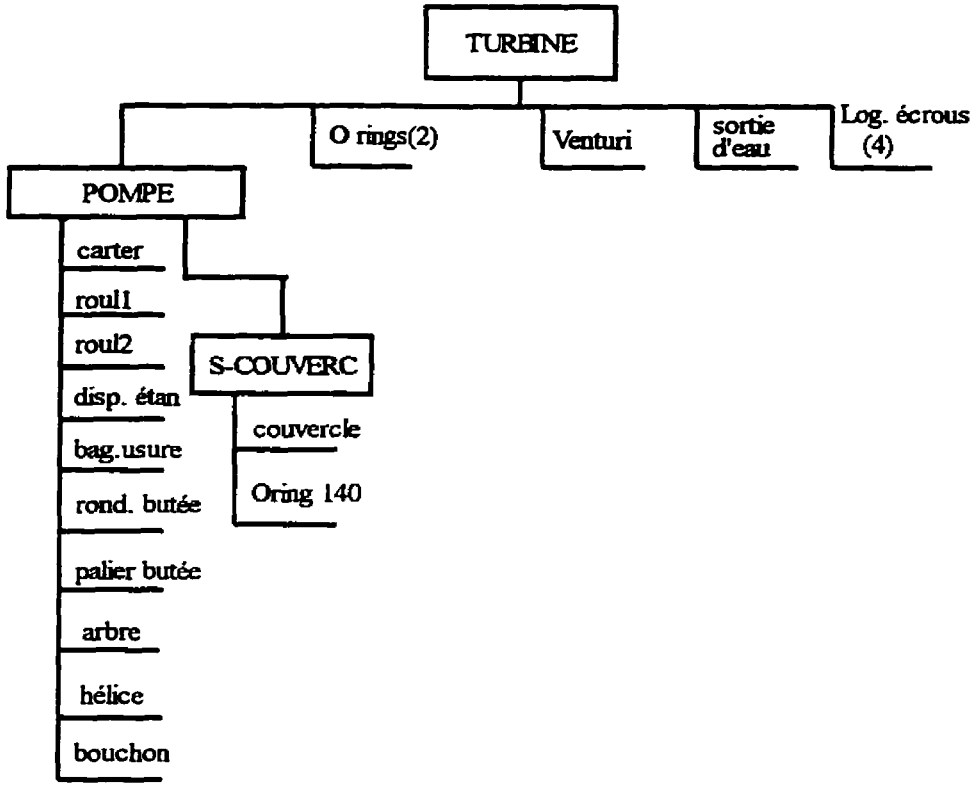


Figure 11.3 Modularisation des turbines en plastique

Dans cette figure, on peut voir qu'un module principal, nommé POMPE, est à la fois constitué de composants élémentaires et d'un composant modulaire appelé S-COUVERCLE (sous-assemblage du couvercle). Le reste des composants dans le niveau principal d'assemblage, sont des composants élémentaires. Il faut noter que, pour la sortie d'eau, même si celle-ci est un composant de la pompe, on a donc décidé de l'assembler séparément afin de conserver le module POMPE commun pour tous les modèles.

La modularisation de l'assemblage des turbines métalliques est présentée à la Figure 11.3. Le module POMPE est le même que pour le cas des turbines en plastique. De plus, on peut utiliser la même équipe et le même outillage.

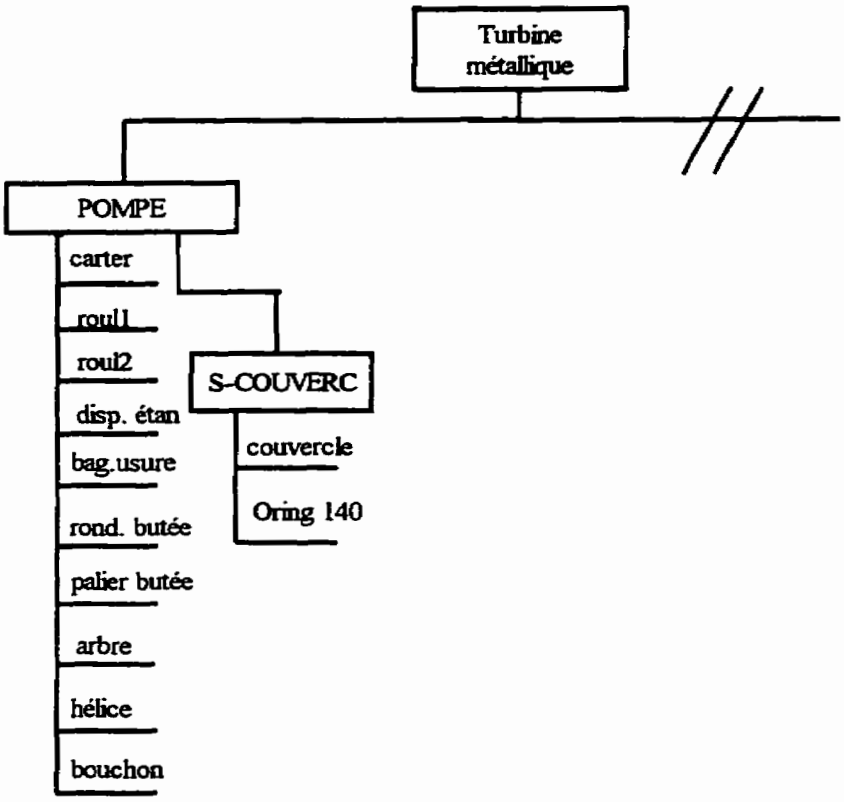


Figure 11.4 Modularisation des turbines métalliques

11.5 RELATION DE PRÉCÉDENCE DES COMPOSANTS PAR MODULE

L'étape qui suit la modularisation est la définition des fonctions qui représentent la relation de précédence entre les composants d'un module. Ces fonctions sont la fonction de contact et la fonction de translation, et celles-ci sont montrées en Annexe VII. Cependant, il faut remarquer la différence entre les entrées pour chaque fonction, lorsqu'on utilise l'approche binaire pour la génération de séquences ou la méthode modulaire que l'on propose. Pour le premier cas, le nombre d'entrées par fonction est de 380. Pour le deuxième cas, ce nombre est de 184, ce qui représente 51,6 % de moins.

11.6 GÉNÉRATION DES SÉQUENCES D'ASSEMBLAGE PAR MODULE

Dans cette section, nous avons généré les séquences d'assemblage pour les différents modules en utilisant la méthode expliquée dans le Chapitre 5. Afin d'éviter une explosion combinatoire des séquences générées, nous avons posé certaines contraintes à l'assemblage avant de commencer la génération des séquences.

11.6.1 Sous-assemblage du couvercle (S-couvercle)

Le module S-couvercle est formé seulement par deux composants, le couvercle et le joint torique 140. Malgré cette simplicité, ce module doit être assemblé séparément du module POMPE, puisque leurs bases d'assemblage sont différentes. Les séquences d'assemblage générées pour ce module sont présentées au Tableau 11.1:

Tableau 11.1 Séquences d'assemblage pour le module S-Couvercle

SÉQUENCE 1	SÉQUENCE 2
couvercle	joint torique 140
joint torique 140	couvercle

Évidement, il est plus facile d'introduire le joint torique dans le couvercle que de faire l'inverse. C'est pourquoi on choisit la séquence n°1.

11.6.2 Pompe

Le module POMPE contient dix composants élémentaires fonctionnels et un module (S-couvercle). Pour éviter l'explosion des séquences d'assemblage, on a d'abord posé des contraintes initiales.

11.6.2.1 Contraintes initiales

Afin de focaliser la génération vers des séquences qui soient faisables et souhaitables, nous avons imposé les contraintes suivantes avant de commencer la génération des séquences d'assemblage pour la pompe.

A) Premier composant

Dans notre cas, le premier composant est **le carter**, parce qu'il est la base de l'assemblage. On ne peut pas commencer l'assemblage avec un autre composant.

B) Dernier composant

Pour la pompe, le dernier composant à assembler est **le bouchon**. Avec la même logique utilisée pour la première contrainte, on conclut qu'il n'y a pas d'autre composant qui puisse terminer l'assemblage de ce module.

C) Premières liaisons possibles

Théoriquement, les premières liaisons qui peuvent commencer un assemblage dépendent seulement de la fonction de contact de ses composants. Les premières liaisons qui peuvent commencer le module POMPE sont:

1) Carter-roulement 1,
2) Carter-roulement 2,
3) Carter-dispositif d'étanchéité,
4) Carter-bague d'usure,
5) Carter-rondelle de butée,
6) Carter-S-couvercle.

Il est clair que nous pouvons éliminer quelques liaisons présentées, soit pour des raisons géométriques ou topologiques, soit pour des raisons stratégiques. Les liaisons que nous éliminons pour des raisons géométriques ou topologiques auraient été éliminées de toute façon par le logiciel. Cependant, en faisant d'abord l'élimination par nous-

mêmes, nous réduisons énormément le temps de calcul que prend le logiciel. De la liste ci-dessus, on peut éliminer les liaisons 3,4,5 et 6.

En effet, la liaison 3 ne peut pas commencer l'assemblage parce que le dispositif d'étanchéité doit être posé après le roulement 2 (contrainte géométrique). De plus, la liaison 4 est éliminée, parce que la bague d'usure pourrait être endommagée si l'on presse le roulement n°1 (contrainte stratégique) après l'avoir assemblée. La liaison 5, quant à elle, ne peut pas commencer l'assemblage non plus, parce qu'il faut d'abord assembler le roulement n°1 (contrainte géométrique). Finalement, nous éliminons la liaison 6 comme liaison de base parce qu'avant d'assembler le S-COUVERCLE, il est nécessaire d'assembler le roulement n°1, la rondelle, le palier de butée et l'arbre d'hélice (contrainte géométrique). Après cette évaluation, les liaisons qui restent pour commencer un assemblage faisable et souhaitable, sont:

1) Carter-roulement 1,
2) Carter-roulement 2.

11.6.2.2 Génération des séquences d'assemblage

Dans le pire des cas, le module POMPE peut avoir 11! séquences différentes. Grâce à son module d'analyse géométrique et topologique, et à l'aide des contraintes imposées

au début, le logiciel génère, pour le module POMPE, le nombre de séquences suivant par niveau d'assemblage:

Niveau	Séquences
2	2
3	12
4	56
5	202
6	540
7	1 025
8	1 315
9	1 031
10	373
11	373

11.6.2.3 Contraintes technologiques et de procédure

Comme nous pouvons l'observer au tableau précédent, malgré les contraintes imposées au début, les séquences générées sont nombreuses, ce qui rend impraticable leur analyse. Pour cette étape, nous faisons encore appel à la logique et nous imposons des contraintes stratégiques et de procédure propres au produit, afin qu'il ne reste que les

séquences qui soient faisables et souhaitables. Les contraintes imposées à l'assemblage de la POMPE sont les suivantes.

A) Le roulement 2 doit être assemblé avant le dispositif d'étanchéité et pas nécessairement de façon consécutive. Cette contrainte est de type géométrique, le logiciel l'a donc déjà prise en note. Pour cette raison, le nombre de séquences réalisables reste invariable à 373.

B) Le roulement n°1 doit être posé avant la bague d'usure et pas nécessairement de façon consécutive. Avec cette contrainte, les séquences réalisables diminuent à 346.

C) La rondelle de butée, le palier de butée et l'arbre d'hélice doivent être assemblés dans cet ordre. Cette contrainte fait tomber le nombre de séquences réalisables à 93.

D) Comme dernière contrainte de procédure pour la POMPE, nous avons imposé que l'hélice soit assemblée avant l'assemblage du groupe rondelle de butée, palier de butée et arbre d'hélice. Les séquences faisables, après cette contrainte, sont au nombre de 6.

a liste des séquences réalisables et souhaitables est présentée au Tableau 11.2:

Tableau 11.2 Séquences d'assemblage du module pompe

SÉQUENCE 1	SÉQUENCE 2	SÉQUENCE 3
Carter	Carter	Carter
Roulement 1	Roulement 1	Roulement 1
Roulement 2	Roulement 2	Bague d'usure
Dispositif d'étanchéité	Bague d'usure	Roulement 2
Bague d'usure	Dispositif d'étanchéité	Dispositif d'étanchéité
Hélice	Hélice	Hélice
Rondelle de butée	Rondelle de butée	Rondelle de butée
Palier de butée	Palier de butée	Palier de butée
Arbre d'hélice	Arbre d'hélice	Arbre d'hélice
S - couvercle	S - couvercle	S - couvercle
Bouchon	Bouchon	Bouchon
Carter	Carter	Carter
Roulement 2	Roulement 2	Roulement 2
Roulement 1	Roulement 1	Dispositif d'étanchéité
Dispositif d'étanchéité	Bague d'usure	Roulement 1
Bague d'usure	Dispositif d'étanchéité	Bague d'usure
Hélice	Hélice	Hélice
Rondelle de butée	Rondelle de butée	Rondelle de butée
Palier de butée	Palier de butée	Palier de butée
Arbre d'hélice	Arbre d'hélice	Arbre d'hélice
S - couvercle	S - couvercle	S - couvercle
Bouchon	Bouchon	Bouchon

11.6.3 Turbine

Le module TURBINE représente le produit au complet. Puisqu'il est au sommet de l'arbre de hiérarchie d'assemblage, il représente aussi le module le plus complexe, à cause

de la quantité de composants qu'il contient et aussi à cause des relations entre ses composants. Ce module contient neuf composants dont un seul est modulaire.

11.6.3.1 Contraintes initiales

Les contraintes que nous imposons au début de la procédure de génération de séquences sont les suivantes.

A) Premier composant

Pour la turbine, le premier composant est la POMPE, qui joue le rôle de composant de base.

B) Dernier composant

Pour ce cas, nous ne trouvons pas de contrainte.

C) Premières liaisons possibles

Les liaisons qui peuvent théoriquement commencer l'assemblage sont:

1) Pompe-venturi,
2) Pompe-logement d'écrou 1,
3) Pompe-logement d'écrou 2,
4) Pompe-logement d'écrou 3,
5) Pompe-logement d'écrou 4,

6) Pompe-sortie d'eau.

De la liste ci-dessus, nous pouvons seulement enlever la liaison 1, parce que le venturi ne peut pas être assemblé avant que les joints toriques soient placés (contrainte géométrique).

11.6.3.2 Génération des séquences d'assemblage

L'assemblage de la turbine présente une caractéristique différente de celle de la pompe; elle contient des composants qui doivent être assemblés suivant des trajectoires cylindriques qui font 45° avec chaque axe cartésien (les quatre logements d'écrou). La Figure 11.4 montre la position qui doivent atteindre ces composants une fois assemblés.

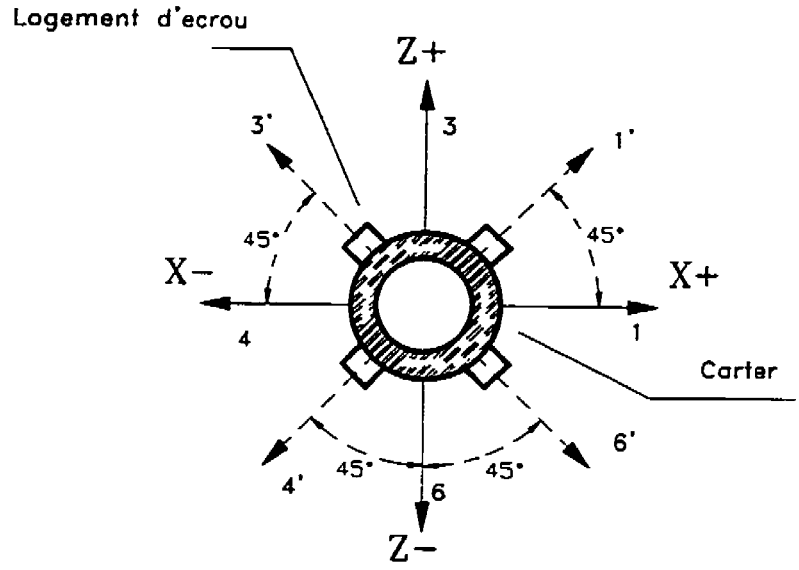


Figure 11.5 Position non cartésienne des logements d'écrou

Le nombre de séquences générées par niveau pour la turbine est présenté ci-dessous:

Niveau	Séquences
2	5
3	27
4	124
5	474
6	1 456
7	3 360
8	5 040
9	3 360

11.6.3.3 Contraintes technologiques et de procédure pour la turbine

Étant donné que nous avons imposé moins de contraintes au début, le nombre de séquences générées est très élevé, ce qui rend impossible leur analyse individuelle. Nous devons, pour cette raison, encore imposer certains contraintes pour régler cette situation.

1) Les joints toriques 1 et 2 doivent être posés de façon consécutive (logique d'assemblage).

2) L'ordre d'assemblage des joints toriques n'a pas d'importance (relation produit-composant). Après ces deux contraintes, le nombre de séquences diminue à 840.

3) Le venturi doit être assemblé immédiatement après les joints toriques (stabilité de l'assemblage). Après cette contrainte, le nombre de séquences réalisables est de 360.

4) Les logements d'écrou doivent être assemblés consécutivement (logique d'assemblage). L'ordre d'assemblage entre les quatre logements d'écrou n'a pas d'importance (relation produit-composant). Finalement, après l'imposition de ces restrictions, le nombre de séquences résultantes est de 3.

La liste des séquences réalisables et souhaitables est présentée au Tableau 11.3.

Tableau 11.3 Séquences d'assemblage du module turbine

SÉQUENCE 1	SÉQUENCE 2	SÉQUENCE 3
$Pompe	$pompe	$pompe
Logement d'écrou 1	Sortie d'eau	Sortie d'eau
Logement d'écrou 2	Joint torique 1	Logement d'écrou 1
Logement d'écrou 3	Joint torique 2	Logement d'écrou 2
Logement d'écrou 4	Venturi	Logement d'écrou 3
Sortie d'eau	Logement d'écrou 1	Logement d'écrou 4
Joint torique 1	Logement d'écrou 2	Joint tonique 1
Joint torique 2	Logement d'écrou 3	Joint tonique 2
Venturi	Logement d'écrou 4	Venturi

Note : «$» indique un composant modulaire

11.7 OPÉRATIONS COMPLÉMENTAIRES

Dans cette section, nous incluons les opérations complémentaires et de fixation nécessaires pour l'assemblage des turbines en plastique ou des turbines métalliques. Les opérations qui font référence à l'installation de la sortie d'eau et à l'installation du venturi sont réalisées uniquement lors de l'assemblage des turbines en plastique (elles sont marquées par un P). La liste complète des opérations (opérations fonctionnelles, de fixation et complémentaires) et leurs temps sont présentés ci-dessous.

	Temps (s.)
Préparer l'arbre pour dégraissage	11.8
Sortir l'arbre de dégraisseur	0.8
Appliquer un apprêt sur filets de l'arbre	1.9
Changer le panier des carters et déballage	1.8
Nettoyer le carter avec de l'air comprimé	0.8
Vérifier des entrées du carter	2.9
Transporter le carter du panier à la presse 1	3.6
Coller une étiquette d'identification sur le carter	6.0
Fixer le carter en presse 1	1.8
Poser le roulement 1 sur le carter	2.4
Presser le roulement 1	2.4
Tourner le carter	2.0
Fixer le carter en presse 2	1.8
Poser le roulement 2 sur le carter	3.2
Presser le roulement 2	4.2
Contrôler les diamètres des deux roulements	8.5
Appliquer Loctite 518 sur le carter (pour le dispositif d'étanchéité)	4.4
Fixer le carter en presse 3	1.8
Poser le dispositif d'étanchéité sur le carter	2.3
Presser le dispositif d'étanchéité	2.6

Déballer la bague d'usure	1.4
Appliquer de l'huile sur le carter (pour poser la bague d'usure)	2.2
Fixer le carter en presse 4	1.8
Poser la bague d'usure	2.9
Presser la bague d'usure	2.8
Tourner le carter	2.0
Transporter le carter à la station d'hélice	1.8
Déballer l'hélice	3.8
Appliquer un apprêt sur l'hélice	1.5
Appliquer Loctite 271 sur les filets de l'hélice	6.6
Fixer l'hélice au support de travail	2.5
Assembler l'hélice à la pompe	3.9
Fixer le carter au support pneumatique	1.8
Poser la rondelle de butée sur le carter	2.1
Poser le palier de butée sur le carter	2.6
Introduire l'arbre dans l'hélice et visser	6.0
Donner le couple à l'arbre	4.4
Remplir le carter d'huile	8.8
Transporter la pompe à la zone de preuve	2.4
Appliquer Loctite dans deux trous du carter	2.5
Sous-assembler le couvercle	13.6

Poser le couvercle sur la pompe	5.4
Sous-assembler boulon-rondelle plate(3)	11.0
Poser et visser les trois boulons du couvercle	7.3
Preuve d'étanchéité (travail manuel)	8.9
Fixer la pompe dans le support de travail vertical	2.5
Finir de remplir d'huile le carter	7.6
Appliquer du Téflon liquide sur le bouchon	6.1
Poser et visser le bouchon	3.9
Poinçonner	5.7
Enlever la pompe de support vertical et transport	2.5
Placer la pompe sur la table	1.5
(P) Installer la sortie d'eau sur la pompe	6.0
(P) Positionner les quatre logements d'écrous	7.9
(P) Introduire les logements d'écrou	7.9
(P) Appliquer Loctite 518 autour de la pompe	13.0
(P) Poser deux joints toriques sur la pompe	5.0
(P) Poser le venturi sur la pompe	3.7
(P) Sous-assembler de boulon, rondelle plate et rondelle de sécurité (4)	19.0
(P) Introduire et visser les 4 boulons qui fixent la pompe et le venturi	33.6

Transporter de la turbine a la machine à roder	2.1
Opérer manuellement la machine à roder	9.1
Transporter de la turbine à la zone de stockage	2.5

11.8 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES SÉQUENCES GÉNÉRÉES PAR MODULE

Afin de trouver la séquence d'assemblage manuelle la plus économique par module et pour le produit au complet, nous utiliserons le logiciel DFMA de Boothroyd et Dewhurst, qui donne une estimation du temps et du coût d'assemblage. Pour rendre plus réel le coût d'assemblage calculé pour chaque séquence, nous allons inclure dans leur évaluation les opérations fonctionnelles et complémentaires nécessaires. Pour trouver le coût de la main-d'oeuvre de chaque séquence évaluée, nous avons considéré un salaire moyen de 30 $/h.

11.8.1 Sous-assemblage du couvercle

Il n'y a pas de séquences à évaluer puisqu'il y a seulement une seule séquence réalisable et souhaitable.

11.8.2 Pompe

Après avoir ajouté les opérations complémentaires à chaque séquence générée, les résultats de l'évaluation économique sont les suivants:

Séquences 1, 2 et 3:

Coût total d'assemblage : 1,73 $/pompe

Temps total d'assemblage : 207 s

Nombre total d'opérations : 61

Séquences 4, 5 et 6:

Coût total d'assemblage : 1,76 $/pompe

Temps total d'assemblage : 211 s

Nombre total d'opérations : 63

La principale différence entre le premier groupe de séquences (1,2,3) et le deuxième groupe (4,5,6) est que dans le premier cas, nous commençons l'assemblage avec la liaison «carter-roulement n°1», tandis que dans le deuxième cas, nous commençons avec la liaison «carter-roulement n°2». Cette différence amène deux opérations supplémentaires de tournage de carter pour le deuxième cas. Les séquences de base choisies qui ont servi pour l'élaboration des séquences détaillées 1, 2 et 3 sont montrées au Tableau 11.4; les séquences détaillées et l'analyse faite par le logiciel DFMA sont présentées en Annexe VI.

Tableau 11.4 Séquences d'assemblage choisies pour le module pompe

SÉQUENCE 1	SÉQUENCE 2	SÉQUENCE 3
Carter	Carter	Carter
Roulement 1	Roulement 1	Roulement 1
Roulement 2	Roulement 2	Bague d'usure
Dispositif d'étanchéité	Bague d'usure	Roulement 2
Bague d'usure	Dispositif d'étanchéité	Dispositif d'étanchéité
Hélice	Hélice	Hélice
Rondelle de butée	Rondelle de butée	Rondelle de butée
Palier de butée	Palier de butée	Palier de butée
Arbre d'hélice	Arbre d'hélice	Arbre d'hélice
S - couvercle	S - couvercle	S - couvercle
Bouchon	Bouchon	Bouchon

11.8.3 Turbine

Avant d'évaluer le module turbine, nous avons également ajouté les opérations complémentaires nécessaires à chaque séquence. Les résultats sont les suivants:

Séquence 1,2 et 3 :

Coût total d'assemblage : 0,91 $/turbine

Temps total d'assemblage : 109,8 s

Nombre total d'opérations : 32

Pour l'assemblage de la turbine, puisque le coût d'assemblage manuel est le même, nous pouvons choisir n'importe quelle séquence du Tableau 11.3.

11.9 ÉQUILIBRAGE DE LA LIGNE POUR LA CELLULE D'ASSEMBLAGE DE TURBINES

Après l'évaluation économique des séquences générées, nous avons comme résultat trois séquences pour la pompe et trois séquences pour la turbine au complet. Dans cette section, nous évaluons chaque séquence du point de vue de l'équilibrage de la ligne, ce qui veut dire que nous choisissons, parmi les séquences que nous avons sélectionnées dans l'analyse économique, la séquence qui nous permet d'équilibrer la ligne pour un taux de production et un mélange de modèle définis. Comme contraintes de production nous allons utiliser les suivantes: le temps disponible est de 430 min/quart (7,17 h), la production requise est de 400 turbines/quart et le mélange de modèles souhaitables est de 70 % de turbines en plastique et de 30 % de turbines métalliques.

Pour tenir compte d'allocation de fatigue et pour besoins personnels, nous avons décidé que le temps de travail de chaque travailleur doit se situer entre 85 % et 90 % du temps moyen disponible. Pour l'équilibrage de la ligne d'assemblage de la turbine, nous avons ajouté deux objectifs à celui de l'efficacité. Le premier objectif consiste à conserver une ligne capable d'assembler de façon aléatoire les différents modèles de turbines. Cette ligne doit avoir des stations dédiées aux opérations communes à tous les modèles, de façon à ce que la charge de travail de chaque station ne change pas avec le modèle à assembler. Les opérations qui sont variables ou spécifiques à la famille des turbines en plastique doivent être regroupées dans une seule station. Comme deuxième objectif, nous voulons que les opérations qui sont assignées à chaque station soient logiques et qu'elles

représentent des tâches complètes d'assemblage. Si l'on fait un équilibrage de ligne avec une telle distribution d'opérations, la probabilité d'erreur lors de l'assemblage diminuera énormément.

11.9.1 Analyse pour l'équilibrage de ligne

Avec les données de temps disponible et les données de production requises/quart de travail, nous obtenons :

$$\frac{\textbf{T.disponible(moyen)}}{\textbf{turbine}} = \frac{\textbf{430}}{\textbf{400}} = \textbf{1,08} = \textbf{65 s}$$

Le temps que nous pouvons assigner à chaque travailleur doit donc se situer entre 55,2 s et 58,5 s. D'abord, il faut s'assurer que les machines que nous avons dans la ligne soient capables de fournir la quantité de turbines requises. Le Tableau 11.5 montre les temps d'opérations pour les deux machines de la ligne.

Tableau 11.5 Temps d'opération des machines de la cellule d'assemblage des turbines

Poste	Machines	T. Partagé (s)	T. machine (s)	Total (s)
4	preuve d'étanchéité	8,9	50	58,9
5	machine à roder	9,1	75	84,1

On conclut que la machine à roder ne peut pas fournir la production requise et qu'il nous faut une autre machine pour y arriver. Quant à la machine de preuve d'étanchéité, une seule arrive à fournir la quantité de production prévue. Il est donc nécessaire d'ajouter une autre machine à roder seulement.

Le temps d'assemblage total du module pompe est de 206,8 s. Le temps des opérations spécifiques à la famille de turbines en plastique que nous voulons regrouper dans un seul poste de travail est de 109,8 s. Le temps théorique d'assemblage pour les turbines en plastique est donc de 316,6 s. Pour les turbines métalliques, le temps total est de 220,5 s, ce qui inclut le temps assigné aux opérations reliées au fonctionnement de la machine à roder. Ces opérations sont spéciales, parce que même si elles sont communes aux deux familles, elles doivent être faites dans le poste dédié aux opérations spécifiques de la famille des turbines en plastique.

Comme nous avons déjà défini les séquences à utiliser, l'équilibrage de ligne est limité au regroupement des opérations de chaque séquence de façon séquentielle et ce, en faisant toujours l'assignation des opérations d'assemblage de manière à former des tâches complètes d'assemblage et avec l'intention d'obtenir la fluidité et l'efficacité maximale de chaque séquence évaluée. Après une analyse préliminaire des séquences, on conclut que avec un taux de travail entre 80 % et 90 %, les trois séquences d'assemblage de la pompe résultantes de l'évaluation économique nécessitent quatre travailleurs et une machine de preuve d'étanchéité pour fournir une production de 400 pompes/quart.

$$\text{À } 85\% : \frac{206,8 \frac{s}{pompe}}{66 \frac{s}{cycle} * 0,85} = 3,74 \approx 4 \text{ travailleurs}$$

$$\text{À } 90\% : \frac{206,8 \frac{s}{pompe}}{66 \frac{s}{cycle} * 0,90} = 3,53 \approx 4 \text{ travailleurs}$$

Le résumé de l'analyse est montré ci-dessous :

	Temps (s)		
Travailleur	Séquence 1	Séquence 2	Séquence 3
1	55,9	55,9	49,3
2	56,8	56,8	50,9
3	55,4	55,4	55,2
4*	38,7	38,7	51,4

Note : * Indique la charge de travail manuel du travailleur n°4.

Nous avons choisi la séquence n°1 pour la pompe, étant donné que cette séquence n'exige pas de changements dans la localisation des machines de la ligne, ce qui la rend plus économique.

Pour le module turbine, nous avons éliminé la deuxième séquence du Tableau 11.3, parce qu'elle devient instable, lors de l'assemblage des logements d'écrou avec le venturi posé mais non fixé. On peut conclure aussi que pour un temps de cycle de 66 s, il faut deux personnes dans le poste variable pour les turbines en plastique (96,1 s de plus). Bien qu'il n'y ait pas de différence entre la séquence n°1 et la séquence n°3, nous avons choisi la séquence n°1. En effet, l'ordre d'assemblage des logements d'écrou et de la sortie d'eau ne représente aucun avantage ou désavantage, puisqu'on utilise le même outil (petit marteau) pour les deux opérations. De plus, la présence d'un composant par rapport à l'autre n'affecte pas l'assemblage.

11.10 SOLUTION POUR UN SYSTÈME D'ASSEMBLAGE ALÉATOIRE POUR LA FAMILLE DE TURBINES HYDRAULIQUES

Théoriquement, on peut arriver à assembler les 400 turbines en plastique avec six personnes, ce qui représente un taux de travail de 85 % ou de 90 % imposé aux travailleurs.

$$\text{À } 85\% : \frac{316,6 \frac{s}{turbine}}{65 \frac{s}{cycle} * 0,85} = 5,73 \approx 6 \text{ travailleurs}$$

$$\text{À } 90\% : \frac{316{,}6 \frac{s}{turbines}}{65 \frac{s}{cycle} * 0{,}90} = 5.41 \approx 6 \text{ travailleurs}$$

Aussi, la solution que l'on a trouvée nécessite six personnes qui travailleraient selon la séquence n°1 de la pompe et la séquence n°1 de la turbine. La liste des opérations assignées à chaque travailleur ainsi que le temps total de travail assigné sont présentés ci-dessous.

Travailleur 1

Préparer l'arbre pour dégraissage	11,8
Sortir l'arbre de dégraisseur	0,8
Appliquer un apprêt sur filets de l'arbre	1,9
Changer le panier des carters et déballer	1,8
Nettoyer le carter avec de l'air comprimé	0,8
Vérifier les entrées du carter	2,9
Transporter le carter du panier à la presse 1	3,6
Coller étiquette d'identification sur le carter	6,0
Fixer le carter en presse 1	1,8
Poser le roulement 1 sur le carter	2,4
Presser le roulement 1	2,4

Tourner le carter	2,0
Fixer le carter en presse 2	1,8
Poser le roulement 2 sur le carter	3,2
Presser le roulement 2	4,2
Contrôler les diamètres des deux roulements	8,5

TOTAL: 55,90 s

Travailleur 2

Appliquer Loctite 518 sur le carter	
(pour le dispositif d'étanchéité)	4,4
Fixer le carter en presse 3	1,8
Poser le dispositif d'étanchéité sur le carter	2,3
Presser le dispositif d'étanchéité	2,6
Déballer la bague d'usure	1,4
Appliquer de l'huile sur le carter	
(pour poser la bague d'usure)	2,2
Fixer le carter en presse 4	1,8
Poser la bague d'usure	2,9
Presser la bague d'usure	2,8
Tourner le carter	2,0
Transporter le carter à la station d'hélice	1,8

Déballer l'hélice	3,8
Appliquer un apprêt sur l'hélice	1,5
Appliquer Loctite 271 sur les filets de l'hélice	6,6
Fixer l'hélice au support de travail	2,5
Assembler l'hélice à la pompe	3,9
Fixer le carter au support pneumatique	1,8
Poser la rondelle de butée sur le carter	2,1
Poser le palier de butée sur le carter	2,6
Introduire l'arbre dans l'hélice et viser	6,0

TOTAL: 56,8 s

Travailleur 3

Donner le couple à l'arbre	4,4
Remplir le carter d'huile	8,8
Transporter la pompe à la zone de preuve	2,4
Appliquer Loctite dans deux trous du carter	2,5
Sous-assembler le couvercle	13,2
Poser le couvercle sur la pompe	5,4
Sous-assembler boulon et rondelle plate (3)	11,4
Poser et viser les 3 boulons du couvercle	7,3

TOTAL: 55,4 s

Ce dernier travailleur s'occupe d'une machine pour la preuve d'étanchéité, soit pour les turbines en plastique ou pour les turbines métalliques. Sa charge de travail est présentée au tableau ci-dessous.

Temps (s)	Homme	Machine
8,90	Décharge Charge	Décharge Charge
38,70	Travail manuel pour la machine 2 (29,80)	Automatique (50,00)
58,9	Attente (20,2)	

Note: Les pompes arrivent chaque 56,8 sec.

Le résumé des temps pour le travailleur n°4 est montré au tableau suivant.

Item	T. Individuel (s)	T. partagé (s)	T. attente (s)	TOTAL (s)
Homme	29,80	8,90	20,20	58,90
Machine	50,00	8,90	--	58,90

Le poste n°4 produit une turbine chaque 58,90 sec.

La charge de travail assignée au poste n°5 (le poste variable) varie en fonction de la sous-famille de turbines que l'on assemble. Pour les turbines métalliques, un seul travailleur est nécessaire avec la charge de travail présentée ci-dessous.

Travailleur 5

Transporter la turbine à la machine à roder	2,10
Actionner manuellement la machine à roder	9,10
Transporter la turbine à la zone de stockage	2,50
	TOTAL: 13,70

Ce travailleur doit s'occuper de deux machines à roder, lors de l'assemblage de turbines en métal. Le diagramme Homme-Machine montre, dans le tableau ci-dessous, la façon de procéder avec les machines à roder.

Temps (s)	Homme	Machine à roder 1	Machine à roder 2
9,10	Décharge Charge	Décharge Charge	
11,60	À stockage		
58,90	Attente (47,30)	Automatique (75,00)	Automatique (75,00)
61,00	Aller à machine. 2		
70,10	Décharge Charge		Décharge Charge
72,60	À stockage		
74,70	Aller à machine. 1		Automatique
84,10	Attente		

Note: Les turbines arrivent au poste chaque 58,90 sec.

Le résumé des données présentées dans le diagramme «Homme -machine» précèdent est montré dans le tableau suivant.

Item	T. individuel (s)	T. partagé (s)	T. d'attente (s)	TOTAL (s)
Homme	9,20	18,20	56,70	84,10
Machine. 1	75,00	9,10	---	84,10
Machine. 2	75,00	9,10	---	84,10

1. Le travailleur n°5 à 28,4 s d'attente par turbine.
2. Les deux machines travaillent à pleine capacité.
3. Le travailleur n°5 produit une turbine métallique à chaque 84,1 ÷ 2 = 42,05 s.

Pour les turbines en plastique, deux personnes sont nécessaires dans le poste de travail n°5 pour pouvoir arriver à partager les 96,1 s spécifiques aux turbines en plastique et à gérer les deux machines à roder. La charge de travail assignée à ce poste, lors de l'assemblage de turbines en plastique, est présentée ci-dessous.

Travailleur 5

(P) Positionner les 4 logements d'écrous 7,9

(P) Introduire les logements d'écrou 7,9

(P) Appliquer Loctite 518 autour de la pompe	1,0	
(P) Sous-assembler boulon, rondelle plate et rondelle de sécurité (4)	19,0	
Transporter la turbine à la machine à roder	2,1	
Opérer manuellement la machine à roder	9,1	
Transporter la turbine à la zone de stockage	2,5	
		TOTAL: 61,5 s

Travailleur 6

P) Installer la sortie d'eau sur la pompe	6,0	
(P) Poser deux joints toriques sur la pompe	5,0	
(P) Poser le venturi sur la pompe	3,7	
(P) Introduire et viser les 4 boulons de fixation pompe-venturi	33,6	
Transporter la turbine à la machine à roder	2,1	
Opérer manuellement la machine à roder	9,1	
Transporter la turbine à la zone de stockage	2,5	
		TOTAL: 62,0 s

La façon dont les deux travailleurs partagent les opérations et leur interaction avec les machines à roder sont présentées dans le diagramme Homme-Machine qui suit.

Temps (s)	Homme 1	Homme 2	Machine à roder 1	Machine à roder 2
23,70	Travail manuel (1) (47,8)	Travail manuel (2)	Automat. (75,00)	Automat.
47,8				Attente (26,20)
49,9	À machine 2	Travail manuel (2) (48,3)		
59,0	Décharge Charge			Décharge Charge
61,5	À stock			Automat. (75,00)
72,0	Travail manuel (1)		Attente (26,20)	
96,1				
98,2		À machine 1		
107,3		Décharge Charge	Décharge Charge	
109,3		À stockage	Automat.	
109,8	Attente			
110,3				

Note: Les turbines arrivent au poste chaque 58,9 sec.

Le résumé des données présentées dans le diagramme "Homme - machine" est montré dans le tableau suivant.

Item	T. individuel (s)	T. partagé (s)	T. d'attente (s)	TOTAL (s)
Homme 1	100,2	9,1	1,0	110,3
Homme 2	101,2	9,1	--	110,3
Machine 1	75,00	9,1	26,2	110,3
Machine 2	75,00	9,1	26,2	110,3

Le temps par turbine en plastique pour les travailleurs 5 et 6 est:

$110{,}3 \div 2 = 55{,}15$ s. Chaque machine à roder travaille à 76,2 % de sa capacité.

11.10.1 Résumé de la solution proposée

Production requise	400 turbines/quart
Mélange de modèles réel	70 % turbines en plastique
	30 % turbines métalliques
Nombre de travailleurs	6
Temps de cycle	58,9 s pour tous les modèles

Le détail des temps d'opération de chaque travailleur est montré au Tableau 11.6.

Tableau 11.6 Résumé des temps d'opération assignés par travailleur (s)

Travailleur	Turbine en plastique	Turbine en métal
1	55,9	55,9
2	56,8	56,8
3	55,4	55,4
4	58,9	58,9
5	55,15	42,05
6	55,15	---

La configuration de la ligne d'assemblage de turbines est présentée à la figure suivante.

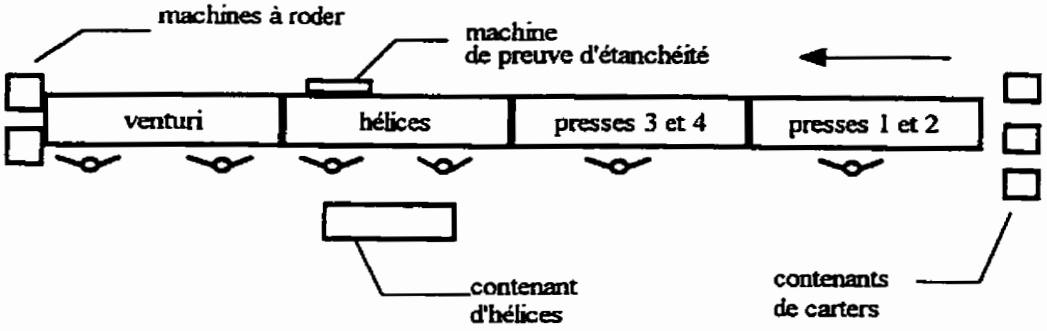


Figure 11.6 Configuration de la cellule d'assemblage pour la turbine hydraulique

Dans cette solution, il y a un travailleur dans le poste n°5 qui n'a pas de charge de travail pendant l'assemblage des turbines en métal, ce qui représente 27,4 % du temps disponible. Nous avons choisi cette solution à cause de deux considérations importantes.

1) Pendant le temps d'apprentissage et de changement de système de production mélangé, le sixième travailleur joue un rôle de marge de manoeuvre.

2) Le remplacement graduel des turbines en métal par des turbines équivalentes en plastique.

La deuxième considération signifie que le temps libre du sixième travailleur diminuera au fur et à mesure que les changements de turbines en métal vers les turbines en plastique auront lieu jusqu'à ce que l'usine assemble uniquement des turbines en plastique, dans lequel cas la configuration de la ligne demeurerait invariable et le travailleur 6 cesserait d'avoir du temps libre. Il faut dire qu'avec cette configuration, la ligne peut fournir 438 turbines en plastique.

11.11 PROCÉDURE DE CONTRÔLE DES COMPOSANTS VARIABLES

Comme nous l'avons déjà dit, la clé du succès d'un système de production aléatoire sans erreurs est la bonne identification des composants variables. Pour nous, la meilleure solution serait l'identification des composants variables par étiquetage.

11.11.1 Étiquette d'identification

L'étiquette d'identification que nous avons conçue représente la séquence d'assemblage des composants variables pour chaque modèle.

A) Carter

Nous avons deux types de carter:

- un carter en plastique,
- un carter en métal.

Dans l'étiquette proposée, chacun des types différents est représenté par une lettre:

P = plastique,

M = métallique.

B) Hélice

Il existe neuf modèles différents d'hélice et les différences entre ceux-ci se situent plutôt au niveau du matériel et des spécifications techniques. L'étiquette proposée prévoit trois autres espaces pour l'identification du modèle d'hélice qui doit être assemblé (par exemple: H02 = modèle 2 d'hélice).

C) Couvercle

En ce qui concerne le couvercle, il y a trois modèles différents. De façon visuelle, la différence entre les couvercles est leur longueur. Nous représentons cette différence sur l'étiquette avec une seule lettre:

L = long,

M = moyen,

P = petit.

D) Venturi

Il existe sept modèles de venturi. Ces modèles sont représentés sur l'étiquette par trois symboles alphanumériques, de la même façon que pour les hélices (par exemple: V03 = modèle 3 du venturi). L'identification de chaque composant variable sur l'étiquette est faite d'une couleur différente, de façon à ce que chaque travailleur puisse identifier facilement le composant qu'il doit assembler. Une étiquette générique est présentée à la Figure 11.6 pour mieux en exprimer l'idée:

Modèle de turbine XYZ:

Carter : en plastique	Hélice : modèle 07
Couvercle : long	Venturi : modèle 05

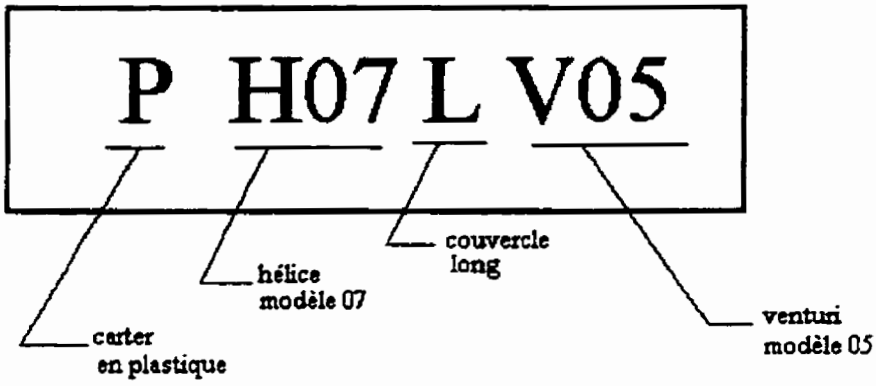


Figure 11.7 Étiquette générique d'identification

Évidemment, il est nécessaire de définir les équivalences entre les codes des turbines demandées par le plan de production et les codes utilisés pour l'étiquetage. Les étiquettes peuvent être présentées en feuilles pré-perforées avec le code officiel de la turbine en haut de la page et avec 40 ou 50 étiquettes par feuille.

11.11.2 Procédure

D'abord, il faut dire que les hélices et les venturis doivent déjà arrivés à la cellule avec leurs étiquettes d'identification (par exemple: H07, V05, etc). L'opération d'étiquetage de ces composants doit donc être faite chez le fournisseur, sinon en dernier recours par les gens de l'entrepôt.

Pour le cas des couvercles, l'identification est plus facile puisque les pièces contiennent des différences mesurables. Nous pensons qu'avec un gabarit adéquat, le travailleur serait en mesure de reconnaître le bon composant. Le gabarit nécessaire est présenté à la Figure 11.7.

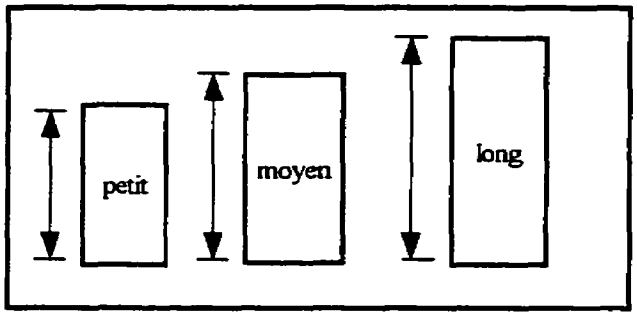


Figure 11.8 Gabarit pour les couvercles

Il est sûr que le travailleur utilisera la jauge seulement pendant une période d'apprentissage après laquelle il sera capable de reconnaître visuellement le type de couvercle qu'exige l'étiquette. Le carter est la pièce clé de l'assemblage et est aussi celle sur laquelle le premier travailleur de la ligne doit coller l'étiquette qui correspond au modèle à assembler. Le chef d'équipe doit donc lui fournir exactement les étiquettes nécessaires pour la production du jour. De cette manière, la ligne produit la quantité et le mélange requis pour le plan de production. Une fois que le premier travailleur a choisi le bon carter et colle la bonne étiquette sur la pièce, les autres travailleurs sauront le type de composant qu'ils doivent assembler, lorsque le carter arrive à leur poste de travail.

Quand le carter arrive au poste des hélices, le travailleur chargé de l'assembler cherche la lettre qui correspond à l'hélice (H dans ce cas-ci) et identifie le type d'hélice qu'il doit assembler par les chiffres (par exemple: H07 = modèle d'hélice 07). De la même façon, lorsque le carter arrive au poste des couvercles, le travailleur identifie, grâce à l'étiquette, le type de couvercle qu'il doit assembler.

Finalement, lorsque le carter arrive au poste du venturi, le travailleur respectif identifie la sorte de venturi qu'il doit assembler (par exemple: V08 = venturi de type 08). Une fois que le premier travailleur termine les étiquettes, la production du jour est finie. De cette façon, on contrôle la quantité de turbines à assembler par jour et on règle le problème de surplus qui peut se présenter dans la zone de turbines.

CONCLUSION

L'amélioration du processus de planification de l'assemblage est l'un des moyens efficaces pour réduire le coût d'assemblage, celui-ci étant d'ailleurs un des coûts les plus élevés dans le processus productif.

Étant donné la complexité de la procédure de génération de séquences d'assemblage et de la conception de produits pour un assemblage facile, l'automatisation complète de la planification de l'assemblage n'est pas encore possible. Nous proposons plutôt l'utilisation d'une méthodologie munie d'outils informatiques pour aider les équipes responsables de la conception des produits et des systèmes d'assemblage dans un contexte d'ingénierie simultanée. En effet, à notre avis, la planification de l'assemblage avec l'aide des ordinateurs (CAAP : *Computer-Aided Assembly Planning*) effectuée par un usager connaisseur du produit est de nos jours la solution la plus pratique et rentable.

L'analyse de la littérature existante sur la génération de plans d'assemblage démontre que la plupart de ces travaux sont très théoriques et qu'ils traitent la génération de plans d'assemblage comme un problème strictement mathématique. Ce point de vue donne comme résultat des approches incomplètes, parfaites du côté mathématique, mais d'une utilisation pratique difficile. En effet, ces approches théoriques représentent un très bon point de départ, mais elles ne permettent que de gérer des produits très simples, car elles

ne considèrent pas les concepts de l'ingénierie de l'assemblage qui pourraient augmenter leur puissance.

Nous avons présenté une méthodologie qui est capable de nous aider à déterminer le plan d'assemblage le plus convenable selon le produit et nos besoins de production. Cette approche inclut des outils informatiques qui nous permettent la définition du meilleur plan d'assemblage dans un temps et avec un effort raisonnables. Nous intégrons des concepts de l'ingénierie de l'assemblage et des concepts strictement mathématiques, ce qui permet à l'approche de gérer des produits complexes contenant un grand nombre de composants ou encore des familles de produits.

La modélisation proposée pour la génération des séquences d'assemblage est faite en deux étapes. Dans la première étape, on modélise la structure de l'assemblage du produit en le divisant en modules d'assemblage indépendants; cette modélisation a pour objectif de diminuer la complexité de l'assemblage et de répartir cette complexité entre les différents modules définis. De cette manière, nous arrivons à définir une structure d'assemblage qui permet un assemblage facile et logique du produit et même un assemblage en parallèle si c'est nécessaire. Dans la deuxième étape, nous utilisons la modélisation de l'approche de Ghosh pour représenter les relations entre les composants, mais appliquée à chaque module défini. Cette méthode nous permet d'utiliser environ la moitié des données requises par l'approche originale qui nécessite de définir toutes les relations de précédence entre les composants.

L'algorithme de Ghosh, que nous avons pris comme base, permettait de gérer seulement des composants qui suivaient des trajectoires cartésiennes, lors de leur assemblage. Nous avons développé une méthodologie sur la base de la rotation d'axes pour pouvoir gérer les composants qui suivent une trajectoire cylindrique d'assemblage et nous l'avons adaptée à l'algorithme de base. Cette amélioration permet d'utiliser l'algorithme sur un plus grand nombre de produits industriels.

La génération de séquences d'assemblage de Ghosh peut utiliser le système de modélisation solide PADL-2 et un programme d'interface afin d'obtenir les données nécessaires pour la définition des relations de précédence des composants d'un produit. Étant donné la difficulté d'avoir le logiciel PADL-2 à disposition, surtout au niveau de petites et moyennes entreprises, nous avons ajouté dans le programme générateur un module interactif qui permet à l'usager d'introduire facilement les données requises pour la génération de séquences d'assemblage.

Pour empêcher l'explosion combinatoire de résultats, au moment de la génération des séquences, nous avons aussi intégré dans le programme générateur un module interactif qui permet à l'usager d'imposer trois des plus communes contraintes de procédure: le composant qui débute l'assemblage, le composant qui doit terminer l'assemblage et les liaisons qui sont capables de commencer le processus d'assemblage. Les deux premières contraintes dirigent la génération vers les séquences souhaitables pour l'usager, permettant en même temps d'éliminer toute autre séquence qui n'accomplit pas ces

contraintes initiales et, de cette manière éviter l'explosion combinatoire de résultats. La troisième contrainte est posée pour réduire le temps de calcul de l'ordinateur. L'imposition de ces contraintes permet, à la fin du processus de génération, d'avoir une liste avec des dizaines ou des centaines de séquences selon la complexité du produit, comparativement à la génération strictement géométrique qui, pour les mêmes cas, donne des milliers ou des dizaines de milliers de séquences possibles.

Même si nous avons dirigé dès le début la génération des séquences d'assemblage vers des séquences souhaitables, elles sont encore trop nombreuses à la fin du processus pour pouvoir faire une évaluation approfondie. Pour cette raison, nous avons inclus un module interactif d'imposition de contraintes à la fin du processus de génération. Ce module permet à l'usager d'imposer des contraintes technologiques et de procédure plus spécifiques que celle imposées avant la génération. Le module utilise deux questions pour définir les relations de précédence qui permettent encore de trier les séquences générées. Selon les contraintes imposées, nous avons remarqué qu'à la fin, les séquences résultantes peuvent être d'environ une vingtaine.

Pour la représentation finale des séquences avant l'évaluation, nous utilisons une liste «en texte» plutôt qu'une représentation schématique des résultats. En effet, après plusieurs applications de l'approche proposée, nous avons constaté qu'une liste de séquences finales donne plus d'informations qu'une représentation schématique. De plus,

étant donné que nous travaillons maintenant avec beaucoup moins de séquences, la représentation schématique n'est pas nécessaire ni pratique.

L'évaluation de séquences est faite en deux étapes: la première est de caractère quantitative, en utilisant le logiciel DFMA de Boothroyd et Dewhurst, et la deuxième est de caractère qualitative. Comme la dernière base d'évaluation, nous avons choisi la capacité des séquences à accomplir le taux de production prévu de façon efficace en permettant aussi l'équilibrage de la ligne et la distribution logique de tâches complètes d'assemblage entre les travailleurs impliqués. La séquence choisie garantit un coût minimal, l'harmonie avec notre environnement d'assemblage et avec notre façon de travailler et un équilibrage approprié de la ligne.

Nous avons introduit les concepts sur l'assemblage de familles de produits à notre approche, ce qui nous a permis de gérer ce type de produits. Même si cette partie est encore à l'étude, nous avons obtenu des résultats très prometteurs dans nos applications pratiques.

Les applications pratiques présentées dans les Chapitres 9, 10 et 11 montrent la puissance de la méthodologie proposée pour gérer différentes sortes de produits industriels et même une famille de produits, comme c'est le cas de la famille de turbines hydrauliques présentée dans le Chapitre 11.

L'étude pour la génération du meilleur plan d'assemblage est encore ouverte. Il reste encore beaucoup de travail à réaliser, et que nous pouvons diviser en trois domaines:

Le premier domaine serait la gestion de composants. Jusqu'à aujourd'hui, nous pouvons générer des plans d'assemblage pour des produits constitués des composants qui suivent une trajectoire d'assemblage soit cartésienne, soit cylindrique. Il faudrait étudier l'inclusion des composants suivant une trajectoire d'assemblage sphérique. Aussi, il faudrait étudier les composants flexibles et la façon d'incorporer ce type de composants au programme générateur. La maîtrise de ces composants nous permettrait de gérer toutes sortes de produits industriels.

Le deuxième domaine consisterait en l'évaluation qualitative des séquences générées. En effet, une fois que les séquences sont générées et évaluées de façon quantitative, il est presque sûr qu'il va rester plus d'une séquence avec le coût minimal d'assemblage et, qui de plus, satisfait toutes nos contraintes. Il est donc nécessaire de formaliser les bases d'évaluation qualitative qui peuvent nous aider à la sélection de la meilleure séquence.

Enfin, le troisième domaine serait l'étude approfondie de la planification de l'assemblage pour les familles de produits. Nous avons adapté les concepts d'assemblage pour les familles de produits à notre algorithme générateur et nous pouvons conclure que les résultats obtenus sont assez précis, en utilisant comme objectif l'obtention du plan

d'assemblage le plus standard possible avec la flexibilité minimale. Mais comme nous l'avons déjà dit, la porte de la recherche reste encore ouverte dans ce nouveau domaine.

RÉFÉRENCES

1. ANDREASEN, M., KÄHLER, S., LUND, T., SWIFT, K., (1988), *Design for Assembly*, IFS Publications, 2ème édition, Bedford, UK.

2. BALDWIN, D.F., ABELL, T.E., LUI, M.C., DE FAZIO, T.L. et WHITNEY, D.E., (1991), An Integrated Computer Aid Generating and Evaluating Assembly Sequences for Mechanical Products, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7, 78-94.

3. BEN - ARIEH, D., (1995), A Methodology for Analysis of Assembly Operations Difficulty, Proceedings of *International Industrial Engineering Conference*, Montréal, Canada, 3, 1879-1895.

4. BEN - ARIEH, D. et KRAMER, B., (1994), Computer-Aided Process Planning for Assembly: Generation of Assembly Operation Sequences, *International Journal of Production Research*, 32, 643-656.

5. BONESCHANSCHER, N. et HEEMSKERK,C.J.M., (1989), Grouping Parts to Reduce the Complexity of Assembly Sequence Planning, Proceedings of *IFAC International Conference on Control Problems in Manufacturing Technology*, Madrid, Spain, 233-238.

6. BOOTHROYD, G. et DEWHURST, P., (1991), *Design for Assembly Toolkit Manual*, Release 5.2, Boothroyd & Dewhurst Inc., Wakefield, Rhode Island, USA.

7. BROWN, C.M., (1982), PADL - 2 : A Technical Summary, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2, 69-84.

8. BOURJAULT, A., (1984), *Contribution à une approche méthodologique de l'assemblage automatisé: Élaboration automatique des séquences opératoires*, Thèse d'État, Université de Franche - Compté, Besançon, France

9. BOURJAULT, A., (1987), Methodology of Assembly Automation : A New Approach, Proceedings of the *2nd Conference of Robotics and Factories of the Future*, San Diego, California, USA.

10. CHANG, K.H. et WEE, W.G., (1988), A Knowledge - Based Planning System for Mechanical Assembly Using Robots, *IEEE Experts*, 3, 18-30.

11. CHEN, C.L.P., (1991) Automatic Assembly Sequences Generation by Pattern Matching, *IEEE Transactions on Systems,Man and Cybernetics*, 21, 376-389.

12. CHEN, C.L.P. et WICHMAN, C.A., (1993), A Systematic Approach for Design and Planning of Mechanical Assemblies, *Artificial Intelligence in Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 7, 19-36.

13. CHOW, W., (1990), *Assembly Line Design : Methodology and Applications*, Marcel Dekker Inc., New York, USA, 111-156.

14. DE FAZIO, T.L. et WHITNEY, D.E., (1987), Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3, 640-658.

15. DE FLORIANI, L. et NAGY, G., (1989), A Graph Model for Face-to-Face Assembly, Proceedings of *IEEE International Conference on Robotic and Automation*, 1, 75-78.

16. DJEMEL, N., LUTZ, P. et BOURJAULT, A., (1994), Flexible Assembly System Design : Modeling of a Product Family with a Web Grammar, Proceedings of the *10th ISPE/IFAC International Conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future*, Ottawa, Ontario, Canada, 63-68.

17. DELCHAMBRE, A., (1990), A Pragmatic Approach to Computer Aided Assembly Planning, Proceedings of *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Los Alamitos, California, USA, 1600-1605.

18. DURAND, D., (1979), *La systémique*, 1ère édition, Presses Universitaires de France, Paris, France, 3-82.

19. GHOSH, K., (1994), Generation of Feasibles Assembly Sequences, Proceedings of the *10th ISPE/IFAC International Conference on CAD/CAM, Robotics, and Factories of the Future*, Ottawa, Ontario, Canada, 99-104.

19a. GHOSH, K., (1995), Practical Implications of Assembly Sequence Generation, Proceeding of the *11th International Conference on CAD/CAM, Robotics, and Factories of the Future*, Pereira, Colombia, 314-319.

20. GOTTIPOLU, R. et GHOSH, K., (1995), An Integrated Approach to the Generation of Assembly Sequences, *International Journal of Computer Applications in Technology*, 8, No. 3/4, 125-138

21. GOTTIPOLU, R., (1994), *An Approach for Assembly Sequence Planning Using Solid Models*, Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Canada.

22. HENRIOUD, J.M., BOURJAULT, A. et CHAPPE, D., (1987), Élaboration des gammes d'assemblage : Approche composant, *Les journées de la productique*, GAMI, Paris, France.

23. HENRIOUD, J.M, BONEVILLE, F. et BOURJAULT, A., (1990), Evaluation and Selection of Assembly Plans, *APMS 90*, Spoo, Finland, 212-219.

24. HENRIOUD, J.M., BOURJAULT, A., (1990), Computer - Aided Elaboration of Assembly Sequences, Proceedings of the *3rd International Symposium on Robotics and Manufacture*, Vancouver, Canada, 803-808.

25. HOFFMAN, R., (1989), Automated Assembly in a CSG Domain, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale, Arizona, USA, 210-215.

26. HOMEM DE MELLO, L. et LEE, S. (1991), *Computer-Aided Mechanical Assembly Planning.*, Kluwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts, USA.

27. HOMEM DE MELLO, L.S. et SANDERSON, A.C., (1991), A Correct and Complete Algorithm for the Generation of Mechanical Assembly Sequences, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7, 228-240.

28. HOMEM DE MELLO, L.S. et SANDERSON, A.C., (1990), AND/OR Graph Representation of Assembly Plans, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6, 188-199.

29. HOMEM DE MELLO, L.S et SANDERSON, A.C., (1991), Representation of Mechanical Assembly Sequences, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7, 211-227.

30. HUANG, Y.F. et LEE, C.S.G., (1990), An Automatic Assembly Planning System, Proceedings of *IEEE International Conference on Robotic and Automation*, Sacramento, California, USA, 599-604.

31. JENTSCH, W. et KADEN, F., (1984), Automatic Generation of Assembly Sequences, Proceedings of *Artificial Intelligence and Information Control System of Robots*, Elsevier Science Publishers, Holland, 197-200.

32. KHOSLA, P.K., et MATTIKALI, R., (1989), Determining the Assembly Sequence from a 3-D Model, *Journal of Mechanical Working Technology*, 20, 153-162.

33. KLEIN, C.M. et RHEE, H.K., (1991), An Assembly Sequences Procedure, *Computers and Industrial Engineering*, 21, 63-66.

34. KLEIN, C.J., (1987), *Generation and Evaluation of Assembly Sequence Alternatives*, M.S. Thesis, Massachussetts Institute of Technology, Cambridge, Massachussetts, USA.

35. KO, H. et LEE, K., (1982), Automatic Assembling Procedure Generation from Mating Conditions, *Computer-Aided Design*, 14, 3-10.

36. KROLL, E., (1992), Modeling and Reasoning for Computer-Based Assembly Planning, Proceedings of *Concurrent Engineering : Automation, Tools and Techniques.*, Andrew Kusiak, editor, A Willey - Interscience Publication, 1993, New York, USA, 177-205.

37. LAPERRIÈRE, L. et ELMARAGHY, H.A., (1991), Automatic Generation of Robotic Assembly Sequences, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 6, 299-316.

38. LAPERRIÈRE, L. et ELMARAGHY, H.A., (1993), Generation and Evaluation of Assembly Sequences in Concurrent Engineering, *Manufacturing Systems*, 22, 123-131.

39. LEE, S., (1989), Disassembly Planning Based on Subassembly Extraction, Proceedings of *ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing systems : Opérations Research Models and Applications*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Hollande.

40. LEE, S., et SHIN, Y.G., (1990), Assembly Planning Based on Subassembly Extraction, Proceedings of *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Los Alamitos, California, USA, 1606-1611.

41. LEE, K., et GOSSARD, D.C., (1985), A Hierarchical Data Structure for Representing Assemblies : Part 1, *Computer-Aided Design*, 17, 15-19.

42. LIBERMAN, L.T. et WESLEY, M.A., (1977), AUTOPASS : An Automatic Programming System for Computer Controlled Assembly, *IBM Journal of Research and Development*, 21, 321-333.

43. MASCLE, C. et FIGOUR, J., (1990), Methodological Approach of Sequences Determination Using the Disassembly Method, Proceedings of *Rensselaer 2nd International Conference on CIM*, Troy, NY, USA, 483-490.

44. MASIP, R., (1988), *La fabrica flexible*, Marcombo - Boixareu editores, Barcelona, España, 148-153.

45. MORRIS, G.H., et HAYNES, L.S., (1987), Robotic Assembly by Constraints, Proceedings of *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Raleigh, North Carolina, USA, 1507-1515.

46. NEVINS, J., WHITNEY, D., (1989), *Concurrent Design of Products and Processes*, McGraw-Hill, New York, USA.

47. OCCEÑA, L.G. et CHIN, J.H., (1988), A Knowledge Based Approach to Assembly Planning Analysis, Proceedings of the *1988 Integrated Systems Conference of the Institute of Industrial Engineers*, St. Louis, MO, USA, 287-291.

48. OFICINA INTERNACIONAL DEL TRABAJO, (1983), *Introduccion al estudio del trabajo*, Oficina Internacional del trabajo, Ginebra, tercera edicion, 319-345.

49. PRENTING, T. et BATTAGLIN, R., (1964), The Precedence Diagram : A Tool for Analysis in Assembly Line Balancing, *Journal of Industrial Engineering*, 15, 208-213.

50. ROCHELEAU, D.N, et LEE, K., (1987), Systems for Interactive Assembly Modeling, *Computer Aided Design*, 19, 65-72.

51. SANDERSON, A.C., HOMEM DE MELLO, L.S. et ZHANG, H., (1990), *Assembly Sequences Planning, Artificial Intelligence Magazine*, Spring90, 62-81.

52. SEKIGUCHI, H., KOJIMA, T., INOUE, K., HONDA, T. et TAKEYAMA, H., (1983), Study of Automatic Determination of Assembly Sequences, *Annals of the CIRP*, 32, 25-28.

53. SEOW, K.T. et DEVANATHAN, R., (1994), A Temporal Framework for Assembly Sequence Representation and Analysis, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10, 220-229.

54. SHINGO, S., (1983), *Maîtrise de la production et méthode Kanban : le cas Toyota*, Les éditions d'organisation, Paris, France, 213-214.

55. SHPITALNI, M., ELBER, G. et LENZ, E., (1988), Automatic Assembly of Three Dimensional Structures Via Connectivity Graph, *Annals of the CIRP*, 38, 25-28

56. STADZISZ, P.C. et HENRIOUD, J.M., (1995), Integrated Design of Product Families and Assembly Systems, *IEEE International Conference on Robotic and Automation*, 290-1295.

57. STADZISZ, P.C. et HENRIOUD, J.M., (1995), On the Minimization of the Required Assembly Flexibility, Proceedings of *International Industrial Engineering Conference*, Montréal, Canada, 1199-1208

58. SUZAKI, K., (1991), *Le nouveau défi industriel : Les techniques et les hommes*, InterEditions, Paris, France, 47-48.

59. TURNER, J.U., (1989), Relative Positioning of Parts in Assemblies Using Mathematical Programming, Technical Report No. 89046, *Rensselaer Design Research Center*, Troy, NY, USA.

60. WESLEY, M.A., LOZANO-PEREZ, T., LIBERMAN, L.I., LAVIN, M.A. et GROSSMAN, D.D., (1980), A Geometric Modeling System for Automated Mechanical Assembly, *IBM Journal of Research & Development*, 1, 64-74.

61. WOLTER, J.D., (1989), On the Automatic Generation of Assembly Plans, Proceedings of *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale, Arizona, USA, 62-68.

ANNEXE I

Fonctions de contact et de translation par module de la station bureautique

03-04-1996
22:14:17

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE: TABLE

	PAIRES	CONTACT
1	pan gauche - pan droit	0
2	pan gauche - dessus	1
3	pan gauche - pan arrière	1
4	pan gauche - côté tiroir	0
5	pan gauche - base tiroir	0
6	pan gauche - carton post	0
7	pan gauche - $porte	0
8	pan droit - dessus	1
9	pan droit - pan arrière	0
10	pan droit - côté tiroir	0
11	pan droit - base tiroir	1
12	pan droit - carton post	1
13	pan droit - $porte	0
14	dessus - pan arrière	0
15	dessus - côté tiroir	1
16	dessus - base tiroir	0
17	dessus - carton post	1
18	dessus - $porte	0
19	pan arrière - côté tiroir	1
20	pan arrière - base tiroir	0
21	pan arrière - carton post	0
22	pan arrière - $porte	0
23	côté tiroir - base tiroir	1
24	côté tiroir - carton post	1
25	côté tiroir - $porte	1
26	base tiroir - carton post	1
27	base tiroir - $porte	0
28	carton post - $porte	0
29	pan droit - pan gauche	0
30	dessus - pan gauche	1
31	pan arrière - pan gauche	1
32	côté tiroir - pan gauche	0
33	base tiroir - pan gauche	0
34	carton post - pan gauche	0

35	$porte	-	pan gauche	0
36	dessus	-	pan droit	1
37	pan arrière	-	pan droit	0
38	côté tiroir	-	pan droit	0
39	base tiroir	-	pan droit	1
40	carton post	-	pan droit	1
41	$porte	-	pan droit	0
42	pan arrière	-	dessus	0
43	côté tiroir	-	dessus	1
44	base tiroir	-	dessus	0
45	carton post	-	dessus	1
46	$porte	-	dessus	0
47	côté tiroir	-	pan arrière	1
48	base tiroir	-	pan arrière	0
49	carton post	-	pan arrière	0
50	$porte	-	pan arrière	0
51	base tiroir	-	côté tiroir	1
52	carton post	-	côté tiroir	1
53	$porte	-	côté tiroir	1
54	carton post	-	base tiroir	1
55	$porte	-	base tiroir	0
56	$porte	-	carton post	0

03-04-1996
22:14:19

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE: TABLE

	PAIRES	TRANSLATION
1	pan gauche - pan droit	1 1 1 0 1 1
2	pan gauche - dessus	1 1 1 0 1 1
3	pan gauche - pan arrière	1 1 1 0 1 1
4	pan gauche - côté tiroir	1 1 1 0 1 1
5	pan gauche - base tiroir	1 1 1 0 1 1
6	pan gauche - carton post	1 1 1 1 1 1
7	pan gauch - $porte	1 1 1 0 1 1
8	pan droit - dessus	0 1 1 1 1 1
9	pan droit - pan arrière	0 1 1 1 1 1
10	pan droit - côté tiroir	0 1 1 1 1 1
11	pan droit - base tiroir	0 1 1 1 1 1
12	pan droit - carton post	1 1 1 1 1 0
13	pan droit - $porte	0 1 1 1 1 1
14	dessus - pan arrière	1 0 1 1 1 1
15	dessus - côté tiroir	1 0 1 1 1 1
16	dessus - base tiroir	1 0 1 1 1 1
17	dessus - carton post	1 1 1 1 1 0
18	dessus - $porte	1 0 1 1 1 1
19	pan arrière - côté tiroir	1 1 1 0 1 1
20	pan arrière - base tiroir	1 1 1 1 1 1
21	pan arrière - carton post	1 1 1 1 1 1
22	pan arrière - $porte	1 1 1 1 1 1
23	côté tiroir - base tiroir	1 1 1 0 1 1
24	côté tiroir - carton post	1 1 1 1 1 0
25	côté tiroir - $porte	1 1 1 0 1 1
26	base tiroir - carton post	1 1 1 1 1 0
27	base tiroir - $porte	1 1 1 1 0 1
28	carton post - $porte	1 1 0 1 1 1
29	pan droit - pan gauche	0 1 1 1 1 1
30	dessus - pan gauche	0 1 1 1 1 1
31	pan arrière - pan gauche	0 1 1 1 1 1
32	côté tiroir - pan gauche	0 1 1 1 1 1
33	base tiroir - pan gauche	0 1 1 1 1 1
34	carton post - pan gauche	1 1 1 1 1 1

35	$porte	-	pan gauche	0	1	1	1	1	1
36	dessus	-	pan droit	1	1	1	0	1	1
37	pan arrière	-	pan droit	1	1	1	0	1	1
38	côté tiroir	-	pan droit	1	1	1	0	1	1
39	base tiroir	-	pan droit	1	1	1	0	1	1
40	carton post	-	pan droit	1	1	0	1	1	1
41	$porte	-	pan droit	1	1	1	0	1	1
42	pan arrière	-	dessus	1	1	1	1	0	1
43	côté tiroir	-	dessus	1	1	1	1	0	1
44	base tiroir	-	dessus	1	1	1	1	0	1
45	carton post	-	dessus	1	1	0	1	1	1
46	$porte	-	dessus	1	1	1	1	0	1
47	côté tiroir	-	pan arrière	0	1	1	1	1	1
48	base tiroir	-	pan arrière	1	1	1	1	1	1
49	carton post	-	pan arrière	1	1	1	1	1	1
50	$porte	-	pan arrière	1	1	1	1	1	1
51	base tiroir	-	côté tiroir	0	1	1	1	1	1
52	carton post	-	côté tiroir	1	1	0	1	1	1
53	$porte	-	côté tiroir	0	1	1	1	1	1
54	carton post	-	base tiroir	1	1	0	1	1	1
55	$porte	-	base tiroir	1	0	1	1	1	1
56	$porte	-	carton post	1	1	1	1	1	0

03-19-1996
21:58:18

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : ÉTAGÈRE

	PAIRES	CONTACT
1	pan gauche - pan droit	0
2	pan gauche - tablet milieu	0
3	pan gauche - tablet sup	1
4	pan gauche - tablet moniteur	1
5	pan gauche - carton post	0
6	pan gauche - $porte gauche	0
7	pan gauche - $porte droite	0
8	pan gauche - base tiroir	0
9	pan droit - tablet milieu	0
10	pan droit - tablet sup	1
11	pan droit - tablet moniteur	0
12	pan droit - carton post	1
13	pan droit - $porte gauche	0
14	pan droit - $porte droite	1
15	pan droit - base tiroir	1
16	tablet milieu - tablet sup	1
17	tablet milieu - tablet moniteur	1
18	tablet milieu - carton post	1
19	tablet milieu - $porte gauche	1
20	tablet milieu - $porte droite	0
21	tablet milieu - base tiroir	1
22	tablet sup - tablet moniteur	0
23	tablet sup - carton post	1
24	tablet sup - $porte gauche	0
25	tablet sup - $porte droite	0
26	tablet sup - base tiroir	0
27	tablet moniteur - carton post	0
28	tablet moniteur - $porte gauche	0
29	tablet moniteur - $porte droite	0
30	tablet moniteur - base tiroir	0
31	carton post - $porte gauche	0
32	carton post - $porte droite	0
33	carton post - base tiroir	1
34	$porte gauche - $porte droite	0

35	$porte gauche - base tiroir	0
36	$porte droite - base tiroir	0
37	pan droit - pan gauche	0
38	tablet milieu - pan gauche	0
39	tablet sup - pan gauche	1
40	tablet moniteur - pan gauche	1
41	carton post - pan gauche	0
42	$porte gauche - pan gauche	0
43	$porte droite - pan gauche	0
44	base tiroir - pan gauche	0
45	tablet milieu - pan droit	0
46	tablet sup - pan droit	1
47	tablet moniteur - pan droit	0
48	carton post - pan droit	1
49	$porte gauche - pan droit	0
50	$porte droite - pan droit	1
51	base tiroir - pan droit	1
52	tablet sup - tablet milieu	1
53	tablet moniteur - tablet milieu	1
54	carton post - tablet milieu	1
55	$porte gauche - tablet milieu	1
56	$porte droite - tablet milieu	0
57	base tiroir - tablet milieu	1
58	tablet moniteur - tablet sup	0
59	carton post - tablet sup	1
60	$porte gauche - tablet sup	0
61	$porte droite - tablet sup	0
62	base tiroir - tablet sup	0
63	carton post - tablet moniteur	0
64	$porte gauche - tablet moniteur	0
65	$porte droite - tablet moniteur	0
66	base tiroir - tablet moniteur	0
67	$porte gauche - carton post	0
68	$porte droite - carton post	0
69	base tiroir - carton post	1
70	$porte droite - $porte gauche	0
71	base tiroir - $porte gauche	0
72	base tiroir - $porte droite	0

03-19-1996
21:58:20

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : ÉTAGÈRE

	PAIRES	TRANSLATION
1	pan gauche - pan droit	1 1 1 0 1 1
2	pan gauche - tablet milieu	1 1 1 0 1 1
3	pan gauche - tablet sup	1 1 1 0 1 1
4	pan gauche - tablet moniteur	1 1 1 0 1 1
5	pan gauche - carton post	1 1 1 1 1 1
6	pan gauche - $porte gauche	1 1 1 0 1 1
7	pan gauche - $porte droite	1 1 1 0 1 1
8	pan gauche - base tiroir	1 1 1 0 1 1
9	pan droit - tablet milieu	0 1 1 1 1 1
10	pan droit - tablet sup	0 1 1 1 1 1
11	pan droit - tablet moniteur	0 1 1 1 1 1
12	pan droit - carton post	1 1 1 1 1 0
13	pan droit - $porte gauche	0 1 1 1 1 1
14	pan droit - $porte droite	0 1 1 1 1 1
15	pan droit - base tiroir	0 1 1 1 1 1
16	tablet milieu - tablet sup	1 1 1 1 1 0
19	tablet milieu - $porte gauche	1 1 1 0 1 1
20	tablet milieu - $porte droite	1 1 1 0 1 1
21	tablet milieu - base tiroir	1 1 1 0 1 1
22	tablet sup - tablet moniteur	1 0 1 1 1 1
23	tablet sup - carton post	1 1 1 1 1 0
24	tablet sup - $porte gauche	1 0 1 1 1 1
25	tablet sup - $porte droite	1 0 1 1 1 1
26	tablet sup - base tiroir	1 0 1 1 1 1
27	tablet moniteur - carton post	1 1 1 1 1 1
28	tablet moniteur - $porte gauche	1 1 1 1 1 1
29	tablet moniteur - $porte droite	1 1 1 1 1 1
30	tablet moniteur - base tiroir	1 1 1 1 1 1
31	carton post - $porte gauche	1 1 0 1 1 1
32	carton post - $porte droite	1 1 0 1 1 1
33	carton post - base tiroir	1 1 0 1 1 1
34	$porte gauche - $porte droite	1 1 1 0 1 1
35	$porte gauche - base tiroir	1 0 1 1 1 1
36	$porte droite - base tiroir	1 0 1 1 1 1

37	pan droit - pan gauche	0	1	1	1	1	1
38	tablet milieu - pan gauche	0	1	1	1	1	1
39	tablet sup - pan gauche	0	1	1	1	1	1
40	tablet moniteur - pan gauche	0	1	1	1	1	1
41	carton post - pan gauche	1	1	1	1	1	1
42	$porte gauche - pan gauche	0	1	1	1	1	1
43	$porte droite - pan gauche	0	1	1	1	1	1
44	base tiroir - pan gauche	0	1	1	1	1	1
45	tablet milieu - pan droit	1	1	1	0	1	1
46	tablet sup - pan droit	1	1	1	0	1	1
47	tablet moniteur - pan droit	1	1	1	0	1	1
48	carton post - pan droit	1	1	0	1	1	1
49	$porte gauche - pan droit	1	1	1	0	1	1
50	$porte droite - pan droit	1	1	1	0	1	1
51	base tiroir - pan droit	1	1	1	0	1	1
52	tablet sup - tablet milieu	1	0	1	1	1	1
53	tablet moniteur - tablet milieu	1	1	1	0	1	1
54	carton post - tablet milieu	1	1	0	1	1	1
55	$porte gauche - tablet milieu	0	1	1	1	1	1
56	$porte droite - tablet milieu	0	1	1	1	1	1
57	base tiroir - tablet milieu	0	1	1	1	1	1
58	tablet moniteur - tablet sup	1	1	1	1	0	1
60	$porte gauche - tablet sup	1	1	1	1	0	1
61	$porte droite - tablet sup	1	1	1	1	0	1
62	base tiroir - tablet sup	1	1	1	1	0	1
63	carton post - tablet moniteur	1	1	1	1	1	1
64	$porte gauche - tablet moniteur	1	1	1	1	1	1
65	$porte droite - tablet moniteur	1	1	1	1	1	1
66	base tiroir - tablet moniteur	1	1	1	1	1	1
67	$porte gauche - carton post	1	1	1	1	1	0
68	$porte droite - carton post	1	1	1	1	1	0
69	base tiroir - carton post	1	1	1	1	1	0
70	$porte droite - $porte gauche	0	1	1	1	1	1
71	base tiroir - $porte gauche	1	1	1	1	0	1
72	base tiroir - $porte droite	1	1	1	1	0	1

03-19-1996
21:58:53

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : MEUBLE

	PAIRES	CONTACT
1	pan gauche - pan droit	0
2	pan gauche - tab sup	1
3	pan gauche - tab milieu	1
5	pan droit - tab sup	1
6	pan droit - tab milieu	1
7	pan droit - tab inf	1
8	tab sup - tab milieu	0
9	tab sup - tab inf	0
10	tab milieu - tab inf	0
11	pan droit - pan gauche	0
12	tab sup - pan gauche	1
13	tab milieu - pan gauche	1
14	tab inf - pan gauche	1
15	tab sup - pan droit	1
16	tab milieu - pan droit	1
17	tab inf - pan droit	1
18	tab milieu - tab sup	0
19	tab inf - tab sup	0
20	tab inf - tab milieu	0

03-19-1996
21:58:56

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE: MEUBLE

	PAIRES	TRANSLATION
1	pan gauche - pan droit	1 1 1 0 1 1
2	pan gauche - tab sup	1 1 1 0 1 1
3	pan gauche - tab milieu	1 1 1 0 1 1
4	pan gauche - tab inf	1 1 1 0 1 1
5	pan droit - tab sup	0 1 1 1 1 1
6	pan droit - tab milieu	0 1 1 1 1 1
7	pan droit - tab inf	0 1 1 1 1 1
8	tab sup - tab milieu	1 0 1 1 1 1
9	tab sup - tab inf	1 0 1 1 1 1
10	tab milieu - tab inf	1 0 1 1 1 1
11	pan droit - pan gauche	0 1 1 1 1 1
12	tab sup - pan gauche	0 1 1 1 1 1
13	tab milieu - pan gauche	0 1 1 1 1 1
14	tab inf - pan gauche	0 1 1 1 1 1
15	tab sup - pan droit	1 1 1 0 1 1
16	tab milieu - pan droit	1 1 1 0 1 1
17	tab inf - pan droit	1 1 1 0 1 1
18	tab milieu - tab sup	1 1 1 1 0 1
19	tab inf - tab sup	1 1 1 1 0 1
20	tab inf - tab milieu	1 1 1 1 0 1

03-03-1996
19:41:36

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : PORTE

	PAIRES	CONTACT
1	charn sup - charn inf	0
2	charn sup - poignee	0
3	charn sup - panneau	1
4	charn inf - poignee	0
5	charn inf - panneau	1
6	poignee - panneau	1
7	charn inf - charn sup	0
8	poignee - charn sup	0
9	panneau - charn sup	1
10	poignee - charn inf	0
11	panneau - charn inf	1
12	panneau - poignee	1

03-03-1996
19:41:38

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE: PORTE

	PAIRES	TRANSLATION
1	charn sup - charn inf	1 0 1 1 1 1
2	charn sup - poignée	1 1 1 1 1 1
3	charn sup - panneau	1 1 0 1 1 1
4	charn inf - poignée	1 1 1 1 1 1
5	charn inf - panneau	1 1 0 1 1 1
6	poignée - panneau	1 1 1 1 1 0
7	charn inf - charn sup	1 1 1 1 0 1
8	poignée - charn sup	1 1 1 1 1 1
9	panneau - charn sup	1 1 1 1 1 0
10	poignée - charn inf	1 1 1 1 1 1
11	panneau - charn inf	1 1 1 1 1 0
12	panneau - poignée	1 1 0 1 1 1

05-06-1996
14:33:21

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : STATION

	PAIRES			CONTACT
1	$table	-	$etagere	1
2	$table	-	union	1
3	$table	-	$meuble	0
4	$etagere	-	union	0
5	$etagere	-	$meuble	0
6	union	-	$meuble	1
7	$etagere	-	$table	1
8	union	-	$table	1
9	$meuble	-	$table	0
10	union	-	$etagere	0
11	$meuble	-	$etagere	0
12	$meuble	-	union	1

05-06-1996
14:33:23

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : STATION

	PAIRES	TRANSLATION
1	$table - $etagere	1 1 1 1 0 1
2	$table - union	0 1 1 1 1 1
3	$table - $meuble	1 1 0 1 1 1
4	$etagere - union	1 1 1 1 1 1
5	$etagere - $meuble	1 1 1 1 1 1
6	union - $meuble	1 1 0 1 1 1
7	$etagere - $table	1 0 1 1 1 1
8	union - $table	1 1 1 0 1 1
9	$meuble - $table	1 1 1 1 1 0
10	union - $etagere	1 1 1 1 1 1
11	$meuble - $etagere	1 1 1 1 1 1
12	$meuble - union	1 1 1 1 1 0

ANNEXE II

Évaluation quantitative par module de la station bureautique (DFMA)

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - TABLE1 FILENAME - TABLE1.MOD

Total Assembly Time	257	Description	No. of Items	Mins. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	257							
dessus		place in fixture	1	1	4.5	0.04	0.00	0.0
pan gauche		add & hold down	1	1	8.5	0.07	0.00	0.0
viser au dessus		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
2 boulons de cane		au dessus	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
2 canes de serrure		au cote tiroir	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
cote tiroir		add	1	1	4.0	0.03	0.00	0.0
viser les canes		boulons et canes	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
pan arriere		add & hold down	1	1	11.0	0.09	0.00	0.0
viser au pan gauche		le pan arriere	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser au cote tiroir		le pan arriere	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan droit		add & hold down	1	1	8.5	0.07	0.00	0.0
viser au dessus		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
base tiroir		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser au cote tiroir		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser au pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
mettre debout		la table	1	-	5.5	0.05	0.00	0.0
carton post		add	1	1	3.6	0.03	0.00	0.0
cluer le carton		10 clues	1	-	20.0	0.17	0.00	0.0
porte		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
viser porte		add & screw fasten	4	0	29.0	0.24	0.00	0.0
mettre du ruban		sur la porte	1	-	7.0	0.06	0.00	0.0
transport a stockage		de la table	1	-	15.0	0.13	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 13:36:05

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY RANK - TABLE2 FILENAME - TABLE2.DOO

Total Assembly Time	257
Time for Main Assembly	257

	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
dessus	place in fixture	1	1	4.5	0.04	0.00	0.0
pan droit	add & hold down	1	1	8.5	0.07	0.00	0.0
iser au dessus	add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
2 boulons de cane	au dessus	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
2 canes de serrure	au cote tiroir	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
cote tiroir	add	1	1	4.0	0.03	0.00	0.0
viser les canes	boulons et canes	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
base tiroir	add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser au cote tiroir	add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser au pan. droit	add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan gauche	add & hold down	1	1	8.5	0.07	0.00	0.0
viser au dessus	add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan arriere	add & hold down	1	1	11.0	0.09	0.00	0.0
viser au pan gauche	le pan arriere	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser au cote tiroir	le pan arriere	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
mettre debout	la table	1	-	5.5	0.05	0.00	0.0
carton post	add	1	1	3.6	0.03	0.00	0.0
cluer le carton	10 clues	1	-	20.0	0.17	0.00	0.0
porte	add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
viser la porte	add & screw fasten	4	0	29.0	0.24	0.00	0.0
mettre du ruban	sur la porte	1	-	7.0	0.06	0.00	0.0
transport a stockage	de la table	1	-	15.0	0.13	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 13:39:04

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - STATION3 FILENAME - STATION3.000

Total Assembly Time	132	Description	No. of items	Min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	132							
table		place in fixture	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
2 boulons de cane		a droite de la table	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
2 canes de serrure		gauche de tab union	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
2 canes de serrure		droite de tab union	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
tab d union		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
visser 2 canes		cote table	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
2 boulons de cane		pan gauche meuble	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
meuble		add	1	1	4.5	0.04	0.00	0.0
visser canes		boulons et canes	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
2 goujons de bois		table cote droit	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
2 goujons de bois		table cote gauche	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
etagere		add	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
visser table-etagere		add 4 screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
transport a stockage		du produit	1	-	15.0	0.13	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-29-1995
Time of Analysis: 11:44:02

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - STATION2 FILENAME - STATION2.MOD

Total Assembly Time	132	Description	No. of items	Min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	132							
table		place in fixture	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
2 boulons de cane		a droite de la table	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
2 canes de serrure		gauche de tab union	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
2 canes de serrure		droite de tab union	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
tab d union		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
visser 2 canes		cote table	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
2 goujons de bois		table cote droit	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
2 goujons de bois		table cote gauche	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
etagere		add	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
visser table-etagere		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
2 boulons de cane		pan gauche meuble	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
meuble		add	1	1	4.5	0.04	0.00	0.0
visser canes		boulons et canes	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
transport a stockage		du produit	1	-	15.0	0.13	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-29-1995
Time of Analysis: 11:33:56

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - STATION1 FILENAME - STATION1.MOD

Total Assembly Time	132
Time for Main Assembly	132

	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
table	place in fixture	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
2 goujons de bois	table cote droit	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
2 goujons de bois	table cote gauche	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
etagere	add	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
visser table-etagere	add & screw fastes	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
2 boulons de cane	a droite de la table	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
2 canes de serrure	gauche de tab union	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
2 canes de serrure	droite de tab union	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
tab d union	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
visser 2 canes	cote table	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
2 boulons de cane	pan gauche meuble	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
meuble	add	1	1	4.5	0.04	0.00	0.0
visser canes	boulons et canes	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
transport a stockage	du produit	1	-	15.0	0.13	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-29-1995
Time of Analysis: 11:23:08

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - MEUBLE4 FILENAME - MEUBLE4.MOO

Total Assembly Time	142	Description	No. of items	Mins. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	142							
tab superieur		place in fixture	1	1	3.3	0.03	0.00	0.0
pan droit		add & hold down	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan gauche		add & hold down	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab inferieure		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a pan gauche		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab milieu		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a pan gauche		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - MEUBLE3 FILENAME - MEUBLE3.MOD

Total Assembly Time	142	Description	No. of items	Min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	142							
tab superieur		place in fixture	1	1	3.3	0.03	0.00	0.0
pan droit		add & hold down	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan gauche		add & hold down	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab milieu		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a pan gauche		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab inferieure		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a pan gauche		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - MEUBLE2 FILENAME - MEUBLE2.MOO

Total Assembly Time 142		Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
Time for Main Assembly 142								
tab superieur		place in fixture	1	1	3.3	0.03	0.00	0.0
pan gauche		add & hold down	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan droit		add & hold down	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab inferieure		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a pan gauche		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab milieu		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a pan gauche		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - MEUBLE1 FILENAME - MEUBLE1.MOO

Total Assembly Time	142	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
Time for Main Assembly	142							
tab superieur		place in fixture	1	1	3.3	0.03	0.00	0.0
pan gauche		add & hold down	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan droit		add & hold down	1	1	10.5	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab milieu		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a pan gauche		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab inferieure		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a pan gauche		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 14:15:02

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - PORTE FILENAME - PORTE.MOO

Total Assembly Time	76	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
Time for Main Assembly	76							
panneau		place in fixture	1	1	3.3	0.03	0.00	0.0
charn sup		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
Machine screw		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
char inf		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
Machine screw		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
poignee		add & hold down	1	1	7.3	0.06	0.00	0.0
Machine screw		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
transport stockage		de la porte	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 01-22-1996
Time of Analysis: 14:52:21

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - ETAGERE4 FILENAME - ETAGERE4.MOD

Total Assembly Time	300	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	300							
tab superieur		place in fixture	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
tab milieu		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan droit		add & hold down	1	1	8.3	0.07	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
base de tirroir		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a tab milieu		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan gauche		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab moniteur		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a pan gauche		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a tab milieu		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
mettre debout		1 etagere	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
carton post		add & hold down	1	1	7.9	0.07	0.00	0.0
clouer le carton		13 clous	1	-	24.0	0.20	0.00	0.0
porte gauche		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
viser porte gauche		add & screw fasten	4	0	29.0	0.24	0.00	0.0
porte droite		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
viser porte droite		add & screw fasten	4	0	29.0	0.24	0.00	0.0
mettre du ruban		sur les portes	1	-	7.0	0.06	0.00	0.0
transport a stockage		de l etagere	1	-	15.0	0.13	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 13:59:30

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - ETAGERE3 FILENAME - ETAGERE3.MOD

Total Assembly Time	300	Description	No. of items	Min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
Time for Main Assembly	300							
tab superieur		place in fixture	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
tab milieu		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan gauche		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab moniteur		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser au pan gauche		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a tab milieu		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan droit		add & hold down	1	1	8.3	0.07	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
base de tirroir		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
visera tab milieu		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
mettre debout		l etagere	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
carton post		add & hold down	1	1	7.9	0.07	0.00	0.0
cluer le carton		13 clues	1	-	24.0	0.20	0.00	0.0
porte gauche		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
viser porte gauche		add & screw fasten	4	0	28.0	0.24	0.00	0.0
porte droite		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
viser porte droite		add & screw fasten	4	0	28.0	0.24	0.00	0.0
mettre du ruban		sur les portes	1	-	7.0	0.06	0.00	0.0
transport a stockage		de l etagere	1	-	15.0	0.13	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 13:55:31

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - ETAGERE2 FILENAME - ETAGERE2.MOD

Total Assembly Time	300	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	300							
tab superieur		place in fixture	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
pan droit		add & hold down	1	1	8.3	0.07	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab milieu		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
base de tiroir		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a tab milieu		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan gauche		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab moniteur		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a pan gauche		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a tab milieu		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
mettre debout		1 etagere	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
carton post		add & hold down	1	1	7.9	0.07	0.00	0.0
cluer le carton		13 clues	1	-	24.0	0.20	0.00	0.0
porte gauche		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
viser porte gauche		add & screw fasten	4	0	29.0	0.24	0.00	0.0
porte droite		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
viser porte droite		add & screw fasten	4	0	29.0	0.24	0.00	0.0
mettre du ruban		sur les portes	1	-	7.0	0.06	0.00	0.0
transport a stockage		de 1 etagere	1	-	15.0	0.13	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 13:53:34

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - ETAGERE1 FILENAME - ETAGERE1.MOD

Total Assembly Time	300
Time for Main Assembly	300

	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
tab superieur	place in fixture	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
pan gauche	add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup	add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab milieu	add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser a tab sup	add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
tab moniteur	add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser au pan gauche	add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a tab milieu	add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan droit	add & hold down	1	1	8.3	0.07	0.00	0.0
viser a tab sup	add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
base de tirroir	add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
visera tab milieu	add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser a pan droit	add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
mettre debout	1 etagere	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
carton post	add & hold down	1	1	7.9	0.07	0.00	0.0
cluer le carton	13 clues	1	-	24.0	0.20	0.00	0.0
porte gauche	add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
viser porte gauche	add & screw fasten	4	0	29.0	0.24	0.00	0.0
porte droite	add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
viser porte droite	add & screw fasten	4	0	29.0	0.24	0.00	0.0
mettre du ruban	sur les portes	1	-	7.0	0.06	0.00	0.0
transport a stockage	de 1 etagere	1	-	15.0	0.13	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 13:49:20

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY RANK - TABLE4 FILENAME - TABLE4.MOD

Total Assembly Time	257	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	257							
dessus		place in fixture	1	1	4.5	0.04	0.00	0.0
2 boulons de case		au dessus	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
2 cases de serrure		au cote tiroir	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
cote tiroir		add	1	1	4.0	0.03	0.00	0.0
viser les cases		boulons et cases	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
pan droit		add & hold down	1	1	8.5	0.07	0.00	0.0
viser au dessus		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
base tiroir		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser au cote tiroir		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser au pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan gauche		add & hold down	1	1	8.5	0.07	0.00	0.0
viser au dessus		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan arriere		add & hold down	1	1	11.0	0.09	0.00	0.0
viser au pan gauche		le pan arriere	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser au cote tiroir		le pan arriere	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
mettre debout		la table	1	-	5.5	0.05	0.00	0.0
carton post		add	1	1	3.6	0.03	0.00	0.0
clver le carton		10 clues	1	-	20.0	0.17	0.00	0.0
porte		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
viser la porte		add & screw fasten	4	0	29.0	0.24	0.00	0.0
mettre du ruban		sur la porte	1	-	7.0	0.06	0.00	0.0
transport a stockage		de la table	1	-	15.0	0.13	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 03-25-1996
Time of Analysis: 13:44:28

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - TABLE3 FILENAME - TABLE3.MOD

Total Assembly Time	257	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	257							
dessus		place in fixture	1	1	4.5	0.04	0.00	0.0
2 boulons de case		au dessus	1	-	10.0	0.08	0.00	0.0
2 cases de serrure		au cote tiroir	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
cote tiroir		add	1	1	4.0	0.03	0.00	0.0
viser les cases		boulons et cases	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0
pan gauche		add & hold down	1	1	8.5	0.07	0.00	0.0
viser au dessus		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan arriere		add & hold down	1	1	11.0	0.09	0.00	0.0
viser au cote tiroir		le pan arriere	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser au pan gauche		le pan arriere	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
pan droit		add & hold down	1	1	8.5	0.07	0.00	0.0
viser au dessus		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
base tirroir		add & hold down	1	1	10.8	0.09	0.00	0.0
viser au pan droit		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
viser au cote tiroir		add & screw fasten	2	0	16.0	0.13	0.00	0.0
mettre debout		la table	1	-	5.5	0.05	0.00	0.0
carton post		add	1	1	3.6	0.03	0.00	0.0
clouer le carton		10 clous	1	-	20.0	0.17	0.00	0.0
porte		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
viser la porte		add & screw fasten	4	0	29.0	0.24	0.00	0.0
mettre du ruban		sur la porte	1	-	7.0	0.06	0.00	0.0
transport a stockage		de la table	1	-	15.0	0.13	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 13:41:50

ANNEXE III

Fonctions de contact et de translation par module de l'alternateur

03-21-1996
01:57:33

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : COUVERCLE FRONTAL

	PAIRES	CONTACT
1	roulement - plaquette	1
2	roulement - couvfr	1
3	plaquette - couvfr	1
4	plaquette - roulement	1
5	couvfr - roulement	1
6	couvfr - plaquette	1

03-21-1996
01:57:35

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : COUVERCLE FRONTAL

PAIRES	TRANSLATION
1 roulement - plaquette	0 1 1 1 1 1
2 roulement - couvfr	1 0 0 0 0 0
3 plaquette - couvfr	1 0 0 0 0 0
4 plaquette - roulement	1 1 1 0 1 1
5 couvfr - roulement	0 0 0 1 0 0
6 couvfr - plaquette	0 0 0 1 0 0

03-21-1996
01:56:50

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : COUVERCLE POSTÉRIEUR

	PAIRES	CONTACT
1	stator - term ass	0
2	stator - diode	1
3	stator - brosse ass	0
4	stator - regulateur	0
5	stator - pont de rec	1
6	stator - capaciteur	0
7	stator - couvpos	1
8	term ass - diode	0
9	term ass - brosse ass	0
10	term ass - regulateur	0
11	term ass - pont de rec	1
12	term ass - capaciteur	0
13	term ass - couvpos	1
14	diode - brosse ass	1
15	diode - regulateur	0
16	diode - pont de rec	1
17	diode - capaciteur	0
18	diode - couvpos	0
19	brosse ass - regulateur	1
20	brosse ass - pont de rec	0
21	brosse ass - capaciteur	0
22	brosse ass - couvpos	0
23	regulateur - pont de rec	0
24	regulateur - capaciteur	0
25	regulateur - couvpos	1
26	pont de rec - capaciteur	1
27	pont de rec - couvpos	1
28	capaciteur - couvpos	1
29	term ass - stator	0
30	diode - stator	1
31	brosse ass - stator	0
32	regulateur - stator	0
33	pont de rec - stator	1
34	capaciteur - stator	0

35	couvpos	-	stator	1
36	diode	-	term ass	0
37	brosse ass	-	term ass	0
38	regulateur	-	term ass	0
39	pont de rec	-	term ass	1
40	capaciteur	-	term ass	0
41	couvpos	-	term ass	1
42	brosse ass	-	diode	1
43	regulateur	-	diode	0
44	pont de rec	-	diode	1
45	capaciteur	-	diode	0
46	couvpos	-	diode	0
47	regulateur	-	brosse ass	1
48	pont de rec	-	brosse ass	0
49	capaciteur	-	brosse ass	0
50	couvpos	-	brosse ass	0
51	pont de rec	-	regulateur	0
52	capaciteur	-	regulateur	0
53	couvpos	-	regulateur	1
54	capaciteur	-	pont de rec	1
55	couvpos	-	pont de rec	1
56	couvpos	-	capaciteur	1

03-21-1996
01:56:52

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : COUVERCLE POSTÉRIEUR

	PAIRES	TRANSLATION
1	stator - term ass	1 1 1 1 1 1
2	stator - diode	1 0 1 1 1 1
3	stator - brosse ass	1 0 1 1 1 1
4	stator - regulateur	1 0 1 1 1 1
5	stator - pont de rec	1 0 1 1 1 1
6	stator - capaciteur	1 0 1 1 1 1
7	stator - couvpos	0 0 0 0 1 0
8	term ass - diode	0 1 1 1 1 0
9	term ass - brosse ass	1 1 1 1 1 0
10	term ass - regulateur	1 1 1 1 1 0
11	term ass - pont de rec	0 1 0 0 0 0
12	term ass - capaciteur	1 1 1 1 1 1
13	term ass - couvpos	0 1 0 0 0 0
14	diode - brosse ass	1 0 1 1 1 0
15	diode - regulateur	1 0 1 1 1 1
16	diode - pont de rec	0 0 0 0 1 0
17	diode - capaciteur	1 1 1 1 1 1
18	diode - couvpos	0 0 0 0 1 0
19	brosse ass - regulateur	0 0 0 0 1 0
20	brosse ass - pont de rec	1 1 0 1 1 1
21	brosse ass - capaciteur	0 1 1 1 1 1
22	brosse ass - couvpos	0 0 0 0 1 0
23	regulateur - pont de rec	0 1 0 1 1 1
24	regulateur - capaciteur	0 1 1 1 1 1
25	regulateur - couvpos	0 0 0 0 1 0
26	pont de rec - capaciteur	1 1 1 1 0 0
27	pont de rec - couvpos	0 0 0 0 1 0
28	capaciteur - couvpos	0 0 0 0 1 0
29	term ass - stator	1 1 1 1 1 1
30	diode - stator	1 1 1 1 0 1
31	brosse ass - stator	1 1 1 1 0 1
32	regulateur - stator	1 1 1 1 0 1
33	pont de rec - stator	1 1 1 1 0 1
34	capaciteur - stator	1 1 1 1 0 1

35	couvpos	-	stator	0	1	0	0	0	0
36	diode	-	term ass	1	1	0	0	1	1
37	brosse ass	-	term ass	1	1	0	1	1	1
38	regulateur	-	term ass	1	1	0	1	1	1
39	pont de rec	-	term ass	0	0	0	0	1	0
40	capaciteur	-	term ass	1	1	1	1	1	1
41	couvpos	-	term ass	0	0	0	0	1	0
42	brosse ass	-	diode	1	1	0	1	0	1
43	regulateur	-	diode	1	1	1	1	0	1
44	pont de rec	-	diode	0	1	0	0	0	0
45	capaciteur	-	diode	1	1	1	1	1	1
46	couvpos	-	diode	0	1	0	0	0	0
47	regulateur	-	brosse ass	0	1	0	0	0	0
48	pont de rec	-	brosse ass	1	1	1	1	1	0
49	capaciteur	-	brosse ass	1	1	1	0	1	1
50	couvpos	-	brosse ass	0	1	0	0	0	0
51	pont de rec	-	regulateur	1	1	1	0	1	0
52	capaciteur	-	regulateur	1	1	1	0	1	1
53	couvpos	-	regulateur	0	1	0	0	0	0
54	capaciteur	-	pont de rec	1	0	0	1	1	1
55	couvpos	-	pont de rec	0	1	0	0	0	0
56	couvpos	-	capaciteur	0	1	0	0	0	0

03-21-1996
01:58:12

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : ALTERNATEUR

	PAIRES	CONTACT
1	ecrou - rondelle	1
2	ecrou - poulie	0
3	ecrou - ventilateur	0
4	ecrou - collar1	0
5	ecrou - $couvfr	0
6	ecrou - collar2	0
7	ecrou - roteur	1
8	ecrou - $couvpos	0
9	rondelle - poulie	1
10	rondelle - ventilateur	0
11	rondelle - collar1	0
12	rondelle - $couvfr	0
13	rondelle - collar2	0
14	rondelle - roteur	1
15	rondelle - $couvpos	0
16	poulie - ventilateur	1
17	poulie - collar1	0
18	poulie - $couvfr	0
19	poulie - collar2	0
20	poulie - roteur	1
21	poulie - $couvpos	0
22	ventilateur - collar1	1
23	ventilateur - $couvfr	0
24	ventilateur - collar2	0
25	ventilateur - roteur	1
26	ventilateur - $couvpos	0
27	collar1 - $couvfr	1
28	collar1 - collar2	0
29	collar1 - roteur	1
30	collar1 - $couvpos	0
31	$couvfr - collar2	1
32	$couvfr - roteur	1
33	$couvfr - $couvpos	1
34	collar2 - roteur	1

35	collar2	-	$couvpos	0
36	roteur	-	$couvpos	1
37	rondelle	-	ecrou	1
38	poulie	-	ecrou	0
39	ventilateur	-	ecrou	0
40	collar1	-	ecrou	0
41	$couvfr	-	ecrou	0
42	collar2	-	ecrou	0
43	roteur	-	ecrou	1
44	$couvpos	-	ecrou	0
45	poulie	-	rondelle	1
46	ventilateur	-	rondelle	0
47	collar1	-	rondelle	0
48	$couvfr	-	rondelle	0
49	collar2	-	rondelle	0
50	roteur	-	rondelle	1
51	$couvpos	-	rondelle	0
52	ventilateur	-	poulie	1
53	collar1	-	poulie	0
54	$couvfr	-	poulie	0
55	collar2	-	poulie	0
56	roteur	-	poulie	1
57	$couvpos	-	poulie	0
58	collar1	-	ventilateur	1
59	$couvfr	-	ventilateur	0
60	collar2	-	ventilateur	0
61	roteur	-	ventilateur	1
62	$couvpos	-	ventilateur	0
63	$couvfr	-	collar1	1
64	collar2	-	collar1	0
65	roteur	-	collar1	1
66	$couvpos	-	collar1	0
67	collar2	-	$couvfr	1
68	roteur	-	$couvfr	1
69	$couvpos	-	$couvfr	1
70	roteur	-	collar2	1
71	$couvpos	-	collar2	0
72	$couvpos	-	roteur	1

03-21-1996
01:58:15

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : ALTERNATEUR

	PAIRES			TRANSLATION
1	écrou	-	rondelle	1 1 1 0 1 1
2	écrou	-	poulie	1 1 1 0 1 1
3	écrou	-	ventilateur	1 1 1 0 1 1
4	écrou	-	collar1	1 1 1 0 1 1
5	écrou	-	$couvfr	1 1 1 0 1 1
6	écrou	-	collar2	1 1 1 0 1 1
7	écrou	-	rotor	1 0 0 0 0 0
8	écrou	-	$couvpos	1 1 1 0 1 1
9	rondelle	-	poulie	1 1 1 0 1 1
10	rondelle	-	ventilateur	1 1 1 0 1 1
11	rondelle	-	collar1	1 1 1 0 1 1
12	rondelle	-	$couvfr	1 1 1 0 1 1
13	rondelle	-	collar2	1 1 1 0 1 1
14	rondelle	-	rotor	1 0 0 0 0 0
15	rondelle	-	$couvpos	1 1 1 0 1 1
16	poulie	-	ventilateur	1 1 1 0 1 1
17	poulie	-	collar1	1 1 1 0 1 1
18	poulie	-	$couvfr	1 1 1 0 1 1
19	poulie	-	collar2	1 1 1 0 1 1
20	poulie	-	rotor	1 0 0 0 0 0
21	poulie	-	$couvpos	1 1 1 0 1 1
22	ventilateur	-	collar1	1 1 1 0 1 1
23	ventilateur	-	$couvfr	1 1 1 0 1 1
24	ventilateur	-	collar2	1 1 1 0 1 1
25	ventilateur	-	rotor	1 0 0 0 0 0
26	ventilateur	-	$couvpos	1 1 1 0 1 1
27	collar1	-	$couvfr	1 1 1 0 1 1
28	collar1	-	collar2	1 1 1 0 1 1
29	collar1	-	rotor	1 0 0 0 0 0
30	collar1	-	$couvpos	1 1 1 0 1 1
31	$couvfr	-	collar2	1 0 0 0 0 0
32	$couvfr	-	rotor	1 0 0 0 0 0
33	$couvfr	-	$couvpos	1 0 0 0 0 0
34	collar2	-	rotor	1 0 0 0 0 0

35	collar2 - $couvpos	1	1	1	0	1	1
36	rotor - $couvpos	1	0	0	0	0	0
37	rondelle - écrou	0	1	1	1	1	1
38	poulie - écrou	0	1	1	1	1	1
39	ventilateur - écrou	0	1	1	1	1	1
40	collar1 - écrou	0	1	1	1	1	1
41	$couvfr - écrou	0	1	1	1	1	1
42	collar2 - écrou	0	1	1	1	1	1
43	rotor - écrou	0	0	0	1	0	0
44	$couvpos - écrou	0	1	1	1	1	1
45	poulie - rondelle	0	1	1	1	1	1
46	ventilateur - rondelle	0	1	1	1	1	1
47	collar1 - rondelle	0	1	1	1	1	1
48	$couvfr - rondelle	0	1	1	1	1	1
49	collar2 - rondelle	0	1	1	1	1	1
50	rotor - rondelle	0	0	0	1	0	0
51	$couvpos - rondelle	0	1	1	1	1	1
52	ventilateur - poulie	0	1	1	1	1	1
53	collar1 - poulie	0	1	1	1	1	1
54	$couvfr - poulie	0	1	1	1	1	1
55	collar2 - poulie	0	1	1	1	1	1
56	rotor - poulie	0	0	0	1	0	0
57	$couvpos - poulie	0	1	1	1	1	1
58	collar1 - ventilateur	0	1	1	1	1	1
59	$couvfr - ventilateur	0	1	1	1	1	1
60	collar2 - ventilateur	0	1	1	1	1	1
61	rotor - ventilateur	0	0	0	1	0	0
62	$couvpos - ventilateur	0	1	1	1	1	1
63	$couvfr - collar1	0	1	1	1	1	1
64	collar2 - collar1	0	1	1	1	1	1
65	rotor - collar1	0	0	0	1	0	0
66	$couvpos - collar1	0	1	1	1	1	1
67	collar2 - $couvfr	0	0	0	1	0	0
68	rotor - $couvfr	0	0	0	1	0	0
69	$couvpos - $couvfr	0	0	0	1	0	0
70	rotor - collar2	0	0	0	1	0	0
71	$couvpos - collar2	0	1	1	1	1	1
72	$couvpos - rotor	0	0	0	1	0	0

ANNEXE IV

Évaluation quantitative par module de l'alternateur (DFMA)

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - COMPOS1 · FILENAME - COMPOS1.MOO

Total Assembly Time 86 / Time for Main Assembly 86	Description	No. of items	Min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
compos	place in fixture	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
engraisser roulement	couvercle posterieur	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
post rectification	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
viser le post	add & screw fasten	2	-	7.0	0.06	0.00	0.0
enlever ecrou	ensemble-terminal	1	-	4.0	0.03	0.00	0.0
ensemble-terminal	add	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
fixer le terminal	add & fasten	1	-	5.0	0.04	0.00	0.0
regulateur	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
capacitenr	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
viser capacitenr	add & screw fasten	2	-	7.0	0.06	0.00	0.0
ensemble-brosses	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
diode	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
viser ensemble	regulat-bross-diode	3	-	9.0	0.08	0.00	0.0
stateur	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
fixer le stateur	add & fasten	3	-	9.0	0.08	0.00	0.0
tourner l ensemble	couvercle post.	1	-	4.0	0.03	0.00	0.0
enlever la tige sec.	ensemble de brosses	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - COUVPOS2 FILENAME - COUVPOS2.MOD

Total Assembly Time	86	Description	No. of Items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
Time for Main Assembly	86							
couvpos		place in fixture	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
engraisser roulement		couvercle posterieur	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
post rectification		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
viser le post		add & screw fasten	2	-	7.0	0.06	0.00	0.0
enlever ecrou		ensemble-terminal	1	-	4.0	0.03	0.00	0.0
ensemble-terminal		add	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
fixer terminal		add & fasten	1	-	5.0	0.04	0.00	0.0
capaciteur		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
fixer capaciteur		add & screw fasten	2	-	7.0	0.06	0.00	0.0
regulateur		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
ensemble-brosses		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
diode		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
fixer l ensemble		regulat-brosse-diode	3	-	9.0	0.08	0.00	0.0
stateur		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
fixer le stateur		add & fasten	3	-	9.0	0.08	0.00	0.0
tourner l ensemble		couvercle post.	1	-	4.0	0.03	0.00	0.0
enlever la tige sec.		ensemble de brosses1	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 14:46:46

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - CONVPOS3 FILENAME - CONVPOS3.BOO

Total Assembly Time 86 / Time for Main Assembly 86	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost K$
converpos	place in fixture	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
engraisser roulement	couvercle posterieur	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
pont rectification	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
fixer le pont	add & screw fasten	2	-	7.0	0.06	0.00	0.0
capacitour	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
fixer capacitour	add & screw fasten	2	-	7.0	0.06	0.00	0.0
enlever ecrou	ensemble-terminal	1	-	4.0	0.03	0.00	0.0
ensemble-terminal	add	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
fixer terminal	add & fasten	1	-	5.0	0.04	0.00	0.0
regulateur	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
ensemble-brosses	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
diode	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
fixer ensemble	regulat-brosse-diode	3	-	9.0	0.08	0.00	0.0
stateur	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
fixer stateur	add & fasten	3	-	9.0	0.08	0.00	0.0
tourner l ensemble	couvercle post.	1	-	4.0	0.03	0.00	0.0
enlever la tige sec.	ensemble de brosses	1	-	8.0	0.07	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 14:45:42

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - COUVFR FILENAME - COUVFR.MOD

Total Assembly Time	30	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
Time for Main Assembly	30							
couvfr		place in fixture	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
roulement		add	1	1	4.0	0.03	0.00	0.0
presser roulement		standard operation	1	-	4.0	0.03	0.00	0.0
engraisser roulement		couvercle fr	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
plaquette		add	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
viser plaquette		add & srew fasten	3	-	9.0	0.08	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 14:48:12

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - ALTERN1 FILENAME - ALTERN1.MOD

Total Assembly Time	79	Description	No. of Items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
Time for Main Assembly	79							
ecrou		place in fixture	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
rondelle		add	1	1	3.2	0.03	0.00	0.0
poulie		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
ventilateur		add	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
collar1		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
couver fr (ass)		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
collar2		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
roteur		add & screw fasten	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
coverpos (ass)		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
fixer les 2 coverc		add & screw	4	-	29.0	0.24	0.00	0.0
tourner l ensemble		1 alternateur	1	-	6.5	0.05	0.00	0.0
couple a l ecrou		alternateur	1	-	4.0	0.03	0.00	0.0
preuve electronique		alternateur	1	-	8.4	0.07	0.00	0.0

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - ALTERN2 FILENAME - ALTERN2.BOO

Total Assembly Time	79	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	79							
roteur		place in fixture	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
collar2		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
couverfr (ass)		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
collar1		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
ventilateur		add	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
poulie		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
rondelle		add	1	1	3.2	0.03	0.00	0.0
ecrou		add & screw fasten	1	1	7.1	0.06	0.00	0.0
couple a 1 ecrou		alternateur	1	-	4.0	0.03	0.00	0.0
tourner 1 ensemble		1 alternateur	1	-	6.5	0.05	0.00	0.0
couverpos (ass)		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
fixer les 2 couverc		add & screw	4	-	29.0	0.24	0.00	0.0
preuve electronique		alternateur	1	-	8.4	0.07	0.00	0.0

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - ALTERN3 FILENAME - ALTERN3.MOD

Total Assembly Time	90	Description	No. of Items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	90							
roteur		place in fixture	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
collar2		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
couvfr (ass)		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
tourner 1 ensemble		1 alternateur	1	-	6.5	0.05	0.00	0.0
couvpos (ass)		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
fixer 2 couvere		add & screw	4	-	29.0	0.24	0.00	0.0
tourner 1 ensemble		1 alternateur	1	-	6.5	0.05	0.00	0.0
collar1		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
ventilateur		add	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
poulie		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
rondelle		add	1	1	3.2	0.03	0.00	0.0
ecrou		add & screw fasten	1	1	7.1	0.06	0.00	0.0
couple a 1 ecrou		alternateur	1	-	4.0	0.03	0.00	0.0
preuve electronique		alternateur	1	-	8.4	0.07	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 15:16:29

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - ALTERN4 FILENAME - ALTERN4.MOD

Total Assembly Time	96	Description	No. of items	Min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	96							
roteur		place in fixture	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
collar2		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
liberer roteur		du support	1	-	6.5	0.05	0.00	0.0
couvpos (ass)		add & hold down	1	1	7.5	0.06	0.00	0.0
tourner l ensemble		l alternateur	1	-	6.5	0.05	0.00	0.0
couvfr (ass)		add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
fixer 2 couverc		add & screw fasten	4	-	29.0	0.24	0.00	0.0
tourner l ensemble		l alternateur	1	-	6.5	0.05	0.00	0.0
collar1		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
ventilateur		add	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
poulie		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
rondelle		add	1	1	3.2	0.03	0.00	0.0
ecrou		add & screw fasten	1	1	7.1	0.06	0.00	0.0
couple a l ecrou		alternateur	1	-	4.0	0.03	0.00	0.0
preuve electronique		alternateur	1	-	8.4	0.07	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 15:17:41

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - ALTERN5 FILENAME - ALTERN5.HOO

Total Assembly Time 79 / Time for Main Assembly 79	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
couvpos (ass)	place in fixture	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
roteur	add	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
collar2	add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
couvfr (ass)	add	1	1	3.5	0.03	0.00	0.0
collar1	add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
ventilateur	add	1	1	3.0	0.03	0.00	0.0
poulie	add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
rondelle	add	1	1	3.2	0.03	0.00	0.0
ecrou	add & screw fasten	1	1	7.1	0.06	0.00	0.0
couple a 1 ecrou	alternateur	1	-	4.0	0.03	0.00	0.0
tourner 1 ensemble	1 alternateur	1	-	6.5	0.05	0.00	0.0
fixer les couverc	les 2 couvercles	4	0	29.0	0.24	0.00	0.0
preuve electronique	alternateur	1	-	8.4	0.07	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-26-1995
Date of Analysis: 03-26-1996
Time of Analysis: 15:19:01

ANNEXE V

Fonctions de contact et de translation par module de la famille de turbines hydrauliques

03-25-1996
21:20:24

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : POMPE

	PAIRES			CONTACT
1	carter	-	roul1	1
2	carter	-	roul2	1
3	carter	-	O etanch	1
4	carter	-	b usure	1
5	carter	-	rond but	1
6	carter	-	palier but	0
7	carter	-	arbre	0
8	carter	-	helice	0
9	carter	-	s-couver	1
10	carter	-	bouchon	0
11	roul1	-	roul2	0
12	roul1	-	O etanch	0
13	roul1	-	b usure	0
14	roul1	-	rond but	0
15	roul1	-	palier but	0
16	roul1	-	arbre	1
17	roul1	-	helice	0
18	roul1	-	s-couver	0
19	roul1	-	bouchon	0
20	roul2	-	O etanch	0
21	roul2	-	b usure	0
22	roul2	-	rond but	0
23	roul2	-	palier but	0
24	roul2	-	arbre	1
25	roul2	-	helice	0
26	roul2	-	s-couver	0
27	roul2	-	bouchon	0
28	O etanch	-	b usure	0
29	O etanch	-	rond but	0
30	O etanch	-	palier but	0
31	O etanch	-	arbre	1
32	O etanch	-	helice	0
33	O etanch	-	s-couver	0
34	O etanch	-	bouchon	0

35	b usure	-	rond but	0
36	b usure	-	palier but	0
37	b usure	-	arbre	0
38	b usure	-	helice	1
39	b usure	-	s-couver	0
40	b usure	-	bouchon	0
41	rond but	-	palier but	1
42	rond but	-	arbre	1
43	rond but	-	helice	0
44	rond but	-	s-couver	0
45	rond but	-	bouchon	0
46	palier but	-	arbre	1
47	palier but	-	helice	0
48	palier but	-	s-couver	0
49	palier but	-	bouchon	0
50	arbre	-	helice	1
51	arbre	-	s-couver	0
52	arbre	-	bouchon	0
53	helice	-	s-couver	0
54	helice	-	bouchon	0
55	s-couver	-	bouchon	1
56	roul1	-	carter	1
57	roul2	-	carter	1
58	O etanch	-	carter	1
59	b usure	-	carter	1
60	rond but	-	carter	1
61	palier but	-	carter	0
62	arbre	-	carter	0
63	helice	-	carter	0
64	s-couver	-	carter	1
65	bouchon	-	carter	0
66	roul2	-	roul1	0
67	O etanch	-	roul1	0
68	b usure	-	roul1	0
69	rond but	-	roul1	0
70	palier but	-	roul1	0
71	arbre	-	roul1	1
72	helice	-	roul1	0
73	s-couver	-	roul1	0
74	bouchon	-	roul1	0
75	O etanch	-	roul2	0
76	b usure	-	roul2	0
77	rond but	-	roul2	0

78	palier but	-	roul2	0
79	arbre	-	roul2	1
80	helice	-	roul2	0
81	s-couver	-	roul2	0
82	bouchon	-	roul2	0
83	b usure	-	O etanch	0
84	rond but	-	O etanch	0
85	palier but	-	O etanch	0
86	arbre	-	O etanch	1
87	helice	-	O etanch	0
88	s-couver	-	O etanch	0
89	bouchon	-	O etanch	0
90	rond but	-	b usure	0
91	palier but	-	b usure	0
92	arbre	-	b usure	0
93	helice	-	b usure	1
94	s-couver	-	b usure	0
95	bouchon	-	b usure	0
96	palier but	-	rond but	1
97	arbre	-	rond but	1
98	helice	-	rond but	0
99	s-couver	-	rond but	0
100	bouchon	-	rond but	0
101	arbre	-	palier but	1
102	helice	-	palier but	0
103	s-couver	-	palier but	0
104	bouchon	-	palier but	0
105	helice	-	arbre	1
106	s-couver	-	arbre	0
107	bouchon	-	arbre	0
108	s-couver	-	helice	0
109	bouchon	-	helice	0
110	bouchon	-	s-couver	1

03-25-1996
21:20:26

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : POMPE

PAIRES	TRANSLATION
1 carter - roul1	0 1 0 0 0 0
2 carter - roul2	0 0 0 0 1 0
3 carter - O etanch	0 0 0 0 1 0
4 carter - b usure	0 0 0 0 1 0
5 carter - rond but	0 1 0 0 0 0
6 carter - palier but	0 1 0 0 0 0
7 carter - arbre	0 1 0 0 0 0
8 carter - helice	0 0 0 0 1 0
9 carter - s-couver	0 1 0 0 0 0
10 carter - bouchon	1 1 1 1 0 1
11 roul1 - roul2	1 0 1 1 1 1
12 roul1 - O etanch	1 0 1 1 1 1
13 roul1 - b usure	1 1 1 1 1 1
14 roul1 - rond but	1 1 1 1 0 1
15 roul1 - palier but	1 1 1 1 0 1
16 roul1 - arbre	0 1 0 0 0 0
17 roul1 - helice	1 0 1 1 1 1
18 roul1 - s-couver	1 1 1 1 0 1
19 roul1 - bouchon	1 1 1 1 1 1
20 roul2 - O etanch	1 0 1 1 1 1
21 roul2 - b usure	0 1 0 0 1 0
22 roul2 - rond but	1 1 1 1 0 1
23 roul2 - palier but	1 1 1 1 0 1
24 roul2 - arbre	0 1 0 0 0 0
25 roul2 - helice	1 0 1 1 1 1
26 roul2 - s-couver	1 1 1 1 0 1
27 roul2 - bouchon	1 1 1 1 1 1
28 O etanch - b usure	0 1 0 0 1 0
29 O etanch - rond but	1 1 1 1 0 1
30 O etanch - palier but	1 1 1 1 0 1
31 O etanch - arbre	0 1 0 0 0 0
32 O etanch - helice	0 0 0 0 1 0
33 O etanch - s-couver	1 1 1 1 0 1
34 O etanch - bouchon	1 1 1 1 1 1

35	b usure	-	rond but	1	1	1	1	1	1
36	b usure	-	palier but	1	1	1	1	1	1
37	b usure	-	arbre	0	1	0	0	1	0
38	b usure	-	helice	0	1	0	0	1	0
39	b usure	-	s-couver	1	1	1	1	1	1
40	b usure	-	bouchon	1	1	1	1	1	1
41	rond but	-	palier but	1	1	1	1	0	1
42	rond but	-	arbre	0	1	0	0	0	0
43	rond but	-	helice	1	0	1	1	1	1
44	rond but	-	s-couver	1	1	1	1	0	1
45	rond but	-	bouchon	1	1	1	1	0	1
46	palier but	-	arbre	0	1	0	0	0	0
47	palier but	-	helice	1	0	1	1	1	1
48	palier but	-	s-couver	1	1	1	1	0	1
49	palier but	-	bouchon	1	1	1	1	0	1
50	arbre	-	helice	0	0	0	0	1	0
51	arbre	-	s-couver	0	1	0	0	0	0
52	arbre	-	bouchon	1	1	1	1	0	1
53	helice	-	s-couver	1	1	1	1	0	1
54	helice	-	bouchon	1	1	1	1	0	1
55	s-couver	-	bouchon	0	0	0	1	0	0
56	roul1	-	carter	0	0	0	0	1	0
57	roul2	-	carter	0	1	0	0	0	0
58	O etanch	-	carter	0	1	0	0	0	0
59	b usure	-	carter	0	1	0	0	0	0
60	rond but	-	carter	0	0	0	0	1	0
61	palier but	-	carter	0	0	0	0	1	0
62	arbre	-	carter	0	0	0	0	1	0
63	helice	-	carter	0	1	0	0	0	0
64	s-couver	-	carter	0	0	0	0	1	0
65	bouchon	-	carter	1	0	1	1	1	1
66	roul2	-	roul1	1	1	1	1	0	1
67	O etanch	-	roul1	1	1	1	1	0	1
68	b usure	-	roul1	1	1	1	1	1	1
69	rond but	-	roul1	1	0	1	1	1	1
70	palier but	-	roul1	1	0	1	1	1	1
71	arbre	-	roul1	0	0	0	0	1	0
72	helice	-	roul1	1	1	1	1	0	1
73	s-couver	-	roul1	1	0	1	1	1	1
74	bouchon	-	roul1	1	1	1	1	1	1
75	O etanch	-	roul2	1	1	1	1	0	1
76	b usure	-	roul2	0	1	0	0	1	0
77	rond but	-	roul2	1	0	1	1	1	1

78	palier but - roul2	1	0	1	1	1	1
79	arbre - roul2	0	0	0	0	1	0
80	helice - roul2	1	1	1	1	0	1
81	s-couver - roul2	1	0	1	1	1	1
82	bouchon - roul2	1	1	1	1	1	1
83	b usure - O etanch	0	1	0	0	1	0
84	rond but - O etanch	1	0	1	1	1	1
85	palier but - O etanch	1	0	1	1	1	1
86	arbre - O etanch	0	0	0	0	1	0
87	helice - O etanch	0	1	0	0	0	0
88	s-couver - O etanch	1	0	1	1	1	1
89	bouchon - O etanch	1	1	1	1	1	1
90	rond but - b usure	1	1	1	1	1	1
91	palier but - b usure	1	1	1	1	1	1
92	arbre - b usure	0	1	0	0	1	0
93	helice - b usure	0	1	0	0	1	0
94	s-couver - b usure	1	1	1	1	1	1
95	bouchon - b usure	1	1	1	1	1	1
96	palier but - rond but	1	0	1	1	1	1
97	arbre - rond but	0	0	0	0	1	0
98	helice - rond but	1	1	1	1	0	1
99	s-couver - rond but	1	0	1	1	1	1
100	bouchon - rond but	1	0	1	1	1	1
101	arbre - palier but	0	0	0	0	1	0
102	helice - palier but	1	1	1	1	0	1
103	s-couver - palier but	1	0	1	1	1	1
104	bouchon - palier but	1	0	1	1	1	1
105	helice - arbre	0	1	0	0	0	0
106	s-couver - arbre	0	0	0	0	1	0
107	bouchon - arbre	1	0	1	1	1	1
108	s-couver - helice	1	0	1	1	1	1
109	bouchon - helice	1	0	1	1	1	1
110	bouchon - s-couver	1	0	0	0	0	0

03-25-1996
21:21:52

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : TURBINE

	PAIRES			CONTACT
1	pompe	-	venturi	1
2	pompe	-	Oring1	0
3	pompe	-	Oring2	0
4	pompe	-	log ecrou1	1
5	pompe	-	log ecrou2	1
6	pompe	-	log ecrou3	1
7	pompe	-	log ecrou4	1
8	pompe	-	sortie d'eau	1
9	venturi	-	Oring1	1
10	venturi	-	Oring2	1
11	venturi	-	log ecrou1	0
12	venturi	-	log ecrou2	0
13	venturi	-	log ecrou3	0
14	venturi	-	log ecrou4	0
15	venturi	-	sortie d'eau	1
16	Oring1	-	Oring2	0
17	Oring1	-	log ecrou1	0
18	Oring1	-	log ecrou2	0
19	Oring1	-	log ecrou3	0
20	Oring1	-	log ecrou4	0
21	Oring1	-	sortie d'eau	1
22	Oring2	-	log ecrou1	0
23	Oring2	-	log ecrou2	0
24	Oring2	-	log ecrou3	0
25	Oring2	-	log ecrou4	0
26	Oring2	-	sortie d'eau	1
27	log ecrou1	-	log ecrou2	0
28	log ecrou1	-	log ecrou3	0
29	log ecrou1	-	log ecrou4	0
30	log ecrou1	-	sortie d'eau	0
31	log ecrou2	-	log ecrou3	0
32	log ecrou2	-	log ecrou4	0
33	log ecrou2	-	sortie d'eau	0
34	log ecrou3	-	log ecrou4	0

35	log ecrou3	-	sortie d'eau	0
36	log ecrou4	-	sortie d'eau	0
37	venturi	-	pompe	1
38	Oring1	-	pompe	0
39	Oring2	-	pompe	0
40	log ecrou1	-	pompe	1
41	log ecrou2	-	pompe	1
42	log ecrou3	-	pompe	1
43	log ecrou4	-	pompe	1
44	sortie d'ea	-	pompe	1
45	Oring1	-	venturi	1
46	Oring2	-	venturi	1
47	log ecrou1	-	venturi	0
48	log ecrou2	-	venturi	0
49	log ecrou3	-	venturi	0
50	log ecrou4	-	venturi	0
51	sortie d'ea	-	venturi	1
52	Oring2	-	Oring1	0
53	log ecrou1	-	Oring1	0
54	log ecrou2	-	Oring1	0
55	log ecrou3	-	Oring1	0
56	log ecrou4	-	Oring1	0
57	sortie d'ea	-	Oring1	1
58	log ecrou1	-	Oring2	0
59	log ecrou2	-	Oring2	0
60	log ecrou3	-	Oring2	0
61	log ecrou4	-	Oring2	0
62	sortie d'ea	-	Oring2	1
63	log ecrou2	-	log ecrou1	0
64	log ecrou3	-	log ecrou1	0
65	log ecrou4	-	log ecrou1	0
66	sortie d'ea	-	log ecrou1	0
67	log ecrou3	-	log ecrou2	0
68	log ecrou4	-	log ecrou2	0
69	sortie d'ea	-	log ecrou2	0
70	log ecrou4	-	log ecrou3	0
71	sortie d'ea	-	log ecrou3	0
72	sortie d'ea	-	log ecrou4	0

03-25-1996
21:21:53

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Dept.de Génie Industriel

MODULE : TURBINE

PAIRES	TRANSLATION
1 pompe - venturi	0 1 0 0 0 0
2 pompe - Oring1	0 1 0 0 0 0
3 pompe - Oring2	0 1 0 0 0 0
4 pompe - log écrou1	1 0 0 0 0 0
5 pompe - log écrou2	0 0 1 0 0 0
6 pompe - log écrou3	0 0 0 1 0 0
7 pompe - log écrou4	0 0 0 0 0 1
8 pompe - sortie d'eau	0 1 0 0 0 0
9 venturi - Oring1	1 0 1 1 1 1
10 venturi - Oring2	1 0 1 1 1 1
11 venturi - log écrou1	1 0 1 1 1 1
12 venturi - log écrou2	1 0 1 1 1 1
13 venturi - log écrou3	1 0 1 1 1 1
14 venturi - log écrou4	1 0 1 1 1 1
15 venturi - sortie d'eau	1 0 1 1 1 1
16 Oring1 - Oring2	0 1 1 1 1 1
17 Oring1 - log écrou1	1 1 1 1 1 1
18 Oring1 - log écrou2	1 1 1 1 1 1
19 Oring1 - log écrou3	1 1 1 1 1 1
20 Oring1 - log écrou4	1 1 1 1 1 1
21 Oring1 - sortie d'eau	1 0 1 1 1 1
22 Oring2 - log écrou1	1 1 1 1 1 1
23 Oring2 - log écrou2	1 1 1 1 1 1
24 Oring2 - log écrou3	1 1 1 1 1 1
25 Oring2 - log écrou4	1 1 1 1 1 1
26 Oring2 - sortie d'eau	0 1 1 1 1 1
29 log écrou1 - log écrou4	1 1 1 1 1 1
30 log écrou1 - sortie d'eau	1 1 1 1 1 1
31 log écrou2 - log écrou3	1 1 1 1 1 1
32 log écrou2 - log écrou4	1 1 0 1 1 1
33 log écrou2 - sortie d'eau	1 1 1 1 1 1
34 log écrou3 - log écrou4	1 1 1 1 1 1
35 log écrou3 - sortie d'eau	1 1 1 1 1 1
36 log écrou4 - sortie d'eau	1 1 1 1 1 1

37	venturi - pompe	0	0	0	0	1	0
38	Oring1 - pompe	0	0	0	0	1	0
39	Oring2 - pompe	0	0	0	0	1	0
40	log écrou1 - pompe	0	0	0	1	0	0
41	log écrou2 - pompe	0	0	0	0	0	1
42	log écrou3 - pompe	1	0	0	0	0	0
43	log écrou4 - pompe	0	0	1	0	0	0
44	sortie d'eau - pompe	0	0	0	0	1	0
45	Oring1 - venturi	1	1	1	1	0	1
46	Oring2 - venturi	1	1	1	1	0	1
47	log écrou1 - venturi	1	1	1	1	0	1
48	log écrou2 - venturi	1	1	1	1	0	1
49	log écrou3 - venturi	1	1	1	1	0	1
50	log écrou4 - venturi	1	1	1	1	0	1
51	sortie d'eau - venturi	1	1	1	1	0	1
52	Oring2 - Oring1	1	1	1	0	1	1
53	log écrou1 - Oring1	1	1	1	1	1	1
54	log écrou2 - Oring1	1	1	1	1	1	1
55	log écrou3 - Oring1	1	1	1	1	1	1
56	log écrou4 - Oring1	1	1	1	1	1	1
57	sortie d'eau - Oring1	1	1	1	1	0	1
58	log écrou1 - Oring2	1	1	1	1	1	1
59	log écrou2 - Oring2	1	1	1	1	1	1
60	log écrou3 - Oring2	1	1	1	1	1	1
61	log écrou4 - Oring2	1	1	1	1	1	1
62	sortie d'eau - Oring2	1	1	1	1	0	1
63	log écrou2 - log écrou1	1	1	1	1	1	1
64	log écrou3 - log écrou1	1	1	1	0	1	1
65	log écrou4 - log écrou1	1	1	1	1	1	1
66	sortie d'eau - log écrou1	1	1	1	1	1	1
67	log écrou3 - log écrou2	1	1	1	1	1	1
68	log écrou4 - log écrou2	1	1	1	1	1	0
69	sortie d'eau - log écrou2	1	1	1	1	1	1
70	log écrou4 - log écrou3	1	1	1	1	1	1
71	sortie d'eau - log écrou3	1	1	1	1	1	1
72	sortie d'eau - log écrou4	1	1	1	1	1	1

ANNEXE VI

Évaluation quantitative par module de la turbine hydraulique

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE1 FILENAME - POMPE1.500

Total Assembly Time	207	Description	No. of Items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	182							
preparer l arbre		pour le degraissage	1	-	11.8	0.10	0.00	0.0
sortir l arbre		de degraisseur	1	-	0.8	0.01	0.00	0.0
appret sur arbre		sur les filets	1	-	1.9	0.02	0.00	0.0
changer panier carte		(et deballer carter)	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
nettoyer carter		air comprime	1	-	0.8	0.01	0.00	0.0
verif. entrees carte		outil special	1	-	2.9	0.02	0.00	0.0
trans. carter		panier a presse 1	1	-	3.6	0.03	0.00	0.0
coller etiquette		d identification	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
carter		add	1	1	1.8	0.02	0.00	0.0
roulement 1		add	1	1	2.4	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	2.4	0.02	0.00	0.0
tourner carter			1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
fixer carter press2		roul 2	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
roulement 2		add	1	1	3.2	0.03	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	4.2	0.04	0.00	0.0
controle diametres		des roul. presses	1	-	8.5	0.07	0.00	0.0
loctite dans carter		518 pour disp. etan	1	-	4.4	0.04	0.00	0.0
fixer carter press3		disp. etancheite	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
disp. etancheite		add	1	1	2.3	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	2.6	0.02	0.00	0.0
huile vegetal		pour bague d usure	1	-	2.2	0.02	0.00	0.0
fixer carter press4		bague d usure	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:10:49

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE1 FILENAME - POMPE1.MOD

1st Level Subs / 2nd Level Subs / 3rd Level Subs		Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
deballer b. d usure			1	-	1.4	0.01	0.00	0.0
bague d usure		add	1	1	2.9	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	2.8	0.02	0.00	0.0
tourner carter			1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
trans. station helic			1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
deballer helice			1	-	3.8	0.03	0.00	0.0
appret sur helice			1	-	1.5	0.01	0.00	0.0
loctite sur helice		271 sur filets	1	-	6.6	0.06	0.00	0.0
fixer helice a fixtu			1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
helice		add	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
fixer pompe		fixture pneumatique	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
ronc. butee		add	1	1	2.1	0.02	0.00	0.0
palier butee		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
arbre		add & screw fastes	1	1	6.0	0.05	0.00	0.0
couple sur arbre		torquimetre	1	-	4.4	0.04	0.00	0.0
rempliage huile		dans le carter	1	-	8.8	0.07	0.00	0.0
trans zone preuve		etancheite	1	-	2.4	0.02	0.00	0.0
loctite trous carter		2 trous.pour couverc	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
SS-COUVERCLE	13	add	1	-	5.4	0.05	-	-
couvercle		place in fixture	1	1	2.7	0.02	0.00	0.0
Oring 140		add & snap fit	1	0	2.7	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:10:49

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE1 FILENAME - POMPE1.MOD

1st Level Subs	2nd Level Subs	3rd Level Subs	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
loctite sur couverc.			518 autour	1	-	7.8	0.07	0.00	0.0
$BOULONS	11		add & screw fasten	3	-	7.3	0.06	-	-
boules			saisir et orienter	3	3	5.7	0.05	0.00	0.0
Plain washer			add	3	0	5.7	0.05	0.00	0.0
preuve d etancheite			poser et retirer pon	1	-	8.9	0.07	0.00	0.0
fixer poupe fixt ver				1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
finir remplir huile			par couvercle	1	-	7.6	0.06	0.00	0.0
teflon sur bouchon			sur filets	1	-	6.1	0.05	0.00	0.0
bouchon			add & screw fasten	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
poinconnage			sur poupe	1	-	5.7	0.05	0.00	0.0
enlever poupe f. ver			y compris transport	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
placer poupe sur tab			fin module poupe	1	-	1.5	0.01	0.00	0.0

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE2 FILENAME - POMPE2.800

Total Assembly Time	207	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Time for Main Assembly	182							
preparer l arbre		pour le degraissage	1	-	11.8	0.10	0.00	0.0
sortir l arbre		de degraisseur	1	-	0.8	0.01	0.00	0.0
appret sur arbre		sur les filets	1	-	1.9	0.02	0.00	0.0
changer panier carte		(et deballer carter)	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
nettoyer carter		air comprime	1	-	0.8	0.01	0.00	0.0
verif. entrees carte		outil special	1	-	2.9	0.02	0.00	0.0
trans. carter		panier a presse 1	1	-	3.6	0.03	0.00	0.0
coller etiquette		d identification	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
carter		add	1	1	1.8	0.02	0.00	0.0
roulement 1		add	1	1	2.4	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	2.4	0.02	0.00	0.0
tourner carter			1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
fixer carter press2		roul 2	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
roulement 2		add	1	1	3.2	0.03	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	4.2	0.04	0.00	0.0
controle diametres		des roul. presses	1	-	8.5	0.07	0.00	0.0
huile vegetal		pour bague d usure	1	-	2.2	0.02	0.00	0.0
fixer carter press4		bague d usure	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
deballer b. d usure			1	-	1.4	0.01	0.00	0.0
bague d usure		add	1	1	2.9	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	2.8	0.02	0.00	0.0
loctite dans carter		SIB pour disp. etan	1	-	4.4	0.04	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:14:58

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE2 FILENAME - POMPE2.BOO

1st Level Subs / 2nd Level Subs / 3rd Level Subs		Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
fixer carter press3		disp. etancheite	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
disp. etancheite		add	1	1	2.3	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	2.6	0.02	0.00	0.0
tourner carter			1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
trans. station helic			1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
deballer helice			1	-	3.8	0.03	0.00	0.0
appret sur helice			1	-	1.5	0.01	0.00	0.0
loctite sur helice		271 sur filets	1	-	6.6	0.06	0.00	0.0
fixer helice a fixtu			1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
helice		add	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
fixer poupe		fixture pneumatique	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
rond. butee		add	1	1	2.1	0.02	0.00	0.0
palier butee		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
arbre		add & screw fasten	1	1	6.0	0.05	0.00	0.0
couple sur arbre		torquimetre	1	-	4.4	0.04	0.00	0.0
resplisage huile		dans le carter	1	-	8.8	0.07	0.00	0.0
trans zone preuve		etancheite	1	-	2.4	0.02	0.00	0.0
loctite trous carter		2 trous.pour couverc	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
$S-COUVERCLE	13	add	1	-	5.4	0.05	-	-
couvercle		place in fixture	1	1	2.7	0.02	0.00	0.0
Oring 140		add & snap fit	1	0	2.7	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:14:58

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE2 FILENAME - POMPE2.MOD

1st Level Subs / 2nd Level Subs / 3rd Level Subs		Description	No. of items	Mfgs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
loctite sur couverc.		SIB autour	1	-	7.8	0.07	0.00	0.0
$BOULONS	11	add & screw fasten	3	-	7.3	0.06	-	-
boulon		saisir et orienter	3	3	5.7	0.05	0.00	0.0
Plain washer		add	3	0	5.7	0.05	0.00	0.0
preuve d etancheite		poser et retirer pos	1	-	8.9	0.07	0.00	0.0
fixer pompe fixt ver			1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
finir remplir huile		par couvercle	1	-	7.6	0.06	0.00	0.0
teflon sur bouchon		sur filets	1	-	6.1	0.05	0.00	0.0
bouchon		add & screw fasten	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
poinconnage		sur pompe	1	-	5.7	0.05	0.00	0.0
enlever pompe f. ver		y compris transport	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
placer pompe sur tab		fin module pompe	1	-	1.5	0.01	0.00	0.0

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE3 FILENAME - POMPE3.MOD

Total Assembly Time	207	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
Time for Main Assembly	182							
preparer l arbre		pour le degraissage	1	-	11.8	0.10	0.00	0.0
sortir l arbre		de degraisseur	1	-	0.8	0.01	0.00	0.0
appret sur arbre		sur les filets	1	-	1.9	0.02	0.00	0.0
changer panier carte		(et deballer carter)	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
nettoyer carter		air comprime	1	-	0.8	0.01	0.00	0.0
verif. entrees carte		outil special	1	-	2.9	0.02	0.00	0.0
trans. carter		panier a presse 1	1	-	3.6	0.03	0.00	0.0
coller etiquette		d identification	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
carter		add	1	1	1.8	0.02	0.00	0.0
roulement 1		add	1	1	2.4	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	2.4	0.02	0.00	0.0
tourner carter			1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
huile vegetal		pour bague d usure	1	-	2.2	0.02	0.00	0.0
fixer carter press4		bague d usure	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
deballer b. d usure			1	-	1.4	0.01	0.00	0.0
bague d usure		add	1	1	2.9	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	2.8	0.02	0.00	0.0
fixer carter press2		roul 2	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
roulement 2		add	1	1	3.2	0.03	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	4.2	0.04	0.00	0.0
controle diametres		des roul. presses	1	-	8.5	0.07	0.00	0.0
loctite dans carter		518 pour disp. etan	1	-	4.4	0.04	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-06-1995
Time of Analysis: 12:17:53

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMP13 FILENAME - POMP13.BOO

1st Level Subs / 2nd Level Subs / 3rd Level Subs		Description	No. of Items	Tigs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
fixer carter press3		disp. etancheite	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
disp. etancheite		add	1	1	2.3	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	2.6	0.02	0.00	0.0
tourner carter			1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
trans. station helic			1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
deballer helice			1	-	3.8	0.03	0.00	0.0
appret sur helice			1	-	1.5	0.01	0.00	0.0
loctite sur helice		271 sur filetz	1	-	6.6	0.06	0.00	0.0
fixer helice a firtu			1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
helice		add	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
fixer pompe		fixture pneumatique	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
rond. butee		add	1	1	2.1	0.02	0.00	0.0
palier butee		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
arbre		add & screw fasten	1	1	6.0	0.05	0.00	0.0
couple sur arbre		torquimetre	1	-	4.4	0.04	0.00	0.0
remplisage huile		dans le carter	1	-	8.8	0.07	0.00	0.0
trans zone preuve		etancheite	1	-	2.4	0.02	0.00	0.0
loctite trous carter		2 trous.pour couverc	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
SS-COUVERCLE	13	add	1	-	5.4	0.05	-	-
couvercle		place in fixture	1	1	2.7	0.02	0.00	0.0
Oring 140		add & snap fit	1	0	2.7	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:17:53

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE3 FILENAME - POMPE3.800

1st Level Subs	2nd Level Subs	3rd Level Subs	Description	No. of items	Tigs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
loctite sur couverc.			518 autour	1	-	7.8	0.07	0.00	0.0
$BOULONS	11		add & screw fasten	3	-	7.3	0.06	-	-
	boulon		saisir et orienter	3	3	5.7	0.05	0.00	0.0
	Plain washer		add	3	0	5.7	0.05	0.00	0.0
preuve d etancheite			poser et retirer po:	1	-	8.9	0.07	0.00	0.0
fixer pompe fixt ver				1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
finir remplir huile			par couvercle	1	-	7.6	0.06	0.00	0.0
teflon sur bouchon			sur filets	1	-	6.1	0.05	0.00	0.0
bouchon			add & screw fasten	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
poinconnage			sur pompe	1	-	5.7	0.05	0.00	0.0
enlever pompe f. ver			y compris transport	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
placer pompe sur tab			fin module pompe	1	-	1.5	0.01	0.00	0.0

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE4 FILENAME - POMPE4.MOD

Total Assembly Time 211 / Time for Main Assembly 186	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
preparer 1 arbre	pour le degraissage	1	-	11.8	0.10	0.00	0.0
sortir 1 arbre	de degraisseur	1	-	0.8	0.01	0.00	0.0
appret sur arbre	sur les filets	1	-	1.9	0.02	0.00	0.0
changer panier carte	(et deballer carter)	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
nettoyer carter	air comprime	1	-	0.8	0.01	0.00	0.0
verif. entrees carte	outil special	1	-	2.9	0.02	0.00	0.0
trans. carter	panier a presse 2	1	-	3.6	0.03	0.00	0.0
coller etiquette	d identification	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
tourner carter		1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
carter	add	1	1	1.8	0.02	0.00	0.0
roulement 2	add	1	1	3.2	0.03	0.00	0.0
press or inter. fit	standard operation	1	-	4.2	0.04	0.00	0.0
tourner carter		1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
fixer carter press1	roul 1	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
roulement 1	add	1	1	2.4	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit	standard operation	1	-	2.4	0.02	0.00	0.0
controle diametres	des roul. presses	1	-	8.5	0.07	0.00	0.0
tourner carter		1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
loctite dans carter	518 pour disp. etan	1	-	4.4	0.04	0.00	0.0
fixer carter press3	disp. etancheite	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
disp. etancheite	add	1	1	2.3	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit	standard operation	1	-	2.6	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-23-1995
Date of Analysis: 01-04-1995
Time of Analysis: 12:20:56

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE4 FILENAME - POMPE4.BOO

1st Level Subs / 2nd Level Subs / 3rd Level Subs		Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
huile vegetal		pour bague d usure	1	-	2.2	0.02	0.00	0.0
fixer carter pressé		bague d usure	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
deballer b. d usure			1	-	1.4	0.01	0.00	0.0
bague d usure		add	1	1	2.9	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	2.8	0.02	0.00	0.0
tourner carter			1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
trans. station helic			1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
deballer helice			1	-	3.8	0.03	0.00	0.0
appret sur helice			1	-	1.5	0.01	0.00	0.0
loctite sur helice		271 sur filets	1	-	6.6	0.06	0.00	0.0
fixer helice a fixtu			1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
helice		add	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
fixer pompe		fixture pneumatique	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
rond. butee		add	1	1	2.1	0.02	0.00	0.0
palier butee		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
arbre		add 4 screw fastes	1	1	6.0	0.05	0.00	0.0
couple sur arbre		torquimetre	1	-	4.4	0.04	0.00	0.0
remplisage huile		dans le carter	1	-	8.8	0.07	0.00	0.0
trans zone preuve		etancheite	1	-	2.4	0.02	0.00	0.0
loctite trous carter		2 trous.pour couverc	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
SS-COUVERCLE	13	add	1	-	5.4	0.05	-	-
couvercle		place in fixture	1	1	2.7	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:20:56

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE4 FILENAME - POMPE4.BOG

1st Level Subs	2nd Level Subs	3rd Level Subs	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost: $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $$
	Oring 140		add à snap fit	1	0	2.7	0.02	0.00	0.0
	loctite sur couverc.		518 autour	1	-	7.8	0.07	0.00	0.0
$BOULONS		11	add à screw fasten	3	-	7.3	0.06	-	-
	boulon		saisir et orienter	3	3	5.7	0.05	0.00	0.0
	Plain washer		add	3	0	5.7	0.05	0.00	0.0
preuve d etancheite			poser et retirer pon	1	-	8.9	0.07	0.00	0.0
fixer pompe fixt ver				1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
finir remplir huile			par couvercle	1	-	7.6	0.06	0.00	0.0
teflon sur bouchon			sur filets	1	-	6.1	0.05	0.00	0.0
bouchon			add à screw fasten	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
poinconnage			sur pompe	1	-	5.7	0.05	0.00	0.0
enlever pompe f. ver			y compris transport	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
placer pompe sur tab			fin module pompe	1	-	1.5	0.01	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:20:56

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE5 FILENAME - POMPE5.MOD

Total Assembly Time	211
Time for Main Assembly	186

	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
preparer l arbre	pour le degraissage	1	-	11.8	0.10	0.00	0.0
sortir l arbre	de degraisseur	1	-	0.8	0.01	0.00	0.0
appret sur arbre	sur les filets	1	-	1.9	0.02	0.00	0.0
changer panier carte	(et deballer carter)	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
nettoyer carter	air comprime	1	-	0.8	0.01	0.00	0.0
verif. entrees carte	outil special	1	-	2.9	0.02	0.00	0.0
trans. carter	panier a presse 2	1	-	3.6	0.03	0.00	0.0
coller etiquette	d identification	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
tourner carter		1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
carter	add	1	1	1.8	0.02	0.00	0.0
roulement 2	add	1	1	3.2	0.03	0.00	0.0
press or inter. fit	standard operation	1	-	4.2	0.04	0.00	0.0
tourner carter		1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
fixer carter presal	roul 1	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
roulement 1	add	1	1	2.4	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit	standard operation	1	-	2.4	0.02	0.00	0.0
controle diametres	des roul. presses	1	-	8.5	0.07	0.00	0.0
tourner carter		1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
huile vegetal	pour bague d usure	1	-	2.2	0.02	0.00	0.0
fixer carter presal	bague d usure	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
deballer b. d usure		1	-	1.4	0.01	0.00	0.0
bague d usure	add	1	1	2.9	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:25:45

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE5 FILENAME - POMPE5.MOC

1st Level Subs / 2nd Level Subs / 3rd Level Subs	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
press or inter. fit	standard operation	1	-	2.8	0.02	0.00	0.0
loctite dans carter	518 pour disp. etan	1	-	4.4	0.04	0.00	0.0
fixer carter press3	disp. etancheite	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
disp. etancheite	add	1	1	2.3	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit	standard operation	1	-	2.6	0.02	0.00	0.0
tourner carter		1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
trans. station helic		1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
deballer helice		1	-	3.8	0.03	0.00	0.0
appret sur helice		1	-	1.5	0.01	0.00	0.0
loctite sur helice	271 sur filets	1	-	6.6	0.06	0.00	0.0
fixer helice a firtu		1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
helice	add	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
fixer pompe	fixture pneumatique	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
rond. butee	add	1	1	2.1	0.02	0.00	0.0
palier butee	add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
arbre	add & screw faster	1	1	6.0	0.05	0.00	0.0
couple sur arbre	torquimetre	1	-	4.4	0.04	0.00	0.0
remplisage huile	dans le carter	1	-	8.8	0.07	0.00	0.0
trans zone preuve	etancheite	1	-	2.4	0.02	0.00	0.0
loctite trous carter	2 trous.pour couvert	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
SS-COUVERCLE 13	add	1	-	5.4	0.05	-	-
couvercle	place in fixture	1	1	2.7	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:25:45

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY RANK - POMPES FILENAME - POMPES.BOO

1st Level Subs / 2nd Level Subs / 3rd Level Subs	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
Oring 140	add & snap fit	1	0	2.7	0.02	0.00	0.0
loctite sur couverc.	51B autom	1	-	7.8	0.07	0.00	0.0
$BOULONS 11	add & screw fasten	3	-	7.3	0.06	-	-
boulon	saisir et orienter	3	3	5.7	0.05	0.00	0.0
Plain washer	add	3	0	5.7	0.05	0.00	0.0
preuve d etancheite	poser et retirer pos	1	-	8.9	0.07	0.00	0.0
fixer pompe firt ver		1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
finir remplir huile	par couvercle	1	-	7.6	0.06	0.00	0.0
teflon sur bouchon	sur filets	1	-	6.1	0.05	0.00	0.0
bouchon	add & screw fasten	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
poinconnage	sur pompe	1	-	5.7	0.05	0.00	0.0
enlever pompe f. ver	y compris transport	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
placer pompe sur tab	fin module pompe	1	-	1.5	0.01	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:25:45

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE6 FILENAME - POMPE6.BOO

Total Assembly Time 211 / Time for Main Assembly 186	Description	No. of Items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
preparer l arbre	pour le degraissage	1	-	11.8	0.10	0.00	0.0
sortir l arbre	de degraisseur	1	-	0.8	0.01	0.00	0.0
appret sur arbre	sur les filets	1	-	1.9	0.02	0.00	0.0
changer panier carte	(et deballer carter)	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
nettoyer carter	air comprime	1	-	0.8	0.01	0.00	0.0
verif. entrees carte	outil special	1	-	2.9	0.02	0.00	0.0
trans. carter	panier a presse 2	1	-	3.6	0.03	0.00	0.0
coller etiquette	d identification	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
tourner carter		1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
carter	add	1	1	1.8	0.02	0.00	0.0
roulement 2	add	1	1	3.2	0.03	0.00	0.0
press or inter. fit	standard operation	1	-	4.2	0.04	0.00	0.0
loctite dans carter	518 pour disp. etan	1	-	4.4	0.04	0.00	0.0
fixer carter pressl	disp. etancheite	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
disp. etancheite	add	1	1	2.3	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit	standard operation	1	-	2.6	0.02	0.00	0.0
tourner carter		1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
fixer carter pressl	roul 1	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
roulement 1	add	1	1	2.4	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit	standard operation	1	-	2.4	0.02	0.00	0.0
controle diametres	des roul. presses	1	-	8.5	0.07	0.00	0.0
tourner carter		1	-	2.0	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:28:55

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE6 FILENAME - POMPE6.MOD

1st Level Subs / 2nd Level Subs / 3rd Level Subs		Description	No. of items	Figs. sim. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost $
huile vegetal		pour bague d usure	1	-	2.2	0.02	0.00	0.0
fixer carter pressé		bague d usure	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
deballer b. d usure			1	-	1.4	0.01	0.00	0.0
bague d usure		add	1	1	2.9	0.02	0.00	0.0
press or inter. fit		standard operation	1	-	2.8	0.02	0.00	0.0
tourner carter			1	-	2.0	0.02	0.00	0.0
trans. station helic			1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
deballer helice			1	-	3.8	0.03	0.00	0.0
apprêt sur helice			1	-	1.5	0.01	0.00	0.0
loctite sur helice		271 sur filets	1	-	6.6	0.06	0.00	0.0
fixer helice a firtu			1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
helice		add	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
fixer pompe		firture pneumatique	1	-	1.8	0.02	0.00	0.0
rond. butee		add	1	1	2.1	0.02	0.00	0.0
palier butee		add	1	1	2.6	0.02	0.00	0.0
arbre		add à screw fasten	1	1	6.0	0.05	0.00	0.0
couple sur arbre		torquimetre	1	-	4.4	0.04	0.00	0.0
remplisage huile		dans le carter	1	-	8.8	0.07	0.00	0.0
trans zone preuve		etancheite	1	-	2.4	0.02	0.00	0.0
loctite trous carter		2 trous.pour couvert	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
SS-COUVERCLE	13	add	1	-	5.4	0.05	-	-
	couvercle	place in firture	1	1	2.7	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:28:55

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - POMPE6 FILENAME - POMPE6.MOD

1st Level Subs / 2nd Level Subs / 3rd Level Subs	Description	No. of items	Fign. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
Oring 140	add à snap fit	1	0	2.7	0.02	0.00	0.0
loctite sur couverc.	518 autour	1	-	7.8	0.07	0.00	0.0
$BOULONS 11	add à screw fasten	3	-	7.3	0.06	-	-
boulon	saisir et orienter	3	3	5.7	0.05	0.00	0.0
Plain washer	add	3	0	5.7	0.05	0.00	0.0
preuve d etancheite	poser et retirer pon	1	-	8.9	0.07	0.00	0.0
fixer poupe fixt ver		1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
finir remplir huile	par couvercle	1	-	7.6	0.06	0.00	0.0
teflon sur bouchon	sur filets	1	-	6.1	0.05	0.00	0.0
bouchon	add à screw fasten	1	1	3.9	0.03	0.00	0.0
poinconnage	sur poupe	1	-	5.7	0.05	0.00	0.0
enlever poupe f. ver	y compris transport	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0
placer poupe sur tab	fin module poupe	1	-	1.5	0.01	0.00	0.0

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - TURBO1 FILENAME - TURBO1.BOO

Total Assembly Time	110	Description	No. of items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost K$
Time for Main Assembly	91							
log. ecrou		add	4	1	7.9	0.07	0.00	0.0
introduir log. ecrou		avec marteau	4	-	7.9	0.07	0.00	0.0
fixer sortie d eau		marteau	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
Oring		add	2	2	5.0	0.04	0.00	0.0
loctite autour carte		518 pour venturi	1	-	13.0	0.11	0.00	0.0
venturi		add	1	1	3.7	0.03	0.00	0.0
BOULONS	19	add & screw fasten	4	-	33.6	0.28	-	-
boulon		saisir et orienter	4	4	6.5	0.05	0.00	0.0
Plain washer		add à hold down	4	0	6.4	0.05	0.00	0.0
Lock washer		add à hold down	4	0	6.2	0.05	0.00	0.0
transport à Rovobic		de la turbine	1	-	2.1	0.02	0.00	0.0
operat. Robovic		temps d operateur	1	-	9.1	0.08	0.00	0.0
transport stockage		de la turbine	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 12:50:12

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

ASSEMBLY NAME - TURBO2 FILENAME - TURBO2.MOD

Total Assembly Time	96	Description	No. of Items	Figs. min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost k$
Time for Main Assembly	114							
fixer sortie d eau		marteau	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
log. ecrou		add	4	0	7.9	0.07	0.00	0.0
introduir log. ecrou		avec marteau	4	-	31.6	0.26	0.00	0.0
Oring		add	2	2	5.0	0.04	0.00	0.0
loctite autour carte		518 pour venturi	1	-	13.0	0.11	0.00	0.0
venturi		add	1	1	3.7	0.03	0.00	0.0
BOULONS	19	add & screw fasten	4	-	33.6	0.28	-	-
boulon		place in fixture	4	4	6.4	0.05	0.00	0.0
Plain washer		add & hold down	4	0	6.4	0.05	0.00	0.0
Lock washer		add & hold down	4	0	6.2	0.05	0.00	0.0
transport a Rovobic		de la turbine	1	-	2.1	0.02	0.00	0.0
operat. Robovic		temps d operateur	1	-	9.1	0.08	0.00	0.0
transport stockage		de la turbine	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0

Ecole Polytechnique
Montreal, Quebec, Canada

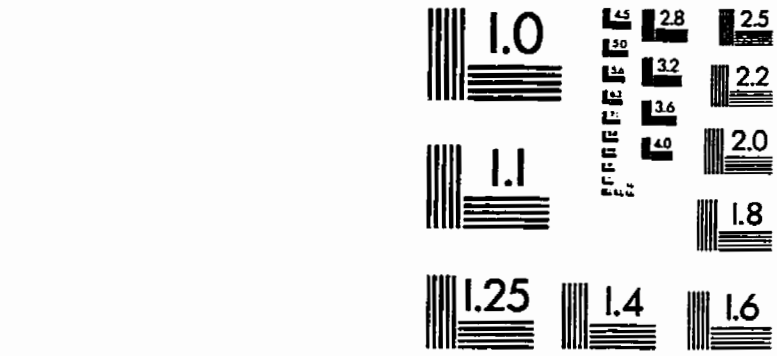
ASSEMBLY NAME - TURBO3 FILENAME - TURBO3.MOD

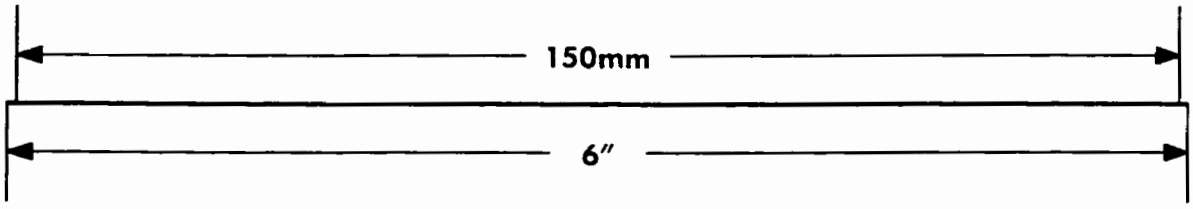
Total Assembly Time 110 / Time for Main Assembly 91		Description	No. of items	Min. parts	Assembly Time, sec.	Assembly cost $	Part(s) Cost $	Tooling Cost K$
fixer sortie d eau		marteau	1	-	6.0	0.05	0.00	0.0
log. ecrou		add	4	1	7.9	0.07	0.00	0.0
introduir log. ecrou		avec marteau	4	-	7.9	0.07	0.00	0.0
Oring		add	2	2	5.0	0.04	0.00	0.0
loctite autour carte		518 pour venturi	1	-	13.0	0.11	0.00	0.0
venturi		add	1	1	3.7	0.03	0.00	0.0
$BOULONS	19	add à screw fasten	4	-	33.6	0.28	-	-
boulon		saisir et orienter	4	4	6.5	0.05	0.00	0.0
Plain washer		add à hold down	4	0	6.4	0.05	0.00	0.0
Lock washer		add à hold down	4	0	6.2	0.05	0.00	0.0
transport a Rovobic		de la turbine	1	-	2.1	0.02	0.00	0.0
operat. Robovic		temps d operateur	1	-	9.1	0.08	0.00	0.0
transport stockage		de la turbine	1	-	2.5	0.02	0.00	0.0

Boothroyd Dewhurst, Inc.

Current Date: 01-29-1995
Date of Analysis: 01-08-1995
Time of Analysis: 16:09:53

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)





APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved