UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

INTÉGRATION DE MODÈLES DE CARACTÉRISTIQUES À UNE MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE POUR SUPPORTER L'ASSEMBLAGE

TONI JABBOUR
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE MÉCANIQUE)
OCTOBRE 1997

© Toni Jabbour, 1997.

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.

0-612-33006-0

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

INTÉGRATION DE MODÈLES DE CARACTÉRISTIQUES À UNE MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE POUR SUPPORTER L'ASSEMBLAGE

présentée par : TONI JABBOUR

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

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

M. FORTIN Clément, Ph.D., président

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

M. MARANZANA Roland, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. BARON Luc, Ph.D., membre

M. DESROCHERS Alain, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

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

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mes directeurs de recherche, Messieurs Christian MASCLE et Roland MARANZANA, pour leur disponibilité tout au long de la réalisation de la thèse, leurs directives, leurs conseils et leur support financier.

Je tiens à exprimer mon immense gratitude à mes parents qui m'ont toujours soutenu dans mon désir d'étudier.

Je me permets aussi de remercier les membres du jury, Messieurs Clément FORTIN, Luc BARON et Alain DESROCHERS, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail en détail et d'en être les rapporteurs.

Je désire finalement exprimer toute ma reconnaissance à mes collègues de l'équipe de développement du projet LOGAM, pour leur soutien, leur esprit d'équipe et leur inconditionnelle bonne humeur.

RÉSUMÉ

Dans le but d'accroître leur productivité, de nombreuses entreprises se tournent à l'heure actuelle vers les technologies informatiques et vers l'automatisation de l'assemblage de leurs produits. Ce travail de thèse touche au domaine de la modélisation des assemblages. Cette modélisation permet de définir les caractéristiques d'entrées à un système de préparation à l'assemblage. Ce dernier, par application de règles non universelles et souvent empiriques, effectue une analyse déterministe de ces caractéristiques afin de déterminer ses sorties sous la forme d'une structure de gamme faisant apparaître la séquence des opérations et le choix des ressources d'assemblage.

Cependant le changement continu d'état (ou de configuration) du produit, à la suite de chaque opération d'assemblage appliquée, implique le changement de plusieurs paramètres définis sur son modèle. Ce changement nécessite la recherche continue de nouvelles données afin de pouvoir formuler des décisions à chaque étape du processus d'assemblage. Ce constat confère au système de préparation à l'assemblage un aspect récursif car ses sorties influencent ses entrées de façon continue jusqu'à l'achèvement du processus d'assemblage. Par conséquent, le champ d'action derrière la définition du modèle de produit ne doit pas se contenter uniquement de la définition des caractéristiques relatives au produit à son état assemblé. Il doit être élargi afin de mettre en évidence cet aspect de variation continue de ces caractéristiques aux différents états du produit. Ceci nécessite l'intégration de ces derniers à ce modèle.

L'objectif de cette thèse est donc orienté vers le développement d'un modèle de caractéristiques d'assemblage d'un produit. Ce modèle vise à supporter le processus d'assemblage des produits mécaniques.

La méthodologie suivie pour la génération du modèle de produit se fait en suivant les

deux étapes suivantes:

Une première étape permet à l'utilisateur de procéder de manière interactive lors de la construction de la structure hiérarchique du produit et de la définition des caractéristiques technologiques et fonctionnelles relatives à cette structure et déduites de l'état assemblé. Ces dernières ne sont pas supportées directement par le modeleur solide ACIS™ utilisé dans le système pour générer les informations topologiques et géométriques relatives aux pièces. Ceci conduit à l'automatisation du processus de détermination des liaisons entre les composants (pièces ou sous-assemblages). Un tel processus suit une hiérarchie ayant comme base la modélisation des liaisons au niveau des sous-faces de contact entre les pièces.

Une deuxième étape permet à l'utilisateur d'intégrer une structure de gamme au modèle du produit. Cette structure met en évidence la chronologie d'apparition des états suite aux différentes opérations d'assemblage appliquées. Le système déduit automatiquement les caractéristiques propres à un état donné à partir de la comparaison de sa structure à celle de l'état assemblé. À l'état actuel de développement, la structure de gamme est générée de manière interactive dans le système afin de valider ses fonctionnalités.

Notons aussi que la structure orientée-objet utilisée dans le modèle permet la génération de la structure de chacun des états en tout temps. Il en résulte un support pour permettre au préparateur à l'assemblage d'effectuer une évaluation des séquences d'assemblage a posteriori de leur génération, ou aussi, un interfaçage avec un module qui génère les ressources d'assemblage, dans le cas où cette tâche est aussi définie a posteriori.

L'efficacité des différentes fonctionnalités du modèle est validée par l'étude de deux produits industriels: un micro-moteur et un bobinoir. Ces fonctionnalités montrent comment les objectifs de la méthodologie proposée sont atteints. Elles ouvrent aussi la

voie à des fonctionnalités supplémentaires. Ces dernières visent à supporter d'autres activités du cycle d'élaboration du produit.

ABSTRACT

Many companies are now automating the assembly of their products and are considering computer-based technologies in order to improve their productivity. The present thesis deals with the methodology of assembly modeling which allows the definition of the input features with an assembly planning system. By applying non-universal and empirical rules, the latter analyse these features in order to generate the outputs under an assembly plan structure that put into evidence the sequence of operations and the choice of assembly resources.

Meanwhile, the continuous change of state, resulting from each applied assembly operation, affects many defined parameters on the model of the product. This result requires a continuous research of new data in order to be able to formulate decisions at each step of the assembly process. This constat conferes to the assembly planning system a recursif aspect since its outputs influence its inputs continuously until the achievement of the assembly process. Therefore, the action field beyond the definition of the product model should not only satisfy the definition of features at the assembled state. It should be extended in order to put into evidence this aspect of continuous change of these features at the different states. This fact also highlights the necessity of the integration of the latter to the product model.

The objective of this thesis is oriented towards the development of a feature-based assembly model. This model aims to support the assembly process of mechanical products.

The methodology used to reach this objective is based on two major steps:

The first step allows the user to interactively proceede to the construction of the

hierarchical structure of the product and the definition of technological and functional features of this structure resulting from the assembled state. These features are not directly supported by the solid modeler ACIS™ used in the system to generate the topological and geometrical informations relative to parts. This result leads to automatically compute liaisons between components (parts or subassemblies). The followed process uses a hierarchy having as base the modeling of liaisons at the level of contact sub-faces between parts.

The second step allows the user to integrate an assembly plan structure to the product model. This structure put into evidence the chronology of sequenced states resulting from the applied assembly operations. The system automatically deduces the features pertaining to a given state by comparing its structure to the one of the assembled state. At the current stage of development, the assembly plan structure is interactively generated in order to validate the various functionalities of the system.

Let us mention that the object-oriented structure used in the model allows to generate, at any given time, the structure of each state. This leads to a support of the planning engineer in the evaluation of assembly sequences *a posteriori* and in the interfacing with a module that generates the assembly resources in the case where this task is also defined *a posteriori*.

The efficiency of the different functionalities of the model is validated by the study of two industrial products: a micro-engine and a winding-machine. These functionalities show how the proposed objectives are reached. It also opens the way to supplementary functionalities which aim to support other activities in the development and manufacture of a product.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS....iv
RÉSUMÉ....v
ABSTRACT....viii
TABLE DES MATIÈRES....x
LISTE DES TABLEAUX....xv
LISTE DES FIGURES....xvi
LISTE DES SYMBOLES....xx
LISTE DES ANNEXES....xxiii
AVANT-PROPOS....xxiv

CHAPITRE 1: CYCLE D'ÉLABORATION DE PRODUIT

1.1-Introduction....1
1.2-Les fonctions classiques du cycle d'élaboration de produit....1
1.2.1-La conception....3
1.2.1.1-La conception pour la fabrication....6
1.2.1.2-La conception pour l'assemblage....7
1.2.1.3-La conception pour la fabrication et pour l'assemblage..9
1.2.2-La fabrication....10
1.2.3-L'assemblage....11
1.2.3.1-Intégration autour des données: les caractéristiques....12
1.2.3.2-Définition....13
1.2.3.3-Intégration sur un modèle de produit....14
1.2.3.4-La reconnaissance des caractéristiques....16
1.2.3.4.1-La méthode manuelle....17
1.2.3.4.2-Les méthodes algorithmiques....19
1.2.3.5-Élaboration des gammes d'assemblage....21

1.2.3.6-La détermination des ressources d'assemblage.....24
1.2.3.7-Optimisation par simulation.....25
1.3-Conclusion.....27

CHAPITRE 2 : LA PRÉPARATION A L'ASSEMBLAGE
2.1-Introduction.....29
2.2-Système de préparation à l'assemblage.....29
2.3-Influence d'une approche d'ingénierie simultanée.....31
2.4-Les éléments caractéristiques du système de préparation à l'assemblage.....34
2.4.1-Les entrées.....35
2.4.1.1-Le modèle solide des pièces.....35
2.4.1.2-La nomenclature.....36
2.4.1.3-Les sous-assemblages.....37
2.4.1.4-Le récepteur.....40
2.4.1.5-Les caractéristiques de liaisons entre les composants...41
2.4.1.6-Les sous-faces disponibles pour la préhension.....45
2.4.1.7-Le matériau.....47
2.4.1.8-Les états de surface.....48
2.4.1.9-Le traitement de surface.....49
2.4.1.10-Les tolérances.....50
2.4.1.11-Cohérence dans l'intégration des caractéristiques.....54
2.4.2-Les règles de génération et d'évaluation des gammes d'assemblage.....54
2.4.2.1-La contrainte géométrique.....55
2.4.2.2-La stabilité.....57
2.4.2.3-L'accessibilité.....58
2.4.2.4-La maintenabilité.....59
2.4.2.5-La minimisation du nombre de réorientations.....60

2.4.2.6-Les affectations de plusieurs tâches à un même équipement....60
2.4.2.7-La modularité du produit....61
2.4.2.8-Le choix de séquences lié au préparateur....62
2.4.2.9-Bilan....63
2.4.3-Les règles de sélection des ressources d'assemblage....63
2.4.4-Les sorties....65
2.4.4.1-Génération d'une gamme planifiée....65
2.4.4.2-Génération de plusieurs gammes alternatives....65
2.4.4.3-Génération d'une gamme à opérations alternatives....66
2.5-Objectif de la recherche....68
2.6-Conclusion....71

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE DE RECONNAISSANCE DES CARACTÉRISTIQUES D'ASSEMBLAGE
3.1-Introduction....72
3.2-Différentes étapes dans la génération d'un modèle homogène de produit..73
3.2.1-Spécification d'un modèle de produit....73
3.2.2-Structure hiérarchique d'un produit....75
3.2.3-Procédure de construction de la structure hiérarchique du produit....82
3.2.4-Modèle homogène de pièce....87
3.2.4.1-Modèle géométrique et topologique....87
3.2.4.2-Modèle technologique....89
3.2.4.2.1-Caractéristiques technologiques intrinsèques à une entité....89
3.2.4.2.2-Caractéristiques technologiques extrinsèques aux entités....90

3.2.4.2.3-Génération du modèle de pièce homogène.....90
3.2.5-Modélisation des liaisons.....94
3.2.5.1-Les liaisons et les degrés de liberté.....94
3.2.5.2-Modèle géométrique et technologique des liaisons.....97
3.2.5.3-Cas des sous-assemblages.....105
3.2.5.4-Remarque.....109
3.2.6-Pseudo-matrices des demi degrés de liaisons.....111
3.2.7-Les sous-faces libres et de contact.....113
3.2.8-Les procédés.....118
3.2.9-Algorithme généralisé.....124
3.2.10-Exemples de résultats.....127
3.3-Conclusion.....129

CHAPITRE 4: MODÈLE DES ÉTATS ET DE LA GAMME D'ASSEMBLAGE. MODÉLISATION DYNAMIQUE DU PRODUIT

4.1-Introduction.....131
4.2-Spécification d'un modèle de gamme d'assemblage.....132
4.2.1-Introduction.....132
4.2.2-Spécification d'un modèle des opérations d'assemblage.....132
4.2.3-Spécification d'un modèle de séquencement des opérations d'assemblage.....136
4.3-Modélisation dynamique du produit.....140
4.3.1-Introduction.....140
4.3.2-Méthodologie de reconnaissance des CA propres à un état actuel du produit.....144
4.3.2.1-Les sous-faces de contact.....145
4.3.2.2-Les sous-faces libres.....147
4.3.2.3-Les liaisons.....150

4.3.2.4-Bilan.....159
4.3.3-Les caractéristiques relatives à l'opération d'assemblage.....161
4.4-Conclusion.....163

CHAPITRE 5 : MAQUETTE FONCTIONNELLE DE VALIDATION
5.1-Introduction.....165
5.2-Architecture fonctionnelle de la maquette.....165
5.2.1-Génération du modèle de pièce homogène.....166
5.2.2-Construction de la structure hiérarchique du produit.....168
5.2.3-La modélisation des liaisons au niveau des sous-faces de contact des pièces.....173
5.2.4-la modélisation dynamique du produit.....175
5.3-Limites actuelles.....189
5.4-Conclusion.....191

CHAPITRE 6 : CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES
6.1-Conclusion générale.....193
6.2-Perspectives.....197

RÉFÉRENCES.....200

ANNEXES.....210

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1: Attributs relatifs aux entités propres à un modèle homogène de pièce...91

Tableau 3.2: Liste d'exemples de contacts les plus rencontrés en pratique.....114

Tableau 3.3: Liste d'exemples de procédés de la première catégorie et leurs PMPr..120

Tableau 3.4: Liste d'exemples de procédés de la deuxième catégorie et leurs PMPr..123

Tableau 5.1: Liste des commandes ajoutées sur l'interface du Test-Harness.....190

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Cycle d'élaboration d'un produit.....2
Figure 1.2: Schéma de dialogue entre les intervenants.....10
Figure 1.3: Processus de reconnaissance des caractéristiques (inspiré de [DEN-93])..17
Figure 2.1: Système de préparation à l'assemblage.....30
Figure 2.2: Cycle d'élaboration d'un produit.....32
Figure 2.3: Exemples de plusieurs produits.....43
Figure 2.4: Variation des conditions du montage au cours du processus d'assemblage.....44
Figure 2.5: Sous-faces libres et de contact sur un composant.....46
Figure 2.6: Méthode de recherche à propos des sous-faces disponibles pour la préhension sur un composant.....47
Figure 2.7 : Exemple de contraintes géométriques.....56
Figure 2.8: Instabilité de la pièce (2) suite au désassemblage de la vis.....57
Figure 2.9: Opération d'assemblage irréalisable due à une contrainte d'accessibilité..59
Figure 2.10: Lien du modèle avec les différentes phases d'assemblage.....70
Figure 3.1: Structure hiérarchique d'un produit.....76
Figure 3.2: Démarche de construction d'un sous-assemblage.....78
Figure 3.3. a) Modification de la structure hiérarchique suite à la création d'un nouveau sous-assemblage, b) Démarche de définition des instances de composants.....79
Figure 3.4: Redéfinition des transformations par rapport au référentiel du récepteur..84
Figure 3.5: Décomposition de la tâche "Construire la structure hiérarchique du produit".....86
Figure 3.6: Syntaxe utilisée dans les équations.....97
Figure 3.7: Exemples sur la méthode d'assemblage des pièces.....100
Figure 3.8: Liaisons équivalentes à un sous-assemblage déduites des liaisons au

niveau de ses pièces.....107
Figure 3.9: Changement de la configuration des sous-faces libres sur une pièce.....115
Figure 3.10: Exemple de régions d'intersection entre deux faces.....116
Figure 3.11: Cas où aucune information n'est disponible pour le prépositionnement éventuel d'un composant.....122
Figure 3.12: Décomposition fonctionnelle de la tâche "Chercher les caractéristiques propres à l'interaction entre deux faces".....127
Figure 3.13: Exemple de reconnaissance des caractéristiques de liaisons sur les différents niveaux d'entités.....128
Figure 4.1: Modèle de la gamme d'assemblage.....138
Figure 4.2: Le graphe ET/OU et le GEP pour un exemple de produit.....140
Figure 4.3: Décomposition de la fonction "Déterminer la gamme et les ressources d'assemblage.....143
Figure 4.4: Volume formé par le balayage des faces dans la direction de déplacement.....155
Figure 4.5: Explicitation des valeurs de R et R' dans le cas du montage d'un anneau élastique.....157
Figure 4.6: Décomposition de la tâche "Reconnaître les caractéristiques d'assemblage".....161
Figure 4.7: Décomposition fonctionnelle de la tâche "Reconnaître les caractéristiques d'une opération d'assemblage".....163
Figure 5.1: Cohérence entre les entités préexistantes du modèle ACIS™ avec les entités propres à SCAP.....168
Figure 5.2: Micro-moteur créé et sa structure hiérarchique correspondante.....171
Figure 5.3: Bobinoir créé et sa structure hiérarchique correspondante.....172
Figure 5.4: Interface utilisateur pour le choix des procédés d'assemblage.....174
Figure 5.5: a)GEP et états du micro-moteur (gamme d'assemblage), b)GEP et états du bobinoir (gamme de désassemblage).....176

Figure 5.6: Sous-faces de contact isolées sur le vilebrequin (6) et sur le SA piston aux états (7) et (11).....178
Figure 5.7: Sous-faces libres identifiées sur la chemise (2) et le sous-assemblage piston aux états (7) et (11).....179
Figure 5.8: Liaisons relatives au sous-assemblage piston et au bouchon (8) à l'état (17).....181
Figure 5.9: Liaisons relatives au vilebrequin (6) aux états (7) et (17).....182
Figure 5.10: Liaisons de blocage relatives au sous-assemblage piston à l'état (16)...183
Figure 5.11: Liaisons de blocage relatives au colier (7) à l'état (4).....184
Figure 5.12: Caractéristiques relatives à différentes opérations d'assemblage.....186
Figure 5.13: Fonctionnalité globale du modeleur ACIS™ résultante de l'intégration des fonctionnalités de SCAP au sein de sa structure.....188
Figure A1: Graphe de liaisons du *TILT MECHANISM* [HUA-91].....210
Figure A2: Exemples d'un produit et de ses matrices d'interférence, de contact et de connection dans la direction x [SAN-92].....211
Figure A3: Trois ensembles de relations de précédence sur l'assemblage montré [LIN-93].....212
Figure A4: Graphe des séquences d'assemblage (*Assembly Sequence Graph)* pour l'exemple de produit montré [RED-94].....213
Figure A5: Liste de préhenseurs recommandés dans RALPH[DUB-92].....214
Figure A6: Propositions tirées de [DIN-93] pour l'optimisation de la configuration de saisie d'un composant.....214
Figure B1: Plan d'ensemble de montage et nomenclature du mico-moteur.....215
Figure B2: Plan d'ensemble de montage et nomenclature du bobinoir.....216
Figure C1: Exemples de relations dans un schéma NIAM.....218
Figure D1: Structure hiérarchique d'un produit.....219
Figure D2: Modèle géométrique et topologique relatif à une pièce.....220
Figure D3: Exemples de caractéristiques intrinsèques à une pièce, à une face et à

une arête.....221
Figure D4: Exemples de caractéristiques extrinsèques à une face.....222
Figure D5: Caractéristiques relatives à la liaison d'une sous-face de contact sur une pièce.....223
Figure D6: Structure générale de la gamme intégrée au modèle de l'assemblage à partir du GEP.....224

LISTE DES SYMBOLES

L_{cFI}	: Liaison fonctionnelle d'un composant i avec le reste du produit
$L_{cF(i,j)}$	: Liaison fonctionnelle entre deux composants i et j
L_{SAF}	: Liaison fonctionnelle d'un sous-assemblage avec le reste du produit
L_{pFi}	: Liaison fonctionnelle d'une pièce i avec le reste du produit
$L_{pF(i,j)}$	: Liaison fonctionnelle entre deux pièces i et j
L_{pPi}	: Liaison de prépositionnement d'une pièce i avec le reste du produit
$L_{pP(i,j)}$	: Liaison de prépositionnement entre deux pièces i et j
L_{pBi}	: Liaison de blocage d'une pièce i avec le reste du produit
$L_{pB(i,j)}$	: Liaison de blocage entre deux pièces i et j
L_{fF}	: Liaison fonctionnelle sur une sous-face de contact
L_{fP}	: Liaison de prépositionnement sur une sous-face de contact
$L_{f(Pr)}$	: Liaison de procédé sur une sous-face de contact
$L_{fF(i,j)}$	: Liaison fonctionnelle sur la $j^{ème}$ sous-face de la pièce i
$L_{fP(i,j)}$	: Liaison de prépositionnement sur la $j^{ème}$ sous-face de la pièce i
$L_{f(Pr)(i,j)}$	: Liaison de procédé sur la $j^{ème}$ sous-face de la pièce i
$SF_{(i,j)}$	: $j^{ème}$ sous-face sur une pièce i
S_{ij}	: Ensemble de sous-faces de contact entre deux pièces i et j
$S_{iP,Pr}$	: Ensemble de sous-face sur une pièce i ayant une liaison de prépositionnement et de procédé
S_{iP}	: Ensemble de sous-faces sur une pièce i ayant une liaison de prépositionnement
S_{iPr}	: Ensemble de sous-face sur une pièce i ayant une liaison de procédé
S_{iT}	: Ensemble de toutes les sous-faces de contact sur une pièce i
V	: Relation de disjonction entre les liaisons
V_i	: Mise en disjonction des liaisons sur des éléments de numéros i
$A \cup B$	: Réunion de A et B

Card A : Cardinalité de l'ensemble A

C_P : Ensemble des composants équivalents à des pièces

C_{SA} : Ensemble des composants équivalents à des sous-assemblages

$C = C_P \cup C_{SA}$: Ensemble des composants du produit

P_n : Ensemble des pièces du produit

P_{nl} : Ensemble des pièces d'un sous-assemblage l quelconque

$\mathscr{L}_I$: Ensemble des liaisons fonctionnelles entre les pièces à l'intérieur d'un sous-assemblage

$\mathscr{L}_E$: Ensemble des liaisons fonctionnelles des pièces à l'intérieur d'un sous-assemblage avec les autres pièces du produit

$\mathscr{L} = \mathscr{L}_I \cup \mathscr{L}_E$: Ensemble des liaisons fonctionnelles de toutes les pièces d'un sous-assemblage

E_i : État i quelconque du produit

O_i : Opération d'assemblage i quelconque

GEP : Graphe d'États du Produit

PP : Phase de prépositionnement relative à une opération d'assemblage

PPr : Phase de procédé relative à une opération d'assemblage

$$PM = \begin{pmatrix} dx+ & dx- & dyz+ & dyz- \\ dy+ & dy- & dzx+ & dzy- \\ dz+ & dz- & dxy+ & dxy- \end{pmatrix}$$

: Pseudo matrice des demi-degrés de liaison

Les dx+,dx-, dy+, dy-, dz+, dz- sont des variables booléennes représentant chacune un demi-degré de liaison en translation égal à 0 si le demi-degré est libre, à 1 s'il est lié. Les dyz+, dyz-, dzx+, dzy-, dxy+, dxy- représentent les demi-degrés de liaison en rotation.

d.d.l. : demi-degré de liaison

PMF : Pseudo-matrice relative à une liaison fonctionnelle

PMP : Pseudo-matrice relative à une liaison de prépositionnement

PMPr : Pseudo-matrice relative à une liaison de procédé

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Exemples tirés de la littérature.....210
Annexe B : Vues d'ensemble du micro-moteur et du bobinoir.....215
Annexe C : Notions générales du formalisme NIAM.....217
Annexe D : Schémas relationnels relatifs au modèle du produit.....219

AVANT-PROPOS

Concevoir, fabriquer et assembler des produits répondant à des spécifications précises, équilibrer les dépenses et les recettes correspondantes, générer un bénéfice, tel est le rôle économique de l'entreprise industrielle. Un marché qui se mondialise, une concurrence internationale agressive, des consommateurs exigeants, des produits devenant rapidement obsolètes, tel est aujourd'hui le contexte de cette activité et l'évolution des tendances. Ces nouvelles données ont obligé les entreprises industrielles à rationaliser leurs pratiques et à fixer dans ses objectifs l'automatisation de l'assemblage tout en mettant en oeuvre les concepts de l'ingénierie simultanée.

Un tel objectif nécessite en premier lieu une description complète et précise des données disponibles explicitement et implicitement et, parmi celles-ci, des données nécessaires pour obtenir les résultats escomptés. Le moyen privilégié pour accomplir cette tâche consiste à utiliser un modèle de produit enrichi par des primitives de conception chargées de valeur sémantique appelées caractéristiques. Ce modèle constitue une interface de communication de la conception vers un système de préparation à l'assemblage. Ce dernier permet alors, par application des règles non universelles et souvent empiriques, de traduire les propositions locales ou globales de conception, en possibilités d'assemblage exploitant au mieux le niveau de détail inévitablement variable des propositions.

L'objectif de cette thèse est d'apporter une contribution à l'étude de faisabilité d'un système aboutissant à la définition d'un modèle de produit mécanique tout en étant ouvert à d'autres activités du cycle d'élaboration de ce dernier. Un tel système permet la modélisation du produit à chaque étape du processus d'assemblage tout en tenant compte d'un ensemble d'informations technologiques et fonctionnelles non supportées directement par l'usage d'un modeleur solide.

Nous commençons dans le premier chapitre par examiner en détails les diverses phases impliquées dans le cycle d'élaboration d'un produit afin de mettre en évidence leurs interactions. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'assemblage. Pour cela, nous détaillons les diverses activités liées au processus d'élaboration de cette phase. Nous donnons aussi un état de l'art sur les travaux entrepris par les chercheurs afin de supporter l'automatisation de chacune de ces activités.

Dans le deuxième chapitre, nous resserrons notre étude sur l'activité de préparation à l'assemblage. Cette dernière englobe la génération de la gamme et des ressources d'assemblage. Pour cela, nous évaluons les possibilités d'assistance, par la définition des entrées sous la forme de caractéristiques d'assemblage intégrées à un modèle de produit. L'analyse de ces entrées favorise l'automatisation des prises de décisions, basées sur des règles déterministes, tout au long de cette activité. Nous en tirons profit pour proposer notre objectif de recherche. Ce dernier est orienté vers le développement d'un modèle de caractéristiques d'assemblage de produit. Ce modèle vise à supporter le processus d'assemblage des produits mécaniques. Nous visons ainsi à combler les faiblesses au niveau des approches de modélisation rencontrées dans la littérature.

Dans le troisième chapitre, nous commençons par préciser les spécifications d'un modèle de produit ainsi que la notion de caractéristique d'assemblage (CA). Cette dernière englobe l'ensemble des informations topologiques, géométriques, technologiques et fonctionnelles rencontrées dans la plupart des produits industriels. Nous explicitons ensuite une méthodologie permettant la construction de la structure hiérarchique du produit et la reconnaissance des CA propres aux composants (pièces ou sous-assemblages) relativement à leurs positions respectives dans le produit assemblé. Une telle méthodologie conduit aussi à l'établissement d'une hiérarchie permettant le passage du niveau des liaisons relatives aux sous-faces de contact pour la déduction successive des liaisons relatives aux pièces et aux sous-assemblages.

Nous consacrons le quatrième chapitre à la modélisation du produit à chaque étape du processus d'assemblage. Pour cela, nous proposons au début un modèle de la gamme d'assemblage. Ce modèle assure l'intégration des états au modèle du produit et la mise en évidence de la chronologie de leur apparition suite aux différentes opérations appliquées. Il est généré de façon interactive dans le système afin de valider ses fonctionnalités. Nous proposons ensuite une méthodologie de reconnaissance des CA propres aux composants relativement à un état donné du produit. Nous proposons aussi une méthodologie de reconnaissance des caractéristiques propres à chaque opération d'assemblage. A cet effet, divers algorithmes sont présentés. Ils mettent en oeuvre un mécanisme de reconnaissance automatique de différents types de caractéristiques. Ce mécanisme est basé sur la comparaison de la structure d'un état donné à celle de l'état assemblé pour lequel on conserve ses propres caractéristiques.

Nous décrivons enfin dans le cinquième chapitre la maquette logicielle d'un **Système de Caractéristiques d'Assemblage de Produits (SCAP)**. À l'aide de ce système, nous validons les concepts mises en oeuvre dans le modèle. Nous décrivons aussi comment les fonctionnalités du SCAP ont été assurées en lui intégrant au sein du modeleur solide ACIS™. Ce dernier est aussi utilisé pour générer les modèles topologiques et géométriques relatifs aux pièces.

À l'aide du système, nous testons deux produits industriels: un micro-moteur et un bobinoir. L'examen des résultats nous permet de valider les concepts introduits, de vérifier la compatibilité de notre approche avec la mise en oeuvre d'un système qui englobe d'autres activités du cycle d'élaboration du produit et de discuter des travaux qui pourraient être poursuivis.

CHAPITRE 1
CYCLE D'ÉLABORATION DE PRODUIT

1.1-Introduction

Entre l'idée, qui traduit la conceptualisation d'un besoin et un produit qui traduit sa matérialisation physique, différentes fonctions sont nécessaires. Dans ce premier chapitre, nous commençons par définir et caractériser ces différentes fonctions qui supportent les phases successives d'élaboration d'un produit. Cette analyse constitue la base de la recherche d'un modèle intégré satisfaisant aux objectifs de l'automatisation de l'assemblage.

1.2-Les fonctions classiques du cycle d'élaboration de produit

Le produit moderne se caractérise par un cycle de vie de plus en plus court. Cela impose aux industries une adaptabilité et une flexibilité autant au niveau du produit fonctionnel qu'au niveau des machines de production.

Dans les qualités attendus des systèmes modernes de production, il faut souligner la nécessité de favoriser les domaines à forte valeur ajoutée, de disposer d'une automatisation poussée, d'une modularité tant au niveau machine qu'au niveau produit, d'une gestion à flux tendu et des circuits d'information efficaces. L'industrialisation d'un produit exige donc une certaine interchangeabilité au niveau des phases principales d'élaboration du produit (figure 1.1). Elle doit aussi faire intervenir d'autres facteurs tels que:

- la capacité de synthèse parmi les solutions locales qui sera souvent un compromis

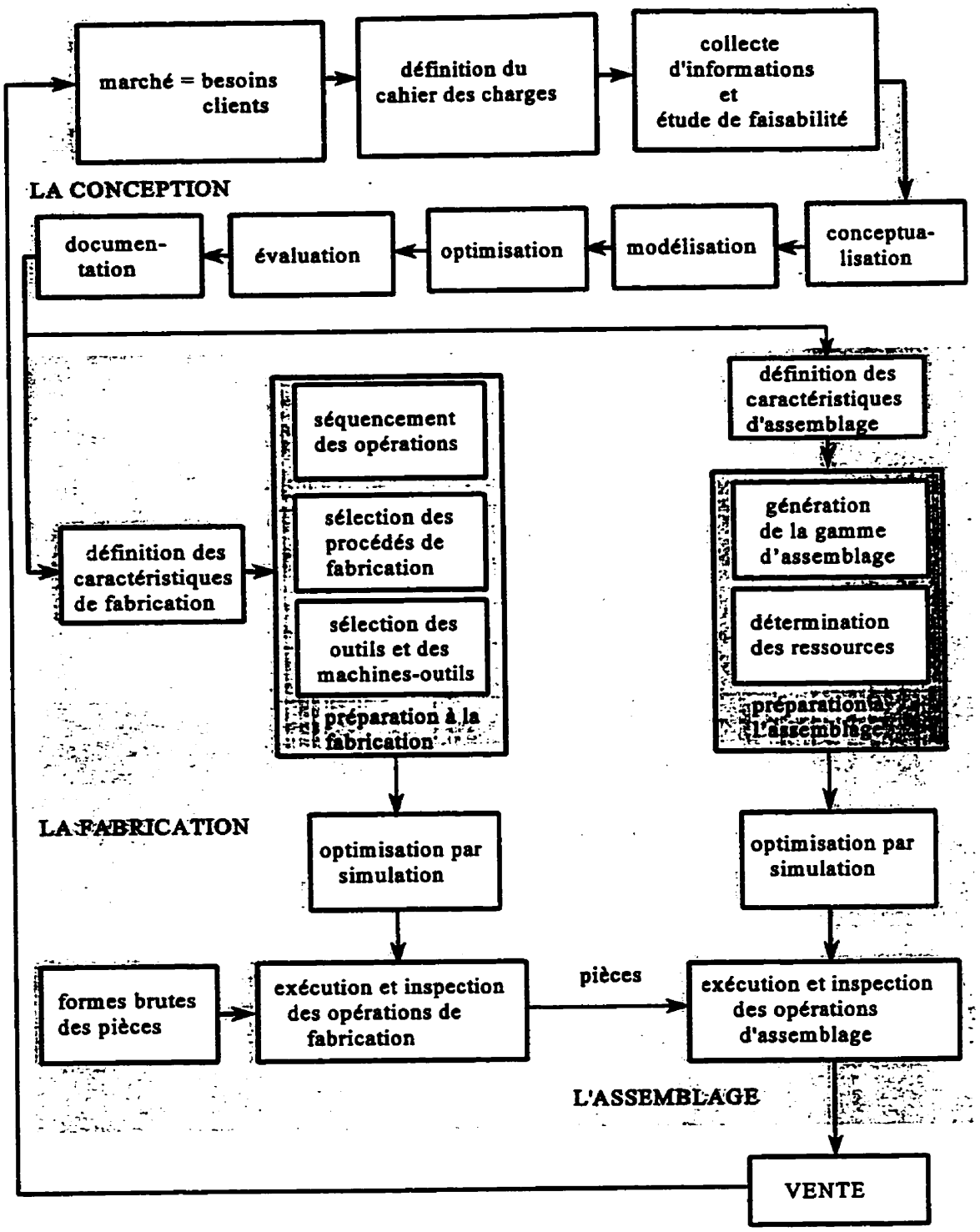


Figure 1.1. Cycle d'élaboration d'un produit

pour atteindre l'objectif cherché au regard de l'ensemble de contraintes imposées,

- le respect de la qualité requise,
- la minimisation des coûts induits sur le produit,
- la minimisation des stocks,
- la réduction de la main d'oeuvre directe et indirecte.

Sur la figure 1.1, on peut distinguer trois fonctions principales dans le cycle d'élaboration d'un produit: la conception, la fabrication et l'assemblage.

La part consacrée à chacune de ces fonctions dépend non seulement des caractéristiques du produit mais également du type d'entreprise concernée.

Le temps consacré à la conception, par exemple, peut varier considérablement suivant la complexité du problème et le degré d'innovation qu'il représente pour l'entreprise. Ceci montre toute l'importance du savoir-faire manufacturier.

Le temps consacré à la fabrication ou à l'assemblage est entièrement dépendant des décisions prises en préparation à chacune de ces fonctions, des degrés de perturbation des moyens de production et de l'influence de ces perturbations sur le système de production.

Nous allons examiner de manière détaillée les caractéristiques des fonctions essentielles du cycle d'élaboration du produit.

1.2.1-La conception

La conception est la phase la plus créative du cycle d'élaboration du produit. Elle a pour objectif de transformer les spécifications qui qualifient le besoin perçu du produit sous forme de contraintes en un ensemble de spécifications géométriques, technologiques et

fonctionnelles telles qu'elles peuvent apparaître sur le plan détaillé du produit.

On peut décrire la conception comme un processus itératif au cours duquel un objet est conçu et modifié afin qu'il puisse remplir des fonctions bien définies et se conformer à un ensemble de contraintes. On identifie plusieurs étapes dans cette démarche:

- création d'un modèle de l'objet,
- analyses, essais et simulation,
- construction de prototypes,
- modifications,
- réalisation de l'objet.

À quelques variantes près dans l'enchaînement de ces étapes, la méthodologie est la même que l'objet, soit un barrage, une pièce mécanique, etc.

Les autres caractéristiques communes à l'ensemble des activités de conception sont les moyens utilisés par le concepteur:

Outils analytiques: formules empiriques et équations issues de modèles mathématiques. Ceux-ci sont utilisés aussi bien lors de la création du modèle, lors de son analyse, ou des modifications.

Outils informatiques: dans certains des cas, l'outil de conception est un modeleur solide. Celui-ci permet d'assister la tâche du concepteur en lui permettant de générer relativement rapidement et facilement un objet géométrique virtuel reflétant l'objet qu'il est en train de concevoir mentalement. Le premier intérêt du modeleur solide est la faculté de visualisation non ambiguë de la géométrie graduellement construite, au moyen de rendus polychromes réalistes de grande qualité, qui donnent au concepteur un premier

degré de validation immédiate de ses concepts. Mais un second degré de validation, au niveau du comportement de l'objet en situation de fonctionnement est rendu possible par extension directe de la modélisation géométrique, par la mise à l'épreuve virtuelle, mécanique ou thermique, du modèle de l'objet,

Informations: propriétés et caractéristiques de toutes sortes, designs antérieurs, etc. Ces informations auxquelles le concepteur fait appel sont contenues dans des manuels, dans des plans, etc. Leurs formes sont variées: chiffrées, graphiques, textuelles. On a recours aux informations également à toutes les phases du processus de conception.

Pris séparément, ces aspects donnent lieu à des activités quantitatives (ou non créatives) et des activités qualitatives (créatives). L'aspect créatif se manifeste évidemment lors de la création d'un modèle, mais également tout au long du cheminement, c'est-à-dire dans le choix d'une méthode de calcul plutôt qu'une autre, l'appel à telle information ou l'interprétation d'un calcul, l'élaboration d'une modification à la suite d'une simulation, etc. La coordination de toutes ces activités, en fonction d'un objectif et menant à une réalisation, est le processus de conception.

Sur la figure 1.1, l'assemblage et la fabrication sont des activités tributaires de la conception. Un objet industriel, quel qu'il soit (voiture, roulement, disjoncteur, etc.) a une vie à l'intérieur d'une entreprise qui va de sa conception à son assemblage, en passant par la fabrication, et une vie à l'extérieur de l'entreprise qui va de la livraison et la mise en oeuvre à l'utilisation effective de l'objet dans un certain contexte. Il est donc difficile de séparer l'objectif de l'activité de conception des besoins de l'application avale. C'est pourquoi la tendance actuelle des travaux de recherche est orientée vers le développement de modèles de conception qui supportent les différentes phases du cycle d'élaboration de produit. Nous allons en donner un aperçu représentatif au travers de certaines approches qui nous semblent pertinentes.

1.2.1.1-La conception pour la fabrication

La conception pour la fabrication est un processus où l'on cherche à optimiser les technologies, les procédés de fabrication et les coûts dès la phase de conception. Elle a aussi pour but de définir l'ensemble des caractéristiques pour fournir au système automatisé une représentation du produit dotée d'une logique de raisonnement comparable à celle de l'expert [DEN-93]. Ces caractéristiques sont classées dans [MAR-87] en quatre catégories:

Les caractéristiques géométriques: Ce sont les éléments géométriques de base tels que les points, les segments, les surfaces ou le volume, ainsi que les différentes relations qui existent entre ces éléments et qui permettent la définition non ambiguë de la géométrie nominale d'un composant mécanique.

Les caractéristiques de précision: Elles quantifient les déviations maximales admissibles par rapport à la forme idéale de la pièce, tant au niveau macro-géométrique (tolérancesdimensionnelles et géométriques) qu'au niveau micro-géométrique (états de surface).

Les caractéristiques technologiques: Il s'agit de sous-ensembles de la géométrie de la pièce qui assurent une fonction particulière. Les caractéristiques sont généralement définies par un vocabulaire spécifique (rainure, poche, etc.) plus riche que la seule description de la géométrie correspondante, car ces termes évoquent la fonction remplie ou le mode de fabrication de forme qu'ils décrivent.

Les caractéristiques matérielles: Elles décrivent les propriétés physiques, chimiques, électriques, thermiques ou mécaniques du matériau constitutif de la pièce, ainsi que les éventuels traitements subis par celle-ci qui ont pu altérer ces propriétés globalement

(trempe à coeur, vieillissement) ou localement (peinture, anodisation, cémentation) et donc affecter ses surfaces.

La conception pour la fabrication réalise donc une intégration des fonctions de conception et de fabrication. Elle permet aussi de bénéficier de l'état actuel des outils disponibles dans la plupart des systèmes commerciaux de CFAO. En effet, ces derniers possèdent un module d'analyse en commande numérique intégré. Ce module utilise directement le modèle de conception et propose, après sélection par l'opérateur d'un outil de coupe approprié, de générer automatiquement les trajectoires d'outil qui permettent d'usiner des groupes de volumes standards, tels que les poches ou les contournages. L'accent est porté sur la convivialité de ces modules qui vont jusqu'à offrir une simulation visuelle animée de l'usinage, en même temps que les différents temps opératoires sont calculés.

1.2.1.2-La conception pour l'assemblage

L'approche de conception en assemblage est différente de celle rencontrée en fabrication car l'étude d'une pièce en particulier ne peut pas être isolée d'un environnement lui imposant certaines contraintes géométriques, technologiques et fonctionnelles tout aussi importantes que les contraintes intrinsèques à la pièce.

Selon cette approche, le problème de l'assemblage est traité en profondeur avec l'ensemble de contraintes qui le limite. Le traitement se fait cependant en assurant un certain "dialogue" entre les différentes étapes des processus de conception et d'assemblage. Ce qui conduit généralement à la définition des besoins fonctionnels du produit tout en optimisant les techniques appliquées, les formes des pièces, ainsi que leur nombre.

Dans les méthodes d'aide à la conception en assemblage, on peut citer certaines méthodes

ou recueils de recommandation, tel que le livre "*Design for Assembly*" de M. Andreassen, S. Kahler et T. Lund [AND-83], celui de "*Design for Assembly Handbook*" de G. Boothroyd et P. Dewhurst [BOO-83] dans lesquels les auteurs proposent une méthode d'évaluation par codification des composants et des opérations en fonction de leur aptitude à être assemblés.

R. Jeannes [JEA-86] s'est attaché à l'aspect méthodologique de la (re)conception des produits en fonction du montage. Son objectif était en effet de créer un outil applicable à différents types de produits. Cet outil comporte deux parties essentielles:

- une partie d'analyse globale que l'on appelle "macroanalyse" et dont le but est de modéliser la structure du produit. Cette modélisation permet entre autre de générer les processus de montage et de proposer des modifications de conception visant à rendre la structure du produit compatible avec un montage plus rationnel.
- une partie d'analyse fine que l'on appelle "microanalyse" et qui consiste à étudier en détail le déroulement de chaque opération de montage. Cette microanalyse débouchera sur des propositions de reconception des dessins de pièces afin de diminuer la difficulté des opérations.

Dans [NIE-92] et [KIM-95], on trouve l'idée d'une conception en deux temps commençant par une première phase d'ébauche de conception, privée d'informations de détail concernant les liaisons entre les composants (conception ascendante), suivie d'une seconde phase de conception détaillée basée sur l'utilisation de caractéristiques de liaisons permettant de réaliser l'assemblage (conception descendante).

Certains auteurs [SEI-91], [THU-94] ont abordé aussi cet objectif à l'aide de l'évaluation d'un indice d'assemblabilité. L'intervention de certains paramètres (tolérances, types de mouvements à mettre en oeuvre, forces à appliquer, poids, dimension, etc.) dans des

formules empiriques permet d'obtenir des notes entre plusieurs propositions.

1.2.1.3-La conception pour la fabrication et pour l'assemblage

Elle a pour but l'intégration de techniques qui optimise les relations entre les différentes phases d'élaboration du produit. Cette intégration doit permettre la production de données non redondantes et diminuer les sources d'erreurs dans la transmission de données.

Les bénéfices que l'on peut tirer de l'utilisation de cette approche, au delà d'une indiscutable réduction des coûts de production, incluent:

- la réduction du nombre de composants,
- la réduction des problèmes techniques de fabrication et d'assemblage,
- la réduction des coûts de maintenance,
- l'amélioration de la fonction du produit.

La mise en oeuvre de cette méthodologie de conception consiste à forcer les acteurs de la conception, de la fabrication et de l'assemblage à examiner ensemble leurs besoins réciproques pour résoudre de concert les problèmes de qualité, de fonction, de production et de profit, qui sont des objectifs communs. Cette idée rejoint, d'une certaine façon, le concept de l'ingénierie simultanée qui vise justement à concevoir un produit en analysant simultanément les aspects "conception", "fabrication" et "assemblage" de celui-ci [BOO-94], [THO-95].

Le fait de briser les barrières traditionnelles qui existent entre les différents services participant au cycle d'élaboration de produit conduit à la parallélisation de certaines tâches qui sont traditionnellement réalisées en séquence dans une approche classique.

Le succès d'une telle approche est conditionné par l'existence d'une structuration hiérarchique des intervenants propice au dialogue (figure 1.2).

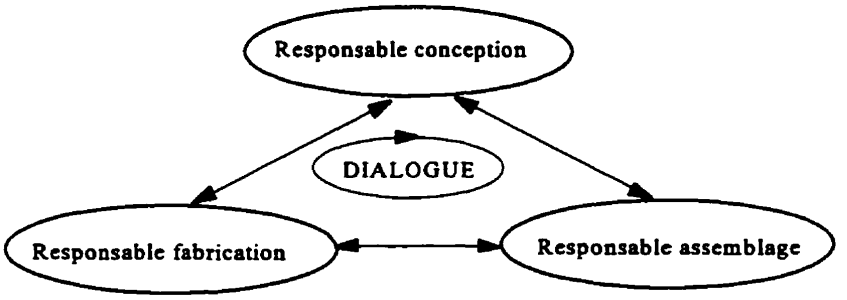


Figure 1.2. Schéma de dialogue entre les intervenants

Cette approche a également poussé certains chercheurs à évoluer vers des modèles basés sur la construction d'une pièce à partir d'un ensemble de caractéristiques de forme [SOD-91], [CUT-92], [SHA-92], [SHA-93], [DEF-93], [CHE-93], [VAN-96]. Ces entités géométriques sont en fait des regroupements de surfaces correspondants souvent à des opérations d'usinage ou à la création des liaisons entre des entités ayant des formes bien définies sur deux pièces. L'objectif de ce concept est d'obliger le concepteur à construire son modèle à partir de ces entités de manière à réduire l'écart entre la conception, la fabrication et l'assemblage.

1.2.2-La fabrication

Sur la figure 1.1, la fabrication constitue une phase principale du cycle d'élaboration du produit. Elle consiste à définir les spécifications de fabrication qui garantissent l'obtention des spécifications de conception.

La fabrication a constitué un objectif de plusieurs activités de recherche. C'est un sujet qui peut être traité à part. Il est en dehors du champ de cette thèse. Cependant, nous allons donner une brève description de la chronologie des activités liées à la fabrication

tirée de [DEN-93]. Cette chronologie fait apparaître trois phases principales:

- la première phase consiste à analyser et interpréter la proposition de conception (dimensions, tolérances, états de surface, etc.). Elle conduit à la définition des caractéristiques qu'il est nécessaire de retrouver dans le modèle des entrées issu de la phase de conception pour favoriser une analyse déterministe de la préparation à la fabrication.
- la deuxième phase consiste à déterminer comment produire la pièce (séquencement des opérations, sélection des procédés de fabrication, sélection des machines-outils, sélection des outils, etc.)
- la dernière phase consiste à produire les résultats de l'étude (simulation de la gamme de fabrication, évaluation des temps d'usinage, production des programmes de commande numérique).

Cette phase du processus d'élaboration de produit subit aussi l'influence de nombreuses contraintes extérieures tels que le respect des caractéristiques spécifiées sur le produit et l'ensemble des contraintes supplémentaires définies dans le cahier des charges.

1.2.3-L'assemblage

Sur le schéma de la figure 1.1, la position de l'assemblage est claire. Elle intervient comme une phase principale dans le cycle d'élaboration d'un produit fonctionnel; le produit prend en effet sa valeur fonctionnelle après l'assemblage. Il est donc tributaire de tout ce qui se décide et se fait en amont (conception du produit, technologies employées, fabrication des pièces, manutention, etc.) [FIG-90].

Le marché actuel impose une flexibilité tant au niveau du produit, qu'au niveau des lignes et des machines d'assemblage. La plupart des nouveaux produits sont fabriqués en

différentes variantes. D'autre part, une industrie doit produire en même temps plusieurs types de produits et les volumes de commande étant variables dans le temps de manière aléatoire, la capacité de production doit pouvoir être adaptée. Les capacités de conception sont donc en grande partie occupées à modifier, à reconcevoir et à planifier des ressources, des produits et des implantations, à reprogrammer des machines. Ces nouveaux produits sont assez similaires aux précédents.

L'automatisation de l'assemblage apparaît donc comme une nécessité par le désir non seulement d'augmenter la productivité mais aussi pour permettre, pour un temps de cycle contrat donné, la définition des caractéristiques qui sont pertinentes pour l'analyse du processus d'assemblage du produit, la détermination de la gamme et des ressources d'assemblage. Il doit aussi permettre de proposer un choix de machines ou de cellules flexibles, un schéma d'implantation de la zone d'assemblage, de simuler les flots des composants et aussi de vérifier les choix posés aux différentes étapes de l'élaboration du projet.

Analysons maintenant en détails chacune des activités mentionnées.

1.2.3.1-Intégration autour des données: les caractéristiques

Lors de l'analyse de l'information permettant de supporter les différentes activités liés à l'assemblage, il faut passer en revue l'information dont nous disposons explicitement et implicitement, puis remettre en évidence l'information utile idéalement.

L'information disponible explicitement est contenue dans les plans d'ensemble du produit et de détail, la nomenclature et les informations complémentaires données oralement ou par écrit dans un descriptif du fonctionnement du produit.

L'information implicite est disponible à l'expert en arrière de toute information explicite, sa recherche est un processus de longue haleine et les résultats ne sont pas toujours ceux espérés.

Le moyen privilégié pour renseigner le système sur l'intention de conception est d'utiliser explicitement des primitives de conception chargées de valeur sémantique appelées caractéristiques (*features*).

Nous allons d'abord tenter de donner une définition unificatrice des caractéristiques, puis examiner comment ces dernières peuvent être utilisées pour parvenir aux objectifs visés.

1.2.3.2-Définition

Pour S. Lee [LEE-90], une caractéristique est toute configuration géométrique intéressante formée par les surfaces, les segments ou les sommets sur une pièce. Cette définition trouve un écho dans la définition proposée par K. Case [CAS-94]: une caractéristique est défini par un volume enveloppé par un ensemble de faces. Une définition plus générale est donnée par De Fazio et al. [DEF-93]: une caractéristique est tout attribut de nature géométrique ou non géométrique sur une pièce dont la présence ou les dimensions sont importants pour la fonction, la fabrication, l'usage, etc. et dont la validité comme une primitive ou une opération facilite le processus de conception. Dans [SHAH-92] on trouve une définition plus spécifique à l'assemblage: une caractéristique d'assemblage est définie comme une association entre deux caractéristiques de forme sur deux composants différents tandis que dans [MAS-94] une caractéristique d'assemblage est définie comme l'interaction entre deux éléments par l'intermédiaire d'une liaison orientée.

Si le concept des caractéristiques ne trouve pas de définition consensuelle, nous pouvons

dire que la caractéristique est un ensemble d'entités dont le regroupement a une signification particulière. On dénombre ainsi les caractéristiques de formes, de conception, d'usinage et bien d'autres. Cependant, dans le chapitre trois, nous proposons notre propre définition d'une caractéristique d'assemblage. Celle-ci allie des informations de nature géométrique et d'autres de natures technologique et fonctionnelle.

1.2.3.3-Intégration sur un modèle de produit

Pour automatiser la prise de décision en assemblage, il est nécessaire de fournir au système une structure des caractéristiques d'assemblage comparable à celle que perçoit le préparateur et de la doter d'une logique de raisonnement comparable à celle de l'expert. Cette structure constitue le modèle du produit. Cette démarche correspond aussi à une restriction de l'information disponible par la suite pour l'analyse du problème posé. Les solutions obtenues sont les résultats de l'information contenue dans le modèle. Les travaux de la plupart des chercheurs développés autour des différentes activités liées à l'assemblage ont fait appel à la notion de modèle du produit pour stocker les caractéristiques. Une classification des différents modèles peut s'avérer difficile. Nous pouvons cependant en donner un aperçu représentatif au travers de certains critères qui nous semblent pertinents:

Le graphe de liaisons: c'est le modèle utilisé dans un grand nombre de travaux. L'intérêt de l'utilisation des graphes est lié à un solide fondement mathématique et à une implémentation informatique relativement aisée et dont la complexité présente l'avantage de demeurer constante quelle que soit la taille du problème. La théorie des ensembles et celle des graphes permettent de résoudre un certain nombre de problèmes avec élégance. Les auteurs des travaux suivants [BOU-84], [DEF-87], [WHI-88], [HEE-89], [HEN-89], [HOM-89], [HOM-90], [MAS-90], [MAT-90], [WOL-91], [HUA-91], [DEL-91], [LAP-91], [REQ-91], [DEL-92], [HEN-92], [LEE-92], [LEE-93], [LIU-93], [MAS-94],

[GUI-94], en tirent profit pour représenter un produit sous la forme d'un graphe d'adjacences où les noeuds sont les pièces, les arcs, les liaisons entre les pièces et les attributs les valeurs numériques spécifiant les caractéristiques propres aux arcs (degrés de liberté, type de liaison, type d'attachement, un poids pour caractériser la rigidité de la liaison [LEE-92]). Un exemple d'un graphe de liaisons, tiré de [HUA-91], est illustré sur la figure A1 (annexe A). Dans d'autres modèles, les liaisons ne résultent pas seulement de contact physique mais aussi d'autres situations telles que blocage ou emboîtement [HEE-89] et interférence [WOL-91], [LAP-91], [REQ-91], [LEE-92], [LEE-93].

Le modèle conceptuel intégré: le modèle est basé sur l'union de différents modèles et la mise en oeuvre de liens de correspondance. Les différentes parties de ce modèle sont identifiées en modules ayant en charge différents types de caractéristiques. Dans [LIN-93], trois modules sont créés pour la représentation des informations non géométriques dans un assemblage. Le premier module est consacré pour les éléments de machines standards comme les engrenages, les roulements à billes, les ressorts, etc. où on représente les informations nécessaires pour l'assemblage de chaque élément. Le deuxième module est pour les attachements où on mentionne le type, la méthode de fixation et les composants liés par cet attachement. Le troisième module est pour présenter les *assembly design intents* et ceci à plusieurs niveaux. Le premier niveau est pour choisir les sous-assemblages par le concepteur et à ce niveau on détermine le composant de base de chaque sous-assemblage. Le deuxième niveau sert à présenter l'affectation des liaisons entre les composants durant le processus d'assemblage. Le troisième niveau représente les relations de précédences entre les composants ou les sous-assemblages. Dans [CHA-88], les connaissances de base sur un produit sont groupées dans un module appelé "*Knowledge base*". Ce dernier comprend trois sous-modules. Le premier ("*Workpiece structure*") contient toutes les informations sur les composants du produit (forme, matériau, liaisons avec les autres composants, etc.). Le deuxième

("*Assembly principles*") contient les contraintes de précédences entre les composants et celles qui doivent être satisfaites si certaines conditions sont remplies (si par exemple la surface saisie est *smooth*, il faut utiliser un *rubber gripper*). Le troisième ("*Assembly operations*") décrivent les actions robots qui doivent être appliquées pour changer l'état du produit. Ces actions sont formulées en fonction de la capacité du manipulateur et de l'utilité opérationnelle.

La structure de données pour supporter les caractéristiques: Une solution pour intégrer les différents types d'informations du modèle consiste à utiliser une approche orientée objets telle que les *frames* [SHA-92], [SHA-93], un langage spécialisé de programmation [GLO-86], [HENS-93], [DEF-93], [SUG-94], [PRI-96], [RAJ-96], [VAN-96]. Cette approche permet d'établir facilement des relations entre caractéristiques ou entre objets. Elle est souvent utilisée par les chercheurs qui modélisent le produit à partir de la définition de sa structure hiérarchique.

Le modèle mathématique: Cette approche spécifique à [SAN-92a], [SAN-92b] permet une représentation des liaisons existant entre les composants d'un produit sous forme matricielle d'où une matrice d'interférence, de contact et la dernière de connection suivant une direction donnée. Les éléments de ces matrices sont des valeurs binaires déterminées en fonction de la relation de contact entre les composants comme l'indique la figure A2 en annexe A. L'avantage de cette approche, c'est la simplicité de représentation. Son inconvénient, c'est qu'elle ne permet pas d'associer des caractéristiques aux composants.

1.2.3.4-La reconnaissance des caractéristiques

Dans les systèmes qui suivent cette approche, la phase de définition des caractéristiques d'assemblage comprend en général deux méthodes:

- la méthode manuelle,
- la méthode algorithmique.

La séquence est répétée récursivement afin de convertir le modèle géométrique en un modèle de caractéristiques. Le processus est illustré sur la figure 1.3.

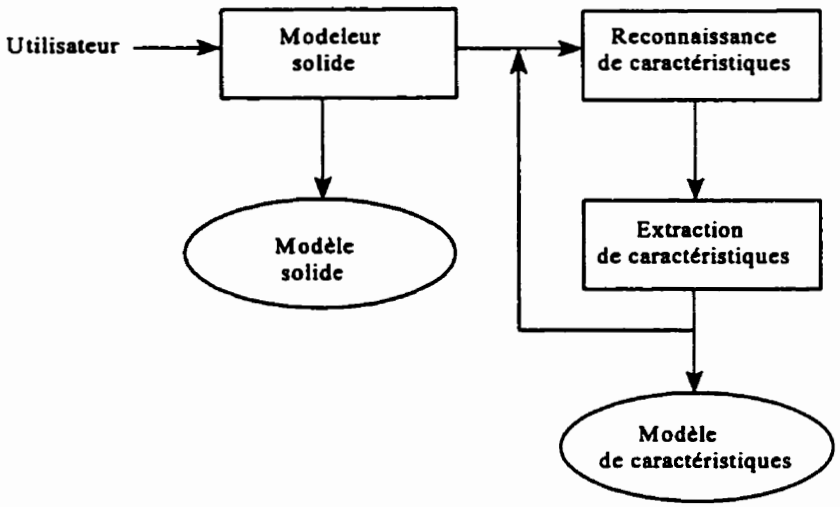


Figure 1.3. Processus de reconnaissance des caractéristiques (inspiré de [DEN-93])

1.2.3.4.1-La méthode manuelle

La plupart des systèmes actuels de CFAO sont dirigés pour créer des modèles géométriques de composants avec seulement quelques performances analytiques pour modéliser les assemblages (création de l'assemblage, vue éclatée, détection des interférences, etc.). Pourtant, il y a un ensemble d'informations d'ordre technologique ou fonctionnel qui doit être représenté sur le modèle du produit. Parmi ces informations, mentionnons la nomenclature utilisée pour identifier les pièces et le produit. Il y a aussi les caractéristiques intrinsèques aux pièces et à leurs faces telles que le matériau, l'état de surface, les tolérances, etc. Une autre catégorie très importante concerne les caractéristiques relatives aux procédés d'assemblage comme le vissage, soudage, etc.

Dans les modeleurs solide actuels, il n'y a aucune possibilité de les représenter, elles doivent donc être associées manuellement par l'usager pour enrichir le modèle du produit.

L'hypothèse de similarité géométrique d'une même famille de pièces invite parfois à la conception complète d'une seule pièce et à définir des instances de cette pièce [WAN-93], [DEF-93]. Ceci permet d'appliquer les caractéristiques à l'ensemble de la famille de pièces.

Dans [SHA-92], [SHA-93] les paramètres dépendants (comme par exemple la position d'un cylindre dans un trou) ou indépendants (comme par exemple la profondeur d'insertion) doivent être spécifiées par l'usager. Ceci sert à vérifier l'assemblabilité entre deux caractéristiques conjuguées.

Dans [SOD-91], [SHA-92], [CHE-93], [DEF-93], [SHA-93], [VAN-96] des caractéristiques de forme peuvent être créées directement par l'usager lors de la conception de la pièce. Ceci permet de modifier subséquemment sa forme.

Dans certains travaux [MAS-90], [DEL-91], [HUA-91], [LAP-91], [DEL-92], [HEN-92], [LIU-93], [GUI-94], [MAS-94] des pièces sont identifiées comme des pièces d'attachement. Ceci sert à la modélisation des liaisons entre les pièces.

Dans certains modèles, des caractéristiques comme la priorité d'assemblage [DEL-92], [RED-94], l'élément de base [DEL-92], [LIN-93] sont spécifiés manuellement lors de la modélisation du produit.

Dans [DEL-92], [SAN-92b], [RED-94] l'utilisateur doit identifier la direction d'assemblage de certaines pièces déformables comme les circlips dans le cas où cette

direction ne peut pas être déduite par l'analyse géométrique.

1.2.3.4.2-Les méthodes algorithmiques

La phase de l'identification automatique des caractéristiques à l'aide des méthodes algorithmiques vient souvent en complément de la phase de reconnaissance manuelle. Selon le type du modèle solide utilisé, différentes techniques de reconnaissances peuvent être utilisées.

La reconnaissance des caractéristiques géométriques tridimensionnelles résulte en général de l'usage d'un modeleur solide. Certains utilisent le modèle CSG (Constructive Solid Geometry) [DEL-91], [KLE-91], [LAP-91], [DEL-92], [LEE-92], [SAN-92b], [LEE-93], [RED-94], d'autres, le modèle B-rep (Boundary Representation) [GLO-86], [MAT-90], [REQ-91], [TUR-92], [LIU-93], [WAN-93], [CASE-94], [CHE-93], [PRI-96], [RAJ-96].

L'idée de départ du modèle CSG est que tout composant complexe peut être construit en utilisant des opérations booléennes sur des primitives solides de base: prismes, cylindres, cônes, sphères ou autres. L'objet résultant est alors représenté sous la forme d'un arbre binaire dont les noeuds sont les opérateurs booléens et les feuilles, les primitives de base. Cette représentation peut néanmoins être facilement mise en échec dès qu'interviennent les arrondis et les dépouilles. La structure de données créée n'est pas saine car l'objet est bâti par assemblage de volumes élémentaires et par conséquent sa définition dépend du processus qui a conduit à sa création. Aussi, les applications, basées sur l'évaluation locale de la frontière de l'objet, s'accommodent mal à cette structure. Par conséquent, les modeleurs solides proposent le plus souvent, comme alternative au modèle CSG, le modèle B-rep évalué (les localisations des intersections de primitives sont calculées explicitement).

Selon le modèle B-rep, un objet est décrit par l'ensemble des faces constituant l'enveloppe, chacune de ces faces étant elle-même limitée par son contour d'arêtes. On distingue deux sortes d'information, d'une part les informations géométriques: coordonnées des sommets, équations des faces et des arêtes et d'autre part, les informations topologiques. Un composant est alors défini à partir de certaines entités géométriques et topologiques de base: corps, face, contour, arête et sommet. La représentation B-rep offre l'avantage d'être compacte. La raison tient aux structures de base offertes (topologie et pointeurs), mais aussi à la philosophie de création des pièces.

Outre la définition de la géométrie d'une pièce, les caractéristiques géométriques sont utilisées pour l'identification d'autres caractéristiques. La reconnaissance des caractéristiques relatives aux liaisons entre les pièces peut être déduite automatiquement par la combinaison du type de contact entre les faces conjuguées avec les caractéristiques technologiques concernant les procédés d'assemblage appliqués. Cette démarche correspond aussi à la démarche suivie dans la plupart des modèles vus dans la littérature.

Dans [WAN-93] et [NGO-96], les caractéristiques de contact entre les faces des pièces sont utilisées pour déduire les chaînes de cotes dans un produit. Ce qui permet d'identifier les tolérances dimensionnelles qui doivent être associées à certaines faces des pièces.

Dans [CUT-92], les orientations relatives des faces adjacentes sont analysées pour la reconnaissance automatique des caractéristiques de forme relatives aux pièces du produit. La méthode proposée fait appel à la technique des réseaux de neurones. Cependant, elle est limitée à la reconnaissance de six types de caractéristiques tels que le cube, le cylindre, la poche, le trou, la rainure et l'épaulement.

Dans [MAS-90] et [CHE-93] on utilise le nombre de liaisons, le poids et les dimensions,

relatifs à chaque composant, pour déduire automatiquement le récepteur du produit.

Dans [HEE-89] une méthode est présentée pour identifier les ensembles dont les composants ont certaines caractéristiques communes. Chacun de ces ensembles est alors classifié dans une catégorie de groupe fixée à priori. Le résultat de ce traitement conduit à la génération d'une structure de gamme qui met en évidence le groupement des opérations d'assemblage relatives aux composants.

1.2.3.5-Élaboration des gammes d'assemblage

Dans l'ensemble de la méthodologie générale de la modélisation en assemblage, il est toujours nécessaire d'identifier la chronologie des diverses opérations qui contribuent à la constitution du produit fini. L'étude de cette chronologie permet d'aboutir à la gamme d'assemblage.

D'une façon générale, le nombre de gammes admissibles pour un produit est généralement important et des études effectuées au Charles Stark Drapper Laboratory (C.S.D.L.) ont montré que les coûts d'assemblage pouvaient varier dans des proportions allant jusqu'à 20% suivant la gamme choisie. Le choix d'une gamme donnée joue un rôle important dans la détermination des caractéristiques d'autres tâches tels que le choix des ressources, soit les posages et les préhenseurs, puis, en fonction du temps de cycle contrat et des capacités financières de l'entreprise, le schéma d'implantation du système d'assemblage. Le choix de la gamme d'assemblage occupe donc une situation stratégique puisqu'il assure l'interface entre la conception du produit et celle de la machinerie nécessaire pour l'assembler.

Parmi les travaux actuels orientés vers cet objectif, nous avons vu se profiler deux méthodologies de recherche des gammes opératoires. La première suit le cheminement

de montage. Les composants y sont considérés désassemblés et la recherche porte sur la stratégie de montage [BOU-84], [WHI-88], [HUA-91], [WOL-91], [HEN-92], [LIN-93]. La deuxième méthodologie, qui est la plus couramment utilisée, procède de manière inverse, c'est à dire qu'on cherche comment désassembler le produit fini [HEE-89], [HOM-89], [HOF-89a], [HOF-89b], [HOF-90], [HOM-90], [MAS-90], [MAT-90], [LAP-91], [LEE-92], [SAN-92a], [SAN-92b], [DEF-93], [LEE-93], [CHE-93], [MAS-94], [RED-94]. Cette méthode procède par induction. Elle est la seule qui permette le contrôle de l'explosion combinatoire des solutions. Une analyse rang par rang s'impose de telle sorte à éliminer toutes les solutions inacceptables à chaque rang donné. L'objectif est de déterminer quelques bonnes gammes, et non l'ensemble des gammes acceptables, par l'application de contraintes à chaque rang pour réduire l'espace des solutions.

La formalisation des contraintes d'assemblage est par contre différente d'un travail à un autre. Dans [BOU-84], [DEF-87] et [WHI-88], les contraintes de précédences sont établies grâce à un questionnaire dont le cheminement est guidé par l'analyse d'un graphe connexe d'ordre n. Ce type d'automatisation prend donc appui sur une conduite humaine importante. Il s'agit d'établir les conditions de faisabilité de chaque action fonctionnelle par une méthode plus efficace qu'une exploration systématique. Pour cela, des relations binaires sont définies et des états partiels interdits sont mis en évidence. Une explosion combinatoire des solutions apparaît dans l'utilisation de ces travaux.

Dans [HEN-92], les contraintes d'assemblage ont été formalisées par des relations reliées à trois catégories de contraintes: géométriques, matérielles et de stabilité.

Dans [HOF-90], [DEL-91], [DEL-92], [LIN-93] la détermination des contraintes de précédences entre les composants se fait uniquement à partir de l'analyse des contraintes de faisabilité du positionnement des composants.

L.S. Homem de Mello et A.C. Sanderson [HOM-89], [HOM-90] ont développé un outil d'élaboration d'arbres d'assemblage en utilisant une définition récursive et une représentation en arbre ET/OU. A partir du produit fini, tout arc ou couple d'arc s'éloignant définit, pour le noeud en amont, un sous-ensemble réalisable et, en aval, une pièce, un sous-ensemble ou une opération. Pour Sanderson, un facteur qui a beaucoup d'influence sur le nombre de séquences faisables pour assembler le produit, ce sont les conditions de faisabilité de l'assemblage d'un composant et de la fixation d'un attachement en tenant compte des interférences et des dimensions des préhenseurs qui doivent tenir le composant et l'attachement. Il y a aussi la stabilité qui se traduit par le fait qu'à chaque décomposition du produit, les composants, dans chaque sous-ensemble, doivent maintenir leurs positions relatives. Les algorithmes pour traduire ces conditions n'ont pas été discutés dans la littérature publiée.

Dans [MAS-90], [MAT-90], [SAN-92a], [SAN-92b], [LEE-93] la génération des séquences d'assemblage s'effectue en fonction de la détermination des contraintes géométriques et de la détermination des sous-assemblages stables dans le produit.

Dans [HEE-89], [BON-91] les séquences d'assemblage sont générées après la sélection des ensembles de composants vérifiant la spécification de groupe et de l'identification, par l'utilisateur, des sous-assemblages à priori.

Dans [LAP-91], les séquences d'assemblage sont évaluées à partir du calcul d'un coût relatif à la stabilité interne à chaque sous-ensemble de composants, au nombre de réorientations du produit et au groupement des opérations d'assemblage.

Dans [HEE-89], [HEN-89], [MAS-90], [DEL-91], [DEL-92], [DEF-93] des heuristiques sont utilisées pour évaluer la stabilité, l'accessibilité, la maintenabilité des composants. Ceci permet de sélectionner les meilleures séquences d'assemblage.

Dans [WOL-91], [CHE-93], la sélection des séquences se fait en fonction de l'évaluation du nombre de réorientations et de la complexité de chaque opération d'assemblage à réaliser.

1.2.3.6-La détermination des ressources d'assemblage

Cette activité en assemblage consiste à décider quel type de préhenseurs sélectionner à chaque opération définie dans la gamme d'assemblage. Elle doit aussi permettre d'étudier les surfaces libres, les trajectoires d'insertion, la méthode de jonction entre les caractéristiques conjuguées (*mating features*) des composants. Cette étape de la démarche globale génère une boucle de contre réaction vers la détermination des gammes. Par exemple, certaines opérations ne peuvent pas être exécutées matériellement du fait que le préhenseur n'est pas accessible pour prendre le composant par ses surfaces libres. Dans d'autres cas, les opérations d'insertion mettant en jeu des forces, les surfaces libres sur le récepteur peuvent se révéler mal situées par rapport à la ligne de forces.

Dans [CHA-88], [MAT-90] et [ROM-96] la détermination des ressources d'assemblage se fait simultanément en fonction des séquences d'assemblage sélectionnées. Pour chaque opération d'assemblage, le système cherche dans une librairie de ressources d'assemblage, le type de préhenseur qui convient le mieux pour cette opération en fonction de la géométrie et de la trajectoire d'insertion du composant.

B. Lotter [LOT-86] a proposé une méthode allant dans ce sens et mis au point une démarche qui permet de concevoir une architecture d'atelier grâce à l'analyse fonctionnelle de chacune des opérations définies par la gamme.

[DUB-92] a développé un système nommé RALPH orienté vers l'optimisation de la méthode de préhension et du choix du préhenseur nécessaire pour l'exécution d'une

opération d'assemblage donnée. Ce choix est basé sur l'analyse des spécifications de la tâche à réaliser, des caractéristiques géométriques, des conditions de montage et de la direction d'assemblage de l'objet. Ceci permet d'évaluer trois indices relatifs aux actions liées à la manipulation (*Manipulabilty)*, à la rotation (*Rotability*) et au moment de rotation (*Torquabilty)*. Le choix d'une ressource se fait alors à partir d'une librairie qui contient les différents types de préhenseurs recommandés dans RALPH (voir figure A5 en annexe A).

Dans [DIN-93], nous trouvons une méthode similaire mais plus évoluée du point de vue de l'optimisation dans la sélection des faces de préhension sur un objet en fonction des caractéristiques relatives à ces faces (figure A6 en annexe A). Cependant, elle est restreinte au cas des préhenseurs à deux mâchoires.

1.2.3.7-Optimisation par simulation

L'optimisation du comportement du système d'assemblage nécessite que les idées du concepteur puissent être testées et simulées. La simulation passe par la mise en place d'un modèle facile à représenter à l'aide du langage de simulation proposée, il est alors souvent différent du modèle mathématique.

L'étude d'un système d'assemblage débute par le recensement des aspects que l'on veut observer. il s'agit par exemple: des rendez-vous entre composants, du taux de production des machines, des taux de pannes et de réparation, etc.

Chacun de ces aspects se traduit par un ou plusieurs critères numériques. Par exemple, le taux de production technique peut se traduire par le taux moyen sur une période de temps et par l'écart-type de ce niveau.

Le modèle recherché est un modèle de simulation. Il se distingue d'un modèle mathématique en ce sens que les critères en simulation ne sont bien souvent que des caractéristiques locales, alors que dans les approches analytiques, ils sont significatifs du fonctionnement global du système ou, au moins, de l'ensemble du phénomène étudié. En fonction du degré du détail demandé, l'approche par simulation exige une connaissance moins approfondie du système que l'approche analytique. Il faut distinguer à ce niveau de réflexion, les simulations des flux de pièces dans une installation d'assemblage et les simulations géométriques, reproduisant les mouvements relatifs des différents corps mobiles et des pièces d'une installation.

Dans la simulation géométrique, le modèle des composants ou des machines correspond à un modèle géométrique rigoureux des formes et des enveloppes considérées. Le modèle permet d'intégrer les notions de géométrie et de temps, il est construit autour de trois opérations principales: la manutention, le déplacement et le stockage. Il permet à la fois de concevoir l'installation et de l'optimiser, on peut lui greffer des post-processeurs permettant la génération du code machine [MIL-89], [MILL-91].

Dans la simulation de flux de pièces, on peut distinguer les modélisations effectuées à l'aide de réseaux de file d'attente, à l'aide des réseaux de Pétri ou par objets. La plupart de ces travaux sont consacrés à des simulations d'ateliers d'usinage. Certains sont écrits dans des langages spécialement conçus à cet effet [KAM-89], D'autres, encourent à la technique de simulation par génération aléatoire d'événements. Il s'agit d'un modèle informatique qui permet de déclencher, selon des lois de distribution de probabilités fixées à l'avance et de comptabiliser en temps accéléré, toutes les opérations (y compris les pannes), [BJO-90].

Parmi les simulations effectuées à l'aide des réseaux de file d'attente, on peut citer les travaux de [SKU-91] et de [ABE-91].

Dans les simulateurs à événements discrets basés sur les réseaux de Pétri, [CHAP-90] est un bon exemple.

Enfin, parmi les simulations par objets (les objets étant: opération, phase, pièce, ressource, station, stock, transport, transfert), on peut citer celles de [FIG-90].

1.3-Conclusion

Les activités de recherche couvrent un ensemble de domaines qui visent à supporter le cycle d'élaboration de produit c'est-à-dire incluant sa conception, sa fabrication et son assemblage par un support informatique compact et efficace.

La phase de conception, dont la durée relativement à celle de la vie du produit est faible, est à l'origine de la majeure partie des coûts induits. C'est une activité de création sous contraintes. Dans un système idéal, l'aspect créativité est l'attribut du concepteur humain tandis que la gestion des contraintes devrait pouvoir être confiée au système qui le supporte.

Les activités de fabrication et d'assemblage apparaissent comme des sorties de l'activité de conception sous la double contrainte de disponibilité des ressources et de minimisation du coût. Ces deux activités, peu créatives mais extrêmement interprétatives et déductives, doivent être automatisées.

L'automatisation apparaît avant tout comme relevant d'un problème de communication entre les divers intervenants. Un problème de communication survient entre deux acteurs lorsque l'objet de la communication n'est pas le même ou que, bien que s'agissant du même objet, la signification qui lui est donnée par chacun est différente. Il se résume donc à un problème d'objet et de sémantique de l'objet. Pour que l'objet soit le même

vis-à-vis du concepteur et du préparateur à la fabrication ou à l'assemblage, il faut que la représentation du produit soit la même pour tous. Pour qu'elle soit significative vis-à-vis de chacun, il faut qu'elle possède une valeur sémantique suffisante.

Les caractéristiques apparaissent à cet égard comme des véhicules privilégiés d'information entre les phases d'élaboration de produit. La détermination des gammes et des ressources dans le cadre d'une activité de préparation à l'assemblage apparaît aussi être une étape essentielle dans le processus global. Les autres tâches liées à l'assemblage (optimisation par simulation, conception de l'atelier d'assemblage) n'étant définies qu'ultérieurement en fonction des données issues de cette étape.

Dans le chapitre suivant nous nous intéressons de manière plus précise à l'activité de préparation à l'assemblage. Nous chercherons avant tout à mettre en évidence les éléments qui favorisent la prise de décision lors de cette activité. Nous montrerons ensuite comment une approche intégrée des activités de conception et d'assemblage peut utiliser ces éléments, de manière à définir le modèle de produit requis.

CHAPITRE 2
LA PRÉPARATION À L'ASSEMBLAGE

2.1-Introduction

Nous avons défini dans ce qui précède, les différentes phases du cycle d'élaboration d'un produit, considéré l'état de l'art des outils et techniques qui les supportent et mis en évidence les activités liées à l'assemblage. L'objectif de ce deuxième chapitre est de parvenir à une formalisation détaillée de l'activité de l'assemblage intégrée à celle de la conception.

Nous commençons par identifier les éléments caractéristiques d'un système d'aide à la préparation à l'assemblage. Nous caractérisons ensuite les flux d'informations nécessaires pour permettre au cycle d'élaboration de produit de supporter une approche d'ingénierie simultanée en tenant compte des règles qui dirigent la détermination des gammes et des ressources d'assemblage. Le système doit alors proposer en sortie une gamme d'assemblage composée d'opérations impliquant successivement, dans un ordre bien défini pour une séquence à respecter, des ressources d'assemblage adéquates.

2.2-Système de préparation à l'assemblage

Dans le chapitre précédent, nous avons parlé en détail des différents objectifs liés à l'activité de préparation à l'assemblage. Si l'on considère cette activité comme un système, on peut le représenter comme sur le schéma de la figure 2.1.

Dans l'approche séquentielle du cycle d'élaboration de produit, l'intégralité des spécifications nécessaires à la préparation à l'assemblage est présentée sur les documents

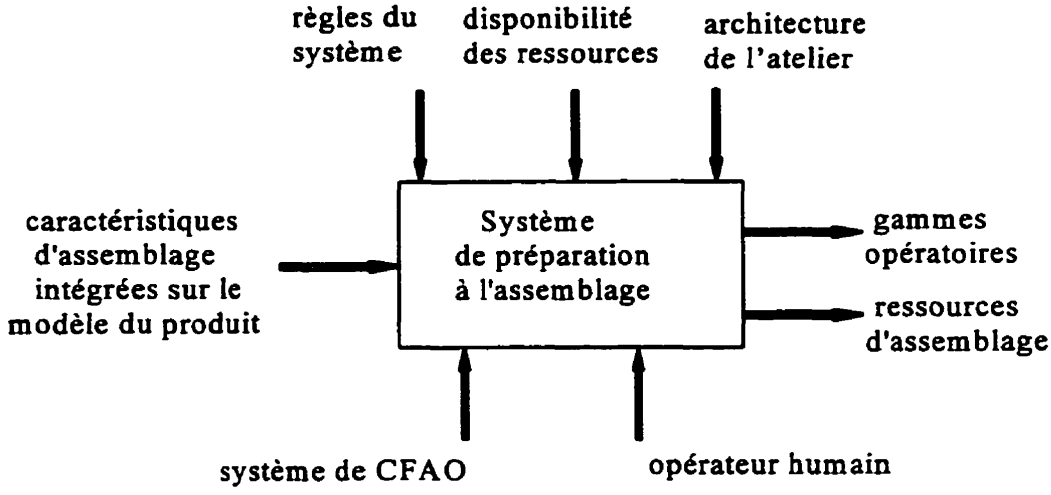


Figure 2.1. Système de préparation à l'assemblage

résultant de l'activité de conception qui sont les plans d'ensemble et de détails. Ces spécifications sont alors utilisées comme la base de données permettant au préparateur de définir le modèle des entrées du système traduisant ainsi la proposition globale de conception en une possibilité globale d'assemblage.

Dans le cas d'une approche intégrée de ces activités, les entrées du système se limitent aux spécifications du produit représentées sous la forme de caractéristiques intégrées sur le modèle du produit. De manière comparable, l'objectif du système de préparation à l'assemblage est de traduire les propositions locales ou globales de conception en possibilités d'assemblage exploitant au mieux le niveau de détail inévitablement variable des propositions.

Dans les deux cas, le système est soumis à un ensemble de règles qui définissent les méthodes de détermination des sorties du système et à un certain nombre de contraintes plus flexibles pouvant être modulées en interaction avec la disponibilité des ressources.

La prise en compte de ces derniers éléments n'est pas a priori du ressort du préparateur à l'assemblage, mais les conséquences des décisions de préparation à l'assemblage interviennent au moment du passage à l'affectation des tâches pour la réalisation des différentes opérations. Ceci peut impliquer dans certains cas le réordonnancement ou la reconsidération de la gamme afin de permettre son réordonnancement.

La prise en compte au plus tôt de ce facteur permet donc non seulement de relaxer les contraintes pesant sur les activités avales mais aussi d'éviter les boucles inutiles.

On peut donc caractériser l'activité de préparation à l'assemblage, discrète ou intégrée, comme une activité fortement contrainte dont la fonction est de traduire les propositions de conception en possibilités (ou impossibilités) d'assemblage en prenant en compte les caractéristiques de l'ordonnancement d'atelier, qui concernent principalement la disponibilité des ressources. Notons qu'une impossibilité d'assemblage invalide une proposition de conception.

2.3-Influence d'une approche d'ingénierie simultanée

Outre l'amélioration de la qualité, l'objectif principal de l'ingénierie simultanée est la minimisation du temps d'élaboration total du produit, par l'intégration maximale des différentes fonctions conduisant idéalement à leur recouvrement partiel. La figure 2.2 montre comment le cycle d'élaboration peut être mené de manière concourante suivant les aspects conception, fabrication et assemblage dans le respect du principe d'antériorité de la proposition de conception sur l'analyse des procédés de production.

Dans le cycle d'élaboration de produit présenté ci-dessus, nous distinguons quatre niveaux d'étude:

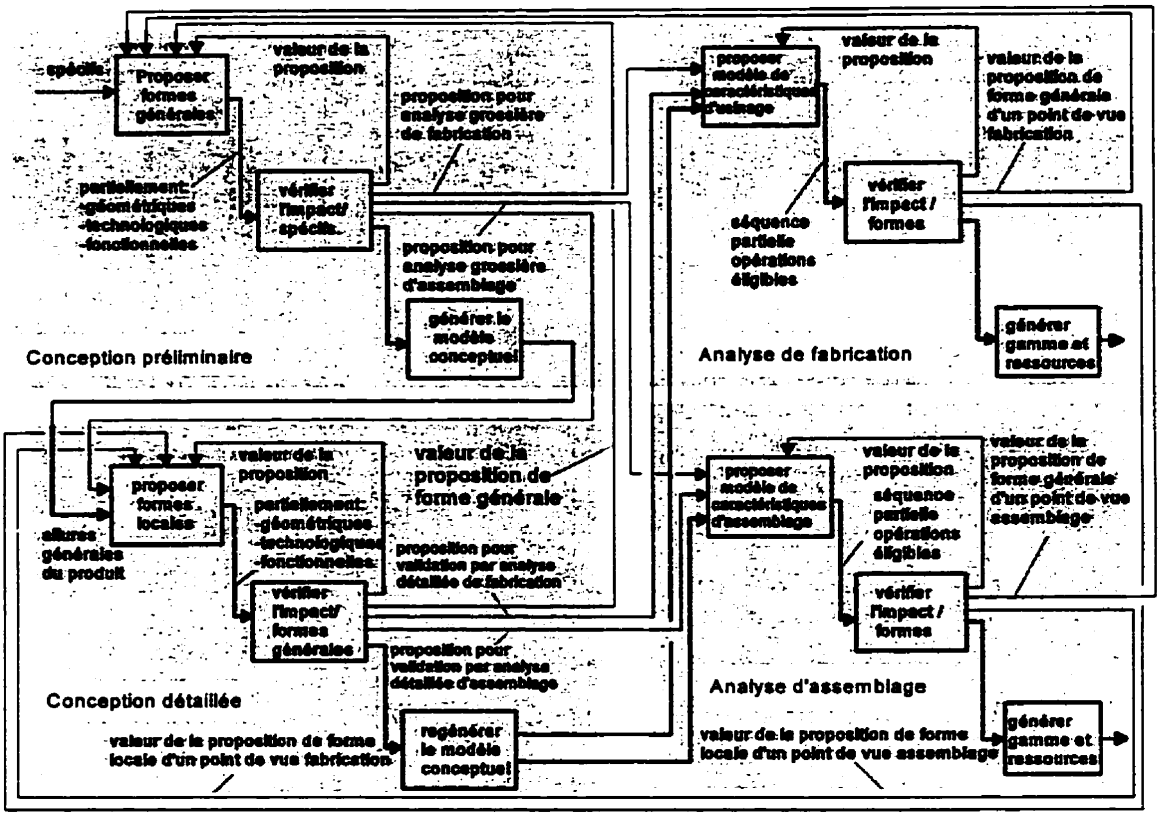


Figure 2.2. Cycle d'élaboration d'un produit

- un niveau de conception préliminaire, dans lequel sont définies les spécifications et les formes générales des pièces du produit,
- un niveau de conception détaillée, dans lequel on s'intéresse de manière plus fine aux zones des pièces ou du produit présentant localement un intérêt du point de vue fonctionnel,
- un niveau d'analyse de fabrication, dans lequel on s'intéresse à l'élaboration du processus d'usinage approprié des pièces modélisées,
- un niveau d'analyse de l'assemblage, dans lequel on s'intéresse à l'élaboration du processus d'assemblage du produit modélisé.

Les liens présentés en traits fins indiquent les possibilités d'analyse anticipée des

répercussions des choix de conception sur le modèle de fabrication et d'assemblage. Ils permettent d'envisager une approche de conception pour la fabrication, pour l'assemblage et pour les deux simultanément; les propositions de conception étant selon les cas validées, optimisées ou invalidées.

Notons que le modèle de produit est évolutif, que sa construction s'opère simultanément sur plusieurs niveaux de détail et se répartit indifféremment dans les quatre phases, l'élaboration du produit se faisant ainsi de manière parallèle, simultanée, en convergeant vers le meilleur compromis produit/processus. Cette façon de procéder est d'ailleurs tout à fait adaptée à la logique de conception de l'homme et favorise la mise en oeuvre d'un protocole d'interactivité extrêmement efficace. L'homme a la charge de proposer des solutions en usant de sa faculté de créativité tandis que la machine se charge, grâce à sa puissance de calcul, de gérer les conséquences des choix effectués à chaque niveau sur les autres niveaux.

Le problème restant à résoudre est l'identification des éléments pertinents, dans un modèle partiel ou complet de conception, pour permettre l'automatisation des évaluations des propositions de conception par l'analyse de la fabrication et de l'assemblage.

L'automatisation de l'assemblage dans une optique d'ingénierie simultanée nécessite donc la définition d'une interface de communication de la conception vers la préparation à l'assemblage, permettant l'interprétation automatique complète et non-ambiguë des propositions de conception. Ces propositions doivent être validées, évaluées ou simplement estimées ce qui implique:

- le recensement des informations qui, dans le modèle de conception sont pertinentes pour le préparateur,
- la définition des caractéristiques qu'il est nécessaire de trouver dans le modèle des

entrées pour favoriser une analyse déterministe de la préparation à l'assemblage. Ces caractéristiques visent à compléter le modèle des entrées issues de la phase de conception,

- la formalisation du processus décisionnel du préparateur à l'assemblage afin de satisfaire les règles du système.

Un système d'aide à la préparation à l'assemblage compatible avec les objectifs d'ingénierie simultanée doit aussi proposer un modèle de gamme flexible, permettant une intégration plus poussée des fonctions d'ordonnancement et de conduite d'atelier. Il doit tenir compte des résultats du contrôle de produit qui peuvent constituer une validation pour la fonction de préparation à l'assemblage ou, le cas échéant, un indicateur de la nécessité de modifier les paramètres susceptibles d'avoir provoqué l'invalidation d'une gamme proposée. Mais une fois encore, la prévention des défauts est préférable à leur correction.

2.4-Les éléments caractéristiques du système de préparation à l'assemblage

Dans ce qui précède, nous avons considéré l'activité de préparation à l'assemblage comme un système qui se définit par ses éléments caractéristiques que sont ses entrées, ses règles et ses sorties. Afin de remplir les objectifs cités auparavant, dans les paragraphes suivants nous allons successivement:

- examiner les entrées telles qu'elles se présentent dans un modèle du produit,
- formaliser les règles permettant de générer de manière systématique les sorties au moyen des entrées,
- définir les sorties.

2.4.1-Les entrées

2.4.1.1-Le modèle solide des pièces

Le modèle solide est une représentation informatique et non ambiguë de toute géométrie d'une pièce dans un assemblage dans le logiciel de CFAO associé. La représentation du modèle se fait en général suivant deux approches:

- une approche de construction géométrique solide (CSG). Les pièces sont alors représentées par des primitives (prismes, cylindres, cônes, tores ou sphères) et des opérateurs booléens agissant sur celles-ci,
- une approche de B-rep (Boundary representation) qui se compose d'une liste hiérarchique d'entités définies topologiquement, telles que les corps, les faces, les arêtes et les sommets, et géométriquement telles que les surfaces, les segments, les arcs ou les points. Les relations entre ces entités sont également conservées de manière à mémoriser qu'une face appartient à un solide, qu'une arête appartient à une face, etc. Pour ce type de modélisation, les faces sont des entités déterminantes dans la prise de décision en préparation à l'assemblage. Mais les relations qui existent entre ces faces sont également très importantes.

À ce stade de modélisation, les caractéristiques de forme peuvent être utilisées pour définir la topologie d'une pièce [SHA-92], [SHA-93], [CHE-93] ou même comme des faits topologiques sur cette dernière [SOD-91], [CUT-92], [DEF-93], [VAN-96]. Ces dernières regroupent de manière générale un ensemble de faces en vertu de particularités essentiellement topologiques.

La reconnaissance des caractéristiques de forme dans le modèle du produit présente un intérêt du point de vue du séquencement des opérations d'usinage des pièces, dans la

mesure ou l'ensemble de faces constituant la caractéristique telle que nous la définissons peuvent être usinées dans une même opération. Cet intérêt est tout aussi important pour la sélection des procédés d'usinage, puisqu'une caractéristique de forme, réalisée dans une même opération, peut impliquer un procédé de fabrication commun pour chacune des faces la composant. Elle peut aussi être utilisée pour l'analyse des conditions de montage d'un point de vue de l'association entre des entités ayant des formes bien définies sur deux pièces. Cette donnée présente donc une utilité dans le cas d'un système intégré de préparation à la fabrication et l'assemblage.

Cependant, elle n'a pas présenté un intérêt commun à tous les modèles vus dans la littérature. On peut lier ce phénomène au fait qu'il n'est pas toujours facile de définir une caractéristique de forme au moyen d'un langage de définition et que les cas particuliers comme les caractéristiques intersécantes qui modifient la topologie doivent être traités par des règles dédiées. Si le nombre de caractéristiques augmente, on assiste à une explosion combinatoire de cas particuliers. D'un autre côté, par la définition elle-même d'une caractéristique de forme comme étant un ensemble de faces, la modélisation des informations à ce niveau (faces) se révèle donc suffisante pour tirer toutes les informations aux niveaux supérieurs (pièces, sous-assemblage) même si cette notion ne figure pas sur le modèle.

2.4.1.2-La nomenclature

La nomenclature émanant de la conception est un support de données qui permet la description du produit sous forme alphanumérique. Elle ne peut pas être extraite automatiquement du modèle, mais c'est un support de l'expertise du concepteur sur la structure du produit.

La nomenclature porte sur le nom et le numéro de position donnés au composant

conformément au plan d'ensemble du produit. Ici, il est possible de distinguer une pièce d'un sous-assemblage et de représenter leurs caractéristiques ou leurs signes distinctifs. Cette nomenclature portera aussi sur des caractéristiques d'importance variable dans la détermination d'une gamme. Par exemple, un ensemble de n vis identiques placées sur une même face sont généralement assemblées par une tête multiple, donc de manière simultanée. Elles peuvent être numérotées de manière unique, tout en spécifiant leur quantité, et leur montage considéré comme une seule opération, même si ce n'est pas le cas. La nomenclature est ainsi utilisée pour spécifier la qualité de groupe qui doit être associée à cet ensemble de composants.

Cependant, pour l'assemblage, il se peut que la nomenclature provenant de la conception ne soit pas adéquate ou encore que l'expert en assemblage désire imposer sa structure du produit. C'est donc une donnée d'entrée réellement modifiable et flexible et qui représente une vue particulière d'un concepteur ou d'un préparateur face au produit. Ainsi le générateur de gammes pourra être lancé pour le même produit restructuré, et les séquences d'assemblage obtenues différeront du lancement précédant. Cette particularité ouvre la porte à différents systèmes de gestion de nomenclature auxquelles sont liées les séquences d'assemblage. On sait que la gestion des nomenclatures, notamment sur le plan des variantes de produit, est un sujet à part entière.

2.4.1.3-Les sous-assemblages

Les différentes méthodes de recherche exhaustive des gammes d'assemblage admissibles pour tout produit donné se heurtent toutes à un problème majeur: l'explosion combinatoire inhérente à la nature du problème abordé. Le nombre de solutions obtenues et le nombre de questions posées à l'expert croissent très rapidement avec la taille du produit étudié. Le problème de l'explosion combinatoire induit donc la nécessité de fractionner le produit en sous-produits de taille raisonnable. C'est ce que nous

appellerons les sous-assemblages.

Si nous examinons les stratégies de mise en évidence des sous-assemblages, rencontrées dans la littérature, nous relevons une distinction au niveau de la chronologie de traitement. Sur ce sujet, l'étude menée par C. Mascle [MAS-90] identifie trois stratégies de recherche des sous-assemblages dans un produit:

- a priori,
- a posteriori,
- a propos.

Les **sous-assemblages a priori** apparaissent dans la nomenclature du produit. Ils sont incontournables à partir de la conception et on doit absolument en tenir compte comme sous-assemblages. Chaque sous-assemblage apparaît alors dans un plan de sous-ensemble comprenant sa propre nomenclature détaillée. Il faut remarquer que certains sous-assemblages a priori sont obligatoires afin de trouver un ensemble de gamme possibles. Ainsi, le micro-moteur montré sur la figure B1 (voir annexe B), contient un sous-assemblage obligatoire. Ce denier est formé par l'axe du piston (4), la bielle (5), les deux bouchons (11), les deux bagues (12) et le piston (13).

La recherche des **sous-assemblages a posteriori** s'effectue à partir des séquences composant les gammes d'assemblage. Il s'agit donc de repérer, parmi toutes les séquences temporelles obtenues, celles qui représentent des sous-assemblages indépendants. Une telle distinction pourra être un élément de choix parmi toutes les gammes obtenues.

Cette recherche ne réduit pas le problème posé par le grand nombre de composants, elle permet cependant une mise hors ligne d'une partie des opérations d'assemblage. La

recherche et la mise en évidence de sous-assemblages a posteriori sont très bien formalisées par A. Bourjeault [BOU-87].

Quant au traitement des **sous-assemblages a propos**, il se fait au fur et à mesure de la détermination des gammes d'assemblage du produit. Le sous-assemblage se comporte comme une entité qui a le même comportement qu'une simple pièce. Un exemple de traitement a propos est constitué par les méthodes proposées par L. Laperrière [LAP-91] et S. Lee [LEE-93], qui consistent à sélectionner un groupe de sous-assemblages présumés en décomposant un graphe de liaison en un groupe de sous-graphes tout en se basant sur des indices de sélection de la stabilité. Une autre méthode intéressante dans le traitement des sous-assemblages a propos est proposée par C. Mascle [MAS-90] et Santochi [SAN-92b]. Elle consiste à repérer les sous-ensembles dont les pièces sont stables et puis à vérifier que chacun de ces sous-ensembles autorise la poursuite de l'assemblage du produit. Cette méthode utilise un algorithme de recherche des sous-assemblages basé sur le modèle des liaisons décrit précédemment.

L'existence d'un sous-assemblage complet, possible et stable dans un produit est une donnée importante pour l'analyse globale du processus d'assemblage. Elle s'impose dans la mesure où les méthodes doivent déterminer si le sous-assemblage nécessite un préhenseur spécial pour le positionnement ou la stabilisation d'un ou de plusieurs de ces composants. Elle convient aussi afin d'adopter, pour ce sous-assemblage, une représentation spécifique à l'intérieur de la représentation globale du processus d'assemblage. Cette représentation est nécessaire lors de l'analyse du processus d'assemblage du sous-assemblage. Elle engendre donc une nouvelle modélisation du produit qui reflète la décision du préparateur à l'assemblage sur le modèle de conception car c'est lui qui va, de par ses connaissances d'expert, effectuer les choix qui s'imposent entre différentes alternatives objectivement sensés. Les décisions prises à ce niveau ont pour objectif l'optimisation du processus, par le choix raisonnable d'une solution parmi

plusieurs éligibles. Elles font également appel à l'expérience du préparateur dans la mesure où elles sont prises en application de règles non universelles et souvent empiriques.

2.4.1.4-Le récepteur

Les règles 3.4 et 3.5 énoncées dans [MAS-90] donnent une description très claire du rôle du récepteur dans le processus d'assemblage d'un produit.

> *"tous les composants d'un produit sont montés sur un composant particulier qui permet de lier fixement son référentiel au référentiel produit. En terminologie d'assemblage, on lui donne le nom de récepteur."*
>
> *"le récepteur est le composant déposé lors de la première opération d'assemblage d'un produit à chaque niveau."*

Le récepteur se distingue donc comme étant le composant permettant un rattachement précis du référentiel produit au référentiel machine. Ceci résulte de sa fonction en tant que composant non mobile et fixé dans le posage. Le référentiel machine de base étant défini par rapport à cet élément. À chaque fois qu'un nouveau composant est assemblé, la transformation de ce dernier par rapport au référentiel de base sera connue.

L'existence d'un récepteur dans un produit fait d'ailleurs partie des recommandations généralement admises pour la conception des produits à assembler. Il convient donc de permettre à l'expert de définir un tel composant pour le produit complet et pour chaque sous-assemblage imposé s'il y a lieu. L'existence du récepteur ne réduit pas le nombre des gammes d'assemblage admissibles, mais elle fait de toute gamme, une gamme ordonnée.

2.4.1.5-Les caractéristiques de liaisons entre les composants

Les liaisons dans un produit sont parmi les caractéristiques les plus importantes. En effet, à partir de ces liaisons nous déduisons les directions d'assemblage ainsi que d'autres caractéristiques qui jouent un rôle primordial dans un système intégré de préparation à l'assemblage.

Cependant, l'assemblage consiste en l'établissement de liaisons entre les composants. Ces liaisons sont rendues fonctionnelles par les procédés appliqués comme le vissage, le soudage, etc. Les opérations d'assemblage sont donc considérées selon deux phases:

- une phase qui met les faces en contact et réalise ainsi l'amorce de la liaison géométrique,
- une phase de procédé qui fait appel à des actions technologiques.

La première phase s'appuie donc sur un modèle géométrique des composants et la deuxième phase sur un modèle technologique des liaisons.

Dans la littérature, les modèles qui tiennent compte de cette hypothèse [HOM-90], [MAS-90], [HUA-91], [LAP-91], [DEL-92], [HEN-92], [LEE-93], [LIN-93], [LIU-93], [GUI-94], [MAS-94] représentent les liaisons comme résultant du contact des caractéristiques conjuguées (*mating features*) et de l'ajout des composants comme les vis, les rivets, etc. que les auteurs appellent les composants d'attachement. Ce critère a des limitations pour les raisons suivantes:

• Il implique la définition d'un seul type de liaison sur ces composants. Ces derniers ont, par ailleurs, une représentation sur un modèle de produit qui résulte de l'application de certaines actions technologiques (ex. des rivets et des anneaux élastiques). Ceci ne permet

pas la caractérisation du processus traduisant le changement d'état (ou la déformation) qui se produit à la suite de l'application de ces actions. Il en résulte une impossibilité de déduire les directions d'insertion de ces pièces lors de l'élaboration de la gamme d'assemblage. Pour cette raison, certains auteurs tels que A. Delchambre [DEL-92] ont procédé de façon interactive pour spécifier de telles directions. Pour d'autres auteurs, ces pièces ne sont pas considérées comme des composants qui doivent être assemblés. Une telle hypothèse correspond à une simplification du problème qui ne permet pas d'effectuer une analyse complète des différentes contraintes imposées sur l'assemblage du produit.

• Il limite la réalisation des actions technologiques à certains types de techniques. Ce qui n'est pas toujours vrai, puisque dans certains cas la fonction de certaines pièces dans le produit pourrait être assimilée à un attachement. C'est ainsi le cas du produit sur la figure 2.3(a) (représentant une portion d'une vanne hydraulique) où la liaison entre les pièces (1) et (2) est comparable à celle entre une vis et un écrou. C'est aussi le cas du produit donné sur la figure 2.3(b) (représentant une partie d'une bielle de commande), où la pièce (1) joue le rôle d'un boulon malgré qu'il n'est pas un composant d'attachement. Dans d'autres cas, la méthode d'assemblage de certaines pièces nécessite un processus spécial bien que le composant n'est pas un attachement. C'est par exemple le cas des segments d'étanchéité 1 et 2 (figure 2.3(c)) dont la méthode d'assemblage sur le piston est comparable à celle d'un anneau d'arrêt (circlips). Cependant la fonctionnalité du segment est d'assurer l'étanchéité entre la culasse et le piston.

• Il limite la fonctionnalité de ces pièces à l'attachement seulement. Ce qui n'est pas toujours vrai car, dans certains cas, ces dernières ont une fonctionnalité différente. Ceci peut aussi être mis en évidence d'après la définition donnée dans la norme AFNOR à une vis:

> *"les vis sont des composants filetés munis d'une tête permettant l'entraînement et d'une extrémité adaptée pour réaliser différentes fonctions mécaniques telles*

que assemblage, pression, arrêt, guidage et blocage".

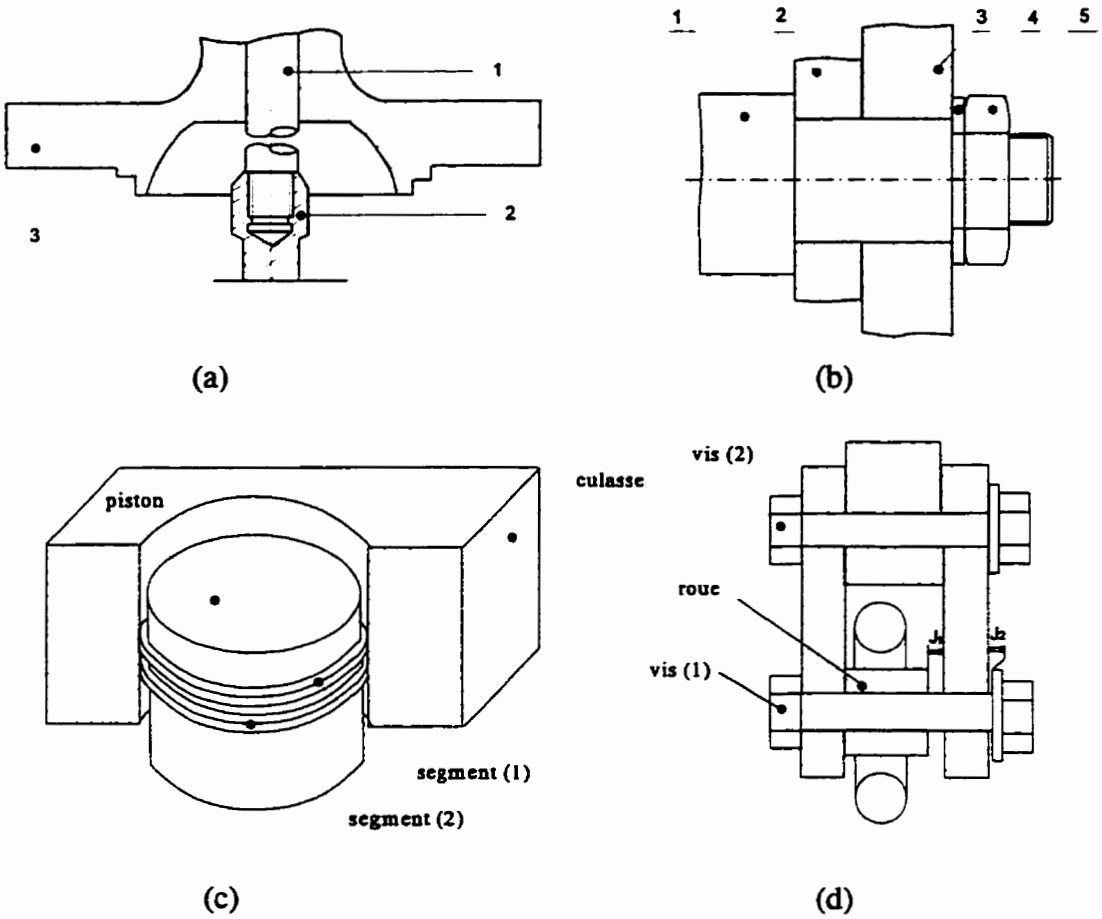


Figure 2.3. Exemples de plusieurs produits

On peut remarquer ce fait sur le produit de la figure 2.3-(d) (tiré de [WAN-93]), où la vis 1 joue aussi le rôle d'un axe de rotation. Elle intervient aussi dans la fonctionnalité du produit à travers l'influence de ses dimensions sur les jeux J_1 et J_2. Notons finalement qu'on voit, dans le cas de la figure 2.3(d), la nécessité de permettre au préparateur de déduire les chaînes de cotes à partir de l'analyse des contacts entre les différentes pièces et en particulier ceux relatifs à la vis 1. L'approche de modélisation qui consiste à analyser les liaisons comme des relations entre des composants s'avère alors insuffisante pour pouvoir effectuer une telle analyse. Cette remarque a été par ailleurs donnée dans [WAN-93].

D'autre part, certains auteurs dont [GLO-86], [WOL-91], [SAN-92b], [HENS-93], [SUG-94], [RAJ-96], [VAN-96] abordent globalement les procédés d'assemblage au niveau de la modélisation des liaisons entre les composants. Tandis que d'autres limitent leurs applications à certains types particuliers de procédés tels que [HEE-89], [PRI-96] (vissage seulement), [HOF-89b], [DEL-92], [CHE-93] (modélisation du comportement de certains types de composants). On peut donc déceler dans l'ensemble de ces travaux une ambiguïté au niveau de la méthode de traitement des différents types de procédés et de la modélisation du comportement de certains types de composants, qui sont déformés au cours de l'assemblage comme les rivets, les anneaux élastiques, etc.

Finalement, l'approche de modélisation adoptée dans les travaux de [MAT-90], [HOF-89a], [HOF-90], [RED-94], [SHAH-92], [SHA-93], procède par analyse géométrique pour déduire les liaisons entre les composants. Elle ne permet pas d'associer des caractéristiques technologiques. Elle n'est donc pas applicable à un grand nombre de produits.

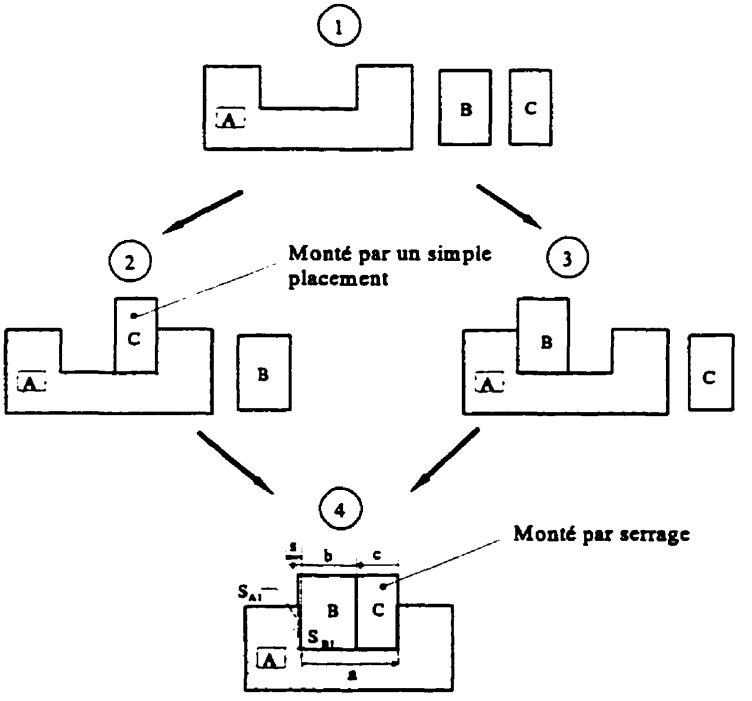


Figure 2.4. Variation des conditions du montage au cours du processus d'assemblage

Un modèle du produit doit donc permettre la modélisation des liaisons entre les composants et le support des différentes phases de leur réalisation. Notons ici que les liaisons entre les composants changent continuellement au fur et à mesure de l'évolution du processus d'assemblage. Elles doivent donc être modifiées en fonction de la configuration du produit pour déduire les directions d'assemblage et les conditions de montage de chaque composant (voir figure 2.4).

2.4.1.6-Les sous-faces disponibles pour la préhension

Dans un produit, les surfaces élémentaires des composants sont subdivisées en surfaces de contact et surfaces libres. Chacune de ces surfaces fait partie d'une face donnée. Par conséquent, dans le reste de cette thèse nous allons identifier ces surfaces élémentaires par des **sous-faces**. Dans l'exemple de la figure 2.5, la sous-face S_{11} est une sous-face de contact alors que la sous-face S_{12} est une sous-face libre.

La détermination des sous-faces libres d'un composant doit supporter la modélisation du produit car la méthode d'assemblage est fonction de la configuration de ces sous-faces. Le choix du préhenseur, pour assembler le composant, se fait alors en fonction des paramètres de ces sous-faces comme la géométrie, l'état de surface, etc.

Pour bien illustrer le cas, considérons sur la figure 2.5, un produit qui, supposons, se trouve à deux instants t et t' du processus d'assemblage aux étapes i et j. Au plan de la génération des séquences d'assemblage, le composant "A" peut être assemblé dans la direction -y dans les deux cas, mais du point de vue réalisation de l'opération d'assemblage, la manière d'assembler le composant "A" à l'étape i est différente de celle à l'étape j pour les raisons suivantes: à l'étape j, il est certain que sur le composant "A", la sous-face S_{11} va rester libre sur toute la trajectoire d'assemblage, donc nous pouvons facilement décider qu'on peut saisir le composant "A" par cette sous-face. Par contre, à

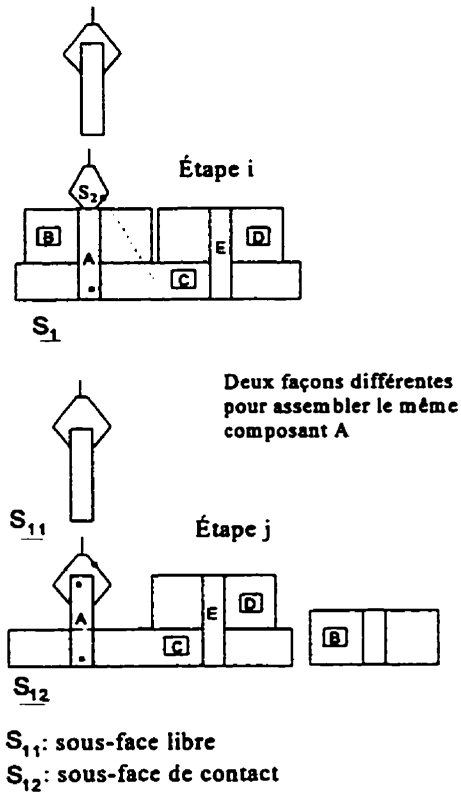


Figure 2.5. Sous-faces libres et de contact sur un composant

l'étape i, au fur et à mesure de l'évolution de l'assemblage du composant "A", le point de saisie du préhenseur sur la face S_1 doit persister jusqu'au moment où il faut utiliser un dispositif qui permet de pousser le composant "A" à partir de la face S_2.

La revue de la littérature effectuée nous permet de conclure qu'aucun article ne présente ce genre d'informations sur les faces. Les auteurs de [CHA-88], [MAT-90] se limitent dans la détermination des ressources d'assemblage à l'étude des conditions de montage des composants dans l'état du produit assemblé et à la géométrie des faces associées à d'autres informations comme l'état de surface, la direction d'assemblage, etc.

La détermination des sous-faces doit s'effectuer a posteriori, car il est indispensable de connaître les sous-faces de contact sur une face pour pouvoir distinguer les sous-faces

libres. C'est une donnée qui doit être modifiée au fur et à mesure de l'évolution de l'assemblage en fonction de la configuration des composants assemblés et désassemblés dans le produit. Ceci est bien illustrée sur la chronologie de détermination des sous-faces libres montrée sur la figure 2.6.

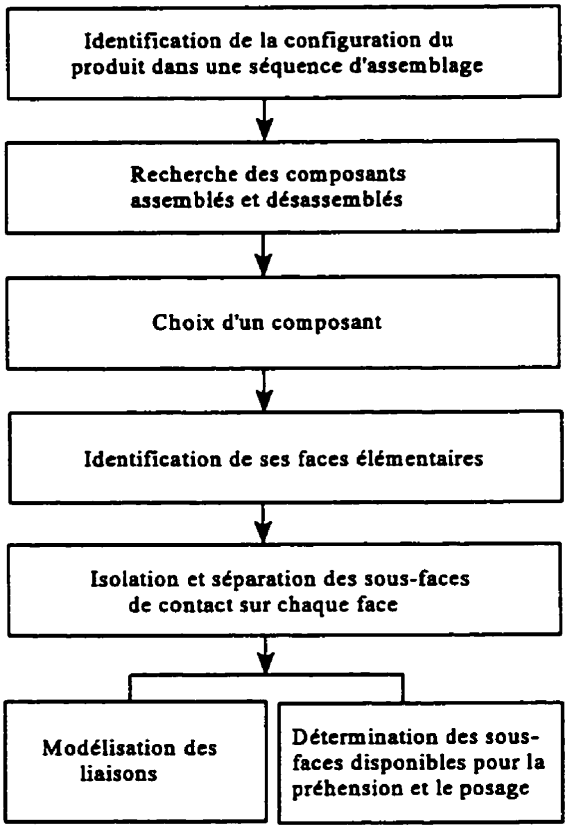


Figure 2.6. Méthode de recherche à propos des sous-faces disponibles pour la préhension sur un composant

2.4.1.7-Le matériau

L'attribut de pièce le plus absolu est celui du matériau constitutif. Il est défini en conception pour satisfaire à un comportement mécanique, thermique ou autre imposé par les spécifications. Il se détermine par l'application de critères de sélection économiques parmi un ensemble de solutions technologiques possibles.

Cette caractéristique influence parfois le choix d'un préhenseur pour assembler une pièce due aux propriétés du matériau. Elle a aussi une influence sur le choix des paramètres liés à un procédé de fabrication, comme, par exemple, la vitesse de coupe qui doit être réduite dans le cas où le matériau est dur.

Le matériau sert aussi à calculer le poids d'une pièce à partir de sa masse volumique. C'est une donnée qui intervient dans la sélection du récepteur et constitue un facteur qui définit la sélection des ressources d'assemblage. Dans le cas où le matériau est fragile ou coûteux, il peut imposer une contrainte qui favorise l'assemblage au plus tard de la pièce.

Il est donc utile, lors de l'analyse de la préparation à l'assemblage, de connaître les caractéristiques matérielles de la pièce qui doivent en conséquence figurer explicitement dans le modèle.

2.4.1.8-Les états de surface

Ils sont caractérisés par un ensemble de valeurs numériques décrivant les variations micro-géométriques propres à chaque face usinée qui sont acceptables pour satisfaire à une contrainte fonctionnelle d'assemblage ou de comportement cinématique d'un composant.

Les caractéristiques d'états de surface comptent parmi les facteurs qui conditionnent l'aptitude à l'emploi d'une pièce mécanique. Elles influencent aussi le choix des préhenseurs pour assembler les pièces en imposant des précautions à prendre dans le cas des faces à fini de surface de qualité supérieure.

Le terme général d'état de surface concerne:

- **l'état géométrique de la surface réalisée**, dont les variations par rapport à la forme idéale sont conventionnellement classées en quatre catégories:

  catégorie 1: écarts de forme et de position

  catégorie 2: ondulation (périodique)

  catégorie 3: rugosité définie par les stries périodiques

  catégorie 4: rugosité définie par les marques d'outil apériodiques.

- **l'état physico-chimique de la surface réalisée**, défini par différentes caractéristiques de la couche superficielle.

Les normes françaises NF E 05-015/016/017/018/ précisent dix-huit critères d'état de surfaces dont les plus fréquemment rencontrés sont:

W	l'amplitude moyenne de l'ondulation,
R	l'amplitude moyenne de la rugosité,
Rmax:	l'amplitude maximale de la rugosité,
Ra:	l'écart moyen arithmétique par rapport à la ligne moyenne,
Rt:	la profondeur totale ou écart de rugosité

Les états de surface sont définis au moyen de valeurs normalisées à partir d'une table de correspondance entre fonction requise et valeur maximale tolérable, sur chaque face de la pièce définie géométriquement et topologiquement.

2.4.1.9-Le traitement de surface

Les éventuels traitements subis par les pièces comme la peinture, l'anodisation, les tests, le marquage, etc. sont des opérations complémentaires qui agissent sur un groupe de composants au cours du processus d'assemblage. Ils ont pour but d'altérer certaines de leurs propriétés et d'affecter leurs surfaces. Il est donc important que le modèle du

produit contienne une information les concernant car ils imposent certaines contraintes d'assemblage résultant de l'équipement nécessaire pour leur réalisation. Notons ici qu'un soin particulier devra être porté à la représentation de telles caractéristiques qui ne font pas l'objet d'un formalisme rigoureux.

2.4.1.10-Les tolérances

Par suite de l'imprécision inévitable des procédés de fabrication, une pièce ne peut être réalisée rigoureusement à une dimension ou une géométrie fixée à l'avance, mais pour que cette dernière réponde à son but, il suffit qu'elle soit astreinte à rester comprise entre deux limites admissibles dont la différence constitue la tolérance [AFN-84].

L'assemblage, par définition, implique toujours un ensemble de pièces. Il est donc nécessaire de prendre en compte les relations entre ses pièces pour la réalisation de ses fonctions spécifiques. Ces fonctions, en retour, ajouteraient autant de contraintes supplémentaires dont certaines sont imposées par les tolérances. Par, exemple, une fonction de transmission d'effort implique, au départ, l'assemblage d'un arbre menant et d'un arbre mené dans un bâti. Par la suite, la fonction ne peut être parfaitement remplie que si un parallélisme strict est respecté entre les deux arbres. Il s'agit donc là d'un assemblage soumis à une contrainte additionnelle de parallélisme.

Pour assurer la qualité et l'aptitude à l'emploi de l'assemblage, il faut donc procéder à l'analyse et à la synthèse des tolérances. L'analyse des tolérances consiste à calculer, à partir des valeurs des tolérances données, les jeux minimums et/ou maximums entre deux surfaces appartenant à deux pièces du produit. Inversement, la synthèse des tolérances vise à déterminer des valeurs de tolérances acceptables, qui permettent de respecter un jeu fonctionnel donné à un endroit du produit.

Dans cette optique, il est nécessaire d'avoir un outil d'assistance à la conception permettant la génération du dimensionnement et du tolérancement du produit. Il s'agit d'un outil qui intègre au modèle du produit une cotation complète et conforme aux exigences de son concepteur.

Cette cotation vise à assurer l'assemblage et la fabrication des pièces d'un produit et le contrôle des jeux à partir des valeurs de tolérances choisies sur les éléments assemblés. Ces jeux influencent le comportement des pièces et par conséquent celui du produit en service. Ainsi un ajustement serré entre un arbre et un alésage empêche la mobilité entre eux, ce qui se traduit par la modification de la liaison entre ces deux éléments. Inversement, sur un arbre et un alésage ayant des valeurs de tolérances larges, on obtiendra un jeu fonctionnel élevé qui n'a aucune influence sur leur liaison.

La cotation peut également servir d'autres buts. Dans la plupart des cas, il s'agit des fonctions plus spécifiques et propres à une application donnée. Par exemple, on peut coter un produit pour garantir son étanchéité. Néanmoins, le produit, avant d'être étanche, doit d'abord s'assembler. La fonction d'étanchéité servira donc plutôt à spécifier une précision et donc une qualité d'assemblage. Cette qualité se traduira, en retour, par des inscriptions et des valeurs de tolérances particulières.

Les normes, aussi bien ISO ou AFNOR que ANSI, définissent un certain nombre de principes de tolérancement. Ceux-ci établissent des relations très précises entre les différents types de tolérances:

- **dimensionnelles**: se manifestant sous la forme d'un intervalle de tolérance associé à la valeur nominale d'une distance ou d'un angle entre deux faces ou à la courbure intrinsèque d'une face (par exemple le rayon ou le diamètre d'une face cylindrique) ou encore à la distance entre une face et une arête (c'est le cas qui

accompagne souvent la cotation de l'angle entre un plan incliné et une face de référence); il est plus rare de devoir coter la dimension d'une arête ou la distance entre deux sommets,

- **de forme**: elles concernent des entités isolées (rectitude d'une arête, d'une génératrice et d'un axe, planéité d'une surface, circularité d'un cylindre et d'un cône; forme d'une ligne ou d'une surface),
- **d'orientation**: elles concernent des entités associées (parallélisme, perpendicularité, inclinaison d'une ligne ou d'une surface par rapport à une autre servant de référence),
- **de position**: elles concernent des entités associées (localisation d'un élément tel qu'une ligne, un axe ou une surface par rapport à une ou plusieurs autres, coaxialité ou concentricité d'un axe ou d'un point par rapport à un autre axe de référence).

Parmi les travaux d'aide au dimensionnement et au tolérancement revus dans la littérature, nous avons vu se profiler plusieurs approches.

Dans [WAN-92], [NGO-96], des méthodes algorithmiques sont proposées pour déduire les chaînes de cotes dans un produit à partir de la localisation du jeu et de l'analyse de contact entre les faces des pièces. Ceci permet d'identifier des tolérances dimensionnelles qui doivent être associées à certaines cotes en fonction de celles spécifiées par le concepteur.

Outre la détermination des chaînes de cotes, trois autres aspects font également l'objet d'efforts considérables liés à la cotation d'un produit. Il s'agit de l'analyse [BOUR-91], [TAK-91], de la synthèse [GU-88], [VOS-90] et de l'aide au tolérancement [WOO-89], [DES-91]. Dans ces travaux l'approche suivie s'appuie sur deux facteurs:

- les cotes, les tolérances et les jeux spécifiés par la conception,
- les modes de fixation ou de positionnement des pièces entre elles selon:

  a) le type de contact entre les faces qui permet d'établir s'il s'agit d'un contact avec fixation (colle, soudure, etc.) et donc sans jeu ou encore contact libre avec jeu,

  b) la nature du contact qui permet d'établir des distinctions basées sur la nature des surfaces impliquées dans le contact.

Le deuxième facteur repose essentiellement sur l'analyse du modèle du produit assemblé (comme par exemple le graphe de liaisons utilisé par [DES-91]). La génération du modèle est cependant une activité liée à la préparation à l'assemblage.

La cotation d'un produit est donc une activité fortement liée à celle de l'assemblage. C'est aussi une information qui donne au produit de conception une connotation de fabrication, en y intégrant la notion d'imprécision, variable selon le choix des procédés d'usinage [DEN-93]. D'un autre côté, les tolérances géométriques mettant en relations plusieurs entités sont orientées (référées par rapport à une ou plusieurs références), ce qui définit une chronologie dans leur création et influe donc sur le séquencement des opérations d'usinage.

L'analyse de la préparation à l'assemblage doit donc exploiter ces liens implicites avec la conception et la fabrication dans le but de l'intégration des différentes fonctions du cycle d'élaboration du produit. Cela implique la présence des tolérances dans le modèle du produit, la préservation de leur sémantique par un rattachement cohérent aux entités qu'elles qualifient et la représentation de l'orientation éventuelle de la contrainte.

2.4.1.11-Cohérence dans l'intégration des caractéristiques

Dans ce qui précède, nous avons discuté de l'utilité d'un modèle de produit qui renseigne le système de préparation à l'assemblage sur l'intention de conception. Nous avons aussi donné l'état de l'art concernant les modèles proposés dans la littérature pour stocker les caractéristiques.

Cependant, il faut mentionner que dans le contexte d'une intégration efficace des activités de conception et de préparation à l'assemblage, il est souhaitable de s'affranchir des variations inhérentes à la phase de conception, dans la mesure où il serait injustifié que deux produits rigoureusement identiques, construits soit par deux concepteurs, soit par le même concepteur, mais de manière différente, et soumis aux mêmes règles, présentent des différences au niveau de la gamme. La cohérence des caractéristiques et la préservation de leur sémantique impose que celles-ci soient explicitement liées aux entités qu'elles qualifient. La rapidité et la compacité de traitements requis pour l'analyse de préparation à l'assemblage interfacée aux spécifications de conception, impose que ces caractéristiques soient inclues de manière homogène au modèle du produit.

2.4.2-Les règles de génération et d'évaluation des gammes d'assemblage

Le but de tout système de préparation à l'assemblage est de fournir un nombre restreint de gammes à partir desquelles seront étudiées différentes implantations d'ateliers, chacune étant évaluée de façon chiffrée en vue d'une comparaison précise. Cependant, il est clair que l'aspect combinatoire qui accompagne la détermination des gammes opératoires et en l'absence de contraintes, conduit pour tout produit à un nombre de solutions prohibitif. Il est donc nécessaire au préparateur à l'assemblage d'examiner attentivement les règles qui maîtrisent la génération et l'évaluation des gammes d'assemblage.

La génération des gammes est conditionnée par la possibilité matérielle de réaliser les différentes opérations. Une opération d'assemblage techniquement non réalisable ou menant à une configuration instable annule la validité d'une gamme; ce qui amène à la rejeter complètement. Nous avons distingué trois facteurs qui conditionnent la génération des gammes d'assemblage:

- la contrainte géométrique,
- la stabilité,
- l'accessibilité.

L'évaluation des gammes est liée à des facteurs quantitatifs [RED-94] liés d'une part au coût, au temps et à la complexité des opérations à réaliser, et, d'autre part à l'architecture de l'atelier d'assemblage. Cette évaluation conduit à privilégier certaines gammes d'assemblage par rapport à un certain nombre d'autres.

L'évaluation des gammes d'assemblage constitue un sujet très vaste qui dépasse le cadre de ce travail. Nous avons cependant tenu à présenter les critères qui sont très fréquemment utilisés par les chercheurs, notamment:

- la maintenabilité,
- la minimisation du nombre de réorientations,
- les affectations de plusieurs tâches à un même équipement,
- la définition des sous-assemblages,
- le choix des séquences lié à l'expertise du préparateur.

2.4.2.1-La contrainte géométrique

La réalisation d'une opération d'assemblage fait intervenir un mouvement relatif entre

deux composants solides déformables ou non. Indépendamment de toute autre considération, il doit exister au moins une trajectoire amenant en contact les surfaces qui doivent l'être, sans qu'il y ait collision entre les solides en mouvement, et ce pour au moins une des formes que peuvent prendre ces composants s'ils sont déformables ou non. L'exemple donné sur la figure 2.7 illustre ce cas; la pièce (1) ne peut pas être assemblé dans la direction -y à cause de la collision avec la pièce (2) sur la trajectoire d'assemblage.

La contrainte géométrique est intrinsèque au produit considéré. Il suffit pour savoir si elle est respectée d'examiner les parties du produit mises en jeu dans l'opération envisagée. Elle est absolue, il y a au moins une trajectoire ou il n' y en a pas. Ces deux caractéristiques rendent envisageables une évaluation automatique d'une opération d'assemblage vis-à-vis de cette contrainte. Nous avons d'ailleurs constaté ce fait dans la plus grande partie des travaux de la littérature.

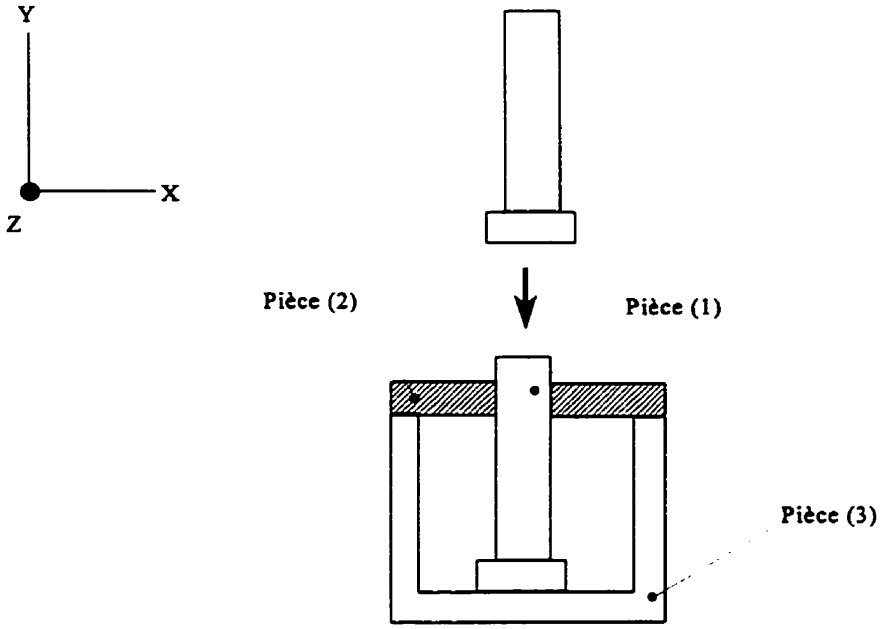


Figure 2.7. Exemple de contraintes géométriques

2.4.2.2-La stabilité

La stabilité des composants à chaque étape du processus d'assemblage est aussi l'un des facteurs qui joue un rôle dans la génération des gammes d'assemblage. Le choix d'une gamme avec des sous-ensembles stables à chaque étape, facilitera d'une façon considérable les différentes opérations d'assemblage. Il en résulte une réduction du temps de cycle, une diminution des possibilités d'erreur et une élimination du besoin d'un ou de plusieurs organes de maintien lors du retournement du produit ou de son transfert d'une station d'assemblage à une autre.

Lorsque la réalisabilité d'une opération n'est pas interdite par une contrainte géométrique, il convient de s'assurer qu'aucune des liaisons internes aux sous-ensembles produits ne risque de se rompre, sous l'effet des forces s'exerçant sur les composants, qu'elles relient au cours des phases suivantes du processus d'assemblage.Ceci conduirait à ne pouvoir obtenir aucun sous-ensemble comme le montre l'exemple simple donné sur la figure 2.8 où la liaison de la pièce (2) est susceptible de se rompre sous l'effet de la gravité.

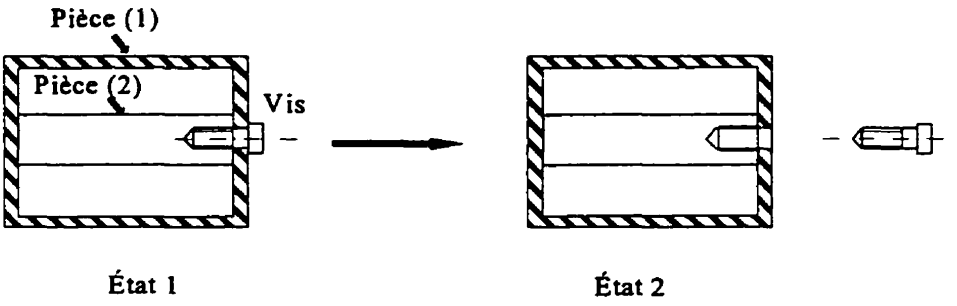


Figure 2.8. Instabilité de la pièce (2) suite au désassemblage de la vis

Il faut également considérer qu'un sous-ensemble peut être maintenu par un dispositif externe assurant la stabilité de certains de ses composants. Cette constatation a poussé certains auteurs tels que [HEE-89], [DEL-91] à l'usage d'heuristiques pour éviter de rejeter d'emblée des gammes qui pourraient être acceptables; l'élimination des sous-

ensembles instables se fait alors à posteriori. D'autres, tels que [LAP-91], [LEE-93] utilisent des indices de stabilité qui permettent de sélectionner les meilleurs sous-ensembles stables à chaque étape du processus d'assemblage. Mais les solutions entrevues sont loin d'être convaincantes.

Il est cependant certain que la stabilité des liaisons des composants est un élément à prendre en compte pour éviter des gammes présentant des opérations d'assemblage aberrantes. Il convient alors de la considérer d'une façon qui ne soit pas trop restrictive mais qui soit liée à certains critères d'évaluation tels le coût et la complexité de l'opération à réaliser.

2.4.2.3-L'accessibilité

La réalisation effective d'une opération d'assemblage nécessite la mise en oeuvre d'éléments extérieurs au produit: organes de préhension, manipulateurs ou robots. Cette réalisation peut s'avérer impossible pour différentes raisons que nous classons en deux catégories:

• Une impossibilité géométrique résultant de la collision de l'élément extérieur avec les autres composants dans le produit. La figure 2.9-(a), ci-après fournit un exemple imaginé pour la circonstance mais qui illustre le problème: l'opération visant à assembler la pièce (d) est admissible vis-à-vis de la contrainte géométrique, car il existe une trajectoire permettant d'amener cette pièce dans sa position finale au sein du sous-ensemble {a, b, c}. Il semble toutefois impossible de réaliser cette opération vis-à-vis du type du préhenseur utilisé.

• Une impossibilité de définir un ensemble d'équipements capable de mener à bien l'opération d'assemblage due à une restriction d'accès au composant. La figure 2.9(b)

montre un exemple d'une opération portant à assembler une pièce (c) dans le sous-ensemble {a,b}. La surface S_b doit être emmanché à force dans la surface S_c. Il se peut qu'il soit trop difficile d'imaginer un préhenseur capable d'effectuer cette tâche à cause de la localisation de la pièce (c). Nous la jugeons alors irréalisable.

La contrainte d'accessibilité n'est pas intrinsèque au produit. Elle permet au préparateur à l'assemblage d'éliminer facilement certaines gammes d'assemblage parce qu'il n'aura su imaginer un éventuel ensemble d'équipements aptes à réaliser certaines opérations considérées. Il y a aussi une part d'arbitraire dans la décision; ainsi pour le deuxième exemple présenté, il est clair qu'il n' y a pas d'impossibilité; il y a seulement une grande difficulté.

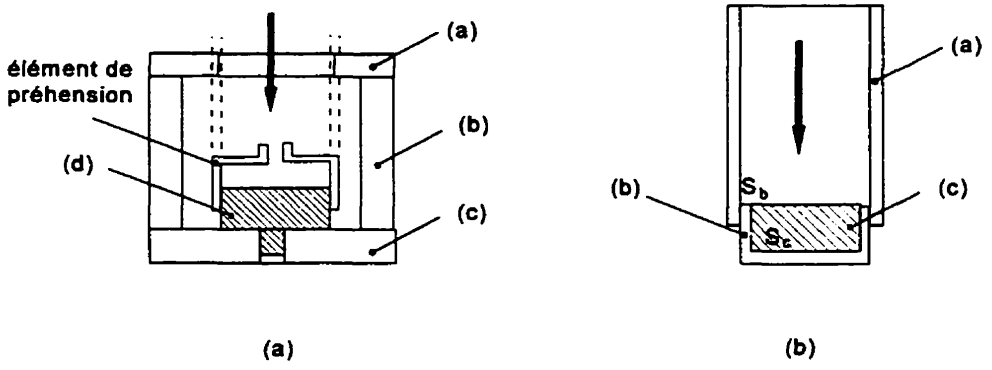


Figure 2.9. Opération d'assemblage irréalisable due à une contrainte d'accessibilité

2.4.2.4-La maintenabilité

Une opération d'assemblage est d'autant plus difficile à effectuer que les deux objets sont difficiles à maintenir (insuffisances de bonnes sous-faces de préhension, nécessité de maintenir simultanément des parties instables, l'espace autour de la trajectoire d'insertion est plus ou moins encombré, etc.). Cet élément d'évaluation des opérations est appelé maintenabilité; il intervient directement sur le coût des équipements et sur le temps de réalisation des opérations.

Il existe actuellement un certain nombre de travaux relatifs à l'évaluation de la maintenabilité. Ces travaux sont pour la plupart limités à l'étude des composants élémentaires et dans l'optique d'une rationalisation de la conception des produits à assembler [AND-83], [BOO-83], [BOO-94].

Dans [DEL-91], [HEN-92] l'évaluation fait appel à l'usager qui doit fournir une appréciation sur la maintenabilité des paires de sous-ensembles intervenant dans toutes les opérations. Citons également le travail de P. Maguet [MAG-90] qui évalue la maintenabilité comme une somme pondérée de différents critères (stabilité, poids, volume, recouvrements de surfaces).

2.4.2.5-La minimisation du nombre de réorientations

En assemblage, il est toujours préférable d'insérer tous les composants dans une seule direction. Ceci implique la limitation du trajet des manipulateurs, nécessite moins de dextérité aux robots et permet d'éviter des opérations supplémentaires résultant de la réorientation du sous-ensemble des composants assemblés (nécessité de stabilisation). C'est un facteur qui a donc un effet sur le coût et sur le temps de réalisation des opérations d'assemblage.

Ce critère est utilisé par [KLE-91], [LAP-91], [WOL-91], [CHE-93] pour la réduction du nombre de gammes admissibles pour un produit.

2.4.2.6-Les affectations de plusieurs tâches à un même équipement

Il est assez fréquent que plusieurs opérations d'assemblage soient susceptibles d'être effectuées par un même équipement:

- opérations portant sur des composants de morphologie et de dimension suffisamment voisines et entrant dans des liaisons de même nature,
- opérations mettant en oeuvre un même procédé d'assemblage,
- opérations mettant en oeuvre un même traitement.

Dans de telles situations, et sous réserve que l'équilibrage du système d'assemblage soit convenable, il y a tout intérêt à regrouper ces opérations. Le changement d'équipement fréquent sur une station d'assemblage allonge le temps d'exécution empêchant ainsi que d'autres opérations soient réalisées pendant ce changement. Nous trouvons ce critère dans les travaux de [HEE-89], [BON-91], [LAP-91], [CHE-93].

2.4.2.7-La modularité du produit

Il y a plusieurs raisons qui pousse le préparateur à l'assemblage à imposer une certaine modularité au produit par sa subdivision en des sous-assemblages.

Une raison principale est liée à la diminution des contraintes sur la ligne d'assemblage finale et à la parallélisation des opérations pouvant l'être. De temps à autre, certains sous-assemblages se répètent n fois dans un produit, il est alors préférable de réaliser un regroupement des opérations sur une même machine en travaillant à une cadence n fois supérieure, on diminue ainsi le nombre de postes à réaliser et, par là-même les coûts directs (moins d'équipements, réduction du temps de mise au point, du nombre d'opérateurs, etc.).

Une autre raison est liée à la réduction du temps total d'assemblage par la possibilité de la réalisation simultanée de plusieurs opérations sur un ou plusieurs postes d'assemblage.

La modularité du produit a donc un effet direct sur la fiabilité opérationnelle de la ligne

d'assemblage. Cette fiabilité diminue considérablement si le nombre de postes augmente.

2.4.2.8-Le choix de séquences lié au préparateur

Dans certains cas, le préparateur peut favoriser le choix des séquences bien définies à l'intérieur d'une gamme.

La raison d'un tel choix relève de l'expertise du préparateur, soit parce qu'il devine qu'une telle séquence partielle dans une gamme est la meilleure par rapport à d'autres séquences, soit parce qu'il n'a aucun avantage d'en chercher d'autres. Par exemple, il peut favoriser l'assemblage d'une pièce immédiatement après celui d'un sous-ensemble de composants car l'établissement des liaisons de ce composant avec ces derniers a pour effet de les stabiliser.

Une autre raison est liée au fait que certaines pièces dans le produit possèdent des caractéristiques permettant de forcer leur retrait le plus tôt possible ou leur insertion le plus tard possible dans la gamme. Nous en avons donné un exemple dans le cas où le matériau de la pièce est fragile ou coûteux, ce qui favorise leur assemblage le plus tôt possible. Ainsi, à une étape donnée du processus d'assemblage, entre deux choix, on pourrait en préférer un car il fait intervenir des composants pouvant avoir ou non une certaine priorité d'assemblage.

Le choix des séquences par le préparateur a pour effet de conditionner l'ordre d'insertion de certains composants dans une gamme. Ceci se traduit par la réduction du nombre de gammes d'assemblage générées.

2.4.2.9-Bilan

Comme nous pouvons le constater, la génération des gammes optimales d'assemblage est un processus difficile à réaliser vu le nombre de critères qui gouvernent cette génération. D. WHITNEY [WHI-96] a constaté qu'il est difficile au stade actuel de connaissance de parler avec précision de distance de la gamme choisie par rapport à celle qui serait optimale. Les variables dont dépend une ligne d'assemblage sont si nombreuses et si peu connues aujourd'hui dans leur comportement que la mise au point finale chez le client prend encore des semaines et des mois.

Nous proposons donc de réunir les différents éléments d'évaluation des gammes d'assemblage dans une démarche qui les combine à l'emploi des contraintes géométriques, d'accessibilité et de stabilité. En n'introduisant aucun critère d'évaluation, on procède à un classement de toutes les gammes qui satisfont seulement à certaines contraintes de faisabilité. Même ces dernières seront dans certains cas difficiles à évaluer, car elles font référence à un éventuel dispositif de maintien. Un tel principe n'est pas toujours envisageable lorsque le nombre de séquences admissibles est trop élevé de l'ordre de 10^4 ou plus. Dans de tels cas, il s'avère nécessaire d'examiner les différents types de décisions prises lors de l'activité de préparation à l'assemblage, ce qui conduit à penser que dans un premier temps au moins, l'examen isolé du produit implique un certain nombre de choix qui tiennent compte de certains critères d'évaluation et qui, à défaut d'être judicieux, sont au moins éligibles pour un examen plus rigoureux tenant compte du contexte.

2.4.3-Les règles de sélection des ressources d'assemblage

Tout produit fini peut être considéré comme une structure construite à partir de composants élémentaires. L'établissement des liaisons entre ces composants définit leur

situation au sein de cette structure. Comme déjà mentionné précédemment, ces liaisons peuvent résulter soit de l'établissement d'un contact géométrique, soit de l'application d'un procédé d'assemblage, soit des deux cas simultanément. D'une façon générale, l'établissement d'un contact géométrique nécessite l'utilisation d'un robot ou d'un manipulateur muni d'un préhenseur. Les règles de détermination telles que nous l'avons vu sont fonctions:

- du matériau du composant,
- de son poids,
- de ses dimensions,
- des conditions de montage,
- de la direction d'insertion,
- des caractéristiques liées aux sous-faces de préhension (état de surface, géométrie, etc.).

Quant aux procédés d'assemblage, ils nécessitent l'emploi d'un outillage spécifique à chaque procédé et souvent de machines spécialisées. Par exemple, le procédé appliqué pour assembler un anneau élastique sur un axe nécessite un dispositif qui permet la déformation de l'anneau pour pouvoir augmenter le diamètre intérieur et ainsi le glisser sur le diamètre extérieur de l'axe.

Outres ces deux catégories d'opérations, tout processus d'assemblage est également susceptible de faire intervenir une autre catégorie d'opérations que nous avons groupé sous le nom de traitement. Ces opérations sont intrinsèques au produit fini et à son cahier des charges; elles doivent être réalisées d'une façon ou d'une autre, et elles conditionnent la définition du processus d'assemblage. Les équipements nécessaires à la réalisation de telles opérations sont donc définies à priori en fonction du type de traitement à effectuer.

2.4.4-Les sorties

Le système de préparation à l'assemblage doit proposer en sortie une gamme d'assemblage composée d'opérations impliquant, dans un ordre défini par une séquence à respecter, des ressources d'assemblage adéquates.

La plupart des systèmes de préparation à l'assemblage revus dans la littérature ne tiennent pas compte de l'aspect simultané lié aux sorties du système. Ils se contentent alors de proposer une gamme d'assemblage du produit, ou d'affecter des ressources aux opérations d'assemblage à réaliser [DUB-92], [DIN-93]. Nous trouvons une exception à cette règle dans les travaux de [CHA-88], [MAT-90], [ROM-96] dont nous avons précisé les sorties dans le paragraphe 1.4.3. Pour la représentation des gammes, différentes approches sont envisagées.

2.4.4.1-Génération d'une gamme planifiée

Cette approche est celle utilisée dans [LAP-91], [WOL-91], [CHE-93]. Elle implique que la gamme soit entièrement définie à partir d'une évaluation rigoureuse des séquences d'assemblage. Cependant, elle ne tient pas compte de certains aspects liés à la faisabilité technique de la gamme aux moyens de ressources d'assemblage bien définies. Ce qui amène parfois à son invalidation et rend nécessaire la régénération immédiate d'une gamme alternative. Ceci se traduit par un problème particulièrement complexe, survenant justement dans une situation qui réclame une solution en "temps réel".

2.4.4.2-Génération de plusieurs gammes alternatives

Cette approche est satisfaisante de point de vue du respect de la multiplicité des solutions possibles. Elle consiste à sélectionner un ensemble de gammes déterminées selon

quelques critères de sélection. La représentation de chaque gamme se fait alors sous la forme de relations de précédences [HEN-92], [SAN-92b], [LIN-93] (voir l'exemple donné sur la figure A3 en annexe A). Le principal obstacle à l'usage de cette méthode est issu de la combinatoire de l'ensemble de choix possibles, qui donne au nombre de gammes définies pour un produit une croissance exponentielle. Ce défaut est redhibitoire tant au niveau de la taille nécessaire au stockage des différentes alternatives, qu'au niveau du temps requis pour leur traitement par un module d'analyse concernant les ressources d'assemblage. Ceci est d'autant plus important que le nombre de pièces est élevé.

2.4.4.3-Génération d'une gamme à opérations alternatives

Cette approche permet d'intégrer la notion de multiplicité des solutions techniques sans avoir à en subir les désagréments. Elle a été proposée par [WHI-88], [HEE-89], [HOM-90], [MAT-90], [LEE-92], [DEF-93], [LEE-93], [RED-94] (voir l'exemple donné sur la figure A4). Dans une telle approche la gamme peut apparaître sous la forme d'un graphe d'états dont deux sont particuliers: l'état initial et l'état final qui représentent le produit assemblé et désassemblé (ou désassemblé et assemblé si la génération des gammes se fait par désassemblage). Entre ces deux états, un ensemble d'états (ou de configurations du produit) intermédiaires sont reliés entre eux par des relations qui peuvent être multiples. L'orientation de ces relations se justifie par la chronologie à respecter; la multiplicité par l'existence de différentes alternatives de passage d'un état à un autre. Une telle représentation a les avantages suivants:

- Un graphe d'états est plus descriptif qu'un ensemble de relations de précédences. Il visualise directement le montage ou le démontage du produit. Par ailleurs, il met en évidence l'asynchronisme possible des opérations dans des branches différentes.

• Le nombre de séquences admissibles dans la gamme pour un produit donné est inférieur ou égal à celui d'un ensemble de relations de précédence; généralement il est très nettement inférieur. Nous sauvons donc de la mémoire pour conserver les différentes caractéristiques retenues.

• Dans la majorité des cas, puisqu'il existe des solutions alternatives, une invalidation d'une opération ne modifie en rien la validité technique de la gamme et n'implique qu'une reconsidération locale, si la disponibilité des ressources est une donnée accessible en temps réel.

Un avantage exclusif à cette méthode est qu'elle permet aussi lors de la construction du graphe de poursuivre le changement consécutif de la configuration du produit lors du passage d'un état à un autre. Ce changement a pour effet de définir des nouvelles entrées au système de préparation à l'assemblage dont la prise en compte constitue la clé pour la détermination de (ou des) l'état(s) suivant. Ceci se poursuit explicitement jusqu'à l'achèvement du processus d'assemblage. Les exemples donnés sur les figures 2.4, 2.5 illustrent bien le cas. Le passage d'un état à un autre pourrait impliquer le changement:

- des degrés de liberté des composants,
- de la configuration des sous-faces libres et de contact sur les faces,
- des conditions de montage,
- de l'espace libre autour des sous-faces des composants disponibles pour la préhension. L'accessibilité par les préhenseurs se modifie lors du passage d'un état à un autre.

Nous pouvons donc assimiler un système de préparation à l'assemblage à un système récursif où les sorties qui correspondent aux états admissibles influent sur ses entrées d'une façon continue jusqu'à l'achèvement du processus d'assemblage.

La mise en évidence de ce principe doit donc se manifester suivant **une approche qui assure la modélisation du produit à chaque étape du processus d'assemblage**.

La revue de la littérature nous permet de constater que l'approche de modélisation est la même pour tous les auteurs: on détermine les caractéristiques relatives au produit à son état assemblé et on procède à la génération de la gamme d'assemblage. Pour cette raison on ne tient compte que de la variation des degrés de liberté des composants lors du passage d'un état à un autre. Ceci permet d'appliquer seulement certains critères d'évaluation qui sont en relation avec ces caractéristiques. C'est une approche qui est partiellement conforme avec ce que nous proposons. Cependant, elle explique leur faiblesse à traiter des critères qui font références à des éléments externes tels que l'accessibilité, la stabilité, ou à générer les ressources d'assemblage en tenant compte des sous-faces libres sur les composants.

Ces derniers facteurs montrent aussi l'importance de conserver les différentes caractéristiques relatives à chaque état pour pouvoir les générer dans le cas où il faut les utiliser a posteriori dans la gamme d'assemblage. Ceci pourrait se produire, par exemple, lors de l'interfaçage avec les fonctions d'ordonnancement et de conduite d'atelier.

2.5-Objectif de la recherche

Dans ce qui précède, nous avons défini les éléments caractéristiques d'un système de préparation à l'assemblage. Ceux-ci se résument aux:

- entrées définies à partir du recensement des éléments sur lesquels le préparateur fonde ses décisions objectives locales,
- règles de décision déterministes susceptibles de générer les sorties à partir des

entrées,

- sorties du système définies comme la structure de la gamme, faisant apparaître la séquence des opérations et le choix des ressources d'assemblage.

La possibilité d'application des règles du système consiste à chercher les entrées à chaque état du produit pour pouvoir formuler des décisions permettant la poursuite du processus d'assemblage. Par conséquent, nous avons trouvé qu'au niveau de la définition des entrées, la faiblesse principale des modèles proposés dans la littérature se situe au niveau de trois sujets principaux:

- la modélisation du produit à un seul état qui correspond à celui du produit assemblé,
- la manque d'une description complète des faces,
- la modélisation des liaisons entre les composants.

Comme n'importe quel système, un système de préparation à l'assemblage ne peut donc appliquer ses règles pour générer ses sorties tant que ses entrées ne sont pas bien définies et représentées dans un modèle unique et cohérent incluant les relations qui lient ces entrées entre elles.

C'est à partir de ce point que notre objectif de recherche est fixé:

"proposer un modèle de caractéristiques d'assemblage de produits qui permet de supporter l'assemblage".

Ce modèle [JAB-96a], [JAB-96b], [JAB-97], [MAS-97] apporte une approche plus globale pour permettre:

- d'intégrer d'une façon homogène un ensemble complet d'informations qui sont pertinentes pour favoriser une analyse déterministe du processus d'assemblage d'un produit,
- de chercher les caractéristiques propres à chaque état. Il en résulte une mise en évidence du caractère dynamique de variation de plusieurs types de caractéristiques d'assemblage.

La génération du modèle doit cependant s'effectuer en concordance avec les besoins de l'ingénierie simultanée. Ceci nécessite alors son ouverture pour supporter d'autres phases du cycle d'élaboration du produit.

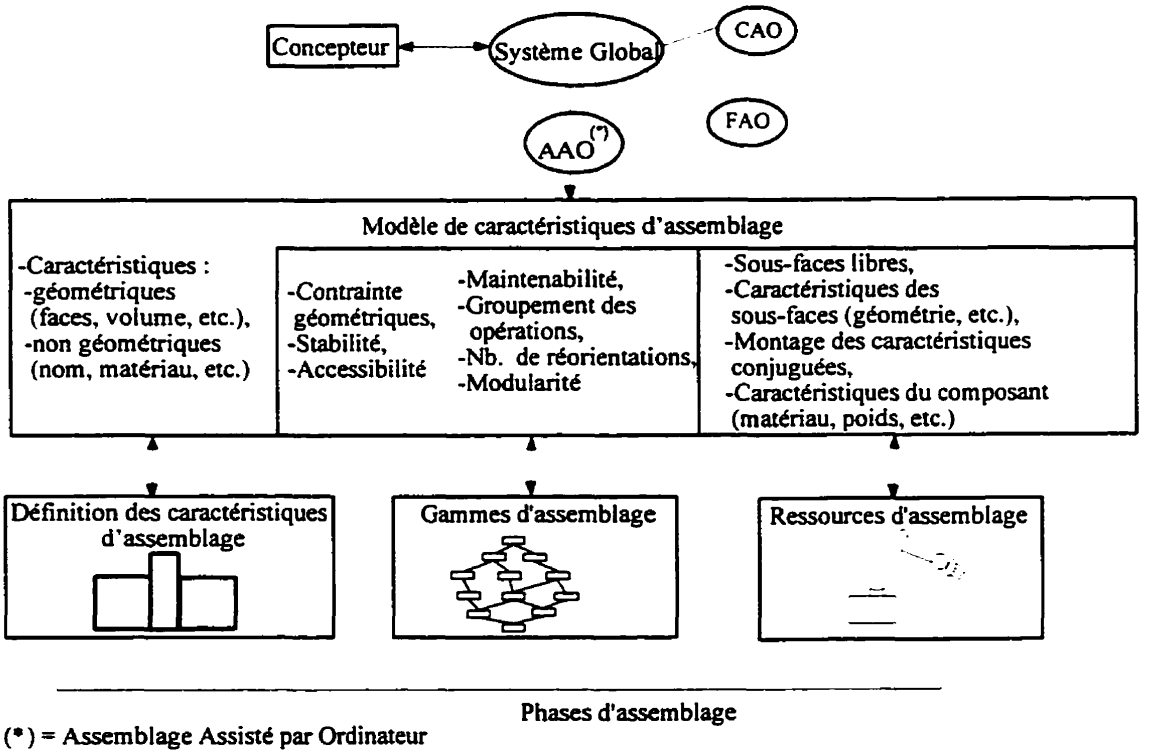


Figure 2.10. Lien du modèle avec les différentes phases d'assemblage

Sur la figure 2.10, nous schématisons le lien du modèle avec les différentes activités liées à l'assemblage. Sur cette figure, nous avons intégré aux activités de conception et

de fabrication, celle de l'Assemblage Assistée par Ordinateur (AAO) introduite par C. Mascle [MAS-90] et définie comme l'utilisation de l'informatique pour le support du processus d'assemblage d'un produit. Le rôle du modèle fait donc partie de cette activité que nous lui avons intégrée complètement.

2.6-Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir défini les éléments caractéristiques d'un système de préparation à l'assemblage, nous avons mis en évidence la nature de décisions qui interviennent lors de cette activité. L'examen des besoins spécifiques d'une approche d'ingénierie simultanée a fait apparaître la nécessité d'ouverture du système sur les fonctions de conception et de fabrication.

Nous avons également montré que la génération des gammes et des ressources d'assemblage nécessite essentiellement la reconnaissance des caractéristiques d'assemblage qui doivent être intégrées à un modèle homogène et cohérent du produit. Ceci nous a permis de proposer notre objectif de recherche par la constatation que la faiblesse des modèles dans la littérature est au niveau de la modélisation du produit.

Dans le troisième chapitre, nous proposons une méthodologie d'identification des caractéristiques d'assemblage intégrées à un modèle du produit généré à partir de l'état assemblé. Nous nous intéressons ensuite à démontrer la démarche suivie pour assurer la modélisation du produit à chaque étape du processus d'assemblage. Nous proposons à cet effet un modèle de séquencement des opérations d'assemblage.

CHAPITRE 3
MÉTHODOLOGIE DE RECONNAISSANCE DES CARACTÉRISTIQUES D'ASSEMBLAGE

3.1-Introduction

Nous avons établi dans le chapitre précédent que l'intégration des fonctions de conception et de préparation à l'assemblage favorise une approche d'ingénierie simultanée. Cette intégration doit s'appuyer sur un modèle de produit complet et muni d'une richesse sémantique équivalente à celle perçue sur un plan détaillé par un préparateur expert. Nous avons également montré que la détermination des gammes et des ressources, dans le cadre d'une activité de préparation à l'assemblage intégrée, nécessite essentiellement la reconnaissance des caractéristiques d'assemblage.

Dans ce troisième chapitre, nous parlons en détails de la méthodologie suivie pour la génération d'un modèle homogène caractérisant le produit à l'état assemblé. Pour cela, nous commençons par spécifier la structure de données qui convient le mieux à l'intégration de différents types de caractéristiques d'assemblage. Nous décrivons ensuite la méthode de construction de la structure hiérarchique du produit. Cette structure a comme base la définition des modèles topologiques, géométriques et technologiques relatifs aux pièces. Nous proposons par la suite la méthodologie de reconnaissance des caractéristiques géométriques, technologiques et fonctionnelles propres aux liaisons entre les composants. Ceci conduit à la définition d'une hiérarchie permettant le passage, par la déduction successive, du niveau des liaisons relatives aux sous-faces de contact à celui des liaisons relatives aux pièces, puis aux sous-assemblages.

Le processus de modélisation nécessite une hypothèse principale:

Hypothèse 3.1: *L'établissement d'une liaison (de nature géométrique ou technologique) entre deux composants se fait par une simple translation et/ou rotation suivant les axes d'un repère orthonormée OXYZ. C'est le cas d'un grand nombre de cas rencontrés dans la pratique.*

3.2-Différentes étapes dans la génération d'un modèle homogène de produit

3.2.1-Spécification d'un modèle de produit

Toute démarche de développement d'un produit a toujours tendu à obtenir des modèles lorsque la complexité des phénomènes augmente (grands nombres de variables, relations emmêlées entre ces variables, etc.). L'esprit humain se retrouve rapidement limité dans sa capacité à intégrer toutes ces informations et à reconnaître une cohérence ou un comportement structural invariant. Il est donc nécessaire d'avoir recours à une approche méthodique et à un support matériel qui est de plus en plus informatisé.

Dans une méthodologie de type CFAO, les modèles sont créés afin d'aider au processus de développement, bien que la modélisation ne soit pas toujours suffisante. Elle est cependant absolument indispensable et doit être reliée à des modèles de connaissance. C'est aussi ce que nous avons évoqué au cours des deux premiers chapitres lorsqu'on a parlé de l'utilité d'un modèle de produit qui renseigne le système de préparation à l'assemblage sur l'intention de conception.

D'autre part, une simple révision des paramètres d'entrées qui doivent être présents sur un modèle de produit (réf. paragraphe 2.4.1) montre que l'assemblage met en jeu plusieurs types de caractéristiques. Ces derniers peuvent servir pour différents objectifs. Mentionnons à titre d'exemple la mise en évidence des procédés d'assemblage et la précision des propriétés topologiques, géométriques et technologiques propres aux

composants (la nomenclature, le modèle solide, le matériau, la qualité de récepteur) et aux faces (la géométrie, l'état de surface, le traitement, certains types de tolérances dimensionnelles ou géométriques). Ajoutons aussi la description des dépendances fonctionnelles entre les différents types d'entités présentes sur le modèle de produit. Ces dépendances fonctionnelles ne se limitent pas uniquement aux cas des liaisons, qui représentent implicitement des relations entre des composants ou des faces à travers leurs sous-faces. Elles s'étendent au cas des tolérances qui expriment des relations technologiques de précision entre des faces. Ces tolérances conduisent à l'identification des serrages relatifs aux liaisons. La variété de paramètres que l'assemblage met en jeu nous a mené à donner une définition plus large aux **caractéristiques d'assemblage**.

Définition 3.1: *Nous définissons une* ***caractéristique d'assemblage*** *par toute information de nature topologique, géométrique, technologique ou fonctionnelle associée à une face, une pièce ou un sous-assemblage et, dont la présence a une signification particulière, qui intéresse le préparateur lors de l'analyse du processus d'assemblage du produit.*

Notons finalement, que dans le but d'assurer la modélisation du produit à chaque étape du processus d'assemblage, les états admissibles de ce dernier doivent aussi être présents sur son modèle. Pour cela, ils doivent être intégrés à un modèle de gamme qui identifie la chronologie de leur apparition de manière à permettre la recherche des caractéristiques propres à chaque état. Ceci est nécessaire, soit pour pouvoir formuler des décisions permettant la poursuite du processus d'assemblage, soit aussi pour pouvoir générer à nouveau les structures des états à posteriori de la détermination de la gamme d'assemblage.

Pour simplifier la lecture de cette thèse, la représentation des résultats obtenus et la différentiation entre ce qui pourrait être déduit à l'état du produit assemblé, de ce qui est spécifique à l'état (comme par exemple les sous-faces libres et les liaisons de blocage),

nous avons rapporté le sujet de la modélisation dynamique du produit au quatrième chapitre. Nous proposons ainsi une représentation des états intégrée à une structure de gamme permettant la mise en évidence de la nature dynamique du changement de plusieurs types de caractéristiques.

Par conséquent, nous voyons bien qu'un simple graphe de liaisons ou un simple modèle mathématique (qui représente le graphe de liaisons sous-forme matricielle [SAN-92b]) ne sont pas adéquats pour modéliser un produit. Pour cette raison, nous avons opté pour un modèle conceptuel intégré, dans le sens de la définition du modèle du produit, tout en adoptant la structure de base de données, dans le sens de la définition des relations entre les objets et leurs caractéristiques. Nous avons aussi adopté le formalisme NIAM pour représenter le modèle généré (voir annexe C pour connaître les principes de base de ce formalisme). Ce modèle permet d'intégrer les caractéristiques à partir de la définition de la structure hiérarchique du produit. **Il permet aussi au préparateur de traduire sa perception sur le produit.** Nous avons choisi le formalisme NIAM car il se veut indépendant des techniques de mise en oeuvre et permet de représenter explicitement les types d'entités informationnelles (objets ou attributs), les relations entre ces entités (telles que les dépendances fonctionnelles), la cardinalité de ces relations ou encore les contraintes sur ces relations (totalité, exclusion mutuelle, égalité, etc.).

3.2.2-Structure hiérarchique d'un produit

La figure 3.1 représente la structure d'un produit sous la forme d'un arbre à N niveaux. Cette structure est hiérarchisée depuis l'entité de plus haut niveau, qui représente le produit, jusqu'à la plus basse entité qui est la pièce. A cet égard, le produit est formé d'un nombre fini de pièces ou de sous-assemblages. A son tour chaque sous-assemblage de niveau $P \leq N$ peut être composé d'un ensemble de pièces ou de sous-assemblages et ainsi de suite.

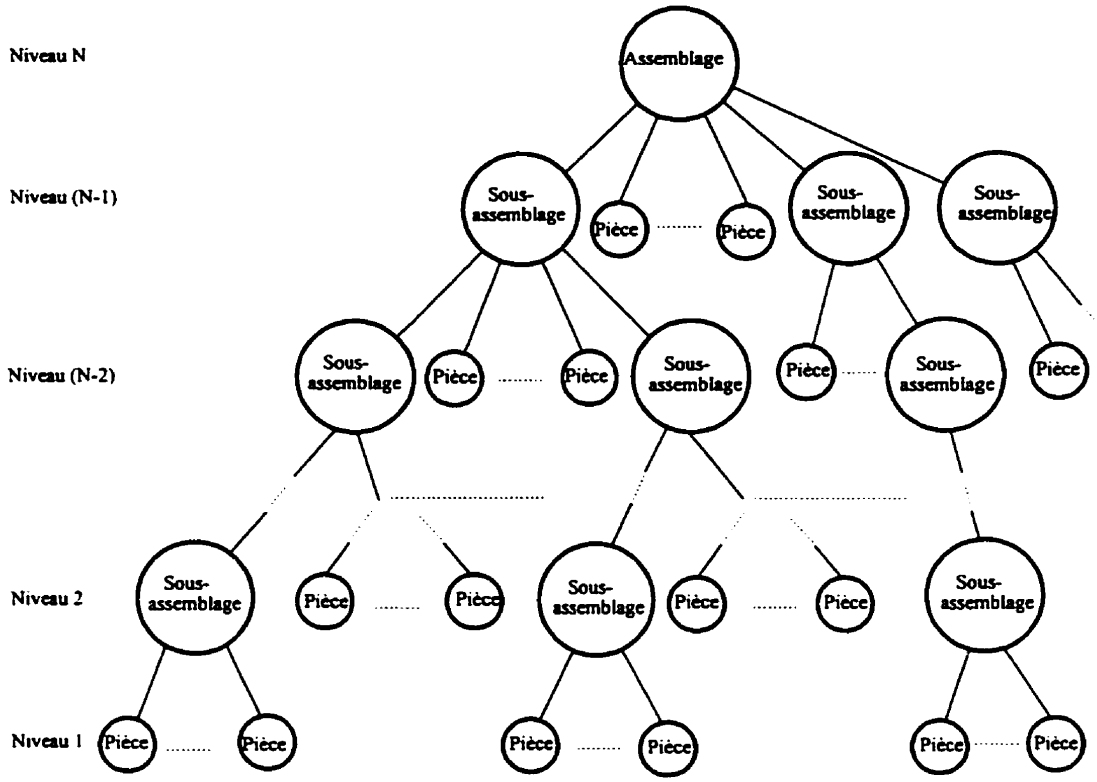


Figure 3.1. Structure hiérarchique d'un produit

Définition 3.2: *Un sous-assemblage est un sous-ensemble d'au moins deux composants dont chacun est relié à au moins un autre composant. Il se comporte au cours du processus d'assemblage comme une seule entité. De plus la configuration obtenue après son insertion est une configuration à partir de laquelle il est possible de continuer le processus d'assemblage du produit.*

L'ensemble des composants $C = \{c_1,.....,c_n\}$ du produit peut donc être scindé en deux sous-ensembles:

- le sous-ensemble des pièces $C_p = \{c_i \ / \ c_i$ *est une pièce et* $0 \leq i \leq n\}$,
- le sous-ensemble des sous-assemblages
  $C_{SA} = \{c_j \ / \ c_j$ *est un sous-assemblage et* $0 \leq j \leq n\}$.

donc

$$C = C_P \cup C_{SA}$$

La définition de la structure de l'arbre sur la figure 3.1, doit se faire au fur et à mesure de l'analyse du processus d'assemblage global. Ainsi pour le produit qui est aussi un assemblage de niveau N, l'analyse du processus d'assemblage permet de compléter le niveau N-1. A son tour, l'analyse du processus d'assemblage des sous-assemblages de niveau N-1 permet de compléter le niveau N-2 et ainsi de suite jusqu'à la construction de l'arbre au complet. Ceci permet aussi de simuler le processus d'assemblage depuis la ligne d'assemblage finale du produit jusqu'aux sous-lignes d'assemblage relatives aux sous-assemblages.

Pour cette raison, nous pouvons généraliser la démarche qui consiste à construire un assemblage, qu'il soit un produit ou un de ses sous-assemblages, à partir des modèles de pièces issus de la conception (nous détaillons ce sujet dans le prochain paragraphe) et des modèles pré-définis de sous-assemblages (figure 3.2). Cette démarche doit aussi permettre à chaque instant la modification de la structure définie par l'agrégation d'un sous-ensemble de composants dans la structure d'un sous-assemblage (figure 3.3(a)). C'est par exemple le cas des sous-assemblages a propos ou a posteriori. Ce principe s'applique même au cas des sous-assemblages a priori, car le préparateur envisage toujours la possibilité de sélectionner directement un sous-ensemble de composants en aval de leur intégration à la structure de l'assemblage. Il s'agit d'éviter des complications résultant de la génération de plusieurs types de modèles de composants (gestion des fichiers, création des copies de modèles de pièces déjà intégrés dans un sous-assemblage, etc.).

Cependant, dans un produit, de nombreuses pièces présentent une similarité dans les formes. Ceci peut entraîner aussi une similarité au niveau de la structure de plusieurs

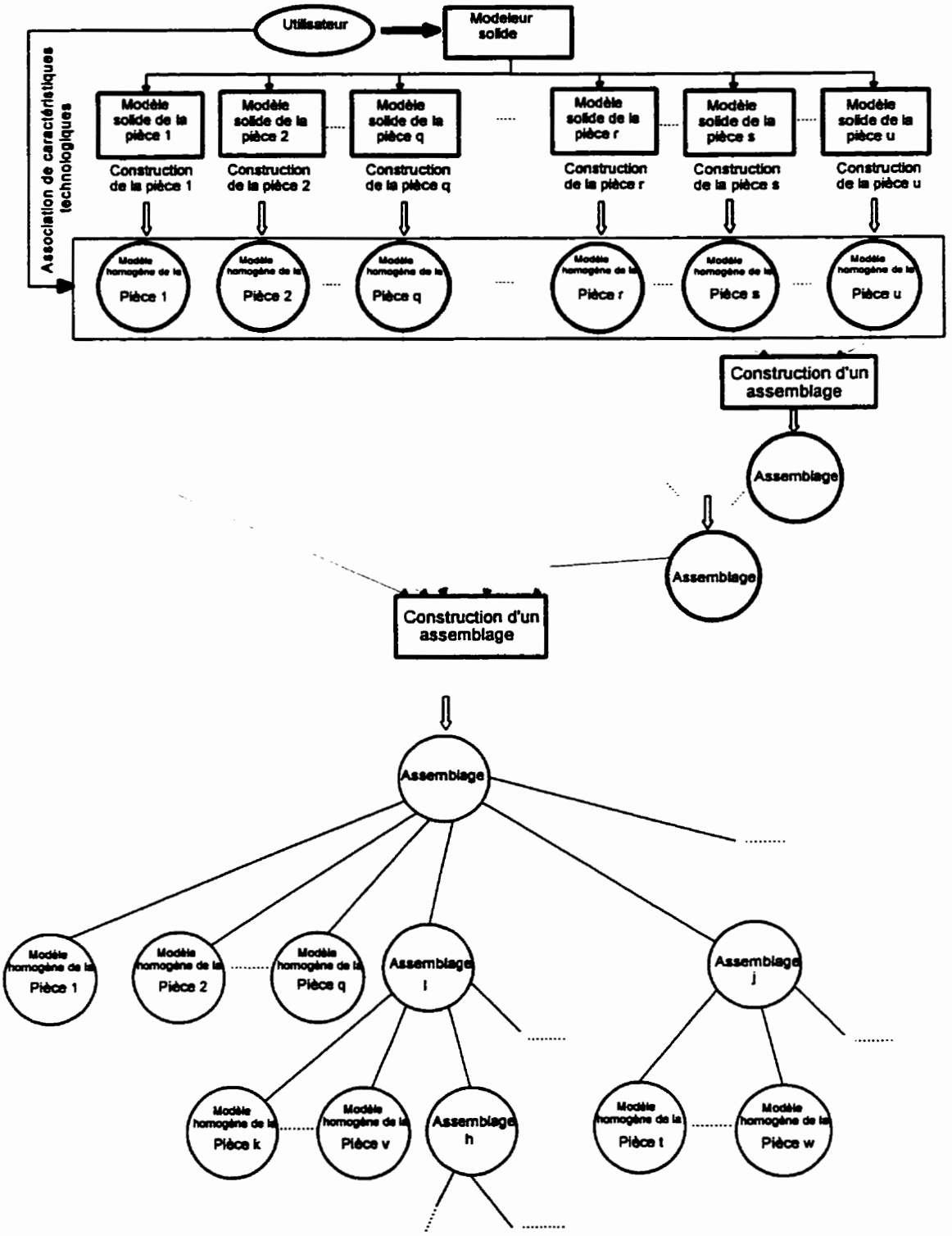


Figure 3.2. Démarche de construction d'un assemblage

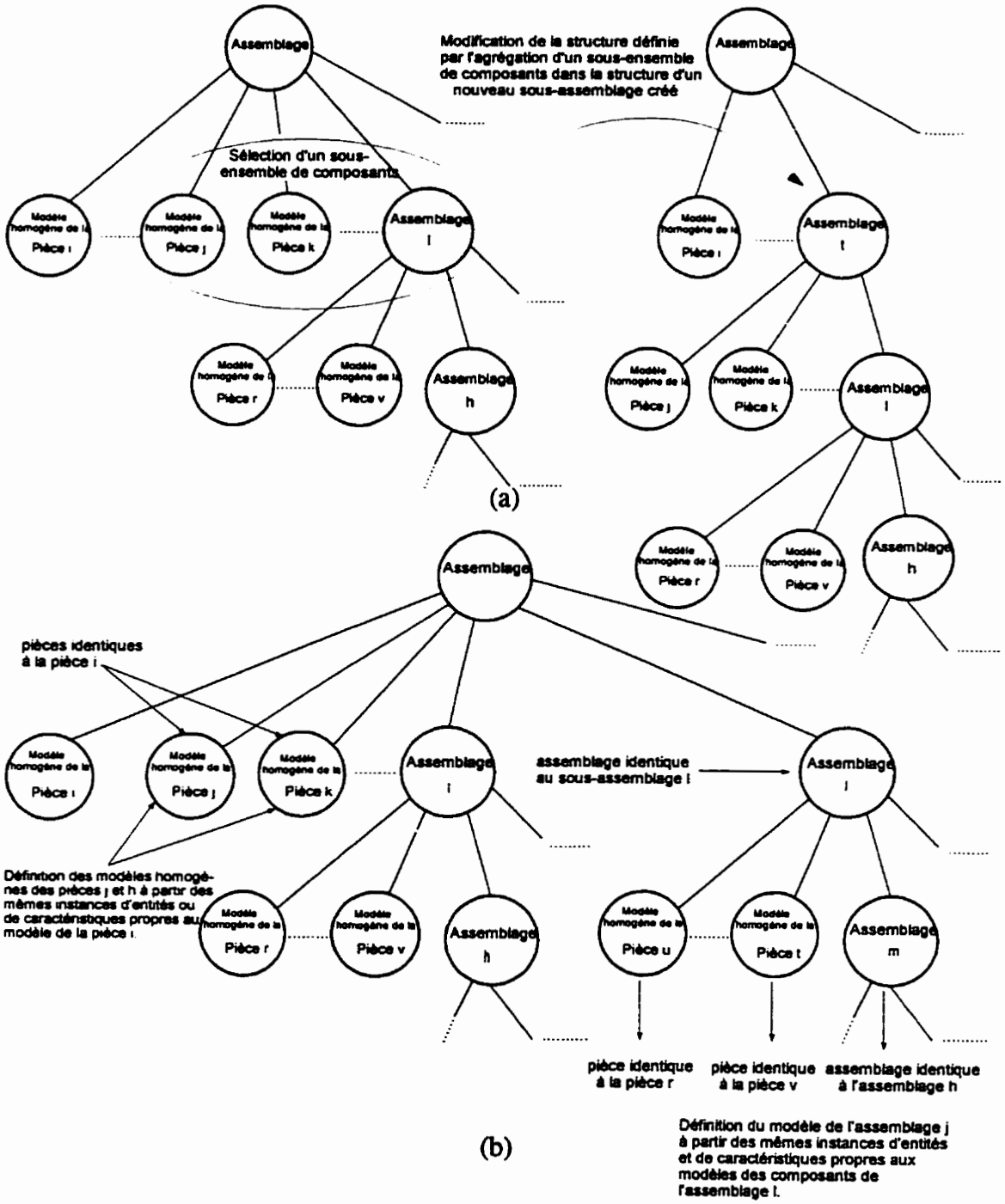


Figure 3.3. a) Modification de la structure hiérarchique suite à la création d'un nouveau sous-assemblage, b) Démarche de définition des instances de composants

sous-assemblages. Dans ce cas, lors de la construction de la structure du produit, nous pouvons faire face à une redondance au niveau de la définition des caractéristiques propres aux modèles de pièces ou de sous-assemblages identiques. On peut distinguer deux cas:

- cas où les caractéristiques d'assemblage (CA) sur des composants identiques ne sont pas similaires. C'est par exemple le cas des deux bagues (12) sur la figure (B1) (en annexe B) qui n'ont pas les mêmes liaisons dans le produit. Il est alors possible que les processus d'insertion de ces composants ne soient pas identiques. C'est le cas lorsque les conditions ou les directions de montage des composants sont différentes, ou aussi, lorsque ces derniers apparaissent dans des branches distinctes de la gamme d'assemblage. Par conséquent, il est nécessaire de caractériser cette différence au niveau des CA en créant des instances d'assemblage de modèles relatifs à des composants distincts. La méthodologie de conception paramétrique [KON-90] est adéquate. Elle permet de propager:
  - les caractéristiques propres d'une même instance de modèle, à la famille de pièces identiques,
  - les mêmes structures et instances de modèles de composants, à la famille de sous-assemblages identiques (figure 3.3(b)).

  La complexité de la mémoire, au niveau de la conception des pièces de base, sera donc proportionnelle au nombre effectif de pièces modélisées plutôt qu'au nombre réel de pièces du produit,
- cas où les caractéristiques d'assemblage, relatives à un ensemble de p composants identiques, sont similaires. Également, on sait a priori que leur montage doit s'effectuer de façon consécutive et simultanée. C'est par exemple le cas des six vis (14), des quatre vis (10) et des deux bouchons (11) sur la figure (B1). Cette fois-ci nous pouvons faire face à une redondance au niveau de la définition de modèles et des CA relatives à des éléments identiques. Ces derniers ne se

différencient que par leur position dans le produit. La réduction d'une telle redondance sera dans ce cas assurée en ayant recours au concept de groupe inspiré par les travaux de [TEM-85], [HEE-89] et [BON-91].

Le concept de groupe est un aspect de la problématique de l'assemblage qui comporte sa propre méthodologie. Il est en dehors du champs d'action de cette thèse. Nous l'avons cependant limité au cas des éléments identiques en se basant sur les deux hypothèses suivantes:

• Le processus et les contraintes d'assemblage peuvent être décrites complètement par un groupe de composants au sein d'une structure de données de sorte que le traitement d'élaboration d'une gamme est unique. Une telle structure permet aussi la mise en évidence de la similarité du processus d'élaboration des éléments ne se distinguant les uns des autres qu'en fonction de quelques paramètres parfaitement identifiés.

• Lorsqu'à l'intérieur des composants d'un même groupe, il n'y a pas de relations d'antériorité, il semble inutile de produire toutes les séquences d'assemblage contenant toutes les permutations admissibles de ce groupe. Il conviendrait donc d'adopter pour le groupe de composants une représentation spécifique afin de simplifier la représentation globale de la gamme d'assemblage.

La structure de données, utilisée dans le modèle, ressemble à celle mise en oeuvre dans certains systèmes de CAO. Elle décrit le comportement en assemblage d'un groupe de composants identiques à partir de la définition d'un **composant type** et d'éléments identiques à celui-ci. Les CA du groupe sont alors déterminées à partir de l'analyse de celles relatives à un élément à une position particulière dans le produit. Étant donné que les composants sont identiques, la modélisation d'un seul composant permet alors de propager les CA à l'ensemble des composants constituant le groupe. Ceci permet aussi

d'éviter la répétition de la même information plusieurs fois alors qu'une seule s'avère suffisante pour décrire le comportement du groupe.

Définition 3.3: *Un composant est dit* ***type*** *lorsqu'il caractérise le comportement en assemblage d'un groupe de composants identiques. Il décrit alors d'une façon unique le processus d'assemblage relatif à un sous-ensemble de composants. Ces derniers doivent être assemblés soit consécutivement, soit à une seule étape parce qu'ayant la même fonction.*

La démarche précédente correspond donc à une simplification de la structure hiérarchique du produit. Elle ouvre par ailleurs la possibilité:

- d'éviter une redondance au niveau de la définition des caractéristiques d'assemblage sur des éléments identiques,
- de permettre au préparateur d'associer directement la qualité du groupe à un ensemble de composants lors de la génération de la gamme d'assemblage.

3.2.3-Procédure de construction de la structure hiérarchique du produit

La procédure de construction de la structure hiérarchique d'un produit a été adaptée pour supporter les différentes alternatives de choix décrites dans le paragraphe précédent. Cette procédure a l'avantage de permettre une simplification de l'information qu'il faut représenter sur le modèle du produit. Elle permet à l'usager de procéder selon les trois étapes suivantes:

• **La construction du produit à partir des modèles de composants de base (pièces et sous-assemblages)**. À chaque composant, une nomenclature doit lui être associée ainsi qu'un référentiel (O_c, X_c, Y_c, Z_c). Ce dernier permet de le situer dans le produit. Les

coordonnées x_{Oc}, y_{Oc} et z_{Oc}, du centre O_c, et les trois vecteurs unitaires des axes X_c, Y_c, Z_c sont au départ initialisés par rapport au référentiel défini dans le modeleur solide. Ce dernier est au début considéré comme le référentiel propre au produit. Ceci conduit alors à la localisation des composants et à une structure partielle de l'arbre identique à celle sur la figure 3.2.

• **La définition des différentes instances de composants**. À chaque instance, un identificateur alphanumérique peut lui être associé. Cet identificateur sert pour la différencier des autres instances déjà définies. Dans le cas d'un sous-assemblage, les identificateurs de ses composants peuvent être modifiés a posteriori de la définition de son modèle. D'un autre côté, nous devons spécifier les valeurs de translation x_t, y_t et z_t par rapport au centre du référentiel du produit, et les valeurs des angles de rotation θ_x, θ_y et θ_z, autour des axes X, Y et Z de ce dernier. Ces valeurs servent pour situer la nouvelle instance de composant dans le produit. Le nouveau composant créé sera ainsi caractérisé, d'une part, par la même instance de modèle que le composant initial et, d'autre part, par un référentiel qui identifie sa localisation dans le produit.

• **La modification de la structure de l'arbre par la possibilité de définition de nouveaux sous-assemblages**. À cette étape, l'approche de modélisation permet la sélection, puis l'agrégation d'un sous-ensemble de composants dans la structure d'un sous-assemblage.

En vertu des règles définies au paragraphe 2.4.1.4, le référentiel du produit et de chacun des sous-assemblages doit être rattaché à celui de son récepteur. Ce dernier peut être soit une pièce, soit un sous-assemblage. Il convient alors de permettre au préparateur à l'assemblage de définir un tel composant pour le produit complet et également pour chacun des sous-assemblages. En effet, la démarche suivie par le préparateur pour identifier le récepteur peut se faire:

- soit manuellement au premier examen d'un plan d'ensemble [HEE-89], [LIN-93]. Dans ce cas, il serait possible d'identifier les récepteurs du produit et de chacun de ses sous-assemblages au fur et à mesure de la définition de la structure hiérarchique des différents niveaux de sous-assemblages,
- soit sous forme algorithmique et appliquée a posteriori à partir de la recherche des caractéristiques relatives aux composants [MAS-90], [CHE-93].

Une fois les récepteurs de chaque niveau de sous-assemblages déterminés, les transformations associées aux composants doivent être redéfinies par rapport aux nouveaux référentiels associés (figure 3.4). Nous avons alors développé une procédure récursive qui permet à l'usager d'accomplir cette tâche après la construction de la structure hiérarchique du produit . Cette procédure effectue le parcours de l'arbre définissant la structure hiérarchique. Elle permet ainsi la recherche des récepteurs sur les différents niveaux de composants.

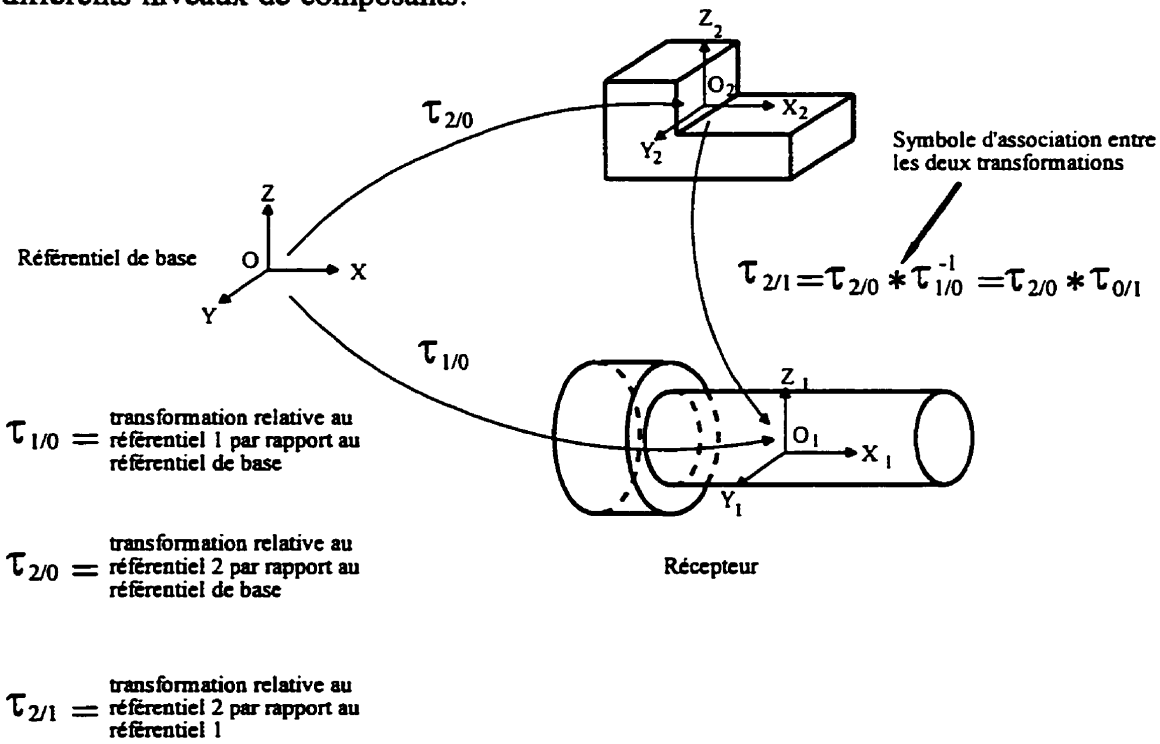


Figure 3.4. Redéfinition des transformations par rapport au référentiel du récepteur

La tâche de construction de la structure hiérarchique du produit utilise donc quatre fonctions:

-**Définir** la structure hiérarchique du produit

Objectif : construire le produit à partir des modèles de pièces issus de la conception et des modèles pré-définis de sous-assemblages

Entrées : modèles des composants

Sorties : structure hiérarchique relative à un assemblage équivalent au produit

Règles : règles d'intégration des composants dans la structure d'un arbre

-**Créer** des instances de composants

Objectif : définir des instances d'assemblage différentes de composants

Entrées : modèle du composant, positions et orientations des nouvelles instances

Sorties : nouvelles instances de composants créés

Règles : propagation des mêmes caractéristiques relatives à la même instance de modèle du composant

-**Agréger** un sous-ensemble de composants dans la structure d'un sous-assemblage

Objectif : modifier la structure du produit par l'agrégation d'un sous-ensemble de composants dans la structure d'un sous-assemblage

Entrées : modèle des composants à intégrer dans la structure d'un sous-assemblage

Sorties : un assemblage intégré à la structure hiérarchique

Règles : intégration d'un nouveau composant à la structure de l'arbre

-**Redéfinir** les référentiels associés aux composants

<u>Objectif</u> : rattacher le référentiel de chaque assemblage à celui de son récepteur

<u>Entrées</u> : structures hiérarchiques du produit, récepteurs sur les niveaux de sous-assemblages

<u>Sorties</u> : nouveaux référentiels associés aux composants

<u>Règles</u> : parcours de l'arbre à la recherche des récepteurs sur les différents niveaux de composants

La décomposition fonctionnelle de la tâche "Construire la structure hiérarchique du produit" peut donc se présenter comme sur la figure 3.5.

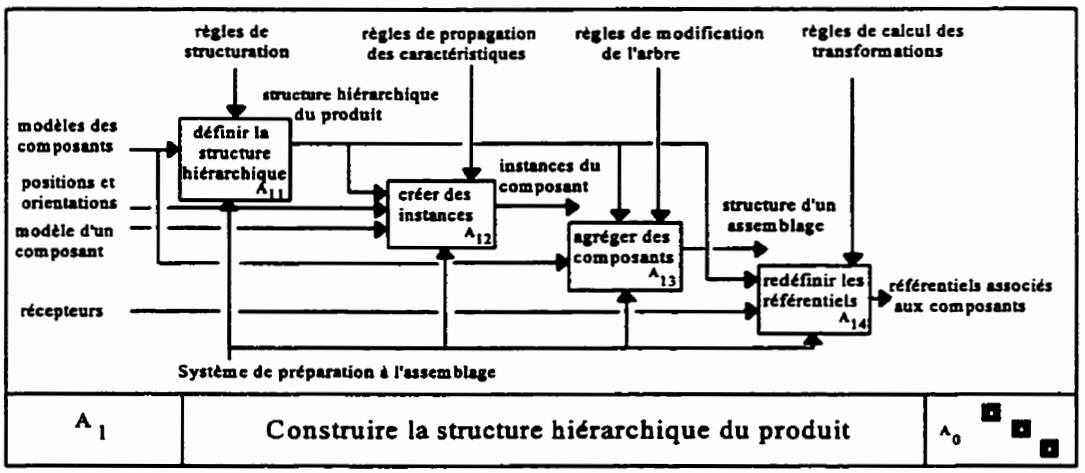


Figure 3.5.Décomposition de la tâche "Construire la structure hiérarchique du produit"

Notons ici qu'à ce stade de modélisation, nous ne pouvons pas dire que la structure hiérarchique du produit soit complète. D'abord, les sous-assemblages a propos ou a posteriori ne peuvent être identifiés que lors de l'analyse du processus d'assemblage. Ensuite, comme nous l'avons mentionné au début de ce paragraphe, certains sous-assemblages de niveaux quelconques sont montés eux-mêmes sur des sous-assemblages.

Ils ne sont pas repérables en tant que sous-assemblages directement et entièrement lors de l'assemblage du produit, mais lors de l'assemblage du sous-assemblage auquel ils appartiennent.

La figure D1, en annexe D, représente en formalisme NIAM l'ensemble des caractéristiques relatives à la structure hiérarchique du produit. Sur cette structure, on voit apparaître un seul type d'objet (Assemblage) caractérisant le produit et chacun de ses sous-assemblages, cela à cause de la similarité de structure relative à chacun de ces éléments. Ceci permet aussi la mise en évidence de l'homogénéité de traitement au niveau de ces objets, ainsi que des types de caractéristiques qui leur sont associées. Par exemple, chacun des assemblages peut être caractérisé par une gamme, une nomenclature, une structure hiérarchique, etc.

3.2.4-Modèle homogène de pièce

Le modèle homogène de pièce consiste en un modèle unique et cohérent incluant les informations topologiques, géométriques et technologiques ainsi que les relations qui lient ces informations entre elles.

3.2.4.1-Modèle géométrique et topologique

Le modèle topologique et géométrique caractérise la forme solide tridimensionnelle propre à une pièce. Dans le modèle, nous avons choisi d'adopter la représentation par les frontières (B-rep) qui décrit un solide par l'ensemble des faces constituant l'enveloppe, chacune de ces faces étant elle-même limitée par des contours composés d'arêtes. On distingue deux sortes d'informations:

- les informations géométriques vouées à préciser davantage les formes:

coordonnées des sommets, équations des faces et des arêtes. C'est pourquoi les informations géométriques apparaissent comme les attributs des informations topologiques, à chaque niveau pertinent,

- les informations topologiques hiérarchisées sur plusieurs niveaux d'entités (corps, face, contour, arête, sommet, etc.) incluant les relations qui les lient entre elles. Par exemple, le corps est limité par un nombre fini d'enveloppes. Chacune d'entre elles est composée d'un nombre fini de faces qui forment la frontière de l'objet. La plupart des faces sont bornées par un ou plusieurs contours. Une sphère, en revanche, ne possède pas de contour, tandis qu'une face trouée présente un contour extérieur et un contour intérieur. Un contour, lorsqu'il existe, appartient toujours à une et une seule face. Chaque contour est composé d'un nombre d'arêtes supérieur ou égal à un. Dans la mesure où les modèles étudiés, représentant des pièces mécaniques, sont toujours manifolds, c'est à dire exclusivement solides [MASU-89], toute arête est incluse exactement dans deux contours, qui sont ceux définissant les faces qui se rejoignent au niveau de cette arête. Chaque arête à son tour est définie par au moins deux sommets.

La figure D2, en annexe D, illustre à titre d'exemple la structure mise en oeuvre dans le modeleur solide ACIS™ (de Spatial Technology). Ce dernier est utilisé dans le modèle pour supporter la génération des modèles solides à partir desquels nous construisons les différentes pièces du produit.

La représentation B-rep convient bien pour la détermination des sous-faces de contact et de préhension, pour la cotation et pour la modélisation des liaisons. C'est la représentation la plus fréquemment utilisée par les chercheurs.

3.2.4.2-Modèle technologique

Le modèle technologique comprend toutes les entités qui figurent sur un plan détaillé de pièce mécanique et qui ne sont pas explicitement présentés dans le modèle topologique et géométrique. De même que le modèle géométrique, le modèle technologique s'appuie en partie sur le modèle topologique en y apportant les contraintes significatives pour la préparation à l'assemblage. Le modèle technologique se compose donc de caractéristiques technologiques qui peuvent être intrinsèques ou extrinsèques aux entités du modèle topologique et à la pièce.

3.2.4.2.1-Caractéristiques technologiques intrinsèques à une entité

Définition 3.4: *Une caractéristique intrinsèque à une entité sert à préciser une qualité propre à cette entité. C'est donc un attribut de cette entité.*

La figure D3 (en annexe D) donne quatre exemples de caractéristiques intrinsèques:

- des caractéristiques de matériau et d'identification qui concernent la pièce,
- des caractéristiques d'état de surface et de traitement qui concernent une face,
- une caractéristique de rectitude qui concerne une arête droite.

Notons que la caractéristique technologique de matériau en est une obligatoire qui caractérise la pièce, tandis que les caractéristiques d'état de surface, de traitement et les caractéristiques de tolérance de forme, qui peuvent variablement contraindre une face, sont des caractéristiques facultatives.

3.2.4.2.2-Caractéristiques technologiques extrinsèques aux entités

***Définition** 3.5: Une caractéristique extrinsèque à une entité sert à préciser une relation (contrainte) avec d'autres entités.*

De manière générale, on aura recours aux caractéristiques extrinsèques pour modéliser les relations telles que les cotes ou les tolérances géométriques. Une relation peut s'établir entre entités de même nature (parallélisme entre deux faces) mais aussi entre entités de nature différente (cote entre une face et une arête).

La figure D4, en annexe D, illustre deux types de caractéristiques technologiques extrinsèques aux entités de modèle topologique:

- la cote entre une face et une arête,
- la tolérance d'inclinaison entre deux faces.

Notons que dans certains types de caractéristiques extrinsèques, celle *référée* ou *de référence* sert à préciser si la relation est orientée que ce soit de manière implicite ou explicite.

3.2.4.2.3-Génération du modèle de pièce homogène

La plupart des composants industriels peuvent être spécifiés au moyen de l'ensemble restreint d'attributs donnés dans le tableau 3.1. Ces attributs s'appliquant toujours de manière intrinsèque ou extrinsèque aux entités du modèle topologique et à la pièce, le modèle homogène de cette dernière peut donc être généralisé à partir des exemples précédents.

Tableau 3.1: Attributs relatifs aux entités propres à un modèle homogène de pièce

Attribut	Caractéristiques relatives à l'attribut	Entité d'application
cote parallèle	- indicateur sur la relation orientée (référée ou de référence) - valeur nominale - tolérance supérieure - tolérance inférieure - pointeur à l'arête ou la face référée ou de référence	Face ou arête (cote parallèle, rectitude, circularité)
rayon	- valeur nominale - tolérance supérieure - tolérance inférieure	
angle	- indicateur sur la relation orientée (référée ou de référence) - valeur nominale - tolérance supérieure - tolérance inférieure - pointeur à la face référée ou de référence	
rectitude	- valeur de la tolérance	
circularité		
planéité		
cylindricité		

Tableau 3.1 (suite): Attributs relatifs aux entités propres à un modèle homogène de pièce

Attribut	Caractéristiques relatives à l'attribut	Entité d'application
inclinaison	- indicateur de zone (diamétrale ou linéaire) - valeur de la tolérance - modificateur (maximum de matière, minimum de matière, etc.) - pointeur à la face de référence	Face
perpendicularité		
parallélisme		
position	- indicateur de zone (diamétrale ou linéaire) - valeur de la tolérance - modificateur - pointeur à la 1ère face de référence - modificateur de la 1ère face - pointeur à la 2ème face de référence - modificateur de la 2ème face - pointeur à la 3ème face de référence - modificateur de la 3ème face	
concentricité	- indicateur de zone - valeur de la tolérance - modificateur - pointeur à la face de référence - modificateur de la face	

Tableau 3.1 (suite): Attributs relatifs aux entités propres à un modèle homogène de pièce

Attribut	Caractéristiques relatives à l'attribut	Entité d'application
matériau	- désignation - densité - propriété (magnétique, électrostatique, etc.)	Pièce
traitement	- désignation	Face

La liste donnée dans le tableau 3.1, n'est bien sûr pas exhaustive et l'on pourrait y ajouter par exemple les contraintes de battement simple ou de battement total qui ne seraient pas fondamentalement différentes des précédentes.

Cependant, étant donné que le modèle technologique est partiellement supporté par le modèle topologique, il doit être généré postérieurement. C'est le rôle de la fonction de cotation qui suppose donc l'existence préalable des modèles topologique et géométrique.

Notons que dans le modèle, la cotation n'a pour but que l'enseignement au système de la sémantique fonctionnelle des contraintes issues de la conception. Pour cette raison, elle ne saurait être entièrement automatisée. Toutefois, un certain nombre d'attributs relatifs à la cotation peuvent ne pas nécessiter d'intervention humaine sur le modèle. Ces attributs concernent particulièrement les valeurs nominales qui caractérisent les tolérances dimensionnelles relatives à une distance entre deux faces planes parallèles ou à un rayon d'une face cylindrique ou sphérique.

3.2.5-Modélisation des liaisons

3.2.5.1-Les liaisons et les degrés de liberté

On montre en mécanique que le mouvement quelconque d'un solide (S) résulte toujours instantanément d'une rotation et d'une translation. On sait d'autre part qu'une rotation ainsi qu'une translation sont représentables par un vecteur.

On peut donc, mathématiquement, référer le mouvement instantané de (S) par les six coordonnées indépendantes associées à deux vecteurs, l'un à la rotation, l'autre à la translation. Chacune de ces coordonnées traduit la possibilité d'un mouvement élémentaire appelé degré de liberté.

Conventionnellement, un solide libre possède donc:

- trois translations selon les trois axes: t_x, t_y, t_z
- trois rotations autour des trois axes: θ_x, θ_y et θ_z

Soit au total six degrés de liberté.

Lorsque l'un des six mouvements n'est pas possible suite à la présence d'un obstacle par exemple, on dit que le solide est soumis à un degré de liaison.

D'après C. Mascle [MAS-90], une liaison se traduit par des relations de dépendance entre les paramètres q (appelés aussi coordonnées généralisées) définissant la position d'un système de solides quelconque, les vitesses généralisées et le temps. Ces relations expriment la suppression d'un ou de plusieurs degrés de liberté ou la réalisation d'un ou de plusieurs degrés de liaisons, soit symboliquement:

$$[Liaison] \leftrightarrow [f_j\ (q,\dot{q},t)=0 \ \ ou\ f_j\ (q,\dot{q},t)\geq 0,\ j=1\ \ à\ \ 6]$$

On distingue ainsi les liaisons:

- unilatérales: $f_j\ (q,\dot{q},t)\geq 0$. C'est par exemple le cas où il y a des positions avec contact et des positions sans contact. La liaison s'exprime alors par une inégalité large. L'égalité correspond aux positions où le contact a effectivement lieu,
- bilatérales: $f_j\ (q,\dot{q},t)=0$. Ceci correspond au cas où il y a contact entre les composants dans toutes les directions possibles.

Ces liaisons peuvent être aussi non holonomes (c'est-à-dire dépendantes des vitesses) ou holonomes, dans le cas contraire ($f_j\ (q,t)\geq 0$).

Lorsque les solides ne sont astreints qu'à des conditions géométriques de contact entre eux, les relations de liaison ne font pas intervenir les vitesses et sont de la forme:

$$f\ (q,t)=0$$

Ces liaisons sont alors **holonomes ou géométriques**.

L'éventuelle dépendance du temps, pour une liaison, vient nécessairement d'éléments extérieurs mobiles. Un contact entre deux composants correspond, suivant sa géométrie, à un nombre de degrés de liaison compris entre un et six. Dans la pratique, ces liaisons sont souvent réalisées par des articulations qui ne correspondent pas à un contact uniquement "ponctuel", exemples: une articulation sphérique ou une articulation verrou.

Nous remarquons aussi une difficulté pour pouvoir exprimer les égalités ou les inégalités tenant compte des jeux, des frottements secs ou visqueux, des déformations élastiques, etc. De façon analogue à la démarche proposée par C. Mascle, nous avons cherché dans

un premier temps à simplifier le problème. Nous avons donc binarisé les degrés de liaison tout en faisant appel à la notion du demi-degré de liaison. Il s'agit d'éviter des problèmes de formalisation résultant du blocage simultané ou non d'un degré de liaison dans les sens positif et négatif. En représentant un demi degré lié par 1 et un demi degré libre par 0, les liaisons peuvent être décrites par des pseudo-matrices qui expriment les demi degrés de liaison (réf. paragraphe 3.2.6). Une telle démarche nous a permis aussi de se baser sur d'autres concepts proposés par C. Mascle, notamment ceux concernant l'application des opérateurs booléens à ces pseudo-matrices pour simuler la mise en parallèle ou en série de plusieurs liaisons. De tels concepts sont eux-mêmes repris des travaux entrepris par le prof. K. Roth [Roth-82] qui avait développé toute une théorie sur les matrices logiques de liaison, appliqué au domaine de la construction mécanique. Ceci est normalisé dans VDI 2232.

Nous avons alors cherché à élaborer une modélisation plus complète des liaisons entre les composants qui prend en compte l'ensemble des constatations que nous avons observé au cours du chapitre précédent. Cette modélisation précise davantage la nature de montage entre les composants, et ceci en faisant appel à la notion de la sous-face de contact. Cette dernière décrit d'une façon précise l'interaction entre une paire de faces traduisant ainsi l'existence d'une liaison résultant du contact entre cette paire. La modélisation que nous proposons permet aussi la mise en évidence de toute liaison résultante: soit d'une action technologique appliquée et conduisant au blocage de demi-degrés de liaison entre les surfaces en contact sur les pièces, soit de la collision sur la trajectoire d'assemblage.

Dans les deux premiers cas, il s'agit d'une liaison réelle dont la détermination nécessite une analyse des caractéristiques géométriques et technologiques dans le produit. Dans le troisième cas, il s'agit d'une liaison virtuelle car le contact entre les composants ne s'établit qu'après une certaine translation ou rotation sur la trajectoire d'assemblage. La

détermination d'une telle liaison nécessite alors une analyse géométrique faisant intervenir des mouvements relatifs entre les composants dans le produit. Cependant, afin de simplifier le problème, nous suivons une démarche basée sur la règle suivante:

Règle 3.1: *Si la distance minimale entre deux faces est inférieure à une certaine limite de jeu, les deux faces sont considérées en contact.*

La syntaxe utilisée, dans les prochaines étapes de calcul, est illustrée sur la figure 3.6.

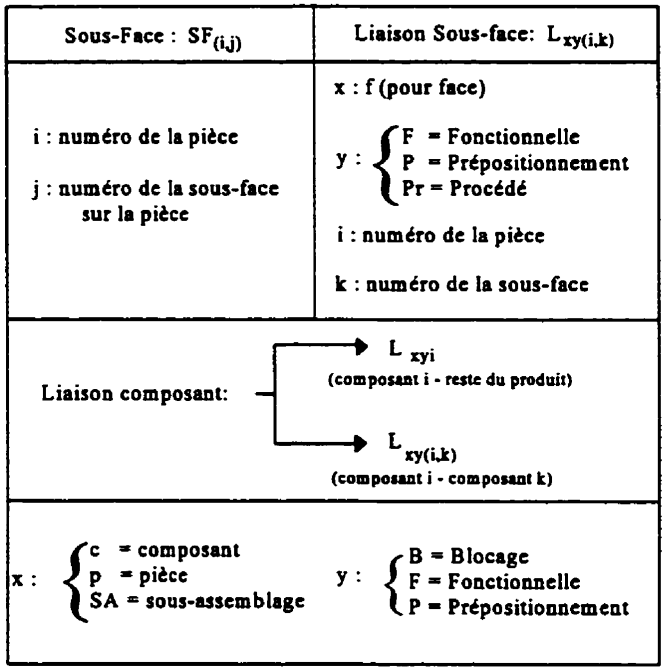


Figure 3.6. Syntaxe utilisée dans les équations

3.2.5.2-Modèle géométrique et technologique des liaisons

Si l'on considère l'hypothèse énoncée au paragraphe 2.4.1.5, nous voyons que l'établissement de toute liaison fait intervenir deux phases principales:

- une phase qui met en jeu de la géométrie,

– une phase de procédé qui met en jeu de l'énergie.

La phase géométrique de la liaison réalise donc un ou plusieurs contacts physiques entre les sous-faces des composants. Elle met en jeu une insertion ou un placement par simple manipulation afin de permettre, dans la plupart des cas, la réalisation de certaines actions technologiques. Pour cette raison, lors d'un retournement du produit, ces contacts peuvent être rompus et le composant inséré risque de changer de position par rapport aux composants fixés. Dans certains cas, cette phase consiste à amener le composant jusqu'à une position temporaire qui peut changer à la suite de l'application d'un procédé d'assemblage. C'est par exemple le cas de certains composants déformables comme les anneaux élastiques ou de l'opération d'assemblage caractérisé sous le nom *place on and turn.*

Nous pouvons alors parler de prépositionnement géométrique, au niveau de cette phase, plutôt que de positionnement; le terme utilisé par certains chercheurs tels que [BOU-84], [DEL-92], [HEN-92].

Définition 3.6: *Une liaison de prépositionnement est toute liaison mettant en jeu une insertion ou un placement par simple manipulation. Elle traduit un lien purement géométrique entre deux entités. Un fait qui est aussi à l'origine de situations où la rupture de la liaison se produit suite au retournement du produit.*

Après le prépositionnement d'un composant dans le produit, l'ensemble pourtant obtenu n'est pas stable dans toutes les positions, il n'est donc pas fonctionnel de manière permanente voire pas fonctionnel du tout. La deuxième phase, correspondant à un procédé d'assemblage, a pour but de créer des liaisons s'opposant à tout déplacement relatif des composants élémentaires assemblés (déformation d'un rivet, soudage, collage, etc.). Cette phase nécessite la réalisation d'une ou de plusieurs actions technologiques

définies d'une façon prédéterminée (d'où le nom de procédé appliqué à cette phase). L'ensemble partiel, obtenu à la suite de la création de telles liaisons, sera alors totalement bloqué sur tous ses degrés de liberté, ce qui assure sa stabilité ainsi que l'aptitude du produit à l'emploi.

Définition 3.7: *Une liaison de procédé est toute liaison résultant d'une ou de plusieurs actions appliquées distinctivement à une action de prépositionnement. Cette liaison donne à un ensemble de composants leur stabilité relative des uns par rapport aux autres, mais aussi à un produit son aptitude à l'emploi.*

Les deux phases appliquées soit individuellement, soit simultanément sur les composants, conduisent alors à définir un mode de fonctionnement du produit dans chacun de ses états. Ce mode de fonctionnement permet alors au préparateur de prendre des décisions concernant le passage à l'état suivant par l'application des critères de génération et d'évaluation des gammes d'assemblages. Dans le reste de cette thèse, lorsque la liaison décrit l'aspect fonctionnel de la liaison, elle est appelée liaison fonctionnelle. Cette dernière peut faire intervenir soit individuellement, soit simultanément les deux phases précédentes.

Définition 3.8: *Nous définissons une liaison fonctionnelle entre deux sous-faces comme égale à une liaison de prépositionnement L_{fp} en disjonction avec une liaison de procédé $L_{f(Pr)}$:*

$$L_{fF} = L_{fP} \vee L_{f(Pr)} \qquad [3.1]$$

Définition 3.9: *Nous définissons une liaison fonctionnelle $L_{pF(i,q)}$ entre une piece i avec une piece q comme la liaison équivalente à la mise en disjonction de toutes les liaisons fonctionnelles sur l'ensemble S_{iq} des sous-faces résultantes du contact de la pièce i avec une pièce q dans le produit:*

$$L_{pF(i,q)} = \bigvee_{j \,/\, SF(i,j) \in S_{iq}} L_{fF(i,j)} \qquad [3.2]$$

Théorème: *la liaison fonctionnelle d'une pièce i avec le reste du produit est équivalente à la mise en disjonction de toutes les liaisons fonctionnelles avec les autres pièces.*

$$L_{pFi} = \bigvee_{q} L_{pF(i,q)} \qquad [3.3]$$

Démonstration: Considérons à la figure 3.7, le cas de l'assemblage de l'anneau élastique (7) relatif au bobinoir (voir figure B2 en annexe B), de la chemise (2) et du vilebrequin (6) relatifs au micro-moteur (voir figure B1).

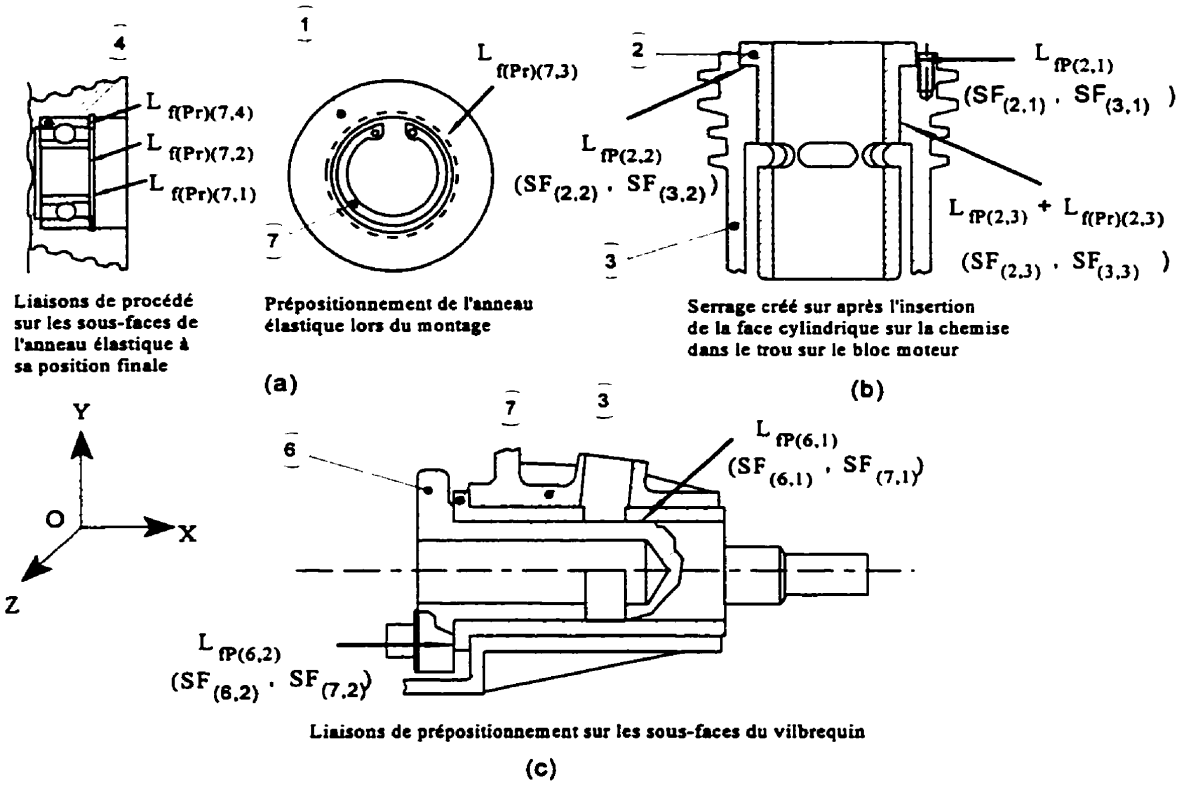


Figure 3.7. Exemples sur la méthode d'assemblage des pièces

Dans le cas de l'anneau élastique, l'assemblage est réalisé à l'aide d'un procédé qui permet la fermeture des mâchoires après le prépositionnement de l'anneau. Ceci a pour effet de créer les liaisons $L_{f(Pr)(7,1)}$, $L_{f(Pr)(7,2)}$, $L_{f(Pr)(7,3)}$ et $L_{f(Pr)(7,4)}$. La liaison fonctionnelle

entre l'anneau et le reste du produit est ainsi assurée.

Dans le cas de la chemise (2), l'assemblage est réalisé à l'aide d'un procédé qui permet de créer simultanément un prépositionnement géométrique entre les sous-faces ($SF_{(2,1)}$, $SF_{(3,1)}$), ($SF_{(2,2)}$, $SF_{(3,2)}$) et ($SF_{(2,3)}$, $SF_{(3,3)}$) (ou la création des liaisons $L_{fP(2,1)}$, $L_{fP(2,2)}$ et $L_{fP(2,3)}$) et un serrage entre les deux sous-faces ($SF_{(2,3)}$, $SF_{(3,3)}$). Cela a pour effet de bloquer les degrés de liberté de la liaison de prépositionnement entre ces deux sous-faces (ou la création de la liaison $L_{f(Pr)(2,3)}$).

Par contre, dans le cas du vilebrequin (6), sa liaison fonctionnelle avec le colier (7) est uniquement la résultante des liaisons de prépositionnement $L_{fP(6,1)}$ et $L_{fP(6,2)}$ entre les sous-faces ($SF_{(6,1)}$, $SF_{(7,1)}$) et ($SF_{(6,2)}$, $SF_{(7,2)}$).

Dans chacun des cas cités, nous voyons bien que la liaison fonctionnelle d'un composant est la résultante de la réunion:

- soit de l'ensemble des liaisons de prépositionnement de ses sous-faces de contact (figure 3.7(c)),
- soit de l'ensemble des liaisons résultant des procédés appliqués (figure 3.7(a)),
- soit des deux ensembles simultanés (figure 3.7(b)).

À chaque état du produit, la liaison fonctionnelle L_{pFi} d'une pièce i est donc équivalente à la mise en disjonction de l'ensemble des liaisons de prépositionnement $L_{fP(i,j)}$ sur ses sous-faces de contact avec l'ensemble des liaisons $L_{fPr(i,k)}$ résultant des procédés appliqués. Nous pouvons ainsi écrire:

$$L_{pFi} = (\vee_j \, L_{fP(i,j)}) \vee (\vee_k \, L_{f(Pr)(i,k)}) \qquad [3.4]$$

Soit $S_{iP,Pr}$ l'ensemble de sous-faces sur la pièce i qui ont une liaison de contact établie par

un procédé après le prépositionnement géométrique, S_{iP} l'ensemble de sous-faces qui ont seulement une liaison de prépositionnement et S_{iPr} l'ensemble de sous-faces qui ont seulement une liaison de contact résultant d'un procédé. L'équation [3.4] s'écrit alors:

$$L_{pFi} = \bigvee_{j/SF(i,j)\in S_{iP,Pr}}(L_{fP(i,j)} \vee L_{f(Pr)(i,j)}) \vee (\bigvee_{k/SF(i,k)\in S_{iP}} L_{fP(i,k)}) \vee (\bigvee_{l/SF(i,l)\in S_{i,Pr}} L_{f(Pr)(i,l)}) \quad [3.5]$$

Dans l'équation [3.5] le terme $\bigvee_{k/SF(i,k)\in S_{iP}} L_{fP(i,k)}$ ne change pas si on y ajoute le terme $\bigvee_{k/SF(i,k)\in S_{iP}} L_{f(Pr)(i,k)}$ (mise en disjonction avec des liaisons nulles). La même hypothèse s'applique au terme $\bigvee_{l/SF(i,l)\in S_{iPr}} L_{f(Pr)(i,l)}$ si on lui ajoute le terme $\bigvee_{l/SF(i,l)\in S_{iPr}} L_{fP(i,l)}$. Ainsi on aura:

$$L_{pFi} = (\bigvee_{j/SF(i,j)\in S_{iP,Pr}}(L_{fP(i,j)} \vee L_{f(Pr)(i,j)})) \vee (\bigvee_{k/SF(i,k)\in S_{iP}}(L_{fP(i,k)} \vee L_{f(Pr)(i,k)})) \vee (\bigvee_{l/SF(i,l)\in S_{iPr}}(L_{fP(i,l)} \vee L_{f(Pr)(i,l)}))$$

Soit:

$$L_{pFi} = \bigvee_{n\ /\ SF(i,n)\ \in\ S_{iT}} (L_{fP(i,n)} \vee L_{f(Pr)(i,n)}) \quad [3.6]$$

où $S_{iT}=S_{iP,Pr} \cup S_{iP} \cup S_{iPr}$ est l'ensemble des sous-faces de contact de la pièce i.

En tenant compte de la définition 3.9, nous voyons que la liaison fonctionnelle d'une pièce i avec le reste du produit est égale à la mise en disjonction de toutes les liaisons fonctionnelles sur ses sous-faces de contact:

$$L_{pFi} = \bigvee_{n\ /\ SF(i,n)\ \in\ S_{iT}} L_{fF(i,n)} \quad [3.7]$$

L'équation [3.7] pourrait également s'écrire sous la forme:

$$L_{pFi} = (\bigvee_{t/SF(i,t)\in S_{ir}} L_{fF(i,t)}) \vee \ldots\ldots \vee (\bigvee_{u/SF(i,u)\in S_{iq}} L_{fF(i,u)}) \vee \ldots\ldots \vee (\bigvee_{v/SF(i,v)\in S_{is}} L_{fF(i,v)}) \quad [3.8]$$

Chaque terme de l'équation [3.8] représente la mise en disjonction de toutes les liaisons fonctionnelles sur l'ensemble S_{iq} des sous-faces résultantes du contact de la pièce i avec une pièce q dans le produit. Ceci correspond en fait à la liaison fonctionnelle $L_{pF(i,q)}$ entre ces deux pièces. L'équation [3.8] s'écrit alors:

$$L_{pFi} = L_{pF(i,r)} \ldots\ldots \vee L_{pF(i,q)} \vee \ldots\ldots \vee L_{pF(i,s)}$$

Soit

$$L_{pFi} = \vee_q L_{pF(i,q)} \qquad \square$$

Notons aussi que dans l'équation [3.4], la suppression de toutes les liaisons de procédés sur toutes les sous-faces de contact d'une pièce entraîne nécessairement la mise en disjonction de toutes les liaisons de prépositionnement sur ces sous-faces.

Définition 3.10: *Nous définissons une liaison de prépositionnement $L_{pP(i,t)}$ entre une pièce i avec une pièce t comme la liaison équivalente à la mise en disjonction de toutes les liaisons de prépositionnement sur l'ensemble S_{it} des sous-faces résultantes du contact de la pièce i avec une pièce t dans le produit:*

$$L_{pP(i,t)} = \vee_{j/\ Sf(i,j) \in S_{it}} L_{fP(i,j)} \qquad [3.9]$$

Analogiquement à l'équation [3.3], nous démontrons que la liaison de prépositionnement L_{pPi} d'une pièce i avec le reste du produit est équivalente à la mise en disjonction de toutes les liaisons de prépositionnement de la pièce i avec chacune des autres pièces dans le produit:

$$L_{pPi} = \vee_t L_{pF(i,t)} \qquad [3.10]$$

Cette liaison caractérise alors la phase de prépositionnement de la pièce. Elle permet de déterminer les directions d'insertion de cette dernière avant l'application des différents procédés d'assemblage contribuant à sa stabilisation. Cependant, ces directions doivent être évaluées pour leur faisabilité au cours de la réalisation de l'opération d'assemblage. Ceci est dû au fait que l'ensemble des directions possibles de prépositionnement est déterminé à partir de la position finale de la pièce dans le produit alors que la collision intervient après le déplacement de cette dernière d'une certaine distance. Pour cette

raison, dans notre modèle, nous avons défini un troisième type de liaisons entre les pièces que nous avons appelé *liaison virtuelle de blocage.*

Définition 3.11: *Il existe une liaison virtuelle de blocage $L_{pB(i,j)}$ entre deux pièces p_i et p_j si, sur la trajectoire d'assemblage, la pièce p_i entre en collision avec la pièce p_j.*

De façon similaire aux cas précédents, la liaison de blocage L_{pBi} d'une pièce p_i avec le reste de produit devient équivalente à la mise en disjonction de toutes ses liaisons de blocage avec les autres pièces dans le produit:

$$L_{pBi} = \bigvee_j L_{pB(i,j)} \qquad [3.11]$$

L'association entre la liaison de prépositionnement et la liaison de blocage procure donc l'information nécessaire pour déterminer, d'une part, les directions possibles d'assemblage du composant et, d'autre part, si ce dernier entre en collision avec d'autres composants présents à l'état actuel du produit. Ceci conduit à une évaluation de la contrainte géométrique qui est un facteur déterminant dans la génération de la gamme d'assemblage du produit.

D'un autre côté, le processus de modélisation, présenté précédemment, montre clairement que la liaison de prépositionnement d'une pièce ne peut être déterminée qu'à partir de l'analyse de la liaison fonctionnelle. Cette dernière étant assurée en partie par les liaisons de procédés sur les sous-faces de contact. La suppression de ces liaisons permet alors de juger si l'assemblage de la pièce est possible. Ce phénomène engendre aussi des relations de précédence entre les composants. Ces relations résultent de la création de telles liaisons à la suite des actions technologiques subies par certaines pièces (par exemple les vis, les rivets, etc).

D'autre part, le changement continu des liaisons de la pièce avec les autres pièces conduit

nécessairement à une impossibilité d'évaluer ses liaisons de blocage lors de la modélisation du produit à l'état assemblé. Ceci résulte de la dépendance de ces dernières par rapport à la détermination des directions d'assemblage possibles. La liaison de blocage entre deux pièces devient alors une caractéristique d'assemblage à nature dynamique. C'est-à-dire qu'elle est fonction de l'état du produit. La recherche de son existence doit se faire continuellement dans le but d'étudier la faisabilité des opérations aux différentes étapes du processus d'assemblage du produit.

3.2.5.3-Cas des sous-assemblages

La problématique de modélisation des liaisons d'un sous-assemblage est différente de celle des pièces. Ceci résulte du fait qu'un sous-assemblage est un un sous-ensemble de composants dont certains sont eux-mêmes montés sur d'autres composants.

Cependant, nous pouvons montrer qu'en suivant la structure hiérarchique du produit et de chacun de ses sous-assemblages, nous tombons nécessairement sur des pièces lorsque nous aboutissons aux feuilles de l'arbre. Ceci met en évidence qu'un assemblage est initialement un sous-ensemble de pièces. La différentiation au niveau de ses composants n'est utilisée que dans le but de caractériser le principe de son montage sur plusieurs lignes ou machines en hors-ligne.

La remarque précédente permet d'envisager la possibilité de déterminer directement les liaisons d'un sous-assemblage à partir de l'analyse des liaisons au niveau de ses pièces. Ceci permet d'économiser du temps de traitement résultant du parcours de l'arbre à la recherche des différents niveaux de composants. Par conséquent, en suivant la même analogie que dans le paragraphe précédent, les pièces deviennent par rapport au sous-assemblage ce que sont les sous-faces par rapport à la pièce. C'est-à-dire que nous pouvons déduire les liaisons au niveau du sous-assemblage par la mise en disjonction de

toutes les liaisons relatives aux pièces le constituant. Cependant, la seule différence réside dans le fait que les liaisons entre les pièces à l'intérieur du sous- assemblage sont établies avant son insertion dans le produit. L'analyse de ces liaisons internes permet donc de déterminer si le sous-assemblage nécessite une préhension spéciale pour la stabilisation d'une ou de plusieurs de ses pièces. Par contre, seules les liaisons externes au sous-assemblage permettent d'établir les liaisons de ce dernier avec les autres composants et avec le reste du produit.

Soit $P_n = \{p_1, \ldots\ldots, p_n\}$ l'ensemble des pièces du produit.

Soit $P_{n_l} = \{p_i, \ldots, p_k \ldots, p_m, \ / \ p_k \in P_n$ et Card $P_{n_l} = n_l \leq n \}$ le sous-ensemble de pièces d'un sous-assemblage SA_l quelconque du produit.

Soit $\mathcal{L} = \{ L_{pF(i,r)}, \ldots, L_{pF(q,t)}, \ldots, L_{pF(k,s)} \}$ l'ensemble des liaisons fonctionnelles des pièces $p_q \in P_{n_l}$ avec des pièces $p_t \in P_n$.

L'ensemble $\mathcal{L}$ peut alors être scindé en (voir figure 3.8):

- $\mathcal{L}_I = \{L_{tf(j,u)} \ / \ p_j \in$ et $p_u \in P_{n_l} \}$ l'ensemble des liaisons fonctionnelles entre les pièces à l'intérieur du sous-assemblage SA_l,
- $\mathcal{L}_E = \{L_{tf(j,v)} \ / \ p_j \in P_{n_l}$ et $p_v \in \{P_n - P_{n_l}\} \}$ l'ensemble des liaisons fonctionnelles des pièces à l'intérieur du sous-assemblage SA_l avec les autres pièces du produit.

Avec: $\mathcal{L} = \mathcal{L}_I \cup \mathcal{L}_E$

D'après ce qu'on vient de mentionner, on doit donc avoir:

$$L_{SAF} = \bigvee_j \left(\bigvee_i L_{pF(i,j)} \right)_{/L_{pF(i,j)} \in \mathcal{L}_E} \qquad [3.12]$$

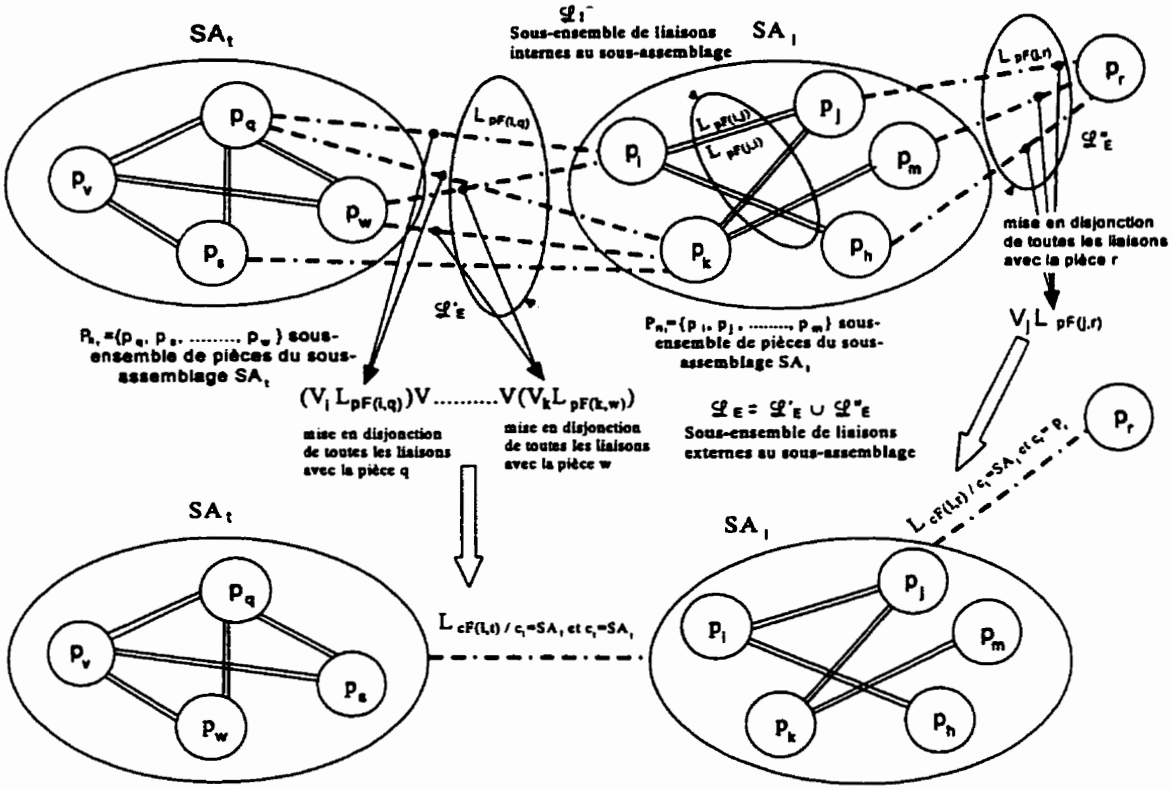


Figure 3.8. Liaisons équivalentes à un sous-assemblage déduites des liaisons au niveau de ses pièces

L'équation [3.12] pourrait également être ramenée à une forme qui regroupe les liaisons des pièces internes au sous-assemblage avec chacune des autres pièces externes à ce dernier. Il s'agit de combiner les termes qui correspondent au même indice j. Ceci revient à fixer dans l'équation [3.12] le terme j et à faire varier l'indice i. Ceci revient à écrire:

$$L_{SAF} = \bigvee_j (\bigvee_i L_{pF(i,j)}) \qquad [3.13]$$

L'équation [3.13] pourrait également s'écrire sous la forme:

$$L_{SAF} = (\bigvee_i L_{pF(i,r)}) \vee \ldots\ldots \vee (\bigvee_i L_{pF(i,q)} \vee \ldots\ldots \bigvee_i L_{pF(i,s)}) \vee \ldots\ldots \qquad [3.14]$$

Dans l'équation [3.14], le terme $\bigvee_i L_{pF(i,r)}$ représente la mise en disjonction de l'ensemble

des liaisons sur les pièces p_i qui composent le sous-assemblage SA_l avec une pièce r externe à celui-ci (voir aussi figure 3.8). Ceci correspond alors à la liaison fonctionnelle entre ces deux composants.

Définition 3.12: *Nous définissons une liaison fonctionnelle entre un sous-assemblage l et une pièce r externe à celui-ci comme la liaison équivalente à la mise en disjonction de l'ensemble des liaisons sur les p_i pièces composants le sous-assemblage avec la pièce r dans le produit:*

$$L_{cF(l,r)\ /\ c_l=SA_l\ et\ c_r=p_r} = \bigvee_i L_{pF(i,r)\ /\ p_i \in P_{n_l}\ et\ p_r \in (P_n - P_{n_l})} \qquad [3.15]$$

Également, dans l'équation [3.14], le terme $\bigvee_i L_{pF(i,q)} \vee \ldots\ldots \bigvee_i L_{pF(i,s)}$ représente la mise en disjonction de l'ensemble des liaisons sur les pièces qui composent le sous-assemblage SA_l avec l'ensemble des pièces ($P_{n_t} = \{p_q, \ldots, p_s, \ldots, p_w, \ /\ p_s \in P_n$ et Card $P_{n_t} = n_t \leq n\}$) qui composent un sous-assemblage SA_t quelconque du produit. Ceci correspond alors à la liaison fonctionnelle entre ces deux sous-assemblages.

Définition 3.13: *Nous définissons une liaison fonctionnelle entre un sous-assemblage l et un sous-assemblage t quelconque du produit comme la liaison équivalente à la mise en disjonction de l'ensemble des liaisons sur les pièces composants le sous-assemblage l avec l'ensemble des pièces composants le sous-assemblage t:*

$$L_{cF(l,t)/c_l=SA_l\ et\ c_t=SA_t \in (C - \{c_l\})} = ((\bigvee_i L_{pF(i,q)}) \vee \ldots\ldots \vee (\bigvee_i L_{pF(i,w)}))\ /\ p_i \in P_{n_l}\ et\ p_q \ldots p_w \in P_{n_t} \qquad [3.16]$$

En tenant compte des équation [3.15] et [3.16], l'équation [3.14] peut donc être amenée à une forme unique qui met en disjonction toutes les liaisons fonctionnelles du sous-assemblage *l* avec les autres composants dans le produit. Soit:

$$L_{cFl\ /\ c_l=SA_l \in C} = \bigvee_i L_{cF(i,u)\ /\ c_u \in (C - \{c_l\})} \qquad [3.17]$$

Les équations [3.15], [3.16] et [3.17] peuvent aussi être généralisées au cas des liaisons

de prépositionnement ou de blocage. Il s'agit une nouvelle fois d'appliquer une similitude qu'on a bien mise en évidence dans les équations [3.2], [3.3], [3.9], [3.10] et [3.11] au niveau des pièces.

3.2.5.4-Remarque

Comme nous pouvons le constater, la démarche de modélisation qu'on a adoptée permet de savoir comment les composants sont liés entre eux et au reste du produit. Il s'agit aussi d'un traitement homogène des caractéristiques des liaisons au niveau des différents composants dans le produit. Ce traitement permet au préparateur à l'assemblage d'évaluer en tout temps l'état de stabilité de tous les composants d'une part, et, d'autre part de savoir quel composant s'enlève ou non pour le rang considéré et les rangs subséquents. Une mathématique basée sur les opérations logiques est mise en jeu dans ce traitement. Ceci engendre la possibilité de définir une méthode algorithmique pour automatiser la procédure de modélisation des liaisons sur les différents niveaux d'assemblage représentés sur la structure hiérarchique du produit.

L'approche de modélisation peut donc être envisagée en deux temps:

- un premier temps d'interrogation du modèle de produit. Ceci permet de fixer les conditions initiales de recherche par la reconnaissance des caractéristiques élémentaires correspondant à l'état assemblé,
- un second temps de propagation des caractéristiques lors de la recherche des caractéristiques des liaisons relatives à un état donné.

En effet, l'application de chacune des équations [3.2], [3.3], [3.9] et [3.10] permet de ramener le problème à une recherche des liaisons, qui sont établies à chaque état, plutôt qu'à la définition des caractéristiques d'une liaison chaque fois qu'un état du produit est

défini. Ce type de traitement permet ainsi de s'affranchir des difficultés de la gestion et de la conservation des caractéristiques déterminées. Il ouvre aussi la possibilité de définir une méthode algorithmique qui est divisée en deux phases:

- une première phase de recherche des caractéristiques de liaison à l'état du produit assemblé. Ces caractéristiques sont alors conservées sur les instances de composants formant cet état. Ces dernières sont entre autres celles définies sur la structure hiérarchique du produit car elles sont définies à partir d'une vue d'ensemble du produit,
- une deuxième phase de recherche des caractéristiques propres à un état actuel à partir de la comparaison de la structure de cet état à celle de l'état assemblé.

Nous pouvons donc définir deux types de caractéristiques d'assemblage (CA):

- les CA de nature statique qui doivent être toujours conservées sur un modèle de produit à l'état assemblé,
- les CA de nature dynamique, dont la recherche doit s'effectuer au fur et à mesure de l'analyse du processus d'assemblage par la recherche des CA du premier type. Les liaisons de prépositionnement, fonctionnelle et de blocage, d'un composant avec le reste du produit, constituent un bon exemple de CA de ce type-ci.

Cependant, nous allons expliciter dans ce chapitre les algorithmes de recherche des CA du premier type. Quant aux algorithmes de recherche des CA du deuxième type, ils vont être explicités lorsque nous abordons le problème de la modélisation dynamique du produit pour chacun de ses états. Ce problème constitue le sujet du quatrième chapitre de cette thèse.

3.2.6-Pseudo-matrices des demi degrés de liaisons

Après avoir mis en évidence, qu'il serait possible de binariser la valeur prise par un demi degré de liaison, et constaté que nous aurions à visualiser 12 demi degrés de liaison, nous avons repris les travaux de C. Mascle [MAS-90]. Pour cela, nous avons cherché à écrire pour chaque liaison une pseudo-matrice contenant ces valeurs binaires. La raison tient aussi à la caractérisation des liaisons entre les composants par des pseudo-matrices numériques. Il en résulte une accélération du processus de modélisation lors de l'exécution des opérations de calcul et de la représentation des résultats obtenus.

Chaque pseudo-matrice 3 x 4 contient les 12 demi-degrés de liaisons (d.d.l.). La valeur d'un d.d.l. est égal à 1 si la translation ou la rotation est bloquée dans une direction donnée, 0 dans le cas contraire. Les trois lignes représentent dans l'ordre les d.d.l. dans les directions Ox, Oy et Oz. Les deux premières colonnes représentent dans l'ordre les d.d.l. de translation dans les directions positive et négative, les deux suivantes les d.d.l. de rotation dans les directions positive et négative. Par conséquent, une liaison fonctionnelle est caractérisée par une pseudo-matrice fonctionnelle (PMF), une liaison de prépositionnement par une pseude-matrice de prépositionnement (PMP), une liaison de procédé par une pseudo-matrice de procédé (PMPr) et une liaison de blocage par une pseudo-matrice de blocage (PMB).

L'intérêt de l'utilisation de ces matrices, devient encore plus évident lorsqu'on cherche à décrire, non seulement la relation entre deux sous-faces élémentaires, mais aussi entre plusieurs sous-faces élémentaires appartenant à des pièces différentes. Prenons pour exemple le contact cylindrique et le contact plan avec le même référentiel que dans la figure 3.7(c). La combinaison disjonctive des pseudo-matrices, relatives aux liaisons entre les surfaces élémentaires ($SF_{(6,1)}$, $SF_{(7,1)}$) et ($SF_{(6,2)}$, $SF_{(7,2)}$), correspond à décrire la pseudo-matrice de la liaison élémentaire de prépositionnement entre la bielle (6) et le

colier (7):

$$L_{cP(6,7)} = L_{fP(6,1)} \vee L_{fP(6,2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1^2 & 1^2 \\ 1 & 1 & 1^2 & 1^2 \end{pmatrix}$$

Explicitons maintenant l'exponentiation: c'est une extension significative de l'algèbre de Boole d'après K. Roth[ROTH-82] mais qui n'altère en rien les grandeurs binaires et ceci est important pour nos objectifs. Les principes de combinaison (de composition) sont à extraire des équations générales suivantes:

$$\begin{array}{ll} 1^m \vee 1^n = 1^{m+n} & \forall\ m>0 \ et\ n>0 \\ 1^m \vee 0 = 1^m & \forall\ m>0 \\ 0 \vee 1^m = 1^m & \forall\ m>0 \\ 0 \vee 0 = 0 & \end{array} \qquad [3.18]$$

Ces équations permettent de ramener le problème au domaine des nombres entiers. Le cas à m voies de contact sera décrit par la notation 1^m lorsqu'il apparaît une redondance à m liens. L'appelation *pseudo-matrice* est donc justifiée par la notation utilisée dans l'équation [3.18].

Hypothèse 3.2: *Les pseudo-matrices de liaison ne sont valables que dans un repère cartésien, elles ne permettent d'exprimer que des relations orthogonales entre objets.*

Hypothèse 3.3: *Dans le modèle, nous évaluons les pseudo-matrices de la liaison relative à un composant et à chacune de ses sous-faces élémentaires par rapport au référentiel de base associé à ce composant.*

3.2.7-Les sous-faces libres et de contact

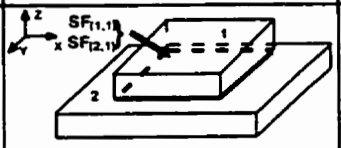
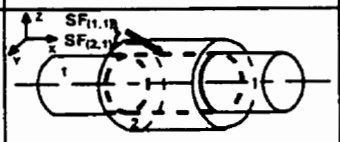
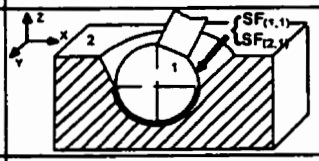
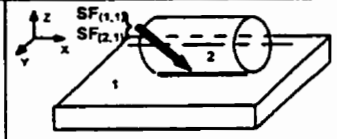
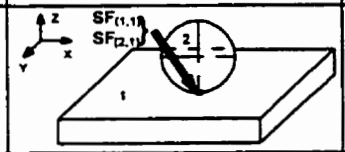
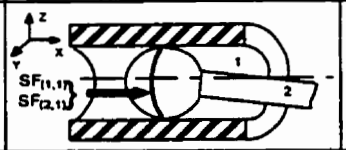
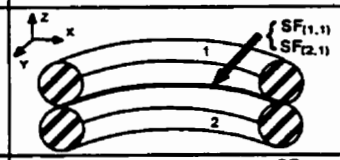
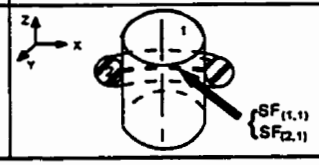
Dans les paragraphes précédents, nous avons défini les règles permettant la reconnaissance des caractéristiques de liaisons sur les différents niveaux d'entités définissant un modèle de produit. Nous avons également montré que cette reconnaissance est basée sur la détermination des liaisons sur des portions de faces, que nous avons convenu d'appeler des sous-faces de contact. Ces dernières décrivent alors les interactions entre les faces de pièces composant l'assemblage.

La traduction géométrique de cette interaction repose donc sur la classification des différents types de contact entre les faces des pièces. Une telle classification est disponible dans un certain nombre d'ouvrages traitant le sujet de construction mécanique [AFN-84]. Il est alors possible de dresser une liste des types de contact les plus fréquemment rencontrés en assemblage. Le tableau 3.2 illustre ces cas types ainsi que la représentation géométrique des sous-faces élémentaires assurant la liaison pour les cas particuliers montrés. Nous n'abordons pas le cas des surfaces complexes (B-spline) vue la rareté des exemples traitant des interactions avec de tels types de faces.

Pour chaque type de contact représenté sur le tableau 3.2, correspond alors un type de sous-face qui est fonction des paramètres sur les faces associées.

Le sujet de la détermination des sous-faces de contact sur les pièces est actuellement bien cerné dans de nombreux travaux [PER-93], [VEN-93] [WIL-94] ou de modeleurs solides CATIA, ACIS, etc. Cependant, ce sujet reste limité au cas des régions d'intersection entre les faces des pièces. Il ne peut pas être étendu au cas des sous-faces libres car, contrairement à une sous-face de contact, une sous-face libre se caractérise par un changement de dimensions à la suite du changement de l'état du produit. Ceci est dû soit

Tableau 3.2. Liste d'exemples de contacts les plus rencontrés en pratique

Nature de contact	Schéma représentatif des sous-faces de contact	Pseudo-matrice de la liaison de prépositionnement relative à chaque sous-face montrée
Plan - Plan		$L_{fP(1,1)} = \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 0100 \end{pmatrix}$ $L_{fP(2,1)} = \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 1000 \end{pmatrix}$
Cylindre - Cylindre		$L_{fP(1,1)} = \begin{pmatrix} 0000 \\ 1111 \\ 1111 \end{pmatrix}$ $L_{fP(2,1)} = \begin{pmatrix} 0000 \\ 1111 \\ 1111 \end{pmatrix}$
Sphère - Sphère		$L_{fP(1,1)} = \begin{pmatrix} 1100 \\ 1100 \\ 0100 \end{pmatrix}$ $L_{fP(2,1)} = \begin{pmatrix} 1100 \\ 1100 \\ 1000 \end{pmatrix}$
Plan - Cylindre		$L_{fP(1,1)} = \begin{pmatrix} 0000 \\ 0011 \\ 1000 \end{pmatrix}$ $L_{fP(2,1)} = \begin{pmatrix} 0000 \\ 0011 \\ 0100 \end{pmatrix}$
Plan - Sphère		$L_{fP(1,1)} = \begin{pmatrix} 0000 \\ 0000 \\ 1000 \end{pmatrix}$ $L_{fP(2,1)} = \begin{pmatrix} 0000 \\ 0000 \\ 0100 \end{pmatrix}$
Cylindre - Sphère		$L_{fP(1,1)} = \begin{pmatrix} 0000 \\ 1100 \\ 1100 \end{pmatrix}$ $L_{fP(2,1)} = \begin{pmatrix} 0000 \\ 1100 \\ 1100 \end{pmatrix}$
Tore - Tore		$L_{fP(1,1)} = \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 0100 \end{pmatrix}$ $L_{fP(2,1)} = \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 1000 \end{pmatrix}$
Plan - Tore		$L_{fP(1,1)} = \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 1000 \end{pmatrix}$ $L_{fP(2,1)} = \begin{pmatrix} 0011 \\ 0011 \\ 0100 \end{pmatrix}$
Cylindre - Tore		$L_{fP(1,1)} = \begin{pmatrix} 1111 \\ 1111 \\ 0000 \end{pmatrix}$ $L_{fP(2,1)} = \begin{pmatrix} 1111 \\ 1111 \\ 0000 \end{pmatrix}$

à la confusion des sous-faces de contact se libérant à la suite de désassemblage d'une ou de plusieurs pièces, soit à l'établissement de nouveaux contacts à la suite de l'assemblage d'une ou de plusieurs pièces (figure 3.9). La détermination des sous-faces libres sur une pièce est donc impossible sans une démarche qui tient compte du changement de l'état du produit.

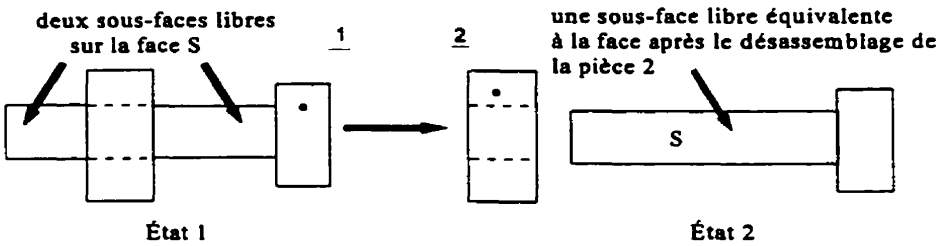


Figure 3.9. Changement de la configuration des sous-faces libres sur une pièce

Les constatations précédentes permettent alors de prévoir une méthode algorithmique pour:

- isoler les sous-faces de contact des pièces aux différentes localisations dans le produit. La sous-face devient alors une caractéristique d'assemblage conservée sur une pièce à l'état du produit assemblé (figure D5 en annexe D),
- déterminer les pseudo-matrices correspondantes aux liaisons de prépositionnement entre les sous-faces de contact, traduisant ainsi la phase purement géométrique relative aux liaisons fonctionnelles associées à ces sous-faces,
- isoler les sous-faces libres de préhension sur les pièces à chaque état du produit. Nous traitons ce sujet lors de la modélisation dynamique du produit.

La procédure de recherche de sous-faces de contact, qui est la base de l'ensemble des tâches définies précédemment, se fait dans le modèle selon une première étape de vérification si les deux faces sont en état de contact, suivie d'une deuxième étape qui isole la (ou les) région d'intersection entre ces deux faces (voir figure 3.10). Ceci permet de

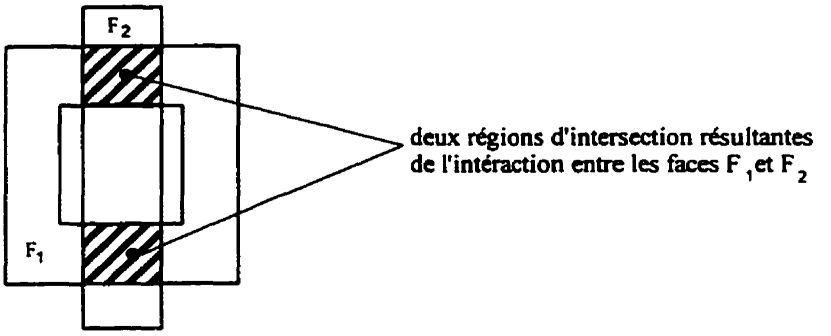


Figure 3.10. Exemple de régions d'intersection entre deux faces

construire la sous-face.

La première étape se fait à partir du calcul de la distance minimale entre les faces. Si la distance minimale est inférieure à une certaine limite de jeu du même ordre que le jeu fonctionnel maximal figurant sur le plan d'ensemble du produit, les deux faces sont considérées en contact. A cette fin, l'usager doit informer le système sur la valeur d'un tel jeu lors de l'appel de la procédure de recherche des sous-faces de contact.

Cependant, avant de calculer la distance minimale, nous effectuons plusieurs vérifications qui tiennent compte de certaines caractéristiques relatives aux faces. Ces caractéristiques concernent également la boîte englobante de la face, l'orientation de la normale propre à une face plane, la direction de l'axe et la valeur de rayon relatifs aux faces cylindriques et toriques, le rayon d'une surface sphérique. De telles vérifications permettent de diminuer le nombre de requêtes à faire, afin d'éviter l'appel de la procédure de calcul de la distance minimale chaque fois qu'on doit vérifier le contact entre deux faces. Par exemple, si l'intersection entre les boîtes englobantes relatives à deux faces est nulle, cela permet de juger directement qu'elles ne sont pas en contact. La même considération peut également être prise si les normales à deux faces planes ou la normale à une face plane et l'axe d'un cylindre sont parallèles et de même sens, aussi si la différence de rayon

entre deux faces (cylindrique-cylindrique, cylindrique-torique, cylindrique-sphérique, torique-sphérique), dont l'une est creuse alors que l'autre est pleine, est supérieure à la valeur du jeu permise.

Quant à la deuxième étape, elle se fait à partir de l'utilisation d'un modeleur solide tel que ACIS. Ceci permet de déterminer la ou les régions d'intersection entre deux faces. Ces régions de dimensions 2, 1 et 0 (respectivement faces, arêtes et points) sont ensuite utilisées pour construire la sous-face à partir des contours formés.

Hypothèse 3.4: *Dans le cas où l'interaction entre deux faces conduit à définir plusieurs régions d'intersection (figure 3.10), la sous-face est toujours unique sauf qu'elle est construite à partir des contours formés sur ces régions. Nous évitons ainsi une redondance au niveau de la création des liaisons caractérisant la même nature de contact alors qu'une seule liaison doit être associée pour décrire d'une façon unique l'interaction entre les deux faces.*

Hypothèse 3.5: *À une région dont le contact entre deux faces s'effectue suivant une arête correspond un contour fermé construit à partir de la superposition de deux arêtes identiques. A un contact ponctuel entre deux faces, correspond un contour fermé construit à partir de la superposition de deux arêtes ayant des sommets confondus.*

L'algorithme généralisé, pour vérifier le contact entre deux faces et construire une sous-face résultante, peut être défini de la manière suivante:

Chercher la valeur du **jeu** spécifié par l'usager
Identifier la géométrie relative à chaque face
Effectuer une évaluation des paramètres sur chaque face
SI une possibilité de contact est rencontrée **ALORS**

Appeler la procédure qui calcule la **distance minimale** entre les deux faces
SI la **distance minimale** est inférieure ou égale au **jeu ALORS**
Appeler la procédure qui isole la région d'intersection entre deux faces
Construire la sous-face à partir de la région identifiée
FINSI
FINSI

3.2.8-Les procédés

Le paragraphe 3.2.5.2 a fait ressortir la nécessité de spécifier des informations technologiques sous la forme de liaisons résultantes des procédés d'assemblage appliqués. Ces derniers correspondent à un ensemble fini de techniques qui sont très bien connues et reviennent sans cesse dans les différents produits. On peut distinguer deux groupes de procédés d'assemblage:

- les procédés mettant en jeu de l'énergie chimique, électrique ou mécanique sans altérer la forme géométrique de la pièce, ni la position résultante de la phase de prépositionnement. C'est le cas des procédés comme le soudage, le collage, le vissage et le serrage,

- les procédés mettant en jeu de l'énergie mécanique et entraînant une déformation de la pièce ou un changement de la position résultant de la phase de prépositionnement. C'est le cas des procédés comme le sertissage, le rivetage, le clippage, la pose des segments élastiques.

Pour la première catégorie, il est possible de caractériser le procédé soit à partir de l'analyse des symboles élémentaires normalisés sur le plan d'ensemble du produit (c'est le cas de soudures, des colles, des filetages), soit à partir de l'analyse des conditions de

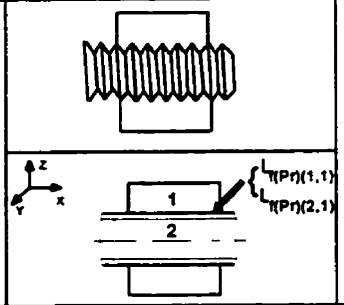
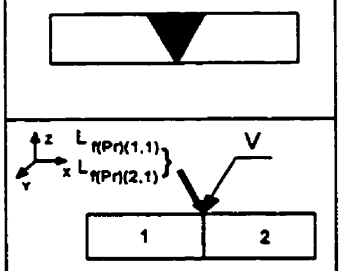
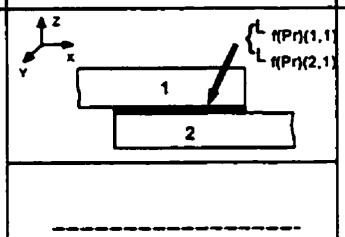
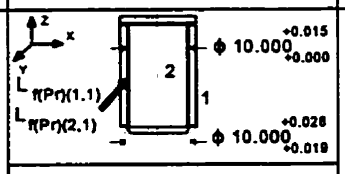
montage des pièces (c'est le cas des serrages). A l'état actuel des systèmes de CFAO, il n'y a aucune possibilité de spécifier une telle information lors de la définition d'un modèle de produit. Ceci empêche l'automatisation de la procédure d'identification des caractéristiques technologiques. Nous avons alors prévu une démarche de modélisation permettant à l'usager de spécifier manuellement le procédé d'assemblage appliqué sur chaque paire de sous-faces. Une telle démarche permet ainsi au système de générer la pseudo-matrice relative à la liaison associée à partir du type de procédé.

Dans le tableau 3.3, nous montrons des exemples de pseudo-matrices relatives aux procédés appliqués à des types particuliers de surfaces. Nous pouvons en tirer les remarques suivantes:

- le procédé de vissage met en jeu une liaison de contact permettant une rotation libre autour de l'axe d'insertion. Bien que la translation et la rotation pour ce type de procédé sont simultanées, cette représentation met en évidence le blocage de tout déplacement libre en translation pour la configuration statique du contact,
- les procédés de soudage et de collage mettent en jeu une liaison bloquant les demi-degrés de liaison en translation et en rotation dans toutes les directions,
- le procédé de serrage, mettant en jeu de l'énergie mécanique (généralement assurée par une presse ou par l'application d'un couple de serrage) pour surmonter les frottements et la déformation entre deux sous-faces, produit un blocage des demi-degrés de liaisons libres de la liaison de prépositionnement entre ces sous-faces. A propos d'un procédé de serrage, nous pouvons énoncer la règle suivante:

Règle 3.2: *Si le serrage est déduit d'une condition fonctionnelle faisant intervenir un ensemble de composants pour être établi, il est nécessaire de caractériser le procédé par cette condition (figure D5 en annexe D). Ceci permet d'identifier l'état du produit*

Tableau 3.3: Liste d'exemples de procédés de la première catégorie et leurs PMPr

Type de procédé	Schéma représentatif Symbolisation (exemple)	Pseudo-matrice relative à la liaison de procédé associée à la sous-face
Vissage		$L_{f(Pr)(1.1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(2.1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
Soudage		$L_{f(Pr)(1.1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(2.1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
Collage		$L_{f(Pr)(1.1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(2.1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
Serrage		$L_{f(Pr)(1.1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(2.1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$

pour lequel la liaison peut être établie. Cette remarque met aussi en évidence la nécessité de déduire les liaisons à partir de l'analyse des conditions de montage sur les sous-faces respectives des composants plutôt qu'à partir de l'analyse des liaisons entre les composants à chaque état du produit. Elle justifie aussi la nécessité de conserver les sous-faces déterminées sur les pièces à l'état du produit assemblé.

Notons ici, qu'à l'état actuel du modèle, le serrage, résultant d'un ajustement entre deux sous-faces cylindriques, est le seul cas qui peut être déduit automatiquement, à partir de l'analyse des tolérances dimensionnelles associées aux sous-faces en question. Dans les autres cas, l'utilisateur doit spécifier cette information manuellement.

Pour les procédés de la deuxième catégorie, le problème de modélisation est différent de celui concernant les procédés de la première catégorie. Dans ce cas, la démarche de modélisation doit faire intervenir des liaisons géométriques établies cette fois-ci par l'action derrière le procédé d'assemblage. Il en résulte une possibilité de déduire les pseudo-matrices des demi-degrés de liaison en utilisant les informations géométriques définies précédemment. Cependant, le changement de l'état des contacts du composant, suite à l'application de l'action, lui confère une représentation sur le modèle du produit ne permettant de déduire aucune information sur son prépositionnement. Pour bien illustrer le cas, considérons le cas du rivet de la figure 3.11. L'observation des contacts obtenus par l'analyse géométrique montre qu'un tel élément ne possède aucun degré de liberté en translation; aucune information n'est donc disponible sur la possibilité de son prépositionnement axial. Pour ce faire, nous devons spécifier sur ce composant la liaison résultante du procédé ($L_{T(Pr)(3,4)}$) pour en déduire celles correspondantes à son prépositionnement. Ceci revient aussi à suivre une analogie similaire à la démarche de modélisation correspondant aux procédés de la première catégorie.

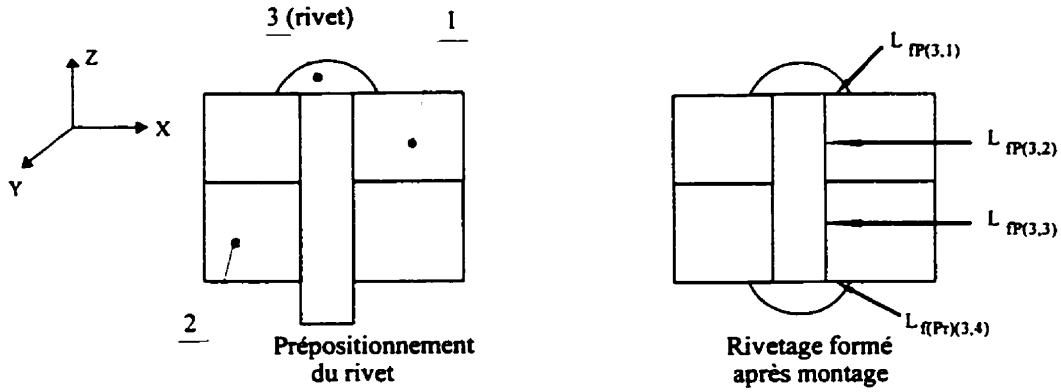


Figure 3.11. Cas où aucune information n'est disponible pour le prépositionnement éventuel d'un composant

L'observation précédente nous a menée à généraliser notre démarche de modélisation. Une fois que les liaisons résultantes des procédés d'assemblage sont spécifiées par l'usager, le système peut déduire automatiquement les pseudo-matrices relatives aux liaisons de prépositionnement et aux procédés sur les sous-faces de cette dernière.

Le tableau 3.4 illustre des exemples sur le traitement suivi et concernant les procédés d'assemblage correspondants à la deuxième catégorie. Nous montrons aussi les liaisons de procédés ou de prépositionnement relatives aux cas particuliers de composants illustrés dans ce tableau.

Vues les remarques précédentes, le classement des procédés en deux catégories n'a servi qu'à caractériser la différence au niveau de leur comportement. Ceci n'a pas empêché de suivre la même démarche de modélisation. Cette dernière permtde déduire les pseudo-matrices relatives aux liaisons de procédés, une fois que ces derniers sont spécifiés par l'usager. Par conséquent, au niveau de la structure du modèle, nous avons choisi de représenter une seule catégorie de caractéristiques technologiques sous la forme d'un attribut de procédés d'assemblage à une sous-face de contact (voir aussi figure D5).

Tableau 3.4: Liste de quelques exemples de procédés de la deuxième catégorie et de leurs PMPr

Type de procédé	Schéma représentatif (exemple)	Pseudo-matrice relative à la liaison de procédé associée à la sous-face
Rivetage		$L_{f(Pr)(2,2)} = \begin{pmatrix} 0&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \\ 0&1&0&0 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(3,4)} = \begin{pmatrix} 0&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \\ 1&0&0&0 \end{pmatrix}$
Sertissage		$L_{f(Pr)(1,1)} = \begin{pmatrix} 0&1&1&1 \\ 0&0&1&1 \\ 1&0&1&1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(1,3)} = \begin{pmatrix} 0&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \\ 1&0&0&0 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(2,1)} = \begin{pmatrix} 1&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \\ 0&1&1&1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(2,3)} = \begin{pmatrix} 0&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \\ 0&1&0&0 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(1,2)} = \begin{pmatrix} 0&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \\ 1&0&0&0 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(1,4)} = \begin{pmatrix} 1&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \\ 1&0&1&1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(2,2)} = \begin{pmatrix} 0&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \\ 0&1&0&0 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(2,4)} = \begin{pmatrix} 0&1&1&1 \\ 0&0&1&1 \\ 0&1&1&1 \end{pmatrix}$
Dépose d'un anneau élastique		$L_{f(Pr)(1,1)} = \begin{pmatrix} 1&0&0&0 \\ 0&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(2,1)} = \begin{pmatrix} 0&1&0&0 \\ 0&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(1,3)} = \begin{pmatrix} 0&0&0&0 \\ 1&1&1&1 \\ 1&1&1&1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(1,2)} = \begin{pmatrix} 0&1&0&0 \\ 0&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(2,3)} = \begin{pmatrix} 0&0&0&0 \\ 1&1&1&1 \\ 1&1&1&1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(2,2)} = \begin{pmatrix} 1&0&0&0 \\ 0&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \end{pmatrix}$
Clipsage		$L_{f(Pr)(1,1)} = \begin{pmatrix} 1&0&0&0 \\ 0&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \end{pmatrix}$ $L_{f(Pr)(2,1)} = \begin{pmatrix} 0&1&0&0 \\ 0&0&1&1 \\ 0&0&1&1 \end{pmatrix}$

Nous avons alors proposé une démarche, qui permet la combinaison d'une modélisation géométrique et technologique, dans laquelle chaque information sur les types de liaisons associées à chacun des éléments à assembler est disponible.

3.2.9-Algorithme généralisé

À partir des remarques qui ont été formulées dans les paragraphes précédents, nous pouvons proposer une généralisation de la méthodologie de reconnaissance des caractéristiques de liaisons au niveau des sous-faces de contact des pièces.

L'algorithme généralisé peut alors être défini de la manière suivante:

POUR chaque pièce à un indice **i** dans la liste des pièces du produit
  Déterminer la boîte englobante 1 relative à cette pièce
  POUR chaque pièce à un indice **j** allant de **i+1** à **p** (nombre de pièces)
    Déterminer la boîte englobante 2 relative à cette deuxième pièce
    SI l'intersection entre les boîtes englobantes 1 et 2 n'est pas nulle
    ALORS
      POUR chaque face dans la liste des faces de la première pièce
        POUR chaque face dans la liste des faces de la deuxième pièce
          Appeler la procédure qui vérifie l'existence de contact entre les deux faces
          SI une paire de sous-faces de contact est identifiée **ALORS**
            Demander à l'usager d'associer ou non un procédé d'assemblage à la sous-face
            SI un procédé est associé **ALORS**
              Associer le procédé à la paire de sous-faces de contact
              Associer une liaison du procédé en fonction du type de ce

dernier

FINSI

SI le procédé est un serrage, soudage ou collage

OU

le procédé n'est pas associé

ALORS

Identifier le type de contact

Associer une liaison de prépositionnement à chaque sous-face

FINSI

Associer une liaison fonctionnelle à chaque sous-face par l'application de l'équation [3.1]

Ajouter chaque sous-face identifiée à la liste des sous-faces de la pièce correspondante

FINSI

FINPOUR

FINPOUR

FINSI

FINPOUR

FINPOUR

Sur cet algorithme, la vérification de l'intersection entre les boîtes englobantes permet de conclure directement sur la non-existence de contact entre deux pièces. Il en résulte une élimination de la requête visant la recherche des sous-faces de contact sur leurs faces. Le processus de modélisation sera ainsi accéléré. Dans le cas du micro-moteur, le nombre de vérifications à effectuer est ramené à 52. Ce nombre aurait du être égal à $\frac{p(p-1)}{2}=\frac{15(15-1)}{2}=105$ si cette intersection n'est pas évaluée (p étant le nombre total de pièces). Le nombre de requêtes à effectuer est donc réduit de presque 50 %. Dans le cas du bobinoir, le nombre de requêtes est réduit de presque 45%.

D'autre part, nous pouvons remarquer que le temps de traitement pour la détermination de toutes les sous-faces de contact varie selon:

- le nombre de pièces du produit,
- le nombre de faces sur chacune de ces pièces,
- la complexité de la procédure d'isolation de la région de contact entre deux faces.

Dans l'algorithme proposé ci-dessus, nous pouvons aussi remarquer que la tâche, qui cherche à caractériser l'interaction entre deux faces, utilise deux fonctions principales:

-**Isoler** la sous-face de contact sur une paire de faces

<u>objectif</u>: vérifier le contact entre deux faces et construire une paire de sous-faces résultantes

<u>entrées</u>: la paire de faces où l'on cherche à identifier le contact

<u>sorties</u>: une paire de sous-faces

<u>règles</u>: la distance entre les faces doit être inférieure au jeu. Règles d'isolation de la région de contact.

-**Associer** une liaison à la paire de sous-faces

<u>objectif</u>: déterminer les liaisons qui doivent être associées à la paire de sous-faces de contact

<u>entrées</u>: la paire de sous-faces de contact, les procédés d'assemblage appliqués

<u>sorties</u>: les liaisons fonctionnelles, de prépositionnement et de procédé associées à chaque sous-face de contact

<u>règles</u>: règles de calcul des liaisons en fonction de la nature de contact et du type du procédé.

La décomposition fonctionnelle de la tâche "Chercher les caractéristiques propres à l'interaction d'une paire de faces " peut donc se présenter comme sur la figure 3.12.

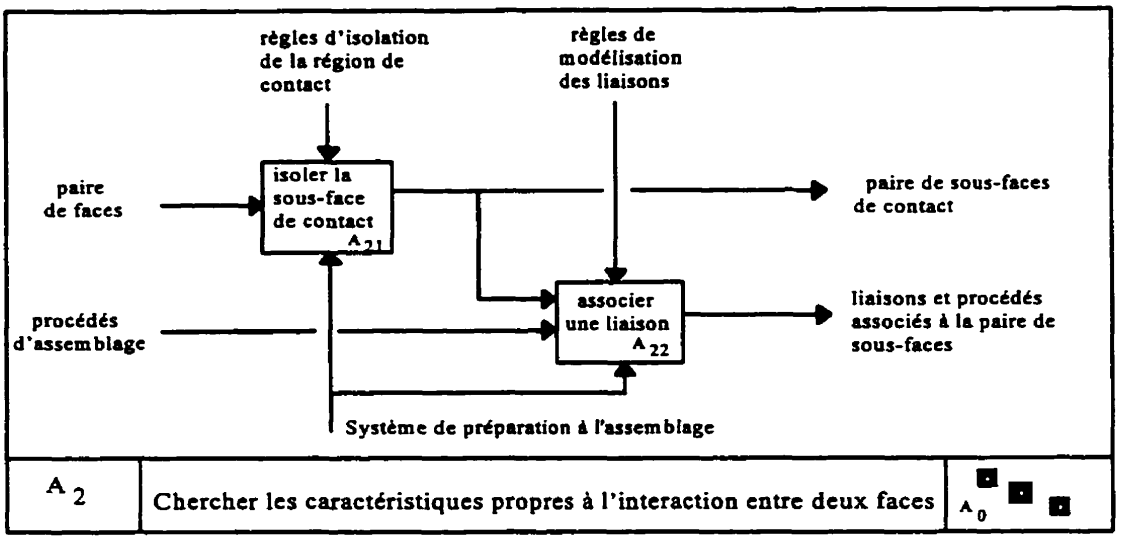


Figure 3.12. Décomposition fonctionnelle de la tâche "Chercher les caractéristiques propres à l'interaction entre deux faces"

3.2.10-Exemples de résultats

La figure 3.13 donne un exemple de reconnaissance des caractéristiques de liaisons opérée au moyen de la méthodologie qu'on a proposée. Sur cette figure, nous avons pris, d'une part, le cas du sous-assemblage couvercle, formé par le cône (3), le couvercle (12) et les quatre vis (13), et, d'autre part, le cas du roulement à bille (5). Les deux cas sont considérés à l'état du produit assemblé.

Comme l'illustre la figure 3.13, la structure mise en oeuvre dans le modèle permet de se détacher de la représentation solide pour les niveaux des pièces et des sous-assemblages. Il en résulte une grande portabilité des caractéristiques d'assemblage et des applications, ainsi qu'un temps de traitement très raisonnable lors de la modélisation dynamique du produit. Nous avons observé ce fait lorsque nous avons testé le cas du micro-moteur et

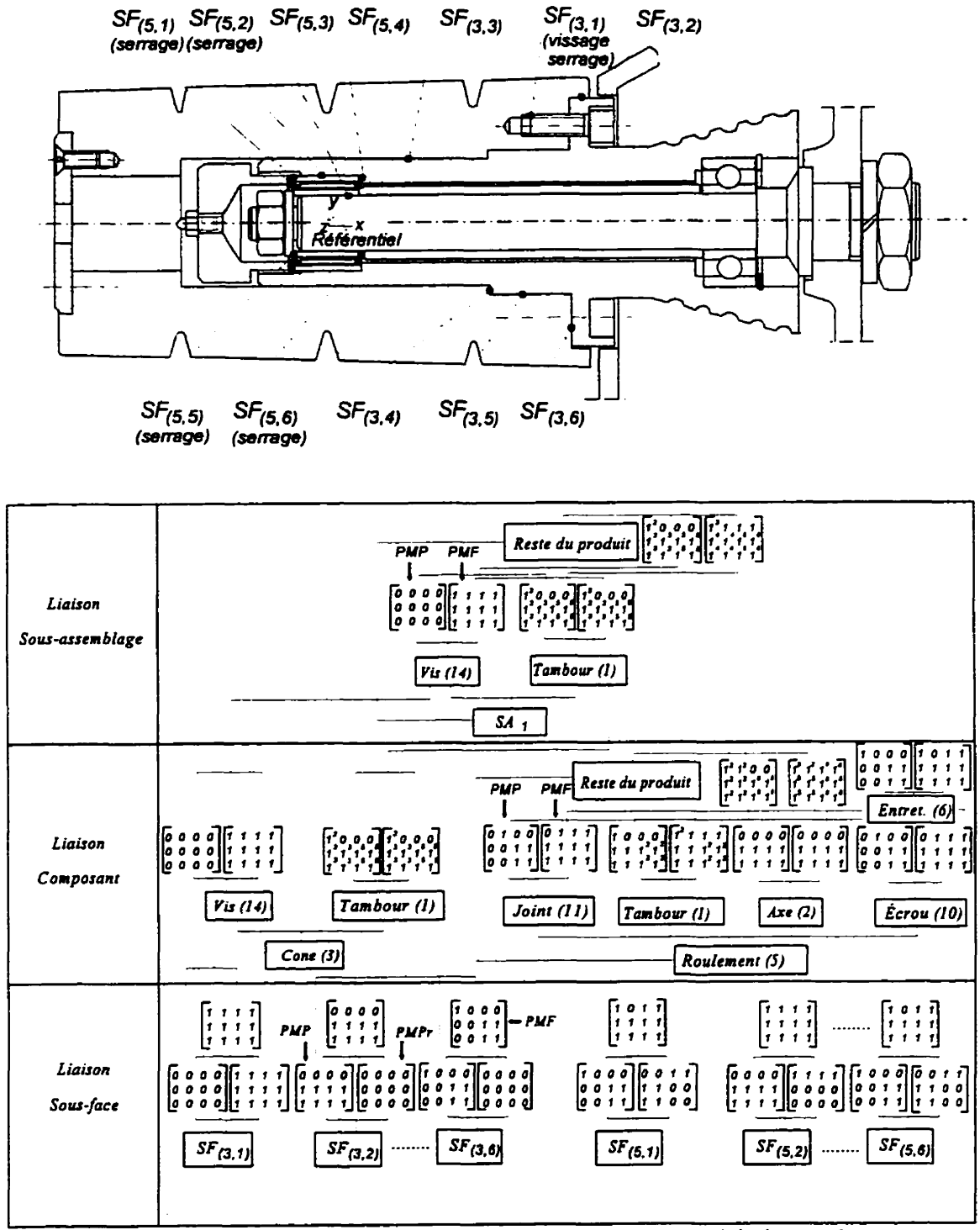


Figure 3.13. Exemple de reconnaissance des caractéristiques de liaisons sur les différents niveaux d'entités

du bobinoir illustrés sur les figures B1 et B2 en annexe B. Les caractéristiques relatives aux liaisons des composants, pour les différents états, sont déterminées en des secondes ou des fractions de seconde, une fois que les liaisons au niveau des sous-faces sont analysées.

Cette structure correspond aussi à un traitement homogène des différents composants dans le produit. Ce traitement a la grande particularité, par rapport aux travaux rencontrés dans la littérature, de simuler le comportement des pièces déformables à partir d'une seule représentation sur le modèle de produit. Ceci permet de minimiser l'intervention humaine permettant, ainsi, une automatisation plus poussée de la détermination des directions d'insertion des composants au cours de l'analyse du processus d'assemblage.

3.3-Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons défini les caractéristiques d'assemblage, qui doivent être incorporées sur un modèle homogène représentant le produit. Ce dernier est élaboré en fonction des besoins informationnels caractérisés dans le deuxième chapitre comme susceptibles de favoriser l'analyse objective de la préparation à l'assemblage d'une proposition de conception.

Basé sur ce modèle de produit, nous avons décrit un système, qui permet au préparateur à l'assemblage de construire le produit en aval de la définition des modèles géométrique et technologique des pièces ou des modèles pré-définis de sous-assemblages. Il lui permet aussi la modification de la structure définie par l'agrégation d'un sous-ensemble de composants dans la structure d'un sous-assemblage. Les caractéristiques relatives aux liaisons peuvent ensuite être déterminées en suivant une hiérarchie ayant comme base les sous-faces de contact sur les pièces composant le produit. Cette hiérarchie permet de déduire les liaisons aux niveaux des pièces et des sous-assemblages à partir de

l'association des caractéristiques géométriques et technologiques sur les liaisons relatives aux sous-faces de contact.

Dans le chapitre suivant, nous proposons une structure de gamme qui permet d'intégrer les états au modèle du produit en simulant le processus de génération des séquences d'assemblage. Ceci conduit alors à la définition d'une méthodologie de reconnaissance des caractéristiques relatives à chaque état admissible par la comparaison de sa structure à celle de l'état assemblé pour laquelle on conserve les caractéristiques qui lui sont propres.

CHAPITRE 4
MODÈLE DES ÉTATS ET DE LA GAMME D'ASSEMBLAGE-MODÉLISATION DYNAMIQUE DU PRODUIT

4.1-Introduction

Nous avons défini dans le chapitre précédent un modèle homogène ayant comme base une structure hiérarchique permettant la mise en évidence des différents niveaux de composants dans le produit. Nous avons aussi proposé une méthodologie de reconnaissance des caractéristiques d'assemblage (CA). Une telle méthodologie nous a permis de définir deux types de caractéristiques: les CA à nature statique, qui doivent être conservées sur le modèle du produit, et les CA à nature dynamique, dont la détermination doit se faire au fur et à mesure de l'analyse du processus d'assemblage.

Nous nous intéressons dans ce quatrième chapitre à l'aspect lié à la prise de décisions objectives dans la génération de la gamme d'assemblage. Nous simulons alors cette phase en permettant à l'usager d'intégrer une structure de gamme au modèle du produit. Cette structure permet aussi de connaître la chronologie d'apparition des états et des opérations éligibles à leur création. Elle peut aussi être exploitée pour assurer la modélisation dynamique de ce dernier, par la comparaison de la structure de chacun de ses états à celle de l'état assemblé. Cette tâche est présentée dans la deuxième moitié de ce chapitre. Nous proposons alors une démarche qui exploite les CA à nature statique tout en utilisant la méthodologie de reconnaissance des caractéristiques d'assemblage définie au chapitre trois.

4.2-Spécification d'un modèle de gamme d'assemblage

4.2.1-Introduction

Selon Bourjeault [BOU-84], on peut définir toute gamme d'assemblage comme une suite logique et chronologique de toutes les opérations nécessaires et suffisantes à sa réalisation.

Si l'on tient, dans l'analyse de préparation à l'assemblage d'un produit, aux considérations objectives privées de tout contexte de production et de toute décision faisant appel à l'expérience d'un préparateur, on définit alors l'intersection commune de toutes les structures de gamme d'assemblage pouvant être proposées pour le produit considéré. Le résultat de cette analyse peut donc apparaître comme une gamme d'assemblage unique.

La spécification d'un système d'aide à la génération de la gamme d'assemblage unique nécessite donc, d'une part, la modélisation des opérations d'assemblage au sens de leur aptitude technique à l'établissement progressif des relations élémentaires au sein de la structure du produit et, d'autre part, la modélisation d'un séquencement de création de ces opérations logiquement en regard des relations spécifiées entre les composants.

4.2.2-Spécification d'un modèle des opérations d'assemblage

Dans le chapitre précédent, nous avons caractérisé le processus d'établissement des liaisons entre les composants d'un produit. Un tel processus fait intervenir, soit individuellement, soit simultanément, deux phases: une phase de prépositionnement et une phase de procédé d'assemblage. Cependant, ces deux phases que nous considérons comme constitutives, en ce sens qu'elles contribuent à la constitution du produit, ne sont

pas appliquées seules. Elles sont complétées dans certains cas en faisant subir aux composants des traitements complémentaires que nous pouvons décomposer en deux classes:

- les traitements annexes qui apportent des modifications à un composant élémentaire: nettoyage, lubrification, marquage, peinture, etc.,
- les traitements informationnels pour lesquels on vérifie la bonne exécution des phases constitutives; il s'agit essentiellement d'opérations de contrôle de qualité des différents sous-ensembles produits au cours du processus d'assemblage.

Ce qui nous intéresse de ces traitements au niveau de la modélisation du produit, ce n'est pas leur nature ou celle des actions qui doivent les réaliser, mais ce sur quoi ils portent. Ainsi, il est équivalent pour nous, au niveau de l'analyse où nous nous plaçons, de savoir que tel groupe de composants, une fois assemblés, doit être peint ou doit faire l'objet d'un contrôle dimensionnel. En revanche, il est nécessaire que le modèle du produit indique que ce groupe de composants doit subir une suite d'actions appliquées d'une façon déterminée, ce qui correspond aussi à la définition d'un procédé.

C'est pourquoi, nous pouvons englober la phase correspondante au traitement avec la phase correspondant à l'application des procédés d'assemblage, par le fait que les deux phases sont appliquées en suivant un certain procédé. Nous allons alors les caractériser sous une seule phase que nous allons identifier sous le nom de la phase de procédé. Cette dernière peut alors interférer avec ou compléter la phase de prépositionnement.

Toute opération d'assemblage contribuant au changement de la configuration du produit peut donc être caractérisée au moyen des deux phases décrites précédemment. Nous proposons alors la définition suivante:

Définition 4.1 *: Nous définissons une opération d'assemblage* ***O*** *comme étant l'ensemble d'actions réparties selon deux phases: une phase de prépositionnement* ***PP****, caractérisant la réalisation de l'insertion d'un ou de plusieurs composants assemblés d'une façon simultanée, et une phase de procédé* ***PPr****, caractérisant l'application d'un ou de plusieurs procédés d'assemblage et/ou traitements quelconques aux composants déjà prépositionnés.*

Nous désignons une opération d'assemblage par **O(PP, PPr)**.

De la définition 4.1, nous pouvons conclure que les caractéristiques relatives à une opération d'assemblage deviennent alors celles résultantes de la combinaison des caractéristiques individuelles aux deux phases constituant l'opération. Ces caractéristiques concernent spécifiquement:

- la méthode de réalisation de la phase de prépositionnement. Cette dernière n'est autre que celle décrivant le processus qui consiste à amener en contact ou à proximité les faces sur les composants par une simple manipulation. Elle est donc caractérisée à partir des directions d'insertion ou de placement relatives à chacun de ces composants,
- la méthode de réalisation de la phase de procédé. Elle comprend d'une part les différents types de procédés appliqués sur les composants déjà prépositionnés et, d'autre part, pour chaque type la liste possible de sous-faces sur lesquelles intervient le procédé. Une telle liste peut cependant être connue a priori à partir des procédés associés aux sous-faces de contact. Dans d'autres cas, comme par exemple le contrôle de qualité, elle s'avère nécessaire pour pouvoir étudier la réalisabilité matérielle de la phase du procédé.

La définition 4.1 permet également de distinguer deux types d'opérations d'assemblage:

- les opérations **linéaires**, lorsqu'il s'agit d'assembler un seul composant au cours de la réalisation du processus d'assemblage,
- les opérations **combinées**, lorsqu'il s'agit d'assembler simultanément un ensemble de composants. Dans ce cas, les caractéristiques relatives à l'opération d'assemblage sont obtenues en combinant plusieurs ensembles de caractéristiques relatives à chaque phase décrite précédemment.

Notons finalement que dans la formulation présentée dans ce paragraphe, on peut remarquer que la réalisation de la phase du procédé est considérée comme indépendante de la phase de prépositionnement. Cette indépendance entraîne une liberté excessive du placement des procédés dans les séquences d'assemblage car dans la pratique la plupart de ces procédés sont réalisés dès que possible:

- les procédés d'assemblage sont appliqués dès que les composants sont assemblés pour des raisons de stabilité,
- les contrôles sont effectués dès que les éléments qu'ils concernent sont en place, de façon à ce que d'éventuelles anomalies soient détectées au plus vite.

Afin de permettre au préparateur de réduire un espace de recherche déjà suffisamment vaste, du fait du caractère combinatoire du problème abordé, nous avons choisi d'assurer une démarche de modélisation gouvernée par la règle suivante:

Règle de génération "au plus tôt" des procédés

Selon cette règle, tout procédé doit, sauf avis contraire, être effectué dès qu'il est applicable.

Par conséquent, dès qu'une opération d'assemblage est déclarée, le système permet au

préparateur, sauf avis contraire, d'associer les caractéristiques propres à la phase de procédé. Ceci se fait à partir de la recherche des procédés d'assemblage et des traitements associés a priori sur les faces des pièces. Il lui permet aussi d'en ajouter d'autres. C'est par exemple le cas des actions de contrôle.

Pour les procédés ne satisfaisant pas à la règle précédente, le préparateur pourra les déclarer **non-applicables**. Ceci permet au système de les éliminer de la phase de procédé correspondante à l'opération d'assemblage. Ces derniers pourront par la suite être placés dans la phase du procédé correspondante à une autre opération d'assemblage. Cela devrait essentiellement se produire lorsqu'il apparaît souhaitable de regrouper des procédés de même nature relevant d'un même type de matériel.

4.2.3-Spécification d'un modèle de séquencement des opérations d'assemblage

Dans le deuxième chapitre, nous avons vu que les critères objectifs de choix d'une gamme d'assemblage dépendent essentiellement d'un ensemble de règles, qui conduisent à privilégier certaines alternatives de séquencement des opérations d'assemblage, par rapport à un certain nombre d'autres. Nous avons vu également, que la conservation d'une multiplicité d'alternatives apparaissait comme un facteur d'intégration privilégié avec l'étude de la faisabilité technique de la gamme aux moyens de ressources d'assemblage adéquats. Ceci correspond donc à l'ouverture aux fonctions d'ordonnancement de la conduite de l'atelier.

Pour ces raisons, le modèle de gamme doit être tel que les différentes alternatives y soient explicitement présentes. Dans le processus d'élaboration, des alternatives peuvent exister au niveau du choix des opérations d'assemblage à réaliser. Ce choix tient compte, d'une part, des montages à réaliser sur les composants insérés et, d'autre part, des procédés à appliquer sur les composants déjà prépositionnés.

Un modèle de gamme représentant explicitement le processus de montage ou de démontage du produit doit donc être structuré en faisant apparaître les différentes alternatives d'opérations à réaliser et, pour chaque opération, la possibilité d'application simultanée ou non des deux phases qui s'y rapportent.

La figure 4.1 donne une représentation schématique du modèle de la gamme que nous adoptons pour simuler le processus d'assemblage ou de désassemblage du produit. La gamme peut être considérée comme une succession ordonnée d'états du produit formant un réseau de chemins alternatifs entre l'état initial et l'état final. Chacun de ces états représente la structure du produit à un moment donné du processus d'assemblage. Une telle structure peut être perçue comme étant un ensemble d'**entités** agissant d'une façon individuelle et séparée. Ces **entités** représentent d'une part le sous- ensemble de composants assemblés et d'autre part, les composants désassemblés. Nous proposons alors la définition suivante:

Définition 4.2: *Nous définissons un état du produit comme étant l'ensemble d'entités considérées séparément à une étape quelconque du processus d'assemblage du produit.*

Mathématiquement, nous pouvons exprimer les définitions d'une entité et d'un état du produit sous la forme suivante:

Soit $C_n = \{ c_1 \text{ ------ } c_n \}$ l'ensemble de tous les composants du produit.

Soit $\mathscr{E}_m = \{ e_1 \text{ ------ } e_m \}$ l'ensemble des entités qui peuvent être considérées séparément aux différentes étapes du processus d'assemblage du produit.

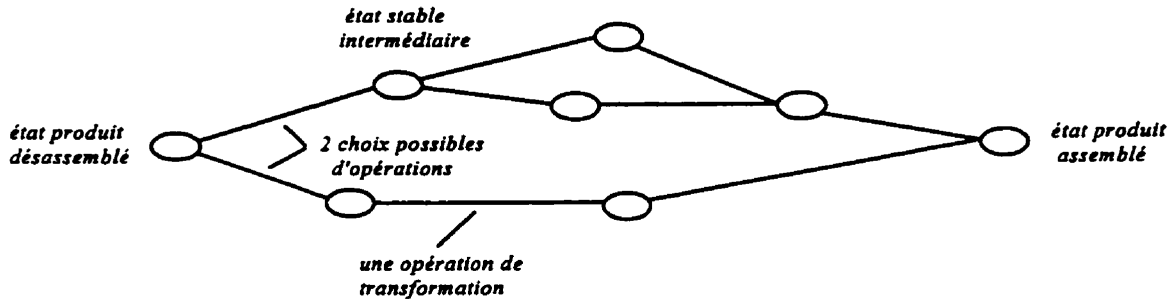


Figure 4.1. Modèle de la gamme d'assemblage

Une entité e_j est alors définie par une suite de p_j constituants, ($p_j \leq n$), sur l'ensemble C_n:

$$e_j = \{ c_k \ / \ c_k \in C_n \} \quad et \quad Card\ e_j = p_j$$

Un état E_i du produit est alors défini par une suite de q_i entités, ($q_i < m$), sur l'ensemble $\mathscr{E}_m$:

$$E_i = \{ e_l \ / \ e_l \in \mathscr{E}_m \} \quad et \quad Card\ E_i = q_i$$

Ainsi l'ensemble E_o constitué par une seule entité $e_0 = \{ c_1 \text{ ------ } c_n \}$ correspond à l'état du produit assemblé: $E_0 = \{e_0\}$. Tandis que l'ensemble E_n constitué par des n entités, dont chacune est équivalente à un seul composant du produit ($e_j = \{c_j \ / \ c_j \in C_n \}$) correspond à l'état du produit désassemblé: $E_f = \{e_1 \text{ ------ } e_n \}$.

Le passage d'un état E_k quelconque à un état immédiatement successif E_{k+1} est donc opéré par la formation de nouvelles entités soit à partir de la réunion de différentes entités présentes à cet état (cas de l'assemblage), soit à partir de la fragmentation de l'entité représentant le sous-ensemble de composants assemblés en de nouvelles entités (cas de désassemblage). Le parcours de la structure définie sur la figure 4.1 peut donc s'effectuer en suivant deux sens: de E_0 vers E_f, dans ce cas il s'agit de la gamme de désassemblage du produit, ou bien de E_f vers E_0, dans ce cas il s'agit de la gamme d'assemblage.

Partant des observations précédentes et en se basant sur notre objectif de supporter la modélisation du produit à chaque étape du processus d'assemblage, nous avons défini une structure de gamme unique qui permet d'intégrer les états au modèle du produit. Ceci s'effectue tout en simulant le processus d'assemblage ou de désassemblage du produit. Une telle structure a été représentée sous la forme d'un graphe d'état du produit (GEP) défini comme suit:

Définition 4.3: *Le graphe d'états du produit est un graphe orienté $G(E,O)$ où $E=\{E_0, E_2, \ldots\ldots, E_n\}$ représente l'ensemble de tous les états du produit que sont les noeuds du graphe et $O=\{O_1, O_2, \ldots\ldots, O_l\}$ représente l'ensemble des opérations d'assemblage que sont les arcs du graphe. Les noeuds terminaux représentent les états assemblé et désassemblé, et les noeuds intermédiaires, les états du produit.*

La structure du GEP ressemble à celle utilisée dans les travaux de [HEE-89] et [DEF-93], sauf qu'elle est adoptée pour supporter les 2 possibilités de représentation de la gamme d'assemblage et pour permettre le parcours du graphe dans les 2 sens. Une telle structure est aussi représentée sur la figure D6 (voir annexe D) selon le formalisme NIAM. Elle a l'avantage d'être plus compacte que celle représentée en utilisant le graphe ET/OU. Ce dernier est à la base de la structure de gamme définie dans les travaux de [HOM-89], [MAT-90], [LEE-92], [RED-94]. Nous remarquons ce fait en comparant la structure de la gamme d'un même produit (figure 4.2). Le GEP conduit à avoir 5 noeuds possibles dont chacun décrit explicitement la configuration du produit résultante de chaque opération d'assemblage. Tandis que l'autre structure conduit à avoir 8 noeuds possibles dont chacun représente un sous-ensemble partiel des composants du produit. La description de la configuration de ce dernier nécessite alors la combinaison de plusieurs noeuds distincts tout en tenant compte de l'orientation des arcs sur le graphe ET/OU.

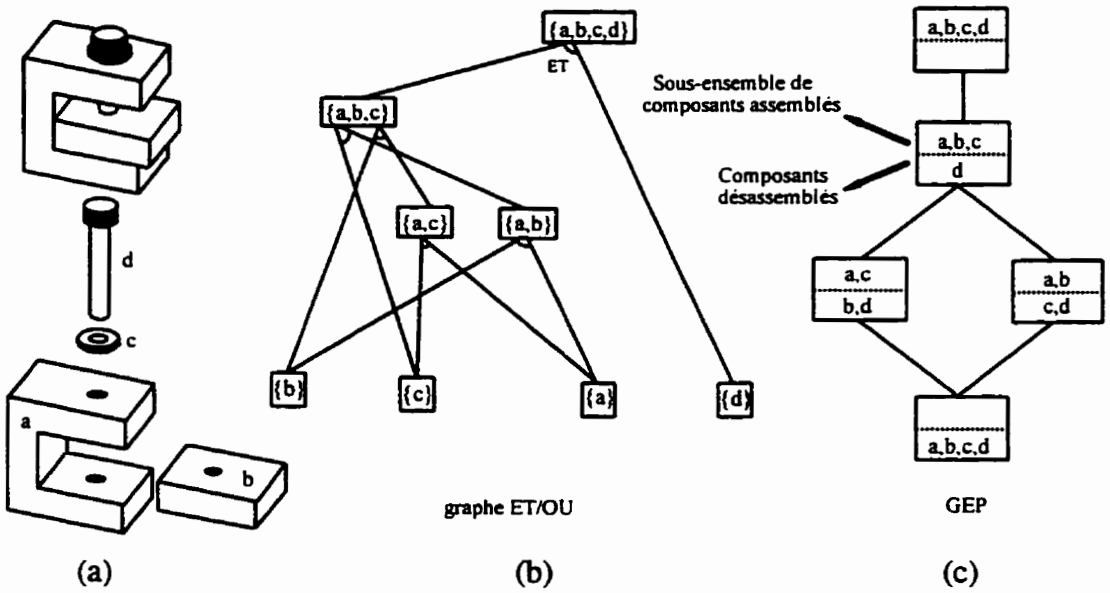


Figure 4.2. Le graphe ET/OU et le GEP pour un exemple de produit

La complexité de la mémoire pour conserver le GEP devient alors proportionnelle à la somme du nombre de sommets **n** (les états admissibles) et d'arcs **a** (les opérations d'assemblage). Par conséquent, le préparateur doit tenir compte du fait qu'il y a toujours des limites à une démarche qui restreint les critères appliqués pour la génération et l'évaluation des séquences d'assemblage. Une telle démarche pourra le conduire à faire face à une explosion combinatoire d'alternatives surtout si le nombre de composants est élevé.

4.3-Modélisation dynamique du produit

4.3.1-Introduction

Nous avons vu au deuxième chapitre que la logique de génération du modèle des sorties est essentiellement basée sur le modèle des entrées. Nous avons vu également que ces sorties concernent essentiellement:

- le choix des ressources nécessaires à l'exécution de chaque opération d'assemblage,
- le séquencement des opérations

Ces deux tâches peuvent à priori être réalisées en parallèle ou en série. Elles utilisent cependant toutes deux le résultat de la recherche des caractéristiques d'assemblage propres à chaque composant. Cette tâche doit donc être antérieure aux deux autres. Elle nécessite, d'une part, la recherche de CA à nature statique (intégrées sur le modèle homogène du produit) et, d'autre part, la comparaison de la configuration correspondante à l'état actuel du produit avec celle correspondante à l'état assemblé.

D'un autre côté, la structuration de la gamme en un graphe d'états nécessite la connaissance de la chronologie de création des états et des opérations éligibles à leur création. Cette tâche est donc réalisée ultérieurement aux deux autres.

La tâche de détermination de la gamme et des ressources d'assemblage utilisent donc cinq fonctions:

-**Reconnaître** les caractéristiques d'assemblage

<u>Objectif</u> : déterminer les différentes variantes de caractéristiques d'assemblage relatives à un composant à un état donné du produit

<u>Entrées</u> : modèle du composant et structure de l'état du produit

<u>Sorties</u> : caractéristiques d'assemblage

<u>Règles</u> : effet de l'état sur la variation des CA à nature dynamique

-**Choisir** les opérations d'assemblage

<u>Objectif</u> : choisir une opération d'assemblage permettant de changer l'état du produit

Entrées : état actuel du produit

Sorties : modèle relatif à l'opération d'assemblage

Règles : respecter les contraintes d'assemblage et satisfaire à certains critères d'évaluation de la gamme.

-**Associer** des ressources

Objectif : identification des moyens physiques de réalisation de l'opération d'assemblage

Entrées : modèle relatif à l'opération à réaliser

Sorties : ressources nécessaires pour effectuer chaque phase relative à l'opération d'assemblage

Règles : analyse des conditions de montage et des caractéristiques propres aux composants à assembler. Identification des procédés appliqués.

Structurer la gamme

Objectif : établir les liens entre les états du produit par l'intermédiaire des différentes opérations réalisées

Entrées : modèle relatif à l'opération d'assemblage, état actuel du produit

Sorties : modèle modifié de la gamme d'assemblage

Règles : respecter la chronologie d'apparition des états à partir des opérations appliquées.

La décomposition fonctionnelle de la tâche "Déterminer la gamme et les ressources d'assemblage" peut donc se représenter de la manière suivante (figure 4.3).

Le rôle de la démarche de modélisation, que nous proposons, se situe donc au niveau de la reconnaissance des CA pour supporter le préparateur lors de la détermination des

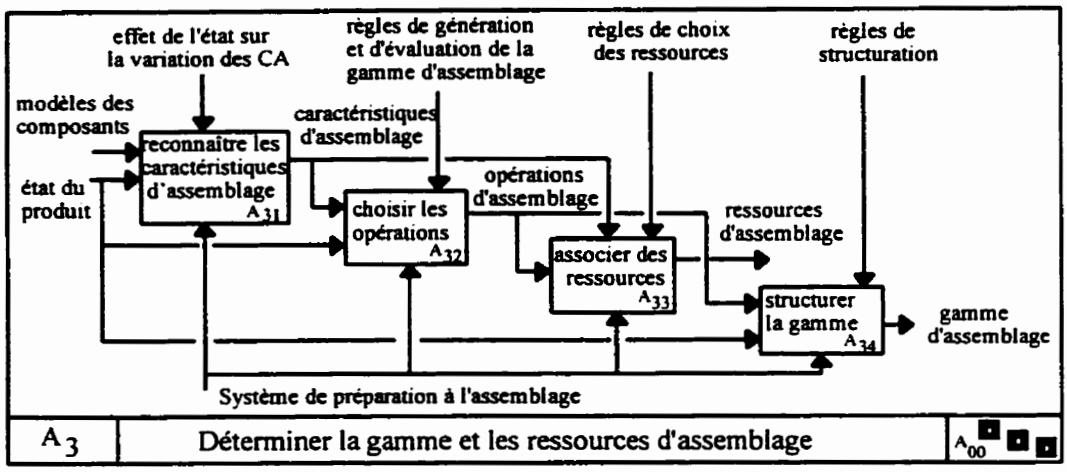


Figure 4.3. Décomposition de la fonction "Déterminer la gamme et les ressources d'assemblage"

tâches relatives à l'ensemble du processus d'assemblage du produit.

Cependant, comme montré sur la figure 4.3, l'état constitue une entrée principale à la tâche de reconnaissance des CA. Il en résulte la nécessité de connaître la structure de la gamme afin d'établir les liens entre les différents états ou de régénérer leur structure. Nous permettons ainsi au préparateur d'effectuer des tâches a posteriori de la génération de la gamme d'assemblage (affectation des ressources aux différentes opérations, application de certains critères d'évaluation, etc.).

Les constatations précédentes nous ont donc obligé à ajouter une fonctionnalité supplémentaire. Cette dernière permet au préparateur de structurer la gamme selon le GEP défini précédemment. Ceci est rendu nécessaire afin de réduire l'écart entre la gamme choisie par le préparateur et celle prévue dans le modèle. Ceci nous permet alors de poursuivre une méthodologie de recherche définie a priori pour le GEP.

La fonctionnalité ajoutée pour structurer le GEP déduit automatiquement le lien à établir,

entre l'état à partir duquel l'opération d'assemblage est réalisée, avec l'état résultant. Le système a ainsi la capacité de savoir, s'il est nécessaire d'ajouter un nouvel état de façon simultanée avec l'établissement d'un arc sur le GEP ou uniquement d'établir un arc entre deux états existants. Ceci a cependant comme base les spécifications relatives à l'opération d'assemblage. Ces dernières concernent également les composants prépositionnés et les procédés appliqués.

La procédure permettant d'assurer cette tâche fonctionne cependant sous l'hypothèse que deux états, ayant la même structure, sont considérés comme deux états distincts, s'ils ne correspondent pas aux mêmes procédés d'assemblage ou traitements annexes appliqués. Il s'agit d'éviter une ambiguïté résultante de la recherche des caractéristiques d'assemblage différentes mais propres à un même état. Pour cette raison, avant d'ajouter un arc entre deux états existants, une recherche est effectuée sur le GEP. Elle a pour but de savoir, si sur un autre chemin menant à l'état résultant, les mêmes procédés sont appliqués.

4.3.2-Méthodologie de reconnaissance des CA propres à un état actuel du produit

Le schéma fonctionnel de la figure 4.3 a mis en évidence le rôle des CA comme un élément essentiel dans la prise de décision accompagnant l'élaboration du processus d'assemblage global du produit.

Cependant, l'importance relative de chacune de ces caractéristiques est fonction de l'objectif que le préparateur veut atteindre pour effectuer les tâches propres au séquencement des opérations et à la sélection des ressources d'assemblage. De tels objectifs sont en relation avec la formalisation continue de décisions autorisant la poursuite du processus d'assemblage. Elles favorisent la recherche de certains types de caractéristiques plutôt que d'autres. Elles engendrent aussi la nécessité de la recherche

des CA propres à chaque état.

Les dernières observations justifient alors la démarche de modélisation que nous suivons. Cette démarche propose une méthodologie de reconnaissance des CA qui se fait cette fois-ci en tenant compte de l'état actuel du produit. Nous mettons ainsi en relief le caractère dynamique de variation de plusieurs types de CA. Un tel caractère est aussi à l'origine de la recherche continue de ces dernières. Il confère au système de préparation à l'assemblage un aspect récursif par le fait que ses sorties influencent de façon continue ses entrées. L'objectif derrière la recherche de chaque type est aussi détaillé.

4.3.2.1-Les sous-faces de contact

La recherche des sous-faces de contact sur les pièces d'un produit peut servir plusieurs objectifs:

- l'étude des conditions de montage sur ces sous-faces. Une telle étude entre en jeu lors de la modélisation des liaisons au niveau des composants. Elle mène aussi à l'identification de la nature des montages à réaliser entre les composants. Ces facteurs entrent en jeu dans le processus de génération des ressources nécessaires pour effectuer l'opération. Il en résulte aussi une possibilité d'effectuer une analyse de la difficulté d'assemblage résultant de la réalisation des montages serrés entre deux ou plusieurs sous-faces entrant en contact,
- la recherche des sous-faces libres d'une pièce. En effet, la soustraction de toutes les régions sur une face qui sont en interactions avec une autre face mènent à l'identification des régions qui restent libres pendant toute la durée de réalisation de la phase d'insertion du composant.

La procédure développée dans le modèle supporte la recherche de l'ensemble des sous-

faces de contact sur un composant à un état donné du produit. Une telle procédure peut être généralisée de la manière suivante:

```
Identifier le type du composant
SI le composant est une pièce ALORS
    Chercher la liste de sous-faces de contact sur la pièce à l'état assemblé
    POUR chaque sous-face dans la liste
        Identifier la sous-face conjuguée  avec cette sous-face
        Identifier la pièce sur laquelle se trouve cette sous-face conjuguée
        SI la pièce est assemblée à l'état donné ALORS
            Ajouter la sous-face à la liste de sous-faces cherchées
        FINSI
    FINPOUR
SINON (cas d'un sous-assemblage)
    Chercher la liste de pièces composant le sous-assemblage
    POUR chaque pièce dans la liste
        Chercher la liste de sous-faces de contact sur la pièce à l'état assemblé
        POUR chaque sous-face dans la liste des sous-faces
            Identifier la sous-face conjuguée avec cette sous-face
            Identifier la pièce sur laquelle se trouve cette sous-face conjuguée
            SI    la pièce est extérieure au sous-assemblage
            ET    la pièce est assemblée à l'état donné
            ALORS
                Ajouter la sous-face à la liste de sous-faces cherchées
            FINSI
        FINPOUR
    FINPOUR
FINSI
```

Remarquons que dans le cas d'un sous-assemblage les sous-faces sont celles déterminées sur l'ensemble des pièces le constituant. Cependant, nous tenons compte seulement des sous-faces résultant du contact de ces dernières avec les pièces à l'extérieur du sous-assemblage.

4.3.2.2-Les sous-faces libres

Les sous-faces libres sont des caractéristiques qui permettent au préparateur de sélectionner les régions selon lesquelles peut s'effectuer la saisie d'un composant pendant toute la durée de la phase de son insertion dans le produit. Ces sous-faces sont alors à choisir parmi celles qui restent accessibles pendant cette phase; on utilise généralement des surfaces présentant des plans parallèles à la direction d'assemblage ou des surfaces cylindriques ou encore des plans parallèles à la direction d'assemblage. Qui plus est, le récepteur doit également avoir avec le posage des sous-faces de contact (choisies parmi les sous-faces libres) admettant un plan tangentiel perpendiculaire à la direction d'insertions des composants.

Nous avons alors adoptée notre démarche en fonction de cet objectif. Cette dernière permet au préparateur de déduire, sur un composant, les sous-faces libres. Ces dernières sont cherchées sur les faces dont la validité pour la préhension est spécifiée sous la forme d'un attribut approprié (attribut Validité-Préhension).

La recherche des sous-faces libres s'effectue d'abord en isolant, puis en soustrayant l'ensemble des sous-faces de contact sur chaque face. L'algorithme généralisé pour identifier les sous-faces libres sur un composant peut alors être défini de la manière suivante:

Identifier le type du **composant**

SI le **composant** est une pièce **ALORS**

Chercher la liste de sous-faces de contact sur la pièce à l'**état donné**

POUR chaque **face** de la pièce

SI la face est sélectionnée pour la préhension **ALORS**

POUR chaque sous-face dans la liste de sous-faces

SI la **face** est le père de la sous-face **ALORS**

Isoler et séparer cette sous-face de la **face**

FINSI

FINPOUR

Construire des sous-faces à partir de nouvelles faces formées

Ajouter ces sous-faces à la liste des sous-faces libres de la pièce

FINSI

FINPOUR

SINON (cas d'un sous-assemblage)

Chercher la liste de pièces composant le sous-assemblage

POUR chaque pièce dans la liste

Chercher la liste de sous-faces de contact sur la pièce avec l'ensemble des pièces présentes à l'**état donné**

POUR chaque **face** de la pièce

SI la face est sélectionnée pour la préhension **ALORS**

POUR chaque sous-face dans la liste de sous-faces

SI la **face** est le père de la sous-face **ALORS**

Isoler et séparer cette sous-face de la **face**

FINSI

FINPOUR

Construire des sous-faces à partir de nouvelles faces formées

Ajouter ces sous-faces à la liste des sous-faces libres de la pièce

FINSI

FINPOUR

FINPOUR

FINSI

Notons aussi que la méthode d'identification des sous-faces libres sur un sous-assemblage ressemble au cas des sous-faces de contact dans le sens où elle s'effectue à partir de l'identification des sous-faces libres sur chaque pièce le constituant.

La démarche que nous proposons permet ainsi au préparateur d'effectuer, en tout temps, une étude de faisabilité de chaque opération d'assemblage. Une telle étude peut avoir plusieurs aspects:

- une identification directe des régions sur les faces qui vont rester libres sur toute la trajectoire d'assemblage du composant. Une étude visant à optimiser la configuration de saisie du composant, comme celle menée dans les travaux de [CHAN-88], [DUB-92] et [DINI-93] serait ainsi possible. Elle peut s'appuyer sur les paramètres identifiés directement sur les sous-faces libres plutôt que sur les faces (voir aussi tableau A6 en annexe A),
- une étude d'accessibilité aux sous-faces libres. Cette étude permet de vérifier la validité d'un choix de préhension d'un composant par un ensemble de sous-faces afin de s'assurer que l'élément de préhension n'entre pas en collision avec les autres pièces dans le produit,
- une analyse de la méthode de préhension quand on décide de saisir un composant par des sous-faces entrant au totalité en contact. Dans ce cas, la nature du montage à réaliser permet de déduire que la saisie du composant par cette sous-face est possible jusqu'au moment où la presque totalité de la sous-face entre en contact. Il est alors nécessaire de la saisir par une autre face ou de procéder par

une autre façon pour l'assembler. Par contre, lorsqu'il s'agit du désassemblage, le résultat précédent permet de déduire facilement l'impossibilité de saisir le composant par cette sous-face pour assurer le mouvement, qui l'amène à l'extérieur du produit.

4.3.2.3-Les liaisons

Les liaisons dans un produit sont parmi les caractéristiques les plus importantes. Elles jouent un rôle essentiel dans la prise de décision qui accompagne la génération et l'évaluation de la gamme d'assemblage.

En effet, le choix du récepteur se fait souvent en fonction du nombre de liaisons du composant. D'un autre côté, la détermination des directions d'assemblage des composants se fait à partir de l'analyse de leurs liaisons de prépositionnement. Ceci permet alors d'effectuer une évaluation de la liaison de blocage sur la trajectoire d'assemblage qui mène chaque composant à sa position finale dans le produit. Il en résulte aussi une possibilité de connaître le nombre de composants qu'on peut assembler simultanément ainsi, que les opérations d'assemblage faisant intervenir des directions d'insertions similaires. Il s'agit d'appliquer les critères d'évaluation basés sur la parallélisation des opérations et sur la minimisation du nombre de réorientation du produit durant une séquence déterminée.

D'autre part, les liaisons fonctionnelles des composants peuvent servir pour l'évaluation de la stabilité interne aux sous-ensembles de composants, obtenus à chaque opération, ou aussi pour la sélection des sous-assemblages nécessitant moins de dispositifs, pour la stabilisation de certains de leurs composants. La détermination des liaisons individuelles de chaque composant est à la base de ces critères [MAS-90], [LAP-91], [LEE-93], [SAN-92b].

Ce qui précède justifie notre démarche pour supporter la recherche des caractéristiques relatives aux liaisons entre les composants. Cette démarche a cependant comme principe une hiérarchie ayant comme base les liaisons au niveau des sous-faces de contact sur les pièces. Pour cette raison, à chaque état, une recherche est effectuée pour identifier l'application a posteriori des procédés d'assemblage déclarés inapplicables à l'étape d'insertion d'un composant. Une vérification est aussi effectuée dans le cas où un serrage nécessite la présence d'un ensemble de composants pour être établi.

La fonctionnalité qu'on a développée permet ainsi de supporter:

- la recherche des liaisons fonctionnelles et de prépositionnement de chaque composant avec les autres composants et avec le reste du produit,
- la détermination de la liaison de blocage du composant avec le reste du produit. Elle se fait à partir de l'évaluation des directions libres associées à la liaison de prépositionnement du composant.

<u>Cas des liaisons fonctionnelles et de prépositionnement</u>

La recherche des liaisons sur les sous-faces de contact des pièces sera à la base de cette tâche. Nous pouvons distinguer quatre cas possibles:

- **liaison pièce - pièce:** les liaisons de prépositionnement et fonctionnelles sont déduites par la mise en disjonction de toutes les liaisons fonctionnelles et de prépositionnement sur les sous-faces de contact entre les deux pièces (équations [3.2] et [3.9]),
- **liaison pièce - sous-assemblage:** les liaisons sont obtenues par la mise en disjonction de toutes les liaisons de la pièce avec chacune des pièces composant le sous-assemblage (équation [3.15]),

- **liaison sous-assemblage - sous-assemblage:** les liaisons sont obtenues par la mise en disjonction de chaque pièce composant un sous-assemblage avec chacune des autres pièces composant l'autre (équation [3.16]),
- **liaison composant - reste du produit:** les liaisons sont déterminées de façon uniforme par la mise en disjonction de toutes les liaisons avec les autres composants présents à l'état du produit (équations [3.3], [3.10] et [3.17]).

Dans ce qui suit, nous proposons les procédures généralisées permettant d'effectuer ces différentes tâches relativement à la détermination des liaisons fonctionnelles. Les procédures relatives aux liaisons de prépositionnement sont cependant identiques sauf qu'elles ne nécessitent pas la recherche des procédés d'assemblage appliqués sur les sous-faces de contact. Nous avons cependant choisi de représenter le cas des pièces. Le cas relatif aux sous-assemblages ne diffère que par la recherche puis, la mise en disjonction des liaisons relatives aux pièces le constituant.

1-Algorithme généralisé pour déterminer la liste des liaisons fonctionnelles d'une pièce avec les autres composants dans le produit:

Identifier le **mode** de génération du GEP
Chercher la liste de sous-faces de contact sur **la pièce identifiée** à l'**état donné**
POUR chaque sous-face dans la liste de sous-faces
    Identifier la **pièce** à laquelle appartient la sous-face conjuguée à la sous-face
    SI la **pièce** appartient à un sous-assemblage
    ET Aucune liaison n'est établie entre la **pièce identifiée** et ce composant
    ALORS
        Ajouter une liaison à la liste des liaisons de la **pièce identifiée**
    SINON

SI Aucune liaison n'est établie entre la **pièce identifiée** et cette **pièce**

ALORS

Ajouter une liaison à la liste des liaisons de la **pièce identifiée**

FINSI

FINSI

Identifier le procédé d'assemblage appliqué à la sous-face

SI le procédé est déclaré non applicable **ALORS**

SI le **mode** est en désassemblage

Chercher sur le GEP pour savoir si le procédé est déclaré ajouté à une opération d'assemblage sur le chemin menant à l'état assemblé

SI OUI **ALORS**

Mettre en disjonction de la liaison de prépositionnement sur la sous-face

SINON

Mettre en disjonction de la liaison fonctionnelle sur la sous-face

FINSI

SINON (cas de l'assemblage)

Chercher sur le GEP pour savoir si le procédé est déclaré ajouté à une opération d'assemblage sur le chemin menant à l'état désassemblé

SI OUI **ALORS**

Mettre en disjonction de la liaison fonctionnelle sur la sous-face

SINON

Mettre en disjonction de la liaison de prépositionnement sur la sous-face

FINSI

FINSI

FINSI

FINPOUR

2-Algorithme généralisé pour déterminer la liaison fonctionnelle d'une pièce avec le reste du produit:

Appeler la procédure qui identifie la liste de liaisons de la **pièce identifiée** avec les autres composants dans le produit

POUR chaque liaison dans la liste

Effectuer une mise en disjonction avec la liaison identifiée

FINPOUR

Cas de la liaison de blocage

La détermination des liaisons de blocage relatives à un composant se fait selon le principe adopté dans un grand nombre de travaux vus dans la littérature. Ce principe a pour base la génération puis l'identification des intersections sur le volume obtenu par le balayage des faces dans les directions de mouvement du composant.

La procédure généralisée correspondante à cette tâche comprend alors trois étapes principales:

étape 1: détermination de la liaison de prépositionnement du composant avec le reste du produit à un état déterminé,

étape 2: pour chaque direction libre de translation générer le volume obtenu par le balayage de toutes les faces exposées dans cette direction. La distance de balayage est calculée de telle façon à amener la face à l'extérieur de la boîte englobante du produit à l'état donné (voir figure 4.4). Une face est considérée comme exposée dans la direction de déplacement s'il existe au moins une normale à cette face pour laquelle le produit scalaire avec la direction de translation est positif .

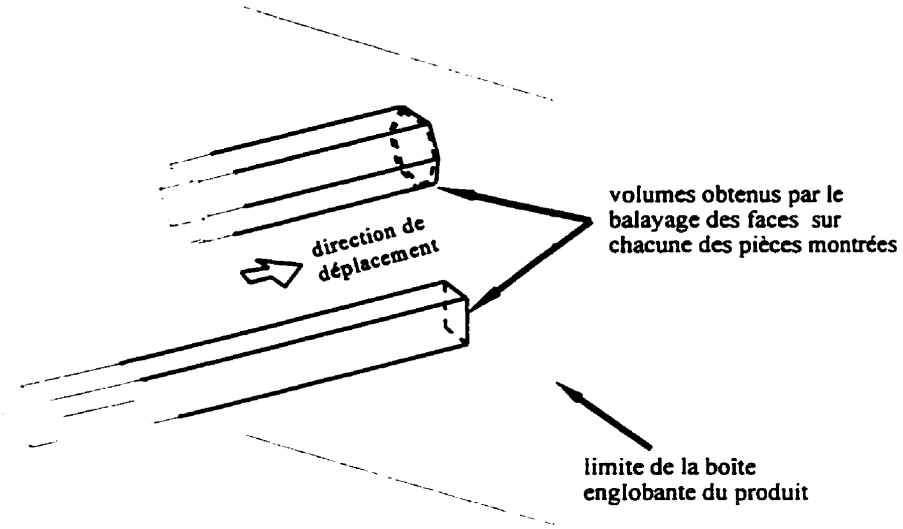


Figure 4.4. Volume formé par le balayage des faces dans la direction de déplacement

étape 3: pour chaque composant déjà assemblé à cet état, nous vérifions son interaction avec le volume généré à l'étape 2. Si l'interaction n'est pas nulle alors nous établissons une liaison de blocage entre ce composant et le composant prépositionné. Un d.d.l. dans la PMB sera ainsi bloqué dans la direction de déplacement.

Cependant, cette procédure fonctionne sous les règles suivantes:

1-Dans le cas d'un sous-assemblage, le volume est obtenu à partir de la génération d'un

solide unique. Ce dernier est équivalent à la réunion de toutes les formes solides relatives aux pièces constituant le sous-assemblage. Il s'agit de simuler le déplacement en bloc de toutes les pièces du sous-assemblage.

2-L'évaluation de l'intersection entre le volume généré avec un sous-assemblage se fait également à partir du solide équivalent à la réunion de toutes les formes solides relatives aux pièces du sous-assemblage.

3-Le processus de génération du volume ne prend pas en considération les faces qui sont à l'origine de l'existence d'une sous-face caractérisée par un procédé d'assemblage contribuant à une déformation (comme le rivetage, le sertissage, le clipsage). Ceci est rendu nécessaire afin d'éviter des collisions détectées sur des faces formées ou qui ont subies un changement de position a posteriori du prépositionnement du composant. Cette même règle s'applique également à toute face déclarée subissant un traitement équivalent à un procédé d'assemblage du même type que ceux mentionnés ci-dessus. Il s'agit de renseigner davantage le système sur l'ensemble des faces déformées sur une pièce. La seule exception à cette règle est faite dans le cas de l'anneau élastique. Ceci est dû au fait que l'ensemble de ses faces sont impliquées dans le contact. L'élimination de ces dernières conduit en quelque sorte à l'élimination d'une partie importante de l'ensemble des caractéristiques géométriques et topologiques relatives à cette pièce. Pour cela, nous simulons approximativement sa forme avant l'application de l'action de déformation (voir figure 4.5). Ceci se fait à l'aide d'une transformation de forme de facteur K égal à $\alpha \times \frac{R'}{R}$ ($\alpha>0$ est spécifique au montage de chaque type d'anneau élastique).

4-Dans le cas d'un composant subissant une action de translation ou de rotation à la suite de son prépositionnement, le volume est généré à partir de sa position précédant l'application de l'action.

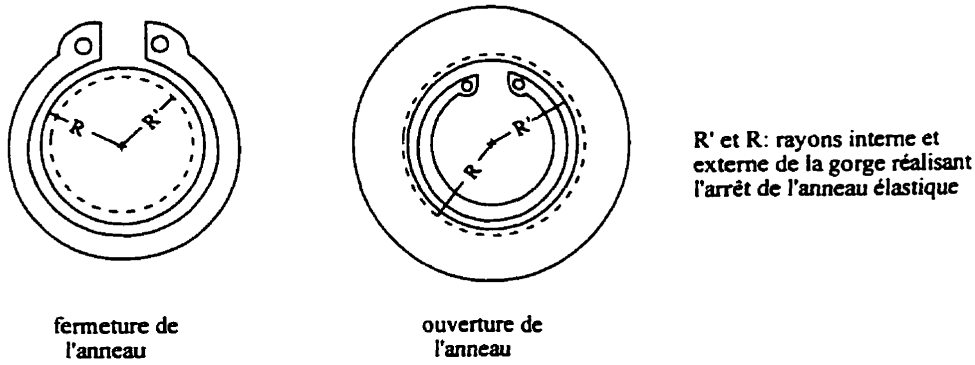


Figure 4.5. Explicitation des valeurs de R et R' dans le cas du montage d'un anneau élastique

5-La génération du volume se fait à partir de la position finale du composant dans le produit. La direction de balayage des faces se fait alors dans la direction opposée à celle de l'insertion du composant. Nous simulons ainsi le processus de désassemblage de ce dernier. Il en résulte une détermination plus aisé de la distance de balayage pour chaque face.

6-Dans le cas d'un groupe de composants identiques, les liaisons de blocage sont obtenus en détectant les collisions possibles sur chaque composant du groupe. Pour cela, nous générons en premier lieu un volume unique obtenu à partir de la forme solide propre au composant type. Ensuite, nous vérifions les intersections de ce dernier dans les différentes localités correspondantes à la répartition des éléments du groupe. L'ensemble de liaisons de blocage détectées seront ainsi associées au composant type. Ce dernier hérite de l'ensemble des caractéristiques relatives aux composants du groupe.

Les règles 3 et 4 décrivent la différence entre la méthode de détection de la collision adoptée dans la littérature avec celle que nous proposons. En effet, ces méthodes fonctionnent sous l'hypothèse que les composants sont indéformables. D'où l'ambiguïté résultante des cas comme ceux mentionnés ci-haut. Nous réalisons ainsi le grand avantage

de la méthodologie de modélisation que nous proposons.

Cependant, dans une étude de faisabilité de l'opération d'assemblage, il faut prendre en considération l'ensemble des facteurs qui entrent en jeu lors de la réalisation de l'opération.

À cet effet, le rôle de la liaison de blocage apparaît comme permettant d'éliminer a priori des opérations pratiquement non réalisables. Nous pouvons caractériser ainsi une partie de la réalité en se basant uniquement sur la reconnaissance directe d'une caractéristique d'assemblage. Il faut aussi considérer que toute opération d'assemblage est susceptible de faire intervenir des équipements spécifiques en fonction des phases relatives à cette dernière. Dans certains cas aussi, certains composants requièrent des pièces d'apport (un doigt de gants par exemple) pour être installés. Pour toutes ces raisons, une étude doit être faite sur l'accessibilité des équipements ou des pièces d'apport sur les trajectoires qui sont imposées. Ces dernières peuvent être rectilignes (dans ce cas il serait possible d'évaluer l'accessibilité de la même façon que dans le cas d'un composant) ou bien quelconques (comme par exemple le vissage, certains types de soudures, etc.).

Nous avons cependant limité notre démarche dans cette étude d'accessibilité. Sa fonction est de supporter la reconnaissance des caractéristiques d'assemblage propres aux composants. Tandis que l'étude de l'accessibilité relève du processus de la génération et d'évaluation de la gamme d'assemblage. Malgré cette limite, il présente des avantages par rapport aux travaux examinés dans la littérature, car les états du produit forment partie intégrante de son modèle. Les structures de ces états pourraient ainsi être évoquées à nouveau à chaque étape du processus d'assemblage. Une étude détaillée sur la faisabilité des différentes opérations est ainsi possible. Elle peut être effectuée soit simultanément au cours de la génération de la gamme d'assemblage, soit a posteriori de cette tâche.

Cette démarche correspond également à un interfaçage avec les fonctions de conduite et d'ordonnancement de l'atelier. Elle conduit dans certains cas à une modification de la gamme et de certaines opérations réalisées.

4.3.2.4-Bilan

Dans les paragraphes précédents, nous avons explicité les différentes fonctionnalités concernant la recherche de plusieurs types de caractéristiques d'assemblage. Ces fonctionnalités sont assurées à travers les quatre fonctions suivantes:

Chercher les sous-faces de contact

Objectif: effectuer une recherche de toutes les faces de contact sur un composant à un état donné du produit

Entrées: modèle du composant, structure de l'état du produit

Sorties: la liste de toutes les faces de contact sur le composant

Règles: sélectionner les sous-faces qui satisfont seulement au critère de l'existence d'une liaison (équation 3.1).

Isoler les sous-faces libres sur un composant

Objectif: identifier toutes les sous-faces libres sur les faces du composant sélectionnées pour la préhension

Entrées: modèle du composant, structure de l'état du produit

Sorties: la liste de toutes les sous-faces libres sur le composant

Règles: éliminer sur chaque face les sous-faces de contact résultantes de son interaction avec les autres faces.

Identifier les caractéristiques des liaisons de prépositionnement et fonctionnelles

Objectif: déterminer les liaisons fonctionnelles et de prépositionnement du

composant avec chacun des autres composants et avec le reste du produit

Entrées: modèle du composant, structure de l'état du produit

Sorties: liaisons du composant avec chacun des composants assemblés et avec le reste du produit

Règles: mise en disjonction de toutes les liaisons sur les sous-faces et sur les pièces. Recherche des procédés d'assemblage appliqués à l'état

Déterminer les liaisons de blocage d'un composant

Objectif: vérifier l'existence d'une collision sur la trajectoire d'insertion d'un composant

Entrées: modèle du composant, structure de l'état du produit

Sorties: liaisons du composant avec chacun des composants assemblés et avec le reste du produit

Règles: génération du volume par le balayage des faces exposées dans chaque direction du mouvement

La décomposition fonctionnelle de la tâche "Reconnaître les caractéristiques d'assemblage" peut alors apparaître telle que le montre la figure 4.6.

Nous avons alors proposé une démarche de modélisation qui devient complètement automatisé au niveau de la modélisation dynamique du produit et du processus de la mécanisation du processus déductif des caractéristiques d'assemblage.

Cette remarque accorde un autre avantage au modèle du produit proposé dans cette thèse. Un tel avantage résulte de sa correspondance avec les besoins actuels visant à automatiser le processus de détermination de la gamme et des ressources d'assemblage.

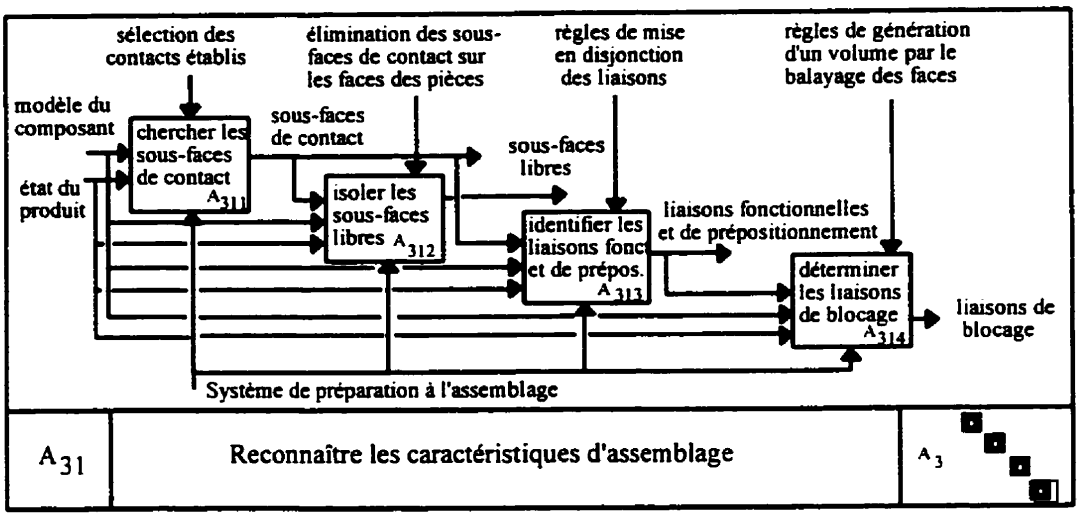


Figure 4.6. Décomposition de la tâche "Reconnaître les caractéristiques d'assemblage"

4.3.3-Les caractéristiques relatives à l'opération d'assemblage

La détermination des caractéristiques relatives à une opération d'assemblage a pour objectif de permettre l'analyse des phases qui entrent en jeu lors de la réalisation de l'opération. De cette façon, les directions d'assemblage relatives à l'insertion de chaque composant sont identifiées, ainsi que les différents procédés appliqués. Ces paramètres constituent ainsi le point de départ vers une étude d'affectation des ressources nécessaires pour réaliser les différentes tâches relatives à l'opération. Il serait aussi possible d'établir un lien direct entre la réalisation de l'opération et les caractéristiques propres aux liaisons fonctionnelles entre les composants à un état spécifique du produit. Ceci résulte de la dépendance, de ces dernières, des procédés d'assemblage. Ajoutons à tout ceci l'étude de faisabilité de l'opération qui nécessite l'identification des régions sur les faces (qui dans certains cas sont équivalentes à ces dernières) qui doivent subir des traitements complémentaires ou des procédés d'assemblage. L'évaluation de l'accessibilité par les équipements à un endroit spécifique du produit est ainsi possible. Dans certains cas aussi, une telle identification permet de tenir compte d'éventuels effets destructeurs, que

peuvent présenter certains procédés sur des pièces fragiles (soudure réalisée au voisinage d'une pièce que la chaleur peut altérer par exemple).

La fonctionnalité, qu'on a développée, permet ainsi la recherche des caractéristiques relatives à l'opération d'assemblage. Cette recherche s'effectue en simulant le processus du montage (ou d'assemblage) du produit. Elle concerne également:

- les caractéristiques relatives à la phase de prépositionnement, qui comportent les directions d'insertions des composants. Ces dernières sont cependant sélectionnées par le préparateur par rapport au référentiel machine, sur laquelle on a effectué les différentes opérations d'assemblage,
- les caractéristiques relatives à la phase de procédé qui comportent les différents types de procédés appliqués. Le préparateur a ainsi la possibilité d'identifier spécifiquement les régions (appelées les sous-faces) des faces sur lesquelles interviennent les mêmes types de procédés d'assemblage ou de traitements appliqués. Dans le cas où ces derniers sont spécifiés sur une face, la face au complet est considérée comme équivalente à la sous-face.

La tâche d'identification des caractéristiques d'une opération d'assemblage utilise donc deux fonctions:

Identifier les caractéristiques relatives au prépositionnement des composants

<u>Objectif</u>: identifier la réalisation du prépositionnement des composants.

<u>Entrées</u>: modèle de l'opération d'assemblage

<u>Sorties</u>: directions d'insertion des composants

<u>Règles</u>: identification des composants prépositionnés durant la réalisation de l'opération

Chercher les procédés associés à l'opération

Objectif: chercher les procédés appliqués durant la réalisation de l'opération

Entrées: modèle de l'opération d'assemblage

Sorties: liste des procédés appliqués et des sous-faces concernées

Règles: recherche des procédés définis a priori ou ajoutés sur les sous-faces des pièces. Élimination des procédés déclarés non applicables

La décomposition fonctionnelle de la tâche "Reconnaître les caractéristiques de l'opération d'assemblage" peut alors apparaître tel que le montre la figure 4.7.

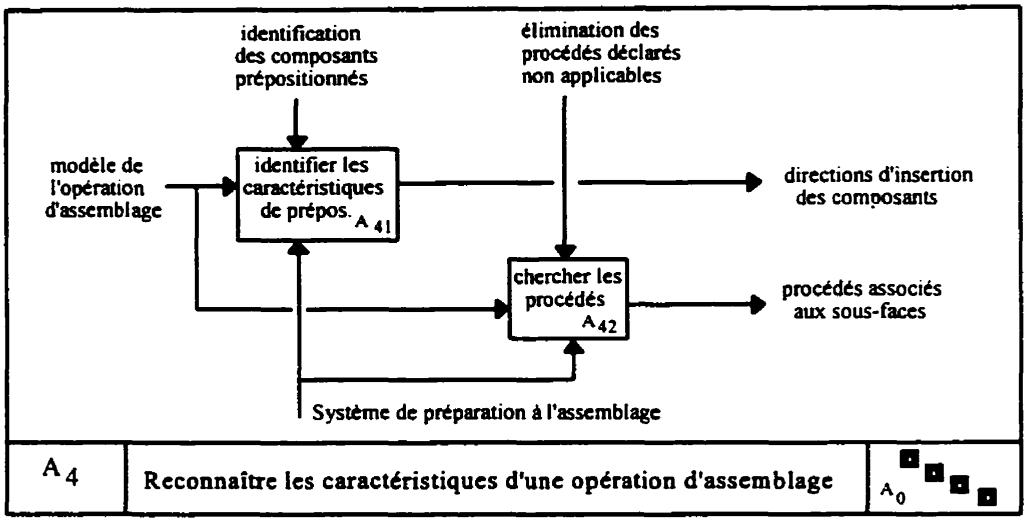


Figure 4.7. Décomposition fonctionnelle de la tâche "Reconnaître les caractéristiques d'une opération d'assemblage"

4.4-Conclusion

Nous proposons dans ce chapitre une méthodologie de reconnaissance des caractéristiques d'assemblage aux différents états du produit. Une telle méthodologie assure aussi la mise en oeuvre d'un système de préparation à l'assemblage, basé sur une analyse objective d'un modèle du produit issu d'une proposition de conception.

Pour atteindre notre objectif, nous avons proposé au début deux modèles:

- un modèle des opérations d'assemblage faisant intervenir une phase de prépositionnement des composants et une phase de réalisation de différents procédés,
- un modèle de la gamme d'assemblage structurée sous la forme d'un GEP donnant de manière cohérente l'ensemble des alternatives d'assemblage en faisant apparaître:
    - -les états du produit,
    - -le choix des opérations d'assemblage

Ceci est rendu nécessaire afin de réduire l'écart entre la structure de gamme choisie par le préparateur avec celle prévue dans le modèle. Ceci nous permet aussi de poursuivre une méthodologie de recherche définie a priori pour le GEP.

Nous avons, par la suite, détaillé les différentes procédures permettant au préparateur la recherche de plusieurs types de CA en fonction des objectifs à atteindre.

Dans le chapitre suivant, nous décrivons d'une façon détaillée la maquette logicielle assurant les fonctionnalités que nous proposons. Plus précisément, nous parlons de ses commandes, des classes d'objets et d'attributs, qui lui sont propres, et surtout de son fonctionnement au sein du modeleur solide ACIS. Nous concluons avec les perspectives souhaitables afin de permettre une intégration de la maquette à un système de préparation à l'assemblage efficace et automatisé.

CHAPITRE 5
MAQUETTE FONCTIONNELLE DE VALIDATION

5.1-Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre trois une méthodologie de reconnaissance des caractéristiques d'assemblage basée sur la définition de la structure hiérarchique du produit. Au début du chapitre quatre, nous avons proposé un modèle de la gamme d'assemblage intégré au modèle du produit. Nous avons élaboré par la suite une méthodologie de recherche des caractéristiques d'assemblage propre à chaque état. Nous avons également montré comment la reconnaissance de ces caractéristiques pouvait permettre une analyse objective du produit du point de vue de l'assemblage.

Dans ce cinquième chapitre, nous commençons par décrire l'architecture fonctionnelle de la maquette logicielle d'un **Système de Caractéristiques d'Assemblage de Produits (SCAP)**. À l'aide de ce système, nous validons les concepts qui sont abordés dans les deux précédents chapitres. Nous décrivons ainsi comment les différentes fonctionnalités de SCAP sont assurées. Nous en tirons profit pour décrire la fonctionnalité globale de SCAP au sein du modeleur solide ACIS™.

5.2-Architecture fonctionnelle de la maquette

La maquette logicielle a été entreprise afin de supporter la génération d'un modèle du produit et la reconnaissance générative des caractéristiques d'assemblage. Elle comprend quatre phases essentielles qui sont:

- la génération du modèle homogène de chaque pièce,

- la construction de la structure hiérarchique du produit,
- la modélisation des liaisons sur les sous-faces de contact des pièces à l'état assemblé,
- la modélisation dynamique du produit.

5.2.1-Génération du modèle de pièce homogène

Le modèle de pièce homogène, tel que nous l'avons défini au chapitre trois, se caractérise par un modèle B-Rep topologique et géométrique, dont les entités topologiques supportent en partie les entités technologiques.

Pour générer le modèle solide de la pièce, notre choix s'est porté sur le modeleur solide ACIS™ développé et commercialisé par Spatial Technology Inc. Un tel choix se justifie, d'une part, par la cohérance et la compacité de la structure utilisée dans ACIS™ pour définir les relations entre géométrie et topologie et, d'autre part, par les différentes fonctionnalités assurées par le modeleur, notamment:

- la possibilité de parcourir aisément l'arbre B-Rep du général vers le détail et inversement,
- les procédures API (*Application Procedural Interface*), qui supportent d'une façon directe la réalisation de plusieurs tâches, comme par exemple, le calcul de la distance minimale et l'isolation de la région d'intersection entre deux faces, le balayage des faces dans une direction déterminée, etc.,
- la sauvegarde des données sous la forme d'un fichier texte qui est toujours récupérable à l'aide des fonctions de ACIS™. Il en résulte une possibilité de reconstruire le modèle du produit en tout temps. Ceci correspond bien avec les objectifs visés dans le modèle; notamment la recherche des caractéristiques d'assemblage aux différents états définis. Cette recherche peut alors se faire a

posteriori de la génération de la gamme d'assemblage,

- la possibilité d'extension du modeleur par l'ajout:
  - des classes d'objets et d'attributs non inclues dans son noyau,
  - des commandes sur son interface graphique Test-Harness.

La dernière fonctionnalité constitue une grande particularité qui différencie ACIS™ des autres modeleurs solides. Elle permet une adaptation de l'application à la structure de données définie dans le modeleur. Au niveau du SCAP, ceci mène à pouvoir:

- exécuter les différentes tâches à partir de commandes interprétées sur l'interface de Test-Harness de façon analogue aux commandes standards de ACIS™,
- visualiser les différentes pièces du produit. Il en résulte une identification plus aisée des différentes entités présentes sur leurs modèles.

Le résultat de la construction du modèle solide est la génération d'un fichier ASCII, qui représente son arbre B-Rep au format ACIS™.

La génération du modèle homogène de la pièce se fait par la suite selon deux étapes:

- une première étape de construction de la pièce à partir de la structure des informations géométriques et topologiques regénérées en faisant appel au fichier précédent,
- une deuxième étape d'association des caractéristiques technologiques aux différentes entités figurant sur le modèle déjà défini de la pièce. Cette tâche est interactive. Elle se fait à partir d'une interface utilisateur qui permet:
  - d'associer directement les caractéristiques intrinsèques à la pièce (l'identification, le matériau et la liste des éléments identiques),
  - de sélectionner tour à tour les faces ou les arêtes, affichées à l'écran,

afin de préciser leurs caractéristiques intrinsèques ou extrinsèques.

Le résultat de cette première phase est donc un fichier ASCII contenant le modèle homogène de la pièce dont les champs d'attributs ont éventuellement été modifiés afin de référencer les entités technologiques qui y figurent explicitement.

À cette fin, les classes d'objets et d'attributs propres à SCAP sont définies en suivant les recommandations spécifiques pour pouvoir les intégrer au noyau de ACIS™. Il en résulte une possibilité de sauvegarder et de régénérer leur structure de façon analogue aux classes d'objets et d'attributs standards du modeleur.

D'un autre côté, les nouvelles entités propres à SCAP (comme par exemple l'entité 'pièce', 'composant', etc.) sont définies de manière à respecter une certaine cohérence avec les entités préexistantes du modèle ACIS™. Nous illustrons, sur la figure 5.1, un exemple d'entité 'composant' dont la structure est inspirée de l'entité 'face' d'ACIS™.

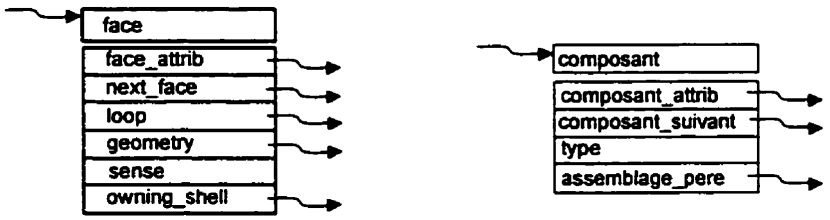


Figure 5.1. Cohérence entre les entités préexistantes du modèle ACIS™ et les entités propres à SCAP

5.2.2-Construction de la structure hiérarchique du produit

L'exploitation des modèles homogènes de pièces consiste à les intégrer dans la structure d'un ou de plusieurs assemblages.

Pour chaque assemblage défini, il est possible de sauvegarder sa structure dans un fichier ASCII qui représente explicitement le modèle de son arbre.

La construction de la structure hiérarchique du produit se fait alors conformément au schéma fonctionnel de la figure 3.2. Elle nécessite d'abord l'intégration des différents modèles de composants dans la structure d'un assemblage. Une interface utilisateur a été développée a cet effet. Elle permet de spécifier manuellement:

- le nom du produit,
- le nom du fichier propre au modèle de chaque composant, ainsi que la position du centre de son référentiel et l'orientation de ses axes par rapport au référentiel absolu du produit.

Le système agit d'abord en construisant un nouvel assemblage, puis en ajoutant chaque composant défini à la liste des composants de cet assemblage. Un référentiel est aussi associé à chaque composant dont le modèle est régénéré à partir du fichier correspondant.

La structure ainsi définie pourra par la suite être modifiée. C'est le cas lorsqu'il s'agit de définir des nouvelles instances de composants ou, aussi, lorsqu'il s'agit d'agréger un sous-ensemble de composants dans la structure d'un sous-assemblage. Deux interfaces utilisateurs supplémentaires sont créées afin d'assurer la réalisation de ces deux tâches:

La première interface permet à l'utilisateur de préciser de façon interactive, d'une part, le nom du composant qui doit être instancié et, d'autre part, les caractéristiques propres à la définition de chaque nouvelle instance de ce composant. Ces caractéristiques concernent notamment:

- les nouvelles position et orientation du référentiel propre à l'instance définie,

- le nouveau numéro de variante.

Pour chaque instance définie, le système agit en modifiant la structure hiérarchique du produit. Ceci se fait, d'abord, en créant un modèle d'un nouveau composant, puis en lui propageant les caractéristiques propres au modèle du composant instancié.

Quant à la deuxième interface, elle permet à l'utilisateur de:

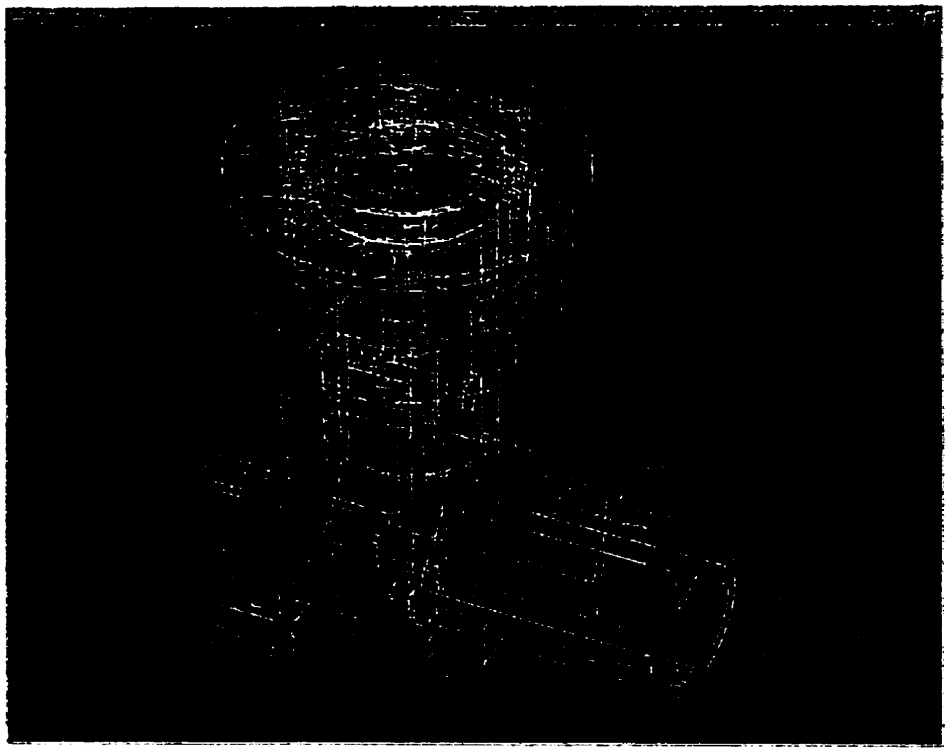
- sélectionner manuellement la liste de composants qui doivent être intégrés à la structure d'un nouvel assemblage,
- spécifier le nom du nouveau sous-assemblage créé.

Le système agit alors en modifiant la structure hiérarchique du produit. Ceci se fait par la création d'un nouvel assemblage à partir du sous-ensemble de composants sélectionnés. Dans un même temps, cet assemblage est ajouté à la liste des composants du produit.

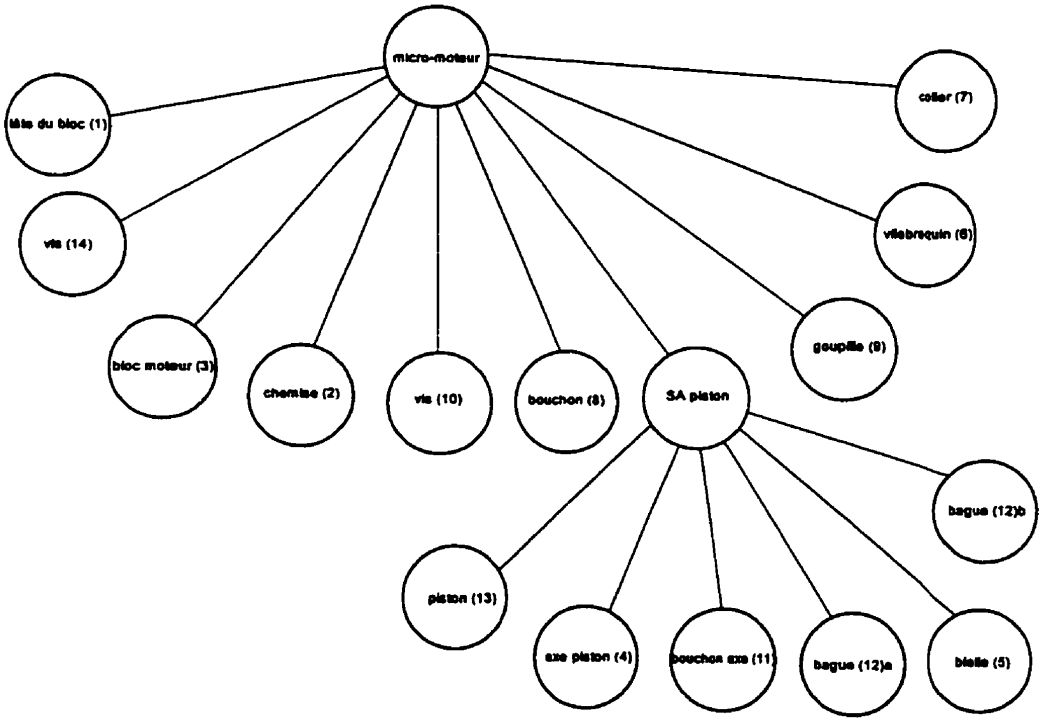
Notons finalement qu'à la fin de chaque étape mentionnées précédemment, la structure résultante du produit est sauvegardée.

Pour chacune de ces étapes, l'utilisateur a la possibilité de spécifier manuellement le récepteur du produit. La tâche, qui redéfinit les référentiels associées aux composants, peut alors être effectuée dès que le produit est construit.

Sur les figures 5.2(b) et 5.3(b), nous illustrons deux exemples de structures hiérarchiques. Elles correspondent à deux produits ainsi créés: un micro-moteur et un bobinoir (figures 5.2(a) et 5.3(a)). Les plans d'ensemble relatifs à ces deux produits sont donnés sur les figures B1 et B2 en annexe B.



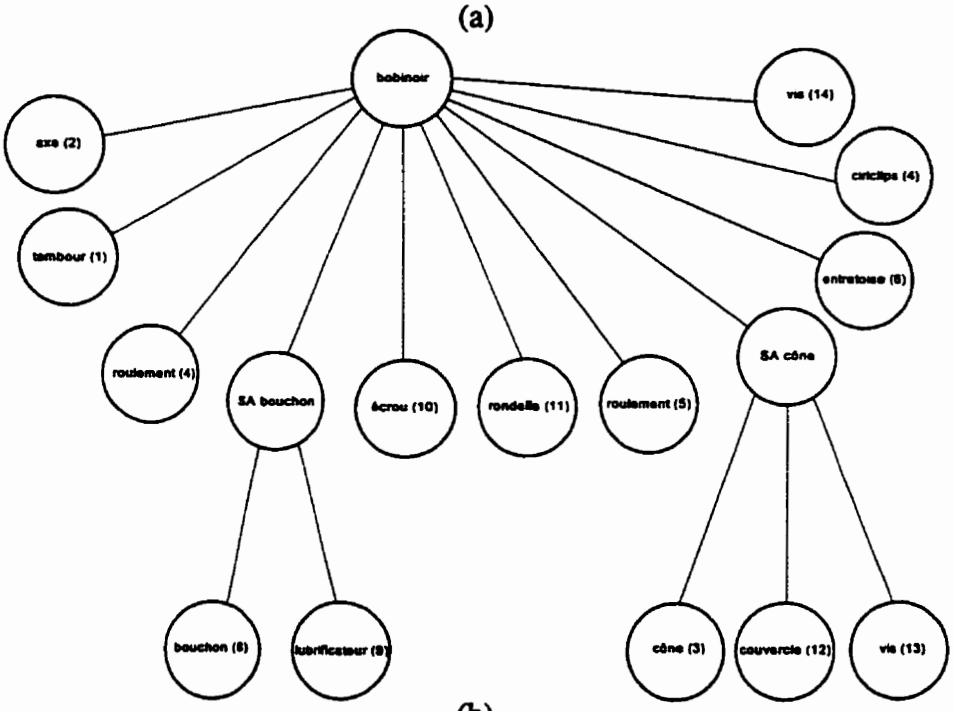
(a)



(b)

Figure 5.2. Micro-moteur créé et sa structure hiérarchique correspondante

(a)



(b)

Figure 5.3. Bobinoir créé et sa structure hiérarchique correspondante

Pour ces deux produits, nous avons choisi d'adopter une nomenclature qui englobe, d'une part, le nom et le numéro de position de la pièce, et, d'autre part, le nom unique d'un sous-assemblage. Sur les figures 5.2(b) et 5.3(b), les sous-assemblages sont créés conformément à la tâche qui modifie la structure hiérarchique du produit. Sur la figure 5.2(a), nous avons choisi de présenter une vue complète qui représente chacune des six vis (14), des quatre vis (10) et des deux bouchons (11) à sa position respective dans le produit.

5.2.3-La modélisation des liaisons au niveau des sous-faces de contact des pièces

Les différents composants étant intégrés à la structure du produit, il est possible de passer à une étape essentielle du processus de modélisation. Cette étape concernespécifiquement l'identification des caractéristiques de liaisons sur les sous-faces de contact des pièces.

Une procédure appropriée permet la réalisation de cette tâche. Elle peut être exécutée sur l'interface du Test-Harness. Ceci est rendu nécessaire, afin de permettre la visualisation de la région de contact sur chaque paire de faces. Cette région est déduite automatiquement par le système. Elle est utilisée pour construire la sous-face de contact. Il en résulte une identification plus aisée de chaque contact entre deux pièces, ainsi que du type de procédé qui doit lui être associé.

Pour chaque sous-face isolée, une liste de procédés est affichée à l'écran (figure 5.4). Une interface utilisateur permet de spécifier s'il faut caractériser cette sous-face par un ou plusieurs procédés d'assemblage. Des caractéristiques propres à la réalisation du procédé peuvent aussi être spécifiées. C'est par exemple le cas des procédés comme le vissage (le pas et le sens de rotation) et le serrage (le couple de serrage, la condition fonctionnelle derrière l'établissement du procédé).

Figure 5.4. Interface utilisateur pour le choix des procédés d'assemblage

Le résultat de ce traitement consiste à faire apparaître automatiquement la liste de sous-faces de contact associée à chaque pièce et, pour chaque sous-face, ses propres caractéristiques. Ces dernières concernent également:

- le numéro d'identification généré automatiquement par le système,
- la liaison associée, caractérisée par une PMF, une PMP et une PMPr,
- les procédés d'assemblage appliqués.

La trace du raisonnement précédent consiste à enregistrer toutes les modifications rapportées au modèle de produit généré jusqu'à cette étape de modélisation.

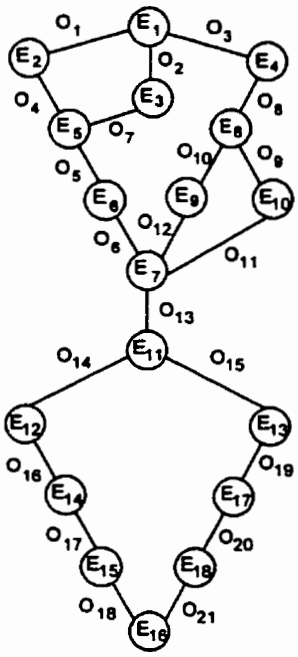
La démarche de modélisation entreprise jusqu'à présent permet donc de fixer les conditions initiales de recherche par la reconnaissance de l'ensemble des caractéristiques propres à l'état assemblé. Il en résulte une possibilité de passage à une étape d'importance égale à celle de la modélisation des liaisons. Cette étape concerne spécifiquement la recherche des caractéristiques d'assemblage propres aux composants dans les différents états. Ceci correspond aussi à la tâche de modélisation dynamique du produit.

5.2.4-la modélisation dynamique du produit

Au chapitre quatre, nous avons montré que la recherche des caractéristiques d'assemblage relatives aux états est basée sur la reconnaissance des structures de ces derniers. Nous avons aussi parlé de la nécessité d'intégrer les états à une structure de gamme. Une telle structure a cependant été présentée dans SCAP sous la forme d'un Graphe d'États du Produit (GEP). Ce dernier permet la simulation du processus de montage ou de démontage du produit. Il en résulte une possibilité de mise en évidence de la chronologie d'apparition des différents états durant le processus d'assemblage du produit.

À l'état actuel du SCAP, le GEP peut être généré manuellement. Une interface utilisateur a été développé à cette fin. Elle permet de spécifier les paramètres relatifs à chaque opération d'assemblage appliquée à partir d'un état déterminé. Le système agit alors en ajoutant un nouvel état de façon simultanée avec l'établissement d'un arc sur le GEP ou en établissant uniquement un arc entre deux états existants. Les figures 5.5(a) et 5.5(b) illustrent à titre d'exemple le GEP (gamme d'assemblage) du micro-moteur (figure 5.2) et le GEP (gamme de désassemblage) du bobinoir (figure 5.3). Les structures de quelques états, générées automatiquement par le système, sont également montrées sur ces figures. Ces GEP ont été créés en simulant manuellement la tâche de séquencement des opérations d'assemblage tout en faisant appel à la procédure qui permet de structurer le GEP. Sur la figure 5.5 chaque cercle représente un état admissible et chaque arc une opération d'assemblage appliquée. Chacun de ces états et de ces opérations a été cependant caractérisé par un numéro pour pouvoir les identifier.

Une fois le GEP défini, il est possible de déduire plusieurs types de caractéristiques d'assemblages (CA). A cette fin, plusieurs fonctionnalités sont associées à SCAP afin de supporter la modélisation dynamique du produit. De telles fonctionnalités sont principalement basées sur les différentes procédures qu'on a proposées au chapitre quatre



E_1 ={1,2,3,SA,6,7,8,9,10,14}

E_2 ={{3,10},1,2,SA,6,7,8,9,14}

E_3 ={{3,2},1,SA,6,7,8,9,10,14}

E_4 ={{3,7},1,2,SA,6,8,9,10,14}

E_5 ={{3,2,10},1,SA,6,7,8,9,14}

E_8 ={{3,7,6},1,2,SA,8,9,10,14}

Sous-ensemble de composants assemblés

E_7 ={{3,6,7,10,2},1,SA,8,9,14}

E_{11}={{3,6,7,10,2,SA},1,8,9,14}

Composants désassemblés

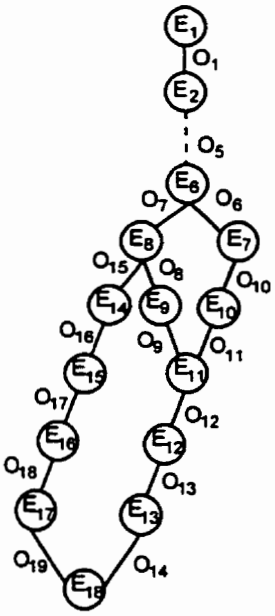
E_{12}={{3,6,7,10,2,SA,1},8,9,14}

E_{13}={{3,6,7,10,2,SA,8},1,9,14}

E_{16}={{3,6,7,10,2,SA,1,14,8,9}}

SA=[4,5,11,12a,12b,13]

(a)



E_1={{1,2,SA_1,4,5,6,7,SA_2,10,11,14}}

E_2={{1,2,SA_1,4,5,6,7,SA_2,10,11},14}

E_6 ={{1,2,4,5,6,7},14,SA_1 ,SA_2,10,11}

E_7={{1,2,4,6,7},14,SA_1 ,SA_2,10,11,5}

E_8 ={{1,4,5,6,7},14,SA_1 ,SA_2,10,11,2}

E_9 ={{1,4,6,7},14,SA_1 ,SA_2,10,11,2,5}

E_{10}={{1,2,4,7},14,SA_1 ,SA_2,10,11,5,6}

E_{11} ={{1,4,7},14,SA_1 ,SA_2,10,11,2,5,6}

E_{14}={{1,4,5,6},14,SA_1 ,SA_2,10,11,12,7}

E_{17}={{1,6},14,SA_1,SA_2,10,11,12,7,4,5}

E_{18}={1,14,SA_1 ,SA_2,10,11,12,7,4,5,6}

SA_1 =[3,12,13] SA_2=[8,9]

(b)

Figure 5.5. a)GEP et états du micro-moteur (gamme d'assemblage)

b)GEP et états du bobinoir (gamme de désassemblage)

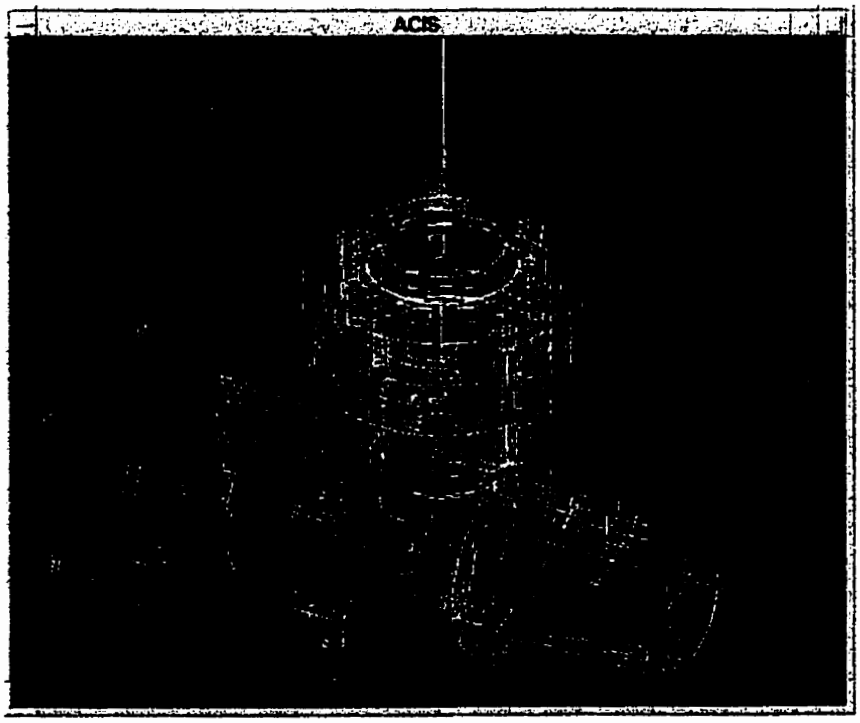
tout en explicitant la méthodologie de reconnaissance des CA à chaque état du produit. Ces procédures concernent spécifiquement:

La recherche des sous-faces de contact sur les composants: Les figures 5.6(a) et 5.6(b), illustrent deux exemples de sous-faces isolées au moyen de la fonctionnalité développée dans SCAP. Ces sous-faces sont relatives au vilebrequin (6) et au sous-assemblage piston. Rappelons que ce dernier est un sous-assemblage a priori du micro-moteur. Sur la figure 5.6, nous montrons aussi une vue éclatée du produit aux états (7) et (11). Une telle vue est déduite automatiquement par le système au moyen d'une procédure qui déplace les différents composants, suivant leur direction d'insertion, jusqu'à une position qui les mène à l'extérieur de la boîte englobante du produit à l'état donné. Cette dernière est formée par la combinaison de toutes les boîtes englobantes relatives aux différents composants déjà assemblés à cet état. L'usager a donc la possibilité de visualiser directement l'état ainsi que les différentes entités le constituant.

L'isolation des sous-faces libres: Les figures 5.7(a) et 5.7(b) illustrent deux autre exemples de sous-faces libres identifiées respectivement sur le vilebrequin (6) et sur le sous-assemblage piston aux états (7) et (11). La validité pour la préhension a été spécifiée manuellement sur les faces composantes l'enveloppe externe de chaque pièce montrée. Une étude d'accessibilité aux sous-faces identifiées sur l'axe du piston et la bielle, dans le cas de la figure 5.7(b), permet cependant de déduire qu'il est impossible de saisir le sous-assemblage piston par ces sous-faces. Ceci résulte de la collision de l'élément de préhension avec les autres pièces dans le produit.

L'identification des caractéristiques des liaisons de prépositionnement et fonctionnelles. Les figures 5.8(a), 5.8(b) et 5.9(a) et 5.9(b) montrent quatre exemples de liaisons identifiées sur le sous-assemblage piston, le bouchon (8) et le vilebrequin (6) aux états (7) et (17). Sur ces figures nous montrons également les liaisons avec le reste

(a)



(b)

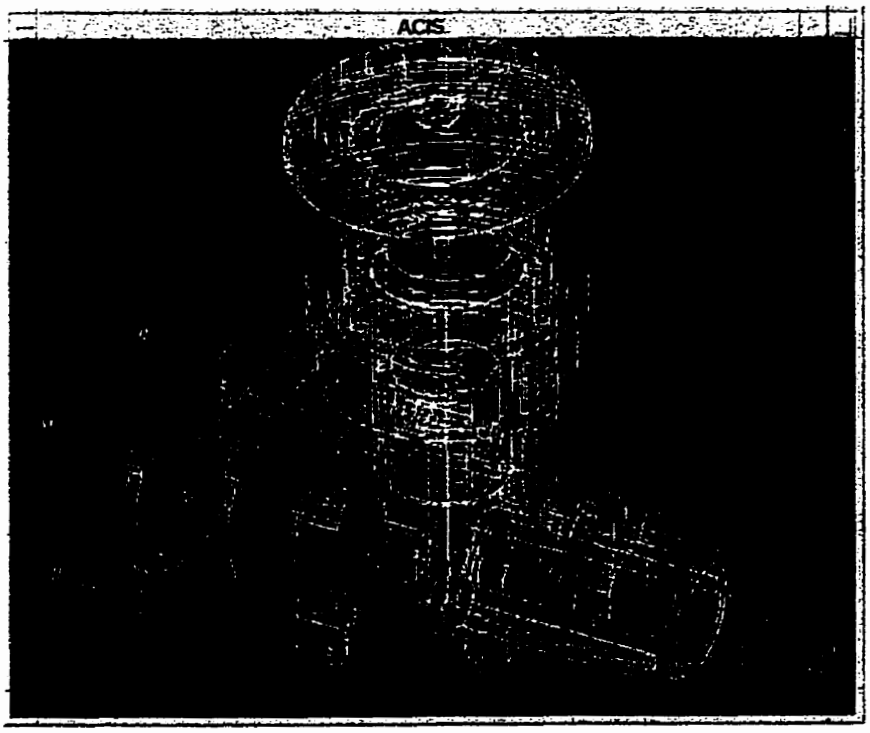
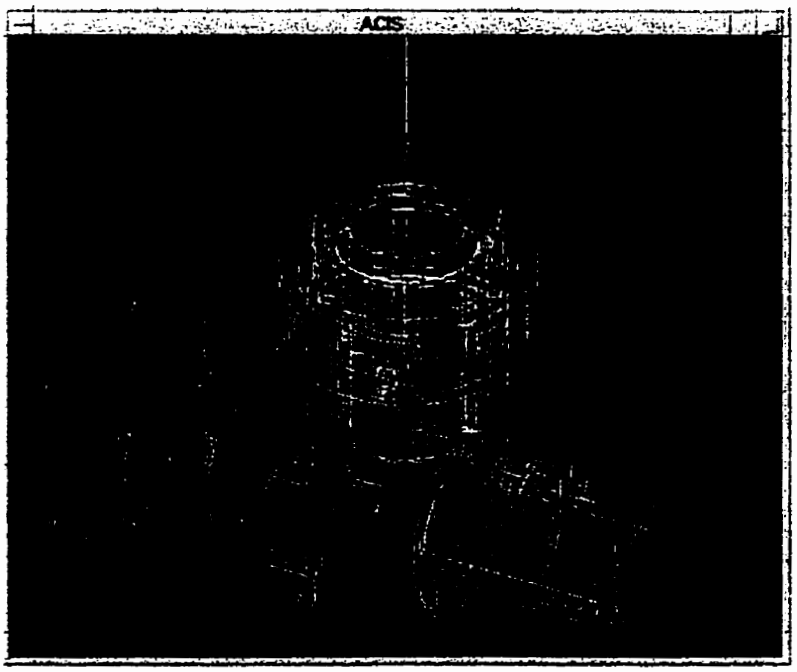


Figure 5.6. Sous-faces de contact isolées sur le vilebrequin (6) et sur le SA piston aux états (7) et (11)

(a)



(b)

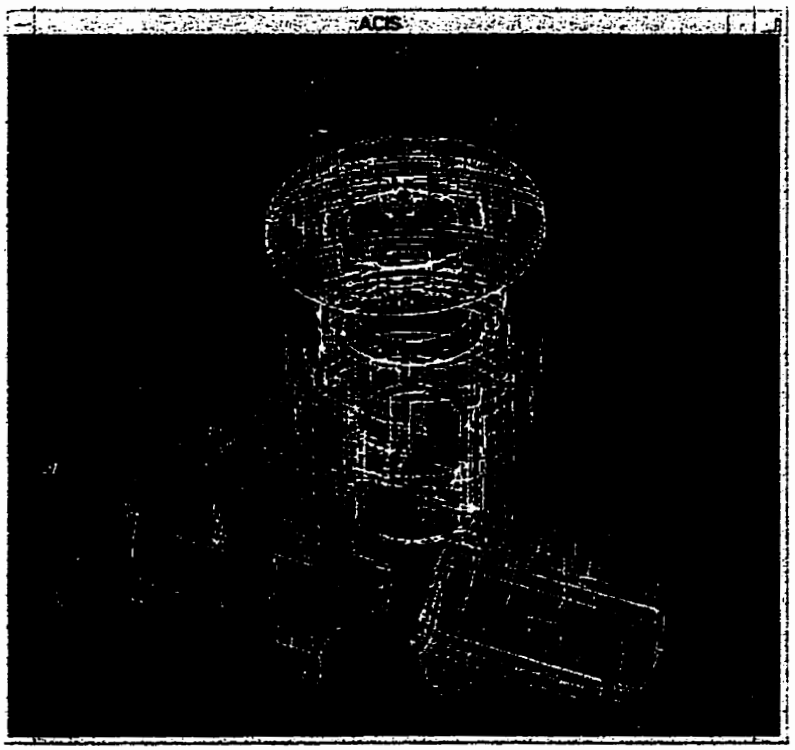


Figure 5.7. Sous-faces libres identifiées sur le vilebrequin (6) et le sous-assemblage piston aux états (7) et (11)

du produit relatives à chacun de ces composants pour chaque état correspondant. Sur la figure 5.8(a), nous remarquons que la liaison de prépositionnement du sous-assemblage piston est obtenue en supprimant sa liaison avec le vilebrequin. Cette dernière est la résultante des liaisons entre les surfaces cylindrique et plane sur le vilebrequin. De telles liaisons ont été cependant déclarées résultantes d'une action de translation appliquée suite au prépositionnement de ce composant dans le produit. Remarquons aussi sur la figure 5.9 le changement des liaisons du vilebrequin. Ce changement est survenu suite à l'insertion du sous-assemblage piston. Les différentes alternatives qui apparaissent durant la génération de la gamme sont cependant à l'origine de ce changement. En effet, les composants, dont l'assemblage est impossible à un état, le deviendront suite à la suppression de certaines de leurs liaisons à un autre état. Remarquons aussi l'absence de toute possibilité de mouvement du bouchon (8) à l'état (17). Ceci résulte de ses liaisons avec le groupe de quatre vis (10) et le bloc moteur (3).

La détermination des liaisons de blocage: Les figures 5.10 et 5.11 montrent deux exemples de liaisons de blocage relatives au sous-assemblage piston et le colier (7) respectivement aux états (4) et (16). Nous y illustrons aussi les liaisons de chaque composant avec les autres composants et avec le reste du produit. Les résultats montrées sur la figure 5.10 peuvent être utilisés pour déduire une contrainte géométrique imposée sur l'assemblage du sous-assemblage piston. Toute opération d'assemblage, portant sur l'assemblage ou de désassemblage de ce composant, pourrait être considérée non réalisable. Par contre, dans le cas du colier (7), nous réalisons une absence de blocage sur la trajectoire d'assemblage. Il en résulte une possibilité de prendre en considération tout changement d'état résultant d'une opération d'insertion de ce composant.

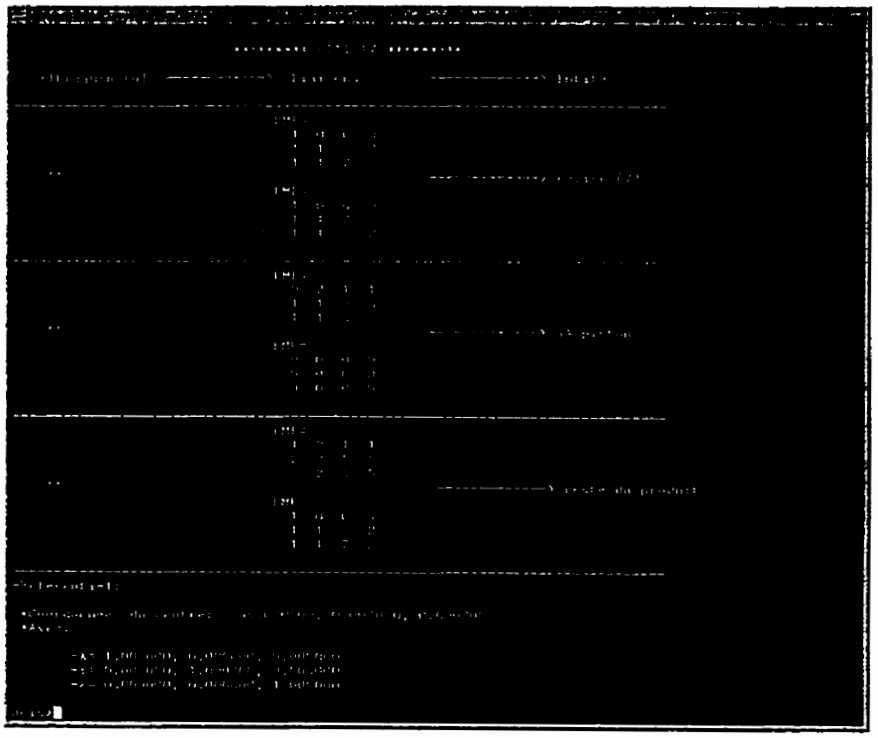
L'identification des caractéristiques propres à chaque opération d'assemblage: La figure 5.12 illustrent trois exemples de caractéristiques relatives à différentes opérations d'assemblage. Le premier s'applique à l'opération d'assemblage de la chemise (2).

(a)

(b)

Figure 5.8. Liaisons relatives au sous-assemblage piston et au bouchon (8) à l'état (17)

(a)



(b)

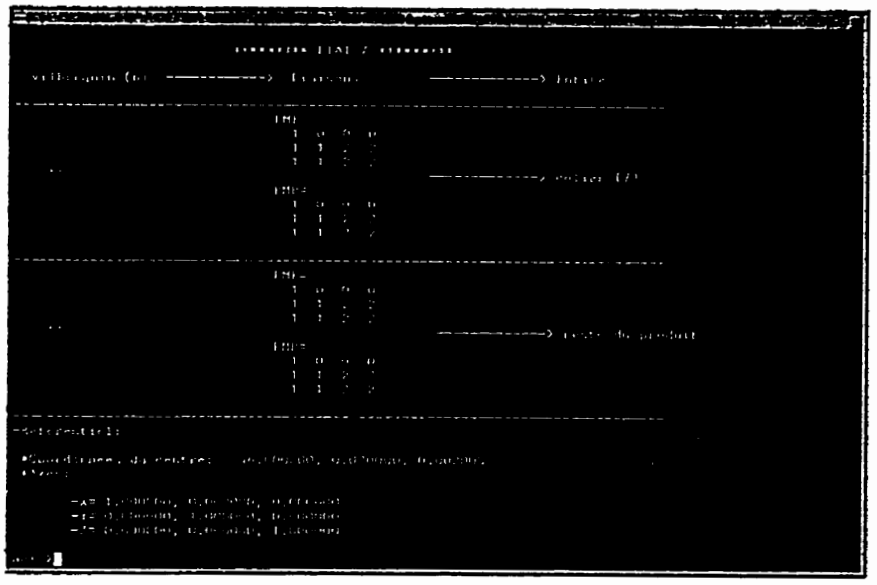


Figure 5.9. Liaisons relatives au vilebrequin (6) aux états (7) et (17)

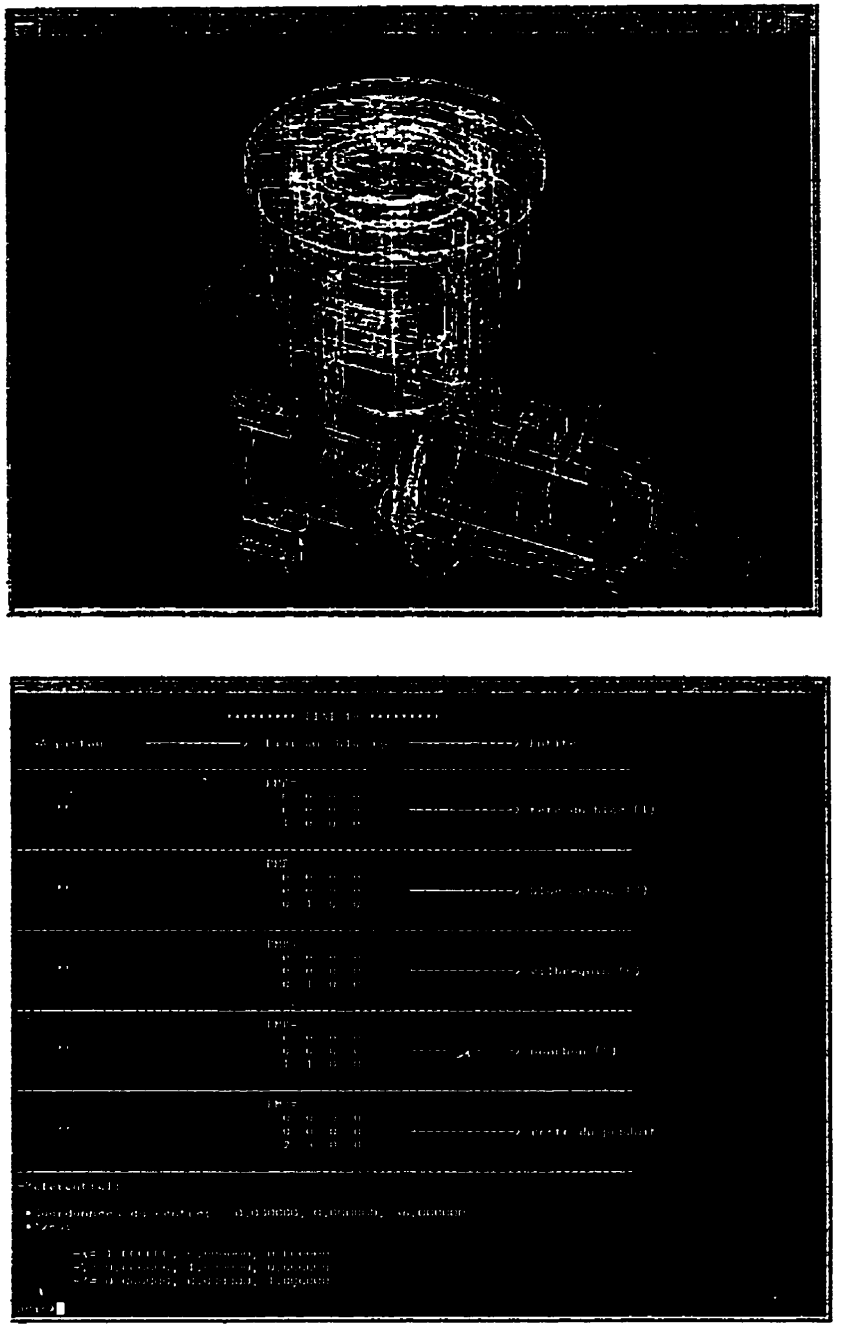


Figure 5.10. Liaisons de blocage relatives au sous-assemblage piston à l'état (16)

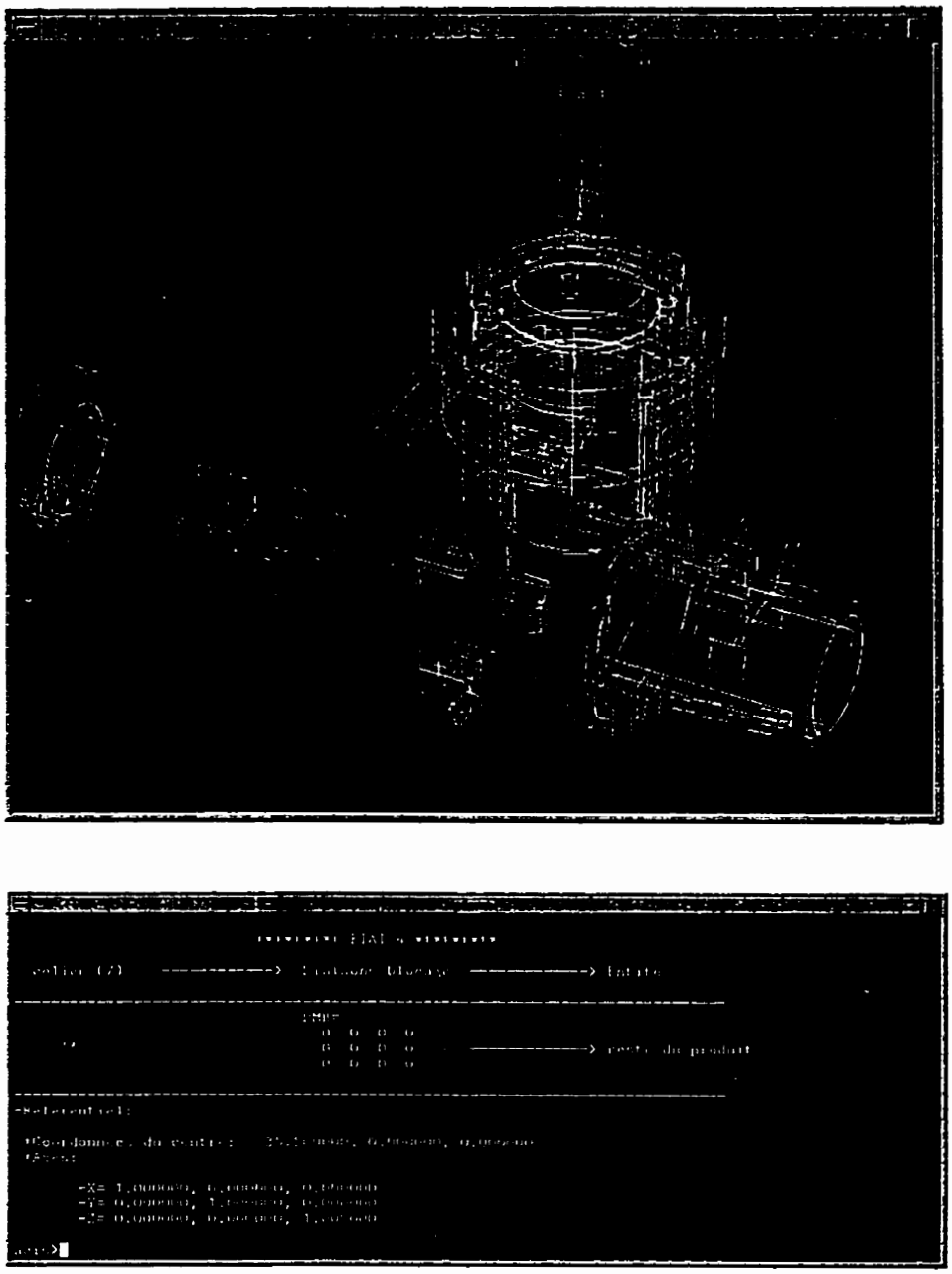


Figure 5.11. Liaisons de blocage relatives au colier (7) à l'état (4)

Ceci correspond aussi au passage de l'état (8) à l'état (10) sur la figure 5.5. Le deuxième exemple est relatif à l'opération d'assemblage des 6 vis (13) (passage de l'état (12) à l'état (14)). Finalement, le troisième exemple est relatif à l'opération d'assemblage du vilebrequin (6) (passage de l'état (4) à l'état (8)).

Dans le cas de la figure 5.12(a), l'opération d'assemblage est de type linéaire. Elle comprend une réalisation d'un prépositionnement de la chemise (2) dans la direction -z et d'un procédé de serrage sur la sous-face de contact # 3 relative à la même pièce. Sur la figure 5.12(a) , nous montrons également les valeurs maximale et minimale du serrage. Elles sont identifiées à partir de la condition fonctionnelle associée au procédé. Nous les avons calculées à partir des tolérances propres aux diamètres des faces originaires de la paire de sous-faces de contact. Ces valeurs sont utiles lors du calcul de la force nécessaire à la réalisation du serrage.

L'opération d'assemblage # 16 (figure 5.12(b)) est du type combinée, car elle intervient sur le groupe de six vis (14). Les caractéristiques relatives à l'opération sont cependant décrites comme s'il s'agissait d'une seule opération, vu la similitude de réalisation des phases relatives à l'assemblage de chaque pièce du groupe. Cette opération comprend un prépositionnement dans la direction -z et l'application d'un procédé de vissage accompagné d'un serrage. Sur la figure 5.12(b), nous identifions aussi les caractéristiques propres à la réalisation de chaque type de procédé. Dans le cas du vissage, elles concernent le pas et le sens de rotation. Dans le cas du serrage, elles concernent le couple de serrage appliqué. De tels paramètres peuvent être utilisés par le préparateur lors d'une étude de faisabilité du procédé d'assemblage. On entre ces données durant la phase de modélisation des liaisons.

Finalement dans le cas de la figure 5.12(c), l'opération d'assemblage est caractérisée à l'aide d'une seule phase de prépositionnement, car aucune action technologique n'est

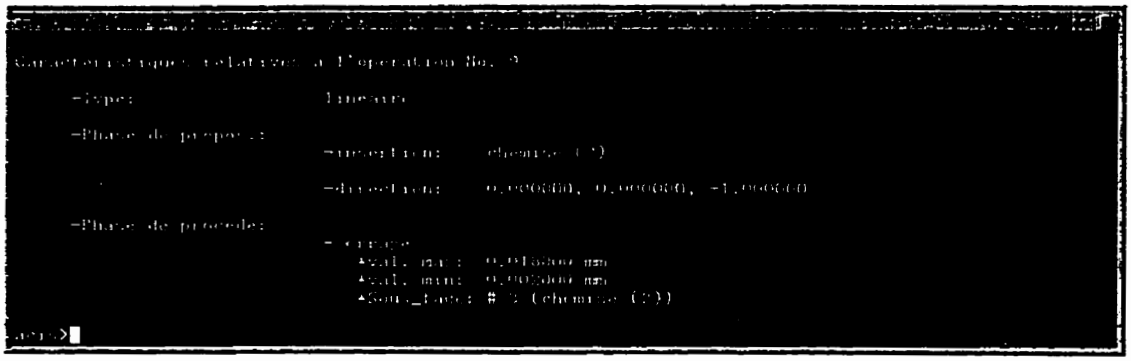


Figure 5.12. Caractéristiques relatives à différentes opérations d'assemblage

appliquée lors de l'assemblage du vilebrequin (6).

Cependant, le système devient complètement automatisé durant cette étape de modélisation. Ceci implique une possibilité d'exploiter les différentes procédures développées dans SCAP pour pouvoir les appeler directement par d'autres procédures.

C'est le cas lorsque d'autres fonctionnalités sont ajoutées au système. Mentionnons à titre d'exemple celles concernant la génération de la gamme et des ressources d'assemblage.

Tenant compte des observations précédentes, nous avons envisagé deux possibilités pour exécuter les différentes procédures développées dans SCAP:

1-Soit à partir de l'interface du Test-Harness. Dans ce cas, il est possible d'effectuer la recherche de différents types de caractéristiques d'assemblage, propres à chaque état, à l'aide de commandes appropriées. Chacune de ces commandes fait appel à une procédure assurant la réalisation de la tâche. Ceci s'effectue simultanément avec la visualisation d'une vue éclatée représentant les différentes entités composant l'état. Les exemples donnés sur les différentes figures, montrées aux chapitres trois et quatre, illustrent bien ce cas.

2-Soit à partir des fonctions membres associées à chaque classe d'objet ou d'attribut. Ceci a pour effet de permettre l'appel de ces procédures dans des programmes exécutés de façon indépendante aux commandes précédentes.

Cette façon de procéder correspond bien avec les fonctionnalités mise en oeuvre dans le modeleur ACIS™ . En effet, ce dernier permet à l'utilisateur de procéder de façon totalement similaire à celle décrite précédemment. Il en résulte une adaptation totale de SCAP avec la fonctionnalité générale du modeleur ACIS™ . Une telle adaptation a aussi

permis d'ajouter les fonctionnalités de SCAP à celles préexistantes dans le modeleur. Ce qui mène, en quelque sorte, à une extension de ce dernier pour **supporter la modélisation des assemblages**.

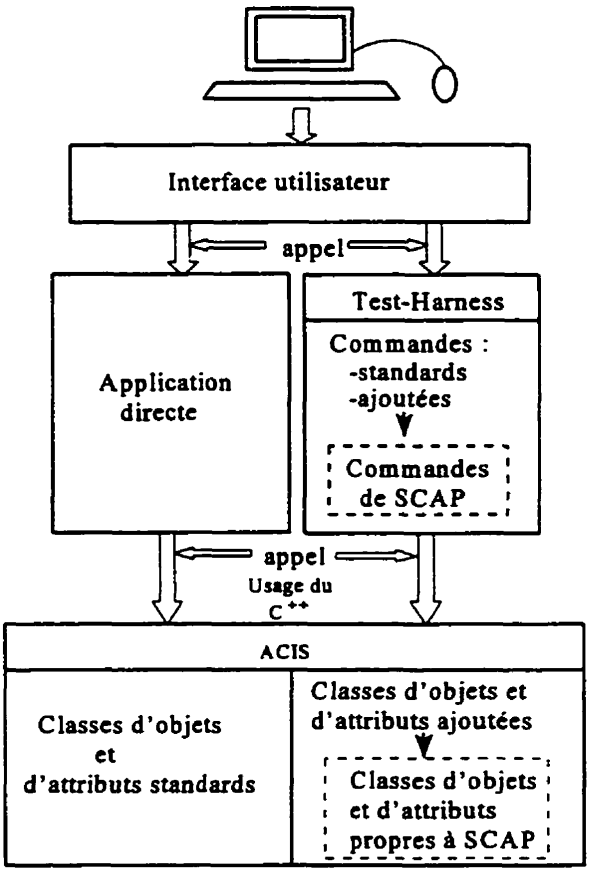


Figure 5.13. Fonctionnalité globale du modeleur ACIS™ résultante de l'intégration des fonctionnalités de SCAP au sein de sa structure

La fonctionnalité globale du modeleur ACIS™, résultante de son extension, est illustrée sur le schéma de la figure 5.13. Sur ce schéma, nous voyons bien les deux possibilités envisagées pour effectuer les différentes fonctionnalités. Nous voyons aussi une intégration totale de SCAP à la structure de données prévue dans ACIS™ . Ceci se fait, d'une part, à travers les classes d'objets et d'attributs ajoutées à celles préexistantes dans le modeleur et, d'autre part, à travers les commandes ajoutées sur l'interface du Test-

Harness. Ces dernières sont montrées dans le tableau 5.1. Une brève description est aussi donnée sur la fonctionnalité assurée par chacune des commandes montrées.

5.3-Limites actuelles

Dans l'état actuel d'avancement de la maquette, seules les faces de géométrie plane, cylindrique, sphérique et torique peuvent être traitées. L'extension des possibilités de traitement à d'autres types de surfaces (comme par exemple les surfaces coniques ou complexes) ne remettra en cause la démarche suivie pour la reconnaissance des caractéristiques d'assemblage (CA). Il suffit d'enrichir la structure de données de la maquette par d'autres procédures compatibles avec le traitement de chaque nouveau type de surface.

Au niveau des liaisons, l'évaluation des pseudo-matrices se fait actuellement par rapport au référentiel de base associé à un composant donné. Cependant, la mise en oeuvre d'autres critères de sélection d'un système de référence ne pose pas de difficulté particulière d'un point de vue algorithmique. Ceci résulte de la possibilité d'appliquer les mêmes principes de calcul en tenant compte des caractéristiques du nouveau référentiel.

Mentionnons aussi que les caractéristiques purement relationnelle et statique des pseudo-matrices ne permettent d'exprimer que des relations orthogonales entre objets ou groupes d'objets. Ces relations conviennent donc mieux pour le traitement des opérations faisant intervenir des mouvements rectilignes dans les directions principales d'un système orthonormé. Notre démarche de modélisation a été cependant adoptée en fonction de ce principe. Mais ceci n'exclut pas son extension pour supporter des opérations d'assemblage faisant intervenir des mouvements combinant plusieurs directions. Ceci revient à exploiter l'algorithme de détection de la liaison de blocage pour étudier les possibilités de mouvement suite à un changement de position d'un composant après le

Tableau 5.1. Liste des commandes ajoutées sur l'interface du Test-Harness

1	Creer_Assemblage	Pour construire un assemblage à partir des modèles de composants
2	Generer_Modele_Piece	Pour générer le modèle homogène de chaque pièce à partir du fichier correspondant à son modèle solide
3	Creer_Instances	Pour créer des instances du même composant
4	Identifier_Sous_Assemblages	Pour sélectionner et agréger un sous-ensemble de composants dans la structure d'un sous-assemblage
5	Redifinir_Referentiels	Pour redéfinir les référentiels des composants suite au choix des récepteurs
6	Modeliser_Liaisons_ Sous_Faces	Pour modéliser les liaisons au niveau des sous-faces de contact des pièces à l'état assemblé
7	Creer_GEP	Pour structurer interactivement le GEP
8	Visualiser_Etat	Pour visualiser la structure de chaque état
9	Chercher_Sous_ Faces_Contact	Pour identifier et visualiser les sous-faces de contact sur un composant à un état donné
10	Determiner_Sous_ Faces_Libres	Pour identifier et visualiser les sous-faces libres sur un composant à un état donné
11	Liaisons_Contact_ Composant	Pour identifier les caractéristiques des liaisons de prépos. et fonct. sur un composant à un état donné
12	Liaisons_Blocage Composant	Pour déterminer les caractéristiques des liaisons de blocage sur un composant à un état donné
13	Carac_Operation _Assemblage	Pour identifier les caractéristiques d'une opération d'assemblage

parcourt d'une certaine distance dans une direction donnée.

5.4-Conclusion

Dans ce cinquième chapitre, nous avons matérialisé les différentes étapes du processus du modélisation sous la forme de fonctionnalités assurées à SCAP. Une maquette logicielle a été donc mise en oeuvre afin de valider:

- la construction du produit,
- l'entrée de plusieurs types de caractéristiques technologiques et fonctionnelles qui ne peuvent pas être supportées directement par le modeleur solide,
- la recherche des caractéristiques d'assemblage aux différents états du produit.

A l'aide de cette maquette, nous avons validé le modèle proposé sur deux produits mécaniques: un bobinoir (14 pièces) et un micro-moteur (15 pièces).

Les étapes nécessitant une intervention de l'utilisateur sont celles qui ont pris le plus de temps. Par exemple, la génération des différents modèles de pièces a pris presque 35 minutes, dans le cas du micro-moteur, et 20 minutes, dans le cas du bobinoir. Il est cependant clair que ce temps est lié, d'une part, à l'interactivité associée à la réalisation de ces tâches (rapidité de l'opérateur au clavier, recherches des faces sur les pièces, choix d'un procédé d'assemblage, etc.) et, d'autre part, à la complexité des formes et au nombre de pièces du produit.

D'un autre côté, dans le cas du micro-moteur, le système a pris 112 secondes de temps CPU pour construire et modéliser les liaisons sur 72 sous-faces de contact. Ce qui a nécessité l'isolation de 36 régions d'intersection entre les faces. Cependant, ce temps n'est pas long vis-à-vis de la complexité en terme du nombre total de faces mis en jeu

pour ce produit (558 faces).

Par contre, dans le cas du bobinoir, le temps de traitement était relativement court; 48 secondes de temps CPU pour construire et modéliser les liaisons sur 64 sous-faces de contact. Cependant, ce produit comporte un nombre de pièces inférieur d'une unité à celui du micro-moteur. Ceci peut être justifié facilement par le nombre inférieur de faces relatif à ce produit (un nombre total de 136 faces).

Finalement, le système a montré une grande rapidité lors de la réalisation de plusieurs autres étapes. Par exemple, les sous-faces libres ou les liaisons de blocage sont déterminées en moins de 10s dans les cas extrêmes. Cela s'explique par l'automatisation poussée dans la réalisation de ces tâches.

La taille de mémoire utilisée était de 1.92 Mb, dans le cas du micro-moteur, et 937 Kb, dans le cas du bobinoir.

Ces résultats permettent d'envisager le traitement de produits comprenant une centaine de pièces, même si notre expérience se limite actuellement à une dizaine.

Mentionnons finalement que la prise en compte d'un volume d'informations important sur le modèle du produit démontre la pertinence de ce dernier en tant que contribution à l'étude de faisabilité d'un système de CFAO supportant la modélisation des assemblages. A cette fin, une étude de plusieurs produits industriels est prévu dans la suite du projet. Une telle étude vise spécifiquement à établir un lien direct entre les performances du système et le nombre de pièces du produit.

CHAPITRE 6
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

6.1-Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans une démarche de modélisation des produits mécaniques. Il comprend une formalisation permettant l'établissement d'un modèle de produit par un support informatique compact et efficace. Ce modèle vise aussi à supporter le cycle d'élaboration du produit suivant les objectifs de l'ingénierie simultanée. De tels objectifs souffrent aujourd'hui d'une évolution qui les a longtemps considérés séparément.

Le problème de détermination de la gamme et des ressources d'assemblage est complexe, le modèle requiert à la fois une bonne modélisation des composants, de leurs liaisons et une prise en compte d'un ensemble d'informations géométriques, technologiques et fonctionnelles. Ce modèle doit aussi assurer la modélisation dynamique du produit à travers la recherche des caractéristiques d'assemblage pour tous ses états admissibles.

Dans le premier chapitre, nous avons détaillé, au travers d'un état de l'art, les éléments caractéristiques des activités composant le cycle d'élaboration du produit. L'activité de modélisation du produit est apparue comme interface entre la phase de conception et de préparation à l'assemblage. Les différentes étapes subséquentes sont les résultats de cette activité. Ceci permet d'envisager leur automatisation.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés de manière plus précise à l'activité de préparation à l'assemblage. Nous avons au début défini l'objectif général de son automatisation et discuté des besoins spécifiques impliqués par une approche

d'ingénierie simultanée. Nous avons ensuite mis en évidence les éléments caractéristiques qui interviennent sous forme d'entrées dans la prise de décision lors de cette activité, défini les éléments qui doivent apparaître en sortie de cette activité et établi les règles objectives qui peuvent être utilisées pour traduire les entrées en sortie. Ceci nous a mené à définir notre objectif de recherche pour proposer un modèle de produit capable de supporter d'une manière efficace le processus d'assemblage d'un produit. Un tel objectif était à l'origine des limitations des modèles proposés dans la littérature. Ces limitations concernent spécifiquement :

- la modélisation des liaisons de façon, d'une part, à tenir compte d'un ensemble d'informations technologiques et fonctionnelles et, d'autre part, à pouvoir modéliser le comportement des pièces déformables,
- la modélisation du produit uniquement à partir de l'état assemblé. Cette démarche leur a imposé de nouvelles limitations tant au niveau de caractéristiques pouvant être déduites, qu'au niveau de la recherche des caractéristiques d'assemblage propres aux états a posteriori de la génération de la gamme d'assemblage.

Dans le troisième chapitre, nous avons détaillé au départ les différentes étapes de la définition de la structure hiérarchique du produit. Ceci a comme base la définition des modèles homogènes de pièces. Ces modèles incorporent les données topologiques, géométriques et technologiques caractérisant la plupart des composants industriels. Basé sur cette structure hiérarchique, nous avons décrit une méthodologie de reconnaissance des caractéristiques relatives aux liaisons. Une telle méthodologie permet d'établir un lien fonctionnel entre la géométrie et les procédés d'assemblage au niveau des sous-faces de contact sur les pièces. Il en résulte une hiérarchie permettant le passage du niveau des liaisons relatives aux sous-faces de contact, pour la déduction successive des liaisons relatives aux pièces, puis aux sous-assemblages. Une mathématique basée sur les opérations logiques est mise en jeu dans cette méthodologie. Elle a permis d'envisager

une approche de modélisation automatisée et divisée en deux temps. Un premier temps où s'effectue la recherche des caractéristiques de liaisons établies sur l'ensemble des sous-faces de contact des pièces à l'état assemblé. Un deuxième temps où s'effectue la recherche des liaisons établies à chaque état par la comparaison de la structure de ce dernier à celle de l'état assemblé.

Nous avons montré dans le quatrième chapitre comment s'effectue le processus de la modélisation dynamique du produit. A cette fin, nous avons proposé au début un modèle de la gamme d'assemblage. Ce modèle assure l'intégration des états au modèle du produit et la mise en évidence de la chronologie de leurs apparitions suite aux différentes opérations d'assemblage appliquées. Nous avons ensuite détaillé les différentes procédures permettant la recherche de plusieurs types de caractéristiques d'assemblage. De nombreux objectifs peuvent ainsi être atteints par le préparateur à l'assemblage . Ils permettent à ce dernier la formalisation continue de décisions autorisant la poursuite du processus d'assemblage.

La description d'une maquette logicielle sur le Système de Caractéristiques d'Assemblage de Produits (SCAP) a été abordée dans le cinquième chapitre. Ce système assure la réalisation du modèle proposé dans cette thèse. Ses différentes fonctionnalités ont été assurées en l'intégrant complètement au sein de la structure du modeleur solide ACIS™. À l'aide de ce système, nous avons testé deux produits industriels: un micro-moteur et un bobinoir. L'examen des résultats a montré comment la méthodologie de définition et d'extraction des caractéristiques d'assemblage, décrite dans les chapitres précédents, pouvait être efficacement atteinte.

Les contributions originales de ce travail peuvent être résumées autour des axes suivants:

La modélisation homogène de la structure du produit : nous avons démontré au cours

de cette recherche, l'importance d'un modèle riche en informations pour l'étude de l'assemblage. Cette remarque nous a conduit:

- à définir et à utiliser une structure hiérarchique représentant d'une manière homogène les informations topologiques, géométriques et technologiques relatives aux pièces. Ceci s'effectue cependant tout en permettant d'éviter une redondance au niveau de la définition de ces informations,
- à modéliser les liaisons entre les pièces du produit de façon à établir un lien fonctionnel entre la géométrie et les procédés d'assemblage au niveau de leurs sous-faces de contact. Ce traitement a permis de tenir compte d'une partie essentielle des informations technologiques. Il a aussi mené:
    - à la modélisation du comportement des pièces déformables à partir d'une seule représentation sur le modèle de produit
    - à l'automatisation du processus déductif des liaisons aux niveaux des pièces et des sous-assemblages.

L'intégration des états au modèle de produit: Cette démarche de modélisation constitue une grande originalité du travail de recherche proposé dans cette thèse. Elle correspond à la définition d'une vue "assemblage" sur le modèle issu de la conception. Dans cette vue, le processus concourant de conception et d'assemblage devient évident. Il en résulte:

- une mise en évidence de l'impossibilité de matérialiser le produit si le passage par ses états intermédiaires s'avère irréalisable,
- un élargissement du champs d'action derrière la définition du modèle du produit, pour supporter la recherche des caractéristiques d'assemblage à chaque étape du processus d'assemblage. Cette observation était cependant à l'origine des différents traitements proposés dans cette thèse pour assurer la modélisation dynamique du produit. Elle a mené à pouvoir déterminer les sous-faces libres sur

les pièces; une tâche qui s'avère impossible en assurant la modélisation du produit uniquement à partir de l'état assemblé. Elle a aussi ouvert la voie à plusieurs fonctionnalités supplémentaires telles que:

- l'évaluation de l'accessibilité par les préhenseurs aux sous-faces libres sur les pièces,
- l'évaluation des séquences et la détermination des ressources a posteriori de la génération de la gamme d'assemblage.

Mentionnons finalement que nous avons élaboré, à l'aide d'un langage de programmation des plus génériques, une maquette logicielle qui combine, d'une part, une interactivité nécessaire à l'enrichissement du modèle sur l'ensemble des informations issues de la phase de conception et ne pouvant pas être supportées par le modeleur solide et, d'autre part, une automatisation poussée lors de la recherche des caractéristiques d'assemblage pour les différents états. Cette maquette logicielle répond alors dans les grandes lignes aux besoins d'un système de préparation à l'assemblage automatisé et intégré pour l'ingénierie simultanée.

6.2-Perspectives

Nous concluons cette étude en précisant les perspectives de recherche portant sur l'interfaçage du modèle avec les autres activités du cycle d'élaboration d'un produit, notamment:

La génération de la gamme et des ressources d'assemblage qui, ainsi que nous l'avons traité en détail au chapitre quatre, peut se baser sur les fonctionnalités développées dans le modèle. Il en résulte une formalisation continue de décisions tout au long des traitements associés à cette activité.

La (re)conception des produits en vue de l'assemblage qui peut utiliser la structure de données utilisée dans la maquette afin d'optimiser le processus d'élaboration du produit. A titre d'exemple, les différentes alternatives de la gamme offrent la possibilité de regrouper certains composants dans de nouveaux sous-assemblages, la détermination des directions d'insertion permet de modifier la gamme pour minimiser le nombre de retournements du produit, l'analyse du récepteur et la détermination de ses surfaces de prise et de pose permettent de juger la qualité de positionnement, etc. Cependant, les répercutions des modifications sur le modèle du produit doivent être prises en compte sans entraîner nécessairement une nouvelle modélisation de ce dernier.

La fabrication qui est basée sur une analyse du modèle, topologique et géométrique de chaque pièce, et sur une interprétation du relationnel technologique entre faces (appartenant cette fois à la même pièce). La richesse des modèles homogènes de pièces correspond bien aux besoins de cette activité. Nous pouvons envisager l'extension de la maquette par sa liaison directe avec un module d'extraction des caractéristiques d'usinage. Ce dernier assure aussi une intégration des différentes fonctions relatives au séquencement des opérations et au choix des procédés de fabrication.

La cotation du produit qui, comme nous l'avons mentionné au chapitre deux, s'effectue à partir de l'analyse des conditions fonctionnelles et de montage entre les composants du produit. Le deuxième facteur repose essentiellement sur l'identification des caractéristiques relatives aux sous-faces de contact sur les composants. Une tâche qui est directement supportée dans la maquette. Cette dernière assure aussi la préservation de la sémantique nécessaire pour l'intégration des tolérances aux modèles des pièces.

Notons finalement que les propositions formulées, dans ces paragraphes, montrent clairement une facilité d'intégration du modèle proposé dans cette thèse à un système global supportant les différentes activités du cycle d'élaboration de produit. A l'aide de

ces propositions, nous formulons aussi des souhaits très vifs concernant les nouvelles idées que cette thèse saura faire naître chez le lecteur.

RÉFÉRENCES

[ABE-91] ABELS, S. et THIM, C. (1991). Design of an automated assembly environment. Computer Aided Design, 561-569.

[AFN-82] FERNAND NATHAN/AFNOR (1982). La construction mécanique, tome 1: dessin, conception, normes. CEP Edition, Paris.

[AND-83] ANDREASEN, M. M., KAHLER, S. et LUND, T. (1983). Design for assembly. Traduction anglaise de "Montageteknik", IFS Publications, Kempston, Bedford.

[BJO-90] BJORKMAN, M. et EKDAHL, B. (1990). Computer based cost analysis and calculating model. Proc. of the 8th Int. Conf. on Assembly Automation, Copenhagen, Denmark, 348-351.

[BON-91] BONESCHANSCHER, N. et HEEMSKERK, C. J. M. (1991). Grouping parts to reduce the complexity of assembly sequence planning. INCOM'91, 287-292.

[BOO-83] BOOTHROYD, G. et DEWHURST, P. (1983). Design for assembly. Departement of Mechanical Engineering, University of Massachustes.

[BOO-94] BOOTHROYD, G. et DEWHURST, P. (1994). Product design for manufacture and assembly. Ed. Marcel Dekker, New York.

[BOU-84] BOURJAULT, A. (1984). Contribution à une approche méthodologique de l'assemblage automatisé: élaboration automatique des séquences opératoires. Thèse d'état, Université de Besançon, Franche-Comté.

[BOU-87] BOURJAULT, A. (1987). Détermination des sous-assemblages d'un produit à partir des séquences temporelles d'assemblage. APII, 21, 117-127

[BOUR-91] BOURDET, P., REMY-VINCENT, J. et SCHNEIDER, F. (1991). Tolerance analysis in manufacturing. C.I.R.P. Int. Working Seminar on

Computer-Aided Tolerancing. Penn State University, 16-17.

[CAS-94] CASE, K. (1994). The implementation of a feature-based component representation for CAD/CAM integration. Journal of Engineering Manufacture. Part B, 208, 71-80.

[CHA-88] CHANG, K.H. et WEE, W.G (1988). A knowledge-based planning system for mechanical assembly using robots. IEEE Expert, 3, 18-30.

[CHAN-88] CHANDRU, V., KLUG, J. J. et VENKASTESAN, R. (1988). Perces's gripes: a robot grasp planner. Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, 4, 369-377.

[CHAP-90] CHAPPE, D. et BOURJAULT, A. (1990). Une méthodologie de détermination de l'organisation d'un atelier d'assemblage. Contribution to: afcet. congrès automatique. Grenoble.

[CHE-93] CHEN, C.L.P. (1993). An integration of neural network and rule-based systems for design and planning of mechanical assemblies. IEEE Transactions on Systems. Man. and Cybernetics, 23, 1359-1371.

[CUT-92] CUTKOSKY, M. R., TENENBAUM, J. M. et BROWN, D. R. (1992). Working with multiple representations in a concurrent design system. Journal of Mechanical Design, 114, 515-524.

[DEF-87] DE FAZIO, T. L. et WHITHNEY, D. L. (1987). Simplified generation of all mechanical assembly sequences. Proc. of the Int. Conf. on Robotics and Automation, 640-658.

[DEF-93] DE FAZIO, T.L. et al. (1993). A Prototype of feature-based design for assembly. Journal of Mechanical Design, 115,723-734.

[DEL-91] DELCHAMBRE, A. (1991). Knowledge-based process planning and line design in robotized assembly. Proceedings of the 1991 SPIE Applications of Artificial Intelligence IX, 367-378.

[DEL-92] DELCHAMBRE, A. (1992). An industrial prototype of knowledge-based assembly planner. Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and

Automation, 2404-2411.

[DEN-93] DENEUX, D. (1993). Méthodologie de reconnaissance des caractéristiques d'usinage. Contribution à l'ingénierie simultanée. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes.

[DER-91] DESROCHERS, A. (1991). Modèle conceptuel du dimensionnement et du tolérancement des mécanismes. Représentation dans les systèmes CFAO. Thèse de doctorat, École Centrale de Paris.

[DIN-93] DINI, G. (1993). A module for the automated planning of grasps in robotized assembly operations. Annals of the CIRP, 1.

[DUB-92] DUBEY, A. et NNAJI, O.B. (1992). Task-oriented and feature-based grasp planning. Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, 9, 471-484.

[FIG-90] FIGOUR, J. et VERDERBOUT, E. (1990). Simulating part flow in automated assembly. Assembly Automation, 97-100.

[GLO-85] LEE, G. et GLOSSARD, D.C. (1985). A hierarchical data structure for representing assemblies: part 1. Journal of CAD, 17, 15-19.

[GU-88] GU, P. H. et ELMARAGHY, H. A. (1988). Expert tolerancing consultant for geometric modelling. Proc. of Manufacturing International 88 Symposium on Product and Process Design, 1.

[GUI-94] GUI, J. K. et MANTYLA, M. (1994). Functional understanding of assembly modelling. Computer Aided Design, 26, 435-451.

[HAB-88] HABRIAS, H. (1988). Le modèle relationnel binaire, méthode I. A. (NIAM). Editions Eyrolles.

[HEE-89] HEEMSKERK, C.J. et VAN LUTTERVELT, C.A. (1989). The use of heuristics in assembly sequence planning. The Annals of CIRP, 38, 37-40.

[HEN-89] HENRIOUD, J.-M. (1989). Contribution à la conceptualisation de l'assemblage automatisé: nouvelle approche en vue de la détermination des processus d'assemblage. Thèse en sciences physiques, Université de

Franche-Comté.

[HEN-92] HENRIOUD, J.-M. et BOURJAULT, A. (1992). Computer aided assembly process planning. Journal of Engineering Manufacture, Part B, 206, 61-66.

[HENS-93] HENSON, B.W., BAXTER, J. E. et JUSTER, N. P. (1993). Assembly representation within a product data framework. Proc. of the 19th ASME Design Automation Conference, Albuquerque, NM, 195-205.

[HOM-89] HOMEM DE MELLO, L.S. et SANDERSON, A.C. (1989). AND/OR graph representation of assembly plans. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 6, 188-189.

[HOM-90] HOMEM DE MELLO, L.S. et SANDERSON, A.C. (1990). Evaluation and selection of assembly plans. Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1588-1593.

[HOP-89] HOPCROFT, A.A.J. et ULLMAN, J. (1989). Structures de données et algorithmes. Ed. Addisson-Wesley Europe.

[HUA-91] HUANG, Y.F. et LEE, C.S.G. (1991). A framework of knowledge-based assembly planning. Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automatrion, 599-604.

[JAB-96a] JABBOUR, T., MASCLE, C. et MARANZANA, R. (1996). Modélisation d'un mécanisme par entités d'assemblage. Proceedings of the Symposium on Mechanics in Design, May 6-9, Toronto, 541-550.

[JAB-96b] JABBOUR, T., MASCLE, C. et MARANZANA, R. (1996). Représentation des caractéristiques d'assemblage d'un produit mécanique. Revue Internationale de la CFAO et d'Informatique graphique, 5, 545-566.

[JAB-97] JABBOUR, T., MASCLE, C. et MARANZANA, R. (1997). A data base for the representation of assembly features in mechanical products. The Special Issue of the International Journal of Comptational Geometry &

Applications (accepté pour publication).

[JEA-86] JEANNES, R. (1986). Méthodologie d'analyse des produits pour leur reconception en vue du montage automatisé. Thèse de doctorat de l'ENSAM.

[KAM-89] KAMATH, M. (1989). Analytic performance models for closed-loop flexible assembly systems. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 51-84.

[KIM-95] KIM, G. J. et SZYKMAN, S. (1995). Decision-based framework for exploring assembly configurations. CE95: Proc. of the Second Int. Conf. on Concurrent Engineering, Research and Applications, Mclean VA.

[KLE-91] KLEIN, C. M. et RHEE, H. K. (1991). An assembly sequence generation procedure. Computers and Industrial Engineering, 21, 63-66.

[KON-90] KONDO, K. (1990). Pigmod: parametric and interactive geometric modeller for mechanical design. Computer Aided Design, 22.

[LAP-91] LAPERRIÈRE, L. (1991). Automatic generation of a robotic assembly sequence. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 6, 299-316.

[LEE-90] LEE, S. et SHIN, Y.G. (1990). Assembly planning based on geometric reasonning. Computer & Graphics, 14, 237-250.

[LEE-92] LEE, S (1992). Backward assembly with assembly cost analysis. Proc. of the IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, 2382-2391.

[LEE-93] LEE, S. et CHUNSIK, Y. (1993). Subassembly stability and reorientation. Proc. of the IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, 521-526.

[LIN-93] LIN, A.C. et CHEN, T.C. (1993). 3D MAPS: three-dimensional mechanical assembly planning system. Journal of Manufacturing Systems. 12, 437-456.

[LIU-93] LIU, T.-H. et FISHER, G. W. (1993). An approach for PDES/STEP

compatible concurrent engineering solutions, in concurrent engineering: tools and technologies for mechanical system design. Springer-Verlag, 443-464.

[LOT-86] LOTTER, B. (1986). Machines that combine the manufacture of parts with assembly. Assembly Automation, 2. 29-35.

[LOZ-93] LOZANO-PÉREZ, T., et WILSON, R. H. (1993). Assembly sequencing for arbitrary motions. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Atlanta, GA, 527-532.

[MAG-90] Maguet, P. (1990), The economic design of assembly process. Assembly Automation, 4, 29-35.

[MAR-87] MARKS, P. (1987). What do solids Need. Machine Design No 12.

[MAS-90] MASCLE, C. (1990). Approche méthodologique de détermination de gammes par le désassemblage. Thèse de doctorat ès sciences, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

[MAS-94] MASCLE, C., DUPINET, É. et MARANZANA, R. (1994). Feature modeling in assembly planning. Proc. of the IFIP International Conference, 2, 605-625.

[MAS-97] MASCLE, C., JABBOUR, T. et MARANZANA, R. (1997). Assembly features for mechanical product data. Proc. of the 1997 IEEE Int. Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP'97): Towards Flexible and Agile Assembly and Manufacturing, August 7-9, California, 218-223.

[MASU-89] MASUDA, H., SHIMADA, K., NUMAO, M. et KAWABE, S. (1989). A mathematical theory and application of non-manifold geometric modelling. Symposium International du GI-IFIP, Berlin, RFA.

[MAT-90] MATTIKALLI, R. et KHOSLA, P. (1990). Subassembly identification and motion generation for assembly: a geometrical approach. Proc. IEEE Int. Conf. on Systems Engineering, 399-403.

[MIL-89] MILBERG, J. et DIESS, H. (1989). Assembly simulation: an efficient tool for assembly-oriented design. Annals of CIRP.

[MILL-91] MILLS, B. (1991). Variation analysis applied to assembly simulation. Assembly Automation, 8, 41-44.

[NGO-96] NGOI, B. K. A. et TAN, K. C. K. (1996). Tolerance stack analysis for assembly. Journal of Engineering Manufacture Part B, 279-289.

[NIE-92] NIEMINEN, J., KANEVRA, J. et MANTYLA, M. (1992). Feature based design of joints. Symposium International du GI-IFIP, Production Technolgy Center, Berlin.

[PHA-88] PHAM, D. T. et YEO, S. H. (1988). A knowledge-based system for robot gripper selection: criteria for choosing grippers and surfaces for gripping. Int. Journal of Mach. Tools & Manufact., 28, 301-313.

[PRI-96] PRINZ, M., LIU, H.-C., NNAJI, B. O. et LUETH, T. (1996). From CAD-based kinematic to automated programming. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 12, 99-109.

[RAJ-96] RAJAN, V.N. et NOF, S. Y. (1996). Minimal precedence constraints for integrated assembly and execution planning. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12, 175-186.

[RED-94] REDDY, G.B. (1994). An integrated approach for assembly process planning using solid models. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal.

[REQ-91] REQUICHA, A. A. G. et Whalen, T. W. (1991). Representations for assemblies in computer-aided mechanical assembly planning. L. S. Homem de Mello and S. Lee Eds., Kluwer Academic Publishers, CA, 15-39.

[ROM-96] ROMMEY, B. (1996). Atlas: An automatic assembly sequencing and fixturing system. http://robotics.stanford.edu/users/assembly.

[ROTH-82] ROTH, K. (1982). Konstruiren mit konstructions katalogen. Springer-

Verlag. IMT-EPFL.

[SAN-92a] SANTOCHI, M. et DINI, G. (1992). Computer-aided planning of assembly operations: the selection of assembly sequences. Robotics & Computer Integrated-Manufacturing, 9, 439-446.

[SAN-92b] SANTOCHI, M. et DINI G. (1992). Automated sequencing and subassembly detection in assembly planning. Annals of the CIRP, 41, 1-5.

[SEI-91] SEIDEL, U. A. (1991). Operation networks for coordinated DFA and sequence planning. 10th International Conference on Assembly Automation, 11-29.

[SHA-92] SHAH, J.J. et TADEPALLI, R. (1992). Feature-based assembly modelling. Computers in Engineering, 1, 253-260.

[SHA-93] SHAH, J. J. et ROGERS, M. T. (1993). Assembly modeling as an extension of feature-based design. Computer Aided Design, 26, 85-97.

[SKU-91] SKUDELNY, H. (1991). Contribution to ASIM Congress 07-08.03 in Hannover. 83-100.

[SOD-91] SODHI, R. et TURNER, J. U. (1991). Representing tolerance and assembly information in a feature based design environment. Proc. 1991 ASME Design Automation Conference, 157-174.

[SUG-94] SUGIMARA, N. et MORIWAKI, T. (1994). A study on product model for design and analysis of mechanical assemblies based on STEP. Proc. of the Japan-USA Symposium on Flexible Automation. July 11-18. Kobe. Japan, 495-498.

[TAK-91] TAKAHASHI, K., SUZUKI, H. et KIMURA, F. (1991). Tolerance analysis in machine assembly by classifying part contact state. C.I.R.P. Int. Working Seminar on Computer-Aided Tolerancing". Penn State University, 16-17.

[TEM-85] TEMANI, M. (1985). Contribution à la modélisation des processus d'assemblage: élaboration automatique des gammes. Thèse de 3ème cycle.

[THO-95] THORTON, A. C. et LEE, D. J. (1995). Key characteristics for agile product development and manufacturing. Proc. of the 4th Annual Agility Forum.

[THU-94] THU-HUA, L. et GARY, F. W. (1994). Assembly evaluation method for PDES/STEP-based mechanical systems. Journal of Design and Manufacturing, 4, 1-19.

[TUR-92] TURNER, J. U. et SUBRAMANIAM (1992). Constraint representation and reduction in assembly modeling and analysis. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 8, 741-750.

[VAN-96] VAN HOLLAND, W. et BRONSVOORT (1996). Assembly features and sequence planning. Proc. of the 5th IFIP Workshop on Geometric Modeling in CAD, May 19-23.

[VEN-93] VENUVINOD, P. K. (1993). Automated analysis of 3-D polyhedral assemblies: assembly directions and sequences. Journal of Manufacturing Systems, 12, 246-252.

[VOS-90] VOSNIAKOS, G.-C. et DAVIES, B. J. (1990). Knowledge-based automatic allocation of CAD drawing annotation to wireframe IGES models of 21/2-D prismatic parts. Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology, 5, 224-239.

[WAN-93] WANG, N. et OZSOY, T.M. (1993). Automatic generation of tolerance chains from mating relations represented in assembly models. Journal of Mechanical Design, 115, 757-761.

[WHI-88] WHITNEY, D. E., BALDWIN, D.F., ABEL, T.E., LUI, M-C M. et DE FAZIO, T.L. (1988). An integrated computer aid for generating and evaluating assembly sequences for mechanical parts. Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 78-94.

[WHI-96] WHITNEY, D. E. (1996). The potential for assembly modeling in product development and manufacturing.

http://web.mit.edu/ctpid/www/whitney/papers.html.

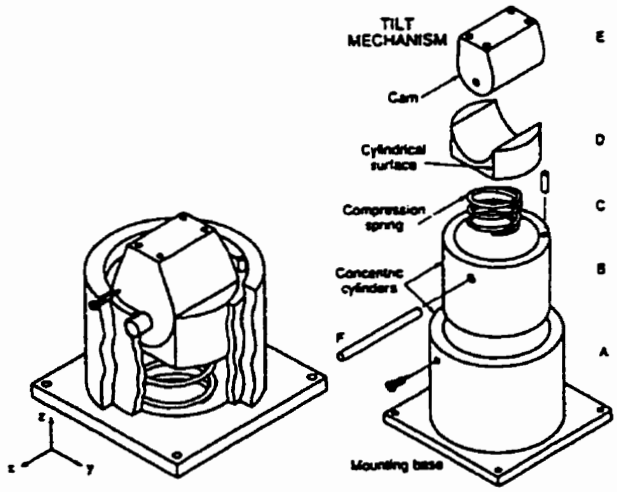
[WIL-94] WILSON R. H., et LATOMBE, J.-C. (1994). Geometric reasonning about mechanical assembly. Artificial Intelligence, 71, 371-396.

[WOL-91] WOLTER, J.D. (1991). A combinatorial analysis of enumerative data structures for assembly planning. Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 611-618.

[WOO-89] WOO, T. C. et LEE, W.-J. (1989). Optimum selection of discrete tolerances. Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Transactions of the ASME, 111.

Annexe A

EXEMPLES TIRÉS DE LA LITTÉRATURE



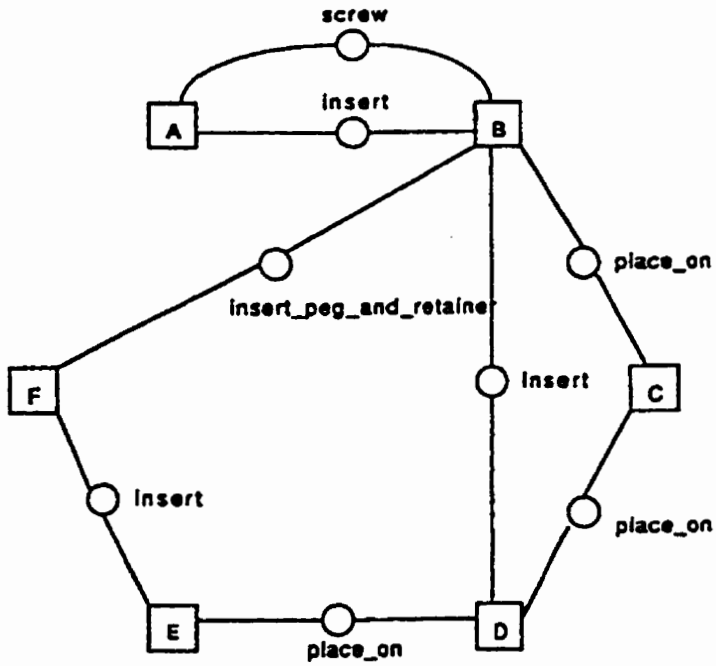
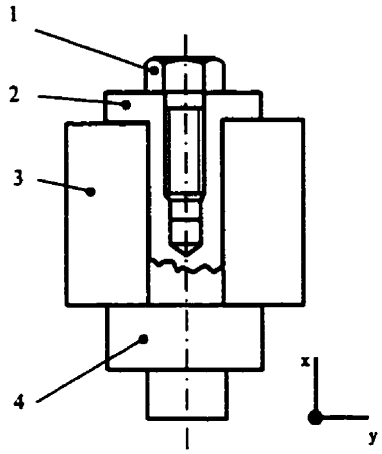


Figure A1. Graphe de liaisons du *TILT MECHANISM* [HUA-91]



$$A_x = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{array}$$

INTERFERENCE MATRIX

$$B_x = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array}$$

CONTACT MATRIX

$$C_x = \begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

CONNECTION MATRIX

Figure A2. Exemple d'un produit et de ses matrices d'interférence, de contact et de connection dans la direction x [SAN-92b]

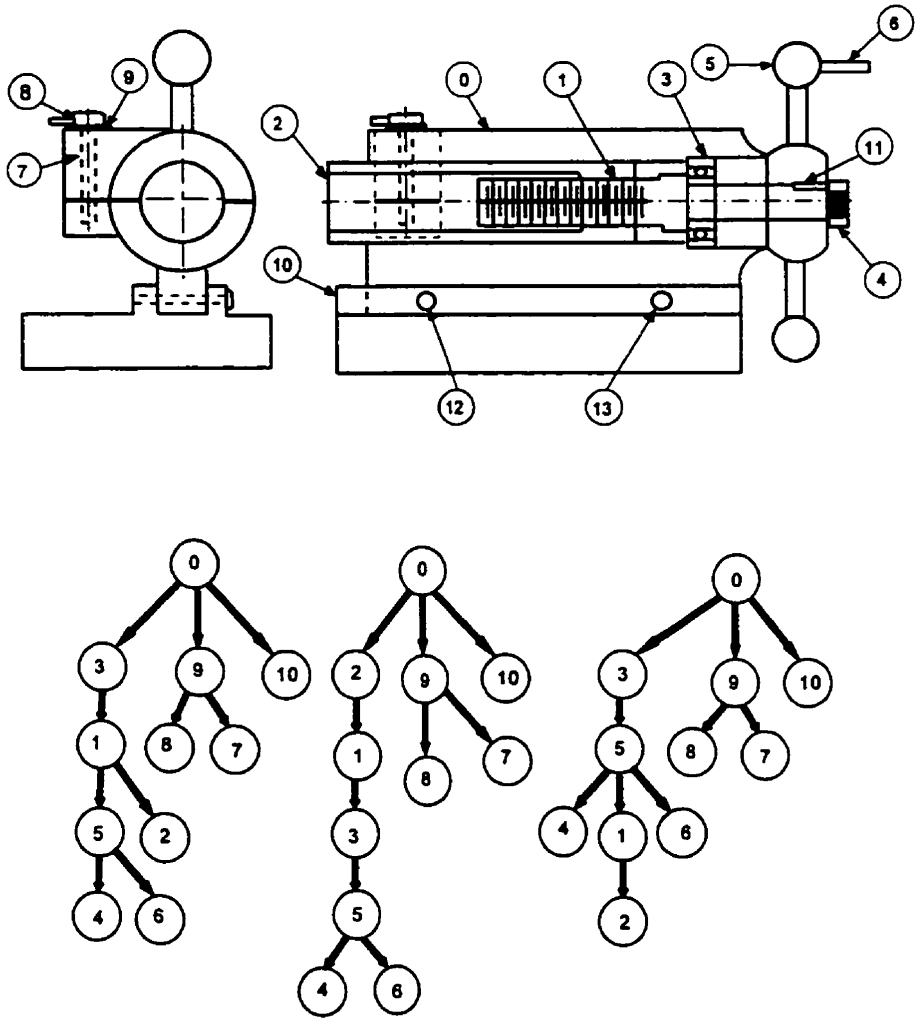


Figure A3. Trois ensembles de relations de précédence sur l'assemblage montré [LIN-93]

Note: la clavette 11, les vis 12 et 13 ne sont pas prises en compte dans l'analyse du processus d'assemblage du produit.

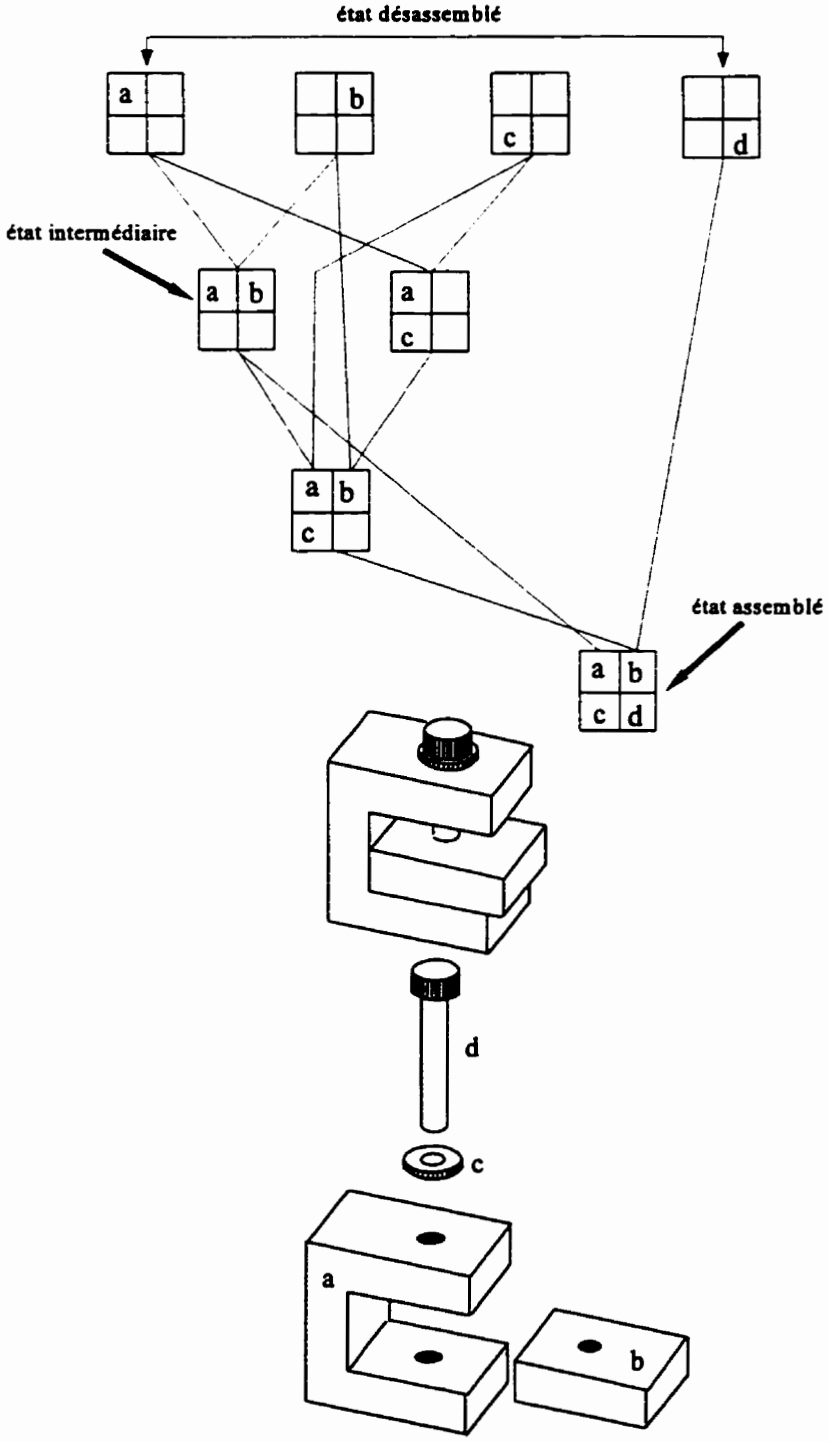


Figure A4. Graphe des séquences d'assemblage (*Assembly Sequence Graph)* pour l'exemple de produit montré [RED-94]

Mid-level commands	M	T	R	Grasp type	Gripper type
place(onto)	0	0	0	lateral	parallel jaw
place(over)	0	0	0	lateral	parallel jaw
place(besides)	0	0	0	lateral	parallel jaw
drop(into)	1	0	0	precision	3 finger
drop_insert(into)	1	0	0	precision	3 finger
push_inser(into)	2	0	0	precision	2 finger
screwR(into)	1	0	0	precision	3 finger
screwL(into)	1	0	0	precision	3 finger
flip	0	0	0	lateral	parallel jaw
turn 1	0	0	1	lateral	parallel jaw
turn 2	0	2	0	encompass	dextrous
hold	0	0	0	lateral	parallel jaw
hold(against)	0	0	0	lateral	parallel jaw
remove	0	0	0	lateral	parallel jaw
pull(tool)	0	1	0		

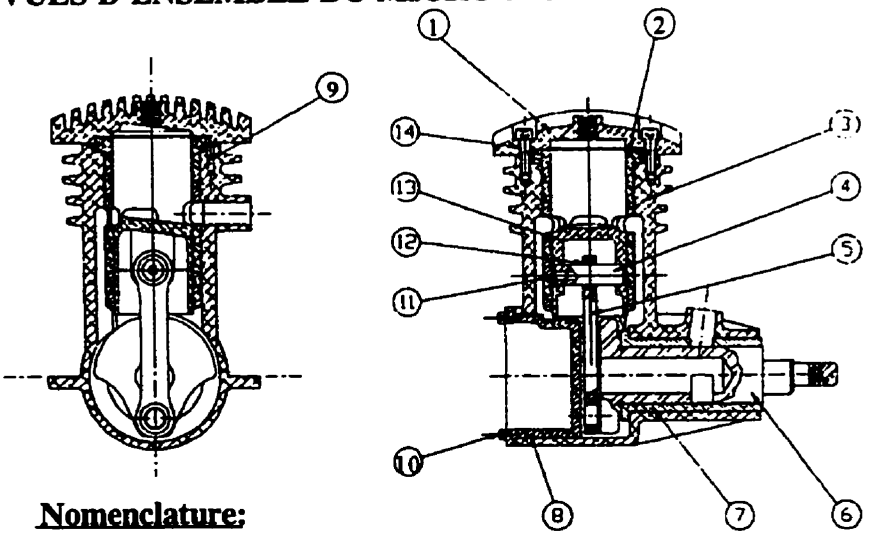
Figure A5. Listes de préhenseurs recommandés dans RALPH[DUB-92]

NO.	PROPOSITION
1	THE AREA OF THE SURFACE IS LARGE
2	THE AREA OF THE SURFACE OF INTERSECTION IS LARGE
3	THE SLENDERNESS OF THE SURFACE IS SMALL
4	THE SLENDERNESS OF THE SURFACE OF INTERSECTION IS SMALL
5	THE MUTUAL ORIENTATION OF THE SURFACE IS CORRECT
6	THE DISTANCE BETWEEN THE SURFACES IS SMALL
7	THE DISTANCE OF THE SURFACES FROM THE CENTROID OF THE OBJECT IS SMALL
8	THE ORIENTATION OF THE SURFACES WITH RESPECT TO THE DIRECTION OF THE GRAVITY VECTOR IS CORRECT
9	THE DISTANCE OF THE SURFACES FROM THE ASSEMBLY AXIS IS SMALL
10	THE ORIENTATION OF THE SURFACES WITH RESPECT TO THE DIRECTION OF THE ASSEMBLY IS CORRECT
11	THE SURFACE FINISH IS CORRECT

Figure A6. Propositions tirées de [DIN-93] pour l'optimisation de la configuration de saisie d'un composant

Annexe B

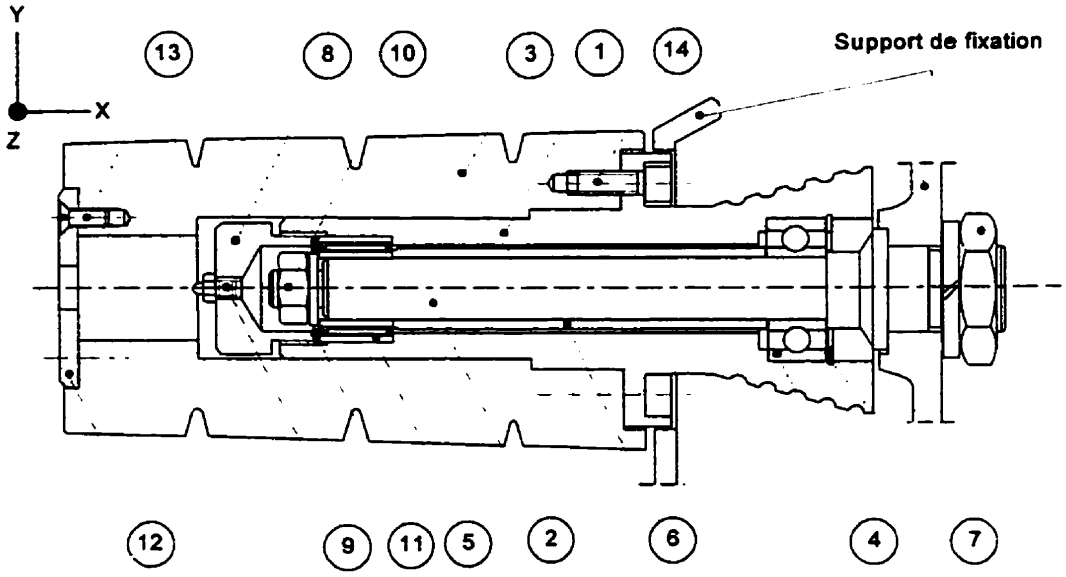
VUES D'ENSEMBLE DU MICRO-MOTEUR ET DU BOBINOIR



Nomenclature:

Numéro de position	Nombre	Nom de la pièce
1	1	tête du bloc
2	1	chemise
3	1	bloc moteur
4	1	axe du piston
5	1	bielle
6	1	vilebrequin
7	1	colier
8	1	bouchon
9	1	goupille
10	4	vis M2*0.4*10
11	2	bouchon d'axe
12	2	bague
13	1	piston
14	6	vis M3.5*0.6*12

Figure B1. Plan d'ensemble de montage et nomenclature du micro-moteur



Nomenclature

Numéro de position	Nombre	Nom de la pièce
1	1	tambour
2	1	axe
3	1	cône
4	1	roulement de droite
5	1	roulement de gauche
6	1	entretoise
7	1	circlips
8	1	bouchon
9	1	lubrificateur
10	1	écrou
11	1	rondelle
12	1	couvercle
13	4	vis C M 10-50
14	4	vis CHc M 12-90

Figure B2. Plan d'ensemble de montage et nomenclature du bobinoir

Annexe C
NOTIONS GÉNÉRALES DU FORMALISME NIAM

NIAM [HAB-88] est un acronyme signifiant *Nijsen Information Analysis Method.* Le formalisme NIAM est un outil d'analyse d'informations dont le but est de permettre à l'utilisateur de créer facilement la structure, parfois complexe, d'une base de données.

Dans le formalisme NIAM, un objet est représenté par un cercle plein, un attribut par un cercle pointillé. Une relation est symbolisée par un lien muni d'une boîte comportant deux cases. Chaque case représente un lien unidirectionnel de l'entité la plus proche de cette case vers la plus éloigné et précise littéralement la relation dans ce sens. Une flèche s'étendant sur la largeur des deux cases précise que certains A sont en relation avec certains B et inversement. Un V placé sur un lien unidirectionnel précise que la totalité des entités proches du V est soumise à la relation. Une flèche placée sur une seule case, proche d'une entité A, dans une direction de A vers B, précise que certains A sont en relation avec un et un seul B. On peut normaliser le sous-typage d'un objet par une relation fléchée du sous-type (sous-ensemble plus précis, plus caractérisé) vers le type (sur un ensemble plus général).

Les relations inter-entités peuvent être contraintes. Les contraintes peuvent porter sur un ensemble de sous-types pour exprimer les idées de:

- **totalité:** l'ensemble des sous-types forme le type (symbole T),
- **exclusion:** un type ne peut se dériver qu'en un seul de ses sous-types (symbole X),
- **totale exclusion mutuelle:** combinaison des contraintes précédentes (symbole T/X).

Notons que les contraintes peuvent aussi porter sur les relations entre types pour exprimer, entre ces relations, les contraintes de totalité et d'exclusion mais aussi d'inclusion (une relation, dite inclue, ne peut être vérifiée que si une autre est vérifiée), d'égalité (idem qu'inclusion mais de façon réciproque), ou d'unicité (une seule entité vérifie simultanément toutes les relations). Dans l'exemple de la figure B1, tiré de [DEN-93], sont synthétisées les informations suivantes:

- une *tâche* peut débuter à zéro, une ou plusieurs *dates de lancement*,
- une *date de lancement* peut lancer zéro, une ou plusieurs *tâches*,
- toute *tâche* a un et un seul *code*,
- tout *code* identifie une et une seule *tâche*,
- toute *tâche* utilise zéro, une ou plusieurs *ressources*,
- toute *ressource* réalise zéro, une ou plusieurs *tâches*,
- toute *ressource* appartient à un et un seul *atelier*,
- un *atelier* peut avoir zéro, une ou plusieurs *ressources*,
- une *ressource* peut être *humaine* ou *matérielle*,
- les *ressources humaines* et *matérielles* forment l'ensemble exhaustif des *ressources*,
- une *ressource* ne peut être simultanément *humaine* et *matérielle*,

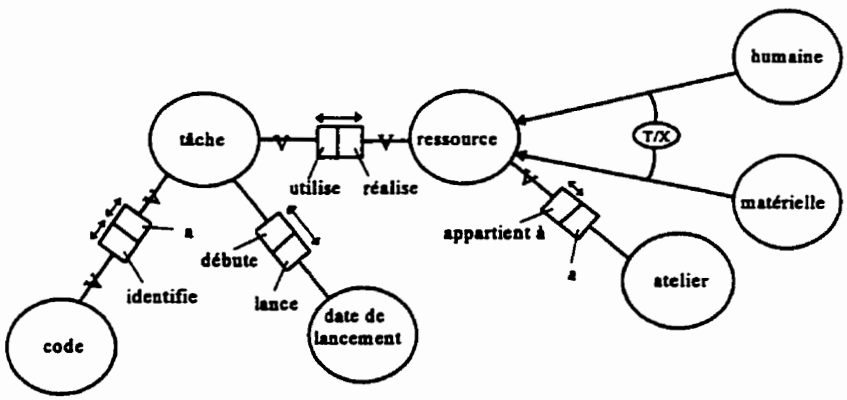


Figure B1. Exemples de relations dans un schéma NIAM

Annexe D

SCHÉMAS RELATIONNELS RELATIFS AU MODÈLE DU PRODUIT

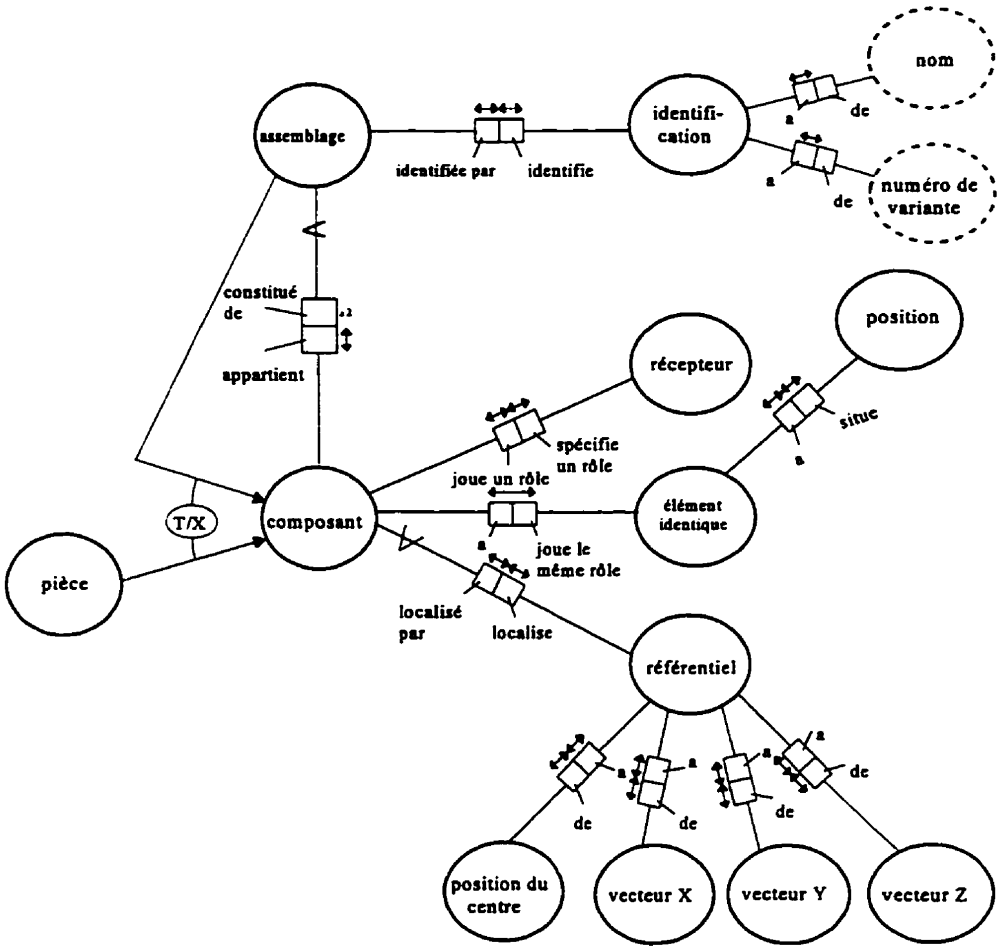


Figure D1. Structure hiérarchique d'un produit

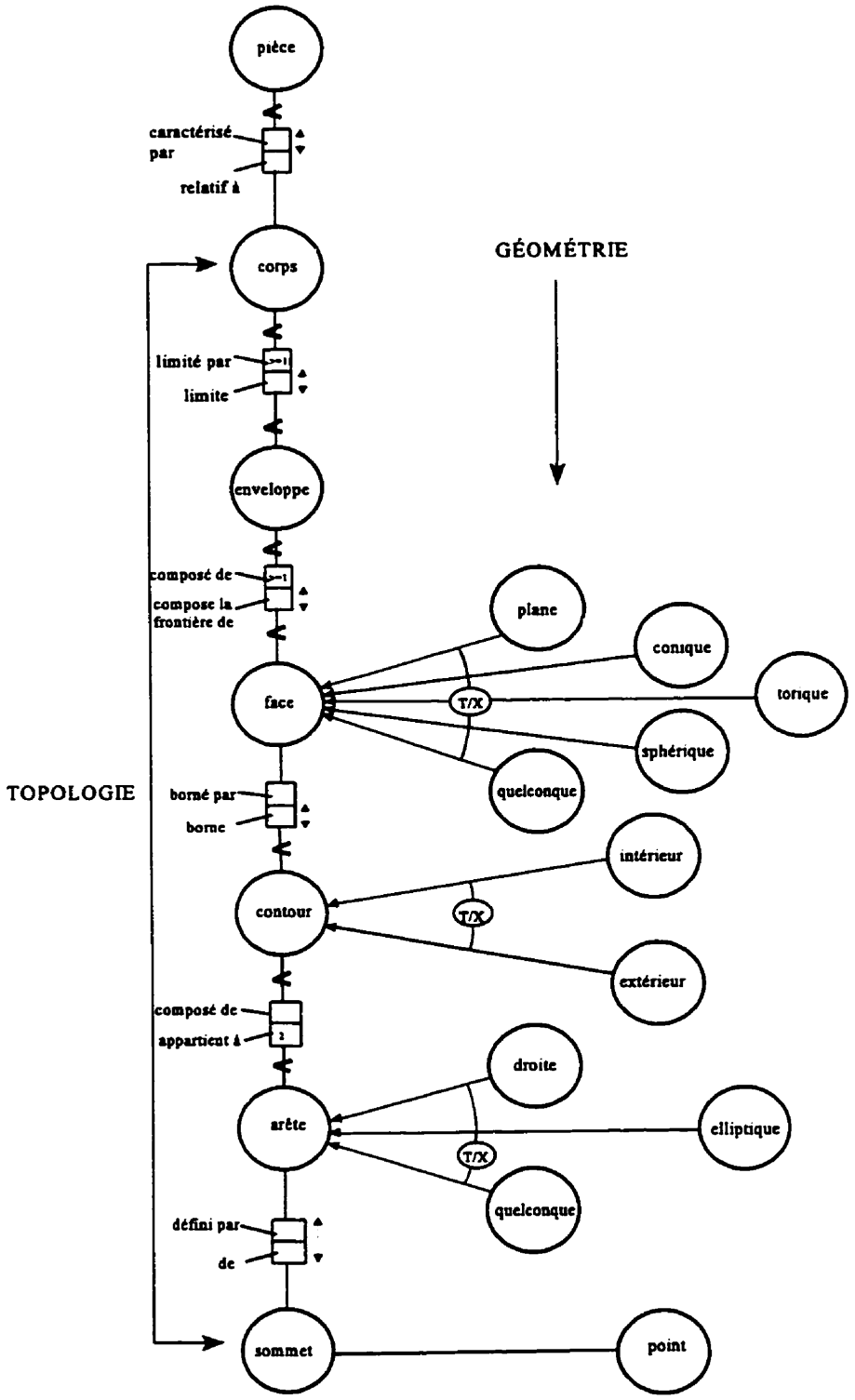


Figure D2. Modèle géométrique et topologique relatif à une pièce

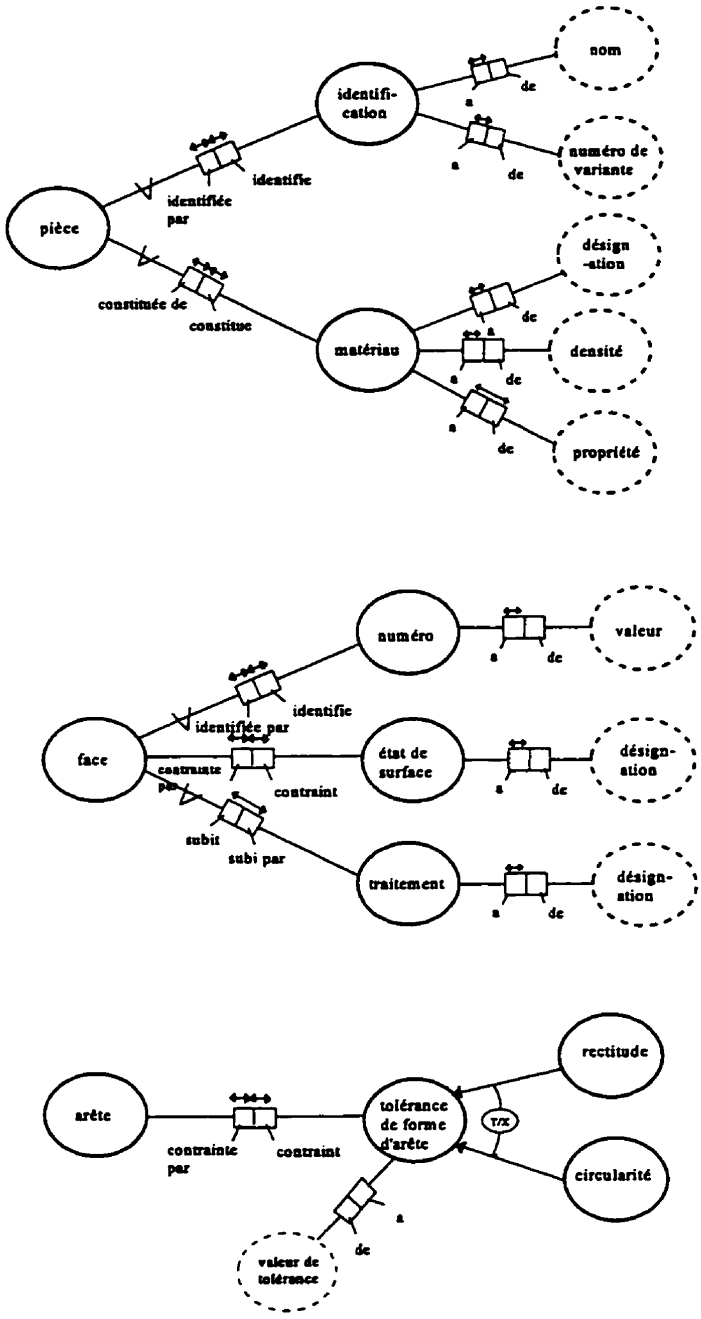


Figure D3. Exemples de caractéristiques intrinsèques à une pièce, à une face et à une arête

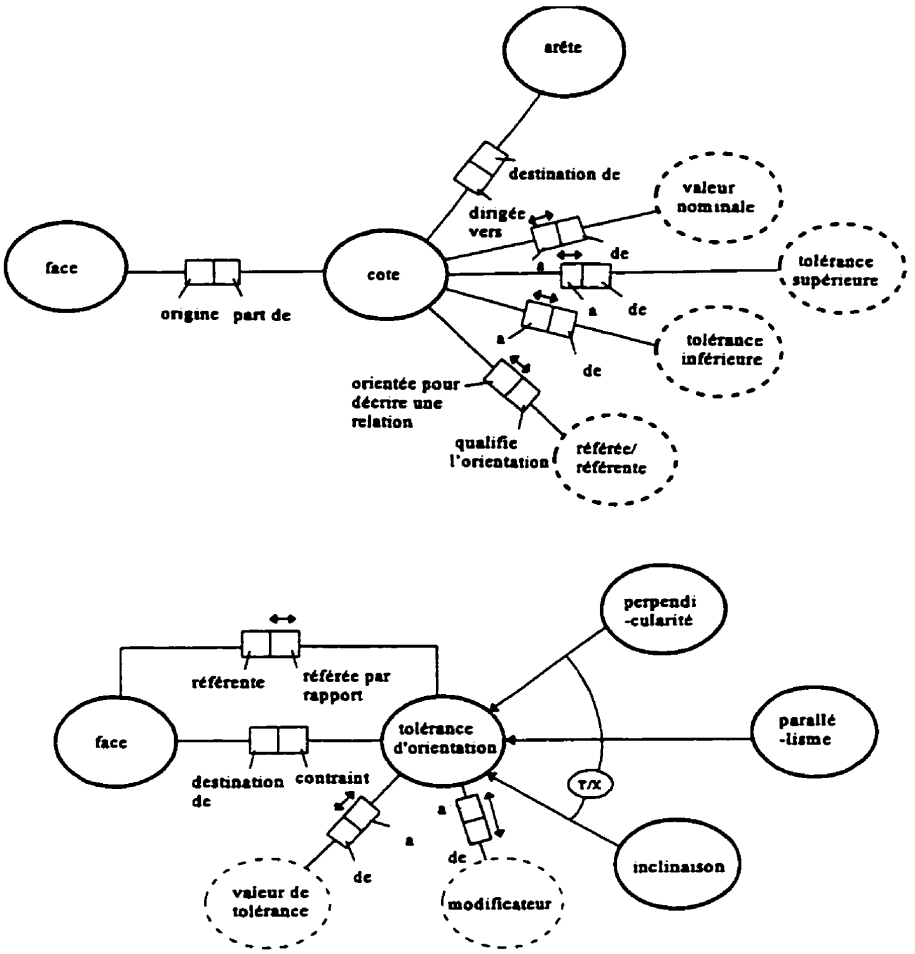


Figure D4. Exemples de caractéristiques extrinsèques à une face

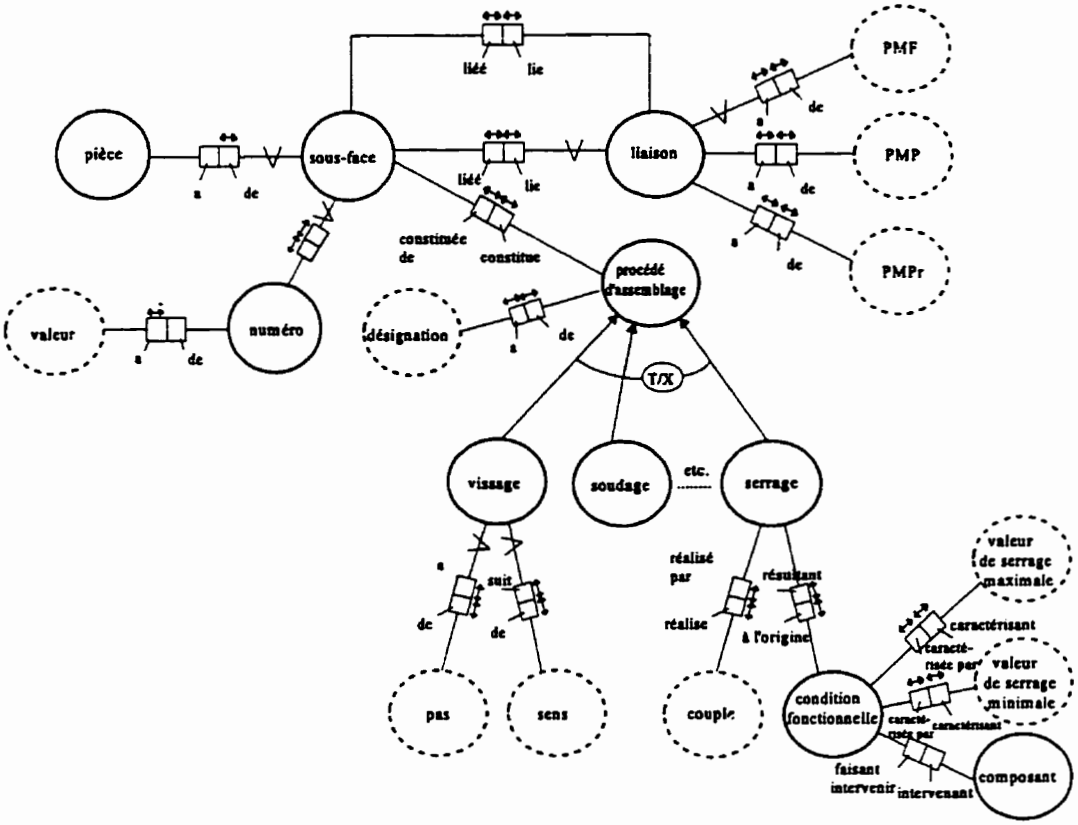


Figure D5. Caractéristiques relatives à la liaison d'une sous-face de contact sur une pièce

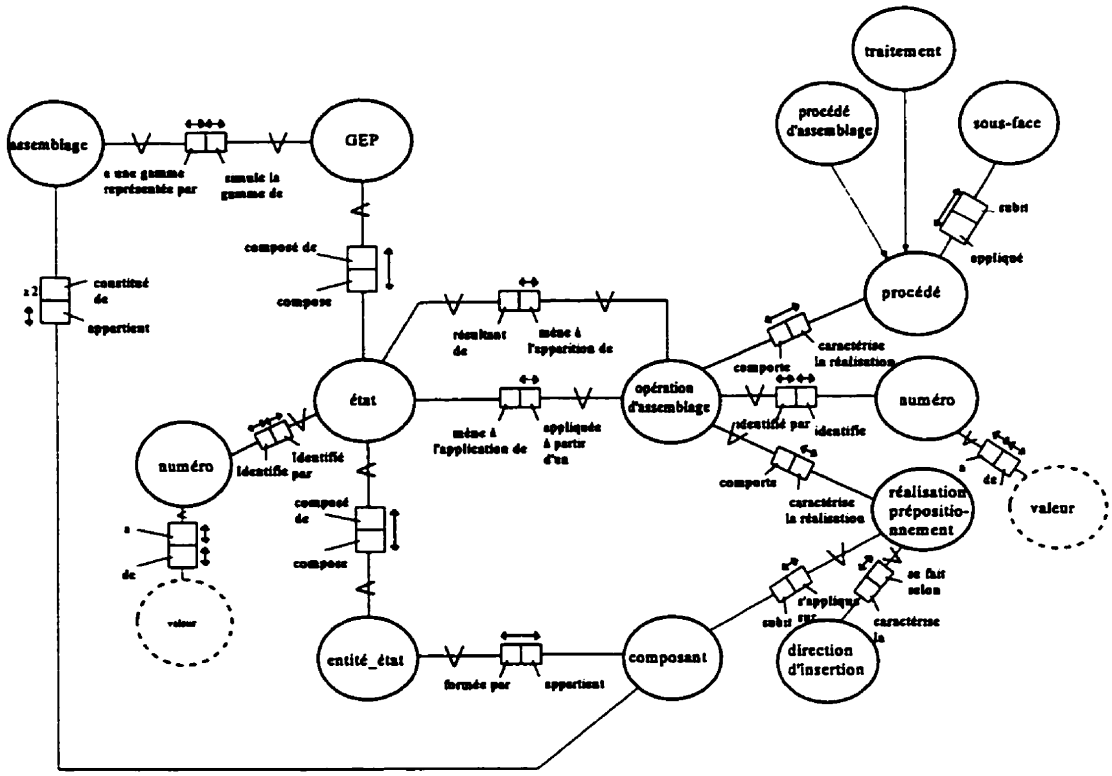
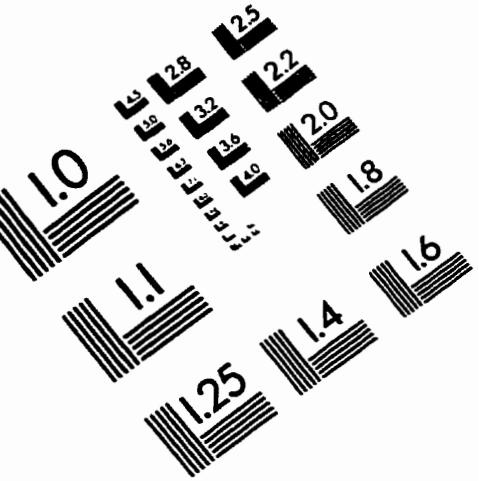
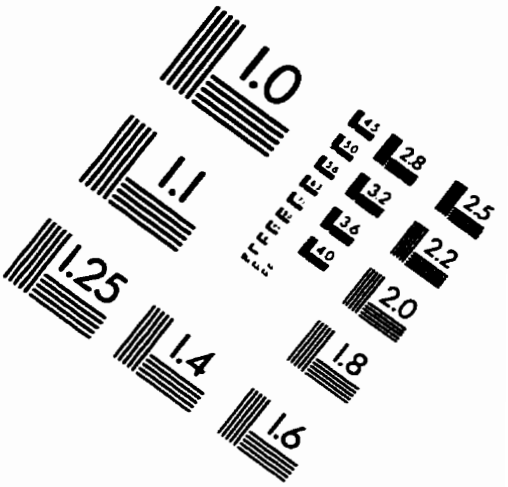
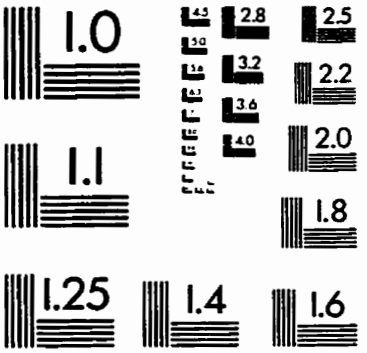


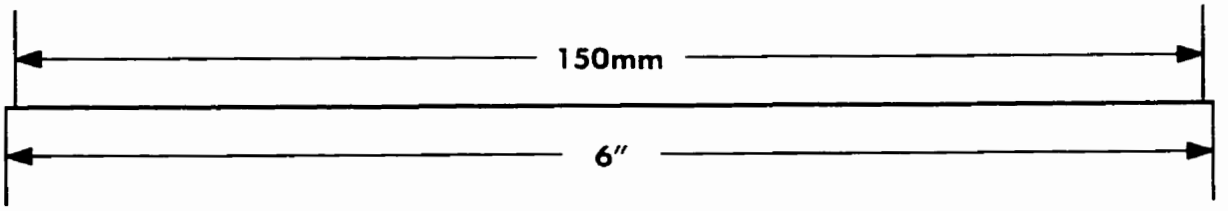
Figure D6. Structure générale de la gamme intégrée au modèle de l'assemblage à partir du GEP

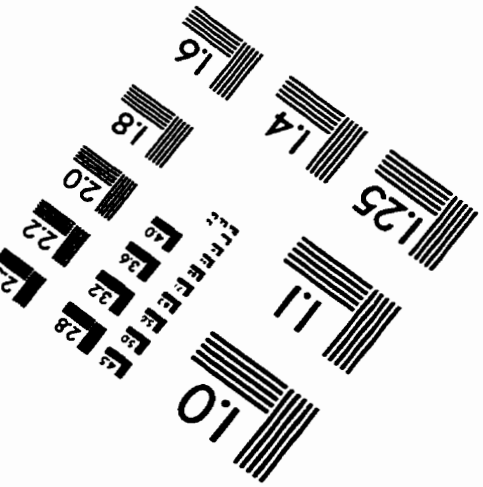
IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)

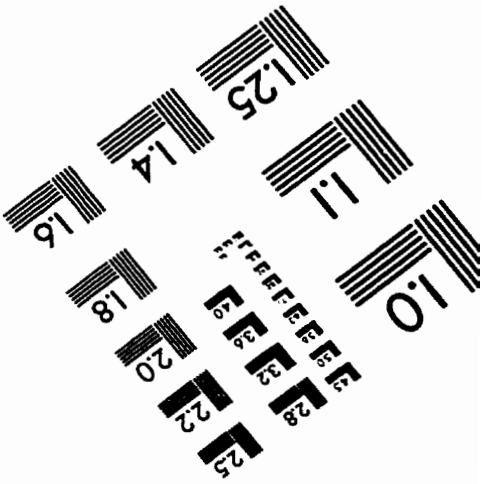












APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved