HAL
open science

Contributions à la génération et à l'amendement de plans d'actions : application à la conception de gammes d'usinage dans un contexte CIM

Philippe Durand

To cite this version:

Philippe Durand. Contributions à la génération et à l'amendement de plans d'actions : application à la conception de gammes d'usinage dans un contexte CIM. Modélisation et simulation. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1988. Français. NNT : . tel-00330034

HAL Id: tel-00330034

https://theses.hal.science/tel-00330034

Submitted on 14 Oct 2008

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

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

TD 1461

THESE

présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR-INGENIEUR
Spécialité Informatique

par

Philippe DURAND

◊◊◊◊

CONTRIBUTIONS A LA GENERATION ET A L'AMENDEMENT DE PLANS D'ACTIONS. APPLICATION A LA CONCEPTION DE GAMMES D'USINAGE DANS UN CONTEXTE CIM

◊◊◊◊

Thèse soutenue le 15 décembre 1988 devant la commission d'examen.

J. FONLUPT	Président
Y. DESCOTTE	Examinateurs
C. LAUGIER	
P. LEULIER	
A. LUX	
F. ROUBELLAT	

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

Président : Georges LESPINARD **Année 1988**

Professeurs des Universités

BARIBAUD Michel	ENSERG
BARRAUD Alain	ENSIEG
BAUDELET Bernard	ENSPG
BEAUFILS Jean-Pierre	ENSEEG
BLIMAN Samuel	ENSERG
BLOCH Daniel	ENSPG
BOIS Philippe	ENSHMG
BONNETAIN Lucien	ENSEEG
BOUVARD Maurice	ENSHMG
BRISSONNEAU Pierre	ENSIEG
BRUNET Yves	IUFA
CAILLERIE Denis	ENSHMG
CAVAIGNAC Jean-François	ENSPG
CHARTIER Germain	ENSPG
CHENEVIER Pierre	ENSERG
CHERADAME Hervé	UFR PGP
CHOVET Alain	ENSERG
COHEN Joseph	ENSERG
COUMES André	ENSERG
DARVE Félix	ENSHMG
DELLA-DORA Jean	ENSIMAG
DEPORTES Jacques	ENSPG
DOLMAZON Jean-Marc	ENSERG
DURAND Francis	ENSEEG
DURAND Jean-Louis	ENSIEG
FOGGIA Albert	ENSIEG
FONLUPTJean	ENSIMAG
FOULARD Claude	ENSIEG
GANDINI Alessandro	UFR PGP
GAUBERT Claude	ENSPG
GENTIL Pierre	ENSERG
GREVEN Hélène	IUFA
GUERIN Bernard	ENSERG
GUYOT Pierre	ENSEEG
IVANES Marcel	ENSIEG
JAUSSAUD Pierre	ENSIEG
JOUBERT Jean-Claude	ENSPG
JOURDAIN Geneviève	ENSIEG
LACOUME Jean-Louis	ENSIEG
LESIEUR Marcel	ENSHMG
LESPINARD Georges	ENSHMG
LONGEQUEUE Jean-Pierre	ENSPG
LOUCHET François	ENSIEG
MASSE Philippe	ENSIEG
MASSELOT Christian	ENSIEG
MAZARE Guy	ENSIMAG
MOREAU René	ENSHMG
MORET Roger	ENSIEG
MOSSIERE Jacques	ENSIMAG
OBLED Charles	ENSHMG
OZIL Patrick	ENSEEG
PARIAUD Jean-Charles	ENSEEG
PERRET René	ENSIEG
PERRET Robert	ENSIEG
PIAU Jean-Michel	ENSHMG
POUPOT Christian	ENSERG
RAMEAU Jean-Jacques	ENSEEG
RENAUD Maurice	UFR PGP
ROBERT André	UFR PGP
ROBERT François	ENSIMAG
SABONNADIERE Jean-Claude	ENSIEG
SAUCIER Gabrielle	ENSIMAG
SCHLENKER Claire	ENSPG
SCHLENKER Michel	ENSPG
SILVY Jacques	UFR PGP
SIRIEYS Pierre	ENSHMG
SOHM Jean-Claude	ENSEEG
SOLER Jean-Louis	ENSIMAG
SOUQUET Jean-Louis	ENSEEG
TROMPETTE Philippe	ENSHMG
VEILLON Gérard	ENSIMAG
ZADWORNY François	ENSERG

Professeur Université des Sciences Sociales (Grenoble II)

BOLLIET Louis

Personnes ayant obtenu le diplôme d'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

BECKER Monique
BINDER Zdenek
CHASSERY Jean-Marc
CHOLLET Jean-Pierre
COEY John
COLINET Catherine
COMMAULT Christian
CORNUEJOLS Gérard
COULOMB Jean- Louis
DALARD Francis
DANES Florin
DEROO Daniel
DIARD Jean-Paul
DION Jean-Michel
DUGARD Luc
DURAND Madeleine
DURAND Robert
GALERIE Alain
GAUTHIER Jean-Paul
GENTIL Sylviane
GHIBAUDO Gérard
HAMAR Sylvaine
HAMAR Roger
LADET Pierre
LATOMBE Claudine
LE GORREC Bernard
MADAR Roland
MULLER Jean
NGUYEN TRONG Bernadette
PASTUREL Alain
PLA Fernand
ROUGER Jean
TCHUENTE Maurice
VINCENT Henri

Chercheurs du C.N.R.S
Directeurs de recherche 1ère Classe

CARRE René
FRUCHART Robert
HOPFINGER Emile
JORRAND Philippe
LANDAU Ioan
VACHAUD Georges
VERJUS Jean-Pierre

Directeurs de recherche 2ème Classe

ALEMANY Antoine
ALLIBERT Colette
ALLIBERT Michel
ANSARA Ibrahim
ARMAND Michel
BERNARD Claude
BINDER Gilbert
BONNET Roland
BORNARD Guy
CAILLET Marcel
CALMET Jacques
COURTOIS Bernard
DAVID René
DRIOLE Jean
ESCUDIER Pierre
EUSTATHOPOULOS Nicolas
GUELIN Pierre
JOUD Jean-Charles
KLEITZ Michel
KOFMAN Walter
KAMARINOS Georges
LEJEUNE Gérard
LE PROVOST Christian
MADAR Roland
MERMET Jean
MICHEL Jean-Marie
MUNIER Jacques
PIAU Monique
SENATEUR Jean-Pierre
SIFAKIS Joseph
SIMON Jean-Paul
SUERY Michel
TEODOSIU Christian
VAUCLIN Michel
WACK Bernard

Personnalités agrées à titre permanent à diriger des travaux de recherche (décision du conseil scientifique)

E.N.S.E.E.G

CHATILLON Christian
HAMMOU Abdelkader
MARTIN GARIN Régina
SARRAZIN Pierre
SIMON Jean-Paul

E.N.S.E.R.G

BOREL Joseph

E.N.S.I.E.G

DESCHIZEAUX Pierre
GLANGEAUD François
PERARD Jacques
REINISCH Raymond

E.N.S.H.G

ROWE Alain

E.N.S.I.M.A.G

COURTIN Jacques

E.F.P.

CHARUEL Robert

C.E.N.G

CADET Jean
COEURE Philippe
DELHAYE Jean-Marc
DUPUY Michel
JOUVE Hubert
NICOLAU Yvan
NIFENECKER Hervé
PERROUD Paul
PEUZIN Jean-Claude
TAIB Maurice
VINCENDON Marc

Laboratoires extérieurs

C.N.E.T

DEVINE Rodericq
GERBER Roland
MERCKEL Gérard
PAULEAU Yves

Résumé

Le problème abordé dans cette thèse est l'automatisation de la conception de Gammes d'Usinage dans un contexte CIM. Du point de vue IA, c'est un problème de planification sous contraintes, que nous proposons de résoudre via la collaboration d'une stratégie de linéarisation et d'une stratégie de planification par "Combinaison Opportuniste de Plans". Certains des plans obtenus par cette méthode pouvant être partiellement erronés, nous avons étudié un mécanisme d'amendement. Ce mécanisme est basé sur un algorithme de compromis afin d'automatiser la modification de plans obtenus par satisfaction de contraintes interdépendantes. Du point de vue CIM, nous présentons des concepts issus de la Cotation Volumique, qui répondent aux besoins d'un système CFAO intégré allant de la conception à la fabrication. Ces concepts et ces méthodes ont été validés par l'implantation d'un logiciel de conception automatique de gammes appelé GAGMAT.

Abstract

This dissertation addresses Computer Aided Process Planning in a CIM context. From an AI point of view, it is an under-constraint planning problem, which we propose to resolve with the collaboration of a linearisation strategy and an "Opportunistic Combination of Plans" strategy. As we encountered the problem of generating partially faulty plans, we have studied a plan patching mechanism, based on a constraint-satisfaction algorithm, which automatically modifies plans resulting from interdependant constraints. From a CIM point of view, we present new concepts based upon Volumic Cotation, which satisfy the needs of a CIM system, from design to manufacturing. These methods and concepts have been validated with the implementation of a CAPP system named GAGMAT.

Mots Clés

Intelligence Artificielle, Planification, Propagation de Contraintes, Compromis, Amendement de Plans, CIM, Gamme d'Usinage, Cotation Volumique.

Remerciements

Je tiens à remercier les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger cette thèse :

- *Monsieur Jean Fonlupt,* Professeur à l'ENSIMAG et Directeur du laboratoire ARTEMIS, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.
- *Monsieur Yannick Descotte,* Directeur du Département Recherche à ITMI, pionnier de la génération automatique de gammes à l'INPG.
- *Monsieur Christian Laugier,* Chargé de Recherche INRIA, responsable de l'équipe Robotique au LIFIA, qui a dirigé ce travail.
- *Monsieur François Roubellat,* Directeur de Recherche au LAAS,
- *Monsieur Pierre Leulier,* Ingénieur TEF de l'Armement à la Manufacture d'Armes de Tulle, qui m'a guidé en ce qui concerne les aspects "mécaniques" de ce projet.
- *Monsieur Augustin Lux,* Maître de Conférence à L'ENSIMAG, responsable de l'équipe Modélisation du Raisonnement au LIFIA.

Je tiens également à remercier :

- *Monsieur Jean-Patrick Tsang,* ex-thésard au LIFIA dans le domaine de la génération automatique de gammes, qui m'a souvent encouragé, et avec lequel les discussions ont toujours été fructueuses.
- La MAT, qui a financé ce projet, et plus particulièrement les membres du Bureau de Fabrication qui m'ont accueilli et ont répondu pendant un an et sans jamais se lasser à mes questions de néophyte en mécanique.
- Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail ; je pense ici à tous les collègues des équipes IA, Robotique et Vision du LIFIA, ainsi qu'à ma famille qui m'a toujours fait confiance.
- *Françoise,* qui m'a soutenu et supporté durant ces quelques années de thèse, et qui, étant la plus grande chasseuse de fôtes d'aurtograf que je connaisse, est à ce titre ma plus fervente lectrice, relectrice, rerelectrice ...

Philippe Durand

Sommaire

Sommaire i

Liste des Figures vii

Introduction 1

1 Problème abordé 1

1.1 Du point de vue de l'IA 1

1.2 Du point de vue mécanique 2

2 Contenu et contribution de la thèse 2

2.1 Méthodes employées 2

2.2 Implantation 3

3 Organisation du mémoire 4

I Les Gammes d'Usinage et la CFAO 5

Chapitre 1 : Les Gammes d'Usinage 7

1 La notion de Gamme d'Usinage 7

1.1 Qu'est-ce qu'une gamme ? 7

1.2 Les différents types de gammes et le domaine envisagé 8

1.3 La conception de Gammes d'Usinage 9

2 Problématique de la conception de gammes 10

2.1 Problème d'optimisation multi-critères 11

2.2 Décomposition en sous-tâches 13

2.3 Interdépendance des sous-tâches 16
2.4 Hiérarchie entre sous-tâches 17
3 Les approches d'automatisation 18
3.1 L'approche variante 18
3.2 L'approche générative 19
3.3 Avantages et inconvénients des deux approches 20
3.4 Conclusion 22

Chapitre 2 : La conception de Gammes d'Usinage dans un contexte CIM **25**
1 Etat de l'art en CFAO Mécanique 26
1.1 Phase Conception 26
1.2 Phase Méthodes 28
1.3 Phase Fabrication 29
2 Essais d'intégration, problèmes rencontrés 30
2.1 Interface CAO → Générateur de Gammes 31
2.2 Interface Générateur de Gammes → programmes CN 32
2.3 Conclusion 36
3 La Cotation Volumique 37
3.1 Les systèmes de cotation 37
3.2 Avantages de la Cotation Volumique 39
3.3 Les concepts issus de la Cotation Volumique 43

II Les Gammes d'Usinage et la planification **49**

Chapitre 3 : Conception de gammes et IA **51**
1 Planification et IA 52
1.1 Le problème 52
1.2 Problèmes d'explosion combinatoire et d'interdépendance de sous-buts 52
1.3 Evolution des stratégies de planification 54
2 Caractéristiques de la conception de Gammes d'Usinages 56
2.1 Problème linéarisable 57
2.2 Sous-problèmes fortement couplés 59
2.3 Partage de ressources hiérarchiques et interdépendantes 61
2.4 Nature conflictuelle des critères d'élaboration 61
2.5 Conclusion 62
3 Analyse et critique de quelques systèmes 63

3.1 Machinist 64
3.2 GARI 65
3.3 PROPEL 65

Chapitre 4 : Stratégies de planification et d'amendement utilisées 67
1 Stratégie de linéarisation 67
1.1 Notions préliminaires 68
1.2 Principes de linéarisation 68
1.3 Exemple concernant la conception de Gammes d'Usinage 73
2 La planification COP 77
2.1 Représentation de plans 77
2.2 Principes de la planification COP 78
2.3 Problèmes dus à la représentation 81
2.4 Caractéristiques de la stratégie COP 84
3 L'algorithme de compromis 85
3.1 Définitions préliminaires 85
3.2 L'algorithme de compromis 86
3.3 Principales propriétés de l'algorithme 88
4 Amendement par satisfaction de contraintes 88
4.1 Le problème abordé 88
4.2 Travaux antérieurs dans le domaine de l'amendement de plans 90
4.3 La stratégie d'amendement 92
4.4 Fonctionnement du mécanisme d'amendement 94
4.5 Exemple de fonctionnement 96
4.6 Discussion 99

III GAGMAT 101

Chapitre 5 : Fonctionnement de GAGMAT 103
1 Présentation générale 103
1.1 Domaine d'application et hypothèses 103
1.2 Fonctionnement de GAGMAT 104
1.3 Architecture du système 107
2 Description des pièces 109
2.1 Principes 109
2.2 Description des Volumes d'Usinage 110
2.3 Les relations entre Volumes d'Usinage 112

3 Les ressources 114
3.1 Description des ateliers 115
3.2 Le problème des appuis 117
4 Structure des gammes 121
5 Propagation de contraintes 123
5.1 Propagation des contraintes de regroupement d'actions 124
5.2 Propagation des contraintes d'ordonnancement d'actions 126
5.3 Propagation des contraintes de spécification de ressource 126

Chapitre 6 : Représentation et exploitation de l'expertise dans GAGMAT 129
1 Introduction 129
2 Connaissances de linéarisation 130
2.1 Choix des règles pondérées 130
2.2 Exemples de règles de linéarisation 131
3 Connaissances d'initialisation 134
3.1 Choix des règles pondérées 135
3.2 Exemples de règles d'initialisation et de PU générés 135
4 Connaissances de contrainte 139
4.1 Choix des règles pondérées 140
4.2 Contraintes de formulation de ces connaissances 140
4.3 Exemples de règles de contrainte 141
4.4 Remarques sur l'écriture des règles 143
5 Autres zones d'expertise 144
5.1 Relations entre tolérances, qualités et Etats de Surface 145
5.2 Estimation de la stabilité des appuis 145

Chapitre 7 : Implantation, expérimentation, extensions de GAGMAT 149
1 Implantation et expérimentation 149
1.1 Implantation 149
1.2 Expérimentation 149
1.3 Réflexions 150
2 Extensions 153
2.1 Agrandissement du champ d'application 153
2.2 Vers un système CIM 153
2.3 Extensions concernant l'amendement de plans 156
2.4 Autres extensions 157

Bilan 159

Bibliographie 163

Annexes 173

Annexe A : La Cotation Volumique 175
1 Un exemple de cotation . . . 175
1.1 En Cotation de Liaison . . . 176
1.2 En Cotation Volumique . . . 178
1.3 Conclusion . . . 180
2 Avantages de la Cotation Volumique . . . 180
2.1 Augmentation du défaut de position . . . 181
2.2 Contrôle des pièces plus rapide et plus simple . . . 182
2.3 Plus de notion d'isostatisme . . . 183
2.4 Utilisation de toute la tolérance . . . 184
2.5 Utilisation de Macros d'Usinage . . . 186

Annexe B : Les Modèles d'Usinage traités par GAGMAT 189
1 Les MU cylindriques . . . 191
1.1 Alésages non débouchants . . . 191
1.2 Alésages débouchants . . . 191
1.3 Lamage . . . 192
1.4 Plongée . . . 192
2 Le MU parallélépipédique plein . . . 193
3 Les MU parallélépipèdiques vides . . . 193
3.1 Les poches . . . 194
3.2 Les rainures . . . 195
3.3 Les coulisses . . . 196
3.4 Les entailles . . . 197

Annexe C : Outils et ateliers 199
1 Les outils . . . 199
2 Deux descriptions d'ateliers . . . 203
2.1 Atelier avec Centre d'Usinage . . . 204
2.2 Atelier traditionnel . . . 204

Annexe D : Le Boîtier 207
1 Les plans du Boîtier . . . 208
2 Description du Boîtier . . . 213

3 Gamme générée pour le Boîtier dans un atelier avec Centre d'Usinage . . . 223
4 Gamme générée pour le Boîtier dans un atelier traditionnel 235

Annexe E : Le Corps **239**
1 Les plans du Corps 240
2 Description du Corps 243
3 La Gamme générée pour le Corps 255

Annexe F : Le Tiroir **263**
1 Les plans du Tiroir 264
2 Description 265
3 La Gamme générée pour un Centre d'Usinage 268
4 La Gamme générée pour un atelier traditionnel 275

Annexe G : Exemples d'amendement de gamme **283**
1 La pièce traitée 283
2 Première gamme générée 283
3 Amendement à effet local 285
4 Amendement à effet global 285
5 Temps d'exécution 287

Glossaire **289**

Liste des Figures

1.1 Les différentes Gammes d'Usinage 8
1.2 De la spécification du besoin à la vente d'un produit 9
1.3 Décomposition de la phase de génération d'une gamme 10
1.4 Les contraintes de la conception de gammes 11
1.5 Usinage de deux alésages sécants 12
1.6 Influence des contraintes technologiques et économiques sur la génération des Gammes d'Usinage 15
1.7 Interdépendances entre les sous-tâches de la conception de GU 16

2.1 Approches d'automatisation du processus de fabrication 26
2.2 Des problèmes d'interfaçage à résoudre ! 31
2.3 Quelles entités faut-il reconnaître ? 33
2.4 Différentes façons de coter une *poche* 35
2.5 Cote mâle ou cote femelle ? 35
2.6 Ensembles mécaniques 38
2.7 Des besoins différents selon le mécanisme 39
2.8 Définitions possibles d'un tronc de cône 43
2.9 Les relations de positionnement de la Cotation Volumique 44
2.10 Exemples de VU 45
2.11 Exemples de MU correspondant au *parallélépipède vide* 46
2.12 Exemples de trajets élémentaires associés à des *Macros* 47
2.13 Décomposition d'un PU en OV et OVE 48

3.1 L'anomalie de Sussman 53
3.2 Exemple d'états intermédiaires 58
3.3 Interdépendances entre les usinages de deux alésages sécants 60

4.1 Décomposition du but final *(finie Maison)* 69
4.2 Exemple de dépendances entre sous-buts 70
4.3 Création des buts intermédiaires, puis linéarisation 70
4.4 Linéarisation d'un problème grâce aux sous-buts intermédiaires 72
4.5 Pièce à usiner 75
4.6 Représentation de plans pour la planification COP 78
4.7 Mise en parallèle des sous-plans hiérarchiques 79
4.8 Partition de l'ensemble solution 84
4.9 Algorithme de compromis 87

5.1 Les étapes du processus de génération des gammes 105
5.2 Architecture interne de GAGMAT 107
5.3 Informations générales sur une pièce 110
5.4 Exemples de descriptions de VU 111
5.5 Exemples de relations de positionnement 113
5.6 Relations de proximité 114
5.7 Exemples de relations de proximité 114
5.8 Montage sur cube 118
5.9 Structure d'une gamme générée par GAGMAT 123
5.10 Exemple de propagation de la contrainte *outil* 127

7.1 Vers les programmes de Commande Numérique 154

A.1 Le mécanisme à coter 176
A.2 La Cotation de Liaison 177
A.3 Les cotes issues de la Cotation de Liaison 178
A.4 La Cotation Volumique 179
A.5 Les cotes issues de la Cotation Volumique 180
A.6 Défaut de position 181
A.7 Augmentation du défaut de position 182
A.8 Une vérification plus simple 183
A.9 Ablocage d'une pièce en Cotation Volumique "max matière" 184
A.10 De la cote de définition à la cote usinée 185
A.11 Programmation en cote moyenne 186
A.12 Valeur d'une cote programmée en Cotation Volumique "max matière" . . 187

A.13 Une Macro d'Usinage 188

G.1 La pièce traitée 284

Introduction

1 Problème abordé

Le problème abordé dans ce mémoire est celui de l'**automatisation de la conception de Gammes d'Usinage dans un contexte CIM** (Computer Integrated Manufacturing). Concevoir une gamme revient à déterminer la séquence des opérations nécessaires à la fabrication d'une pièce, étant données sa description, ainsi que celles des machines et des outils disponibles pour l'usiner.

1.1 Du point de vue de l'IA

C'est un problème de planification sous contraintes :

- **Problème de planification,** car il s'exprime suivant les termes habituels de la planification : étant donnés un état initial (pièce brute), un but (pièce finie), un ensemble d'actions élémentaires (les usinages), trouver une séquence d'actions (la gamme) qui permette d'atteindre le but à partir de l'état initial.
- **Sous contraintes :** il faut respecter de nombreuses contraintes au cours de l'élaboration d'une gamme, suite à des critères de type technologique (respect des dimensions, possibilités des machines et des outils, résistance des matériaux, etc), ou économiques (coût, souplesse, productivité).

La conception de Gammes d'Usinage constitue donc un champ d'investigation qui peut contribuer à l'évolution de l'Intelligence Artificielle.

1.2 Du point de vue mécanique

L'élaboration de Gammes d'Usinage s'intègre au processus global allant de l'étude de marché à la vente d'un produit, en passant par sa conception et sa fabrication. Suite au développement et aux progrés de l'informatique, est apparu le désir d'automatiser entièrement cette chaîne (CIM), où la conception de gammes joue un rôle primordial. Mais le succès de cette automatisation passe par une réflexion approfondie et éventuellement une remise en cause des concepts mécaniques de base. Le problème de la conception automatique de Gammes d'Usinage, étudié dans un tel contexte d'intégration, peut donc contribuer à la rationalisation des méthodes de conception et de fabrication en mécanique.

2 Contenu et contribution de la thèse

Le travail que nous présentons se situe dans le prolongement des travaux de Y. Descotte [Des 81] et de J.P. Tsang [Tsa 87], portant sur la génération de plans d'actions, et qui ont donné lieu à des applications dans le domaine de la conception de Gammes d'Usinage (respectivement les systèmes GARI et PROPEL). Nous avons poursuivi leurs réflexions sur la nature de ce problème, ainsi que sur les méthodes d'IA à employer pour automatiser la conception de gammes. Ce travail a été réalisé en collaboration avec la MAT (Manufacture d'Armes de Tulle), qui nous a fait profiter de son expérience dans le domaine de la mécanique, notamment du point de vue des concepts manipulés. Le résultat de notre étude s'est concrétisé par l'implantation du logiciel GAGMAT (Génération Automatique de Gammes MAT).

2.1 Méthodes employées

Nous nous sommes aperçus que le problème de la génération d'une gamme se décompose en sous-problèmes indépendants, dès lors que l'on est capable de déterminer des états intermédiaires de la pièce par lesquels il faut nécessairement passer. Nous avons donc étudié et élaboré une **stratégie de linéarisation**, qui permet de définir dans un premier temps des buts intermédiaires qu'il faut atteindre pour arriver au but final ; il ne s'agit plus ensuite que de générer les sous-plans permettant de passer d'un état intermédiaire à celui qui lui succède (dans le cas des Gammes d'Usinage, ces sous-plans correspondent aux Sous-Gammes). L'intérêt de cette linéarisation préliminaire est de réduire le phénomène d'explosion combinatoire, inhérent à tout problème de planification.

Tous les systèmes de génération de gammes que nous connaissons, en particulier GARI et PROPEL, n'ont abordé en fait que la seconde partie du problème, à savoir la conception d'une Sous-Gamme, dont l'aspect prépondérant du point de vue de la résolution, s'avère être son caractère fortement couplé. Nous avons donc repris la stratégie de planification par Combinaison Opportuniste de Plans (COP), mise au point par J.P. Tsang. De plus, les critères d'élaboration de gammes étant souvent antagonistes et d'importances inégales, nous avons combiné aux stratégies précédentes un algorithme de compromis, développé par Y. Descotte, qui permet de traiter des contradictions éventuelles.

Ayant été confrontés au problème de la correction de plans partiellement erronés, nous avons étudié et implanté un **mécanisme d'amendement**, basé sur l'algorithme de compromis précédent. Il permet d'automatiser la modification de plans obtenus par satisfaction de contraintes interdépendantes, ce qui évite de recommencer le processus de planification dès le début. Il est donc adapté à la correction des Gammes d'Usinage générées selon les méthodes précédentes.

2.2 Implantation

Les méthodes ci-dessus ont été implantées sous la forme du logiciel GAGMAT, en collaboration avec les experts gammistes de la MAT, qui nous ont fourni l'expertise en matière de conception de gammes. Ce logiciel est destiné à s'intégrer au sein d'un système complet de CFAO, allant de la conception à la fabrication des pièces. C'est la raison pour laquelle les pièces traitées sont décrites via les principes de la **Cotation Volumique**, pourtant peu employée aujourd'hui ; ce système de cotation possède en effet de nombreux avantages, tant au niveau de la conception et de la fabrication, que du point de vue de la réalisation d'un système CIM entièrement automatique. Nous avons analysé cette cotation, et en avons tiré des concepts sur lesquels se fonde GAGMAT pour générer des gammes.

GAGMAT traite des pièces prismatiques et orthomorphes (dont les axes des outils qui permettent de les usiner sont suivant les axes d'un repère orthonormal), dans le cadre d'une technologie traditionnelle (pas de découpe laser, à jet d'eau, etc) orientée plus particulièrement vers les ateliers flexibles, et donc vers l'utilisation de Centres d'Usinage. L'utilisation effective de la Cotation Volumique étant encore au stade expérimental, GAGMAT n'a pu être testé que sur trois pièces, mais qui sont réelles et plutôt complexes (l'une d'entre elles est actuellement usinée suivant ces concepts). Ces descriptions ont cependant été maintes fois modifiées pour utiliser GAGMAT dans le

plus grand nombre cas de figure, et mettre ainsi au point les bases de connaissances. Les gammes générées ont convenu aux experts gammistes de la MAT.

3 Organisation du mémoire

Le mémoire se divise en trois parties composées chacune de deux ou trois chapitres :

- La **Partie I** est une introduction générale sur la conception de Gammes d'Usinage :
  - dans le **Chapitre 1**, nous présentons le problème du point de vue des gammistes, et nous analysons quelques-unes des approches d'automatisation,
  - nous étudions dans le **Chapitre 2** les besoins d'un système CIM ; nous y présentons les concepts issus de la Cotation Volumique comme une solution à cette intégration.
- La **Partie II** étudie les liens entre la conception de gammes et la planification :
  - dans le **Chapitre 3**, nous nous appuyons sur une étude bibliographique de la planification pour dégager les principales caractéristiques de la conception de Gammes d'Usinage, du point de vue de vue de l'IA,
  - le **Chapitre 4** est consacré à l'étude des stratégies utilisées pour répondre à ces caractéristiques ; nous y présentons et analysons aussi le mécanisme d'amendement, fondé sur les propriétés de l'algorithme de compromis de Descotte.
- la **Partie III** concerne le système GAGMAT :
  - le **Chapitre 5** est une présentation générale de son fonctionnement,
  - le **Chapitre 6** explique comment coder l'expertise, et comment les connaissances sont exploitées par le système,
  - son implantation, son expérimentation et quelques extensions possibles, notamment en aval, sont présentées dans le **Chapitre 7**.

Nous terminons le mémoire par un bref bilan des travaux réalisés lors de cette thèse.

Partie I

Les Gammes d'Usinage et la CFAO

1

Chapitre 1

Les Gammes d'Usinage

1 La notion de Gamme d'Usinage

1.1 Qu'est-ce qu'une gamme ?

Dans un contexte industriel, une gamme concerne toute planification d'activités visant à la fabrication d'un produit à partir de ses spécifications de définition. Une gamme contient donc les instructions et les informations successives concernant les méthodes et les ressources (machines, outils, etc) à mettre en œuvre, ainsi que les actions élémentaires à réaliser. Ces instructions et ces informations doivent être suffisamment précises et détaillées pour permettre la fabrication du produit au sein des ateliers.

Au vu de cette définition, il est clair que la notion de gamme concerne un large éventail d'activités industrielles. En effet, une gamme permet non seulement de planifier et d'ordonnancer les actions élémentaires concernant un produit particulier, mais elle permet aussi de planifier la fabrication des autres produits au sein de l'entreprise. En d'autres termes, la gamme est l'entité de base autour de laquelle s'articulent toutes les approches d'organisation et de gestion de l'entreprise : gestion des ressources (machines, outils, matériaux, personnels, etc), gestion des temps de fabrication, organisation des ateliers, etc. En résumé, nous pouvons dire que les gammes jouent un rôle déterminant au sein de l'organisation d'une entreprise, puisqu'elles permettent de coordonner tous les efforts afin d'accomplir de manière efficace des tâches diverses.

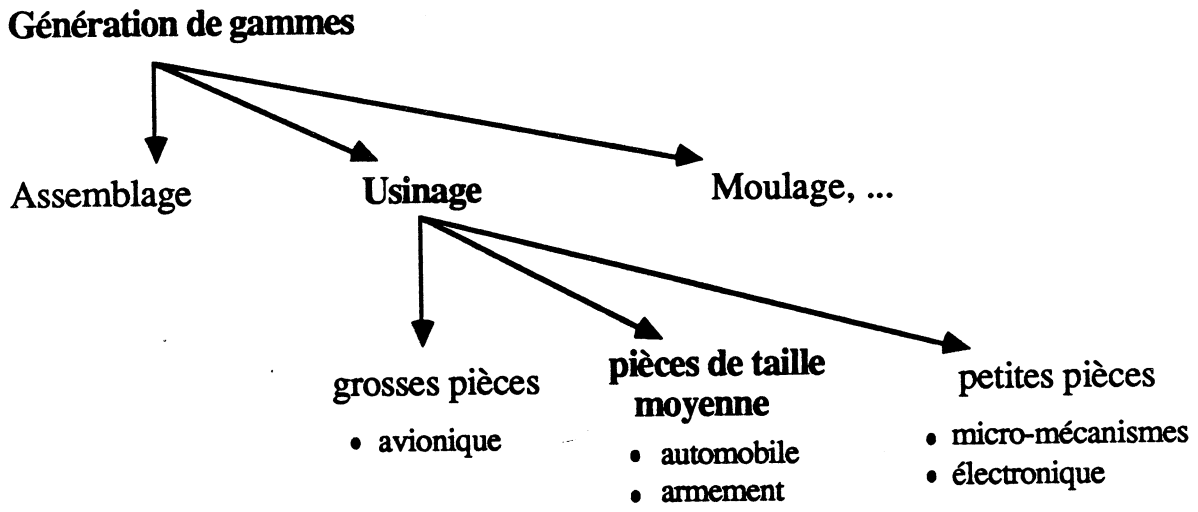


Figure 1.1 : Les différentes Gammes d'Usinage

1.2 Les différents types de gammes et le domaine envisagé

La conception de gammes est par conséquent une activité primordiale au sein de la vie d'une entreprise. Parmi les domaines d'application, mentionnons par exemple ceux de l'**usinage**, de l'**assemblage** ou du **moulage**. Nous nous intéressons quant à nous au premier de ces domaines, et donc au problème de la génération des **Gammes d'Usinage** (GU).

Les Gammes d'Usinage ont pour objectif la fabrication de pièces qui appartiennent à des ensembles mécaniques, moyennant des technologies aussi diverses que le tournage, le fraisage ou le perçage. Nous pouvons encore distinguer ici plusieurs familles de gammes suivant des critères de taille (cf. fig. 1.1) :

- les grosses pièces (avionique),
- les pièces de taille moyenne (automobile, armement),
- les petites pièces (électronique, micro-mécanismes).

Cette distinction provient essentiellement des moyens de fabrication mis en œuvre pour les réaliser. En effet, non seulement les matériels employés sont différents (outils, machines, matériaux), mais aussi les méthodes de fabrication. Les processus de génération de gammes ne font donc pas appel aux mêmes concepts de base. Le domaine abordé par notre étude concerne les Gammes d'Usinage associées à des pièces de **taille moyenne**, plus spécialement en vue de leur réalisation au sein d'**ateliers flexibles**.

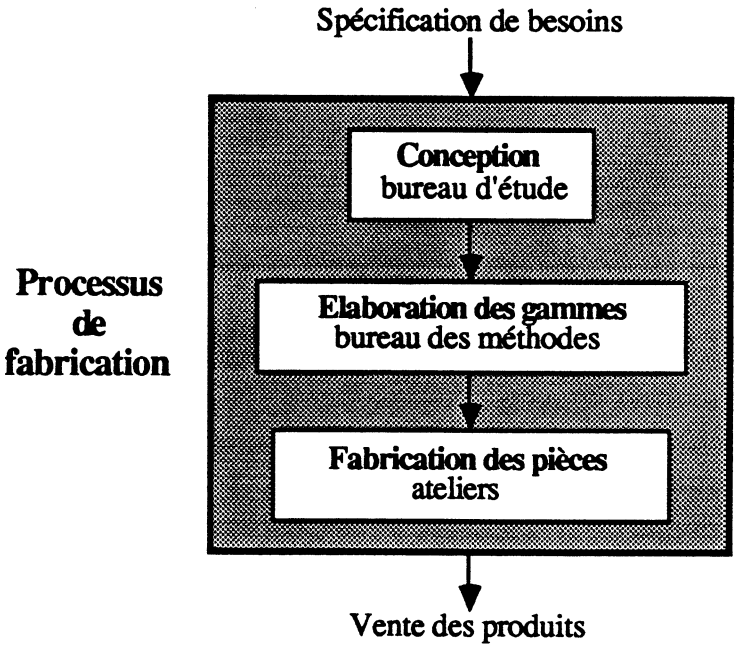


Figure 1.2 : De la spécification du besoin à la vente d'un produit

1.3 La conception de Gammes d'Usinage

Générer la Gamme d'Usinage associée à une pièce revient à déterminer la suite logique des actions élémentaires qui permettent de la fabriquer. Cette activité est un maillon intermédiaire indispensable du processus complet de fabrication au sein d'une entreprise, qui va de la spécification du besoin d'un produit à sa fabrication effective dans les ateliers de production (cf fig. 1.2). Elle est généralement confiée à des équipes de spécialistes, au sein des bureaux des méthodes ou de fabrication.

Les principales données de base nécessaires à cette activité sont la description de la pièce, représentée traditionnellement sous la forme de plans, et la description des ressources disponibles (outils, machines ou moyens d'ablocage[1]). Les connaissances à mettre en œuvre sont nombreuses et touchent à tous les domaines de la mécanique. Certaines sont spécifiques et concernent notamment l'organisation et le séquencement logique de toutes les actions à réaliser. D'autres concernent la conception (il faut interpréter les plans et en déduire par exemple les fonctionalités de la pièce traitée), ou la fabrication (il faut notamment maîtriser les technologies qui peuvent être utilisées comme le tournage, le fraisage, les traitements thermiques, etc).

[1] *Ablocage* provient du verbe *abloquer*, qui signifie fixer une pièce sur une machine

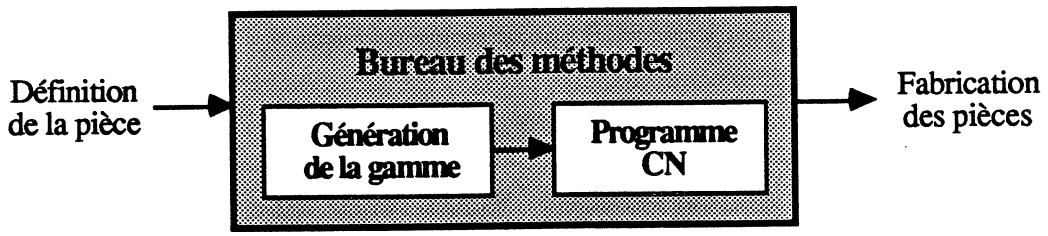


Figure 1.3 : Décomposition de la phase de génération d'une gamme

Concevoir une Gamme d'Usinage est donc une tâche difficile confiée à des spécialistes appelés **gammistes**. Cette activité requiert beaucoup d'ingéniosité et surtout beaucoup d'expérience. Les gammistes doivent être capables d'appréhender et d'apprécier en même temps des paramètres de natures diverses sur la géométrie des pièces, les propriétés des matériaux, les capacités des machines et des outils, etc. Cette multitude de critères est une des raisons pour lesquelles il n'existe pas aujourd'hui de méthodologie qui puisse les guider durant leur travail.

Suite à l'évolution des moyens technologiques et à l'apparition de la **Commande Numérique** (CN), cette phase de conception des Gammes d'Usinage se scinde elle-même en deux étapes consécutives (cf. fig. 1.3) : la génération de la séquence des actions élémentaires (la gamme à proprement parler), et la génération des programmes machines (programmes de Commande Numérique) qui correspondent à l'enchaînement de ces opérations. Ces deux étapes sont fortement liées du point de vue des concepts qu'elles manipulent. En effet, le passage au programme de Commande Numérique nécessite une spécification très détaillée et complète des actions élémentaires de la gamme. Nous verrons par la suite que cet aspect du problème est important en ce qui concerne la réalisation d'un système de conception automatique de Gammes d'Usinage dans un contexte CIM.

2 Problématique de la conception de gammes

Le problème de la conception de Gammes d'Usinage est le suivant : étant données la description de la pièce sous forme de dessins, la description des ressources disponibles (machines et outils), il faut déterminer la séquence des opérations à effectuer pour fabriquer la pièce.

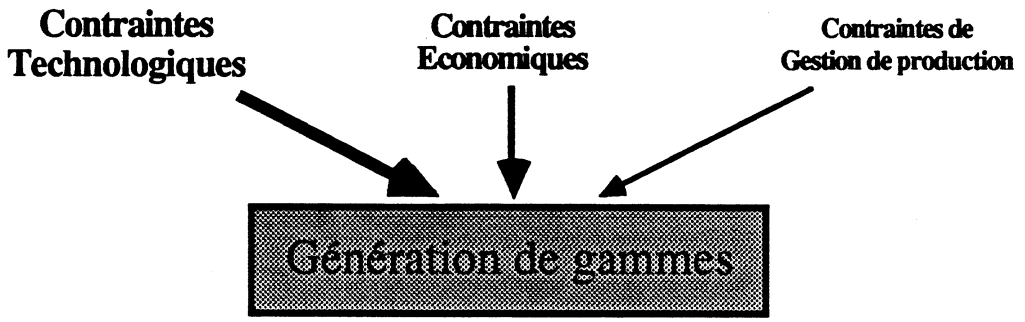


Figure 1.4 : Les contraintes de la conception de gammes

2.1 Problème d'optimisation multi-critères

La conception de Gammes d'Usinage est conditionnée par des contraintes d'ordre **technologique**, **économique**, et de **gestion de production** qu'il faut satisfaire le mieux possible (cf. fig. 1.4) :

- Les contraintes **technologiques** sont pratiquement impératives. En effet, le but d'une gamme est avant tout de permettre la fabrication d'une pièce qui satisfait aux exigences et aux qualités des dessins de définition. De plus, il faut à tout prix que cette gamme soit technologiquement viable, c'est-à-dire que chacune des opérations qui la compose soit réalisable (pas de problème d'accessibilité, de prise de pièce, etc), et en toute sécurité (les limites technologiques des machines et des outils utilisés doivent être respectées).

- L'aspect **économique** conduit à sélectionner parmi les gammes viables celles qui coûtent le moins cher, du point de vue du temps de fabrication ou du coût des matériels utilisés.

- La **gestion de production** intervient à un niveau moindre. Il s'agit ici de retenir la gamme la plus appropriée compte tenu des interactions avec d'autres gammes au sein des ateliers (gestion globale), de la disponibilité des machines, ou de la stratégie de production (type de série, souplesse). Ces types de contrainte correspondent en fait à des contraintes économiques *dynamiques* qui interviennent durant la phase de production des pièces.

Ces trois types de contraintes sont fortement liés entre eux. Imaginons par exemple que nous ayons une tolérance très fine à usiner, l'utilisation d'une machine plus précise ou d'un ablocage plus délicat à réaliser augmente d'autant le prix de revient de la pièce. Pour une meilleure compréhension de l'impact de ces contraintes sur l'élaboration

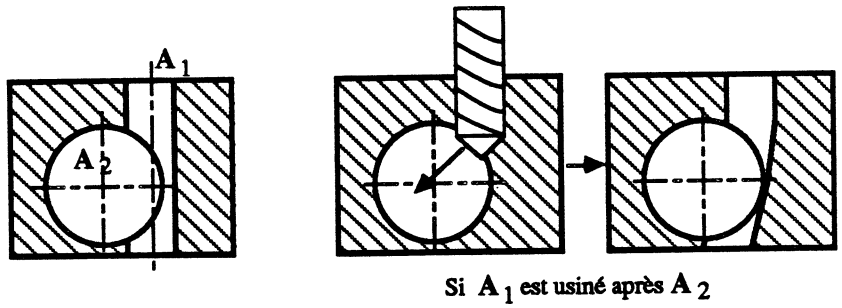


Figure 1.5 : Usinage de deux alésages sécants

des Gammes d'Usinage, illustrons quelques-uns de leurs effets au travers de quelques exemples particuliers.

2.1.1 Exemples de contraintes technologiques

Exemple 1 :

L'obtention d'une qualité inférieure ou égale à 6 pour un alésage nécessite un usinage supplémentaire après l'opération de perçage, à l'aide d'un outil capable de réaliser cette qualité (grain, alésoir, etc).

Exemple 2 :

Pour réaliser un positionnement précis entre deux entités différentes d'une pièce, il importe soit de les usiner sans changement d'appui (puisque tout démontage-remontage d'une pièce induit des incertitudes supplémentaires), soit d'en réaliser une en s'appuyant sur l'autre, soit d'inclure des opérations de mesure entre les usinages pour calculer de nouvelles références machines.

Exemple 3 :

Soient deux alésages sécants A_1 et A_2 de diamètres différents (figure 1.5), c'est le plus petit des deux (A_1) qu'il faut usiner en premier. Si A_2 était usiné avant A_1, l'outil qui usine A_1 fléchirait vers l'axe de A_2 lors de son passage au travers de A_2 du fait de l'inégalité des prises de matière de chaque côté de l'outil. La déformation résultante de l'alésage A_1 serait donc conséquente. Dans le cas où le gros alésage A_2 est usiné en second, cette déformation est minime, du fait du grand diamètre de l'outil et de sa faible hauteur libre lors de son passage au travers de A_1.

2.1.2 Exemples de contraintes économiques

Exemple 1 :

Chercher à diminuer le prix de revient d'une pièce, consiste entre autres à augmenter la productivité. Or celle-ci est fortement liée aux durées d'immobilisation des pièces, c'est-à-dire aux laps de temps durant lesquels aucun travail effectif n'est réalisé. Ces périodes correspondent en général aux temps nécessaires pour changer d'outil, de machine ou de système d'ablocage. Il est donc particulièrement intéressant de regrouper au maximum les usinages qui utilisent les mêmes ressources, afin de minimiser autant que possible toutes ces pertes de temps.

Exemple 2 :

Revenons à l'alésage de qualité 6. Selon la stratégie de l'entreprise, celle-ci préfèrera utiliser pour le réaliser un outil de type *alésoir à 4 lèvres* plutôt qu'un *grain à 1 taille*, suivant les prix de revient respectifs de ces outils.

2.2 Décomposition en sous-tâches

Le premier travail que le gammiste doit effectuer est un travail d'interprétation des plans qui lui sont fournis. Il doit en effet en retirer toutes les informations qui lui seront nécessaires par la suite :

- une étude morphologique et fonctionnelle de la pièce lui permet de dégager les entités qui la composent (trous, rainures, faces, etc) et qu'il faut soit réaliser, soit laisser à l'état brut,
- un examen approfondi de la cotation et des indications portées sur le dessin lui fournit toutes les autres informations dont il a besoin (tolérances, états de surface, matière, etc).

Les informations concernant les entités et leurs fonctionnalités sont *implicites* et varient d'un gammiste à l'autre suivant les concepts mécaniques manipulés.

Une fois cette phase d'interprétation et de compréhension de la pièce effectuée, la génération de la Gamme d'Usinage à proprement parler peut commencer. Ce travail peut se décomposer en plusieurs sous-tâches que nous énumérons ci-dessous.

1 – Choix des technologies, détermination des Sous-Gammes :

En se basant sur des considérations d'ordre général, sur la morphologie de la

pièce le plus souvent, le gammiste décide quelles sont les technologies qu'il va mettre en œuvre (pièce de révolution → tournage, pièce prismatique → fraisage, formes spéciales → formage, etc). Ces choix conditionnent la structure générale de la gamme, car une Sous-Gamme différente correspond à chacune de ces technologies. Pour chacune de ces technologies, il peut exister aussi des Sous-Gammes d'*ébauche* et de *finition*. Une sous-gamme d'ébauche est due en général aux déformations qui peuvent survenir après certaines opérations de la gamme comme les Traitements Thermiques (cf. sous-tâche suivante) ou de gros usinages.

2 – Existence de Traitements Thermiques (TT) :

Les critères d'existence des TT sont relativement simples. Ce sont généralement de simples considérations sur la dureté de la pièce à réaliser : une dureté différente entre la pièce à l'état brut et la pièce à l'état final induit l'existence d'un ou plusieurs TT. Il existe de nombreux types de Traitement Thermique : TT de trempe plus revenu, TT de stabilisation, etc. Ils entraînent à la fois des modifications de la dureté et de la morphologie de la pièce (déformations).

3 – Détermination des usinages :

Il s'agit de déterminer les usinages nécessaires à la réalisation de chacune des entités, en fonction de leurs paramètres dimensionnels et technologiques (états de surface, tolérances, positions, etc). Pour réaliser un alésage de qualité 6, un gammiste décide par exemple de procéder de la manière suivante : première opération de pointage suivie d'une ébauche en perçage et d'une finition à l'alésoir.

4 – Choix des outils et des machines :

En fonction de la nature de chaque usinage et des paramètres de l'entité correspondante, il s'agit de leur associer :

- un outil pour le réaliser,
- une machine sur laquelle l'outil puisse se monter et dont les propriétés de puissance, vitesse, etc, permettent d'effectuer le travail en toute sécurité.

Ceci nécessite entre autres une connaissance approfondie des moyens dont dispose l'entreprise.

5 – Détermination des appuis :

Cette tâche consiste à choisir les positions d'ablocages de la pièce sur les machines. Il s'agit non seulement de déterminer des orientations particulières de la pièce, mais aussi d'étudier la faisabilité de l'appareil d'ablocage correspondant, puis de le concevoir entièrement.

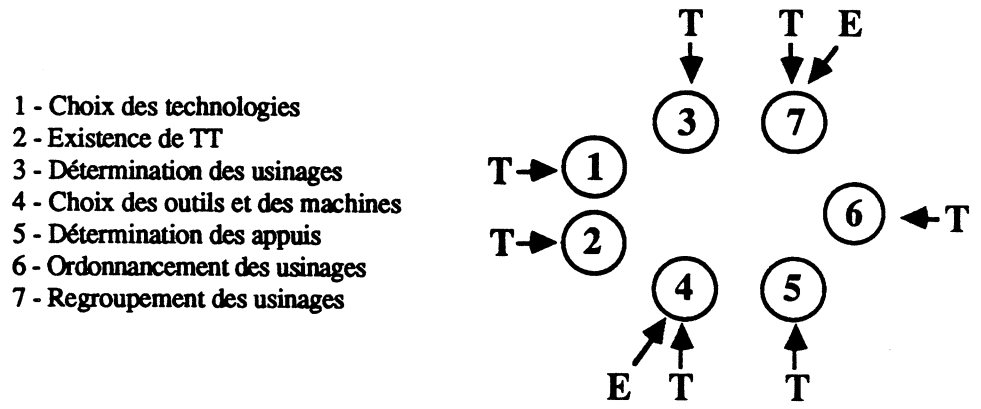


Figure 1.6 : Influence des contraintes technologiques et économiques sur la génération des Gammes d'Usinage

6 – Ordonnancement des usinages : Une fois tous les usinages déterminés, il faut les ordonnancer suivant un ordre logique. Les usinages associés à une même entité sont déjà ordonnés, mais ce n'est pas le cas pour des usinages d'entités différentes. Les contraintes qui influent sur cet ordonnancement sont d'ordre technologique comme dans le cas des alésages sécants de la figure 1.5, ou d'ordre économique quand il s'agit de générer les trajets d'outil minima.

7 – Regroupement des usinages : Comme nous l'avons déjà exposé, il s'agit de regrouper au maximum les usinages qui font appel aux mêmes ressources, afin de minimiser les pertes de temps, tout en respectant les contraintes technologiques liées aux usinages.

La figure 1.6 résume l'influence des contraintes technologiques et économiques sur chacune de ces sous-tâches.

Au travers de ce découpage du travail du gammiste, nous pouvons apprécier la quantité et la nature diverse des connaissances qu'il doit posséder. Il est ainsi plus facile de mesurer l'importance de l'expérience d'un gammiste et les raisons pour lesquelles il lui est souvent difficile d'expliquer le raisonnement plus ou moins intuitif qu'il a suivi. Ces connaissances sont d'autant plus grandes au sein de grosses entreprises où les moyens disponibles sont énormes (100 machines, 10000 outils, etc) ; toutes ces sous-tâches sont alors réparties entre divers spécialistes : les **outilleurs** (chargés de la sélection des outils et des machines), les **abloqueurs** (chargés de la conception des montages d'usinage), et les **gammistes** (ils décident des usinages, les ordonnent et les regroupent). Une telle organisation du travail nécessite cependant une collaboration très étroite entre

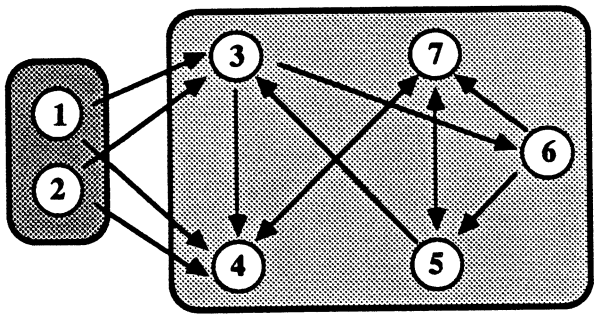


Figure 1.7 : Interdépendances entre les sous-tâches de la conception de GU

ces différents partenaires, car toutes ces sous-tâches sont fortement dépendantes les unes des autres.

2.3 Interdépendance des sous-tâches

Toutes les sous-tâches de la conception de Gammes d'Usinage décrites dans la section précédente sont fortement dépendantes les unes des autres. En effet, toute décision concernant l'une d'entre elles peut avoir une influence sur les décisions relatives aux autres sous-tâches. La figure 1.7 résume toutes ces relations d'interdépendance.

Certaines de ces relations sont évidentes :

- Le choix des technologies conditionne bien sûr le choix des machines et la détermination des usinages : $1 \rightarrow 3$ *et* 4.
- La détermination des usinages d'une entité influe sur l'ordonnancement des usinages de cette entité (les ébauches avant les finitions) : $3 \rightarrow 6$.
- Certains usinages particuliers requièrent l'utilisation d'outils ou de machines spécifiques : $3 \rightarrow 4$.
- La présence de TT influe notamment sur le choix des outils (ceux-ci doivent être adaptés à la dureté du matériau), et sur la détermination des usinages (il faut des usinages plus nombreux et mieux adaptés lorsque le matériau est plus dur) : $2 \rightarrow 3$ *et* 4.

D'autres relations méritent d'être illustrées par des exemples :

- Supposons que deux usinages U_1 et U_2 associés respectivement aux entités E_1 et E_2 soient regroupés du fait qu'ils sont réalisés sur une même machine. Soit U_3 un

autre usinage devant être effectué après U_1 et avant U_2, il est alors nécessaire que U_3 soit aussi regroupé avec U_1 et U_2 ; dans ce cas-là, un regroupement d'actions découle de décisions concernant l'ordonnancement, d'où $6 \rightarrow 7$.

- Lorsqu'un appui, une machine ou un outil sont déterminés pour réaliser un usinage, on cherche à regrouper avec lui ceux qui peuvent être réalisés sur le même appui, avec la même machine ou le même outil : 4 *et* $5 \rightarrow 7$.

- Pour réaliser un usinage, on ne peut s'appuyer que sur des entités qui restent à l'état brut ou qui ont déjà été usinées, d'où $6 \rightarrow 5$.

- Il existe des gammes pour lesquelles aucune entité de la pièce ne peut servir d'appui potentiel. Il faut usiner alors un ou des appuis *dynamiques*, ces appuis ne correspondant pas à des entités figurant dans la description de la pièce. La détermination des appuis a dans ce cas une influence sur la détermination des usinages de la gamme : $5 \rightarrow 3$.

- Des regroupements d'usinages peuvent imposer un appui particulier ($7 \rightarrow 5$). Il suffit de considérer un alésage débouchant avec un lamage à une de ses extrémités. Les deux faces sur lesquelles débouche l'alésage peuvent servir d'appui potentiel pour le réaliser, mais le fait de regrouper l'usinage du lamage avec celui de l'alésage élimine la face ou débouche le lamage.

- Le même phénomène est possible avec les machines ou les outils ($7 \rightarrow 4$). Supposons que deux machines M_1 et M_2 soient a priori retenues pour réaliser l'usinage U_1, et qu'un autre usinage U_2 ne puisse être effectué que sur la machine M_1. Le fait de regrouper les deux usinages conduit à éliminer M_2 pour usiner U_1.

2.4 Hiérarchie entre sous-tâches

L'étude précédente nous permet de dégager une certaine hiérarchie entre les sous-tâches de la conception de Gammes d'Usinage. Il apparaît en effet que les sous-tâches 1 et 2, à savoir le *choix des technologies* et l'*existence des TT*, contraignent les décisions prises lors des autres sous-tâches, sans subir en retour une influence quelconque de leur part. En effet, les choix qui y sont effectués sont **globaux** et influent sur la structure des gammes à un niveau élevé. Tandis que toutes les décisions prises lors des autres sous-tâches concernent des aspects **locaux**, liés à des usinages ou des groupes d'usinages particuliers.

3 Les approches d'automatisation

Nous avons vu que la conception de gammes est l'activité de base de l'industrie mécanique, à partir de laquelle sont conduites toutes les approches de gestion et d'organisation. Or, aussi étonnant que cela puisse paraître, voilà à peine une vingtaine d'années, avec l'avènement de l'informatique, qu'ont débuté des travaux visant à dégager des méthodologies d'élaboration de gammes, dans le but d'automatiser cette activité.

Nous avons exposé aussi l'aspect non algorithmique du problème de la conception de gammes ; le processus d'élaboration n'est pas linéaire et fait appel à beaucoup de paramètres de natures diverses qui doivent être considérés en même temps. L'automatisation de cette activité s'est donc avéré être un problème délicat, et il n'existe pas encore aujourd'hui de système général qui soit satisfaisant. Certains sont pourtant utilisés dans l'industrie, mais se limitent à des domaines relativement restreints et semblent difficiles à généraliser.

Les premiers systèmes conçus avaient pour but d'aider le gammiste au cours de son travail. Plus récemment s'est développé le besoin d'automatiser entièrement le processus de production, de la conception à la fabrication, en limitant au maximum les interventions humaines. Nous discutons plus en détail cet aspect dans le chapitre 2, consacré à l'étude de la conception de gammes dans un contexte CIM (Computer Integrated Manufacturing). Les recherches débouchèrent néammoins sur deux approches opposées, suivant la manière dont le problème a été abordé : l'approche **variante** et l'approche **générative**.

3.1 L'approche variante

Cette approche se fonde sur la notion d'analogie qui peut exister entre deux problèmes. Lorsqu'une telle ressemblance existe, il suffit d'adapter la solution d'un des deux problèmes pour résoudre l'autre. Utiliser ce principe d'analogie pour générer une gamme consiste donc dans un premier temps à retrouver une gamme existante générée pour une pièce similaire, puis à la modifier pour l'adapter à la nouvelle pièce.

La **Technologie de Groupe** (TG) est une des applications de ce principe à la génération de Gammes d'Usinage. Elle consiste à répertorier des familles de pièces standard auxquelles sont associés des gammes ou des squelettes de gammes standard. Un système de codage calcule pour chacune de ces familles un code TG, ainsi que pour toute nouvelle pièce que le système doit traiter, en se fondant sur des critères dimen-

sionnels et morphologiques. Le système utilise et interprète ces codes pour retrouver et associer une gamme ou des gammes standard à une nouvelle pièce. Il reste encore à compléter ces squelettes ou à modifier ces gammes afin de les adapter si besoin est à la nouvelle pièce. Cette seconde étape du processus est rarement automatique ; le système se comporte le plus souvent comme un éditeur de texte évolué qui aide l'utilisateur à modifier et à assembler les gammes selon un mode interactif et conversationnel.

Un exemple type de système par variante est le système CAPP développé au milieu des années 70 par le CAM-I (Computer Aided Manufacturing - International), afin de démontrer la faisabilité d'un système d'aide à la conception de gammes par ordinateur. Ce système a été entre autre modifié et adapté par la suite par Lockheed-Georgia sous le nom de GENPLAN. Citons aussi les systèmes TAUPROG [Tot 85], IPROS [Fin 87], DCLASS de Brigham Young's University. Il existe en fait dans l'industrie une multitude de *"systèmes maisons"* conçus suivant cette approche, chacun ayant ses propres systèmes de codage et ses familles de pièces, représentatives des travaux qui y sont menés.

3.2 L'approche générative

Contrairement aux systèmes par variante, les systèmes conçus suivant les concepts de l'approche générative synthétisent entièrement les gammes pour les pièces qui leur sont proposées, sans préjuger de leur forme. L'hypothèse de base de ces sytèmes repose sur la possibilité de communiquer et de faire comprendre à un programme informatique ce que réalise le gammiste au cours de son travail. Il ne s'agit pas ici de classer et de mémoriser des gammes standard, mais plutôt d'utiliser des connaissances sur les possibilités des ressources disponibles (machines, outils, etc) et sur les règles de fabrication, afin de générer une gamme spécifique pour chaque nouvelle pièce. Cette synthèse s'appuie sur des algorithmes sophistiqués capables de prendre les décisions adéquates aux bons moments à partir des descriptions des pièces et des descriptions des ressources disponibles dans les ateliers.

Apparus à la fin des années 70, les premiers systèmes génératifs utilisaient la technique alors connue des *tables de décisions.* Une table de décision est une représentation matricielle qui revient à coder des règles stipulant les opérations à effectuer en fonction de conditions sur la pièce, les ressources, etc. Les systèmes XPS-I du CAM-I, AUTAP de l'Université d'Aix-La-Chapelle, ICAPP de l'Université de Manchester sont des exemples de systèmes qui utilisent cette technique.

Les recherches se sont orientées ensuite vers les méthodologies d'Intelligence Artificielle,

qui permettent de coder les connaissances concernant un problème particulier au sein de bases de connaissances. Cette approche semble aujourd'hui la plus prometteuse en ce qui concerne la réalisation de systèmes de conception automatique de Gammes d'Usinage. Nous analysons plus en détail les problèmes IA liés à la conception de GU dans le chapitre 3. Nous pouvons déjà cependant citer les systèmes TOM [Mat 82] de l'Université de Tokyo, EXCAP [Wri 87] de l'université de Manchester, GARI [Des 81] et PROPEL [Tsa 87] développés respectivement à l'INPG et à ITMI.

Devant l'intérêt grandissant porté à l'approche générative, certains systèmes par variante ont essayé d'intégrer les possibilités des systèmes génératifs. Sont ainsi apparus des systèmes hybrides, tels les dernières versions de GENPLAN [Tul 87] de Lockheed-Georgia.

3.3 Avantages et inconvénients des deux approches

3.3.1 Approche variante

L'approche variante a essentiellement les deux **avantages** suivants :

- **Rapidité du processus de conception :** le fait d'exploiter des solutions connues et mémorisées permet de réduire considérablement la durée et la difficulté du processus complet de génération de gammes.
- **Gestion efficace des gammes :** ces systèmes intègrent dans la plupart des cas des fonctionalités d'organisation et de gestion des gammes qu'ils manipulent, permettant des accès et des mises à jour rapides.

En revanche, de nombreux **inconvénients** sont inhérents à cette approche :

- **Complexité du concept d'analogie :** comment en effet estimer la similitude pouvant exister entre deux problèmes différents ? Ainsi, dans le domaine des Gammes d'Usinage, il est fréquent de rencontrer des pièces pratiquement identiques qui admettent pourtant des gammes totalement différentes ; les raisons peuvent se résumer à une simple question de matière, ou à une relation de positionnement différente entre deux entités.
- **Travail préliminaire exhorbitant :** avant que le système soit opérationnel, il faut en effet commencer par retenir les critères d'analogie entre pièces, choisir un système de codage adéquat, et puis surtout établir les familles de pièces et construire les gammes standard qui leur sont associées.

- **Systèmes difficiles à maintenir :** du fait de la quantité énorme de données qu'ils manipulent (pièces, gammes, etc), et malgré l'utilisation d'outils efficaces de gestion, les mises à jour des familles de pièces et des gammes standard doivent être continuelles.

- **Systèmes difficiles à étendre :** les systèmes de codage gèlent en quelque sorte la quantité de connaissances qu'ils contiennent implicitement. En conséquence, intégrer des concepts qui n'avaient pas été prévus dès le départ (une nouvelle technologie par exemple), ou adapter un système à une entreprise différente est une tâche quasiment impossible.

- **Automatisation complète difficile :** quelles méthodes utiliser et quels critères retenir pour automatiser la phase de modification et d'adaptation des gammes standard[2] ? De ce fait, la qualité des résultats des systèmes actuels dépend encore trop de la qualité de l'expertise de ceux qui les utilisent.

- **Pas de solution originale :** chaque gamme solution dérive nécessairement d'une gamme existante, ce qui écarte dès le départ toute solution originale.

3.3.2 Approche générative

Malgré quelques inconvénients, les avantages liés à cette approche sont déterminants et prometteurs quant à la réalisation de systèmes automatiques et efficaces. Les principaux inconvénients sont liés aux difficultés habituelles qu'il faut surmonter pour réaliser des systèmes fondés sur une codification des connaissances :

- **Problème du transfert de connaissances :** la puissance des systèmes génératifs repose en effet sur la qualité et la complétude des connaissances qu'ils utilisent (ceci est d'autant plus vrai pour les systèmes fondés sur des concepts IA). Tout repose donc sur le transfert d'expertise des gammistes vers les systèmes (problème d'ingéniérie de la connaissance). Les deux raisons suivantes rendent en général cette tâche difficile :

  - **Manque de coopération :** des blocages psychologiques et le plus souvent inconscients empêchent l'expert de transmettre son savoir à des personnes étrangères, a fortiori à une machine.

[2]Nous verrons dans le chapitre 4 que la modification de gammes ne peut se limiter à un simple problème d'édition, du fait de l'**interdépendance** entre les contraintes sur lesquelles repose l'optimalité des gammes.

  - **Manque de méthodologie :** il est difficile d'expliciter et de formaliser les raisonnements utilisés inconsciemment et de manière automatique par les experts.

- **Systèmes plus coûteux :** les systèmes génératifs sont plus coûteux à mettre en œuvre du fait de leur plus grande complexité et donc des difficultés plus grandes à les concevoir.

- **Manque de "mémoire" :** contrairement à un système basé sur une approche variante qui conserve en mémoire les gammes conçues pour chacune des pièces qui lui sont soumises, un système purement génératif recommence entièrement son travail d'élaboration de gamme pour une pièce qu'il a pourtant déjà traitée.

Les principaux **avantages** liés à l'approche générative sont les suivants :

- **Automatisation complète envisageable :** l'approche générative semble la plus capable de répondre au défi de l'automatisation complète du processus d'élaboration des Gammes d'Usinage. Un système qui limite au maximum l'interaction humaine permet de s'affranchir des connaissances complexes et nombreuses nécessaires pour concevoir des gammes. La qualité des résultats ne dépend plus dans ce cas de la qualité des connaissances de ceux qui utilisent le système, mais de la qualité des connaissances qui y sont codées une fois pour toutes.

- **Flexibilité plus grande :** il est plus facile d'adapter un système génératif aux besoins de l'entreprise qui l'utilise ; il suffit seulement pour cela de modifier les connaissances sur lesquelles il se base.

- **Généralité plus grande :** à l'opposé d'un système par variante, un système génératif ne fait aucun a priori sur les gammes des pièces qu'il a à traiter ; il en résulte que ces systèmes s'adressent à des classes de pièces plus larges que ceux qui se basent sur une approche variante.

3.4 Conclusion

L'approche variante cherche à modéliser l'expérience des gammistes au travers des résultats de leurs travaux, tandis que l'approche générative tend à modéliser cette expérience au travers du raisonnement qui conduit aux gammes. Ceci explique notamment pourquoi un système génératif est plus puissant, au sens où il est capable de

traiter des pièces *"non prévues"* lors de sa conception, contrairement à un système par variante.

En outre, bien que plus coûteux à concevoir et à mettre en œuvre, les systèmes génératifs, et surtout ceux qui font appel à des méthodologies IA, sont les plus prometteurs en ce qui concerne la réalisation de systèmes entièrement automatiques de Gammes d'Usinage. C'est la raison pour laquelle les recherches actuelles s'orientent toutes vers l'étude et la réalisation de tels systèmes, afin de relever le défi de l'automatisation complète des processus de fabrication.

2

Chapitre 2

La conception de Gammes d'Usinage dans un contexte CIM

Nous avons vu dans le 1er chapitre que le processus de fabrication d'un produit se représente sous la forme de la trilogie :

Conception → Elaboration de Gammes → Fabrication.

L'avènement de l'automatique et de l'informatique a permis la réalisation dans un premier temps de systèmes d'aide pour chacune des étapes de ce processus. L'idée d'intégrer tous ces systèmes les uns aux autres est apparue au début des années 80, suite au développement des techniques de programmation et aux possibilités de plus en plus grandes des ordinateurs (puissance de calcul, capacité de mémorisation). Le terme **CIM**, initiales de Computer Integrated Manufacturing, a été spécialement créé pour caractériser les systèmes qui visent une telle intégration. L'enjeu économique lié à l'apparition et à l'utilisation de tels systèmes est important. En effet, ces derniers permettraient d'éliminer les interventions humaines qui interviennent à tous les stades du processus de fabrication, entraînant par là-même des gains de temps appréciables et donc une augmentation de la productivité.

Nous consacrons donc ce chapitre au problème de la conception d'un système CIM. Le paragraphe 1 est un bref état de l'art des systèmes d'aide réalisés en CFAO mécanique pour chacune des étapes du processus de fabrication. Nous étudions dans le paragraphe 2 les solutions envisagées et les problèmes rencontrés pour les intégrer. Nous proposons enfin dans le dernier paragraphe les concepts de la Cotation Volumique,

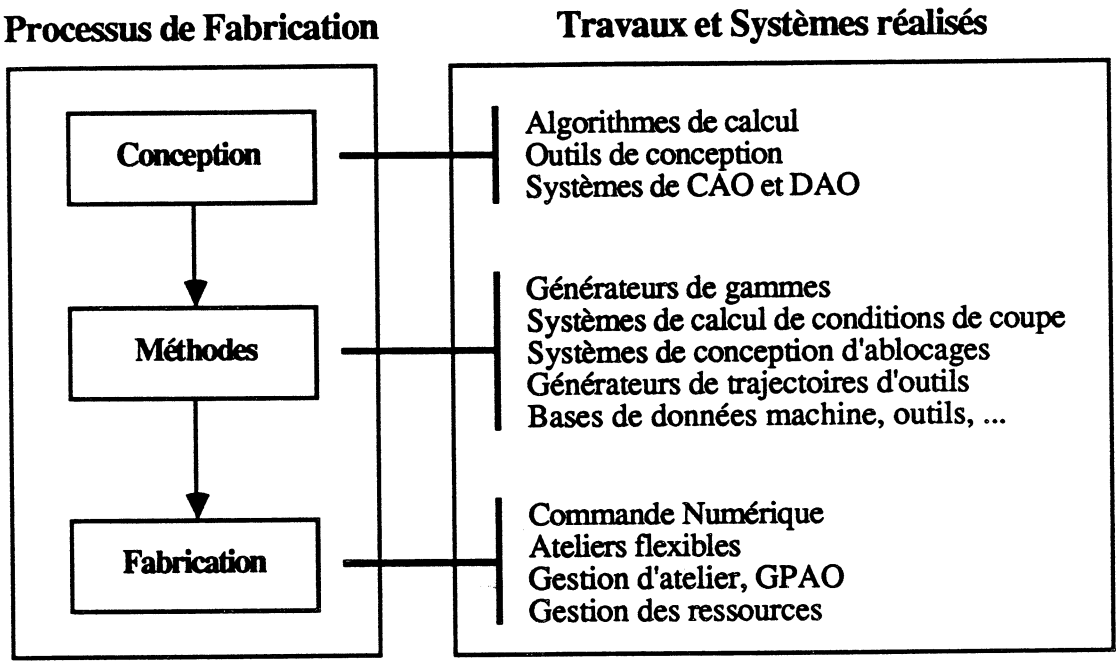


Figure 2.1 : Approches d'automatisation du processus de fabrication

concepts qui répondent tout-à-fait aux besoins d'un système CIM mécanique, et qui sont à la base du raisonnement du générateur de Gammes d'Usinage que nous avons développé : GAGMAT.

1 Etat de l'art en CFAO Mécanique

Toutes les étapes du processus de fabrication ont été abordées au moyen de l'informatique ou de l'automatique, mais toujours de manière plus ou moins indépendante. Ces recherches ont donné naissance à une pléthore de systèmes d'aide, mais le plus souvent ponctuels et déconnectés les uns des autres (cf. figure 2.1). Nous donnons dans ce paragraphe un bref aperçu historique des travaux et des systèmes mis en œuvre pour automatiser chacune des phases du processus de fabrication : les phases conception, méthode et fabrication.

1.1 Phase Conception

L'informatique a permis de développer de nombreux outils de calcul dont se servent les concepteurs : calculs de résistance, calculs de structure, calculs de cinématique,

etc. Tous ces outils extrêmement spécialisés correspondent à des algorithmes connus et bien formalisés. Leur automatisation a permis de simplifier et d'accélérer certaines étapes difficiles et fastidieuses des processus de conception.

Les systèmes d'aide à la conception les plus connus du grand public sont les systèmes de **CAO** et de **DAO**. Les premiers travaux les concernant ont commencé au début des années 60. Il s'agissait initialement de mémoriser les plans ; les premiers systèmes qui virent le jour se basaient par conséquent sur les principes des dessins en 2 dimensions. Or, si le plan, mode de représentation traditionnel en mécanique, est le mieux adapté à la technologie du calque et du tire-ligne, le langage qui le sous-tend n'est certainement pas le plus pertinent en ce qui concerne la construction d'un système CIM. En effet, un plan est une simple juxtaposition de traits, de points et de textes (cotes et tolérances), et la plupart des informations qu'il contient sont implicites (il faut "savoir lire" un plan). Ont émergé par la suite des modeleurs 3D à vocation géométrique. Ces modeleurs apportent un plus indéniable ; ils permettent notamment d'assurer continûment la cohérence des différentes vues lors de la construction des pièces, et certains ont même la possibilité de calculer très simplement des caractéristiques liées à leur géométrie, telles que volumes, surfaces, masses, centres de gravité, etc. On distingue essentiellement trois familles de modeleurs 3D suivant le mode de représentation qu'ils utilisent [Tro 86] :

- Les modeleurs **BREP** (Boundary REPresentation) par représentation des frontières : un objet est représenté par son enveloppe extérieure en termes de faces, elles-mêmes représentées par les arêtes qui les délimitent et des paramètres précisant la position de la matière par rapport à ces faces, une arête étant à son tour définie par ses points extrémités.
- Les modeleurs à **balayage** : les objets sont obtenus par balayage de surfaces suivant des trajectoires. Les surfaces peuvent être simples (faces planes) ou très complexes (surfaces polynômiales).
- Les modeleurs de type **CSG** (Constructive Solid Geometry) : un objet est ici considéré comme un assemblage de volumes élémentaires construits à l'aide d'opérateurs ensemblistes (unions, intersections, différences).

L'utilisation de ces systèmes pour la mécanique a permis d'enrichir ces représentations. Certains systèmes incluent notamment une représentation des tolérances de fabrication. Requicha [Req 83] a d'ailleurs tenté de formaliser le problème du tolérancement des pièces mécaniques, afin de dégager une méthodologie de tolérancement automatique. Mais ce problème, bien qu'envisagé par d'autres systèmes (MCAE [Gos 88]), n'a pas

encore été résolu aujourd'hui. Tous ces systèmes CAO 3D sont toutefois très répandus aujourd'hui et utilisés dans l'industrie. Bien que cela puisse paraître paradoxal, ces modeleurs n'ont cependant pas apporté de progrès décisifs par rapport à l'approche graphique, en mécanique des mécanismes. En effet, leur utilisation est essentiellement axée sur l'édition et la mémorisation de plans, d'où le terme DAO (Dessin Assisté par Ordinateur), souvent usité pour les caractériser. De ce fait, les gammistes doivent encore aujourd'hui se livrer à un travail **d'interprétation préalable** pour passer de la définition des pièces au stade de la fabrication.

Le problème clé de la conception reste cependant le passage de la spécification des besoins d'un produit, ou plus exactement des fonctions qu'il doit réaliser, à sa définition complète et utilisable pour la suite du processus de fabrication. Ce problème n'est pas spécifique à la mécanique. De nombreuses recherches ont été entreprises depuis le début des années 70, mais très peu ont abouti dans l'industrie. Plusieurs approches fondées sur des méthodes d'Intelligence Artificielle ont été développées. La première [Fre 71] [Ing 87], essaie d'inférer les formes des objets à partir des fonctions qu'ils doivent satisfaire (*raisonnement fonctionnel*) ; la démarche suivie consiste à décomposer les fonctions à satisfaire en fonctions élémentaires ; la solution finale est un assemblage d'objets différents qui satisfont une ou plusieurs des fonctions requises. La deuxième approche consiste à coder le savoir-faire de la conception pour des domaines particuliers ; par exemple, TROPIC [Lat 77] utilise des "règles de construction de modèles" qui permettent de décomposer un problème en sous-problèmes plus simples. Les difficultés essentielles de ces deux approches reposent sur les interdépendances qui peuvent exister entre fonctions et objets dans le premier cas, ou entre sous-problèmes dans le deuxième. Les travaux sont encore au stade de la recherche dans le domaine de la mécanique, et semblent progresser lentement du fait de la complexité du raisonnement à tenir, et du nombre important des types de fonctions et des types de solutions qui peuvent intervenir au cours de la conception d'une pièce.

1.2 Phase Méthodes

Cette phase du processus, dont fait partie l'élaboration des Gammes d'Usinage, constitue le lien nécessaire entre la conception et la fabrication des pièces. De nombreux outils ont été développés grâce à l'informatique pour aider les gammistes. Nous ne reviendrons pas sur les systèmes de génération de gammes que nous avons présentés au chapitre précédent, et dont le but est de construire et d'organiser la suite des opérations à effectuer pour fabriquer les pièces mécaniques.

Mais le travail des gammistes ne se limite pas au séquencement des usinages. Avant qu'une Gamme d'Usinage soit opérationnelle et puisse être envoyée dans les ateliers, chacun de ses usinages doit être précisé dans le moindre détail. Il faut en particulier choisir les machines effectivement utilisées, sélectionner l'outil associé à chaque usinage, calculer ses conditions de coupe (vitesse, avance, prise de matière), générer les trajets effectués par chaque outil, etc. D'autres outils informatiques ont par conséquent été créés pour aider les gammistes à accomplir toutes ces tâches. Citons par exemple :

- **Les bases de données matières, outils, machines :** elles permettent de mémoriser des quantités énormes de connaissances sur les caractéristiques et propriétés de toutes les ressources disponibles au sein de l'entreprise. Les fonctionalités des systèmes de bases de données permettent aux gammistes d'accéder facilement et rapidement à toutes ces informations.
- **Les logiciels de calculs de conditions de coupe** (TOOL [Too 83]) **:** interfacés avec les bases de données précédentes, ces logiciels permettent toutes sortes de manipulations :
  - la sélection d'outils connaissant certaines contraintes sur leur conditions de travail (type de matière, machine utilisée, prise de matière désirée, etc),
  - le calcul des conditions de coupe (vitesse, avance, prise de matière, etc) pour un outil connaissant la machine, la matière, le type de travail (en bout, sur flanc, etc).
- **Les générateurs de code CN :** certains systèmes de CAO intègrent la possibilité de générer automatiquement, à partir de la géométrie des pièces, le programme de Commande Numérique qui correspond à des trajets d'outil. Ceci évite notamment l'écriture laborieuse des instructions CN pour des trajets complexes.

1.3 Phase Fabrication

Le progrès le plus important concernant les efforts d'automatisation en fabrication tient à l'apparition de la **Commande Numérique (CN)**. Les débuts de la CN remontent au début des années 50, et sont liés au besoin de produire des surfaces complexes, notamment dans le domaine de l'aéronautique. La CN permet d'éloigner l'homme de la machine, et donc d'éliminer les erreurs qui peuvent intervenir durant les manipulations nombreuses et répétées qu'il faut effectuer pour réaliser des profils complexes. Par conséquent, une fois les programmes CN au point, le taux de pièces rejetées après contrôle diminue et la rentabilité s'améliore. L'utilisation de la CN a été étendue par la

suite à toutes les technologies (perçage, tournage, fraisage), et à la programmation des trajectoires simples, comme les parcours point à point ou les contournages. Un programme CN est une suite d'instructions élémentaires qui correspondent à des ordres de réglages successifs des machines : déplacements élémentaires, vitesses, avances, ordres de changement d'outil. Un programme CN est par conséquent non seulement spécifique à la pièce, mais aussi au modèle de machine utilisé. Ceci explique, outre le nombre de langages de CN utilisés aujourd'hui dans l'industrie[1], le manque de portabilité des programmes CN[2].

Un autre aspect de la fabrication concerne la gestion de production, dénomination qui regroupe la gestion des ateliers, la gestion des machines, des outils, la gestion des stocks, les calculs des besoins en matières, le calcul des capacités de production, la planification des ateliers, etc. Ce vaste domaine a été l'un des premiers abordés au moyen de l'informatique, et tous les travaux effectués se regroupent sous le sigle GPAO (Gestion de Production Assistée par Ordinateur). Si la gestion de production a très peu d'influence sur la génération des gammes, ces dernières constituent en revanche les entités de base sur lesquelles reposent toutes les approches de gestion de l'entreprise. Les techniques informatiques utilisées pour aborder ces problèmes vont des bases de données en ce qui concerne les approches de gestion, à la Recherche Opérationnelle et même à l'IA [Fox 83] [Del 86] [Ver 88] en ce qui concerne les problèmes de planification d'activité et d'allocation de moyens de fabrication. L'intégration de tous ces systèmes de gestion et de planification est déjà bien avancée au sein des ateliers. Leur utilisation, alliée à l'apparition des Centres d'Usinage, machines capable d'effectuer consécutivement un plus grand nombre d'usinages que les machines traditionnelles, a permis l'éclosion d'ateliers entièrement automatisés et relativement opérationnels aujourd'hui : les **Ateliers Flexibles**.

2 Essais d'intégration, problèmes rencontrés

Réaliser un système complet de CFAO revient à intégrer tous les types de systèmes dont nous avons parlé dans la section précédente. L'état d'avancement des recherches n'est pas suffisant au niveau de la conception fonctionnelle, pour laisser espérer l'apparition prochaine d'un système allant de la spécification des besoins des produits à leur fabrication. Des systèmes intégrant CAO, génération automatique de gammes et passage

[1] Chaque constructeur de machine-outil développe ses propres langages de Commande Numérique

[2] Il existe des codes intermédiaires et des post-processeurs qui permettent de programmer dans des langages plus généraux que les codes CN, mais alors le code généré n'est pas optimum.

Figure 2.2 : Des problèmes d'interfaçage à résoudre !

à la Commande Numérique ont tout de même été envisagés. Ils se sont cependant heurtés à des problèmes d'interfaçage cruciaux qui n'ont pas encore été à notre avis convenablement résolus aujourd'hui (figure 2.2) :

- pour réaliser le lien entre la *CAO* et les *générateurs de Gammes d'Usinage*,
- pour passer des *Gammes d'Usinage* aux *programmes CN*.

Étudions un peu plus en détail les raisons de ces problèmes d'interfaçage, ainsi que les solutions envisagées pour les surmonter.

2.1 Interface CAO → Générateur de Gammes

Le problème s'exprime de façon très simple : *comment passer de la représentation CAO d'une pièce aux informations nécessaires pour générer automatiquement la Gamme d'Usinage correspondante ?* Comme nous l'avons déjà remarqué, même les plus récents modeleurs volumiques 3D requièrent un travail d'interprétation pour que les gammistes puissent générer les gammes. En effet, les structures de données CAO contiennent des informations de très bas niveau sur la géométrie et la topologie des pièces, et la plupart des informations dont ont besoin les gammistes sont implicites.

2.1.1 Les Entités de Fabrication

Il est communément admis aujourd'hui que la génération automatique de Gammes d'Usinage repose sur l'identification préalable d'**Entités de Fabrication** : alésages, poches, rainures, etc. Tous les concepteurs de générateurs de gammes ont ainsi développé leur propre langage de description des pièces, où celles-ci sont représentées sous la forme d'ensembles d'entités de fabrication. La démarche généralement suivie est de leur associer dans un premier temps des processus de fabrication, compte tenu de leurs paramètres dimensionnels et technologiques, puis de mélanger et d'organiser tous ces processus entre eux.

2.1.2 Des systèmes d'extraction d'entités

Pour réaliser une interface *CAO → Générateur de Gammes*, il était donc naturel d'essayer d'exploiter les représentations CAO 3D pour en extraire les informations nécessaires, et en particulier pour identifier les entités de fabrication :

- Kyprianou [Kyp 83] génère des codes de Technologie de Groupe à partir d'une représentation BREP des pièces. Son système se base sur les principes de la reconnaissance de formes syntaxiques pour localiser les protusions et dépressions des pièces ; ceci lui permet ensuite d'identifier le profil général de la pièce et de générer le code TG correspondant.
- Henderson [Hen 84] a développé une méthode d'extraction des entités qui repose sur l'utilisation de règles de Système Expert capables de les reconnaître. Une règle différente est associée à chaque type d'entité. Le travail consiste alors à tester une à une la présence de chaque type d'entité.
- Le système de Joshi et Chang [Jos 87] associe dans un premier temps à chaque pièce un graphe appelé AAG (Attributed Adjacency Graph), qui représente les relations d'adjacence entre toutes les faces. Il se base ensuite sur les propriétes de ce graphe et des AAG associés à chaque type d'entité (linéarité, cycles, etc) pour identifier ces dernières dans la pièce.

2.1.3 Problème d'ambiguïté d'interprétation

Qu'il soit manuel ou automatique, ce travail d'identification des entités se heurte à un problème d'**ambiguïté d'interprétation**. En effet, les informations géométriques et topologiques sont insuffisantes dans beaucoup de cas pour identifier les entités qui doivent être effectivement usinées. Ainsi, il arrive souvent que plusieurs types d'entités puissent être associés à une même forme. La pièce représentée sur la figure **2.3** peut par exemple être décrite à l'aide d'une *rainure* ou de deux *tenons*. Autre exemple, dans le cas de deux cylindres concentriques, faut-il identifier deux *alésages*, ou un *alésage* et son *lamage* ? Suivant les cas, les processus pour usiner les entités étant totalement différents, les gammes sont elles aussi différentes. Comment savoir alors si le bon choix a été fait ?

2.2 Interface Générateur de Gammes → programmes CN

Ici aussi le problème se pose de façon claire : *comment passer automatiquement d'une gamme exprimée sous la forme d'un ensemble structuré d'usinages au programme CN*

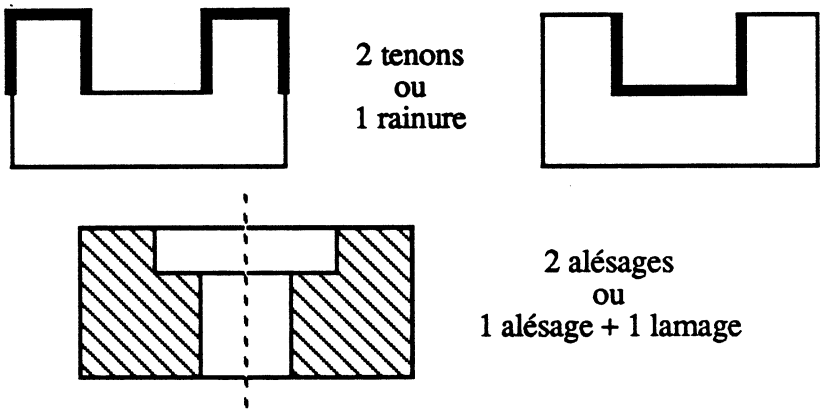


Figure 2.3 : Quelles entités faut-il reconnaître ?

correspondant ?

2.2.1 Une programmation par Macros

Un système d'élaboration automatique de gammes se basant sur une description des pièces décomposées en entités, chaque usinage des gammes générées concerne une entité de fabrication. Le trajet de l'outil qui correspond à un usinage est donc étroitement lié au type d'entité associé. C'est la raison pour laquelle s'est développé un mode de programmation à l'aide de *Macros*, sortes de procédures écrites en langage CN, associées à chaque type d'entité, qu'il suffit de paramétrer convenablement à partir de la description de l'entité (positions, côtes, tolérances), et des données technologiques de l'usinage (outil, vitesse, avance, etc). Cette programmation en termes de *Macros* se situe à un niveau d'abstraction plus élevé que les trajets élémentaires des outils, et peut s'apparenter à la programmation *niveau tâche* en robotique (cf. [Lau 87]). Une telle programmation possède deux avantages essentiels : elle est

- **Plus facile à utiliser :** l'écriture d'un programme en langage CN est un travail laborieux.
- **Indépendante des langages CN :** il suffit de disposer pour chaque *Macro* des codes qui correspondent à chacun des langages ; les programmes sont ainsi plus facilement adaptables d'une machine à l'autre.

Certains constructeurs de machines-outils ont déjà intégré la possibilité de programmer les machines directement via de telles Macros.

Le passage automatique d'une Gamme d'Usinage au programme CN est cependant confronté à deux problèmes essentiels qui traduisent une incompatibilité entre les manières de décrire les pièces et ces concepts de *Macros*. Tous deux concernent le calcul et la spécification des valeurs des paramètres des *Macros* à partir des formalismes couramment utilisés pour décrire les pièces, et qui sont basés sur des concepts de Cotation de Liaison :

- **Problème d'homogénéité :** les paramètres doivent être homogènes d'un appel de *Macro* à l'autre,
- **Problème d'optimalité :** ou comment spécifier des paramètres les moins pénalisants possible pour la fabrication ?

2.2.2 Problème d'homogénéité des paramètres

Les paramètres utilisés lors des appels de *Macros* doivent être homogènes, i.e. toujours du même type d'une entité de fabrication à une autre de même nature. Par exemple, la macro associée à l'entité de type *poche* doit toujours faire appel à des paramètres du style *longueur, largeur, hauteur, tolérance longueur*, etc. Or il est rare de trouver ces valeurs directement sur les tracés de définition des pièces, a fortiori dans les descriptions utilisées par les systèmes de génération de gammes. En effet, le système de cotation traditionnellement employé, la Cotation de Liaison, consiste à coter des faces les unes par rapport aux autres. Une entité de fabrication étant en fait un ensemble de faces de la pièce (des faces usinées simultanément), la façon de la coter ou de la décrire varie d'un cas à l'autre.

La figure **2**.4 représente plusieurs manières de coter une *poche*. Dans le premier cas, les deux faces de la *poche* sont cotées l'une par rapport à l'autre, auquel cas le paramètre *longueur* ou *largeur* est effectivement spécifié sur le dessin de définition. Dans les deux autres cas, les deux faces sont cotées indépendamment l'une de l'autre ; comment passer alors au paramètre de la Macro ?

Certes, il existe toujours un moyen de se ramener au premier cas, en effectuant une opération appelée *transfert de cotation*. Mais ces calculs sont difficiles à automatiser, et entraînent surtout des réductions importantes de tolérances qui sont pénalisantes pour la fabrication.

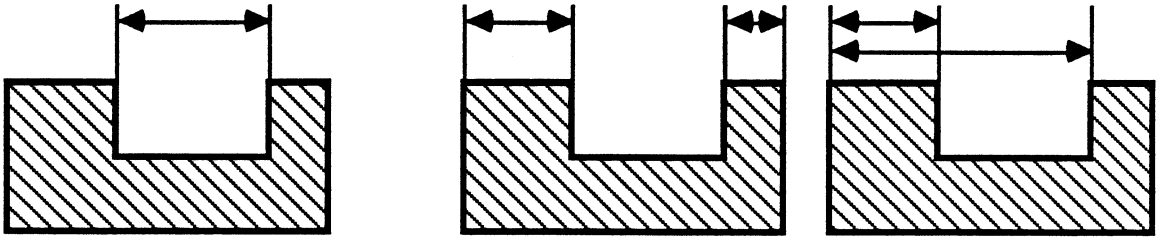


Figure 2.4 : Différentes façons de coter une *poche*

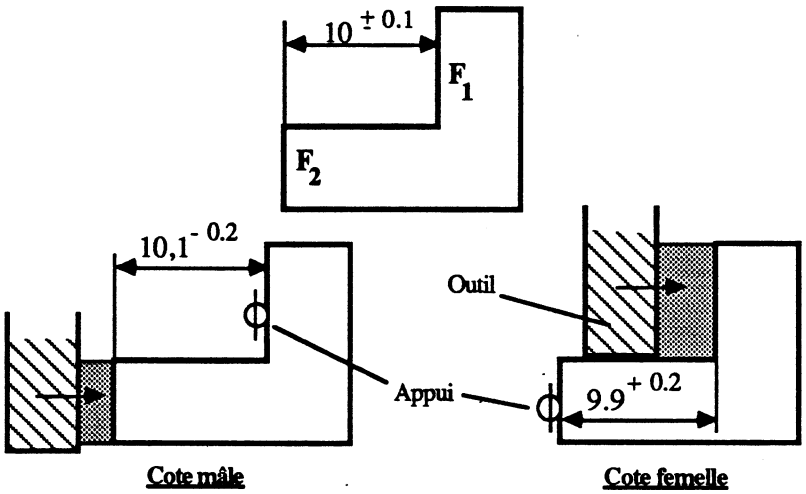


Figure 2.5 : Cote mâle ou cote femelle ?

2.2.3 Problème d'optimalité des paramètres

Afin de mieux saisir la nature de ce problème, considérons l'exemple de la figure 2.5. La cote $10^{\pm 0.1}$ est la cote donnée par le dessin de définition de la pièce qui est décrite suivant les concepts de la Cotation de Liaison. Une *cote mâle* (resp. *cote femelle*) est une cote qui diminue (resp. augmente) quand on l'usine ; il apparaît alors que suivant l'appui choisi pour l'usiner, la cote $10^{\pm 0.1}$ est soit une cote mâle, soit une cote femelle (problème de **localisation de la matière**) :

- si l'appui retenu est la face F_1, c'est une cote mâle, elle devient bonne dès que la valeur 10,1 est atteinte, et on dispose encore d'une tolérance de -0.2,
- si l'appui retenu est la face F_2, c'est une cote femelle, elle devient bonne dès que la valeur 9,9 est atteinte, et on dispose encore d'une tolérance de $+0.2$,

Mais en général, il est difficile à un programmeur CN, et a fortiori à un système informatique, d'identifier la nature des cotes qu'il faut réaliser. Aussi, ce n'est pas la

valeur 10,1 ou la valeur 9,9 qu'il programme, mais la *cote moyenne* 10. Ce faisant, il se pénalise de la moitié de la tolérance : $-0,1$ (resp. $+0,1$) au lieu de $-0,2$ (resp. $+0,2$) dans le cas d'une cote mâle (resp. femelle). Ceci n'a pas d'incidence dans le cas d'une fabrication manuelle, car l'opérateur sur la machine sait au moment de l'usiner si une cote est mâle ou femelle, et peut alors corriger localement le paramètre du programme. Cette manipulation est en revanche impossible dans le cadre d'une fabrication automatique, en particulier au sein des ateliers flexibles.

2.3 Conclusion

Malgré tous ces problèmes d'interface, il existe aujourd'hui des systèmes CIM qui intègrent CAO, génération de gammes et programmes CN. Mais tous ne sont conçus ou ne sont vraiment efficaces que pour l'usinage d'**entités cylindriques** (dans le domaine du perçage [Mat 82] ou du tournage [Wan 87] [Phi 87]). En effet, les entités cylindriques sont à la fois :

- facilement extractables à partir de la description géométrique de la pièce → pas de problème d'ambiguïté,
- explicitement cotés sur les tracés de définition des pièces → calculs plus simples des paramètres des *Macros*, et pas de problème pour situer la matière (cylindre creux ⇒ le diamètre est une cote femelle, cylindre plein ⇒ cote mâle).

Rien n'est résolu par contre en ce qui concerne les **entités prismatiques** (rainures, poches, tenons, etc). La CAO traditionnelle, basée sur une représentation purement géométrique et topologique des pièces est inefficace. En effet, la description d'une pièce mécanique ne peut se réduire à de telles données. Non seulement la cotation, mais surtout aussi les **fonctions** qu'une pièce doit satisfaire, ont leur importance en ce qui concerne l'identification des Entités de Fabrication. Malheureusement, toutes ces informations fonctionnelles sont souvent implicites sur les dessins de définition. Comment alors faire le lien entre la conception et la fabrication ?

Avant de répondre à cette question, remarquons qu'il existe des systèmes intégrés de CFAO dans d'autres domaines que la mécanique, notamment en ce qui concerne la conception et la réalisation de VLSI. Ces systèmes s'appuient sur une représentation des circuits basée sur une identification des liaisons fonctionnelles d'abord, physiques ensuite. Il existe donc une parfaite adéquation entre un circuit intégré et son modèle informatisé. Ceci nous montre l'intérêt d'une représentation qui soit à la fois :

- **unique :** pour une intégration des systèmes à partir d'une information elle-même intégrée,

- **pertinente** à tous les stades du processus de fabrication,
- **issue des fonctionnalités des pièces.**

La notion de pertinence implique notamment que cette description fasse appel à des concepts mécaniques, car c'est avant tout de mécanique qu'il s'agit. Or c'est au travers de la cotation qu'un mécanicien exprime toutes les contraintes de fabrication. Il paraît donc primordial de disposer d'une modélisation CAO des pièces fondée sur la cotation. Mais si l'on va plus loin, il serait appréciable que cette cotation ait un lien étroit avec les fonctions des pièces, et permette ainsi de définir directement les entités de fabrication ; le passage de la CAO à la génération de gammes, et plus tard aux programmes CN serait dans ce cas grandement facilité.

3 La Cotation Volumique

3.1 Les systèmes de cotation

Bien sûr, l'essentiel du savoir-faire des bureaux d'étude et des bureaux des méthodes en ce qui concerne la conception et la manière de réaliser des pièces mécaniques, consiste en la maîtrise des phénomènes physiques, chimiques, métallurgiques, etc, qui sont mis en œuvre. Mais tous ces aspects n'apparaissent pas dans les dossiers de définition des pièces. Or, entre la définition et la fabrication effective d'une pièce intervient une étape fondamentale, la **cotation**. En effet, pour un mécanicien, une définition sans tolérances n'existe pas, il faut donc les spécifier, ainsi que des dimensions, des positions, etc, selon une norme connue de tous, appelée **système de cotation**. La manière de coter une pièce exprime à la fois des besoins de conception (que faut-il coter, par rapport à quoi, comment répartir les jeux de fonctionnement issus des études, etc ?), et des besoins de fabrication (où prendre les références, quelles valeurs utiliser pour régler les machines, etc ?).

Le problème de la cotation a été abordé a une époque où il n'était pas question d'imaginer une représentation autre que graphique. Les premières approches de cotation ont donc été fortement marquées par les conventions du dessin industriel, et ont abouti à la **Cotation de Liaison**. Une autre démarche, plus conceptuelle, a donné naissance au début des années 50 aux concepts de la **Cotation Volumique**. Dans le premier cas, on se place au niveau du graphisme ; dans le second cas, on fait un effort conceptuel supplémentaire en essayant de déduire la cotation des fonctionnalités de base des pièces, et de l'exprimer d'une manière telle qu'on saura la mesurer. Les

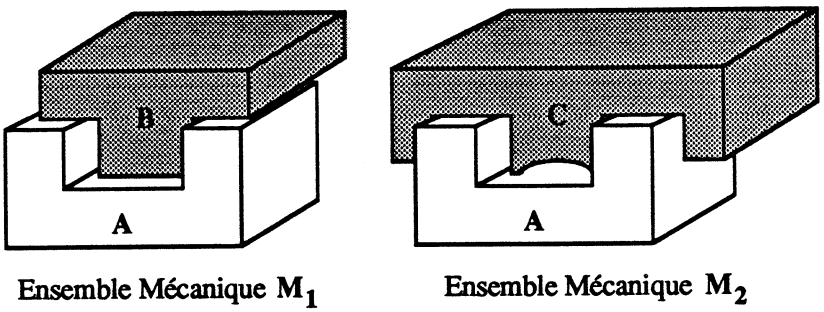


Figure 2.6 : Ensembles mécaniques

principes de base de chacun de ces systèmes de cotation concurrentiels peuvent se résumer de la manière suivante :

> **la Cotation de liaison définit les pièces par leurs surfaces limites, positionnées les unes par rapport aux autres.**
>
> **Une pièce cotée en volumique est définie par un ensemble de volumes paramétrés et positionnés suivant les conventions de la mécanique.**

Afin de mieux mesurer l'importance de la cotation pour un mécanicien, considérons l'exemple de la figure 2.6. Nous y voyons une pièce A utilisée dans deux ensembles mécaniques différents M_1 et M_2. Pour décrire la géométrie de cette pièce, tous les modeleurs dont nous avons parlé (BREP, à balayage, ou de type CSG) sont a priori équivalents, du point de vue des plans qui peuvent en être tirés, ou des calculs géométriques (volumes, centre de gravité, etc). Pourtant, du point de vue de la mécanique, les deux ensembles M_1 et M_2 impliquent pour la pièce A des **cotations différentes**, des **fabrications différentes** et des **contrôles différents**. Ces différences proviennent des contraintes liées aux fonctions de cette pièce dans chacun des mécanismes (figure 2.7) :

- **Ensemble mécanique M_1 :** au plan fonctionnel, ce sont la position et les dimensions du volume vide qui importent, car la pièce A est la partie femelle dans la liaison entre les deux pièces A et B.
- **Ensemble mécanique M_2 :** dans ce cas là, la pièce A est la partie mâle du mécanisme, et ce sont les cotes C_1 et C_2 qui sont intéressantes, ainsi que les dimensions des volumes ainsi positionnés.

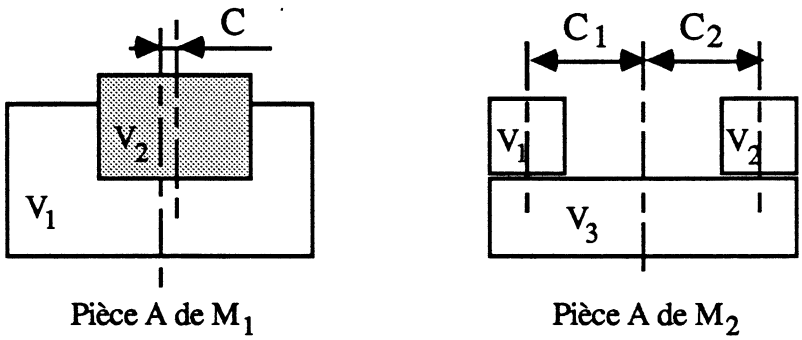


Figure 2.7 : Des besoins différents selon le mécanisme

En Cotation de Liaison, cette modélisation fonctionnelle ne transparaît pas toujours explicitement au niveau de la cotation, mais les valeurs portées sur les plans assurent néanmoins le fonctionnement des mécanismes. La Cotation Volumique dimensionne et positionne chacun des volumes cités ci-dessus ; le lien entre la fonctionnalité et la modélisation de la pièce est dans ce cas explicite.

3.2 Avantages de la Cotation Volumique

La Cotation Volumique est encore très peu employée dans l'industrie. Plusieurs raisons peuvent expliquer cet état de fait :

- La Cotation de Liaison est la plus ancienne, elle est aujourd'hui parfaitement connue et intégrée par ceux qui l'utilisent.
- La Cotation de Liaison donne satisfaction dans l'approche traditionnelle de fabrication.
- Changer de cotation nécessite une adaptation à de nouveaux concepts et un bouleversement des habitudes, tant au niveau de la conception que de la fabrication.

La Cotation Volumique possède pourtant de nombreux avantages, à la fois au niveau de la conception et de la fabrication mécanique, mais surtout, et c'est ce qui nous intéresse, dans l'optique d'un système CIM. C'est la raison pour laquelle la Cotation Volumique a été étudiée et expérimentée en fabrication au sein de la MAT, et plusieurs projets ont été lancés :

- DIMAT : un système de CAO mécanique, fondé sur les concepts de la Cotation Volumique, a vu le jour au laboratoire CPAO de l'ENSTA [Coc 87] [Dro 88] [Cha 88].

- GAGMAT : un système de génération automatique de Gammes d'Usinage, raisonnant lui aussi à partir de ces mêmes concepts, et que nous présentons au chapitre 5 de cette thèse.

3.2.1 Interfaçages simplifiés

La Cotation Volumique est à notre avis d'un intérêt primordial quant à la réalisation d'un système CIM complet. En effet, une représentation des pièces fondée sur les concepts de la Cotation Volumique élimine ou simplifie grandement tous les problèmes d'interfaces que nous avons cités auparavant :

- **Interface simplifié entre la CAO et un système de génération de gammes :**
  En effet, l'identification des entités de fabrication pose moins de problèmes, puisque celles-ci sont explicitement représentées. Un système d'extraction d'entités semblable à ceux que nous avons présentés dans la section 2.1 est donc inutile si la modélisation CAO des pièces fait appel aux concepts de la Cotation Volumique. De plus, le problème d'ambiguïté d'interprétation disparaît, puisque les entités de fabrication décrites sont étroitement liées aux fonctionnalités de la pièce, et correspondent par conséquent aux volumes qui doivent être usinés.

- **Le passage aux programmes CN est simplifié :**
  L'utilisation de *Macros CN* associées aux entités de fabrication est ici tout-à-fait naturelle. Chaque usinage élementaire d'une Gamme d'Usinage correspond à un trajet d'outil spécifique à l'usinage et au volume concerné. Et comme ce volume est spécifiquement dimensionné et positionné via les conventions de la Cotation Volumique, le passage aux paramètres de la *Macro* ne pose pas de problème ; il suffit de reprendre les cotes associées au volume considéré. Ceci élimine la plupart des transferts de cotes nécessaires dans le cas de la Cotation de Liaison, simplifie donc les calculs et évite les réductions de tolérances dues aux transferts.

- **Plus de problème pour situer la matière :**
  En effet, un volume plein (resp. vide) est un volume mâle (resp. femelle), et les cotes qui lui sont associées sont donc aussi des cotes mâles (resp. femelles). Il est donc possible de savoir la nature d'une cote dès la conception de la pièce, sans avoir à attendre le stade de la fabrication et du choix des appuis. Ceci permet d'écrire dès la phase préparation, des programmes CN qui tiennent compte de la totalité des tolérances, et qui ne sont donc pas modifiés manuellement par la suite sur les machines.

3.2.2 Des avantages en fabrication

Le lecteur se reportera à l'annexe A pour avoir le détail des avantages de la Cotation Volumique par rapport à la Cotation de Liaison en ce qui concerne la fabrication ; nous nous contentons ici de les rappeler brièvement.

- **Augmentation des tolérances :**
  Pour une même pièce, les tolérances des cotes qui figurent sur les dessins de définition sont plus larges en Cotation Volumique, convention "Maximum Matière[3]", qu'en Cotation de Liaison (cf. paragraphe 1.3 de l'annexe A). D'où moins de difficultés à usiner et moins de pièces rejetées après contrôle.

- **Augmentation des défauts de position tolérables :**
  En convention Ⓜ, les défauts de position acceptés lors des vérifications des pièces peuvent être plus importants que ceux qui sont spécifiés sur les dessins (cf. paragraphe 2.1 de l'annexe A).

- **Contrôle plus simple et plus rapide :**
  En Cotation de Liaison, il est nécessaire de contrôler une à une chacune des cotes après usinage ; en Cotation Volumique, il est possible d'effectuer plusieurs mesures à la fois à l'aide de **vérificateurs globaux** (cf. paragraphe 2.2 de l'annexe A).

- **Des appareils d'ablocage plus simples :**
  En Cotation de Liaison, il est nécessaire de fixer les pièces à usiner de façon précise, avec des points d'appui déterminés ; en Cotation Volumique Ⓜ, la notion d'isostatisme disparaît, et il suffit de positionner la pièce de façon quelconque à l'intérieur de "cages", plus faciles à concevoir et à manipuler (cf. paragraphe 2.3 de l'annexe A).

- **Utilisation de toute la tolérance :**
  En Cotation Volumique Ⓜ, le signe de la tolérance permet de savoir si une cote est *mâle* ou *femelle* ; il est donc possible de programmer automatiquement l'usinage des cotes en tenant compte de la totalité des tolérances, et d'introduire une autocorrection qui tienne compte de l'usure des outils (cf. paragraphe 2.4 de l'annexe A). D'où encore une fois des usinages plus faciles et moins de rejets après vérification des pièces.

[3]La convention "Maximum Matière", notée Ⓜ, consiste à représenter les pièces avec le plus de matière possible : un volume plein est Ⓜ lorsqu'il est le plus gros possible, un volume vide est Ⓜ lorsqu'il est le plus petit possible.

3.2.3 Des avantages en conception

La Cotation Volumique possède aussi quelques avantages non négligeables en ce qui concerne la phase amont de conception et de définition des pièces mécaniques :

- **Tolérancement automatique :**
  Le processus de cotation d'une pièce est bien moins compliqué en Cotation Volumique qu'en Cotation de Liaison (2 étapes au lieu de 5). L'automatisation de ce processus à partir des spécifications de fonctionnement des mécanismes (les jeux de fonctionnement) pose par conséquent moins de problèmes. Cette fonctionnalité de tolérancement automatique est d'ailleurs en cours d'implantation dans le système DIMAT.

- **Une définition presque unique pour chaque pièce :**
  En Cotation de Liaison, la première étape du processus de cotation d'une pièce consiste à choisir des faces en contact dans l'ensemble mécanique dont elle fait partie ; il s'ensuit des cotations totalement différentes pour chacun des choix possibles. Les fonctionnalités de base d'une pièce permettent pourtant de la décomposer de façon **unique** en volumes élémentaires. La Cotation Volumique définit une pièce via ces volumes élémentaires : la définition résultante varie donc très peu selon le mécanicien qui la décrit.

- **Lien avec la conception fonctionnelle :**
  La définition d'une pièce en Cotation Volumique repose sur une analyse fonctionnelle qui permet d'identifier chacun des volumes qui la composent. La Cotation Volumique semble donc un outil intéressant pour passer de la spécification des fonctions élémentaires qu'une pièce doit réaliser, à sa définition complète et utilisable pour la suite du processus de fabrication.

3.2.4 Conclusion

La Cotation Volumique permet d'envisager une représentation des pièces qui réponde aux besoins d'un système CIM, besoins que nous avons soulignés dans la section 2.3 :

- **Unicité :** la même représentation des pièces est utilisée pour les définir, générer les Gammes d'Usinage, et passer aux programmes CN, avec un minimum de manipulation de données.

- **Pertinence :** les concepts de base sont des concepts mécaniques qui permettent de décrire les pièces en termes d'entités de fabrication.

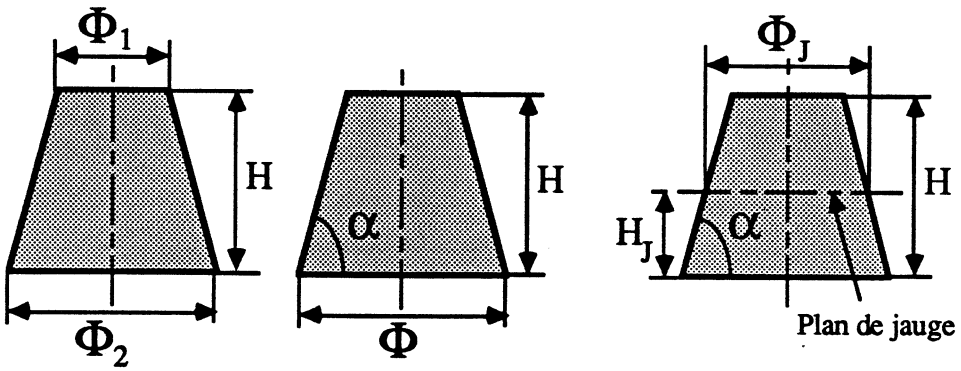


Figure 2.8 : Définitions possibles d'un tronc de cône

- **Aspect fonctionnel :** la Cotation Volumique est par essence une cotation fonctionnelle qui correspond à une norme figée et bien définie.

Ces quelques aspects sont prometteurs en ce qui concerne la réalisation d'un système CIM complet. Le dernier point ouvre notamment la porte vers une intégration avec des systèmes amonts de conception fonctionnelle.

3.3 Les concepts issus de la Cotation Volumique

Cette section détaille un peu mieux les concepts de base, tous issus de la Cotation Volumique, sur lesquels repose la représentation des pièces mécaniques à partir de laquelle GAGMAT raisonne pour générer des Gammes d'Usinage.

En première approche, une pièce décrite en Cotation Volumique est définie par un ensemble de volumes canoniques, identifiés à partir des fonctions élémentaires que doit remplir la pièce, paramétrés et positionnés les uns par rapport aux autres suivant les concepts de la mécanique. Chaque volume canonique est défini par :

- un type (parallélépipède, cylindre, sphère, etc),
- un état matière (*plein* ou *vide*),
- des paramètres de dimensionnement (hauteur, rayon, etc),
- un référentiel,
- des faces caractérisées par leur type (plane, cylindrique, etc).

Il ne faut pas confondre **paramètre géométrique** au sens mathématique classique et **paramètre de dimensionnement**. Un paramètre de dimensionnement est une

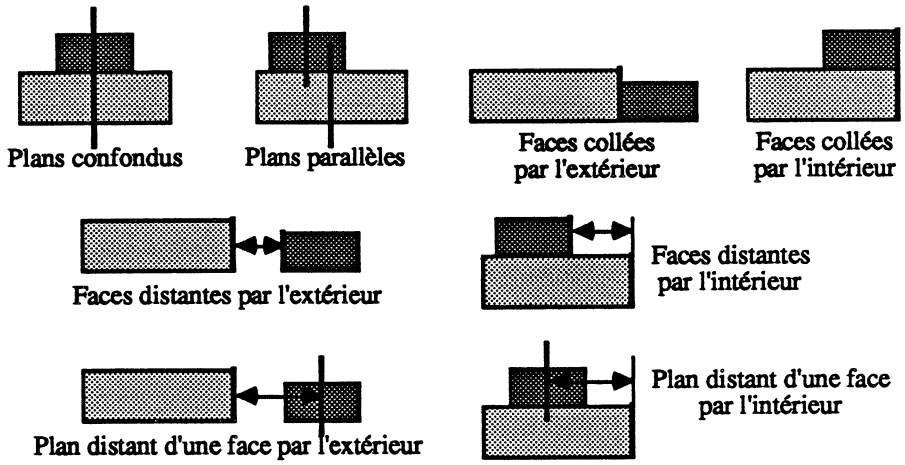


Figure 2.9 : Les relations de positionnement de la Cotation Volumique

donnée mécanique qui correspond à une cote sur un plan. La valeur de cette cote doit donc pouvoir être usinée et vérifiée. La figure 2.8 représente par exemple trois possibilités différentes pour définir mathématiquement un tronc de cône de révolution ; pourtant seule la 3ème possibilité correspond à des cotes de dimensionnement. En effet, les cotes Φ_1, Φ_2 ou Φ sont des cotes résultantes, ne peuvent pas être mesurées, et donc ne doivent pas en principe figurer sur la définition d'une pièce mécanique.

A chaque type de volume sont associés des éléments de références (plans médians, faces, plans de jauge, etc), et des relations de positionnement permettent de relier entre eux tous les volumes canoniques d'une pièce via ces éléments. Ces relations ont toutes un sens pour le mécanicien (mise à niveau de deux faces, concentricité, positionnement d'un plan médian par rapport à un autre, etc), et doivent elles aussi pouvoir être vérifiées au même titre que les paramètres de dimensionnement des volumes. Il existe ainsi huit types de relations, représentés sur la figure 2.9. Une fois la pièce totalement décrite, toutes ces relations définissent un graphe de dépendance entre volumes, appelé **graphe de cotation.**

3.3.1 Volumes d'Usinage et Modèles d'Usinage

Mais les volumes canoniques ne contiennent pas toutes les informations qui permettent de décrire tous les détails d'une pièce mécanique. En particulier, tous les rayons ou chanfreins qui correspondent aux traces d'outils ne sont pas spécifiés (il est en effet impossible d'usiner une poche dont toutes les faces sont à angle droit les unes des autres). L'utilisation de la Cotation Volumique en fabrication, ainsi que les réflexions que nous

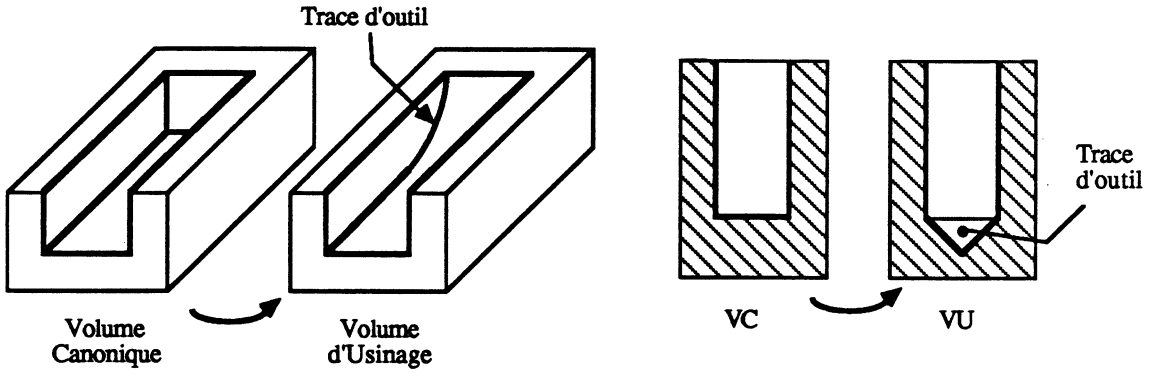


Figure 2.10 : Exemples de VU

avons menées sur l'étude de faisabilité du système GAGMAT, nous ont poussés à identifier et à définir des concepts qui ont permis de dégager une méthodologie de génération de Gammes d'Usinages.

Ainsi, un **Volume d'Usinage (VU)** est associé à chaque volume canonique d'une pièce mécanique (cf. figure 2.10). Le VU est la description fine du volume qui doit être effectivement usiné. Pour un volume canonique donné, ces VU se différencient selon leurs traces d'outils et leur nombre de faces collées (pour les volumes pleins) ou sans matière (pour les volumes vides). Il existe ainsi des types de VU, appelés **Modèle d'Usinage (MU)** ; ils sont définis par :

- le volume canonique associé,
- un référentiel défini à partir du référentiel du volume canonique,
- les faces sans matière (resp. collées) pour un volume canonique vide (resp. plein),
- les traces d'outils (rayons contournés, chanfreins, etc),
- les paramètres dimensionnels (dimensions et tolérances),
- les paramètres technologiques (états de surface, axes d'outil, etc).

A titre d'exemple, la figure 2.11 représente quelques uns des MU que nous avons déterminés pour le volume canonique *parallélépipède vide.* Nous donnons en annexe B la description plus précise des MU qui ont été étudiés dans le cadre de GAGMAT.

Une pièce mécanique est donc définie par un ensemble de VU. Les relations qui les positionnent entre eux sont les mêmes que celles citées précédemment, auxquelles sont associés des paramètres de positionnement (distance, défaut de position), issus de la norme.

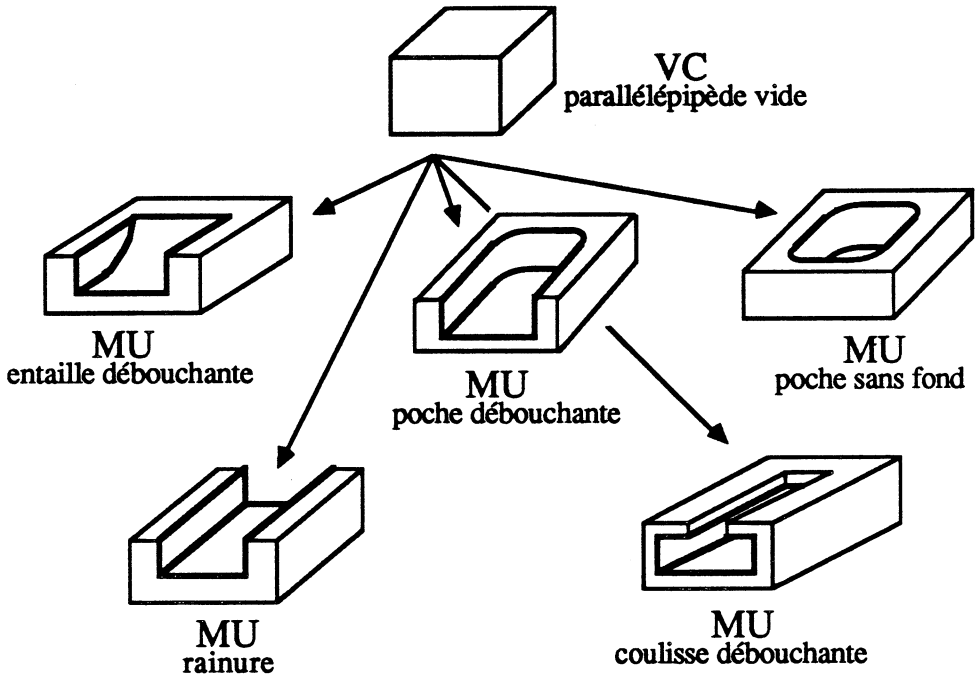


Figure 2.11 : Exemples de MU correspondant au *parallélépipède vide*

3.3.2 Processus d'Usinage et Opérations Volumiques

Une fois connu l'ensemble de VU qui composent une pièce, on peut associer à chacun d'entre eux, en fonction des moyens disponibles et du savoir-faire, un processus de réalisation raisonnablement possible, appelé **Processus d'Usinage (PU)**. Un PU est une suite structurée d'**Opérations Volumiques Elémentaires (OVE)**, une OVE correspondant à l'appel d'une *Macro CN* dans le programme de Commande Numérique qui permet d'usiner la pièce. Une OVE est donc associée à :

- un outil,
- un trajet d'outil élémentaire (qui correspond à la *Macro* (cf. figure 2.12)),
- un VU (i.e. des dimensions, des tolérances, etc, qui servent à paramètrer la *Macro*).

Il s'ensuit qu'une Gamme d'Usinage est la suite ordonnée des OVE qui permettent d'usiner tous les VU qui composent une pièce. Générer une Gamme d'Usinage consiste donc à combiner tous les PU entre eux, en prenant en compte des critères d'accessibilité, de stabilité, d'antériorité entre VU, etc. Les OVE d'un même PU peuvent par consé-

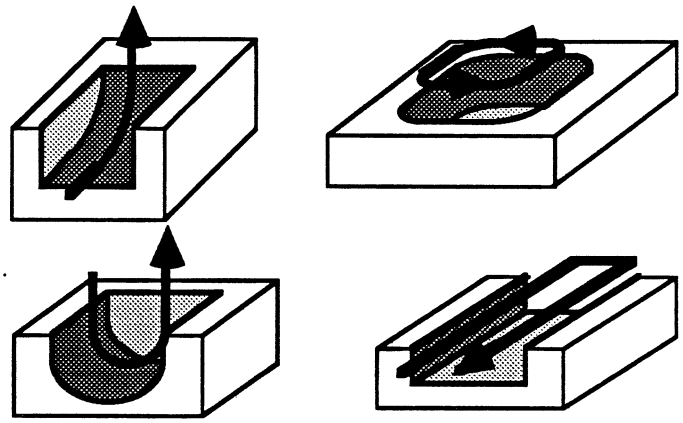


Figure 2.12 : Exemples de trajets élémentaires associés à des *Macros*

quent être dispersées au sein de la Gamme d'Usinage. Il apparaît néammoins que certaines d'entre elles restent toujours ou presque consécutives, du fait qu'elles utilisent :

- le même outil, avec les mêmes conditions de coupe,
- la même *Macro CN*,
- les mêmes paramètres de la *Macro*, à quelques variations près.

Ces OVE sont assimilables aux traditionnelles "passes" d'un même usinage. Nous avons donc défini une **Opération Volumique (OV)** comme étant la réunion de telles OVE consécutives au sein d'un même PU (cf. figure 2.13). Deux OVE qui appartiennent à la même OV ne diffèrent en fait que par quelques paramètres qui correspondent aux hauteurs et largeurs de passe. Une OV est donc associée à :

- un VU,
- un outil,
- une *Macro*.

En admettant que les OVE qui constituent une OV sont indissociables les unes des autres (ce qui est vrai dans la très grande majorité des cas), le problème de la conception des Gammes d'Usinage se réduit dans un premier temps à la simple détermination et ordonnancement des OV qui permettent d'usiner tous les VU des pièces. Une deuxième étape consiste ensuite à décomposer chaque OV en OVE. Il est possible d'utiliser pour cette seconde phase des logiciels de calcul de conditions de coupe qui, connaissant la matière, le type de travail (travail sur flanc, rainurage, etc), la quantité de matière à enlever, l'outil utilisé, sont capables de déterminer le nombre et les dimensions des passes à effectuer. Cette hypothèse n'est pas gratuite, elle permet entre autres :

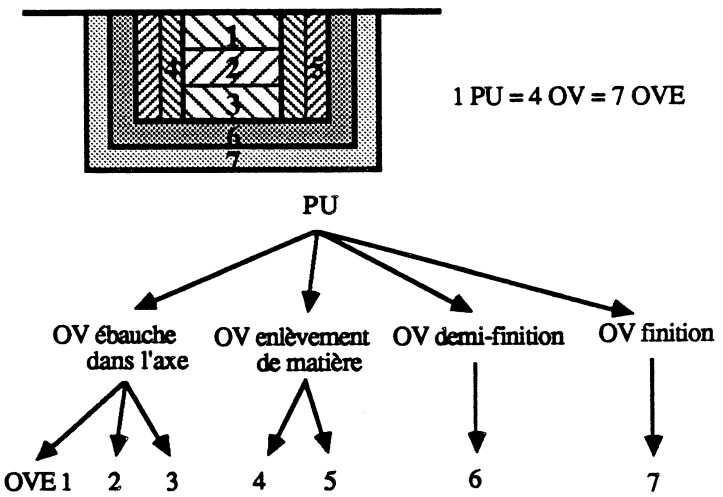


Figure 2.13 : Décomposition d'un PU en OV et OVE

- de diminuer la complexité de la conception des gammes : les problèmes de structuration et d'ordonnancement portent sur un nombre restreint d'actions élémentaires (il y a moins d'OV que d'OVE),
- de ne pas figer le choix des outils dès le début de la conception : en effet, la détermination de tous les paramètres d'une OVE nécessite le choix d'un outil entièrement déterminé ; pour une OV, il suffit de préciser une famille d'outils *capables*, et cette latitude rend possible une optimisation du nombre d'outils de types différents utilisés au cours d'une gamme.

Partie II

Les Gammes d'Usinage et la planification

3

Chapitre 3

Conception de gammes et IA

Le problème de la génération automatique de Gammes d'Usinage s'exprime de la façon suivante :

> *Etant données la description d'une pièce, ainsi que celles des moyens disponibles pour la réaliser (machines, outils), il s'agit de déterminer automatiquement toutes les opérations nécessaires pour fabriquer la pièce.*

Nous pouvons formuler ce problème dans les termes habituels de la **Planification**, traditionnel champ d'investigation des chercheurs en Intelligence Artificielle :

> *Etant données des* **actions élémentaires** *(les opérations d'usinage), trouver un* **plan d'actions** *(la gamme) qui permet de passer de l'***état initial** *(la pièce à l'état brut) à l'***état final** *(la pièce finie).*

Cette traduction aisée montre qu'il est envisageable d'aborder le problème de la conception automatique de gammes à l'aide de méthodes d'IA. Le premier paragraphe de ce chapitre est consacré à la présentation des systèmes "célèbres" de planification et des problèmes qu'ils ont cherché à surmonter. Nous étudions dans le paragraphe 2 les caractéristiques du problème de la conception de Gammes d'Usinage, du point de vue de l'IA, et nous analysons dans le paragraphe 3 la manière dont certains systèmes de génération de gammes ont traité ces caractéristiques.

1 Planification et IA

1.1 Le problème

Dans le langage courant, planifier revient à décider et à organiser un ensemble d'actions avant de commencer à les réaliser. Suite à cette définition, nous pouvons dire que l'homme passe son temps à planifier, que ce soit pour aller acheter du pain, construire sa maison, ou partir en voyage. Pour ce faire, il se fixe des objectifs *(une liste de courses, le plan d'une maison, le lieu de son voyage, etc)* qu'il cherche à atteindre via un enchaînement d'actions *(prendre la voiture → aller à la boulangerie → acheter du pain ...)*. Il tient compte pour cela du contexte dans lequel il se trouve : *pour acheter du pain, le problème n'est pas le même si l'on habite près d'une boulangerie ou à plusieurs km.* Nous retrouvons là tous les ingrédients sur lesquels reposent les systèmes classiques de planification :

- une **modélisation du monde**, qui permet de représenter le contexte,
- des **actions** ou **opérateurs**, qui permettent de passer d'un état du monde à un autre,
- un **état initial**,
- un **état final** (le but à atteindre).

Nous commençons par exposer ci-dessous les deux problèmes fondamentaux auxquels sont confrontés les systèmes de planification (paragraphe 1.2) : problèmes d'**explosion combinatoire** et d'**interdépendance entre sous-buts** à atteindre. Puis, via les principes des systèmes "célèbres" de planification, nous présentons l'évolution des stratégies comme une réponse à ces deux problèmes (paragraphe 1.3). Nous ne donnons pas à ce titre de références bibliographiques précises. Ces systèmes ont tous été décrits dans la plupart des ouvrages consacrés à l'IA : Nilsson analyse en détails les principes de la famille STRIPS dans [Nil 82a] et [Nil 82b] ; un chapitre du "Handbook of AI" [Bar 82] est consacré à la planification ; Tate [Tat 85] a fait une classification relativement complète des systèmes existants, en s'appuyant sur les types de problèmes qu'ils ont abordés et sur les techniques utilisées pour les résoudre.

1.2 Problèmes d'explosion combinatoire et d'interdépendance de sous-buts

Le nombre d'opérateurs étant en général très grand, il existe une quantité énorme d'ordonnancements possibles d'actions à partir d'un état donné du monde. La plupart

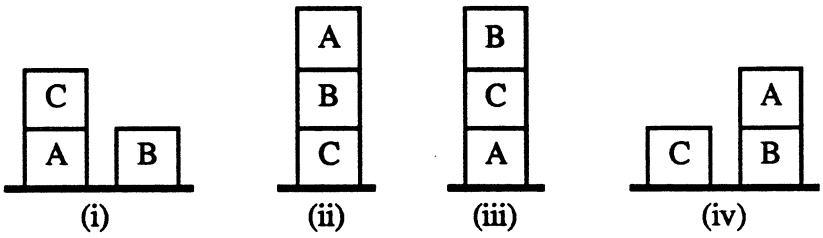


Figure 3.1 : L'anomalie de Sussman

d'entre eux n'atteignent d'ailleurs pas l'état final escompté. Ce premier problème auquel sont confrontés les planificateurs prend le nom d'**explosion combinatoire**, car le nombre de combinaisons des opérateurs croît exponentiellement avec le nombre des opérateurs : il est de l'ordre de n^l, où n est le nombre d'opérateurs, et l la longueur de la solution. Le graphe d'état à partir d'un état initial est donc excessivement étendu, et les méthodes classiques de parcours de graphe pour arriver à un état final ne sont pas envisageables. Les systèmes de planification doivent donc à tout prix ne pas explorer cet espace de recherche en profondeur, afin d'arriver à une solution.

Un deuxième problème fondamental est dû aux **interdépendances entre sous-buts.** Un but s'exprime souvent sous la forme d'une conjonction de sous-buts, sans que soit spécifié l'ordre dans lequel il faut les atteindre. Il se peut alors que la satisfaction de l'un d'entre eux entraîne la destruction d'un autre déjà atteint. Par exemple, "construire une maison" inclut les sous-buts "plâtrer les murs" et "installer l'électricité", qui ne sont pas indépendants ; en effet, l'électricité doit être installée en premier, sinon les saignées dans les murs détruiraient le travail du plâtrier. L'exemple de la figure **3**.1 est connu sous le nom d'*anomalie de Sussman* : soient trois blocs A, B et C ; initialement, C est sur A, et A et B sont posés sur la table (situation i) ; le but est d'avoir A sur B sur C (situation ii), ce qui s'exprime par la conjonction $(sur\ A\ B) \wedge (sur\ B\ C)$. Sachant qu'un seul bloc peut être déplacé à la fois, réaliser $(sur\ B\ C)$ en premier empêche d'atteindre ensuite $(sur\ A\ B)$, car C étant sur A, ce dernier ne peut être saisi (situation iii). De la même manière, si A est placé sur B en premier (en enlevant C pour que A soit accessible), B ne peut être saisi ensuite pour être placé sur C (situation iv). De telles interactions peuvent dans certains cas interdire toute solution.

Le problème de limitation de l'espace de recherche est lié au problème d'interdépendance de sous-buts. Des ordonnancements arbitraires entre sous-buts interdépendants peuvent conduire à un échec. Il est alors nécessaire de revenir en arrière et de remettre en question cet ordonnancement. De tels retours arrières peuvent être très coûteux.

1.3 Evolution des stratégies de planification

1.3.1 Maîtrise de la combinatoire

Au début des années 70, les systèmes GPS et STRIPS font appel à la stratégie appelée **analyse fins-moyens** pour limiter le phénomène d'explosion combinatoire. A chaque opérateur, correspondent des conditions d'applications et des effets sur la représentation du monde, exprimés en termes de prédicats. Ces systèmes calculent alors la différence entre l'état final à atteindre et l'état courant du monde, puis ils choisissent un opérateur qui permet de réduire cette différence. Le processus est récursif jusqu'à annulation de cette différence. Un plan solution est alors la suite inverse des opérateurs ainsi déterminés. Cette stratégie permet de réduire le problème d'explosion combinatoire puisque chaque étape du processus nécessite la satisfaction d'un ou plusieurs sous-buts, ce qui limite le nombre d'opérateurs applicables dans un état du monde donné. L'espace de recherche demeure néanmoins important. Comment en effet choisir un des opérateurs potentiels ? Et comment savoir en particulier si ses préconditions pourront être atteintes par la suite ?

L'**approche linéaire** des systèmes HACKER et INTERPLAN repose sur la formulation successive de deux hypothèses :

- Hypothèse **forte** : tous les sous-buts qui composent le but final sont indépendants, et peuvent donc être atteints séquentiellement dans n'importe quel ordre.
- Hypothèse **faible** : il existe un ordre de satisfaction des sous-buts qui permet d'atteindre l'état final.

La stratégie consiste à émettre dans un premier temps l'hypothèse forte, et à s'engager a priori sur une séquence d'opérateurs qui permettent d'atteindre chacun des sous-buts. Mais cette hypothèse conduit souvent à un échec. Dans un tel cas, l'hypothèse faible laisse espérer qu'une solution peut être trouvée via un réordonnancement des sous-buts (cf. section suivante).

Ces approches ont le défaut de considérer au même niveau des actions pertinentes et des actions dont les effets sont sans importance pour le succès de la planification. Les planificateurs se perdent en conséquence dans la prise en compte de détails inutiles (inconvénient connu dans les termes de *tyrannie du détail*). Une troisième approche, l'**approche hiérarchique**, consiste dans un premier temps à générer un plan à un niveau d'abstraction élevé, puis dans un second temps à le détailler pour aboutir à une séquence d'actions élémentaires. Le fait de différer cette prise en compte de détail a pour avantage de réduire l'espace de recherche. Plusieurs systèmes font appel à ce principe sous différentes formes :

- ABSTRIPS planifie à des ***niveaux d'abstraction*** de plus en plus bas. Pour cela, il associe un entier aux préconditions des opérateurs pour qualifier l'importance accordée à leur satisfaction. Générer un plan dans un espace d'abstraction de niveau n consiste à ne considérer que des faits d'importance supérieure ou égale à n. ABSTRIPS opère de la même façon que STRIPS, mais cherche à satisfaire en priorité les préconditions d'importance maximum.

- Les niveaux d'abstraction de NOAH sont relatifs aux opérateurs. NOAH planifie dans un premier temps à l'aide d'opérateurs généraux, qu'il décompose plus tard en opérateurs élémentaires.

- Dans MOLGEN, les niveaux d'abstraction sont liés au processus de planification lui-même. Le niveau inférieur correspond aux objets à manipuler et aux opérateurs du domaine concerné. Le niveau intermédiaire est appelé ***niveau de conception.*** Les décisions qui y sont prises sont du type : proposer un nouveau sous-but, préciser un objet ou un opérateur, formuler et propager des contraintes dues aux interactions entre sous-buts. Au niveau supérieur, sont prises les décisions sur la stratégie à suivre, les hypothèses à faire ou à supprimer.

- Le système de Hayes-Roth et al. [Hay 79] peut aussi être considéré comme un système hiérarchique. Son architecture comporte plusieurs sources de connaissance qui coopèrent pour résoudre un même problème ; elles communiquent par l'intermédiaire d'un "tableau noir" ***(blackboard)***, où elles écrivent leurs résultats et lisent les données qui leur sont nécessaires. Le système de Hayes-Roth et al. comporte ainsi cinq niveaux de représentation, et le passage d'un niveau à l'autre se fait par un mécanisme d'envoi de contraintes[1].

1.3.2 Prise en compte des interdépendances

Il y a interdépendance entre sous-buts lorsque la satisfaction de l'un d'entre eux entraîne la destruction d'un autre déjà atteint. Lorsqu'un tel problème survient, les systèmes HACKER et INTERPLAN essaient de réordonner les sous-buts, puis recommencent la planification en concaténant les sous-plans correspondants ; cette méthode ne marche pas lorsqu'un tel ordre n'existe pas (cas de l'anomalie de Sussman). Il existe cependant des techniques qui permettent de résoudre ce problème : la **régression de sous-buts**, et la **planification non linéaire**.

[1]Les contraintes peuvent être postées vers un niveau supérieur ou inférieur ; le second cas est équivalent à un affinement du raisonnement, comme dans les autres systèmes hiérarchiques.

Waldinger a introduit le premier la notion de **régression de sous-buts**, technique également utilisée dans le système RSTRIPS. En cas de violation entre sous-buts, plutôt que de les réordonner entre eux, ces systèmes régressent le sous-but coupable au travers des sous-buts déjà atteints, jusqu'à ce qu'il trouve une place où il n'interfère avec aucun autre. Il s'agit à chaque fois de déterminer le sous-but SB' avant application d'un opérateur A pour que le sous-but déplacé SB soit vrai après A : SB' est la régression de SB au travers de A. Tous ces systèmes (HACKER, INTERPLAN, système de Waldinger, RSTRIPS) sont des systèmes **linéaires** qui génèrent des plans *surcontraints*, dans le sens où ils ordonnent **arbitrairement** les sous-buts à atteindre, et rajoutent donc des contraintes inutiles.

Les techniques de planification **non linéaire** ou **parallèle** permettent aussi de résoudre ces problèmes d'interdépendance (systèmes NOAH et DCOMP). Contrairement aux systèmes précédents, ceux-ci suivent le principe de *moindre engagement* : ils construisent parallèlement les sous-plans qui satisfont chacun des sous-buts, obtenant ainsi un ordre partiel entre opérateurs ; la linéarisation du plan résulte d'une analyse ultérieure des interdépendances entre sous-buts à l'aide de "critiques".

2 Caractéristiques de la conception de Gammes d'Usinages

Un problème de planification n'est pas le même suivant le domaine abordé. Le problème de la conception de Gammes d'Usinage se distingue par les caractéristiques suivantes, qui sont à l'origine des méthodes que nous avons employées :

- c'est un problème **linéarisable**, décomposable en sous-problèmes **fortement couplés**,
- la notion de **partage de ressources**, lesquelles sont hiérarchisées et interdépendantes, est primordiale
- il est caractérisé par la nature **conflictuelle** des critères à prendre en compte.

Grâce à quelques exemples simples, nous explicitons dans cette section chacune de ces caractéristiques, et nous analysons à chaque fois leur impact sur la méthode de résolution à employer.

2.1 Problème linéarisable

Commençons par définir ce que nous entendons par *problème linéarisable* :

> *Un problème de planification est* **linéarisable** *s'il est possible de définir a priori une séquence de buts intermédiaires qu'il faut satisfaire avant d'arriver au but final, et qui garantissent que ce dernier soit atteint.*

Cette caractéristique a des conséquences immédiates sur la méthode de résolution. Soit en effet un problème linéarisable $\mathcal{P}$, et $(B_i)_{i\in[0,n]}$ la séquence des sous-buts qui doivent être successivement atteints,

- Le problème $\mathcal{P}$ se décompose en une suite $(\mathcal{P}_j)_{j\in[1,n]}$ de sous-problèmes de planification ; l'état initial de chaque $\mathcal{P}_j$ est un état où le but B_{j-1} est vérifié, et le but à atteindre est B_j.
- Chacun de ces sous-problèmes peut être résolu par des méthodes différentes de planification.
- Le plan solution final est la juxtaposition des plans générés pour chacun des sous-problèmes.

L'intérêt d'une telle linéarisation est de réduire la complexité du problème initial. En effet, nous avons vu que la complexité d'un problème de planification est de l'ordre de n^l (cf. paragraphe 1.2) ; diviser un tel problème en une suite de problèmes plus simples, revient essentiellement à diviser l'exposant, et donc à réduire énormément l'espace de recherche.

La notion de **but intermédiaire** est naturelle et facilement concevable. Beaucoup de problèmes de planification de la vie courante sont d'ailleurs des *problèmes linéarisables* : par exemple, changer d'appartement peut se décomposer en trois sous-problèmes consécutifs dont les buts respectifs sont *d'avoir trouvé une nouvelle habitation* (i), *d'avoir déménagé* (ii), et enfin *d'avoir emménagé* (iii). De même, certaines tâches d'assemblage en robotique peuvent être considérées comme des *problèmes linéarisables* dont les *buts intermédiaires* sont [Dur 84] [Lau 87] : (i) *saisie de l'objet à assembler*, (ii) *transfert de l'objet dans la zone d'assemblage*, (iii) *réalisation de l'assemblage*. Et il existe des méthodes différentes de résolution pour atteindre chacun de ces buts :

- recherches de prises, études d'accessibilité, études d'équilibre et de stabilité pour la *saisie* [Tro 86],

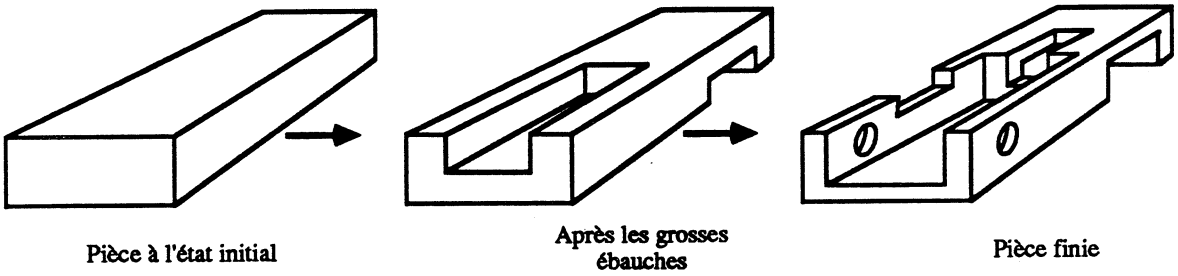


Figure 3.2 : Exemple d'états intermédiaires

- planification de trajectoires sans collision pour les *grands mouvements* (sous-problème ii) : espace des configurations [Bro 83], cônes généralisés [Bro 82a], secteurs angulaires [Ger 85]),
- instantiations de variables dans des squelettes de programmes prédéfinis [Loz 76] [Bro 82b], méthode des pré-images [Loz 83], pour les *mouvements fins* (sous-problème iii).

La conception de Gammes d'Usinage est aussi un *problème linéarisable*, car il est possible de déterminer des états intermédiaires d'une pièce qu'il faut obtenir au cours de sa fabrication, avant même de savoir comment les usiner. Un tel état correspond par exemple à la pièce obtenue après utilisation d'une technologie donnée (tournage, fraisage, etc), à son état avant et après l'exécution d'un Traitement Thermique, etc (cf. figure 3.2). Ces états intermédiaires définissent en particulier les Sous-Gammes : ce sont les suites d'usinages qui permettent de passer d'un état intermédiaire de la pièce à celui qui lui succède[2] (dans le cas où cette transition n'est pas obtenue via un Traitement Thermique). Une fois déterminés les états intermédiaires d'une pièce, le problème de la conception de sa gamme se divise alors en sous-problèmes successifs qui consistent à déterminer les suites d'usinages permettant de passer d'un état à l'autre – la conception de chaque Sous-Gamme – et qui peuvent en particulier être résolus via l'utilisation de connaissances différentes.

Conclusion

La méthode de résolution à employer pour traiter les problèmes linéarisables doit débuter par une phase de linéarisation. La difficulté essentielle réside dans la détermination des *buts intermédiaires*. La stratégie utilisée lors de cette phase, que nous ap-

[2]Une Sous-Gamme est donc une suite d'usinages effctués sur un ensemble d'entités qui composent la pièce.

pelons **stratégie de linéarisation**, doit raisonner pour cela à un niveau d'abstraction élevé, où chaque sous-problème identifié est assimilable à un *macro-opérateur* (par opposition aux opérateurs élémentaires), et considérer les dépendances pouvant exister entre les sous-buts à atteindre. La phase suivante de la résolution du problème consiste à décomposer chacun de ces *macro-opérateurs* en un sous-plan détaillé d'actions élémentaires. Cette seconde étape ne doit pas remettre en cause les *buts intermédiaires*, car sinon la complexité du problème initial n'est plus réduite ; en d'autres termes, ceci signifie que ces buts doivent être "valides".

Remarque

Les systèmes de planification linéaire présentés dans le paragraphe 1.2.1, HACKER et INTERPLAN, résolvent une certaine classe de problèmes *linéarisables*, où les *buts intermédiaires* sont triviaux. Ces derniers correspondent à la satisfaction itérative des sous-buts qui composent l'état final. Lors de la linéarisation, ils ne considèrent pas les dépendances pouvant exister entre chacun de ces sous-buts, ce qui les conduit à des situations d'échec, et les oblige le cas échéant à réordonner l'ordre de satisfaction de ces sous-buts (cas où les *buts intermédiaires* ne sont pas valides).

2.2 Sous-problèmes fortement couplés

Nous reprenons la définition donnée par Tsang [Tsa 87] des termes **fortement couplé** :

> *Un problème est* **fortement couplé** *lorsqu'il se décompose en sous-problèmes entre lesquels il existe de fortes interactions.*

Le problème de la **conception d'une Sous-Gamme** se décompose naturellement en sous-problèmes de même nature, à savoir l'obtention de l'état de chaque entité de la pièce à l'issue de cette Sous-Gamme. Suivant les concepts issus de la Cotation Volumique (cf. paragraphe 3.3 du chapitre 2), ce sont les Processus d'Usinage (PU) associés aux Volumes d'Usinage (VU) qui permettent d'atteindre ces états. Nous pouvons affirmer alors que le problème de la conception de gammes est *fortement couplé*, car il existe de fortes interactions entre les PU, interactions liées aux problèmes classiques d'interdépendance entre sous-buts. Illustrons cette caractéristique sur un exemple, et reprenons pour cela le cas des alésages sécants A_1 et A_2 de diamètres différents (figure **3**.3). Le but recherché est exprimé par la conjonction : *(usiné* A_1*)* $\wedge$ *(usiné* A_2*)*, et les PU associés aux VU A_1 et A_2 sont :

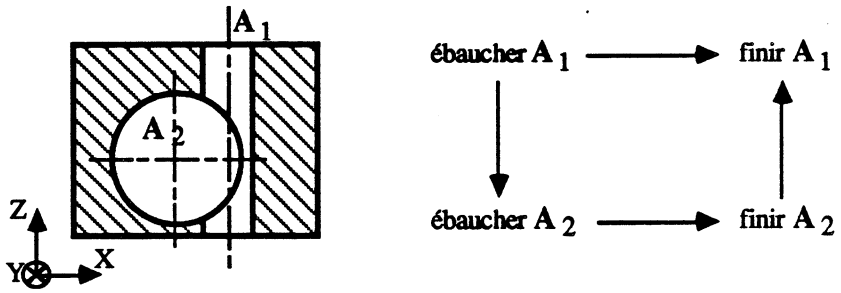


Figure 3.3 : Interdépendances entre les usinages de deux alésages sécants

$$(\textit{ébaucher } A_1) \rightarrow^3 (\textit{finir } A_1)$$
$$\text{et}$$
$$(\textit{ébaucher } A_2) \rightarrow (\textit{finir } A_2)$$

Nous avons déjà vu que l'usinage en premier du plus gros des deux (A_2) ne permet pas de réaliser le plus petit (A_1), donc d'atteindre le sous-but *(usiné A_1)*. En revanche, si A_1 est réalisé en premier, l'usinage ultérieur du gros alésage peut provoquer des bavures importantes sur le petit alésage, et détruire par conséquent le sous-but déjà atteint *(usiné A_1)*. Les sous-buts *(usiné A_1)* et *(usiné A_2)* sont donc interdépendants. La solution consiste en fait à combiner les deux PU afin d'obtenir la gamme correcte suivante :

$$(\textit{ébaucher } A_1) \rightarrow (\textit{ébaucher } A_2) \rightarrow (\textit{finir } A_2) \rightarrow (\textit{finir } A_1)$$

Si la détermination précédente des *buts intermédiaires* est valide, de telles interdépendances n'ont d'effets que sur les actions permettant d'atteindre les sous-buts d'un même *but intermédiaire*, c'est à dire sur les usinages d'une même Sous-Gamme.

Conclusion

Une stratégie de planification non linéaire est alors pertinente pour concevoir chaque Sous-Gamme. Dans notre cas, il s'agit de construire dans un premier temps les sous-plans permettant d'atteindre chaque sous-but composant un *but intermédiaire*, puis de combiner ces sous-plans entre eux, compte tenu des fortes interdépendances qui peuvent exister.

[3] $\rightarrow$ signifie "suivi de"

2.3 Partage de ressources hiérarchiques et interdépendantes

Le problème de la conception des Sous-Gammes est un problème classique de planification, au sens où il s'agit de déterminer et d'ordonnancer des actions élémentaires (les OV en ce qui nous concerne). Mais il ne se limite pas à cela du fait de l'importance de la notion de ressource. La détermination d'une action nécessite en effet la **spécification des ressources** qu'elle utilise (les ressources utilisées sont en général implicites dans les systèmes classiques de planification).

La notion de **regroupement d'actions**, basée sur le partage de ressources, s'ajoute aux problèmes de spécification des ressources et du séquencement d'actions. Les raisons de ces regroupements peuvent être technologiques (usiner deux entités avec le même appui s'il existe une relation de positionnement très serrée entre les deux), ou économiques (regrouper au maximum les usinages qui utilisent les mêmes ressources pour diminuer les temps de manipulation et d'immobilisation des pièces).

Il existe en **hiérarchie** sur les types de ressources, hiérarchie qui reflète l'importance accordée aux regroupements d'actions qui les utilisent. De plus, les ressources sont **interdépendantes** : il est clair en effet que le choix d'une ressource peut influer sur le choix de ressources de types différents. Le choix d'une certaine machine impose une sélection des outils parmi ceux qu'elle peut utiliser (des forets sur une perceuse, des fraises sur une fraiseuse, des couteaux sur un tour, etc). Réciproquement, le choix d'un outil pour réaliser une OV impose l'utilisation d'une machine sur laquelle l'outil en question puisse se monter.

Conclusion

La spécification des ressources et la notion de regroupement d'actions à des niveaux différents suivant la hiérarchie établie entre les différents types de ressource, nécessite une représentation des plans plus évoluée qu'un simple séquencement d'actions. Il faut en plus que la méthode de résolution employée puisse raisonner sur cette représentation, notamment à propos du choix des ressources et des interdépendances qui peuvent exister entre elles.

2.4 Nature conflictuelle des critères d'élaboration

Les critères qui rentrent en ligne de compte dans l'élaboration d'une Gamme d'Usinage sont la plupart du temps conflictuels. Ce sont généralement des critères économiques qui s'opposent à des critères technologiques. Prenons à nouveau l'exemple des alésages

sécants de la figure 3.3. Pour des raisons technologiques, nous avons vu qu'il est préférable d'adopter le processus suivant :

$$(\textit{ébaucher } A_1) \rightarrow (\textit{ébaucher } A_2) \rightarrow (\textit{finir } A_2) \rightarrow (\textit{finir } A_1)$$

Si l'atelier utilisé ne comporte que des machines à un seul axe, cet enchaînement conduit à 3 regroupements successifs :

direction Z	*(ébaucher A_1)*
direction Y	*(ébaucher A_2)* *(finir A_2)*
direction Z	*(finir A_1)*

Ceci rentre en conflit avec les critères économiques selon lesquels il est préférable de regrouper le plus possible les usinages, afin d'éliminer les pertes de temps dues aux changements de ressources. Dans le cas précédent, un tel critère aurait conduit à deux regroupements seulement : le premier suivant la *direction Z*, le second suivant la *direction Y*, au détriment de la qualité finale de l'alésage A_1.

Conclusion

Le seul moyen d'arriver à une solution revient à faire du **compromis**, c'est-à-dire à résoudre les conflits en ne satisfaisant pas les critères auxquels on attache le moins d'importance. L'utilisation d'un algorithme de compromis, capable de traiter les situations d'échec dues à la nature conflictuelle des critères d'élaboration des Gammes d'Usinage, semble ici tout-à-fait pertinente. Cet algorithme doit non seulement permettre d'arriver à une solution, mais il doit aussi garantir en quelque sorte son "optimalité", c'est-à-dire s'assurer que le "moins possible" de critères aient été enfreints.

2.5 Conclusion

Nous venons de voir que le problème de la conception de Gammes d'Usinage peut être perçu comme un **problème de planification hiérarchique**, lequel peut être résolu grâce à l'utilisation successive de deux types de stratégie :

1. Une **stratégie de linéarisation**, qui détermine des *buts intermédiaires*, divisant ainsi le problème initial en une séquence de sous-problèmes de planification. La conception d'une Gamme d'Usinage revient alors à concevoir chacune des Sous-Gammes permettant de passer d'un état intermédiaire de la pièce au suivant.

2. Une **stratégie de planification non linéaire** pour résoudre chacun des sous-problèmes (la conception de chaque Sous-Gamme). La planification COP, mise au point par Tsang [Tsang 87], et dont les concepts sont décrits dans le chapitre suivant, conviennent parfaitement, moyennant une adaptation aux concepts mécaniques et aux types de ressources utilisées.

De plus, le besoin de raisonner sur les ressources nécessite la définition d'une représentation de plan plus évoluée qu'un simple séquencement d'actions. Là encore, le type de représentation utilisé par la planification COP est adapté. Enfin, l'aspect conflictuel des critères d'élaboration des gammes implique l'utilisation d'une technique qui permette de se sortir de telles situations d'échec. Nous avons choisi pour cela l'algorithme de compromis développé par Descotte [Des 81] [Des 85] [Tsa 87].

Dans le chapitre suivant, dédié aux stratégies de planification utilisées dans le cadre de notre application, sont exposés les principes de ces stratégies et de ces mécanismes. Mais avant de les aborder, examinons la manière dont certains systèmes de génération automatique de Gammes d'Usinage ont répondu à ces caractéristiques bien spécifiques.

3 Analyse et critique de quelques systèmes

De nombreux systèmes d'élaboration de Gammes d'Usinage ont été conçus à l'aide de méthodes IA. A notre connaissance, tous n'ont pas abordé cependant le problème de la détermination des états intermédiaires à l'issue des Sous-Gammes ou des Traitements Thermiques. Concevoir une Gamme d'Usinage revient dans ce cas à la conception d'une Sous-Gamme, c'est-à-dire à la seconde phase du processus de planification que nous avons exposé dans le paragraphe précédent.

Nous présentons ci-dessous les trois systèmes Machinist [Hay 87], GARI [Des 81] et PROPEL [Tsa 87], dont les approches méritent d'être explicitées. Nous allons voir en particulier que ces systèmes sont difficilement intégrables au sein de systèmes CIM, essentiellement pour les deux raisons suivantes :

- ils ne produisent pas des gammes suffisamment détaillées, et sont donc difficilement exploitables en aval,
- la description des pièces sous forme d'entités ne repose pas sur une formalisation des concepts mécaniques, d'où une intégration plus difficile avec des systèmes de conception en amont.

Nous aurions pu présenter à ce propos le système TOM, développé à l'Université de Tokyo [Mat 82], qui a été le premier à réaliser l'intégration complète, à la fois vers

l'amont avec un système de CAO, et vers l'aval avec un générateur de programme CN. Mais la partie conception de gamme est très réduite, car TOM ne génère pas des gammes pour des pièces, mais pour des alésages isolés, entités qui ne posent pas de problèmes en ce qui concerne leur identification et le passage à la CN (cf. paragraphe 2.3 du chapitre 2).

3.1 Machinist

Machinist est un système de conception de gammes pour des pièces prismatiques, développé à Carnegie Mellon University par C. Hayes [Hay 87].

Le processus de génération d'une gamme consiste à analyser dans un premier temps les interactions potentielles entre les différents sous-buts à atteindre, puis à tenir compte de ces dépendances pour générer un plan satisfaisant dès le premier essai. Cette démarche est intéressante, mais ne semble pas adaptée à la nature conflictuelle et à la variété des critères d'élaboration des Gammes d'Usinage :

- Le système analyse exclusivement des interactions d'ordre technologique ; celles-ci sont donc privilégiées par rapport aux critères économiques, ce qui ne doit pas être toujours le cas.
- La stratégie adoptée ne comporte pas de mécanisme qui permette d'effectuer des compromis ; or une analyse des dépendances, même purement technologique, peut conduire à des conflits qui ne peuvent être résolus qu'au moyen de compromis : lorsque par exemple une entité A doit être usinée avant une entité B, elle-même avant C, et C avant A.

De plus, Machinist ne génère pas les usinages élémentaires de la gamme, et reste au niveau des sous-buts qui consistent à usiner chaque entité. Par suite, une gamme produite par Machinist est un ordre de réalisation des entités qui composent une pièce. Il n'est donc pas question de combiner les usinages entre eux, et le système reste très évasif au niveau de la spécification des ressources.

Par conséquent, si les principes de Machinist sont intéressants (utilisation des interactions entre sous-buts pour guider la planification), son application à la conception de Gammes d'Usinage est plutôt limitée. A titre informatif, Machinist est construit à l'aide d'OPS5, et la base de connaissances comporte 180 règles de production.

3.2 GARI

Le système GARI est le premier système de conception de Gammes d'Usinage utilisant des méthodes IA apparu dans la littérature. Il a été développé au LIFIA par Y. Descotte [Des 81], et conçoit des Gammes d'Usinage pour des pièces de technologie fraisage. Il fait appel pour cela à une stratégie de planification non linéaire, qui met en parallèle des sous-plans associés aux entités, puis applique des contraintes issues de règles expertes qui réduisent progressivement l'ensemble solution. Cette stratégie lui permet notamment de résoudre les interdépendances entre sous-buts. De plus, il utilise la première version de l'algorithme de compromis présenté dans le chapitre 4, afin de résoudre les situations d'échec dues aux critères conflictuels d'élaboration des gammes.

Le système GARI possède cependant plusieurs défauts que nous énumérons ci-dessous :

- Les pièces sont décrites à l'aide d'entités (trous, poches, rainures, etc), mais il n'existe pas de méthodologie de modélisation évitant toute ambiguïté d'interprétation.
- Les processus de réalisation associés aux entités qui composent la pièce sont excessivement simples (une ébauche optionnelle + une finition), ce qui ne correspond pas à la réalité.
- La formalisation choisie pour représenter les gammes correspond mal à la structure des Gammes d'Usinage : les sous-phases correspondent à l'utilisation simultanée d'une même machine et d'un même appui ; une opération regroupe des usinages qui peuvent être réalisés simultanément avec le même outil, sans pourtant que GARI ne définisse l'outil ou le type d'outil utilisé.

GARI est écrit en MacLisp, et sa base de connaissances comporte une cinquantaine de règles.

3.3 PROPEL

Le système PROPEL conçoit lui aussi des gammes pour des pièces de fraisage. Il a été développé par J.P. Tsang [Tsa 87] au LIFIA et à ITMI, et se situe dans la lignée du système GARI. Il emploie une stratégie non linéaire de Combinaison Opportuniste de Plans (COP). Une première phase (initialisation) consiste à associer indépendamment à chaque entité un sous-plan qui permet de l'usiner ; comme dans GARI, ces sous-plans sont mis en parallèle, ce qui constitue un ensemble initial de solutions. La deuxième

phase (phase contrainte) réduit progressivement cet ensemble de solutions, compte tenu de contraintes technologiques et économiques, issues de règles expertes. Pour résoudre les conflits éventuels entre contraintes, PROPEL utilise la deuxième version de l'algorithme de compromis de Descotte (celle présentée dans le chapitre 4). Par rapport à GARI, PROPEL a l'avantage de concevoir des processus de réalisation plus élaborés et plus réalistes pour chaque entité. De plus, PROPEL utilise une modélisation de plan plus adéquate, qui permet de représenter et de manipuler plus aisément les ressources affectées à chaque usinage.

Nous pouvons émettre cependant quelques critiques à l'égard de PROPEL :

- Là non plus, il n'existe aucune méthode précise pour identifier les entités d'une pièce, d'où les problèmes d'ambiguïté dont nous avons déjà parlé.
- A chaque action élémentaire d'une gamme, PROPEL n'associe pas un outil mais un type d'outil. Ceci a plusieurs conséquences sur la qualité des gammes générées :
  - Dans le but de réduire la combinatoire, PROPEL se contente d'affecter un type d'outil à chaque action. Ceci ne permet donc pas de regrouper les usinages consécutifs qui utilisent le même outil ; en conséquence, les gammes générées ne sont pas entièrement spécifiées.
  - Quoique plus évolués que les sous-plans générés par GARI, les processus que PROPEL construit pour chaque entité sont encore trop vagues et ne caractérisent pas suffisamment les usinages.

PROPEL a été écrit en CommonLisp. La base de connaissances de la phase d'initialisation comporte une soixantaine de règles ; celle de la phase contrainte dépend du type d'atelier utilisé et comprend en moyenne une quarantaine de règles.

4

Chapitre 4

Stratégies de planification et d'amendement utilisées

Ce chapitre est consacré à la présentation des différentes stratégies de planification employées par le système GAGMAT. La **stratégie de linéarisation** permet de décomposer le problème initial de conception de gamme en sous-problèmes consécutifs qui sont l'élaboration de chaque Sous-Gamme (paragraphe 1). La **planification COP** convient, quant-à-elle, à la résolution de chacun de ces sous-problèmes (paragraphe 2). L'**algorithme de compromis** de Descotte, permettant de résoudre les situations d'échecs dues à l'aspect conflictuel des critères d'élaboration, est présenté au paragraphe 3. Nous étudions enfin dans le paragraphe 4 un mécanisme d'amendement de plans fondé sur cet algorithme de compromis.

1 Stratégie de linéarisation

Nous avons dit qu'un problème de planification est **linéarisable** s'il est possible de définir a priori une suite de **buts intermédiaires** qu'il faut satisfaire avant d'arriver au but final, et qui garantissent que celui-ci soit atteint.

La linéarisation d'un problème est fortement liée aux interdépendances entres les différents sous-buts à atteindre. La stratégie à employer doit par conséquent analyser ces interdépendances pour arriver à déterminer les *buts intermédiaires*.

1.1 Notions préliminaires

Les problèmes de planification auxquels nous nous intéressons sont des problèmes de *planification conjonctive*, où un but s'exprime forcément sous la forme d'une conjonction de sous-buts qu'il faut atteindre simultanément. Chaque sous-but peut se décomposer à son tour en une conjonction de sous-buts, et ainsi de suite jusqu'à ce que nous pouvons appeler des **sous-buts élémentaires**, au niveau des prédicats auxquels font référence les opérateurs. Tous les sous-buts qui appartiennent à la décomposition du *but final* sont appelés **sous-buts finals**. Les opérateurs définissent ainsi la **granularité du raisonnement.**

Plus ces opérateurs sont généraux, et plus il y a de chances que les sous-buts qu'ils permettent d'atteindre soient interdépendants. Prenons l'exemple de la construction d'une maison, le but est de la réaliser entièrement, ce qui s'exprime par le but final *(finie Maison)*. Ce but peut se décomposer récursivement à plusieurs niveaux en sous-buts (cf. figure 4.1). Si les opérateurs disponibles pour atteindre le but final manipulent des prédicats du même type que les sous-buts du premier niveau de décomposition, alors le problème peut ne pas être linéarisable. En effet, soient *finir-murs* et *installer-électricité* les opérateurs dont on dispose : le premier permet d'atteindre le sous-but *(finis Murs)*, le second le sous-but *(installée Electricité)* ; ils ne permettent pas cependant d'atteindre le but final car les sous-buts précédents sont interdépendants. Par contre, en choisissant des opérateurs plus fins, au second niveau de la décomposition par exemple, le problème devient linéarisable : une séquence de tels opérateurs, permettant d'atteindre la conjonction *(finis Murs)* $\wedge$ *(installée Electricité)*, est alors :

construire-murs $\rightarrow$ *placer-fils* $\rightarrow$ *plâtrer-murs* $\rightarrow$ *tapisser-murs* $\rightarrow$ *placer-prises*

Cet exemple induit la remarque suivante :

> *La possibilité de linéariser un problème de planification est fortement liée au niveau de précision des prédicats auquel on a choisit de travailler, et à l'ensemble des opérateurs qui lui est associé.*

1.2 Principes de linéarisation

1.2.1 Première approche

Linéariser un problème de planification nécessite une analyse préliminaire des dépendances qui existent entre les *sous-buts élémentaires*. Rappelons que deux sous-buts

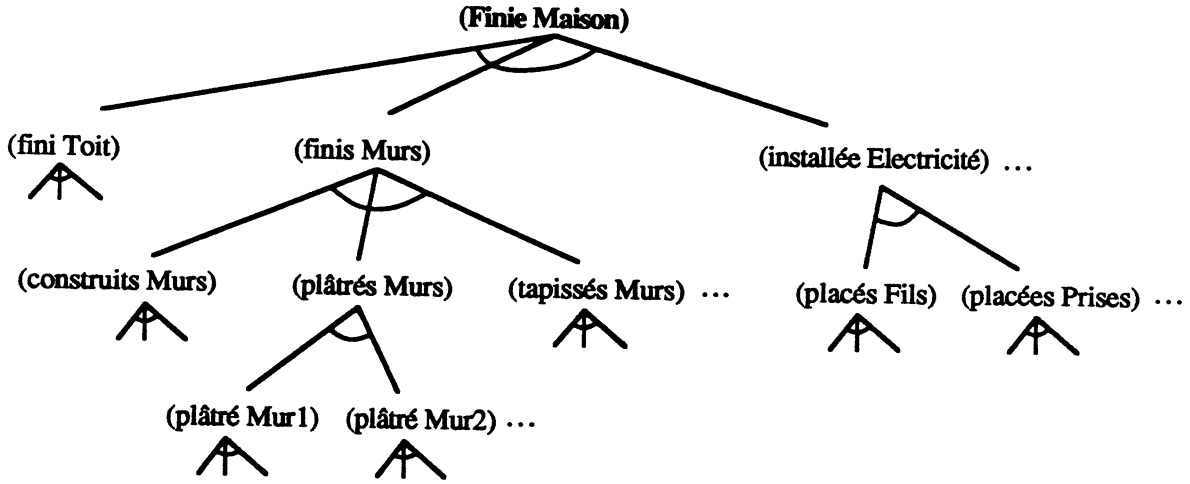


Figure 4.1 : Décomposition du but final *(finie Maison)*

sont **dépendants** lorsque la satisfaction de l'un d'entre eux entraîne la destruction de l'autre s'il avait été précédemment atteint.

Etant donné l'ensemble des *sous-buts élémentaires* qui composent le *but final*, et connaissant toutes les relations de dépendance entre eux, considérons le graphe orienté dont les sommets sont les *sous-buts élémentaires*, et où les arcs représentent les effets destructifs des uns sur les autres ($SB_1 \rightarrow SB_2$ si SB_1 *"viole"* le sous-but SB_2). Nous pouvons tirer les conclusions suivantes à partir d'un tel graphe :

- s'il n'existe pas de chemin entre SB_1 et $SB_2 \Rightarrow$ ils sont indépendants,
- s'il existe un chemin allant de SB_1 à SB_2, mais pas de SB_2 à $SB_1 \Rightarrow$ ils sont dépendants, mais peuvent être atteints séquentiellement,
- s'il existe un chemin de SB_1 à SB_2, un autre de SB_2 à $SB_1 \Rightarrow$ ils sont dépendants et ne peuvent pas être atteints séquentiellement (ils correspondent à des sommets fortement connexes).

Si l'on applique ces principes au graphe représenté sur la figure 4.2, nous pouvons conclure que :

- le sous-but SB_{10} est indépendant de tous les autres sous-buts,
- SB_9 et SB_8 peuvent être atteints séquentiellement : SB_9 puis SB_8,
- SB_5 et SB_6 ne peuvent pas être atteints séquentiellement.

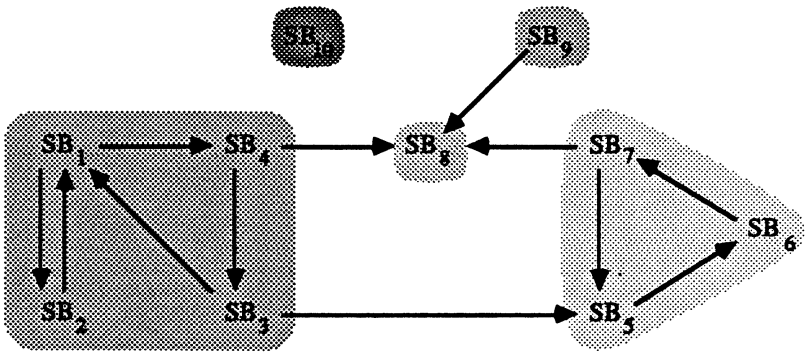


Figure 4.2 : Exemple de dépendances entre sous-buts

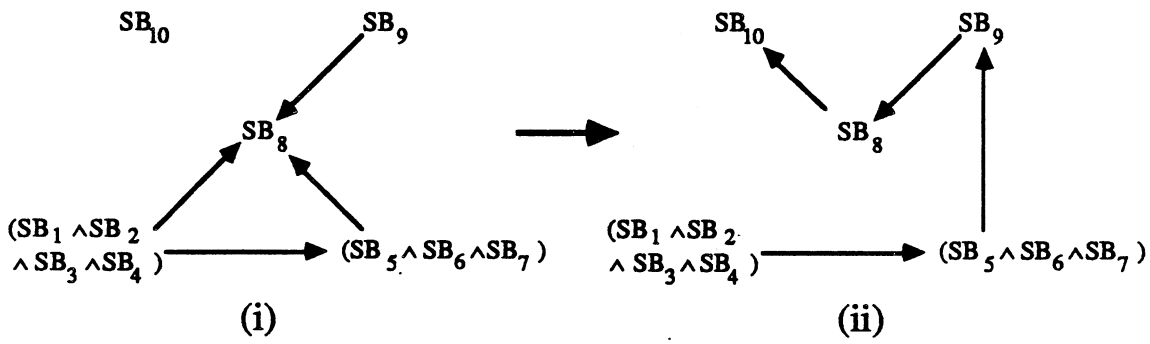


Figure 4.3 : Création des buts intermédiaires, puis linéarisation

S'il existe plusieurs composantes fortement connexes[1] dans un tel graphe, alors le problème correspondant est linéarisable. Les **buts intermédiaires** sont les conjonctions des *sous-buts élémentaires* d'une même composante fortement connexe, et il est possible de trouver un ordre de satisfaction de ces buts qui garantisse que l'on arrive au *but final.* En effet, le graphe réduit, c'est-à-dire le graphe correspondant dont les sommets sont les composantes fortement connexes, a la propriété de ne pas comporter de circuit.

Considérons à nouveau l'exemple du graphe de la figure 4.2, ses composantes fortement connexes correspondent aux parties grisées. Le graphe réduit est représenté par le graphe (i) de la figure 4.3, et le graphe (ii) de cette même figure est une des linéarisations possibles des *buts intermédiaires.*

Remarque : Jusqu'à présent, les *sous-buts élémentaires* que nous avons évoqués font

[1]Une composante fortement connexe est un sous-ensemble maximal de sommets du graphe, tel que pour tout couple (A, B) d'éléments de cet ensemble, il existe un chemin allant de A à B et un chemin de B à A.

tous partie de la décomposition du *but final* ; ce sont donc sont des *sous-buts finals.*

1.2.2 Introduction des sous-buts intermédiaires

La remarque précédente est très restrictive. En effet, il arrive fréquemment que des *buts intermédiaires* ne soient pas exclusivement composés de *sous-buts finals.* Tel est le cas dans les deux exemples suivants :

- Lorsque nous désirons nous rendre à un endroit, nous découpons souvent le trajet en plusieurs étapes successives pour passer en des lieux intermédiaires ; bien sûr, une fois arrivé à destination, ces sous-buts ne sont plus vérifiés.
- Soit un problème classique d'assemblage en robotique, le but atteint à la fin de l'étape de saisie n'est plus vrai une fois l'assemblage réalisé.

C'est la raison pour laquelle nous définissons la notion de **sous-but intermédiaire** :

> *Un sous-but est dit* **intermédiaire** *s'il existe une suite d'opérateurs permettant de passer de l'état initial à un état où ce sous-but est vérifié, et une suite d'opérateurs permettant de passer de cet état à un état final où il ne l'est plus nécessairement.*

Ainsi, pour chaque *sous-but final*, il peut être possible de déterminer une séquence de *sous-buts intermédiaires*, qu'il faut satisfaire avant d'y arriver, et qui garantissent qu'il soit atteint. La relation d'ordre concernant la satisfaction des *sous-buts intermédiaires* d'un *sous-but final* est appelée **relation de précédence**, et les **relations de dépendance** précédentes peuvent exister entre *sous-buts intermédiaires* de *sous-buts finals* différents. Les sémantiques de ces relations quant à l'ordre de satisfaction des sous-buts sont équivalentes : SB_1 *"précède"* SB_2 signifie que SB_1 doit être satisfait avant SB_2, SB_1 *"viole"* SB_2 signifie aussi que SB_1 doit être satisfait si possible avant SB_2. Ceci nous permet d'affirmer que la démarche précédente de linéarisation peut être appliquée à l'ensemble des *sous-buts finals* et *intermédiaires*, avec les deux types de relations précédents. En conséquence, les *buts intermédiaires* sont des conjonctions de *sous-buts finals* et de *sous-buts intermédiaires.*

L'intérêt des *sous-buts intermédiaires* est évident : leur création peut quelquefois permettre de linéariser un problème qui ne l'était pas en ne considérant que des *sous-buts finals* (cf. figure 4.4). Et même si le problème était déjà linéarisable, leur introduction augmente éventuellement le nombre de *buts intermédiaires*, et a donc tendance à diminuer davantage encore sa complexité.

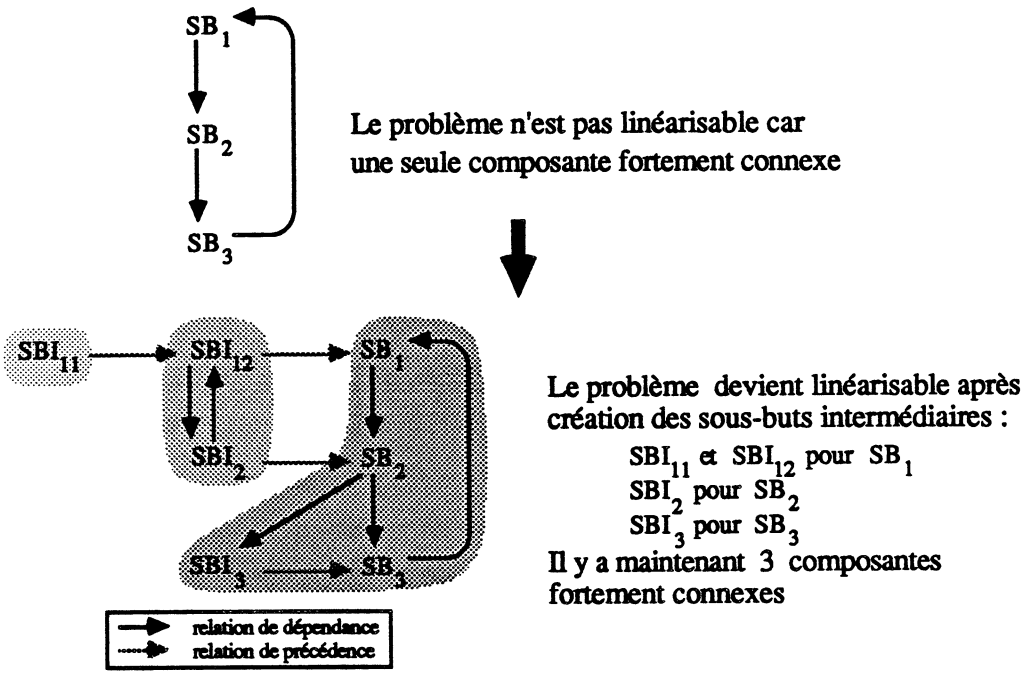


Figure 4.4 : Linéarisation d'un problème grâce aux sous-buts intermédiaires

1.2.3 Conclusion

Le but de cette approche est donc d'isoler les ensembles de *sous-buts finals* et *intermédiaires* entre lesquels il existe de fortes dépendances. Un *but intermédiaire* correspond à la conjonction des sous-buts d'un tel ensemble. Le problème initial est ainsi décomposé en une suite de sous-problèmes de planification plus simples pour atteindre successivement les *buts intermédiaires.*

Toute la difficulté repose sur la justesse de l'analyse des dépendances entre sous-buts (en particulier, il ne faut pas que la résolution ultérieure d'un des sous-problèmes remette en cause les decisions prises lors de cette étape préliminaire), et sur la bonne détermination des *sous-buts intermédiaires* (par exemple, si le but est d'aller de Grenoble à Lyon, le *sous-but intermédiaire* Bourgoin est plus pertinent que Chambéry). Autrement dit, tout repose sur l'exactitude et la validité des connaissances utilisées lors de cette phase.

Le processus de planification complet s'apparente à une planification hiérarchique à deux niveaux d'abstraction :

- La première phase consiste à générer un plan général, sous la forme d'une séquence de sous-problèmes. Chacun de ces sous-problèmes peut être assimilé à un *macro-*

opérateur (défini après coup), qui permet d'atteindre les sous-buts qui lui sont affectés.

- La deuxième phase revient à décomposer ces *macro-opérateurs* pour arriver à des séquences d'actions élémentaires.

1.3 Exemple concernant la conception de Gammes d'Usinage

1.3.1 Principes

Le *but final* d'une Gamme d'Usinage est d'usiner la pièce pour laquelle elle est conçue. Si l'on considère cette pièce comme un ensemble d'entités $(E_i)_{i\in[1,n]}$, ce but final s'exprime sous la forme d'une conjonction de *sous-buts finals* qui sont la réalisation de chacune des entités :

$$(usiné\ E_1) \wedge (usiné\ E_2) \wedge \cdots \wedge (usiné\ E_n)$$

En étudiant les caractéristiques de la conception de Gammes d'Usinage, nous nous sommes aperçus que ce problème est *fortement couplé*, c'est-à-dire qu'il existe de fortes dépendances entre tous ces sous-buts finals. Si l'on se contente de ces derniers, ces dépendances rendent le problème difficilement linéarisable. Or nous savons qu'il existe des états intermédiaires de la pièce par lesquels il faut nécessairement passer, et qui sont les états de la pièce à l'issue de chaque Sous-Gamme ou Traitement Thermique. Ces états intermédiaires de la pièce peuvent être considérés comme des *buts intermédiaires* du problème de la conception de gamme. Or un état intermédiaire de la pièce correspond à une conjonction des états intermédiaires de chacune des entités, lesquels sont donc assimilables à des *sous-buts intermédiaires.*

Le problème de la conception de Gammes d'Usinage est toutefois légèrement différent du problème tel que nous l'avons abordé précédemment. On se trouve ici dans un cadre particulier qui simplifie le travail de linéarisation. Il est en effet assez facile d'identifier les Sous-Gammes ; le raisonnement ne se situe donc pas exclusivement au niveau des dépendances entre sous-buts, et il s'agit plutôt de répartir ces sous-buts dans les Sous-Gammes. Une fois ce travail réalisé, les buts devant être atteints à l'issue de chaque Sous-Gamme correspondent à des composantes fortement connexes telles que nous les avons étudiées.

1.3.2 Fonctionnement

Les deux hypothèses suivantes :

- deux paramètres permettent de qualifier une Sous-Gamme :
  - son **type** : nous ne considérons que trois types possibles *(ébauche, finition, rectification)*,
  - sa **technologie** : deux technologies seulement *(fraisage, tournage)*,
- une entité ne peut être réalisée qu'au moyen d'une seule technologie,

nous permettent alors de définir un prédicat pour chaque type de Sous-Gamme. Ce prédicat, appliqué à une entité, caractérise le *sous-but intermédiaire* atteint à l'issue de la Sous-Gamme du type correspondant, si toutefois celle-ci existe, et si l'entité y est usinée. Ces prédicats sont les trois suivants :

ébauché, fini, rectifié.

Suivant les paramètres d'une entité E_i, le sous-but final (*usiné* E_i) peut se décomposer des deux manières suivantes en *sous-buts intermédiaires* :

$$(\textit{ébauché } E_i) \rightarrow (\textit{fini } E_i)$$
$$(\textit{ébauché } E_i) \rightarrow (\textit{fini } E_i) \rightarrow (\textit{rectifié } E_i)$$

Quant aux Traitements Thermiques, on suppose qu'ils ne modifient que la structure de la matière (changement de dureté ou stabilisation), et que les variations morphologiques sont négligeables. Nous considérons deux types de Traitement Thermique seulement : *trempe+revenu* et *stabilisation.*

En conclusion, linéariser le problème de la conception d'une Gamme d'Usinage revient à identifier et à ordonner les Sous-Gammes et Traitements Thermiques qui la composent, en spécifiant pour chacun d'entre eux les *sous-buts intermédiaires* qui doivent être atteints. Tout ceci est réalisé via l'utilisation de connaissances expertes, sur lesquelles reposent la validité de la linéarisation. Illustrons le fonctionnement de cette phase de linéarisation sur un exemple simple de conception de Gamme d'Usinage.

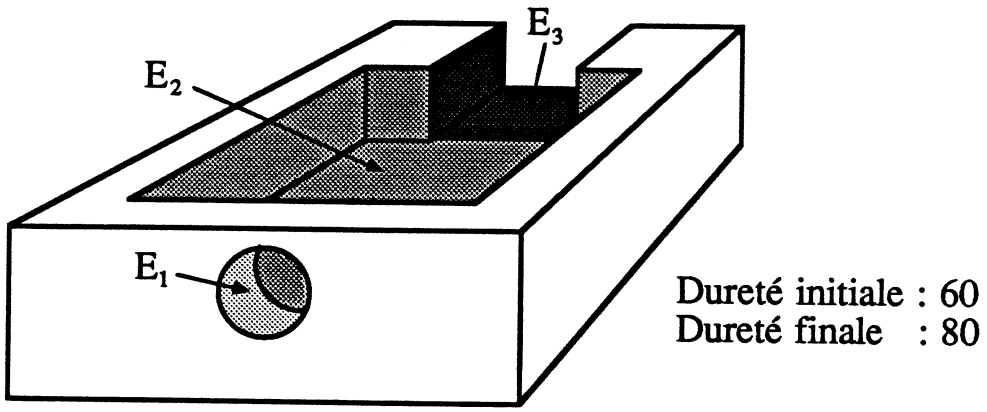


Figure 4.5 : Pièce à usiner

1.3.3 Exemple d'application

Description succinte de la pièce à usiner :

Soit la pièce de la figure 4.5 ; elle est composée de trois entités à usiner (E_1 alésage débouchant, E_2 poche, E_3 rainure), dont les états de surface sont supérieurs à 1,6. De plus, la dureté initiale de la matière du brut de départ est égale à 60, la dureté finale de la pièce doit être de 80.

Linéarisation de la Gamme :

Les connaissances de linéarisation d'une Gamme d'Usinage nous permettent de prendre les décisions suivantes :

1. La dureté initiale est différente de la dureté finale, ce qui implique la présence d'un Traitement Thermique de *trempe + revenu*, que nous notons TTTR.
2. La pièce est parallélépipèdique, toutes les entités seront donc réalisées en technologie fraisage.
3. Il n'y a pas d'entité dont l'état de surface final soit inférieur à 1.6, tous les *sous-but finals (usiné E_i)* se linéarisent de la manière suivante en *sous-buts intermédiaires* :

$$(\textit{ébauché } E_i) \rightarrow (\textit{fini } E_i)$$

4. Il n'y a pas de *sous-but intermédiaire (rectifié E_i)*, donc pas de Sous-Gamme de type *rectification.*
5. Il existe (au moins) une entité devant être fraisée, ce qui implique l'existence d'une Sous-Gamme de *finition* en *fraisage*, notée SGFF.

6. Il n'existe pas d'entité devant être tournée, donc pas de Sous-Gamme de *tournage.*
7. L'entité E_2 est volumineuse par rapport à la pièce, et il existe un TT de *trempe + revenu*, ce qui implique la présence d'une Sous-Gamme d'*ébauche* dont la technologie est la technologie suivant laquelle E_2 est réalisée ; il existe donc une Sous-Gamme d'*ébauche* en *fraisage*, que nous notons SGEF.
   Le *sous-but intermédiaire (ébauché E_2)* doit être atteint à l'issue de cette SG.
8. Chaque entité qui doit être fraisée (i.e E_1, E_2 et E_3) est associée à la Sous-Gamme de *finition* en *fraisage.*
   En conséquence, les *sous-buts intermédiaires (fini E_i)*$_{i=1,2,3}$ doivent donc être atteints à l'issue de cette SG.
9. La dureté finale est inférieure à 135, la Sous-Gamme de *finition* a donc lieu après le TT de *trempe + revenu.*
10. Une Sous-Gamme d'*ébauche* et de technologie donnée a toujours lieu avant la Sous-Gamme de *finition* correspondante.
11. Une Sous-Gamme d'*ébauche* a toujours lieu avant le TT de *trempe + revenu.*

Conclusion :

Ces connaissances nous ont permis de décomposer la génération de la Gamme d'Usinage de la pièce de la figure **4.5** en deux Sous-Gammes (SGEF et SGFF) et un Traitement Thermique (TTTR), ordonnés de la manière suivante :

$$\text{SGEF} \rightarrow \text{TTTR} \rightarrow \text{SGFF}$$

Les *buts intermédiaires* devant être atteints à l'issue de chacun des Sous-Gammes et Traitements Thermiques sont les suivants :

SGEF	TTTR	SGFF
(ébauché E_2)	(dureté-pièce 80)	(fini E_1) (fini E_2) (fini E_3)

En conclusion, la conception de cette Gamme d'Usinage se décompose en trois sous-problèmes qui sont la conception de chacune des Sous-Gammes et du Traitement Thermique. Si le sous-but associé à ce dernier suffit à le spécifier, tout reste à faire en revanche pour les Sous-Gammes : il faut générer et ordonner les usinages élémentaires qui permettent d'atteindre leurs *sous-buts intermédiaires.*

2 La planification COP

La stratégie de planification COP (Combinaison Opportuniste de Plans) a été développée par J.P. Tsang [Tsa 87]. Elle permet de traiter les problèmes de planification qui sont :

- **fortement couplés**, i.e. qui se décomposent en sous-problèmes fortement interdépendants,
- guidés par la notion de **partage de ressources hiérarchisées** et **interdépendantes.**

Nous avons vu dans le chapitre précédent, que la conception de Gammes d'Usinage se divise en sous-problèmes consécutifs – l'élaboration de chaque Sous-Gamme – qui possèdent ces caractéristiques. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé cette technique pour réaliser le système GAGMAT, technique basée sur une représentation de plan hiérarchique [Lag 85] et qui fait appel à un processus de planification constitué de deux phases consécutives.

2.1 Représentation de plans

La planification COP doit non seulement raisonner sur les actions élémentaires d'un plan, mais aussi sur les ressources utilisées par ces actions : notions de partage de ressource (regroupement d'actions) ou de changement de ressource. Il convient donc de définir une structure de plan qui permette de tenir ces raisonnements. Mais définissons plus précisément ce qu'est une ressource :

> *Une* **ressource** *est un moyen physique qui participe au déroulement d'une action : par exemple, un vélo pour se déplacer, une tasse pour prendre le thé, etc.*
> *Un* **type de ressource** *est un ensemble de ressources de même nature : par exemple un moyen de transport = {vélo, voiture, train, avion}, un récipient = {tasse, verre, bol, assiette}.*

Les ressources qui participent à une action donnée sont de type différent. Ces types de ressource peuvent être **interdépendants**, dans le cas où le choix d'un certain type de ressource influence le choix d'un autre type de ressource. Ils définissent de plus une **hiérarchie**, dans le sens où le regroupement d'actions qui utilisent un certain type de ressource, se fait à partir de regroupements d'actions qui utilisent un autre type de ressource.

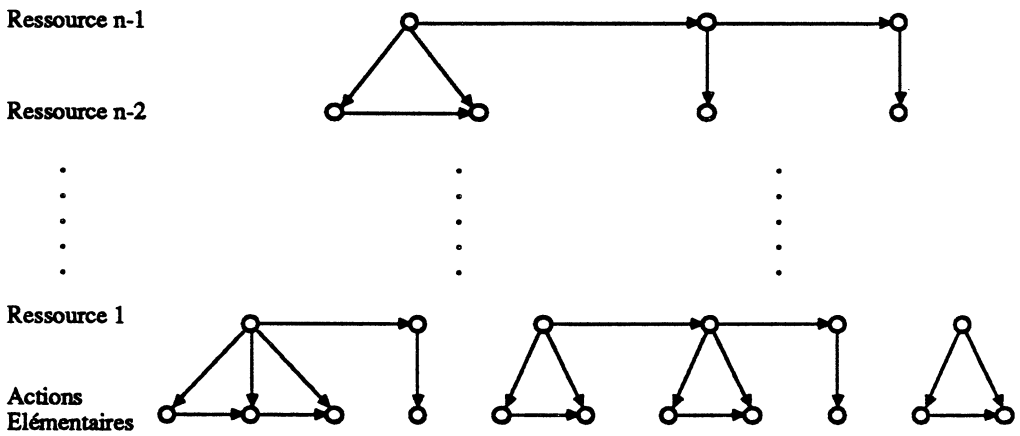


Figure 4.6 : Représentation de plans pour la planification COP

On définit pour cela une action "regroupement d'actions", appelée **ressource-action**, qui correspond à un ensemble d'actions consécutives qui utilisent la même ressource. La structure d'un plan est alors composée de n niveaux hiérarchiques (cf. figure 4.6) où :

- le niveau 1, niveau le plus bas, correspond aux actions élémentaires,
- les niveaux supérieurs, de 2 à n, sont des niveaux de ressource-actions, la hiérarchie entre ces niveaux correspondant à la hiérarchie entre les types de ressource associés.

2.2 Principes de la planification COP

La planification COP est une stratégie de planification parallèle qui applique le principe de *moindre engagement* à la fois :

- **aux actions :** construction de branches parallèles puis linéarisation,
- **aux ressources :** toutes les ressources utilisables a priori sont retenues.

L'objectif est triple : déterminer les actions élémentaires et les ressources utilisées, ordonner les actions élémentaires (séquencement), les regrouper à différents niveaux lorsqu'elles font appel aux mêmes ressources (partage de ressources). Cette stratégie se décompose pour cela en deux phases consécutives : la phase **Initialisation** et la phase **Contrainte**.

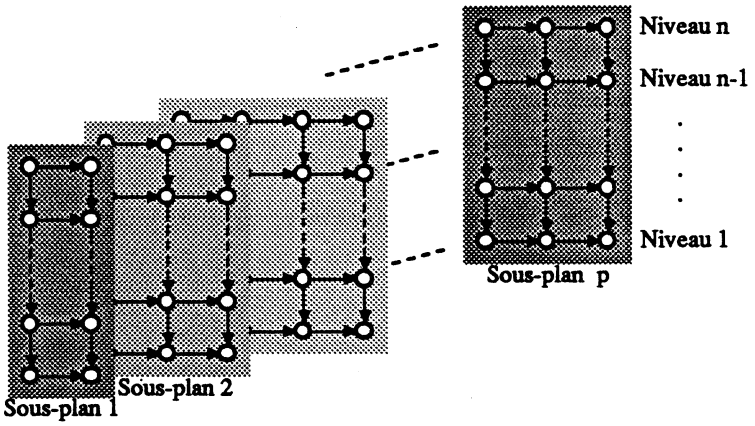


Figure 4.7 : Mise en parallèle des sous-plans hiérarchiques

2.2.1 Phase Initialisation

Le problème de planification est divisé en sous-problèmes résolus en parallèle et indépendamment les uns des autres. Pour chaque action, sont construites les ressource-actions des niveaux supérieurs, auxquelles sont associées toutes les ressources envisageables a priori pour réaliser l'action (en vertu du principe de *moindre engagement*). Les sous-solutions sont des sous-plans hiérarchiques dont les actions sont ordonnées au sens large, c'est-à-dire qui pourront éventuellement se regrouper plus tard. La mise en parallèle de ces sous-plans constitue un ensemble initial de solutions (figure 4.7).

2.2.2 Phase Contrainte

L'hypothèse d'indépendance des sous-solutions est abandonnée. Tous les sous-plans mis en parallèle sont combinés en considérant les interactions qui existent entre les sous-problèmes, via l'application de **conseils**, issus de connaissances sur le domaine traité. L'application itérative de ces conseils induit des **contraintes** qui se propagent et réduisent l'ensemble courant de solutions. Il existe trois familles de conseils :

1. **Ordonnancement d'actions**
   Trois types de relation :

   - Ordre large → les actions sont ordonnées mais restent regroupables :

     relations **avant** et **après**

   - Ordre strict → les actions sont ordonnées et ne sont plus regroupables :

relations **s-avant** et **s-après**

2. **Spécification de ressources**
   Deux sortes de relations sont envisagées :

   - la spécification de ressources, relations qui ont pour nom le type de la ressource :

     type-ressource

   - l'interdiction de ressources, relations du type :

     non-type-ressource

   Ces conseils se traduisent dans les deux cas par une suppression de ressources : en effet, spécifier des ressources revient à interdire celles qui sont possibles mais qui n'ont pas été spécifiées. Supposons par exemple que les ressources associées à une ressource-action soient R_1, R_2 et R_3 : spécifier R_1 revient à éliminer R_2 et R_3, et interdire R_1 revient à éliminer R_1.

3. **Regroupement de ressource-actions**
   Ces conseils ne portent que sur les ressource-actions. Ils sont de deux types et consistent à :

   - regrouper des ressource-actions : elles sont remplacées par une nouvelle ressource-action dont les ressources sont communes aux ressource-actions regroupées. Ces relations ont pour nom :

     même-ressource-action

   - interdire le regroupement de ressource-actions. Les noms des relations sont ici du type :

     différente-ressource-action

2.2.3 Propagation de contraintes et détection de contradictions

Un mécanisme de **propagation de contraintes** est nécessaire pour répercuter les conséquences de l'application de tels conseils à tous les niveaux de la représentation hiérarchique des plans. Par exemple, un regroupement d'actions à un certain niveau de la représentation entraîne des regroupements des actions pères aux niveaux supérieurs ; l'ordonnancement au sens large d'actions peut induire un regroupement d'actions dès

la formation d'un cycle ; il faut aussi que ce mécanisme gère toutes les interdépendances entre ressources à tous les niveaux de la représentation. Nous analysons en détail dans le chapitre 5 ce mécanisme de propagation de contraintes pour la représentation de Gammes d'Usinage que nous avons choisie.

L'application et la propagation de contraintes peuvent conduire à une structure incohérente des plans (il n'y a alors plus de plan solution). Il existe deux types d'incohérence :

- lorsqu'un cycle comporte un ordre strict ou une relation d'incompatibilité,
- lorsque les ressources associées à une ressource-action se réduisent à l'ensemble vide.

Une telle situation, appelée **contradiction**, traduit un conflit entre conseils appliqués. C'est le mécanisme de propagation de contraintes qui permet de les détecter. Pour trouver néanmoins une solution, le système doit être capable de réagir. Le traitement d'une contradiction requiert :

- La possibilité de restaurer un état antérieur cohérent de la représentation des plans. La solution retenue est la suivante : pour chaque contrainte appliquée, soit issue directement d'un conseil, soit due à la propagation d'une autre contrainte, on mémorise les modifications élémentaires de la représentation sous la forme d'un programme inverse au sein d'une pile ; restaurer un état antérieur à l'application d'une contrainte revient à dépiler et à exécuter ces programmes jusqu'à la contrainte incluse.
- Un mécanisme qui permette de remettre en cause l'application de certains conseils. Nous avons choisi pour cela l'**algorithme de compromis** de Descotte [Des 81] [Des 85], dont la dernière version et une extension ont été présentées dans [Tsa 87], et qui est adapté à l'application de conseils d'importances inégales. Le lecteur en trouvera une description détaillée dans le chapitre suivant consacré à l'amendement de plans d'actions.

2.3 Problèmes dus à la représentation

La représentation de plans retenue est équivalente à une **conjonction de primitives**. Un plan étant lui-même défini par une conjonction de primitives, un état donné de la représentation correspond implicitement à un **ensemble de plans** : ceux qui "contiennent" la liste de primitives qui définissent cet état. Nous allons voir que la manipulation

de cette représentation entraîne des limitations sur les contraintes exprimables ; elle a également induit la définition d'une logique trivaluée, source elle aussi de quelques difficultés.

2.3.1 Restrictions sur les contraintes manipulées

Cette représentation sous la forme d'une conjonction de primitives ne permet pas notamment d'exprimer des disjonctions, contrairement à la représentation d'un ensemble en extension, laquelle n'est pas réaliste car beaucoup plus lourde à manipuler. Il n'est pas possible par exemple de représenter tous les plans qui satisfont une disjonction $P_1 \vee P_2$, alors qu'une représentation en extension pourrait contenir côte à côte les plans qui satisfont P_1 et les plans qui satisfont P_2. Il s'ensuit qu'*une contrainte doit obligatoirement s'exprimer sous la forme d'une conjonction de primitives.* Cette restriction n'est toutefois pas la seule. En effet, en cas de retour arrière lorsqu'il y a contradiction, ou de génération d'hypothèse (voir paragraphe suivant), il est nécessaire d'appliquer respectivement la négation d'une contrainte ou d'une condition. L'application de disjonctions étant interdite, il faut que *la négation de ces contraintes s'exprime sous la forme d'une primitive ou d'une conjonction de primitives.* Cette condition est satisfaite en choisissant comme primitives de base **avant**, **¬regroupé** et **¬ressource**. Les contraintes vues précédemment et leur négation s'expriment alors de la manière suivante :

Pour une contrainte

(avant x y)	$\leftrightarrow$	(avant x y)
(s-avant x y)	$\leftrightarrow$	(avant x y) $\wedge$ (¬regroupé x y)
(après x y)	$\leftrightarrow$	(avant y x)
(s-après x y)	$\leftrightarrow$	(avant y x) $\wedge$ (¬regroupé x y)
(ressource x ($R_1 R_2$)	$\leftrightarrow$	(¬ressource R_3) $\wedge$ (¬ressource R_4)
(non-ressource x ($R_1 R_2$)	$\leftrightarrow$	(¬ressource R_1) $\wedge$ (¬ressource R_2)
(même-ressource-action x y)	$\leftrightarrow$	(avant x y) $\wedge$ (avant y x)
(différente-ressource-action x y)	$\leftrightarrow$	(¬regroupé x y)

...et sa négation

(non (avant x y))	$\leftrightarrow$	(avant y x) $\wedge$ (¬regroupé x y)
(non (s-avant x y))	$\leftrightarrow$	(avant y x)
(non (après x y))	$\leftrightarrow$	(avant x y) $\wedge$ (¬regroupé x y)
(non (s-après x y))	$\leftrightarrow$	(avant x y)
(non (ressource x ($R_1 R_2$))	$\leftrightarrow$	(¬ressource R_1) $\wedge$ (¬ressource R_2)
(non (non-ressource x ($R_1 R_2$))	$\leftrightarrow$	(¬ressource R_3) $\wedge$ (¬ressource R_4)
(non (même-ressource-action x y))	$\leftrightarrow$	(¬regroupé x y)
(non (différente-ressource-action x y))	$\leftrightarrow$	(avant x y) $\wedge$ (avant y x)

(les ressources potentielles associées à x sont $\{R_1, R_2, R_3, R_4\}$)

Pour une contrainte quelconque, il se peut cependant que sa négation s'exprime sous la forme d'une disjonction de contraintes. Une technique indépendante de la représentation permet néanmoins de les traiter ; elle se base sur la remarque suivante :

> *Une disjonction $C_1 \vee C_2 \vee \cdots \vee C_n$ est applicable lorsque toutes les contraintes sauf une sont fausses ; il suffit alors d'appliquer la contrainte restante pour satisfaire la disjonction.*

La solution consiste donc à générer n règles du type :

$$(\neg C_1 \wedge \cdots \wedge \neg C_{i-1} \wedge \neg C_{i+1} \wedge \cdots \wedge \neg C_n) \Rightarrow C_i$$

2.3.2 Définition d'une logique trivaluée et conséquences

Une logique trivaluée a été définie afin de pouvoir raisonner sur un ensemble de plans. Pour chaque prédicat p sur un plan, son extension P sur l'ensemble de plans $\mathcal{S}$ est définie comme suit :

$P(\mathcal{S})$ *est* **vrai** $\Leftrightarrow \forall s \in \mathcal{S}$, $p(s)$ *est vrai*
$P(\mathcal{S})$ *est* **faux** $\Leftrightarrow \forall s \in \mathcal{S}$, $p(s)$ *est faux*
$P(\mathcal{S})$ *est* **indéterminé** $\Leftrightarrow \exists (s, s') \in \mathcal{S}^2 / p(s)$ *est vrai et* $p(s')$ *est faux*

Certaines difficultés découlent de l'utilisation de cette logique. Il se peut en effet qu'une règle *en attente* (dont une condition de la partie gauche est indéterminée) soit applicable pour l'un des plans de l'ensemble solution (partie gauche vraie pour ce plan), mais ait sa partie droite en contradiction avec ce plan. Un tel plan, appelé **solution problématique**, doit être éliminé. Une telle règle divise l'ensemble de solutions en quatre parties disjointes selon les valeurs de la partie droite (PD) et de la partie gauche (PG) pour chacun des plans (cf. figure 4.8).

Les solutions problématiques correspondent à la partie grisée ($\neg$PD $\wedge$ PG). On peut les éliminer de deux manières, soit en affirmant la partie droite, soit en niant la partie gauche, ce qui revient dans les deux cas à faire des **hypothèses**. La deuxième solution est toutefois préférable : en effet, une règle étant de la forme $(C_1 \wedge C_2 \wedge \cdots \wedge C_n) \Rightarrow (D_1 \wedge D_2 \cdots \wedge D_m)$, il suffit de nier une condition C_i de la partie gauche pour nier cette dernière, alors qu'il faut affirmer tous les D_j pour affirmer la partie droite. Le nombre

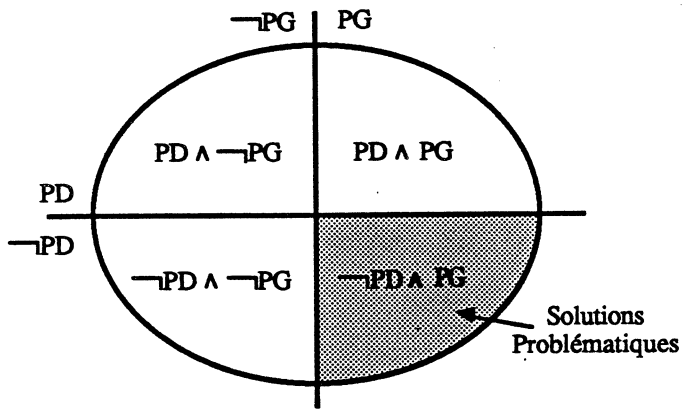


Figure 4.8 : Partition de l'ensemble solution

d'hypothèses est donc moins grand, et les risques de contradiction amoindris. Cette phase de génération d'hypothèses se déroule lors de la phase contrainte, dès qu'il n'y a plus de règles applicables (règles dont la PG est vraie).

Bien que menant à une solution si elle existe, cette génération d'hypothèse s'accompagne néanmoins de **pertes éventuelles de solutions**. En effet, affirmer PD mène à l'élimination des solutions du type (¬PG ∧ ¬PD), et nier PG élimine les solutions du type (PG ∧ PD).

2.4 Caractéristiques de la stratégie COP

La stratégie COP est à la fois une stratégie *non linéaire* et *hiérarchique*.

Elle est *non linéaire* au sens des systèmes DCOMP et NOAH, car elle construit en parallèle des sous-plans pour chacun des sous-buts à atteindre, puis linéarise petit à petit le plan en appliquant des contraintes assimilables aux critiques de NOAH. Le nombre de contraintes est cependant beaucoup plus important que dans les systèmes DCOMP ou NOAH, et celles-ci peuvent s'appliquer dans n'importe quel ordre a priori (il existe seulement 5 types de critique dans NOAH, appliqués suivant un ordre bien défini).

La stratégie COP bâtit un plan *hiérarchique* puisqu'elle regroupe les actions élémentaires en actions de plus "haut niveau". On peut qualifier cette approche d'*ascendante*, contrairement à la démarche *descendante* de NOAH, elle aussi relative aux actions, mais qui consiste à décomposer des actions de "haut niveau" en actions élémentaires. Ce caractère hiérarchique découle en fait de la représentation de plan manipulée qui

permet de raisonner sur les ressources, et de regrouper les actions sur la base du partage de ressources.

3 L'algorithme de compromis

3.1 Définitions préliminaires

L'algorithme de compromis est adapté à la planification sous contraintes où ces dernières sont **interdépendantes, locales**, d'**importances inégales** et **potentiellement conflictuelles**. Le problème de fond est de choisir, à partir d'un ensemble de *conseils* à satisfaire, un sous-ensemble *optimal.* Il est donc nécessaire de définir ce critère d'optimalité.

Selon l'algorithme de compromis, une solution idéale est une solution qui ne rejette aucun conseil (ce qui correspond intuitivement à notre démarche de pensée). Une solution optimale est donc une solution qui rejette le moins de conseils possible. Une telle solution correspond à une solution la plus proche possible de la solution idéale, en fonction d'une métrique qui s'appuie sur l'importance accordée aux conseils rejetés. La définition précise de ce critère d'optimalité requiert donc la spécification d'un **système d'assignation d'importance** aux conseils, et d'une **fonction de cumul** pour évaluer la qualité d'une solution :

- **Système d'assignation d'importance :**
  L'importance d'un conseil est représentée par un nombre entier, appelé **poids,** d'autant plus élevé que le conseil doit être satisfait. Cet ensemble est borné par un entier m et admet un élément supplémentaire ∞ qui correspond à un conseil absolu (contrainte à satisfaire impérativement). La sémantique de l'importance d'un conseil est la suivante : ne pas satisfaire un conseil de poids ∞ est interdit ; ne pas satisfaire une conseil de poids $p < \infty$ génère une pénalité de p.

- **Fonction de cumul :**
  La **qualité** d'une solution se mesure grâce à une fonction f des poids des conseils rejetés, considérés comme des pénalités. Toute fonction convient, pourvu qu'elle satisfasse quelques propriétés [Tsa 87] ; elle doit être, en particulier, monotone croissante. Les fonctions max et $\sum$ en sont deux exemples. Maximiser la qualité revient à minimiser la fonction. Par exemple, avec la fonction max, la qualité d'une solution correspond à la pénalité la plus grande ; avec la fonction $\sum$, la qualité correspond à la somme des pénalités.

3.2 L'algorithme de compromis

L'algorithme de compromis opère sur un ensemble initial de plans potentiels, générés lors d'un processus préliminaire (phase Initialisation de la stratégie COP). L'algorithme consiste alors à appliquer itérativement des conseils et à propager les contraintes qui en découlent, ce qui réduit petit à petit l'ensemble solution courant (un conseil est isssu de la partie droite d'une règle dont la partie gauche est vérifiée, ou découle du mécanisme de génération d'hypothèse). La contrainte appliquée à chaque étape est choisie parmi les conseils de **poids maximum** pour des raisons d'efficacité. Un **cœfficient de décision,** défini comme suit, est associé à chaque contrainte appliquée : soient D_1, D_2, ..., D_n la suite ordonnée des **décisions**[2] prises par le système, le cœfficient affecté à D_n est la qualité de la solution (ensemble de plans) obtenue par application de D_1, D_2, ..., $\neg D_n$ ($\neg D_n$ est la négation de D_n).

L'application d'une contrainte peut induire une contradiction puisque les contraintes sont potentiellement conflictuelles. Lorsqu'une telle situation survient, l'ensemble solution courant se réduit à l'ensemble vide ; le système de représentation communique alors une contradiction au système de décision qui la résoud en rejetant une des contraintes précédemment appliquées. Le système choisit pour cela la plus récente décision D de cœfficient minimum (il y a échec s'il est ∞). Le système se remet alors dans l'état où il était avant son application, puis applique sa négation $\neg D$ pour rendre la contradiction explicite. Le cœfficient de décision associé à $\neg D$ est le minimum des cœfficients des décisions qui étaient appliquées après D, ∞ si D était la dernière (ce cœfficient correspond au coût minimum à payer pour rétablir D). L'algorithme s'arrête lorsqu'il n'y a plus de conseil à appliquer.

Remarque : le poids affecté à une hypothèse est égal à 0 ; ainsi, en cas de contradiction ultérieure à son application, celle-ci est niée plutôt qu'un conseil issu des règles.

L'algorithme est résumé sous la forme d'un programme en pseudo-pascal dans la figure 4.9. Une décision positive correspond à une contrainte en partie droite d'une règle ; une décision négative correspond à la négation d'une telle contrainte. L'heuristique de poids maximum pour choisir la contrainte à appliquer (ligne 8) est juste un exemple, comme nous l'avons déjà notifié précédemment.

[2]Une **décision** correspond à l'application d'un conseil, ou de la négation d'un conseil lors du traitement d'une contradiction

```
programme algorithme-de-compromis(f)

CA := déterminer-contraintes-applicables {Conseils applicables}
SDA := ∅        {Suite des Décisions Appliquées}
SCD := ∅        {Suite des Cœfficients des Décisions}
SPCR := ∅       {Suite des Poids des Conseils Rejetés}
OK := vrai

tantque CA ≠ ∅ et OK faire
    X := choisir C ∈ CA telque Poids(C) = max[poids(CA)]          (ligne 8)
    C_X := f(SPCR,Poids(X))
    appliquer X avec le cœfficient C_X
    tantque contradiction et OK faire
        X := déterminer D ∈ SDA telque Cœf(D) = min[SCD] et D la plus
             récente
        si Cœf(X) = ∞ alors OK := faux
        sinon C_X := déterminer-cœf-min-après(X)
             rétablir-état-système-avant(X)
             appliquer ¬X avec le cœfficient C_X
        finsi
    finfaire
    si OK
    alors SDA := SDA + [X]
        SCD := SCD + [C_X]
        si X positive
        alors CA := CA - {X} ∪ déterminer-nouv-conseils-applicables
        sinon CA := CA -{¬X} ∪ déterminer-nouv-conseils-applicables
             SPCR := SPCR + [Poids(X)]
        finsi
    finsi
finfaire
si OK alors succès sinon échec finsi
```

Figure 4.9 : Algorithme de compromis

Remarques :

1. *Tous les cœfficients des décisions prises par le système sont supérieurs ou égaux à la qualité de la solution courante.*
2. *La solution finale est un ensemble de plans qui sont tous de même qualité.*
3. *La fonction f étant croissante, la valeur de la qualité d'une solution (ensemble de plans) est d'autant plus grande que la solution est mauvaise.*

3.3 Principales propriétés de l'algorithme

Les propriétés de terminaison, d'optimalité et de complétude ont été démontrées dans [Des 85] et [Tsa 87] :

1. **Terminaison :** *l'algorithme se termine au bout d'un temps fini.*
2. **Optimalité :** *la fonction f appliquée aux poids des contraintes rejetées par les plans de l'ensemble solution est minimum sur l'ensemble des plans possibles. En d'autres termes, si le plan proposé est de qualité Q, il n'existe pas de plan de meilleure qualité, c'est-à-dire de qualité $Q' < Q$.*
3. **Complétude :** *s'il existe un plan ne contredisant pas de conseil de poids ∞, alors l'algorithme ne s'arrête pas sur un échec.*

L'algorithme possède néanmoins une propriété supplémentaire, et qui est essentielle en ce qui concerne le problème de l'amendement de plan tel que nous l'avons abordé dans le paragraphe suivant : **la qualité des solutions est indépendante de l'heuristique de choix de la contrainte à appliquer.** Cette propriété découle de la démonstration d'optimalité, au cours de laquelle il n'est pas tenu compte de la manière de choisir le conseil à appliquer à chaque itération du processus de génération. Quel que soit l'ordre d'application des contraintes, la qualité des solutions est donc la même. Ceci ne veut pas dire cependant que la solution est la même.

4 Amendement par satisfaction de contraintes

4.1 Le problème abordé

Dans le cadre de la génération automatique de Gammes d'Usinage, nous avons été confrontés au problème de la correction de plans partiellement erronés. Les raisons de tels échecs en planification sont de deux types :

- **incomplétude et inexactitude des connaissances** : certaines connaissances sont inexactes ou n'ont pas été codées (oubli, formalisme des règles inapproprié, prise en compte trop coûteuse du point de vue de l'efficacité, etc),

- **exécution dans un univers perturbé** : du fait de son caractère évolutif et imprévisible, certaines configurations de l'environnement dans lequel le plan doit s'exécuter n'ont pas été prises en compte lors de l'élaboration du plan, ce qui peut induire un échec lors de son exécution.

Afin d'aboutir à un plan satisfaisant, un système complet de planification doit par conséquent intégrer une fonctionnalité d'amendement en fonction de remarques ou d'informations supplémentaires. Or, les contraintes appliquées lors de la conception de Gammes d'Usinage étant fortement interdépendantes, il n'est pas envisageable de modifier les gammes générées via un éditeur. Examinons en effet l'exemple suivant :

> *Soit un usinage U_1 réalisé avec un outil O_1 sur une machine M_1, regroupé avec d'autres usinages qui utilisent le même outil. Supposons par exemple que l'outil O_1 ne convienne pas, l'affectation d'un autre outil O_2 peut avoir des effets importants sur la structure de la gamme, qui sont difficiles à mesurer. En effet, si O_2 ne peut être monté que sur une machine M_2, il faut alors dissocier l'usinage U_1 des usinages avec lesquels il était regroupé, créer une nouvelle sous-phase associée à la machine M_2 s'il n'y en a pas, ou regrouper U_1 avec des usinages qui sont réalisés sur cette machine, si toutefois les contraintes d'ordonnancement ne s'y opposent pas. Ce simple changement d'outil peut donc se propager et entraîner de multiples changements dans la structure de la gamme.*

Ainsi, une telle modification, pourtant exprimée localement, peut avoir des effets sur la structure générale de la gamme, aussi bien sur des actions antérieures que postérieures à celle qui est mise en cause. Le mécanisme d'amendement dont nous avons besoin doit donc propager ces effets et détecter les éventuels conflits. Il faut noter que nous ne nous intéressons pas à la détection des situations d'échec des plans, ni à la formulation des corrections à leur apporter, mais à l'automatisation de la prise en compte de ces corrections, afin de proposer à chaque fois de nouveaux plans satisfaisants, qui tiennent compte de toutes les interdépendances entre contraintes.

4.2 Travaux antérieurs dans le domaine de l'amendement de plans

Le problème de l'amendement de plans a été abordé essentiellement par deux types de systèmes : les systèmes **réactifs** et les systèmes **adaptatifs**.

4.2.1 La planification réactive

Les systèmes réactifs ne considèrent pas la planification comme un problème autonome, mais connecté au problème concret de l'exécution, afin de tenir compte des évolutions imprévisibles de l'environnement. Ils doivent être capables de prendre rapidement des décisions concernant la suspension et la modification d'un plan au cours de son exécution. Ce besoin de réactivité s'oppose à la détermination d'un plan dans le moindre détail ; l'efficacité de ces systèmes repose par conséquent sur la capacité de gérer le compromis entre ces deux tendances opposées.

Ainsi, certains systèmes font successivement appel à un module de planification et un module d'exécution : le module de planification est appelé en cours d'exécution lorsqu'un problème survient. Tel est le cas du système PLANEX [Fik 72], qui supervise l'exécution de plans générés par STRIPS, en vérifiant après chaque action que la suivante peut s'exécuter. Pour cela, PLANEX code dans une *table triangulaire* les actions avec leurs préconditions et leurs effets sur l'environnement. Après chaque action, cette table permet de poursuivre l'exécution du plan à partir d'un point antérieur ou postérieur au point courant. Ces systèmes sont les plus anciens et les plus simples à mettre en œuvre.

D'autres systèmes privilégient la réactivité par rapport à la planification. Ce sont les systèmes experts *procéduraux*, appelés ainsi car ils appliquent des procédures qui répondent à des situations données, plutôt qu'ils ne planifient. Ils disposent pour cela d'une bibliothèque de plans qui permettent d'atteindre des buts de natures différentes, et qui sont appelés lorsque c'est nécessaire. De tels systèmes ont été proposés par Firby [Fir 87], ainsi que par Georgeff et Lansky [Geo 87]. Ces derniers ont construit une bibliothèque de *Knowledge Areas (KA)*. Chaque *KA* répond à un but donné, et contient un plan sous la forme d'un graphe plus élaboré qu'un simple ordre partiel sur des actions : ceci permet de représenter entre autres des boucles ou des branchements conditionnels. Ces *KA* sont invoqués et empilés à la fois pour atteindre un but donné et pour répondre à un état courant, ce qui dote le système d'"actions réflexes". Un tel système est purement réactif, car il ne coordonne pas les plans entre eux, et tient compte des interactions uniquement lors de l'exécution.

Une autre catégorie de systèmes réactifs privilégie au contraire la planification par rapport à la réactivité. Ceux-ci sont capables de tenir compte de contraintes qui apparaissent au cours de l'exécution sans reprendre entièrement la planification. Le système de Hayes-Roth et al. [Hay 79] peut être considéré comme un tel système, dans la mesure où l'exécution peut avoir une influence rétro-active sur la planification par l'intermédiaire du *blackboard*. Le système d'ordonnancement d'atelier OPIS [Pap 86] dispose d'un mécanisme d'envoi de contraintes qui permet de propager une information extérieure et de modifier ainsi la solution en cours d'exécution et d'élaboration (seules sont ordonnées les actions qui doivent être réalisées dans un futur immédiat, l'ordonnancement des actions ultérieures ayant beaucoup de chances d'être remis en question).

4.2.2 La planification adaptative

Le principe des systèmes de planification **adaptative** (appelée aussi planification **par variante**), consiste à reprendre et à modifier d'anciens plans qui avaient été générés pour atteindre un but similaire à celui escompté. Nous présentons brièvement ci-dessous deux systèmes qui peuvent être qualifiés d'adaptatifs.

PLEXUS [Alt 86] choisit un plan dont le but est analogue à celui recherché, puis il exécute l'une après l'autre chacune de ses actions. Une situation d'échec correspond aux quatre cas suivants : les préconditions de l'action à exécuter ne sont pas satisfaites, l'action exécutée n'a pas les effets attendus, un nouveau sous-but intermédiaire apparaît, l'action n'a aucun lieu d'être dans le nouveau contexte d'exécution. Il dispose de plusieurs stratégies pour remédier à chacune de ces situations : détailler davantage le plan, éliminer l'action courante, la remplacer par un plan d'actions dont le but est identique au sous-but à atteindre, réordonner certaines actions.

CHEF [Ham 86] est un système de planification par variante qui élabore des recettes de cuisine. Il se sert non seulement de plans existants dont il connaît les buts et les problèmes rencontrés lors de leur conception, mais aussi de situations d'échec dont il connaît les causes. Etant donnée la liste des buts à atteindre, CHEF prédit des situations d'échec éventuelles, et génère de nouveaux buts pour les éviter. Il construit ensuite un premier plan à l'aide de plans existants et le modifie si nécessaire à l'aide de règles. CHEF simule alors entièrement ce plan et compare l'état final obtenu avec celui qui est attendu. En cas d'échec, CHEF en explique les causes puis les élimine au moyen de diverses stratégies telles que : ajoût d'actions, remplacement d'une action par une autre, réordonnancement, modifications de paramètres attachés aux actions.

4.2.3 Conclusion

Toutes les stratégies d'amendement présentées ici ne conviennent pas au problème auquel nous nous sommes intéressés.

En effet, un système **réactif** est adapté par définition à la planification *en ligne* : il ne modifie les plans qu'il génère qu'une fois confronté à des situations d'échec, ou suite à l'apparition d'informations inattendues dont il doit tenir compte. Il ne peut donc en aucune façon remettre en question les actions du plan qui ont déjà été exécutées ! L'amendement porte uniquement sur les actions postérieures à celle qui est mise en cause, ou à celle qui s'exécute lorsque surviennent les informations perturbatrices. Il faut noter cependant que certains de ces systèmes (blackboard, OPIS) possèdent des mécanismes d'envoi de contraintes pour propager les effets d'une décision sur les plans en cours d'élaboration.

Quant aux systèmes **adaptatifs**, une de leurs hypothèses fondamentales est la faible interdépendance des contraintes qui existent entre les actions élémentaires des plans. La satisfaction d'une contrainte supplémentaire a par conséquent des effets limités sur la structure du plan amendé, et qui peuvent facilement être codés en fonction du type de situation : ajout, élimination, substitution d'actions, etc.

4.3 La stratégie d'amendement

4.3.1 Principes

Le mécanisme d'amendement que nous proposons s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle tout amendement consiste à émettre des **critiques**, qui peuvent s'exprimer sous la forme de contraintes que doit satisfaire le plan. Cette remarque nous conduit à exploiter l'algorithme de compromis présenté précédemment. La stratégie d'amendement reprend donc la stratégie de compromis. Elle intervient lors d'une phase ultérieure à la phase planification, c'est-à-dire après la phase Contrainte de la planification COP. Cette phase, appelée **phase d'amendement**, est constituée de deux étapes, la première étant manuelle et la seconde entièrement automatique :

1. **Formulation des critiques :**
   Un expert examine le plan obtenu précédemment et, si le plan ne lui convient pas, émet des critiques sous forme de contraintes pondérées. Les poids représentent ici aussi l'importance qu'il accorde à la satisfaction des critiques.

2. **Prise en compte des critiques :**
   Le système essaie de satisfaire les critiques. Ou il rapporte une situation d'échec (pas de solution), ou il génère un nouvel ensemble solution, auquel cas les critiques peuvent parfois ne pas être satisfaites.

4.3.2 Remarques et propriétés

La stratégie d'amendement décrite ci-dessus amène deux remarques :

1. Une critique doit s'exprimer suivant le même formalisme que les conseils en partie droite des règles pour être prise en compte. Elle doit utiliser les primitives de manipulation du système de représentation.

2. L'utilisateur est libre d'affecter le poids qu'il désire aux critiques qu'il émet, de 0 à ∞. Comme nous allons le voir plus loin, le comportement du système peut être différent suivant cette valeur.

Les principales propriétés de la stratégie d'amendement sont les suivantes :

1. L'ensemble solution obtenu après amendement est **optimal**, i.e. la valeur de la fonction f appliquée aux poids des contraintes rejetées est minimale. Ceci découle de la propriété d'*indépendance de l'heuristique de choix de la contrainte à appliquer.*

2. La phase amendement peut être réitérée. Les raisons sont les suivantes. Tout d'abord, l'état du système après amendement est identique à celui avant amendement si la règle *vrai* $\Rightarrow$ *critique* avait été codée au sein de la base de connaissance et lancée en dernier. De plus, la qualité de l'ensemble solution est toujours optimale vis-à-vis des contraintes rejetées (propriété précédente). Pratiquement, ceci signifie qu'un expert peut émettre de nouvelles critiques à propos de la solution amendée courante, et peut donc répéter le processus complet d'amendement.

3. L'ensemble solution après amendement est de moins bonne *qualité* que l'ensemble solution avant amendement. En d'autres termes, si Q est la qualité avant amendement, et Q' après amendement, on a $Q' \geq Q$. Nous explicitons cette propriété dans le paragraphe suivant.

4.4 Fonctionnement du mécanisme d'amendement

Nous pouvons distinguer deux catégories d'amendement suivant les effets d'une critique C sur l'ensemble solution : amendement à **effet local** et amendement à **effet global**.

4.4.1 Amendement à "effet local"

La critique C réduit l'ensemble solution sans pour autant en rejeter tous les plans. Seul un sous-ensemble qui contient le plan proposé est éliminé, et le calcul du nouvel ensemble solution est immédiat.

Le poids affecté à C n'a aucun effet sur le comportement du système puisque celui-ci n'a pas à effectuer de retour arrière. De plus, la qualité de la solution amendée est la même que celle de la solution précédente, puisqu'aucune contrainte supplémentaire n'est rejetée.

4.4.2 Amendement à "effet global"

La critique C réduit l'ensemble solution à un ensemble vide. Il existe donc un conflit entre C et une ou plusieurs décisions de la *Suite des Décisions Appliquées*. L'algorithme de compromis est appelé pour ses capacités de retour arrière. A la fin du processus de compromis, soit le système traduit une situation d'échec (pas de plan solution), soit il fournit un nouvel ensemble solution amendé.

Supposons que l'ensemble solution après amendement ne soit pas vide. Dans ce cas, le poids p affecté à la critique a une influence sur le comportement du système. Nous pouvons distinguer deux cas :

1. **Cas 1 : p = ∞**
   Si le poids p de la critique C est ∞, celle-ci est respectée à coup sûr, car son rejet est impossible. La qualité Q' de la solution est éventuellement dégradée. C'est le cas si le cœfficient d'une décision rejetée est supérieur à Q.

2. **Cas 2 : p < ∞**
   Si le poids affecté à la critique est strictement inférieur à ∞, son respect ou non dépend de p et de la fonction f associée à l'algorithme de compromis. En effet, soit Q la qualité de la solution à amender, le cœfficient de décision affecté à la critique est $f(Q,p)$. Le comportement du système dépend alors des cœfficients de

décision de l'ensemble conflictuel courant[3]. Lorsque le système de représentation détecte une contradiction, plusieurs ensembles conflictuels peuvent apparaître simultanément, auquel cas la résolution du conflit passe par le rejet d'au moins une décision dans chacun des ensembles conflictuels. Nous devons maintenant distinguer deux sous-cas, en fonction des cœfficients des décisions de l'ensemble conflictuel courant $\mathcal{E}$.

(a) **Sous-cas 1 :** $\forall D_i \in \mathcal{E}, coef(D_i) \geq f(Q,p)$
Si l'ensemble conflictuel $\mathcal{E}$ est composé de décisions D_i dont les cœfficients $coef(D_i)$ sont supérieurs ou égaux au cœfficient de la critique $f(Q,p)$, la critique est rejetée . La qualité Q' de la solution amendée se dégrade éventuellement, i.e. $Q' \geq Q$ puisque $coef(critic) = f(Q,p) \geq Q$.

(b) **Sous-cas 2 :** $\exists D_i \in \mathcal{E}/coef(D_i) < f(Q,p)$
S'il existe une décision D_i au sein de l'ensemble conflictuel $\mathcal{E}$ dont le cœfficient est inférieur strictement au cœfficient de la critique $f(Q,p)$, alors le système rejettera tôt ou tard D_i pour éviter $\mathcal{E}$. En effet, s'il existe une décision D dont le cœfficient est strictement inférieur à D_i, rejeter D ne résoud pas le conflit ; le système est obligé de rejeter une décision de $\mathcal{E}$ pour éliminer ce conflit. Nous devons alors distinguer deux cas, selon que l'ensemble conflictuel courant est le dernier ou non qui contient la critique.

i. **$\mathcal{E}$ est le dernier ensemble conflictuel qui contient C**
Dans ce cas, la critique est satisfaite et la qualite Q' du plan amendé se dégrade éventuellement, i.e. $Q' \geq Q$ puisque $Q' \geq coef(D_i)$ et $coef(D_i) \geq Q$ en vertu de la remarque 1 du paragraphe 3.2, selon laquelle les cœfficients de toutes les décisions sont supérieurs ou égaux à la qualité de l'ensemble solution courant.

ii. **$\mathcal{E}$ n'est pas le dernier ensemble conflictuel qui contient C**
Dans ce cas, le système arrivera tôt ou tard à l'ensemble conflictuel suivant qui contient C. On se retrouve alors dans la même situation qu'auparavant : sous-cas 1 ou sous-cas 2.

[3]Par ensemble conflictuel, nous entendons un sous-ensemble minimum de décisions conflictuelles de SDA *(Séquence des Décisions Appliquées)*, plus celles qui ont permis leur application, c'est-à-dire leur activation [Des 85].

4.4.3 Conclusion

S'il n'y a pas de solution après amendement, le système transmet une situation d'échec. Sinon, s'il existe une solution, nous pouvons distinguer deux cas. Si un poids ∞ est associé à la critique, celle-ci est impérativement satisfaite. Sinon ($p < \infty$), la critique peut être ou ne pas être satisfaite. La qualité Q' de la solution proposée après exécution du processus d'amendement (la solution est amendée ou non) se dégrade éventuellement, i.e. $Q' \geq Q$.

4.5 Exemple de fonctionnement

Le fonctionnement de la stratégie d'amendement est illustré ici au moyen d'un exemple très simple. Le lecteur trouvera en annexe G un exemple plus évolué dans le cadre de la conception de Gammes d'Usinage.

4.5.1 Phase planification

Soient 4 actions à ordonner (A_1, A_2, A_3 et A_4), et un unique opérateur binaire *Avant*. Toutes les contraintes du planificateur sont du même type :

(Avant ?x ?y) où *?x* et *?y* appartiennent à $\{A_1, A_2, A_3, A_4\}$

Dans le tableau suivant, nous donnons la *Suite des Décisions Appliquées* (SDA) pour générer le premier ensemble solution[4], avec les cœfficients de décision affectés à chaque contrainte dans les cas des fonctions max et $\sum$:

décision			**cœfficient**	
conseil	contrainte	poids	max	$\sum$
C_1	(Avant A_1 A_2)	9	9	9
C_2	(Avant A_2 A_4)	4	4	4
$\neg C_3$	(Avant A_1 A_4)		∞	∞
qualité de la solution			**3**	**3**

Après application de C_3, il y avait contradiction (A_1 avant A_2 avant A_4 avant A_1). Son poids étant 3, c'est lui qui a été rejeté pour résoudre le conflit, et le cœfficient de décision attaché à l'application de $\neg C_3$ est ∞ dans les deux cas, puisque C_3 était la dernière décision de SDA.

[4]il n'existe aucune contrainte concernant l'ordonnancement de A_3 ; ceci n'a rien d'anormal

Pour les deux fonctions max et $\sum$, l'ensemble solution est donc le même :

$$S = \{ A_1A_2A_4A_3 \ , \ A_1A_2A_3A_4 \ , \ A_1A_3A_2A_4 \ , \ A_3A_1A_2A_4 \}$$

le système peut proposer une quelconque de ces quatre solutions. Supposons que ce soit $A_1A_2A_4A_3$.

4.5.2 Phase amendement

Supposons tout d'abord que A_3 doive être avant A_1, d'où l'application de la critique C :

$$(p\ (Avant\ A_3\ A_1))$$

à la suite des trois décisions. Elle n'engendre pas de contradiction, et l'ensemble des solutions se trouve réduit à la dernière solution $A_3A_1A_2A_4$. Il s'agit d'un amendement à **effet local**, et la critique est respectée, quels que soient son poids p et la fonction f.

Replaçons-nous juste après la phase *planification*, et supposons maintenant que l'on applique la critique C :

$$(p\ (Avant\ A_4\ A_2))$$

à la suite de C_1, C_2 et $\neg C_3$. Cela entraîne une contradiction (A_2 avant A_4 avant A_2) et l'ensemble conflictuel est $\mathcal{E} = \{C_2, C\}$. Il s'agit dans ce cas d'un amendement à **effet global**, et suivant la fonction f et la valeur de p, le conflit n'est pas résolu de la même manière.

1. **Cas 1 : p = ∞**
   Après application de C, nous avons :

décision			cœfficient	
conseil	contrainte	poids	max	$\sum$
C_1	(Avant A_1 A_2)	9	9	9
C_2	(Avant A_2 A_4)	4	4	4
$\neg C_3$	(Avant A_1 A_4)		∞	∞
C	(Avant A_4 A_2)	∞	$\infty(3,\infty)$	$\infty(3,\infty)$

Dans les deux cas de fonction (max et $\sum$), C_2 est rejeté et $\neg C_2$ est appliqué ; sont alors disponibles les conseils C_3 (puisque les effets de l'application de C_2 ont été annulés) et C ; après leur application, nous avons :

décision			cœfficient	
conseil	contrainte	poids	max	$\sum$
C_1	(Avant A_1 A_2)	9	9	9
$\neg C_2$	(Avant A_4 A_2)		∞	∞
C	(Avant A_4 A_2)	∞	$\infty(\infty,3)$	$\infty(\infty,3)$
C_3	(Avant A_4 A_1)	3	4(4,3)	7(4,3)
qualité de la solution			**4**	**4**

La qualité s'est donc dégradée ($Q = 4$) et le nouvel ensemble solution est :

$$S= \{ A_4A_1A_2A_3 \ , \ A_4A_1A_3A_2 \ , \ A_4A_3A_1A_2 \ , \ A_3A_4A_1A_2 \}$$

2. **Cas 2 : p = 3**
Nous avons choisi cette valeur particulière, du fait qu'elle induit un comportement différent du système suivant la fonction f.

Après application de C, la *Suite des Décisions Appliquées* est la suivante :

décision			cœfficient	
conseil	contrainte	poids	max	$\sum$
C_1	(Avant A_1 A_2)	9	9	9
C_2	(Avant A_2 A_4)	4	4	4
$\neg C_3$	(Avant A_1 A_4)		∞	∞
C	(Avant A_4 A_2)	3	3(3,3)	6(3,3)

A partir de là, le système réagit différemment suivant f :

- **fonction** max : la contrainte rejetée est la critique C elle-même, d'où SDA $= \{C_1, C_2, \neg C_3, \neg C\}$. L'ensemble solution est le même que l'ensemble solution précédent, la qualité aussi : $Q' = Q = 3$.
- **fonction** $\sum$: la critique C est respectée et le conseil rejeté est C_2, d'où SDA $= \{C_1, \neg C_2, C_3, C\}$. L'ensemble solution est le même qu'avec un poids $p = \infty$, et la qualité est $Q' = 4$.

4.6 Discussion

La stratégie d'amendement présentée est construite à partir d'une stratégie de planification par satisfaction de contraintes (l'algorithme de compromis), et permet une correction automatique de plans erronés, à partir de critiques émises à propos de leurs défauts. Plusieurs aspects de ce mécanismes prêtent néammoins à discussion :

- **Efficacité**
  Un système d'amendement doit permettre de gagner du temps. Ceci semble vrai dans notre cas puisqu'il évite de recommencer le processus de planification dès le début. Toutefois, si l'amendement est à *effet global*, il n'y a gain de temps que si le temps passé à résoudre la contradiction, c'est-à-dire à dépiler les conseils de SDA puis à reprendre la planification, est inférieur au temps nécessaire pour planifier en recommençant dès le début de la phase contrainte. De telles situations interviennent si les critiques remettent en cause des décisions de poids élevés, donc des connaissances primordiales ; or de telles connaissances sont généralement fiables, et donc peu remises en cause ; par conséquent, rares sont les amendements à *effet global* ayant une telle incidence sur le temps d'obtention d'une nouvelle solution.

- **Nature des critiques**
  Tous les amendements sont obtenus via la prise en compte de critiques, considérées comme des contraintes supplémentaires. Or il serait intéressant d'émettre au contraire des critiques visant à s'affranchir de contraintes appliquées lors de la planification. Ce second type d'amendement pose cependant des problèmes : comment exprimer ces critiques, et comment déduire les contraintes à rejeter au vu de la solution erronée. En effet, la nature interdépendante des contraintes appliquées lors de la planification, qui explique notamment le caractère imprévisible des effets d'une contrainte, fait qu'il est difficile d'isoler les contraintes à remettre en cause.

- **Expression des critiques**
  Une critique doit s'exprimer suivant le même formalisme que les contraintes. Ceci ne constitue pas un inconvénient à première vue. De plus, le plan amendé fait nécessairement partie de l'ensemble de plans potentiels créé à l'issue de la phase initialisation de la planification. En conséquence, l'étendue des possibilités de la stratégie d'amendement repose sur la puissance de cette étape de la planification.

Partie III

GAGMAT

5

Chapitre 5

Fonctionnement de GAGMAT

1 Présentation générale

1.1 Domaine d'application et hypothèses

Le système GAGMAT est un système de génération automatique de Gammes d'Usinage, et a été conçu pour répondre aux objectifs suivants :

- Les pièces considérées appartiennent à la mécanique des mécanismes ; elles sont donc de dimensions moyennes et usinées dans des matières métalliques (acier, aluminium, etc).
- Les technologies utilisées sont des techniques traditionnelles d'usinage (fraisage, perçage et tournage), par opposition aux techniques modernes telles que découpes au laser, au jet d'eau, etc.
- Les gammes doivent être générées dans l'optique d'une réalisation au sein d'ateliers flexibles, lesquels sont essentiellement composés de Centres d'Usinages (machines capables d'effectuer consécutivement plus d'usinages que les machines traditionnelles).
- Il doit s'intégrer dans un système CIM allant de la conception à la fabrication effective des pièces, et se baser pour cela sur les concepts de la Cotation Volumique

(un système de CAO basé sur ces mêmes concepts est développé en parallèle au laboratoire CPAO de l'ENSTA).

Notre travail se limitant en fait à une étude de faisabilité, et les concepts mécaniques étant encore au stade du développement, nous avons restreint le domaine d'application :

- en ne considérant que des pièces orthomorphes, ou du moins dont les axes d'usinage sont orthomorphes,
- en se limitant aux technologies de fraisage et de perçage,
- en se cantonant à un nombre limité de types d'entités, que sont pour nous les Modèles d'Usinage[1].

Ces restrictions ne remettent cependant pas en cause la validité des principes et des méthodes utilisées. Et il serait relativement facile d'étendre GAGMAT à un domaine d'application plus vaste, moyennant bien sûr une adéquation des connaissances manipulées.

1.2 Fonctionnement de GAGMAT

GAGMAT reçoit en entrée une description de la pièce ainsi qu'une description de l'atelier (machines et outils) où celle-ci doit être usinée, et produit en sortie un ensemble de Gammes d'Usinage parmi lesquelles le système en propose une (cf. figure 5.1). Le processus de génération des gammes se divise en deux étapes successives : la première consiste à générer un premier ensemble solution ; la deuxième, facultative, consiste à amender la gamme proposée, si besoin est.

1.2.1 Etape Génération

Cette étape se divise elle-même en trois phases successives, conformément aux différentes stratégies de planification dont nous avons parlé dans les chapitres précédents, chacune faisant appel à une base de connaissances différente : la phase de **Linéarisation**, la phase d'**Initialisation** et la phase **Contrainte**.

[1] En particulier, seules sont usinées des entités vides, car les études du point de vue mécanique sur la façon d'usiner les entités pleines n'ont pas encore été suffisamment développées et figées.

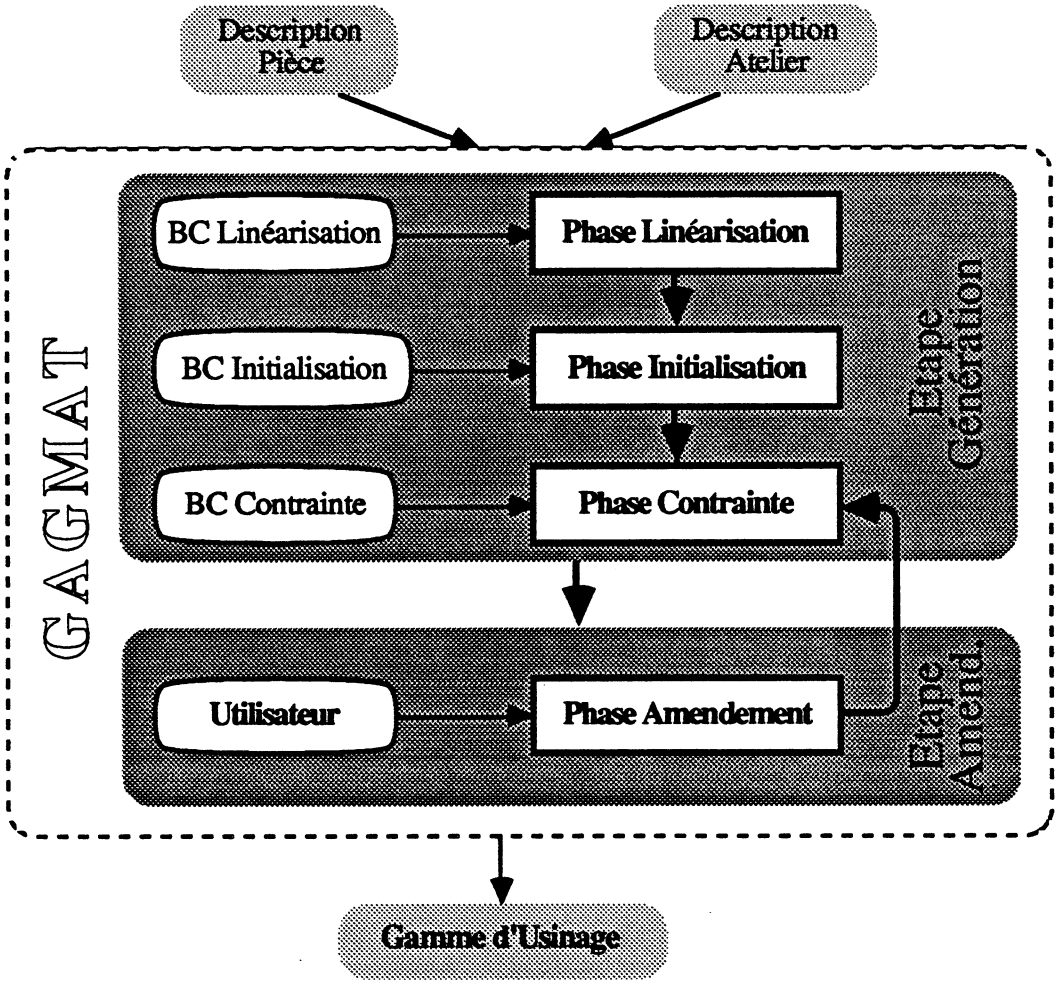


Figure 5.1 : Les étapes du processus de génération des gammes

Phase Linéarisation

La conception de la Gamme d'Usinage est divisée en une suite de sous-problèmes qui sont les conceptions des Sous-Gammes qui la composent. Diverses décisions de natures différentes sont prises dans ce sens :

- choix de la technologie utilisée pour chacun des Volumes d'Usinage (VU) que comprend la pièce,
- génération et ordonnancement des Sous-Gammes (SG) et Traitements Thermiques (TT),
- spécification des états intermédiaires de la pièce, ce qui revient à affecter à chaque SG les VU qui y seront usinés.

Phase Initialisation

A chaque VU est associé un Processus d'Usinage (PU), compte tenu de ses paramètres et des moyens disponibles.

Il faut noter que cette phase d'Initialisation est globale, i.e. n'est pas divisée en autant de phases qu'il y a de Sous-Gammes. En effet, nous ne cherchons pas à construire des PU qui permettent d'atteindre les états intermédiaires des VU ; La suite d'Opérations Volumiques (OV), générée en une seule fois, permet d'usiner entièrement chaque VU. Nous associons cependant un type à chaque OV, de même nature que les différents types de Sous-Gammes *(ébauche, finition, rectification)* ; compte tenu des décisions prises lors de la phase Linéarisation, ceci permet ensuite de scinder si nécessaire les PU, et de répartir leurs OV dans les Sous-Gammes, un point de cassure d'un PU correspondant à un changement de type d'OV.

Phase Contrainte

Contrairement à la phase Initialisation, la phase Contrainte s'applique successivement à chaque Sous-Gamme. Pour chacune d'entre elles, les OV sont ordonnées et regroupées selon les ressources qu'elles peuvent utiliser, en appliquant et en propageant des contraintes issues des règles de la base de connaissances correspondante.

A l'issue de cette troisième phase, et conformément au principe de la stratégie utilisée, le système dispose d'un ensemble de gammes solution, parmi lequel il en propose une à l'utilisateur.

1.2.2 Etape Amendement

Cette étape est facultative, et fait appel au jugement de l'utilisateur. Si la gamme proposée ne lui convient pas, il a la possibilité de corriger chaque Sous-Gamme ; il doit émettre pour cela des critiques suivant le même formalisme que les contraintes issues des règles de la phase Contrainte. Par conséquent, il ne peut remettre en question que les décisions prises lors de cette dernière phase, concernant l'ordonnancement et le regroupement d'actions. On ne peut pas en particulier rajouter des OV supplémentaires, ou répartir différemment les OV à l'intérieur de chaque SG. En revanche la prise en compte de ces amendements, et la propagation de leurs effets au sein de la structure de chaque Sous-Gamme est automatique. Il est fait appel pour cela aux algorithmes utilisés dans la phase Contrainte.

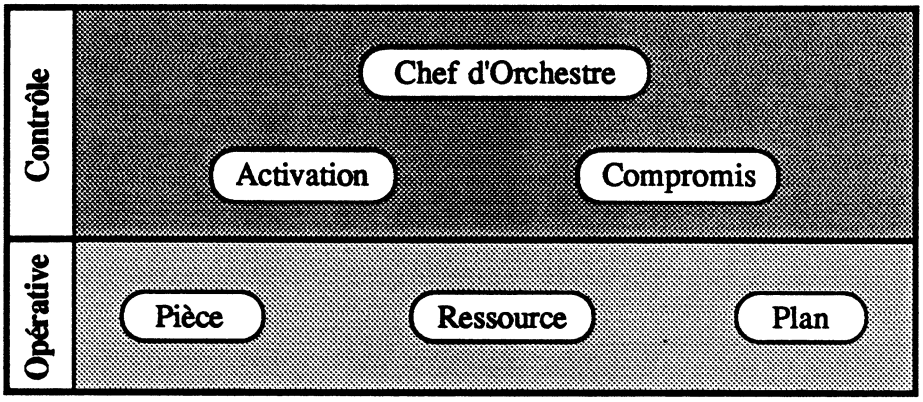


Figure 5.2 : Architecture interne de GAGMAT

A l'issue de cette phase, le système dispose à nouveau d'un ensemble de gammes solution, parmi lequel il en propose une. Cette phase d'Amendement peut être réitérée, jusqu'à ce que la solution proposée convienne.

Remarque : il serait possible de mettre en place une stratégie d'amendement permettant de modifier des Processus d'Usinage, ou de rajouter des OV supplémentaires ; mais ceci nécessiterait de reprendre entièrement la phase Contrainte, rendant par là-même le processus très coûteux. Nous supposons donc que les connaissances mises en œuvre lors des phases Linéarisation et Initialisation sont suffisamment fiables pour ne pas être remises en question.

1.3 Architecture du système

GAGMAT est constitué de six modules (figure 5.2) assurant la partie contrôle (modules *Chef d'Orchestre*, *Activation* et *Compromis*) et la partie opérative (modules *Pièce*, *Ressource* et *Plan*).

Module Chef d'Orchestre

Il dirige la stratégie générale de GAGMAT. Il appelle successivement les phases de Linéarisation, d'Initialisation, de Contrainte et d'Amendement, et gère tous les autres modules.

Module Activation

Le but principal du module *Activation* est de déterminer les contraintes applicables. Il peut fonctionner suivant deux modes distincts :

- mode *exploration exhaustive* : toutes les règles en attente sont examinées,
- mode *exploration sélective* : il tient compte de la stratégie choisie de la contrainte à appliquer pour explorer les règles en attente (par exemple seulement celles dont le poids des contraintes en partie droite est supérieur aux poids des contraintes disponibles).

Ce module est le plus complexe, pour les principales raisons suivantes :

1. Les règles peuvent comporter des variables ; elles sont donc instantiables, ce qui requiert un mécanisme d'unification. Comme dans les systèmes GARI [Des 81] et Propel [Tsa 87], chaque règle est représentée sous la forme d'une arborescence d'activation, qui reflète son état courant durant la planification. Cette technique nécessite une mise à jour constante des arborescences, ce qui rend le processus relativement coûteux.
2. Le traitement des échecs exige la possibilité de restaurer un état antérieur des arborescences d'activation. Pour cela, chaque modification de ces arborescences est mémorisée, sous la forme d'une pile de programmes inverses. En cas d'échec lors de la planification, il suffit d'exécuter ces programmes dans l'ordre inverse de l'empilement pour rétablir des états antérieurs des arborescences.
3. La logique trivaluée de la planification COP (paragraphe 2.3.2 du chapitre 4) peut mener à des *solutions problématiques*, qui sont éliminées via des générations d'hypothèses. Ce module comprend donc des algorithmes qui implantent ce mécanisme.

Module Compromis

Le module *Compromis* s'occupe du choix de la contrainte à appliquer à chaque pas du processus de planification, ou du choix de la contrainte à rejeter lors d'une situation d'échec (contradiction). Pour ce faire, l'algorithme de compromis utilisé est paramétrable par une fonction f qu'il faut minimiser (paragraphe 3.1 du chapitre 4). Ce module garantit l'optimalité des gammes proposées par GAGMAT, dans le sens où il n'existe pas d'autre gamme pour laquelle la valeur de cette fonction f est inférieure. Suite à diverses expérimentations, nous avons choisi pour GAGMAT la fonction *max*, préférable du point de vue des temps d'exécution et de la qualité des solutions obtenues.

Module Pièce

Le module *Pièce* gère toutes les informations qui concernent la pièce traitée par GAGMAT. Ces informations correspondent pour la plupart aux parties gauches des règles ; ce module comporte donc essentiellement des fonctions d'interrogation sur la pièce (sur les VU, les relations entre VU, etc).

Module Ressource

Le rôle du module *Ressource* est similaire à celui du module *Pièce*, mais relativement aux machines et aux outils. Il se charge donc de questionner ces bases de données, pour répondre aux interrogations en partie gauche des règles, ou pour affecter les outils et machines aux Opérations Volumiques lors de la création des Processus d'Usinage.

Module Plan

Le module *Plan* gère l'ensemble courant de gammes solutions qui sont compatibles avec les contraintes appliquées. Il se sert pour cela d'une représentation de plans sous la forme d'une hiérarchie d'actions et de ressource-actions (cf. paragraphe 4), et de fonctions de manipulation de cette représentation. Ce module s'occupe notamment de la propagation au sein de cette structure des contraintes appliquées. De plus, la restauration en cas d'échec d'un état antérieur de la représentation exige la mémorisation des programmes inverses, non seulement des contraintes appliquées, mais aussi des contraintes dues à leurs propagations. Comme dans le module *Activation*, la solution retenue consiste à mémoriser dans une pile les programmes inverses des modifications élémentaires effectuées.

2 Description des pièces

2.1 Principes

Les pièces traitées par GAGMAT sont modélisées suivant les concepts de la Cotation Volumique (paragraphe 3.3 du chapitre 2), cotation où la notion d'entité est naturelle. Elles sont décrites comme étant un ensemble de Volumes d'Usinage (les entités), positionnés les uns par rapport aux autres par l'intermédiaire de leurs éléments de référence ; un référentiel est lié à chaque pièce, ce qui permet de les positionner dans l'espace. Le lecteur trouvera en annexe des descriptions complètes de pièces dont GAGMAT a généré les gammes.

Les usinages à réaliser pour fabriquer une pièce dépendent évidemment de son état brut, appelé "brut de départ" ou "maquette". Un des premiers travaux du gammiste

```
(piece boitier-de-detente          ; nom de la piece
        (matiere acier)
        (durete-initiale 80)        ; durete de la maquette
        (durete-finale 120)         ; durete de la piece finie
        (Ra 3.2)                  ; etat de surface par defaut
        (qualite 10)               ; qualite par defaut
        (LX 170)                  ; dimensions de la piece
        (LY 40)
        (LZ 34)
        (type-piece parallelepipedique)) ; autres parametres generaux
```

Figure 5.3 : Informations générales sur une pièce

consiste à positionner la pièce finie par rapport à la pièce brute, afin de déterminer où enlever de la matière, et en quelle quantité. Dans la version actuelle de GAGMAT, seule la pièce finie est décrite. Nous ne considérons en effet que des Volumes D'usinages creux et qui sont remplis de matière à l'origine ; nous nous passons donc de modéliser la maquette initiale. Une solution consisterait à considérer les surépaisseurs de matière à enlever comme des attributs de chacun des VU ; cette technique permettrait d'intégrer la description de la pièce et de la maquette, évitant ainsi un mécanisme de comparaison des deux descriptions.

2.1.1 Informations générales sur la pièce

Le dessin d'une pièce comporte un encadré qui rassemble des informations générales sur la pièce. Celles-ci expriment par exemple la matière utilisée et sa dureté, ou des valeurs par défaut des paramètres qui doivent être rattachés aux entités, tels que les *états de surface* ou les *qualités*. La description d'une pièce commence donc par une liste d'attributs relatifs à la pièce tout entière (un exemple est donné par la figure 5.3).

2.2 Description des Volumes d'Usinage

Les Volumes d'Usinages (VU) sont les entités qui composent la pièce. Ce sont des instances de Modèle d'Usinage (MU) (nous donnons en annexe B la description détaillée des MU que GAGMAT sait usiner). A chaque MU sont associés un **referentiel**, et des paramètres différents selon sa nature :

- des **éléments de référence** : plans médians, faces, axes, etc,
- des **traces d'outil** : rayon contourné, rayon affuté, etc,

```
(VU poche1
        (type poche-debouchante)
        (a-usiner oui)
        (matrice (X+ Y+ Z+))
        (Ra 6.3)
        (longueur 117.95 0.06)
        (largeur 34 H11)
        (hauteur 13.3)
        (R-contourne 3 3))

(VU trou1
        (type alesage-debouchant)
        (a-usiner oui)
        (matrice (Y- Z- X+))
        (diametre 10 0.022)
        (longueur 24))

(VU trou2
        (type trou-taraude-non-debouchant)
        (a-usiner oui)
        (matrice (Y+ Z- X-))
        (longueur 10 3)
        (diametre M10)
        (pas 1))
```

Figure 5.4 : Exemples de descriptions de VU

- des **paramètres dimensionnels** : longueur, largeur, diamètre, etc,
- des **paramètres technologiques** : états de surface, axes d'outil (dans le référentiel lié au MU), etc.

Une matrice, exprimée dans le repère général de la pièce, donne l'orientation de chaque VU ; les valeurs des paramètres dimensionnels, ainsi que les traces d'outil, sont spécifiées avec leurs tolérances. L'attribut *à-usiner* permet de savoir si le VU doit rester brut ou non. Nous donnons quelques exemples de description de VU dans la figure 5.4.

Afin de limiter la complexité du problème de génération des gammes, qui croît avec le nombre de VU, GAGMAT analyse dans un premier temps la description des pièces, et regroupe les VU identiques qui ont même axe d'outil : les **super-VU**. Ceux-ci héritent bien entendu de tous les paramètres des VU concernés, notamment leurs relations de proximité (cf. paragraphe 2.3.2). Un PU unique est généré pour ces *super-VU* dont les OV concernent tous les VU qui les composent ; dans la gamme finale, chaque OV

sera exécutée en séquence pour chacun de ces VU.

2.3 Les relations entre Volumes d'Usinage

Les relations traduisent comment les Volumes d'Usinage sont reliés entre eux. Nous distinguons deux types de relations : Les **relations de positionnement** issues directement de la cotation, et les **relations de proximité** qui sont implicites, mais primordiales quant à la génération des gammes.

2.3.1 Relations de positionnement

Elles positionnent entre eux tous les VU d'une pièce, par l'intermédiaire de leurs éléments de référence (plans médians, faces et axes). Leur ensemble constitue le **graphe de cotation**. Elles sont issues des normes de la Cotation Volumique ; nous retrouvons donc les relations étudiées dans le paragraphe 3.3 du chapitre 2 : **Distance-plan-plan**, **Distance-plan-face-int**, **Distance-plan-face-ext**, **Distance-face-face-int**, **Distance-face-face-ext**, **Faces-collées-int**, et **Faces-collées-ext**. Pour des raisons de commodité, nous avons rajouté deux autres relations : la **Symétrie** qui est une *Distance-plan-plan* dont la valeur est nulle, et la **Coaxialité** qui est la composition de deux *Symétries*.

Dans la description d'une pièce, ces relations sont représentées sous la forme de listes. Leur premier élément est le type de la relation ; suivent l'élément positionné et l'élément de référence de la relation, et enfin les valeurs de la position et du défaut de position s'il y en a :

(relation élément-positionné élément-référence position défaut-position)

Les plans médians, les faces et les axes sont représentés par des couples, dont le premier terme est le nom du VU, et dont le second dépend du type d'élément :

- pour un **plan**, c'est l'axe perpendiculaire au plan, exprimé dans le repère associé au VU,
- pour une **face**, c'est la normale extérieure perpendiculaire à la face, exprimée dans le repère associé au VU,
- pour un **axe**, c'est l'axe lui-même, exprimé dans le repère associé au VU.

(**distance–face–face–int** (poche1 Z–) (boite Z–) 20.07 –0.14)
(**symetrie** (poche1 Y) (boite Y) 0.1)
(**faces–collees–int** (poche1 X+) (boite X+))
(**faces–collees–int** (poche1 Y+) (boite Y+))

(**distance–plan–plan** (trou1 X) (boite Y) –1.445 0.1)
(**distance–plan–face–int** (trou1 Y) (boite Z–) 10.25 0.1)
(**faces–collees–int** (trou1 Z+) (boite X+))

(**coaxialite** (lamage1 Z) (trou1 Z) 0.1)
(**faces–collees–int** (lamage1 Z+) (boite X+))

Figure 5.5 : Exemples de relations de positionnement

Quelques exemples de relations de positionnement sont représentés sur la figure 5.5. Pour des raisons de clarté dans la description de la pièce, ces relations suivent la description du VU qu'elles positionnent.

2.3.2 Relations de proximité

Nous avons défini quatre types de relation de proximité :

- **Support** : un Volume d'Usinage VU_1 est *support* de VU_2, s'il existe une intersection entre le volume de VU_1 et l'extension du volume de VU_2 suivant son axe d'outil, c'est-à-dire s'il faut traverser VU_1 pour accéder à VU_2.
- **Débouche-dans** : un Volume d'Usinage VU_1 *débouche-dans* VU_2, s'il existe une intersection entre le volume parcouru par l'outil qui usine VU_1 et le volume de VU_2.
- **Traverse** : un Volume d'Usinage VU_1 *traverse* VU_2, s'il existe une intersection entre les deux VU et si l'outil qui usine VU_1 doit couper le volume de VU_2 lors de son parcours.
- **Alésage-support** : cette relation est propre aux VU de type *lamage* ; et sa signification est évidente.

La figure 5.6 illustre ces relations sur un exemple. Contrairement aux relations de positionnement, les relations de proximité sont décrites comme des attributs des VU concernés (cf. figure 5.7).

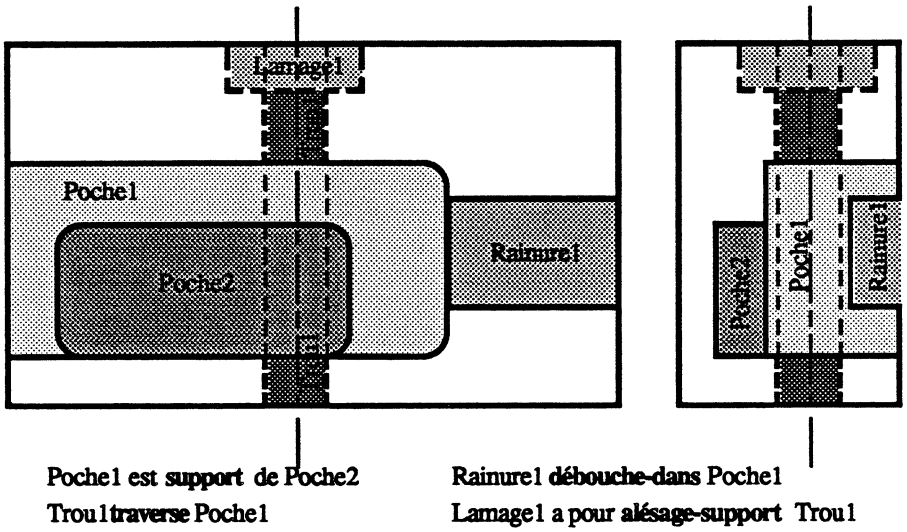


Figure 5.6 : Relations de proximité

```
(VU rainure1
        ...
        (debouche-dans poche1)
        ...)

(VU poche2
        ...
        (support poche1)
        ...)
```

Figure 5.7 : Exemples de relations de proximité

3 Les ressources

Nous distinguons deux types de ressources :

- Les **ressources statiques** : elles servent d'entrées au système et sont sujettes à très peu de variations au cours du temps. Ce sont typiquement les machines et les outils dont dispose l'entreprise.

- Les **ressources dynamiques** : ces ressources sont créées par le système et ont une durée de vie limitée dans le temps. C'est le cas des appuis, qui sont différents pour chaque pièce traitée par le système.

3.1 Description des ateliers

Les ateliers sont des ressources statiques. Ils sont définis par un ensemble d'outils (appelé standard d'outils), et un ensemble de machines. Nous donnons dans l'annexe C la description des ateliers utilisés par GAGMAT.

3.1.1 Description des outils

Nous avons choisi de spécifier de façon précise les outils utilisés lors d'une Gamme d'Usinage, pour les deux raisons suivantes :

- afin de passer de la gamme d'une pièce au programme de Commande Numérique, dans l'optique d'un système CIM (définir chaque outil de manière détaillée permet de calculer les conditions de coupe de chaque usinage),
- afin d'optimiser les regroupements d'usinages : donner simplement le type d'outil ne suffit pas pour rassembler les usinages au sein d'*Opérations* (cf. paragraphe 4).

Nous avons donc représenté les standards d'outils sous la forme de bases de données, et nous nous sommes appuyés pour les décrire sur la représentation du standard d'outils de la MAT. Afin de limiter leurs tailles, nous ne gardons pour chaque outil que le minimum d'informations utiles, à savoir leurs dimensions. Le choix d'un outil dépend en effet essentiellement des critères morphologiques du VU correspondant. Ainsi, un outil est défini par :

- son nom, le plus souvent sous la forme d'un nombre, et des paramètres dimensionnels :

  outil 40 000 048 : (diamètre 4) (longueur-taillée 12)
  outil 40 000 260 : (diamètre 160) (longueur-taillée 15)
  (diamètre-partie-dégageable 40)
  outil 40 000 927 : (diamètre 9) (pas 1.25)
  ...

- sa **famille**, (représentée dans le cas du standard MAT par un nombre de quatre chiffres) : une famille rassemble les outils de morphologies et de propriétés identiques :

famille 5008 : fraises ravageuses 2 tailles,
queue conique, profil semi-finition
famille 5070 : alésoirs 4 coupes,
queue cylindrique, hélice à droite
...

- son **type** : un type d'outil caractérise les familles qui peuvent être utilisées à des fins similaires : *fraise-2-tailles*, *fraise-3-tailles*, *foret-hélicoïdal*, *alésoir-4-lèvres*, etc.

Certains outils sont réglables, comme ceux de type *grain* ou *fraise-3-tailles-extensible*. Affecter un tel outil à un usinage revient à créer un outil spécifique dont les dimensions sont figées. Cet outil peut ensuite être utilisé pour réaliser d'autres usinages sur la pièce, sans qu'il soit déréglé. GAGMAT comporte donc un mécanisme qui crée de tels outils si nécessaire. Le même mécanisme est employé pour créer des outils de type *taraud*, lorsque les *pas* de ceux qui sont dans le standard ne conviennent pas.

Nous n'avons défini pour le moment qu'un seul standard, qui comporte plus de 700 outils différents. D'autres standards pourraient être décrits et utilisés sans problème, pourvu qu'ils observent la structure hiérarchique définie ci-dessus.

3.1.2 Les machines

Au niveau des gammes, contrairement aux outils, il suffit de préciser les types de machine à utiliser ; le choix des machines effectives est différé à la gestion des ateliers. Le gammiste spécifie en général un centre d'usinage, un tour, une fraiseuse, etc, sans se soucier de leurs identités exactes. Lorsqu'il existe cependant plusieurs machines de même type, mais dont les possibilités sont différentes, le gammiste spécifie le sous-type pertinent, par exemple *fraiseuse-horizontale* ou *fraiseuse-verticale*. Nous ne considérons pas d'autre information à ce niveau ; le nombre de machines d'un même type ne sera par exemple utilisé que pour des questions de gestion de l'atelier.

3.1.3 Les relations entre les machines et les outils

Ces relations sont de deux types et sont l'inverse l'une de l'autre : **magasin-outil** et **disponible-sur**.

La relation *magasin-outil* définit les outils disponibles sur une machine. Nous avons choisi de représenter cette relation comme un attribut de chaque machine décrite

dans un atelier. Nous avons choisi de spécifier les outils d'un magasin d'outils par l'intermédiaire de leurs familles, et ce pour les trois raisons suivantes :

- donner la liste exhaustive des outils qui peuvent se monter sur une machine est un travail fastidieux,
- les types d'outil englobent trop d'outils ; deux outils de même type ne se montent pas nécessairement sur les mêmes machines,
- si un outil d'une famille donnée peut se monter sur une machine, il en est de même pour tous les outils de la famille.

La relation ***disponible-sur*** permet de connaître pour chaque outil les machines sur lesquelles il peut être monté. Cette relation est représentée là aussi par un attribut de chaque outil.

Il est tout à fait possible que des outils du standard outil utilisé ne se montent pas sur les machines de l'atelier : il suffit pour cela que leur famille n'apparaisse pas dans les magasins-outils des machines. Réciproquement, certaines familles d'outils spécifiées dans les magasins-outils peuvent ne pas avoir été définies dans le standard d'outil. Ceci permet de marier sans problème des descriptions différentes de standards et de machines.

3.2 Le problème des appuis

Le problème de la détermination des appuis est lié à la conception des Montages d'Usinage et au problème du phasage des gammes. La notion d'appui utilisée par GAGMAT exige un étude préalable de ces deux problèmes.

3.2.1 Phasage et Montages d'Usinage

Phasage

Le but du phasage est de déterminer un ensemble minimum de positions de la pièce sur les machines sélectionnées, qui permette de réaliser tous les usinages. Plusieurs notions sont importantes pour établir le phasage :

- **Axe d'appui :** exprimé dans le référentiel lié à la pièce, c'est l'axe parallèle et de sens opposé à la normale du plateau de la machine sélectionnée.

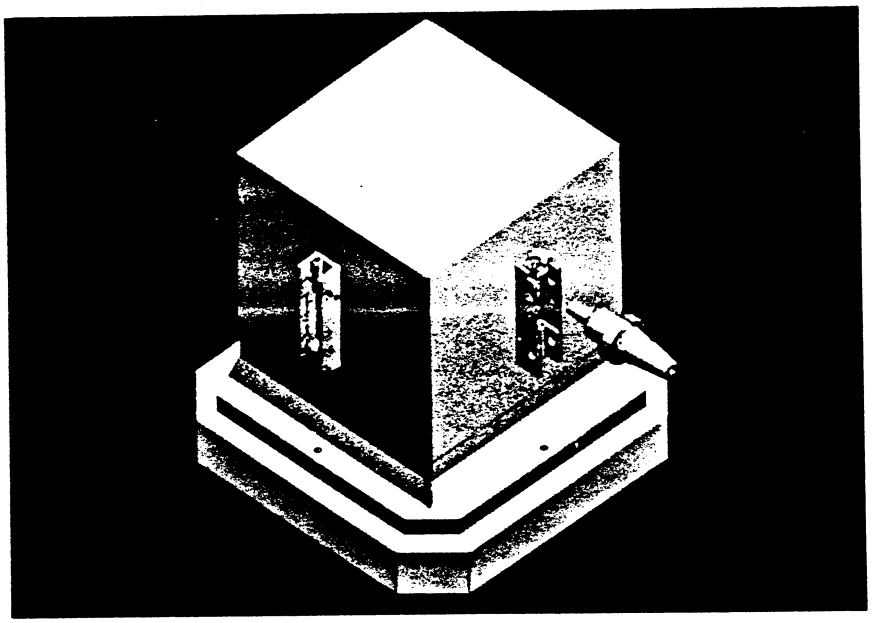


Figure 5.8 : Montage sur cube

- **Axes d'outil :** affectés à chaque OV, ce sont les axes de rotation des outils qui peuvent la réaliser, exprimés dans le référentiel associé au VU (la *matrice* du VU permet de passer au référentiel de la pièce).
- **Directions de broche :** ce sont les axes suivant lesquels une machine peut usiner.

Etant donné une machine et la position de la pièce sur le plateau de cette machine, seules les OV dont les axes d'outils correspondent aux directions de broche peuvent être usinées. Selon le type de machine considéré, les possibilités sont différentes : une **machine classique** n'a qu'une une seule direction de broche par rapport au plateau (perpendiculaire ou parallèle au plateau) ; pour un **Centre d'Usinage traditionnel**[2], les axes d'outil possibles sont dans un plan parallèle au plateau ; pour un **Centre d'Usinage moderne**[3], les axes d'outil possibles appartiennent au demi-espace au dessus du plateau.

Dans le cas des Centres d'Usinage, il arrive souvent que les pièces ne soient pas montées directement sur le plateau, mais sur un cube (cf. figure 5.8). Cette solution est adoptée

[2]Un CU traditionnel a un plateau qui tourne autour d'un seul axe.

[3]Un CU moderne a un plateau capable de touner autour de trois axes.

pour des raisons de rentabilité (4 pièces sont usinées simultanément), et d'accessibilité (il est difficile d'usiner vers le centre du plateau). Dans ce cas, l'axe d'appui n'est plus perpendiculaire au plateau, mais à la face du cube sur laquelle est posée la pièce. De plus, l'ensemble des axes d'outil pouvant être atteints n'est plus seulement fonction de l'axe d'appui retenu ; il dépend aussi de la manière d'orienter la pièce sur la face du cube. Nous avons ainsi défini la notion d'**orientation** comme suit : c'est la direction, liée à la pièce et exprimée dans son repère, qui est parallèle au plateau et perpendiculaire à l'axe d'appui. Pour les deux types de CU, les axes d'outil accessibles sont alors les suivants : pour un **CU traditionnel**, ils sont dans le demi-plan parallèle au plateau et opposé à l'axe d'appui ; pour un **CU moderne**, ils se situent dans le quart d'espace limité par le plateau et la face du cube.

En conclusion, ces notions d'*axe d'appui* et d'*orientation*, ainsi que le type des machines utilisées sont primordiaux pour établir le phasage d'une Gamme d'Usinage.

Les Montages d'Usinage

Il n'existe pas vraiment de méthodologie pour concevoir des Montages d'Usinage. Les ouvrages spécialisés [Che 79] [Paz 78] ne donnent que des éléments de solution (recherche des éléments de référence, types d'appui, etc). Certains travaux ont permis de formaliser quelques étapes de la conception, notamment en ce qui concerne les symboles utilisés [Nor 78]. Tout repose en fait sur l'expérience, et un moyen d'arriver à automatiser ce travail est de faire appel à des techniques d'IA, par le biais du raisonnement fonctionnel [Ing 87].

Le but de GAGMAT n'est pas de concevoir les Montages d'Usinage, mais de fournir les éléments de base de cette conception. Le rôle principal d'un Montage d'Usinage est d'immobiliser la pièce, donc de supprimer ses 6 degrés de liberté. On distingue généralement plusieurs types d'appui selon le nombre de degrés de liberté qu'ils suppriment, et suivant le type de surface qui leur est associé :

TYPE D'APPUI	DEG. DE LIB. SUPPRIMÉS
Appui Plan	*3*
Appui Ligne	*2*
Appui Point	*1*
Centrage Long	*4*
Centrage Court	*2*

Pour concevoir un Montage d'Usinage, il faut donc déterminer un ensemble minimum de types d'appui, qui élimine les 6 degrés de liberté. On s'aperçoit cependant que les solutions adoptées dans la majorité des cas sont les mêmes :

(Appui Plan, Appui Ligne, Appui Point)
(Centrage Long, Appui Point, Appui Point)[4]

En définitive, le problème clé se réduit au choix de l'appui principal *(Centrage Long* ou *Appui Plan)*. Une fois celui-ci déterminé, les appuis auxiliaires suivent sans problème. De plus, cet appui principal doit être stable, car c'est lui qui supporte en particulier tous les efforts de coupe et le poids de la pièce.

3.2.2 Ce qu'est un appui pour GAGMAT

Suite à cette étude, nous avons pris les décisions suivantes concernant la manière dont GAGMAT traite les appuis :

- GAGMAT se limite à la détermination des appuis principaux,
- un appui est défini par quatre attributs :
  - **vu** : le nom du VU qui sert d'élément de base à l'appui,
  - **axe** : l'axe d'appui (axe orienté exprimé dans le repère de la pièce),
  - **orientation** : l'orientation de l'appui (direction exprimée dans le repère de la pièce),
  - **cœf** : un cœfficient de stabilité (d'autant plus élevé que l'appui est stable), calculé grâce à une fonction heuristique définie dans le chapitre suivant.

Le nom de chaque appui généré est la concaténation des valeurs des trois premiers attributs, par exemple *boîte-X--Z*, *poche1-Z--Y*.

Le processus de détermination des appuis se base sur les deux remarques suivantes :

1. Dans une pièce, seuls quelques VU peuvent servir d'appui potentiel ; les VU supportés sont en particulier éliminés (si VU_1 est support de VU_2, on suppose que VU_1 est a priori un meilleur appui que VU_2).

[4]Le *Centrage Long* peut être remplacé par deux *Centrages Courts* : cas du montage entre-pointes.

2. Selon le type de VU, le nombre d'appuis potentiels qui peuvent lui être associés est différent :

   - **2** pour un VU creux, car il n'y a qu'un axe d'appui possible (l'axe $Z+$ dans son repère), et deux orientations (directions X et Y dans son repère).
   - **(2 × N)** au maximum pour un VU plein, où N est le nombre de faces planes du VU ; les axes d'appui sont ici les normales à ces faces, et il y a 2 orientations possibles pour chaque axe d'appui retenu.

L'algorithme de calcul des appuis potentiels, lancé par GAGMAT au tout début du traitement de la pièce, est le suivant :

```
programme détermination-des-appuis-potentiels (pièce)

liste-appuis := ∅
liste-vu := ensemble-des-VU-non-supportés (pièce)
pour tous les éléments VU dans liste-vu faire
début liste-appuis-potentiels := fabriquer-les-appuis-potentiels (VU)
        liste-appuis := liste-appuis ∪ liste-appuis-potentiels
fin
pour tous les éléments A dans liste-appuis faire
        si ((cœf-stabilité (A) < 0)
                        ou (rejet-utilisateur (A)))          (ligne 9)
            alors liste-appuis := liste-appuis − {A}
```

Il existe une part d'interactivité avec l'utilisateur (ligne 9). En effet, la fonction de calcul des cœfficients de stabilité, bien que s'appuyant sur de nombreux paramètres, ne considère pas par exemple des notions de haut niveau, comme la faisabilité des Montages d'Usinage, aspect qu'un mécanicien peut remarquer au premier coup d'œil.

4 Structure des gammes

Une Sous-Gamme est un exemple des plans d'actions hiérarchiques, tels qu'ils ont été définis dans le paragraphe 2.1 du chapitre 4. Les actions élémentaires sont les Opérations Volumiques, et les ressource-actions correspondent à des regroupements d'OV qui utilisent le même outil, la même machine, le même appui.

Lors de la phase Initialisation, GAGMAT associe à chaque OV une **classe** et un **type** :

- La **classe** sert à répartir les OV dans les Sous-Gammes ; il existe trois classes d'OV différentes :
  - **ébauche** : ce sont en général les premières OV d'un Processus d'Usinage ; lorsqu'un VU est associé à une Sous-Gamme d'*ébauche*, ses OV de classe *ébauche* sont affectées à cette Sous-Gamme.
  - **finition** : un Processus d'Usinage comporte toujours au moins une OV de *finition* ; toutes les OV de cette classe sont exécutées lors de la Sous-Gamme de *finition.*
  - **rectification** : de telles OV, lorsqu'elles existent, succèdent toujours aux OV de *finition* ; elles sont la cause de la création des Sous-Gammes de *rectification*, et leur sont donc automatiquement affectées.
- Le **type** qualifie de façon plus précise le type de travail auquel correspond l'OV. Une fois la gamme générée, connaissant pour chaque OV le type du VU correspondant, ce type permet à la fois de leur affecter une Macro d'Usinage, et de calculer les conditions de coupe. La liste des types d'OV n'a pas été totalement définie ; en voici quelques exemples :

pointer	*percer*	*aléser*
ébauche-dans-l'axe	*enlèvement-de-matière*	*calibrage-des-flancs*
finition-du-fond	*finition-des-flancs*	*plongée-des-angles* ...

La hiérarchie entre les différents niveaux de ressource-actions représentent la plus ou moins grande importance accordée aux ressources correspondantes. Les gammes générées par GAGMAT sont destinées à être usinées au sein d'ateliers flexibles. Il résulte que la ressource *appui* est primordiale, puisque les pièces peuvent y passer d'une machine à l'autre sans quitter la palette, et donc sans changer de Montage d'Usinage. La hiérarchie sur les ressources est donc la suivante :

$$appui > machine > outil,$$

et les notions de *Phase*, *Sous-Phase* et *Opération*, habituellement employées en mécanique, peuvent être définies comme suit :

Opération : regroupement d'Opérations Volumiques consécutives qui utilisent le même outil.

Sous-Phase : regroupement d'Opérations consécutives et réalisées sur la même machine.

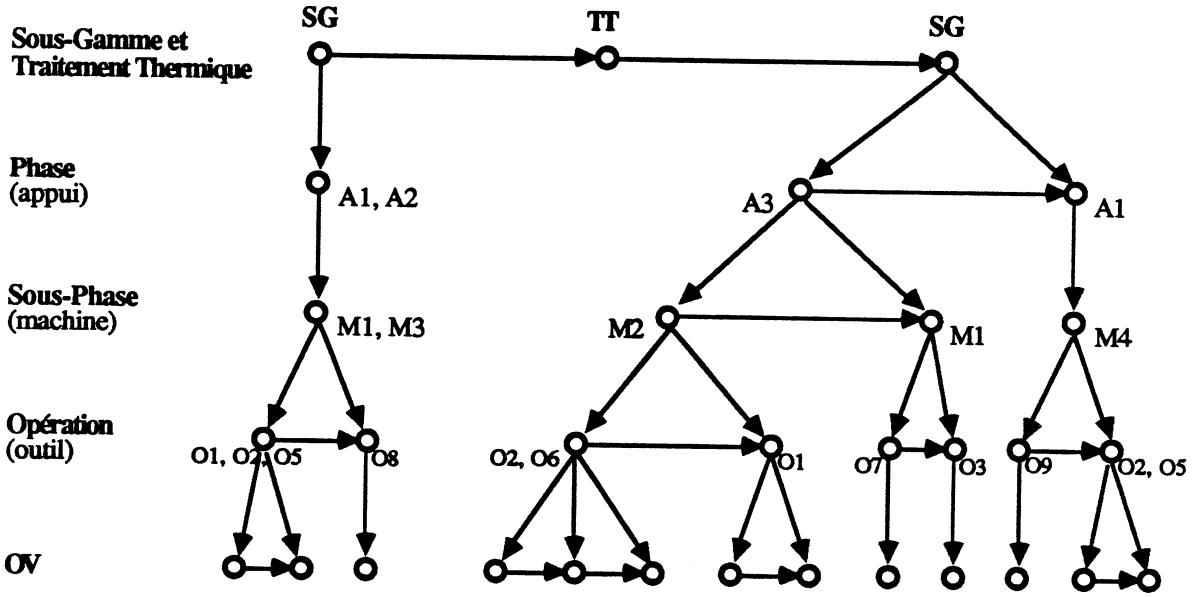


Figure 5.9 : Structure d'une gamme générée par GAGMAT

Phase : regroupement de Sous-Phases consécutives et réalisées sans changer d'appui (i.e. sans démonter la pièce hors du Montage d'Usinage).

La figure 5.9 représente la structure d'une Gamme telle que GAGMAT les génère. Bien que ne correspondant pas à l'utilisation d'un type de ressource particulier[5], les Sous-Gammes peuvent être assimilées à des ressource-actions qui regroupent des *Phases* consécutives.

Des exemples de gammes générées par GAGMAT se trouvent dans les annexes D, E et F.

5 Propagation de contraintes

L'application des critiques, lors de la phase Contrainte, nécessite de propager leurs conséquences à travers toute la structure du plan (cf. la section consacrée à la planification COP). Il existe donc un mécanisme de propagation de contraintes dans GAGMAT, dont le rôle est à la fois de transmettre les effets de chaque décision, et de détecter les contradictions éventuelles, dues au caractère conflictuel des connaissances utilisées. Ce

[5]On pourrait associer aux Sous-Gammes la ressource de type atelier

mécanisme est appliqué pour chaque type de contrainte : **regroupement d'actions, ordonnancement d'actions, spécification de ressource.**

5.1 Propagation des contraintes de regroupement d'actions

Trois remarques peuvent s'appliquer à une contrainte de type *regroupement d'actions* :

- Regrouper deux actions différentes, nécessite de regrouper toutes les actions qui se situent entre elles. Par conséquent, il ne doit pas y avoir d'incompatibilité[6] au sein de cet ensemble, auquel cas il y aurait **contradiction.**
- Une action de type regroupement se propage verticalement dans la structure du plan, du bas vers le haut : un regroupement d'actions à un niveau donné entraîne des regroupements d'actions aux niveaux supérieurs.
- Regrouper des actions a une incidence sur les ressources utilisées, éventuellement pour des actions qui appartiennent à un autre niveau de la représentation (cas des ressources interdépendantes).

5.1.1 Contrainte "même-opération"

Le processus de propagation vis-à-vis des ressources est constitué de deux étapes :

1. Lorsque plusieurs opérations sont regroupées, seuls les outils communs sont conservés ; s'il n'y en a pas, il y a **contradiction.**
2. Pour toutes les sous-phases mères des opérations regroupées, on élimine les machines qui ne sont plus compatibles avec l'ensemble d'outils précédent, à savoir les machines sur lesquelles ces outils ne peuvent pas être montés. Il ne peut y avoir ici de contradiction, car il reste toujours au moins une machine affectée à ces sous-phases : en effet, pour chaque outil d'une opération (et donc en particulier pour ceux retenus), il existe une machine de la sous-phase mère de cette dernière, sur laquelle cet outil peut se monter.

5.1.2 Contrainte "même-sous-phase"

Le processus de propagation est à l'opposé de celui concernant la contrainte de type précédent (ceci est dû à l'inderdépendance des deux types de ressources concernés) :

[6] Une incompatibilité correspond à un ordre strict entre deux actions.

1. Lorsque plusieurs sous-phases sont regroupées, seules les machines communes sont conservées ; s'il n'y en a pas, il y a **contradiction.**

2. Pour toutes les opérations filles des sous-phases regroupées, on élimine les outils qui ne sont plus compatibles avec l'ensemble de machines précédent, à savoir les outils qui ne peuvent pas être montés sur ces machines. Il ne peut y avoir ici de contradiction, car il reste toujours au moins un outil affecté à ces opérations : en effet, pour chaque machine d'une sous-phase (et donc en particulier pour celles retenues), il existe, pour chaque opération fille de cette dernière, un outil qui peut y être monté.

5.1.3 Contrainte "même-phase"

Ce type de regroupement à une incidence sur les ressources de type appui seulement. Le processus de propagation se décompose lui-aussi en plusieurs étapes ; il est cependant plus élaboré que les précédents, car il dépend du type d'atelier et du type de montage utilisés :

1. Lorsque plusieurs phases sont regroupées, seuls sont conservés dans un premier temps les appuis communs, et il y a déjà **contradiction** s'il n'y en a pas.

2. Il faut vérifier ensuite que ces appuis sont compatibles avec les axes d'outil des VU usinés lors de ces phases. C'est ici que rentrent en jeux les types d'ateliers et de montages :

   - Atelier sans centre d'usinage : les appuis communs sont conservés.
   - Centre d'Usinage traditionnel et montage sur plateau :
     (a) Il faut que tous les axes d'outil des VU soient dans un même plan ; il y a **contradiction** si ce n'est pas le cas.
     (b) On ne conserve parmi les appuis communs que ceux dont l'axe d'appui est perpendiculaire à ce plan ; il y a **contradiction** s'il n'y en a pas.
   - Centre d'Usinage traditionnel et montage sur cube :
     (a) Les axes d'outil des VU doivent appartenir à un demi-plan ; il y a **contradiction** si ce n'est pas le cas.
     (b) Seuls sont conservés les appuis tels que :
       - l'axe d'appui est opposé au demi-plan,
       - l'orientation appartient à ce demi-plan.

Là encore, il y a **contradiction** s'il ne reste aucun appui à l'issue de cette sélection.

Exemples :

$$\text{axes des VU : X+, X−, Y+} \Rightarrow \begin{cases} \text{axe d'appui :} & \text{Y−} \\ \text{orientation :} & \text{X} \end{cases}$$

$$\text{axes des VU : X+, Y+} \Rightarrow \begin{cases} \text{axe d'appui :} & \text{X−, Y−} \\ \text{orientation :} & \text{X, Y} \end{cases}$$

Nous n'avons pas implanté le mécanisme pour les Centres d'Usinage modernes. Son principe serait équivalent à celui mis en place pour les Centres d'Usinage traditionnels.

5.2 Propagation des contraintes d'ordonnancement d'actions

De même que pour les contraintes de type regroupement, un ordonnancement d'actions se propage verticalement vers le haut de la structure. La notion d'incompatibilité, inhérente à la relation d'ordre strict *s-avant*, disparaît cependant lors de cette propagation ; ceci afin que les actions mères puissent ultérieurement être regroupées.

Il faut noter aussi qu'un ordonnancement d'Opérations Volumiques (au niveau le plus bas) est nécessairement un ordre strict (il est impossible en effet de regrouper des Opérations Volumiques).

Trois cas de figure différents peuvent se présenter suite à un ordonnancement entre actions :

- Création d'un cycle sans incompatibilité (niveau opération et au-dessus) : les actions appartenant au cycle doivent être regroupées, d'où les propagations exposées dans le paragraphe 5.1.
- Création d'un cycle avec incompatibilité : il y a **contradiction**.
- Pas de cycle créé : on s'arrête là.

5.3 Propagation des contraintes de spécification de ressource

Comme dans le cas des contraintes de type regroupement, les propagations sont de natures différentes selon le type de ressource abordé :

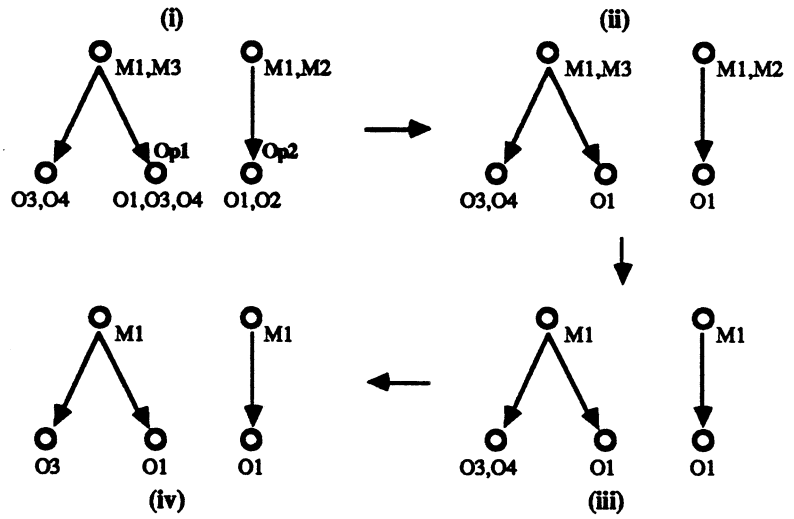


Figure 5.10 : Exemple de propagation de la contrainte *outil*

- ressource interdépendante : contraintes *outil* et *machine*,
- ressource indépendante : contrainte *appui*.

5.3.1 Contrainte "outil"

Elle sert à affecter un ensemble désiré d'outils à une action. La démarche adoptée est la suivante :

1. A chaque opération qui correspond à cette action, on affecte l'intersection de ses outils avec l'ensemble spécifié ; si l'une de ces intersections est vide, il y a **contradiction**.
2. A chaque sous-phase mère des opérations ci-dessus, on affecte l'intersection de ses machines, et de l'ensemble des machines compatibles avec les nouveaux outils de l'opération.
3. On répercute à nouveau l'effet vers le niveau opération, car il existe des opérations filles des sous-phases ci-dessus, qui ne font pas partie des opérations traitées à l'étape 1 : à chaque opération fille d'une sous-phase précédente, on affecte l'intersection de ses outils et de l'ensemble des outils compatibles avec les nouvelles machines de la sous-phase.

La figure **5.10** est un exemple d'une telle propagation. La situation initiale est représentée par le plan i. La contrainte à propager est *(outil* $(Op_1, Op_2) := \{O_1\}$*)*, sachant que les magasins d'outils des machines M_1, M_2 et M_3 sont les suivants :

$$M_1 \rightarrow \{O_1, O_3\} \ , \quad M_2 \rightarrow \{O_2\} \ , \quad M_3 \rightarrow \{O_4\}$$

Les plans ii, iii et iv représentent les situations après application de chaque étape précédente.

5.3.2 Contrainte "machine"

Le processus de propagation est le symétrique de celui de la contrainte *outil*, mais vis-à-vis des machines cette fois. La troisième étape est cependant inutile ici : il suffit de propager le choix des machines vers les ensembles d'outils des opérations filles, car le niveau associé à la ressource de type machine est supérieur à celui de la ressource de type appui, dans la représentation de plans adoptée.

5.3.3 Contrainte "appui"

La ressource de type appui étant indépendante, il est inutile de propager les effets de cette contrainte ; le processus se réduit par conséquent à la première étape des deux processus précédents.

6

Chapitre 6

Représentation et exploitation de l'expertise dans GAGMAT

1 Introduction

L'objectif de notre étude étant d'automatiser une activité experte, nous devons doter GAGMAT des connaissances nécessaires, et donc d'un système de représentation servant à les coder. Avant de définir ce dernier, il faut commencer par identifier les zones d'expertise, qui dépendent à la fois du domaine envisagé et de la méthode de résolution choisie. En effet, une zone d'expertise est un ensemble de connaissances qui prennent part à la résolution d'un aspect d'un problème ; elles dépendent donc de la manière dont celui-ci est abordé. Ainsi, la stratégie adoptée pour GAGMAT définit d'emblée trois zones différentes : **linéarisation**, **initialisation**, et **contrainte**.

Le formalisme choisi pour représenter les connaissances doit permettre de minimiser les inexactitudes dues à leur codage (expressivité), tout en garantissant une exploitation informatique efficace. Ces deux besoins sont antagonistes : en effet, une représentation expressive est forcément compliquée, donc lourde à manipuler. Ce formalisme dépend bien évidemment du type de connaissances à coder :

- Connaissances **exactes** : elles s'expriment typiquement sous forme de tableaux, de graphes, de fonctions, d'équations, etc.
- Connaissances **approximatives** : elles se codent à l'aide de *règles de produc-*

tion, dont il existe plusieurs familles, suivant la forme qu'elles utilisent (règles pondérées, forme *si-alors-sinon*, etc), ou suivant le type de logique auquel elles font référence (logique des prédicats du premier ordre, logique modale, logique floue, etc).

L'utilisation de ce dernier type de connaissances doit cependant se limiter au maximum, car la manipulation et la gestion de règles de production sont coûteuses.

Une fois les zones de connaissances et le formalisme établis, il reste encore à extraire et à coder l'expertise. Ce travail n'est pas des moindres : il nécessite une collaboration étroite des experts (comment notamment leur soutirer leur savoir, sachant qu'ils ont parfois de la peine à le formuler), et le codage pose des problèmes de traduction. L'utilisation de règles pondérées exige, par exemple, qu'un expert soit capable de caractériser l'importance d'une connaissance parmi d'autres, alors que toutes ne font pas références aux mêmes critères (technologiques et économiques dans le cas des gammes). Il va de soi que ces deux aspects – extraction et codage de l'expertise – sont fortement interdépendants : la mise au point de bases de connaissances passe par une séquence alternée de *transfert d'expertise - codage - test*, qui ne s'arrête que lorsque les résultats sont satisfaisants (noter que le test d'arrêt repose là aussi sur un jugement empirique). En conclusion, le transfert d'expertise est une tâche nécessaire, mais qui demande souvent beaucoup d'effort, de temps, et de patience quant aux résultats : c'est un des enseignements que nous avons tirés de l'expérience du système GAGMAT.

Les paragraphes qui suivent présentent les solutions retenues pour chacune des trois zones d'expertise identifiées.

2 Connaissances de linéarisation

Nous avons choisi de représenter les connaissances de linéarisation sous la forme de règles de production pondérées. GAGMAT compte actuellement une quarantaine de règles de linéarisation.

2.1 Choix des règles pondérées

La plupart des connaissances mises en œuvre lors de la phase de linéarisation dépendent du savoir-faire des entreprises. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de les représenter à l'aide de règles de production. Rappelons que ces connaissances doivent permettre :

- de déterminer les Sous-Gammes et les Traitements Thermiques (définir leur type et leur technologie),
- de les ordonner,
- de choisir une technologie de réalisation pour chacun des Volumes d'Usinage qui composent la pièce,
- d'affecter ces VU aux Sous-Gammes, afin de déterminer les buts intermédiaires qu'il faut avoir atteints à leur issue.

Certaines de ces connaissances peuvent être conflictuelles, notamment celles qui concernent l'ordonnancement des SG et des TT ; nous avons donc décidé d'utiliser pour cette phase de linéarisation l'algorithme de compromis présenté dans le chapitre 4, et implanté pour la phase contrainte de la planification COP. Or celui-ci a besoin d'une référence unique afin de mesurer l'importance relative de tous les conseils fournis par les règles, notamment pour déterminer celui qu'il faut rejeter en cas de conflit. D'où le système de pondération qui permet de coder l'importance assignée à un conseil, tous critères confondus. Il faut noter cependant que la mise au point de cette base de connaissances est plus facile que celle de la phase contrainte ; en effet, il n'y a pas ici de propagation de contrainte, d'où la possibilité de prévoir plus aisément le comportement du système.

2.2 Exemples de règles de linéarisation

Chaque règle est présentée d'abord en français, puis sous le format de type Lisp adopté pour GAGMAT. Le mot clé *dom* est une abréviation de *domaine* ; il spécifie le domaine de définition d'une variable, dont le nom est précédé par convention d'un "?".

Existence de Sous-Gamme

S'il existe un Volume d'Usinage devant être réalisé en technologie fraisage, alors il faut à tout prix qu'il existe une Sous-Gamme de finition en fraisage.

```
SG1
((existe-vu-techno fraisage))
(10 (sous-gamme finition fraisage))
```

Si ?x est un Volume d'Usinage vide à usiner volumineux par rapport à la pièce (i.e. si le rapport de son volume sur le volume de la pièce est supérieur à 0.4), et si sa technologie d'usinage est déjà choisie, alors il doit exister une Sous-Gamme d'ébauche dont la technologie est la technologie de réalisation de ?x.

```
SG3
((dom ?x (telque vu-à-usiner
                 (et (> (/ (volume ?x) volume-pièce) 0.4)
                     (vide ?x))))
 (technologie-déjà-choisie ?x))
(8 (sous-gamme ébauche (technologie ?x)))
```

Existence de Traitement Thermique

Si la dureté du brut est différente de la dureté de la pièce, il faut absolument un Traitement Thermique de trempe+revenu.

```
TT1
((/= dureté-initiale dureté-finale))
(10 (traitement-thermique trempe+revenu))
```

Si la dureté de la pièce est supérieure à 135, s'il existe une Sous-Gamme d'ébauche, une Sous-Gamme de rectification, et un Traitement Thermique de Trempe+revenu, alors il faut aussi un Traitement Thermique de stabilisation.

```
TT4
((> dureté-finale 135)
 (sous-gamme ébauche)
 (sous-gamme rectification)
 (traitement-thermique trempe+revenu))
(8 (traitement-thermique stabilisation))
```

Ordonnancement de SG et TT

S'il existe un TT de trempe+revenu et une SG de finition fraisage, alors il y a deux possibilités d'ordonnancement suivant la dureté de la pièce : si la dureté finale est supérieure à 135, le TT doit avoir lieu après la SG, sinon c'est l'ordre inverse.

```
ORD01
((traitement-thermique trempe+revenu)
 (sous-gamme finition fraisage)
 (dom ?x (traitement-thermique trempe+revenu))
 (dom ?y (sous-gamme finition fraisage)))
(7 (choix ((> dureté-finale 135) (avant-sg ?y ?x))
          ((<= dureté-finale 135) (avant-sg ?x ?y))))
```

S'il existe un TT de stabilisation et une SG d'ébauche fraisage, alors la Sous-Gamme doit nécessairement être avant le Traitement Thermique.

```
ORD07
((traitement-thermique stabilisation)
 (sous-gamme ébauche fraisage)
 (dom ?x (traitement-thermique stabilisation))
 (dom ?y (sous-gamme ébauche fraisage)))
(10 (avant-sg ?y ?x))
```

Choix des technologies de réalisation des VU

A chaque Volume d'Usinage sont assignés par défaut deux cœfficients, dont la valeur varie de 0 à 10, et qui représentent le degré de faisabilité du VU suivant les deux technologies de fraisage et de tournage (0 ⇔ faisabilité nulle). Ces paramètres peuvent bien sûr être modifiés par l'utilisateur lors de la description d'une pièce ; il suffit pour cela de les spécifier de la même manière que les autres paramètres des VU. Choisir une technologie pour usiner ces VU revient à affecter un des deux cœfficients à 0, et l'autre à 10. Voici quelques exemples de règles.

Si le cœfficient de technologie tournage est nul, alors le VU correspondant doit être réalisé suivant la technologie fraisage.

```
TECHN02
((dom ?x (telque vu-à-usiner
                 (et (= (cœf-techno-tournage ?x) 0)
                     (/= (cœf-techno-fraisage ?x) 0)))))
(8 (technologie ?x fraisage))
```

Des VU de type cylindrique et qui sont coaxiaux doivent être réalisés suivant la même technologie.

```
TECHNO5
((dom ?x (telque vu-à-usiner
                 (cylindre ?x)))
 (dom ?y (telque vu-a-usiner
                 (et (non-permutation ?x ?y vu-à-usiner)
                     (coaxial ?x ?y))))
 (technologie-déjà-choisie ?y))
(5 (technologie ?x (technologie ?y)))
```

Affectation des VU aux Sous-Gammes

Les Volumes d'Usinage devant être réalisés en fraisage sont associés à la Sous-Gamme de finition fraisage.

```
AFFECT1
((dom ?x (ensemble (vu-à-usiner fraisage)))
 (sous-gamme finition fraisage))
(10 (dans-sous-gamme ?x (sous-gamme finition fraisage)))
```

S'il existe une Sous-Gamme d'ébauche et pas de Traitement Thermique de trempe+revenu, s'il existe un VU dont le volume fait plus du cinquième de la pièce, ce VU doit être affecté à la Sous-Gamme d'ébauche dont la technologie est celle du VU.

```
AFFECT3A
((dom ?x (telque vu-à-usiner
                 (et (> (/ (volume ?x) volume-pièce) 0.2)
                     (vide ?x))))
 (technologie-déjà-choisie ?x)
 (non-traitement-thermique trempe+revenu)
 (sous-gamme ébauche (technologie ?x)))
(7 (dans-sous-gamme ?x (sous-gamme ébauche (technologie ?x))))
```

3 Connaissances d'initialisation

Nous avons choisi de représenter également les connaissances d'initialisation sous la forme de règles de production pondérées. La base de connaissances de la phase initialisation est la plus importante en taille de celles qu'utilise GAGMAT ; elle compte au-

jourd'hui 135 règles, et elle est appelée à s'étendre avec le nombre de Modèles d'Usinage traités.

3.1 Choix des règles pondérées

Le but de la phase d'initialisation est d'associer à chacun des Volumes d'Usinage qui composent la pièce, un Processus d'Usinage (PU), c'est-à-dire de générer des séquences d'Opérations Volumiques (OV) qui permettent de les usiner. Au cours de cette phase est faite l'hypothèse d'abscence de dépendance entre les VU, ce qui permet de construire ces PU indépendamment les uns des autres. Les connaissances mises en œuvre se fondent essentiellement sur l'expérience des gammistes : elles sont approximatives, et varient d'une entreprise à l'autre (les ressources disponibles sont différentes). L'usage des règles de production s'impose par conséquent.

La pondération sert à sélectionner la règle la plus pertinente à appliquer, lorsque plusieurs peuvent être invoquées pour un même VU. Expliquons ce dernier point sur un exemple simple : soit un alésage de qualité 10 (donc peu précis), il peut être usiné moyennant un simple perçage, ou éventuellement via l'utilisation d'un outil de type *alésoir* ; le PU est dans le second cas plus compliqué, et les outils plus coûteux ; il faut donc assigner à la règle qui crée le premier processus un poids plus fort qu'à celle qui permet de générer le second. Mais si le poids d'une règle caractérise sa spécificité, pourquoi ne pas exprimer cette spécificité dans sa partie gauche, où se trouvent ses conditions d'application ? Il y a deux raisons à cela :

- pour ne pas charger l'écriture des règles,
- le PU généré peut ne pas être valide ; une autre règle pertinente peut alors s'appliquer pour tenter d'en générer un autre.

Il faut remarquer que la pondération des règles n'a pas ici la même signification que celle des deux autres phases. Un poids traduit dans ce cas la **spécificité** d'une règle, alors qu'il qualifie ailleurs l'**importance** accordée à la satisfaction des conseils, et est exploité en conséquence par l'algorithme de compromis.

3.2 Exemples de règles d'initialisation et de PU générés

Dans GAGMAT, générer un PU, c'est fabriquer un sous-plan hiérarchique à quatre niveaux : les actions élémentaires sont les OV, et les trois niveaux de ressource-

actions correspondent aux niveaux Opération, Sous-Phase et Phase. Pour chaque OV créée, sont construites automatiquement les ressource-actions des niveaux supérieurs (cf. paragraphe 2.2.1 du chapitre 4) ; il reste tout de même à leur associer des ressources effectives, à savoir les outils, les machines et les appuis qui peuvent être utilisés.

Les appuis sont affectés par défaut à chaque OV ; ce sont ceux dont l'*axe d'appui* est différent de l'*axe d'outil* associé au VU. En fait, les seules ressources spécifiées dans les parties droites des règles sont les outils ; les *machines* des Sous-Phases sont automatiquement mises à jour par le biais des relations *disponible-sur* des outils. C'est la raison pour laquelle la génération et la validité des PU reposent sur la détermination des outils qui permettent de les réaliser, et donc sur leur présence ou non au sein de l'atelier utilisé par GAGMAT pour concevoir la gamme. Suite à ces remarques, les conseils en partie droite d'une règle d'initialisation correspondent aux trois types de décisions suivants :

- **Création des OV** : il faut spécifier leur *classe* (ébauche, finition, rectification) et leur *type* (percer, ébauche-dans-l'axe, etc) ; les fonctions *ébauche*, *finition* et *rectification* ont été programmées à cette fin ; elles sont de la forme suivante :

  (ébauche `type-ov nom-du-VU`*)*

- **Ordonnancement des OV**, via la fonction *avant-ov* :

  (avant-ov $OV_1 \cdots OV_n$*)*

- **Choix des outils** ; il existe deux sortes de fonctions :

  - Pour choisir le *type d'outil* d'une OV (fraise-2t, foret-hélicoïdal, etc). C'est la fonction *outil* :

    (outil `OV type-outil*`*)*

  - Pour sélectionner les outils, à partir de critères dimensionnels. Les fonctions de ce type sont nombreuses, par exemple : *longueur-taillée-min, outil-diamètre-entre, outil-diamètre-égal,* etc.

  Ce sont ces dernières fonctions qui induisent parfois des situations d'échec, lorsqu'aucun outil du standard ne satisfait les contraintes dimensionnelles.

La partie gauche d'une règle d'initialisation définit son domaine d'application. La base de règles se partitionne ainsi en familles, selon le type de VU (ou Modèle d'Usinage) auquel elles s'adressent. Voici à titre d'exemples quelques règles d'initialisation concernant les alésages non taraudés :

```
AL1.1
((<= durete-finale 120)
 ( dom ?x ( telque alesage-fraisage
            ( et (ou (debouchant ?x) (fond-pointu ?x))
                 (>= (defaut-position ?x) 0.1)
                 (>= (qualite diametre ?x) 10)
                 (>= (ra ?x) 6.3)
                 (appartient[ ] (diametre ?x) 2 18)
                 (<= (/ (longueur ?x) (diametre ?x)) 10)))))
( 10 ( (ebauche pointer ?x)
     (finition percer ?x)
     (avant-ov (ov pointer ?x) (ov percer ?x))
     (outil (ov pointer ?x) foret-a-pointer)
     (outil (ov percer ?x) foret-helicoidal)
     ( longueur-taillee-min (ov percer ?x) (+ 2 (longueur ?x)))
     ( outil-diametre-entre (ov percer ?x) (diametre ?x)
                            ( + (diametre ?x) (/ (tolerance diametre ?x) 2)))))

AL2.1
(( dom ?x ( telque alesage-fraisage
            ( et (debouchant ?x)
                 (>= (defaut-position ?x) 0.1)
                 (>= (qualite diametre ?x) 9)
                 (>= (ra ?x) 3.2)
                 (appartient[ ] (diametre ?x) 10 25)
                 (<= (/ (longueur ?x) (diametre ?x)) 4)))))
( 9 ( (finition percer ?x)
     (outil (ov percer ?x) foret-plaquette-carbure)
     ( longueur-taillee-min (ov percer ?x) (+ 2 (longueur ?x)))
     ( outil-diametre-entre (ov percer ?x) (diametre ?x)
                            ( + (diametre ?x) (/ (tolerance diametre ?x) 2)))))

AL4.1
((<= durete-finale 120)
 ( dom ?x ( telque alesage-fraisage
            ( et (ou (debouchant ?x) (fond-pointu ?x))
                 (>= (defaut-position ?x) 0.1)
                 (>= (qualite diametre ?x) 6)
                 (>= (ra ?x) 0.8)
                 (appartient[ ] (diametre ?x) 3 18)
                 (<= (longueur ?x) (+ 6 (* 7.5 (diametre ?x))))))))
( 9 ( (ebauche pointer ?x)
     (ebauche percer ?x)
     (finition aleser ?x)
     ( avant-ov (ov pointer ?x) (ov percer ?x) (ov aleser ?x))
     (outil (ov pointer ?x) foret-a-pointer)
     (outil (ov percer ?x) foret-helicoidal)
     (outil (ov aleser ?x) alesoir-4-levres)
     ( longueur-taillee-min (ov percer ?x) (+ 2 (longueur ?x)))
     ( longueur-taillee-min (ov aleser ?x) (+ 2 (longueur ?x)))
     ( outil-diametre-entre (ov percer ?x) (* (diametre ?x) 0.93)
                            (* (diametre ?x) 0.97))
     ( outil-diametre-egal (ov aleser ?x) (diametre ?x))))

AL4.2
((<= durete-finale 120)
 ( dom ?x ( telque alesage-fraisage
            ( et (debouchant ?x)
                 (>= (defaut-position ?x) 0.1)
```

```
                (>= (qualite diametre ?x) 6)
                (>= (ra ?x) 0.8)
                (appartient[] (diametre ?x) 3 18)
                (<= (/ (longueur ?x) (diametre ?x)) 10)))))
( 7 ( (ebauche pointer ?x)
      (ebauche percer ?x)
      (finition aleser ?x)
      ( avant-ov (ov pointer ?x) (ov percer ?x) (ov aleser ?x))                    70
      (outil (ov pointer ?x) foret-a-pointer)
      (outil (ov percer ?x) foret-helicoidal)
      (outil (ov aleser ?x) alesoir-heli-armor)
      ( longueur-taillee-min (ov percer ?x) (+ 2 (longueur ?x)))
      ( outil-diametre-entre (ov percer ?x) (* (diametre ?x) 0.93)
                                            (* (diametre ?x) 0.97))
      ( outil-diametre-egal (ov aleser ?x) (diametre ?x))))

AL4.3                                                                              80
((<= durete-finale 120)
 ( dom ?x ( telque alesage-fraisage
            ( et (ou (debouchant ?x) (fond-pointu ?x))
                (>= (defaut-position ?x) 0.025)
                (>= (qualite diametre ?x) 6)
                (>= (ra ?x) 0.8)
                (appartient[] (diametre ?x) 3 18)
                (<= (/ (longueur ?x) (diametre ?x)) 10)))))
( 4 ( (ebauche pointer ?x)
      (ebauche percer ?x)                                                          90
      (finition aleser ?x)
      ( avant-ov (ov pointer ?x) (ov percer ?x) (ov aleser ?x))
      (outil (ov pointer ?x) foret-a-pointer)
      (outil (ov percer ?x) foret-helicoidal)
      (outil (ov aleser ?x) alesoir-1-grain)
      ( longueur-taillee-min (ov percer ?x) (+ 2 (longueur ?x)))
      ( outil-diametre-entre (ov percer ?x) (* (diametre ?x) 0.84)
                                            (* (diametre ?x) 0.96))
      ( outil-diametre-egal (ov aleser ?x) (diametre ?x))))
                                                                                   100
AL4.4
((<= durete-finale 120)
 ( dom ?x ( telque alesage-fraisage
            ( et (ou (debouchant ?x) (fond-pointu ?x))
                (>= (defaut-position ?x) 0.05)
                (>= (qualite diametre ?x) 6)
                (>= (ra ?x) 0.8)
                (appartient[] (diametre ?x) 5 18)
                (<= (/ (longueur ?x) (diametre ?x)) 1.5)))))                       110
( 6 ( (ebauche pointer ?x)
      (ebauche percer ?x)
      (finition aleser ?x)
      ( avant-ov (ov pointer ?x) (ov percer ?x) (ov aleser ?x))
      (outil (ov pointer ?x) foret-a-pointer)
      (outil (ov percer ?x) foret-helicoidal)
      (outil (ov aleser ?x) fraise-map)
      ( longueur-taillee-min (ov percer ?x) (+ 2 (longueur ?x)))
      ( longueur-taillee-min (ov aleser ?x) (+ 0.5 (longueur ?x)))
      ( outil-diametre-entre (ov percer ?x) (* (diametre ?x) 0.93)                 120
                                            (* (diametre ?x) 0.97))
      ( outil-diametre-egal (ov aleser ?x) (diametre ?x))))
```

Les domaines définis par les parties gauches de ces règles se recoupent. Le poids en partie droite permet de choisir celle qu'il faut appliquer, lorsque plusieurs sont pertinentes pour un même VU. Les critères d'assignation des poids sont essentiellement économiques ; dans le cas des règles concernant les alésages, ces derniers reflètent à la

fois la complexité du PU et le coût des outils employés : par exemple,

- le poids le plus élevé (règle AL.1.1) est affecté au processus le plus simple et le plus couramment utilisé : *pointer* → *percer*,
- dans le cas où il faut *aléser*, on préfère utiliser un *alésoir-4-lèvres* (AL4.1) plutôt qu'un *alésoir-héli-armor* (AL4.2), lui-même plutôt qu'une *fraise-map* (AL4.4), et cette dernière qu'un *grain-1-taille* (AL4.3).

Pour écrire ces règles, nous nous sommes fondés sur des connaissances de natures diverses : sur l'expertise et le savoir-faire des gammistes, notamment pour établir la pondération et les squelettes des Processus d'Usinage, sur des ouvrages spécialisés [Cet 79a] [Cet 79b] et sur les travaux de Lefur et al. [Lef 86], pour la détermination et la mise au point des nombreux paramètres qui apparaissent dans ces règles.

Le tableau suivant représente le nombre de règles de la base de connaissance actuelle, pour tous les MU que traite GAGMAT :

MU	REGLES
alésage-non-débouchant alésage-débouchant	15
alésage-non-débouchant-taraudé alésage-débouchant-taraudé	4
lamage	6
plongée	2
poche	22
poche-sans-fond	8
poche-débouchante	22
rainure	19 (2 tailles) 18 (3 tailles)
rainure-sans-fond	7
entaille entaille-débouchante	12
TOTAL	135

4 Connaissances de contrainte

Le mode de représentation retenu pour les connaissances de la phase contrainte est encore la règle de production pondérée. Ces règles diffèrent selon le type d'atelier

envisagé. Pour GAGMAT, nous avons construit deux bases de règles différentes, l'une adaptée à un atelier traditionnel, l'autre dédiée à la conception de gammes pour des Centres d'Usinage traditionnels, avec montage sur cube. Toutes deux comportent actuellement à peu près 25 règles, dont certaines sont communes. Les résultats fournis par GAGMAT à l'aide des bases actuelles ont été jugés satisfaisants par les gammistes.

4.1 Choix des règles pondérées

Les raisons suivantes justifient le choix des règles de production : les connaissances de contrainte variant avec le type d'atelier, elles permettent d'adapter GAGMAT aux stratégies des utilisateurs ; de plus, ces connaissances peuvent évoluer au cours du temps, notamment lors de la mise au point des bases de connaissances, leur codage sous forme de règles permet de les corriger facilement. La pondération, qui découle de l'utilisation de l'algorithme de compromis, induit cependant quelques difficultés ; en particulier, un expert a du mal à exprimer ses connaissances suivant le formalisme choisi, et à leur assigner un poids. Plusieurs raisons à cela :

- un poids caractérise l'importance d'une connaissance et non sa spécificité, ce qui est plus difficile à traduire,
- les poids sont assignés tous critères confondus,
- le phénomène de propagation de contraintes induit un comportement du système pas toujours prévisible lors de l'écriture des règles.

4.2 Contraintes de formulation de ces connaissances

Si les *connaissances d'initialisation* construisent la structure de plans initiale (suivant la représentation choisie), les *connaissances de contrainte* la modifient progressivement. Dans le premier cas, il s'agit tout simplement de décrire chacun des sous-plans permettant d'usiner un VU, et la représentation utilisée a peu de conséquences sur la formulation des règles d'initialisation. Les connaissances de contraintes sont au contraire fortement marquées par la représentation de plans ; pour modifier la structure élaborée précédemment, seules doivent être utilisées les primitives de manipulation de la représentation.

La logique utilisée pour exprimer les *connaissances de contrainte* est équivalente à la logique des prédicats du premier ordre. Elle ne permet donc pas en particulier

d'exprimer des connaissances modales de préférences, possibilités, nécessités, etc. En conséquence, il faut traduire de telles connaissances sous forme de simples prédicats, souvent au détriment de l'exactitude. Considérons l'exemple suivant : supposons que la connaissance à coder soit *"utiliser un alésoir si c'est possible"* ; en logique des prédicats du premier ordre, seule sera codée la connaissance *"utiliser un alésoir"* ; cette simplification induit alors des situations d'échec artificielles, lorsqu'il est impossible d'utiliser un alésoir, ce qui fausse la qualité du résultat final, celui-ci étant du coup sous-estimé.

La stratégie utilisée exige que le contenu d'un conseil soit indépendant du moment où il est appliqué lors de la phase contrainte. En conséquence, les conseils ne doivent faire référence qu'à des éléments statiques de la représentation de plan, dont l'existence n'est pas remise en cause au cours de la planification. Seules conviennent les actions du niveau le plus bas et les ressources ; ce n'est pas le cas des ressource-actions, qui peuvent disparaître lors de regroupements. En conséquence, les primitives de manipulation qui apparaissent en partie droite des règles ne font référence qu'à des Opérations Volumiques et à des ressources :

(avant OV_1 OV_2)
(même-phase OV_1 OV_2)
(machine OV_1 fraiseuse-verticale)
...

4.3 Exemples de règles de contrainte

Pratiquement tous les exemples de règles ci-dessous proviennent de la base mise au point pour des gammes réalisées sur Centre d'Usinage traditionnel, avec montage sur cube. Seule la règle `APP3.1` appartient à la base construite pour un atelier traditionnel.

Ordonnancement d'Opérations Volumiques

Si ?x est un VU supporté, ?y un support de ?x, et si ?y a des ébauches, alors la dernière ébauche de ?y doit précéder la première OV de ?x.

```
ORDO1.1
((dom ?x vu-supporté)
 (dom ?y (telque (vu-support ?x)
                 (> (nombre (les-ébauches ?y)) 0))))
(6 (avant (dernière-ébauche ?y) (première-ov ?x)))
```

Si ?x est un cylindre creux qui traverse un VU ?y, alors la dernière OV de ?x doit être exécutée avant la première de ?y.

```
ORD02.1
((dom ?x cylindre-creux)
 (dom ?y (telque vu-a-usiner
                 (traverse ?x ?y))))
(2 (avant (dernière-ov ?x) (première-ov ?y)))
```

Si ?x est un lamage dont l'alésage support est le VU ?y, alors la première OV du lamage doit être exécutée après la dernière de l'alésage.

```
ORD05
((dom ?x lamage)
 (dom ?y (intersection (alésage-support ?x) cylindre-creux)))
((8 (avant (dernière-ov ?y) (première-ov ?x))))
```

Choix de ressource

Si ?x est un VU dont le volume est important par rapport à la pièce, alors on prend comme appui pour le réaliser un appui dont l'axe est opposé à l'axe d'outil de ?x.

```
APP1
((dom ?x (telque vu-a-usiner
                 (> (/ (volume ?x) volume-pièce) 0.15)))
 (dom ?a (ensemble (telque appui
                           (opposé (appui-axe ?a) (axe-outil ?x))))))
(8 (appui (première-ov ?x) ?a))
```

Si ?v est un VU dont l'axe d'outil est opposé aux axes d'appui possibles, choisir pour chacune des OV de ?v un appui dont l'axe d'appui est opposé à l'axe d'outil de ?v, et réaliser ces OV sur une machine verticale.

```
APP3.1
((dom ?v (telque vu-a-usiner
                 (appartient (axe-opposé (axe-outil ?v))
                             axes-d-appui))))
 (dom ?a (ensemble (telque appui
```

```
                    (opposé (appui-axe ?a) (axe-outil ?v)))))
 (dom ?x (les-ovs ?v)))
((10 (appui ?x ?a))
 (10 (machine ?x machine-verticale)))
```

Regroupement d'Opérations Volumiques

Si ?x est un VU qui a plus d'une OV, alors toutes ses OV doivent être dans la même sous-phase, ce qui revient à dire que la première et la dernière OV doivent être réalisées dans la même sous-phase.

```
REG1
((dom ?x (telque vu-a-usiner
                 (> (nombre (les-ovs ?x)) 1))))
(9 (même-sous-phase (première-ov ?x) (dernière-ov ?x)))
```

Si ?x est un VU non supporté tel que son appui est déterminé (axe et direction), et dont l'axe d'outil est opposé à l'axe d'appui, si ?y est un des VU dont l'axe d'outil est parallèle à et la direction de cet appui, alors les regrouper dans la même phase.

```
REG2
((dom ?x vu-non-supporté)
 (appui?  (première-ov ?x))
 (opposé (axe-outil ?x) (axe-appui-de (première-ov ?x)))
 (dom ?y (ensemble (premier-élément
            (telque vu-non-supporté
                 (même-sens (axe-outil ?y)
                      (orientation-appui-de (première-ov ?x))))))))
(7 (même-phase (première-ov ?x) (première-ov ?y)))
```

4.4 Remarques sur l'écriture des règles

Suite à notre expérience du système GAGMAT, il apparaît que la façon de les formuler et de les pondérer influe fortement sur l'efficacité du système. Pour un résultat équivalent, une pondération différente des règles a diminué dans certain cas le temps d'obtention d'une solution d'un facteur 10. Il ne suffit donc pas d'écrire des règles justes, mais efficaces. Il faut essayer de

- **limiter les domaines de définition des variables :** d'une part, les arborescences d'activation des règles sont ainsi plus réduites, et donc moins lourdes à manipuler ; et d'autre part, le nombre de conseils applicables est plus restreint.

- **utiliser le moins possible de conditions dynamiques :** en effet, après chaque application de conseil, GAGMAT doit examiner toutes les conditions *Indéterminées* des règles en attente, pour savoir si elles s'évaluent maintenant à *Vrai* ou *Faux*, et connaître ainsi les nouveaux conseils applicables. Cette évaluation systématique est d'autant plus coûteuse si l'on considère les deux facteurs suivants :

  - très peu de telles conditions changent de valeur suite à l'application d'un seul conseil,
  - un prédicat dynamique coûte plus cher à évaluer qu'un prédicat statique.

  Il existe une autre stratégie d'activation des règles, qui consiste à n'examiner après chaque conseil appliqué que les conditions dynamiques de règles dont le poids est supérieur au poids maximum courant des conseils applicables. La mise à jour des conditions dynamiques n'est plus alors systématique. En revanche, il faut essayer de faire en sorte que les conditions dynamiques d'une règle deviennent *Vraies* ou *Fausses* suite à l'application de conseils dont le poids est plus élevé. Si c'est le cas, ces conditions ne sont évaluées qu'une fois ; dans le cas contraire, leur évaluation redevient systématique dès qu'il n'y a plus que des conseils applicables dont le poids est inférieur à ceux des règles en attente.

- **éviter au maximum les générations d'hypothèses :** le coût d'une hypothèse provient à la fois du fait qu'elle n'est pas forcément juste (ce qui entraîne alors une contradiction qu'il faut résoudre), et du coût de sa génération. Une hypothèse correspond en fait à un manque de connaissances ; diminuer leur nombre suppose donc un enrichissement des bases de connaissances utilisées.

5 Autres zones d'expertise

Il existe d'autres zones d'expertise qu'il faut transmettre au système, et qui ne se codent pas sous forme de règles de production pondérées. Il existe d'autres zones de connaissances que nous avons déjà évoquées, comme la façon de propager les contraintes, ou la caractérisation des Centres d'Usinage. Nous présentons ici d'autres zones d'expertise auxquelles GAGMAT fait référence.

5.1 Relations entre tolérances, qualités et Etats de Surface

Ces relations s'expriment typiquement à l'aide de fonctions et de tableaux.

Qualité ↔ Etat de Surface

Cette relation d'équivalence est très simple ; le tableau suivant suffit à la représenter :

QUALITE	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RA	0.8	0.8	1.6	3.2	3.2	6.3	6.3	8	10	10	10

Qualité ↔ Tolérance

La relation est dans ce cas un peu plus compliquée ; elle se représente à l'aide de la fonction suivante, donnée par les experts de la MAT :

$$IT = k\ (10^{-3}D + 0.45\sqrt[3]{D})$$

où IT est la tolérance,
D est la dimension de la cote,
k est un cœfficient qui dépend de la qualité.

Le tableau suivant représente la valeur de k en fonction de la qualité :

QUALITE	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$k \times 10^3$	7	10	16	25	40	64	100	180	240	400	640

Pour obtenir la qualité à partir de la tolérance, il suffit de calculer k à partir de la fonction précédente, puis de se servir de ce tableau, afin de choisir la qualité dont la valeur correspondante de k se rapproche le plus de la valeur calculée.

5.2 Estimation de la stabilité des appuis

Nous avons étudié dans le chapitre précédent la façon dont GAGMAT traite les appuis. Nous avons vu à ce propos que le problème clé réside dans la détermination des appuis principaux (*appui plan* ou *centrage long*), qui éliminent 3 ou 4 degrés de liberté. Dans ce but, GAGMAT calcule et assigne à chaque appui potentiel un cœfficient de stabilité, via une fonction heuristique qui considère les paramètres suivants :

- la nature du VU qui sert d'appui,
- ses paramètres dimensionnels,
- les paramètres dimensionnels de la pièce.

Suivant la valeur du cœfficient, la signification est différente :

- **strictement positif** ⇒ le VU est un appui principal potentiel *(Appui Plan* ou *Centrage Long)*,
- **égal à -2** ⇒ le VU peut éliminer 2 degrés de liberté *(Appui Ligne* ou *Centrage Court)*,
- **égal à -1** ⇒ le VU peut éliminer 1 degré de liberté *(Appui Point)*,
- **nul** ⇒ le VU ne peut servir d'appui.

Ainsi, il serait possible d'exploiter ces différentes valeurs pour construire des ensembles d'appuis qui éliminent les 6 degrés de liberté (appui principal + appuis secondaires). Mais, GAGMAT se limitant à la détermination de l'appui principal, seuls sont retenus en fait les VU qui ont un cœfficient de stabilité strictement positif.

Seuls sont traités actuellement les VU de type *parallélépipède-creux, parallélépipède-plein* ou *cylindre creux* (ce sont en fait les seuls que GAGMAT sait usiner pour le moment). Nous exposons ci-dessous l'algorithme de calcul des cœfficients de stabilité, pour chacune de ces familles.

Parallélépipède creux

Soient l_x, l_y et l_z les dimensions du VU suivant les axes X, Y et Z du repère qui lui est associé, L_X, L_Y et L_Z les dimensions de la pièce dans ce même repère,

si $(l_x \times l_y)/(L_X \times L_Y) > 0.25$
et
$l_x/L_X > 0.33$ **et** $l_y/L_Y > 0.33$
et
$\min(l_x, l_y)/L_Z > 0.5$
alors cœf-de-stabilité := $1.5 \times l_x \times l_y$
sinon si $(l_x/L_X > 0.05$ **et** $l_y/L_Y > 0.25)$
ou
$(l_x/L_X > 0.25$ **et** $l_y/L_Y > 0.05)$
alors cœf-de-stabilité := -2
sinon cœf-de-stabilité := -1

Parallélépipède plein

Un cœfficient de stabilité est calculé pour chacune des faces, donc pour chacune des directions du repère de la pièce. Nous donnons ci-dessous le principe de calcul de l'un d'entre eux.

Soient l_x et l_y les dimensions du parallélépipède dans le plan perpendiculaire à la direction traitée, L_X et L_Y les dimensions correspondantes de la pièce, L_Z la troisième dimension de la pièce, le processus de calcul du cœfficient de stabilité est alors le même que celui qui concerne le parallélépipède creux.

Cylindre creux

Soient d et l_z le diamètre et la longueur du cylindre, L_X, L_Y et L_Z les dimensions de la pièce suivant les axes X, Y et Z du repère associé au VU,

si $(d/L_X > 0.33$ **ou** $d/L_Y > 0.33)$
et
$l_z/d > 0.5$ **et** $d/L_Z > 0.4$
alors cœf-de-stabilité := $d \times l_z$
sinon cœf-de-stabilité := -2

7

Chapitre 7

Implantation, expérimentation, extensions de GAGMAT

1 Implantation et expérimentation

1.1 Implantation

Nous avons implanté GAGMAT tel qu'il a été décrit dans les chapitres précédents. Il est entièrement écrit en Common-Lisp [Ste 84] sur un Apollo DN3000, avec 4 Méga-octets de mémoire centrale. Le code source est d'environ 1 Méga-octet.

1.2 Expérimentation

1.2.1 Les pièces traitées

GAGMAT n'a été expérimenté que sur trois pièces, mais qui sont toutes réelles (deux sont usinées à la MAT), et relativement complexes (composées de plus de 40 Volumes d'Usinage). Ce nombre restreint est dû au fait que la Cotation Volumique n'était utilisée pour le moment qu'en phase expérimentale à la MAT, de telle sorte que peu de pièces sont actuellement décrites à l'aide de ses concepts. Nous avons cependant fait varier les paramètres de ces descriptions, afin de tester le comportement de GAGMAT dans le plus grand nombre possible de cas de figure. Le lecteur peut se reporter aux annexes D, E et F, où il trouvera les plans et les descriptions selon les concepts de

la Cotation Volumique, ainsi que les gammes fournies par GAGMAT pour chacune d'entre elles.

1.2.2 Les ateliers choisis

GAGMAT étant essentiellement destiné à produire des gammes pour des ateliers flexibles, et ceux-ci étant constitués de Centres d'Usinage, la plupart des tests ont porté sur un atelier composé d'un Centre d'Usinage traditionnel. Toutefois, afin de montrer la validité des concepts manipulés par GAGMAT, nous avons également créé un atelier constitué de machines traditionnelles à un seul axe. Le lecteur trouvera la description de ces ateliers dans l'annexe C.

1.2.3 Les résultats

Les Gammes produites par GAGMAT ont été jugées très satisfaisantes par les experts gammistes de la MAT. Nous donnons dans les annexes D, E et F certaines des gammes produites pour chacune des pièces qui ont servi de test, et pour les deux types d'atelier.

Les temps d'exécution de GAGMAT pour générer une gamme croissent rapidement avec le nombre de Volumes d'Usinage qui composent les pièces : il vont de l'ordre de 30 minutes pour une douzaine de VU, à plus de 8 heures pour le boîtier complet qui en comporte 45. Bien que ces temps constituent un progrès indéniable par rapport aux temps manuels de conception de gammes (de l'ordre de un à plusieurs mois au sein des bureaux de fabrication), ils nous ont conduit cependant à nous interroger encore sur un des aspects fondamentaux de la planification, et plus généralement de l'informatique : la **maîtrise de la complexité**. Le paragraphe suivant traduit quelques-unes de ces réflexions.

1.3 Réflexions

La complexité de la phase contrainte de la planification COP[1] croît avec le nombre de sous-problèmes à traiter, en l'occurence le nombre de Volumes d'Usinage de la pièce. La phase linéarisation permet déjà de diminuer l'explosion combinatoire, en définissant des états intermédiaires par lesquels il faut passer. Pour des pièces très complexes, comme

[1]La phase contrainte est la plus coûteuse du point de vue exécution ; ceci est dû essentiellement au nombre de contraintes appliquées et à leur propagation au sein de la représentation évoluée des plans.

le boîtier présenté dans l'annexe D, où le temps de génération d'une gamme solution dépasse les 8 heures, il serait opportun d'envisager d'autres solutions pour réduire la complexité du problème. Nous exposons ci-dessous deux de nos réflexions à ce sujet qui consistent à adopter des stratégies de planification légèrement différentes.

1.3.1 Stratégie COP par abstractions successives

La stratégie COP ne dispose d'aucun mécanisme lui permettant de mesurer l'importance au niveau de la gamme d'un problème par rapport à un autre. Il s'ensuit que problèmes primordiaux et secondaires sont considérés sur un même pied d'égalité. Une possibilité consisterait à adopter une stratégie hiérarchique analogue à celle d'ABSTRIPS (cf. paragraphe 1.3.1 du chapitre 3), basée sur des abstractions successives. En supposant qu'il n'y ait que deux niveaux d'abstraction, le processus est alors le suivant :

1. Appliquer la stratégie COP au problème simplifié : l'état initial de l'ensemble solution est la mise en parallèle des sous-plans générés pour les sous-problèmes principaux.

2. Appliquer à nouveau la stratégie COP, mais l'ensemble initial correspond maintenant à la mise en parallèle des sous-plans secondaires et de la solution obtenue précédemment.

La seconde étape peut être itérée autant de fois qu'il y a de niveaux d'abstraction. Pour que cette approche ait un intérêt, il faut que les connaissances utilisées lors d'une itération ne remettent pas en cause la solution issue des itérations précédentes, car dans le cas contraire, la complexité du problème ne diminue pas. Ceci revient à dire que les niveaux d'abstraction doivent être "valides".

Appliquer une telle stratégie dans le cas de la conception de Gammes d'Usinage consisterait, dans un premier temps, à ne conserver que les Volumes d'Usinage primordiaux du point de vue de la trame générale de la gamme. Cette discrimination entre VU semble réaliste à première vue : en se basant sur des critères tels que leurs dimensions ou leurs types, et en analysant les relations qui les positionnent, il est possible d'éliminer bon nombre de VU (par exemple des VU "supportés", ou peu volumineux, ou de type *lamage*).

1.3.2 Stratégie COP récursive

Une autre manière de diviser la combinatoire, tout en utilisant la stratégie COP, consisterait, dans un premier temps, à décomposer de manière récursive le problème initial en sous-problèmes de même nature, puis de remonter, en appliquant la phase contrainte à chaque palier de la décomposition. L'algorithme ci-dessous illustre ce processus, appliqué à un problème $\mathcal{P}$:

procédure *COP* $(\mathcal{P})$

si $\mathcal{P}$ se décompose en des sous-problèmes $((\mathcal{P}_i)_{i\in[1,n]})$
de même nature
alors début pour i := 1 **à** n **faire** *COP* $(\mathcal{P}_i)$
phase-contrainte $((\mathcal{P}_i)_{i\in[1,n]})$
fin
sinon *phase-initiale* $(\mathcal{P})$

où la fonction *phase-initiale* $(\mathcal{P})$ associe un sous-plan au problème élémentaire $\mathcal{P}$,

la fonction *phase-contrainte* $((\mathcal{P}_i)_{i\in[1,n]})$ consiste à mettre en parallèle les sous-plans résultant des appels *COP* $(\mathcal{P}_i)$, puis à appliquer des contraintes qui réduisent cet ensemble initial.

Là aussi, pour que cette approche ait un intérêt, il faut que les connaissances appliquées lors d'une phase contrainte du processus ne remettent pas en cause les décisions prises lors d'une phase contrainte de niveau inférieur. Ce qui revient ici à dire que la décomposition doit être "valide".

Cette stratégie semble tout aussi pertinente que la précédente dans le cadre de la conception de Gammes d'Usinage. En effet, en analysant les relations entre Volumes d'Usinage d'une même pièce, il est possible d'isoler des groupes de VU, qui n'ont aucune ou peu d'interactions avec d'autres groupes : par exemple des ensembles de VU qui se "supportent" les uns les autres, des VU qui ont le même *axe-outil*, etc. Le processus consisterait à appliquer une première fois la stratégie COP à chacun de ces groupes, à mettre les plans ainsi obtenus en parallèle, puis à appeler une seconde fois la phase contrainte de la stratégie COP, pour réduire ce nouvel ensemble initial de solutions.

2 Extensions

2.1 Agrandissement du champ d'application

GAGMAT conçoit actuellement des Gammes d'Usinage pour des pièces orthomorphes réalisées en technologie fraisage. Il serait appréciable d'étendre son domaine d'application suivant plusieurs directions :

- **Augmenter le nombre de Modèles d'Usinage traités**, notamment en ce qui concerne les MU *pleins* ; cela demande auparavant une analyse "mécanique" des méthodes à employer pour les usiner, analyse qui n'a pas encore été suffisamment abordée aujourd'hui.
- **Envisager les pièces non orthomorphes,** ce qui exige essentiellement une extension des fonctionnalités de manipulation des axes d'outils des Volumes d'Usinage.
- **Généraliser les concepts à d'autres technologies**, comme le tournage ; bien que cette dernière soit considérée lors de la phase linéarisation (GAGMAT peut créer des Sous-Gammes de technologie tournage), peu d'études ont encore été entreprises en ce qui concerne la réalisation d'entités via la technologie tournage via les concepts de la Cotation Volumique.

2.2 Vers un système CIM

Comme nous l'avons déjà mentionné, GAGMAT est destiné à s'intégrer dans un système complet de CFAO allant de la conception des ensembles mécaniques à leur fabrication. Certains éléments de ce système sont déja en cours de développement et même d'utilisation :

- Un logiciel de CAO, appelé DIMAT, permet de concevoir les pièces mécaniques suivant les concepts de la Cotation Volumique, et donc de construire des descriptions de pièces directement exploitables par GAGMAT (une interface est d'ailleurs en cours de réalisation). DIMAT permettra donc de s'affranchir de la tâche ingrate de description des pièces suivant le formalisme explicité au chapitre 5.
- Il existe aujourd'hui un certain nombre de Macros d'Usinage, écrites en langage CN, et qui sont couramment utilisées à la MAT pour programmer les machines.

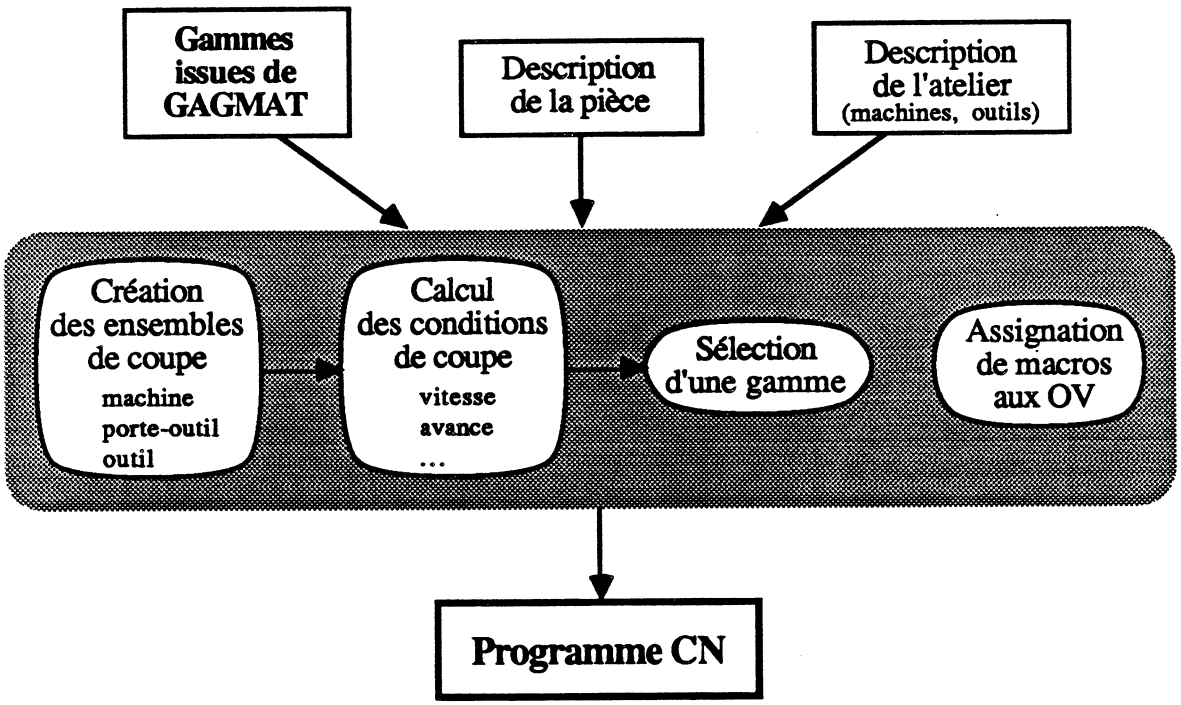


Figure 7.1 : Vers les programmes de Commande Numérique

Si les extensions en amont de GAGMAT sont déjà bien avancées, il faut encore développer la phase aval pour arriver aux programmes de Commande Numérique. Ces extensions ne posent pas cependant de difficultés théoriques insurmontables, et devraient voir le jour sous peu. En effet, analysons en quelques lignes le travail qu'il faut encore effectuer à partir d'une gamme générée par GAGMAT pour parvenir au programme machine :

1. **Création, pour chaque OV et chaque outil pouvant être utilisé pour réaliser cette OV, d'un** *ensemble de coupe* **:**
   Un ensemble de coupe est constitué d'un outil, d'un porte-outil, et d'une machine. Il reste donc à déterminer le porte-outil qui permet de monter l'outil considéré sur la machine correspondante ; cet élément intermédiaire est fonction de la machine et de l'outil, mais aussi d'autres critères comme l'accessibilité (il faut par exemple prévoir des rallonges pour atteindre certains usinages),

2. **Calcul pour chaque couple (OV, ensemble de coupe) des** *conditions de coupe* **:**
   Les conditions de coupe sont les paramètres de l'usinage tels que vitesse, avance,

prise de matière, etc. Ce sont donc certaines des valeurs qui servent de paramètres aux Macros d'Usinage. La prise de matière permet en particulier de déduire le nombre de passes d'une OV, et donc le nombre d'OVE qui la composent. Ces paramètres sont fonction de l'ensemble de coupe, et du type de travail à effectuer (travail sur flanc, en bout d'outil, rainurage, etc), qui se déduit facilement du *type* de l'OV, du type d'outil, du VU considéré, etc.

Plusieurs programmes de calcul de conditions de coupe sont aujourd'hui disponibles sur le marché.

3. **Choix pour chaque OV de l'ensemble de coupe définitif :**
   Il s'agit de sélectionner une des gammes implicitement définies par les ensembles de machines et outils associés aux Sous-Phases et aux Opérations de la gamme proposée par GAGMAT. Cette sélection peut se baser sur des critères tels que minimisation des coûts ou minimisation du temps, qui peuvent s'estimer facilement, puisque les conditions de coupe fournissent entre autres les temps d'usinage de chaque OV.

4. **Assignation à chaque OV d'une Macro d'Usinage :**
   Cette macro est fonction du *type* de l'OV (ébauche-dans-l'axe, enlèvement-de-matière, etc) et du type du VU correspondant.

5. **Construction du programme de Commande Numérique :**
   Un programme CN est la suite des appels des Macros d'Usinage, suivant l'ordre spécifié par la gamme. Entre chaque OV sont insérées quelques instructions très simples qui correspondent aux trajets de dégagement et aux trajets d'approche permettant de se rendre du point de référence d'un VU à un autre (on considère à ce propos qu'il est inutile d'optimiser ces trajets intermédiaires, car leurs durées sont négligeables par rapport au temps total d'usinage).

   Les valeurs des paramètres de la macro proviennent directement de la description de la pièce et des conditions de coupe calculées précédemment (les prises de matières et les paramètres dimensionnels de chaque VU permettent de calculer les valeurs des paramètres dimensionnels des macros, et le nombre d'appels de celles-ci dans le programme final).

Comme nous pouvons le constater, nous disposons de toutes les informations nécessaires pour passer au programme CN à partir d'une gamme produite par GAGMAT. Parmi les différents aspects de la préparation d'une pièce en vue de sa fabrication, seul le problème de la conception des Montages d'Usinage n'apparaît pas dans cette trame.

GAGMAT se limite à la détermination de l'appui principal d'un montage ; il reste donc à déterminer les appuis subsidiaires, puis à concevoir le montage lui-même. Il serait possible d'exploiter les cœfficients de stabilité assignés par GAGMAT pour déterminer les appuis subsidiaires (cf. section 5.2 du chapitre 6) ; la conception automatique d'un montage est en revanche un problème délicat, qui n'a été abordé à notre connaissance que par Ingrand par le biais du *raisonnement fonctionnel* [Ing 87]. L'automatisation complète du processus de fabrication passe donc par une intégration de GAGMAT avec un système de ce type.

2.3 Extensions concernant l'amendement de plans

Plusieurs extensions sont envisageables autour du mécanisme d'amendement :

- **Visualisation des incidences dues à une critique**
  Pour améliorer la convivialité du système, il est possible de montrer à l'utilisateur les règles qui correspondent aux contraintes que sa critique remet en cause. L'utilisateur peut alors modifier ces règles s'il le désire.

- **Automatisation du diagnostic d'échec**
  Le problème est d'identifier les conditions qui caractérisent une situation d'échec. En général, les défauts du plan sont détectés en le simulant mentalement, et en imaginant les problèmes qui pourraient survenir. Ceci pourrait dans beaucoup de cas être effectué par un simulateur. Dans le cadre des Gammes d'Usinage, un tel simulateur correspondrait à un module de modélisation géométrique qui détecterait des collisions entre les outils et l'environnement (pièce, ablocage, etc).

- **Génération automatique des critiques**
  Evaluer la validité d'un plan et identifier ses défauts (formuler des critiques) fait partie des aptitudes des experts. Pour le moment cette tâche est effectuée manuellement. Cependant, bien que pas évidente a priori, son automatisation via une approche de système expert semble faisable et intéressante. Dans le cas d'un échec dû à la collision d'un outil avec l'environnement, la critique serait par exemple de ne pas effectuer l'usinage en question au cours de cette Phase ; dans le cas d'une tolérance trop faible due à un *transfert de cote* et ne pouvant pas être réalisée, la critique serait de choisir un appui différent. La détection de tels échecs ne peut se faire qu'au travers de modules de calculs coûteux, ce qui explique que leur prise en compte n'est pas envisageable dès la phase contrainte de la planification par l'intermédiaire de règles.

2.4 Autres extensions

Afin de faciliter l'écriture des règles de linéarisation, d'initialisation et de contrainte, dont le formalisme Lispien est difficilement utilisable par un utilisateur néophyte (une parenthèse est vite oubliée), un générateur d'éditeur de règles a été implanté [Bel 87]. A partir de la description de la grammaire d'écriture des règles, celui-ci génère un éditeur interactif permettant de créer ou de modifier des règles via l'utilisation de menus ; un tel logiciel permet entre autres de s'affranchir des difficultés syntaxiques (parenthésage, fautes d'orthographe, etc).

Bilan

Le travail effectué au cours de cette thèse concerne l'automatisation de la conception de Gammes d'Usinage dans un contexte CIM. Il se divise en trois parties :

1. Réflexions sur les concepts mécaniques à utiliser dans l'optique d'un système CIM,
2. Présentation des méthodes IA développées pour générer automatiquement les gammes,
3. Implantation des méthodes et utilisation des concepts sous la forme du logiciel GAGMAT.

Rappelons brièvement les principaux points abordés dans ce mémoire :

Concepts issus de la Cotation Volumique

La réalisation d'un système de CFAO intégré, allant de la conception à la fabrication, repose avant tout sur l'utilisation de concepts mécaniques qui soient pertinents à tous les stades du processus. La Cotation Volumique semble répondre de manière idéale à ces besoins. En effet, outre de nombreux avantages au niveau de la fabrication,

- elle permet de décrire sans ambiguïté une pièce en termes d'entités, lesquelles sont déduites des fonctionnalités de base de la pièce (intérêt du point de vue de la conception),

- la modélisation d'une pièce suivant ses principes est directement exploitable par un système de génération de gammes (un système de reconnaissance et d'extraction d'entités est inutile),
- le passage au programme CN ne pose pas de problème via l'utilisation de Macros d'Usinages dont les paramètres sont directement issus de la description.

C'est pourquoi nous en avons dégagé des concepts permettant de définir une méthodologie de conception de gammes, et sur lesquels un système de génération de gammes peut facilement raisonner.

Stratégie de linéarisation

Cette stratégie s'adresse à des problèmes pour lesquels il est possible de définir a priori une suite de buts intermédiaires par lesquels il faut passer pour atteindre le but final. Le problème initial se décompose alors en sous-problèmes de planifications qui peuvent être résolus indépendamment. C'est le cas du problème de la conception de Gammes d'Usinage, ou les buts intermédiaires correspondent à l'état d'une pièce à l'issue d'une Sous-Gamme ou d'un Traitement Thermique, et où les sous-problèmes consistent en la conception de chacune des Sous-Gammes. L'intérêt de cette stratégie est de réduire la complexité du problème initial à la complexité maximale des sous-problèmes qui résultent de sa linéarisation (pourvu que les buts intermédiaires aient été correctement définis).

Planification COP

La stratégie COP s'adresse à des problèmes de planification fortement couplés, pour lesquels l'explicitation des ressources utilisées est importante. Elle consiste dans un premier temps à décomposer le problème en sous-problèmes de même nature et à les résoudre indépendamment ; dans un second temps, les sous-plans obtenus sont combinés compte tenu des interactions qui peuvent exister entre les sous-problèmes, via l'application de contraintes. Ces dernières étant potentiellement conflictuelles, la stratégie COP est combinée à un algorithme de compromis capable de résoudre des contradictions. Elle est donc adaptée au problème de la conception d'une Sous-Gamme, dès lors qu'une pièce est représentée comme un ensemble d'entités (chaque sous-problème consiste à trouver la séquence des usinages permettant d'atteindre l'état d'une entité à l'issue de la Sous-Gamme).

Cette stratégie s'appuie sur une définition structurée des plans d'actions, permettant de traduire les concepts de regroupement d'actions sur la base du partage de

ressources, et qui est par conséquent bien adapté à la représentation des Gammes d'Usinage.

Mécanisme d'amendement

Les plans obtenus par les méthodes précédentes pouvant être partiellement erronés, essentiellement pour des raisons d'incomplétude ou d'inexactitude des connaissances, nous avons imaginé une stratégie d'amendement. Celle-ci se base sur les propriétés de l'algorithme de compromis, et permet de modifier des plans obtenus par satisfaction de contraintes interdépendantes, en évitant de recommencer le processus de planification dès le début.

Implantation de GAGMAT

Tous ces concepts et ces méthodes ont été validés, par l'implantation d'un logiciel de conception automatique de Gammes d'Usinage : GAGMAT. Il a été réalisé en collaboration avec la Manufacture d'Armes de Tulle, et il est destiné à s'intégrer dans un système CIM, allant de la conception des pièces à leur fabrication. Son domaine d'application se réduit pour le moment à des pièces plutôt prismatiques et orthomorphes. Ses résultats ont cependant été jugés très satisfaisants par les experts gammistes de la MAT, de telle sorte qu'un projet d'industrialisation de GAGMAT est actuellement à l'étude.

Bibliographie

[Alt 86] R. ALTERMAN
An Adaptative Planner
Proceedings de AAAI 86, Philadelphie, Pensylvanie, 1896.

[Bar 82] A. BARR, E.A. FEIGENBAUM
Planning and Problem Solving
Handbook Of Artificial Intelligence, vol. 3, chap. XV, p513-562, William Kaufman Inc., 1982.

[Bel 87] V. BELOUGNE, H. DULONG
Générateur d'éditeurs de règles pour systèmes experts
Rapport de 3ème année ENSIMAG, Institut National Polytechnique de Grenoble, juin 1987.

[Bro 82a] R.A. BROOKS
Solving The Find-path Problem By Good Representation Of Free Space
Proceedings de AAAI 82, Carnegie Mellon University, août 1982.

[Bro 82b] R.A. BROOKS
Symbolic Error Analysis and Robot Planning
International Journal of Robotic Research, vol. 1, no. 4, décembre 1982.

[Bro 83] R.A. BROOKS, T. LOZANO-PEREZ
A Subdivision Algorithm in Configuration Space for Findpath with Rotation
Proceedings de IJCAI 83, Karlsruhe, RFA, août 1983.

[Cet 79a] CETIM
Guide : Perçage, Agrandissement, Forage
CETIM, 1979.

[Cet 79b] CETIM
Guide : Fraisage, Résultats d'Essais
CETIM, 1979.

[Cha 88] R. CHACAR
Modélisation Géométrique
Thèse de Doctorat, Université Paris VI, juillet 1988.

[Che 79] A. CHEVALIER, J. BOHAN
Guide du Technicien en Fabrications Mécaniques
Ed. Hachette Technique, 1979.

[Coc 87] M. DE COCK
Modèle de données en conception et fabrication assistées par ordinateur. Accès interactif aux données
Thèse de Doctorat, Université Paris VI, juin 1987.

[Dar 85] I. DARBYSHIRE, B.J. DAVIES
The Use of Expert Systems in Process Planning
Annals of the CIRP, vol. 33/1, 1984.

[Del 86] H. DELESALLE, Y. DESCOTTE
Une Architecture de Système Expert pour la Planification d'Activité
6ème Journées Internationales sur les Systèmes Experts et leurs Applications, Avignon, France, avril 1986.

[Des 81] Y. DESCOTTE
Représentation et exploitation de connaissances expertes en génération de plans d'actions. Application à la conception de Gammes d'Usinage
Thèse de 3ème cycle, Institut National Polytechnique de Grenoble, décembre 1981.

[Des 85] Y. DESCOTTE et J.C. LATOMBE
Making Compromises Among Antagonist Constraints in a Planner
AI journal, Vol. 27, p183-217, 1985

[Dro 88] J.M. DROPPEI
Atelier Logiciel Intégré en CFAO,
Thèse de Doctorat, Université Paris VI, juillet 1988.

[Dur 84] P. DURAND, P. CALOUD
La programmation automatique des robots. Application au montage de composants non standard sur une carte
Rapport de DEA, LIFIA, Institut National Polytechnique de Grenoble, septembre 1984.

[Dur 85] P. DURAND, P. CALOUD
Automatic Insertion of Non Standard Electronic Components
15th International Symposium On Industrial Robots, Tokyo, septembre 1985.

[Fin 87] FINN OLA RASCH
IPROS - A Variant Process Planning System

19th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Penn State, USA, juin 1987.

[Fik 72] R.E. FIKES, P.E. HART, N.J. NILSSON
Learning and Executing Generalized Robots Plans
AI journal, Vol. 3, p251-288, 1972.

[Fir 87] R.J. FIRBY
An Investigation into Reactive Planning in Complex Domains
Proceedings de AAAI 87, Seattle, Wahington, 1987.

[Fre 71] P. FREEMAN, A. NEWELL
A Model for Functional Reasoning in Design
2nd International Conference On Artificial Intelligence, Londres, 1971.

[Geo 87] M.P. GEORGEFF, A.L. LANSKY
Reactive Reasonning and Planning
Proceedings de AAAI 87, Seattle, Washington, 1987.

[Ger 85] F. GERMAIN, C. LAUGIER
An adaptative collision-free trajectory planner
International Conference on Advanced Robotics, Tokyo, septembre 1985.

[Gos 88] D.C. GOSSARD, R.P. ZUFFANTE et H. SAKURAI
Representing Dimensions, Tolerances, and Feature in MCAE Systems
IEEE Computer Graphics and Applications, p51-59, mars 1988.

[Ham 87] K.J. HAMMOND
Explaining and Repairing Plans that Fail
Proceedings de IJCAI 87, Milan, Italie, 1987.

[Hay 79] B. HAYES-ROTH,F. HAYES-ROTH, S. ROSENSCHEIN, S. CAMMARATA
Modeling Planning as an Incremental, Opportunistic Process
Proceedings de IJCAI 79, Tokyo, Japon, 1979.

[Hay 87] C. HAYES
Using Goal Interactions to Guide Planning
Proceedings de AAAI 87, Seattle, Washington, 1987.

[Hen 84] M.R. HENDERSON
Feature Recognition in Geometric Modeling
CAM-I's 13th Annual Meeting and Technical Conference, Floride, 1984.

[Ing 87] F. INGRAND
Inférence de formes à partir de fonctions. Application à la conception de montages d'usinages
Thèse de 3ème cycle, Institut National Polytechnique de Grenoble, février 1987.

[Jos 87] S.B. JOSHI et T.C. CHANG
CAD Interface for Automated Process Planning
19th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Penn State, USA, juin 1987.

[Kor 87] R.E. KORF
Planning as Search: A Quantitative Approach
AI Journal, Vol. 33, No. 1, p65-88, septembre 1987.

[Kyp 80] L.K. KYPRIANOU
Shape Classification in Computer-Aided Design
Ph.D. Thesis, Université de Cambridge, Angleterre, 1980.

[Lag 85] Y. LAGOUDE et J.P. TSANG
A Plan Representation Structure For Expert Planning System
Symposium on Computer Aided Process Planning, Miami Beach, Florida, novembre 1985.

[Lat 77] J.C. LATOMBE
Une application de l'Intelligence Artificielle à la conception assistée par ordinateur (TROPIC)
Thèse d'Etat, Institut National Polytechnique de Grenoble, novembre 1977.

[Lau 87] C. LAUGIER
Raisonnement géométrique et méthodes de décision en robotique. Application à la programmation automatique des robots
Thèse d'Etat, Institut National Polytechnique de Grenoble, décembre 1987.

[Lef 86] E. LEFUR, F. VILLENEUVE, P. BOURDET
Génération Automatique de Processus d'Usinage
Matériaux Mécanique Electricité, n° 418, novembre-décembre 1986.

[Leu 80] P. LEULIER
Cotation des Volumes au Niveau Etudes
Document pour le stage de la Direction des Armements Terrestres, Manufacture d'Armes de Tulle, 1980.

[Loz 76] T. LOZANO-PEREZ
The Design of a Mechanical Assembly System
AI TR 397, Artificial Intelligence Laboratory, MIT, 1976.

[Loz 83] T. LOZANO-PEREZ, M.T. MASON, R.H. TAYLOR
Automatic Synthesis of Fine-motion Strategies for Robots
1st International Symposium on Robotic Research, Bretton-Woods, août 1983.

[Mat 82] K. MATSUSHIMA, N. OKADA, T. SATA
The Integration of CAD and CAM by Application Of Artificial-Intelligence Techniques
Annals of the CIRP, vol. 31/1, 1982.

[Nil 82a] N.J. NILSSON
Basic Plan Generating systems
Principles of Artificial Intelligence, chap. 7, Symbolic Computation, Springer-Verlag, 1982.

[Nil 82b] N.J. NILSSON
Advanced Plan Generating systems
Principles of Artificial Intelligence, chap. 8, Symbolic Computation, Springer-Verlag, 1982.

[Nor 78] NORME FRANCAISE
Symbolisation des Prises de Pièce sur les Dessins d'Opérations
NF E 04-013, septembre 1978.

[Pap 86] C. LE PAPE
OPIS 1 : un système d'ordonnancement opportuniste
Rapport Final de Bourse INRIA, septembre 1986.

[Paz 78] R. PAZOT
Montages d'Usinage, Eléments d'Etudes
Ed. Desforges, 1978.

[Phi 87] R.H. PHILLIPS, V. ARUNTHAVANATHAN et X.D. ZHOU
An Integrated Intelligent Design and Process Planning System
19th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Penn State, USA, juin 1987.

[Req 83] A.A.G. REQUICHA
Toward a Theory of Geometric Tolerancing
International Journal Of Robotics Research, vol. 2, no. 4, Décembre 1983.

[Sch 87] M.J. SCHOPPERS
Universal Plans for Reactive Robots in Unpredictable Environments
Proceedings de IJCAI 87, Milan, Italie, 1987.

[Ste 84] G.L. STEELE Jr.
Common LISP, The Language
Digital Press, aout 1980.

[Tat 85] A. TATE
A Review of Knowledge-Based Planning Techniques
Knowledge Engineers' Review 2(1), juin 1985.

[Too 83] TOOL
Préparation Technologique des Gammes d'Usinage : Choix Assisté par Ordinateur des Outils et Paramètres de Coupe
Techniques d'Organisation et d'Optimisation Lyonnaises, 1983.

[Tot 85] T. TOTH, D. VADASZ
The TAUPROG System Family : Application Experiences and New Results of Development
6ème Conférence Internationale sur les logiciels de CAO/FAO pour les Industries Manufacturières, Prolamat 1985.

[Tro 86] J. PERTIN-TROCCAZ
Modélisation du raisonnement géométrique pour la Programmation des Robots
Thèse de doctorat de l'INPG, Institut National Polytechnique de Grenoble, mars 1986.

[Tsa 86] J.P. TSANG
Genericity in Process Planning Systems
1st International Conference on Applications of AI to Engineering Problems, Southampton, UK, avril 1986.

[Tsa 87] J.P. TSANG
Planification par combinaison de plans. Application à la génération de Gammes d'Usinage
Thèse de doctorat de l'INPG, Institut National Polytechnique de Grenoble, juillet 1987.

[Tul 87] J. TULKOFF
Process Planning : an Historical Review and Future Prospects
19th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Penn State, USA, juin 1987.

[Ver 88] F. VERNADAT
Reconnaissance de situation et commande situationnelle pour la conduite des ateliers de production
Rapport de Recherche 669, LIFIA, Institut National Polytechnique de Grenoble, janvier 1988.

[Wan 87] H.P. WANG
TURBO-CAPP : a Knowledge-Based Computer Aided Process Planning System
19th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Penn State, USA, juin 1987.

Annexes

A

Annexe A

La Cotation Volumique

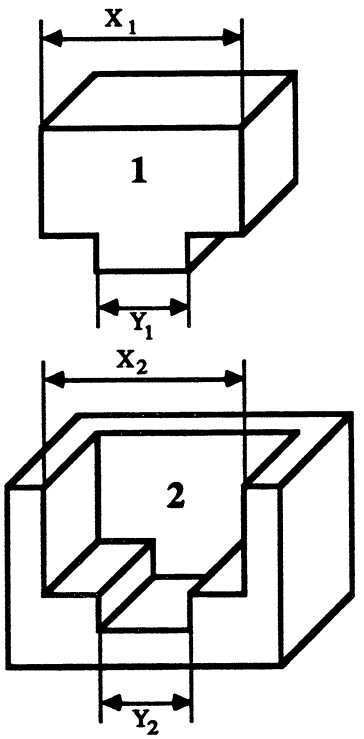
Deux types de cotation sont concurremment utilisés pour définir les pièces mécaniques :

- la **Cotation de Liaison** : la plus ancienne et la plus employée,
- la **Cotation Volumique** : plus récente et moins répandue, elle présente pourtant de nombreux avantages, tant au niveau de son automatisation qu'au niveau de la fabrication.

Afin d'illustrer la différence entre ces deux approches, nous donnons dans cette annexe un exemple de cotation à l'aide de ces deux systèmes, de l'ensemble mécanique simple mais réel, tiré de [Leu 82] et représenté sur la figure **A**.1. Nous explicitons ensuite sur cet exemple quelques avantages de la Cotation Volumique, convention "maximum matière", par rapport à la Cotation de Liaison.

1 Un exemple de cotation

L'ensemble mécanique de la figure **A**.1 a été conçu en Bureau d'Etudes en précisant la fonction principale : la pièce 1 se monte dans la pièce 2. Les jeux de fonctionnement sont donnés dès la conception, ou après expérimentation. Les études ont dans ce cas donné les valeurs suivantes :



Fonction : la Pièce 1 se monte dans la pièce 2

d'où | X_1 dans Y_1
| X_2 dans Y_2

Jeux de fonctionnement :

Les études donnent :

| $J_1 + \Delta J_1$ entre X_1 et X_2
| $J_2 + \Delta J_2$ entre Y_1 et Y_2

Figure A.1 : Le mécanisme à coter

$$X_1 = 40,1^{0}_{-0,2}$$
$$Y_1 = 20,1^{0}_{-0,2} \qquad J_1 + \Delta J_1 = 0,1^{+0,4}_{0}$$
$$X_2 = 40,2^{+0,2}_{0} \qquad J_2 + \Delta J_2 = 0,1^{+0,4}_{0}$$
$$Y_2 = 20,2^{+0,2}_{0}$$

1.1 En Cotation de Liaison

Une pièce en cotation de liaison est définie par des surfaces limites positionnées les unes par rapport aux autres, sans référence constante. Le processus de cotation est constitué de cinq étapes consécutives (cf. figure A.2) :

1. **choix des faces en contact dans l'ensemble mécanique :**
   Il ne doit exister qu'un seul contact entre deux pièces différentes. A chaque choix correspond une cotation différente (4 possibilités dans notre cas).

2. **répartition des jeux de fonctionnement,**

3. **construction de la chaîne de cotes,**

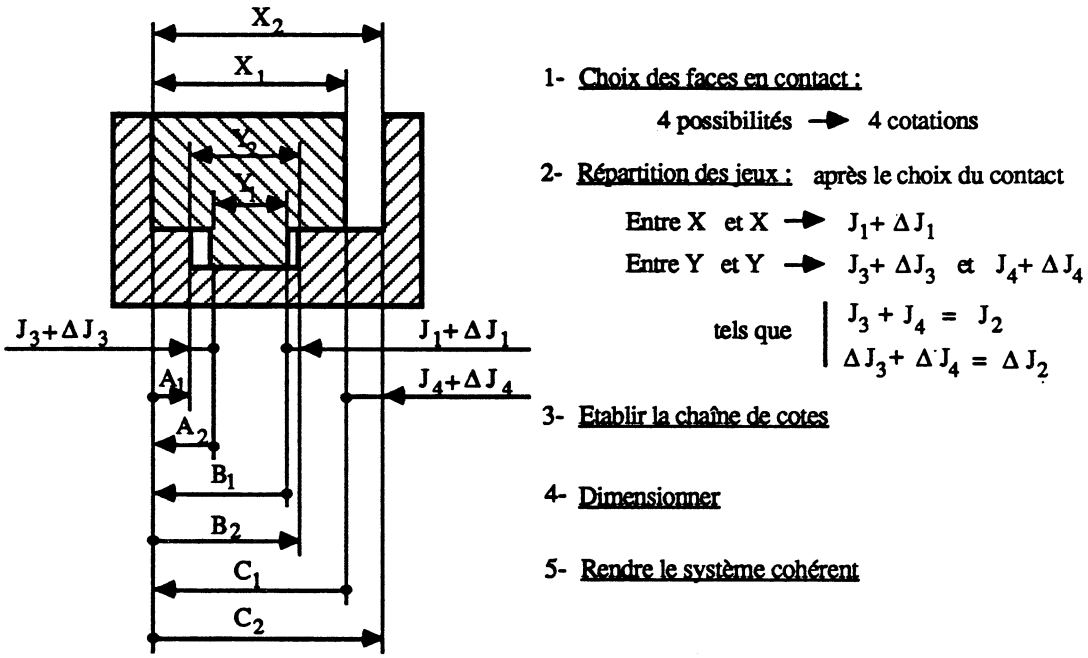


Figure A.2 : La Cotation de Liaison

4. **dimensionnement de la chaîne de cotes,**
5. **assurer la cohérence du dimensionnement :** supprimer des cotes redondantes, etc.

Si l'on applique ce processus à notre exemple, les calculs sont les suivants :

Pour faciliter les dimensionnements, les valeurs données par les études sont données en tolérances réparties :

$$\begin{array}{ll} X_1 = 40^{\pm 0,1} & \\ Y_1 = 20^{\pm 0,1} & J_1 + \Delta J_1 = 0,3^{\pm 0,2} \\ X_2 = 40,3^{\pm 0,1} & J_2 + \Delta J_2 = 0,3^{\pm 0,2} \\ Y_2 = 20,3^{\pm 0,1} & \end{array}$$

On choisit le contact représenté sur la figure **A**.*2.*
On répartit les jeux de fonctionnement :

$$\begin{cases} J'_1 = 0,3 & \Delta J'_1 = 0,2 \\ J'_3 + J'_4 = 0,3 & \Delta J'_3 + \Delta J'_4 = 0,2 \end{cases}$$

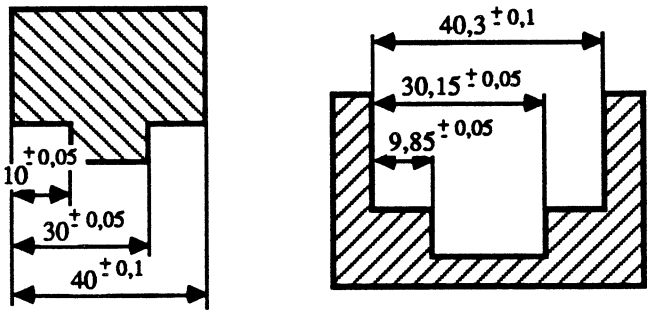


Figure A.3 : Les cotes issues de la Cotation de Liaison

Si les jeux sont équitablement répartis :

$$J'_3 = J'_4 = 0,15$$
$$\Delta J'_3 = \Delta J'_4 = 0,1$$

D'où le calcul des cotes en tolérances réparties :

$$\begin{array}{llll}
A_1 = \frac{X_1 - Y_1}{2} = 10 & a_1 = \frac{\Delta J'_3}{2} = 0,05 & \Rightarrow & A_1^{\pm a_1} = 10^{\pm 0,05} \\
A_2 = A_1 - J'_3 = 9,85 & a_2 = \frac{\Delta J'_3}{2} = 0,05 & \Rightarrow & A_2^{\pm a_2} = 9,85^{\pm 0,05} \\
B_1 = A_1 + X_1 = 30 & b_1 = \frac{\Delta J'_4}{2} = 0,05 & \Rightarrow & B_1^{\pm b_1} = 30^{\pm 0,05} \\
B_2 = B_1 + J'_4 = 30,15 & b_2 = \frac{\Delta J'_4}{2} = 0,05 & \Rightarrow & B_2^{\pm b_2} = 30,15^{\pm 0,05} \\
C_1 = X_2 = 40 & c_1 = \frac{\Delta J'_4}{2} = 0,1 & \Rightarrow & C_1^{\pm c_1} = 40^{\pm 0,1} \\
C_2 = C_1 + J'_1 = 40,3 & c_2 = \frac{\Delta J'_4}{2} = 0,1 & \Rightarrow & C_2^{\pm c_2} = 40,3^{\pm 0,1}
\end{array}$$

Le résultat de cette cotation est illustré sur la figure **A**.3.

1.2 En Cotation Volumique

Une pièce décrite en Cotation Volumique est définie par un ensemble de volumes connus par la norme, paramétrés et positionnés les uns par rapport aux autres suivant les conventions de la mécanique (coaxialité, symétrie, etc). Le processus de cotation ne consiste ici qu'en deux étapes (cf. figure **A**.4) :

1. **dimensionnement des volumes,**
2. **positionnement des volumes** les uns par rapport aux autres.

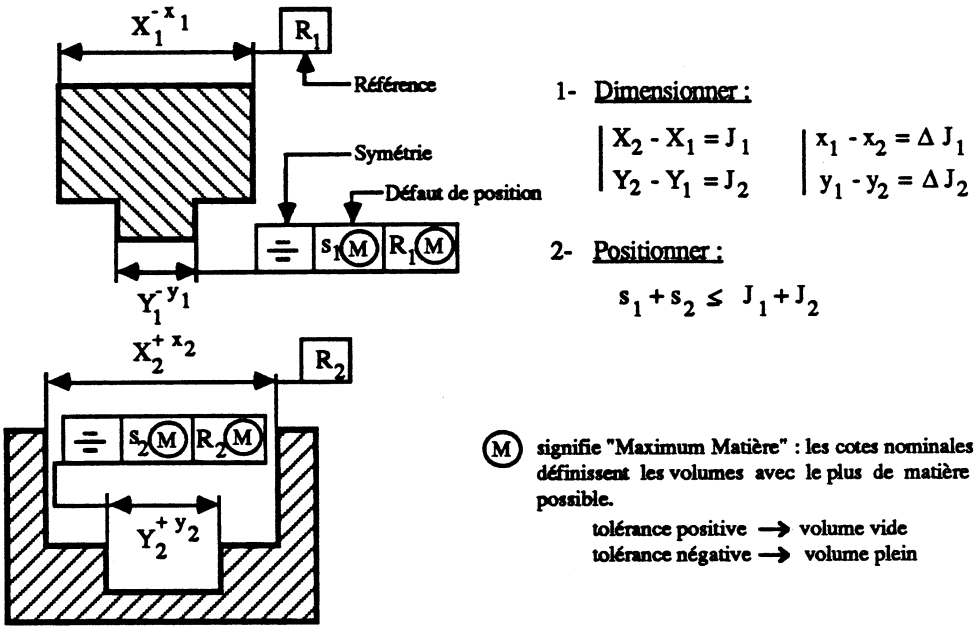


Figure A.4 : La Cotation Volumique

Avant de procéder au calcul des cotes, définissons la convention **Maximum Matière**, notée Ⓜ sur les dessins de définition. On dit que :

- le volume mâle (plein) est Ⓜ lorsqu'il est le plus gros possible, tout en restant compatible avec les tolérances qui sont affectées à ses cotes nominales,
- le volume femelle (creux) est Ⓜ lorsqu'il est le plus petit possible, tout en étant compatible avec les tolérances de ses cotes nominales.

Du point de vue des positions, en cotation Ⓜ, la valeur du défaut de position entre le volume référencé et le volume positionné doit être au plus égale au défaut toléré lorsque les volumes sont au maximum matière.

Sur l'exemple de la figure A.1, le calcul des cotes en Cotation Volumique est très simple :

Les cotes nominales X_1, X_2, Y_1 et Y_2 sont issues directement des données de l'étude :

$$X_1 = 40,1^{-0,2} \quad Y_1 = 20,1^{-0,2}$$
$$X_2 = 40,2^{+0,2} \quad Y_2 = 20,2^{+0,2}$$

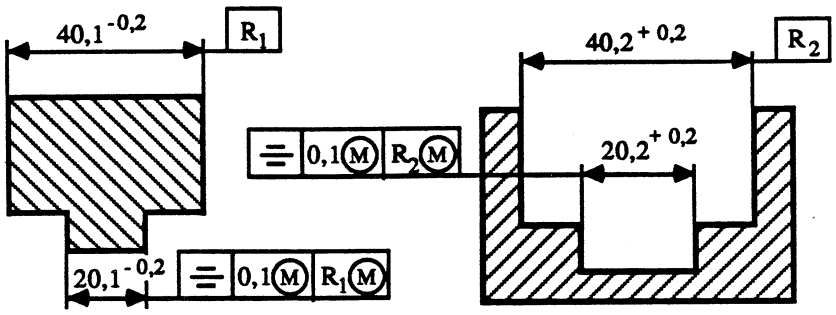


Figure A.5 : Les cotes issues de la Cotation Volumique

On distribue la somme des jeux minima dans les défauts de position :

$$jeux\ minima = J_1 + J_2 = 0,2$$

En les répartissant équitablement, on obtient les cotes portées sur la figure A.5.

1.3 Conclusion

Au vu de cet exemple, nous nous apercevons déjà que la Cotation Volumique est avantageuse par rapport à la Cotation de liaison. En effet,

- **le processus de cotation est plus simple :** 2 étapes au lieu de 5,
- **les calculs sont moins compliqués :** les valeurs sont directement issues des données des études,
- **les tolérances sont plus larges :**

2 cotes à $\pm 0,1$ 4 cotes à $\pm 0,05$	en Cotation de Liaison
4 cotes à ± 0.1 2 cotes à ± 0.05	en Cotation Volumique Ⓜ

d'où une fabrication plus facile.

2 Avantages de la Cotation Volumique

Outre les deux avantages cités ci-dessus, la Cotation Volumique Ⓜ en possède de nombreux autres, notamment en fabrication. Nous allons les examiner ci-dessous.

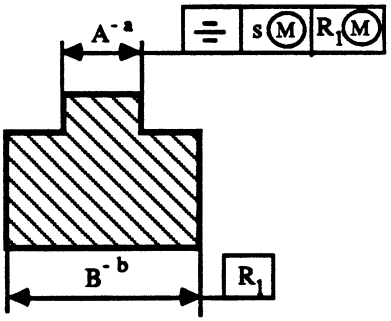


Figure A.6 : Défaut de position

2.1 Augmentation du défaut de position

En convention "maximum matière", les tolérances de position (ou défauts de position) acceptées lors de la vérification des pièces, peuvent être plus importantes que celles qui sont spécifiées sur le dessin. Afin de comprendre cette propriété, examinons plus particulièrement le cas de la symétrie de position, et considérons pour cela la pièce mâle de l'ensemble mécanique que nous avons étudié auparavant (cf. figure A.6).

Nous savons (cf. section 1.2) que la tolérance de position **s** correspond au maximum du défaut de position toléré lorsque les volumes sont au "maximum matière", c'est-à-dire lorsque les cotes **A** et **B** sont effectivement réalisées.

Or ce défaut de position toléré peut être plus important lorsque les volumes tendent vers le "minimum matière", c'est-à-dire vers **(A-a)** et **(B-b)**. En effet, plaçons-nous dans le cas où le défaut de position est maximum entre **A** et **B** : si les cotes effectivement usinées sont respectivement **A'** et **B'**, avec **a' = A-A'** et **b' = B-B'**, alors l'excentricité entre le plan médian de **A'** et le plan médian de **B'** peut être égale à (cf. figure A.7) :

$$e = \frac{s}{2} + \frac{a'}{2} + \frac{b'}{2}$$

Cette propriété peut donc s'énoncer de la manière suivante :

> *Le défaut de position entre deux volumes d'une pièce cotée en cotation volumique Ⓜ peut être au plus égal, lorsque ces volumes tendent vers le "minimum matière", au défaut toléré, augmenté des valeurs absolues de la différence entre le "maximum matière" et la valeur réelle de chaque volume.*

En conséquence, lors de la vérification des pièces, il est possible d'en accepter qui ne

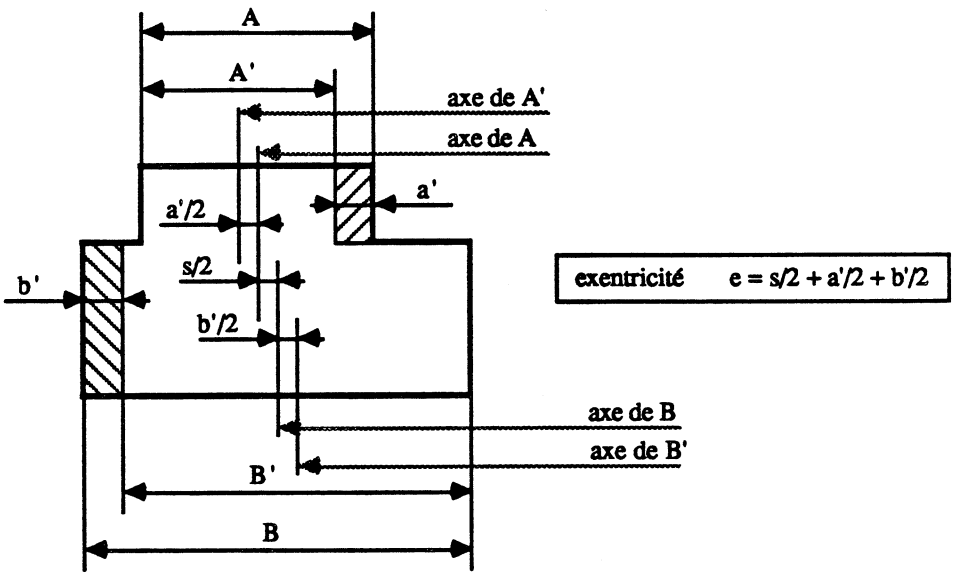


Figure A.7 : Augmentation du défaut de position

vérifient pas exactement les cotes spécifiées sur le dessin de définition. Une telle chose est impossible en Cotation de Liaison où chaque cote doit impérativement être réalisée dans les tolérances pour quepièce soit bonne. Par exemple, sur l'exemple de cotation traité précédemment, il faut impérativement usiner :

- en Cotation de Liaison : 4 cotes à $\pm 0,05$ et 2 cotes à $\pm 0,1$,
- en Cotation Volumique Ⓜ : 4 cotes à $\pm 0,1$ et 2 cotes dont les tolérances peuvent aller jusqu'à $\pm 0,15$ selon les valeurs des quatre cotes précédentes.

Nous allons voir que cette propriété est à l'origine des avantages concernant l'ablocage et la vérification des pièces cotées en Cotation Volumique Ⓜ.

2.2 Contrôle des pièces plus rapide et plus simple

Si la Cotation de Liaison est utilisée, vérifier une pièce revient à contrôler indépendamment les unes des autres toutes les cotes des dessins de définition. La Cotation Volumique permet en revanche d'effectuer plusieurs mesures à la fois, de façon simple et rapide, au moyen d'un appareil appelé **vérificateur global.** Cet outil est en fait une pièce conjuguée de la pièce à mesurer, dont les dimensions sont au "maximum matière" avec défaut de position maximum. L'opération de contrôle consiste à vérifier

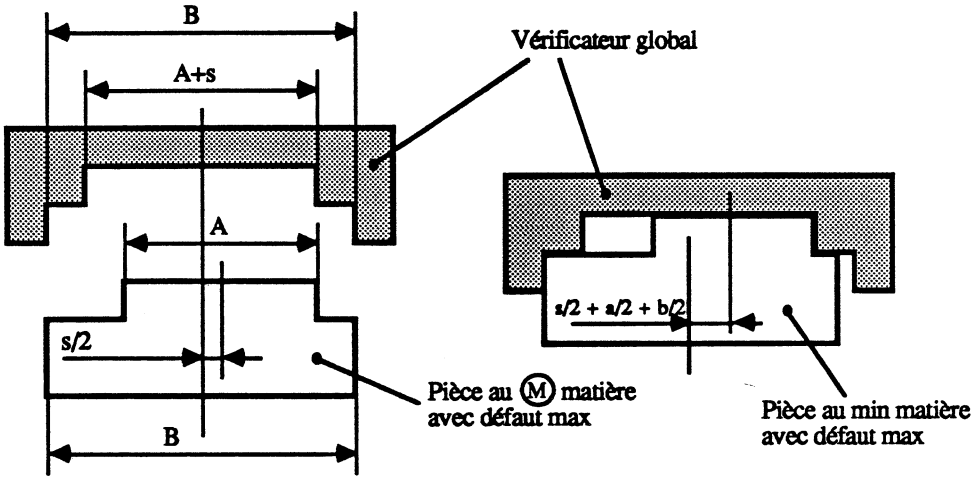


Figure A.8 : Une vérification plus simple

que la pièce à mesurer pénètre dans le vérificateur global, ce qui permet de contrôler simultanément plusieurs cotes. La figure **A**.8 représente la pièce mâle étudiée jusqu'à présent avec son vérificateur ; les cotes vérifiées sont dans ce cas la cote **B** et la position entre les volumes.

2.3 Plus de notion d'isostatisme

Lors de son usinage, une pièce décrite en Cotation de Liaison doit être fixée de façon précise, avec des points d'appui bien déterminés. En effet, toutes les références des cotes sont des faces, et ce sont donc des faces qui servent de référence pour usiner, et donc d'appui. En Cotation Volumique Ⓜ, les références des cotes sont des volumes, et les tolérances de position d'un volume par rapport à un autre sont données lorsque ces volumes sont au "maximum matière". Pour usiner un volume **A** par rapport à un volume référence **B**, il suffit donc de positionner la pièce de façon quelconque à l'intérieur d'une cage dont les dimensions sont au "maximum matière" de **B**. La machine est alors réglée bien évidemment par rapport à cette cage et non par rapport à la pièce qui y est placée.

Considérons la figure **A**.9, et démontrons cette propriété. Soit **B'** la cote déjà usinée que l'on place dans **B**, on a **B'-B = b'** ; on a alors une excentricité **b"/2** entre **B'** et **B** lorsqu'on a placé la pièce, qui vérifie **b"** $\leq$ **b'** $\leq$ **b**. Lorsque le volume **A** est usiné, la machine est réglée de manière à usiner **A'** tel que **A-A' = a'** $\leq$ **a**, avec un défaut de symétrie **s'** de **A'** par rapport à **B** qui est au plus égal à **s**. D'où

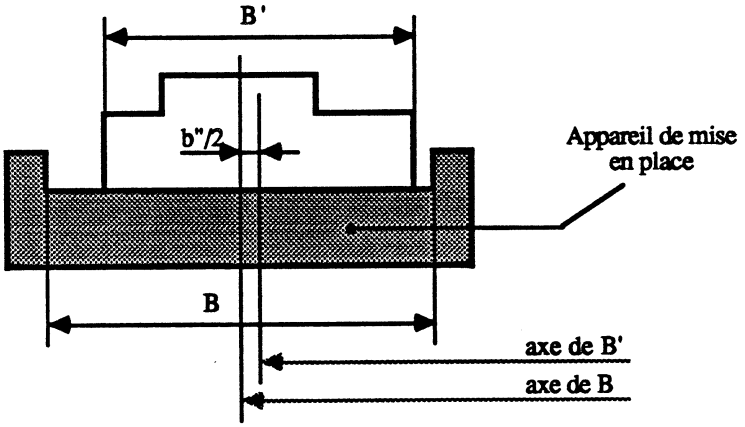


Figure A.9 : Ablocage d'une pièce en Cotation Volumique "max matière"

$$\frac{a'}{2} = \text{distance (axe de } \mathbf{A'} \text{ , axe de } \mathbf{A} \text{)}$$

$$\frac{s'}{2} = \text{distance (axe de } \mathbf{A} \text{ , axe de } \mathbf{B} \text{)}$$

$$\frac{b''}{2} = \text{distance (axe de } \mathbf{B} \text{ , axe de } \mathbf{B'} \text{)}$$

Entre **A'** et **B'**, on a donc une excentricité **e** inférieure à la somme des trois distances ci-dessus :

$$e \leq \frac{a'}{2} + \frac{s'}{2} + \frac{b''}{2}$$

On a donc bien :

$$e \leq \frac{s}{2} + \frac{a'}{2} + \frac{b'}{2} \text{ puisque } s' \leq s \text{ et } b'' \leq b'$$

On reste par conséquent dans le défaut de position toléré.

Cette propriété est très intéressante car elle permet de concevoir plus facilement des appareils d'ablocage qui sont plus simples à manipuler (moins de réglages).

2.4 Utilisation de toute la tolérance

En cotation des volumes convention Ⓜ, le seul fait de connaître une cote permet de savoir où se trouve la matière : si le signe de la tolérance est +, alors c'est un volume femelle (vide) qui est usiné ; si le signe est −, c'est un volume mâle (plein). Par contre, en Cotation de Liaison, la cote usinée est soit mâle, soit femelle, selon l'appui choisi (cf. figure **A**.10).

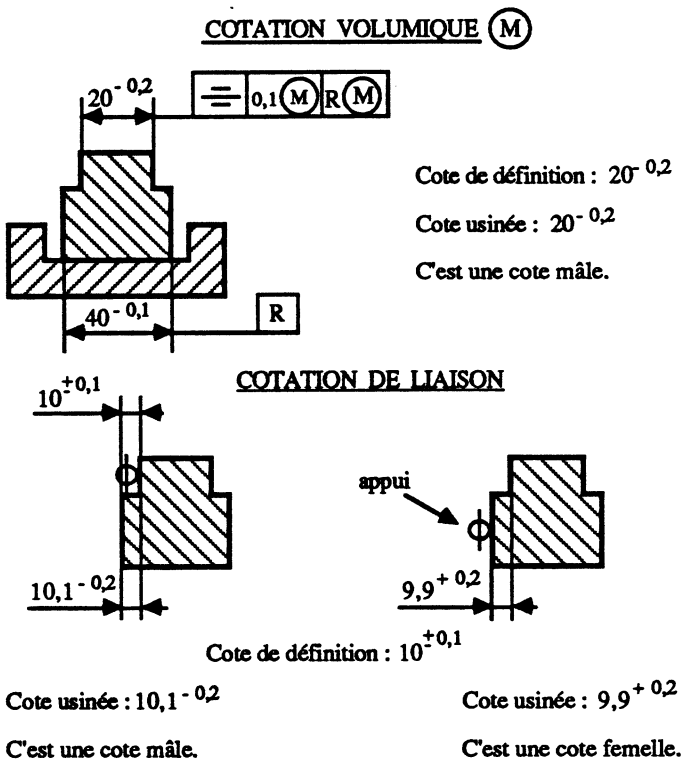


Figure A.10 : De la cote de définition à la cote usinée

Si l'on veut passer automatiquement au programme de Commande Numérique, il est donc nécessaire en Cotation de Liaison de connaître l'appui, et de recalculer en conséquence la nouvelle cote pour tenir compte de toute la tolérance. Cette opération n'est pas toujours facile, surtout s'il y a des transferts à réaliser. C'est pour cette raison que les programmes sont écrits en cote moyenne (c'est la valeur 10 qui est utilisée, et non 9,9 ou 10,1 selon le cas) ; on ne tient alors seulement compte que de la moitié de la tolérance disponible (0,1 au lieu de 0,2), et c'est l'opérateur sur la machine qui joue manuellement sur les diamètres des outils, pour ramener l'usinage vers le "min matière" (il est préférable du point de vue mécanique d'usiner des pièces qui tendent vers le "min matière", car les jeux sont alors plus importants et le système fonctionne mieux). Dans le cas de la figure A.10, la valeur de la cote programmée est 10 ; si l'outil utilisé a pour diamètre 30, l'opérateur rentre la valeur 29,9 au lieu de 30, ce qui a pour effet d'usiner une cote plus grande (cf. figure A.11). Le processus n'a donc rien d'automatique dans ce cas, et la bonne réalisation des pièces dépend grandement du savoir-faire de l'opérateur.

Au contraire, en Cotation Volumique Ⓜ, on sait tout de suite d'après le dessin de

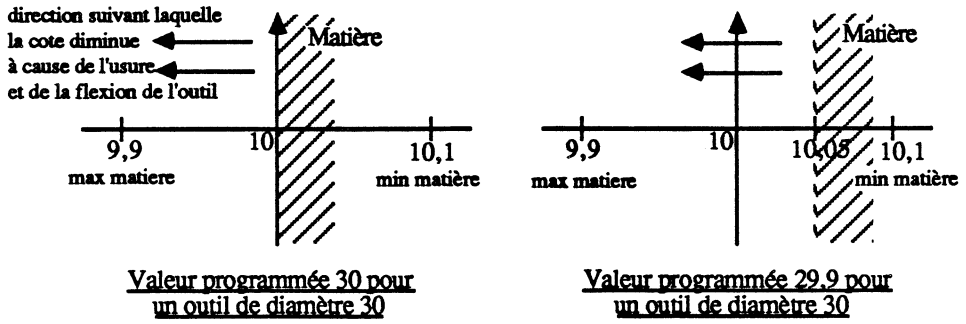


Figure A.11 : Programmation en cote moyenne

définition où se trouve la matière. Le passage à la programmation peut alors être automatique tout en tenant compte de toute la tolérance disponible. Il suffit pour cela de rentrer la cote suivante dans le programme :

$$\text{Cote Usinée} = \text{Cote Nominale} \pm \begin{smallmatrix} femelle \\ mâle \end{smallmatrix} \text{ (tolérance} \times \text{k)},$$

où k traduit une marge de sécurité que l'on se donne : $0 \leq k \leq 1$, en général $k = 0,8$. Dans le cas de la figure A.10, la cote programmée est alors 19,84 (cf. figure A.12). Le processus est donc entièrement automatique, sans interruption extérieure de la part d'un opérateur. On peut introduire en plus une autocorrection qui tient compte de l'usure de l'outil utilisé ; il suffit pour cela de fournir au programme la cote usinée sur la pièce précédente avec le même outil ; la valeur de la cote programmée est alors la suivante :

$$CU_n = CN \pm \begin{smallmatrix} femelle \\ mâle \end{smallmatrix} [(IT \times k) + \alpha] ,$$

$$\begin{aligned} où \quad \alpha = \quad & Cm - CU_{n-1} \\ avec \quad & Cm = cote\ mesurée \\ & CU_{n-1} = cote\ usinée\ à\ l'étape\ n-1 \end{aligned}$$

L'action de α a pour effet de ramener automatiquement l'usinage vers le "minimum matière".

2.5 Utilisation de Macros d'Usinage

Un programme de Commande Numérique est une suite d'instructions qui déterminent les trajets élémentaires des outils (déplacements de chaque axe de la machine), qui mettent à jour les conditions de coupe, etc. Cette programmation est donc relativement lourde, mais est la seule qui soit possible dans le cas d'une pièce cotée en Cotation

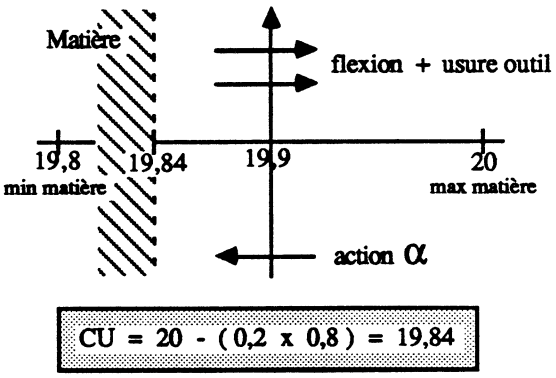
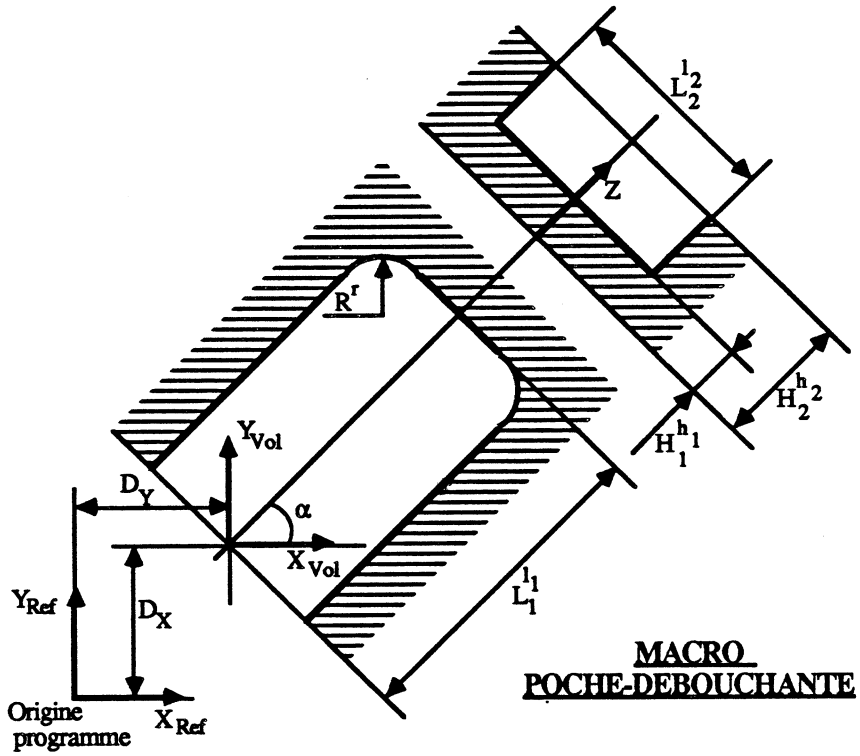


Figure A.12 : Valeur d'une cote programmée en Cotation Volumique "max matière"

de Liaison, puisque ce sont des faces qui sont usinées indépendamment les unes des autres. En Cotation Volumique, ce sont des volumes qui sont décrits ; on s'aperçoit alors que toutes les instructions qui permettent de réaliser une ébauche ou une finition d'un volume sont séquentielles dans le programme CN, et font appel au même outil avec les mêmes conditions de coupe. D'où l'idée de regrouper toutes ces instructions qui correspondent à un trajet d'outil évolué : un tel sous-programme est appelé **Macro d'Usinage** ; on peut le paramétrer avec les dimensions, positions, tolérances du volume à usiner, ainsi qu'avec les dimensions de l'outil et les conditions de coupe (cf. figure A.13). Ces macro-instructions permettent de réaliser très simplement une programmation en langage interprétable ; les valeurs des paramètres dimensionnels sont celles qui apparaissent sur le tracé de définition de la pièce ; quant aux tolérances, elles sont elles aussi automatiquement prises en compte comme nous l'avons vu dans la section précédente. En définitive, un programme CN est une suite d'appels à des macros d'Usinage paramétrées.



Paramètres supplémentaires :

k_R, k_{L_1}, k_{L_2}, k_H : coefficients intervenant dans le calcul des cotes usinées

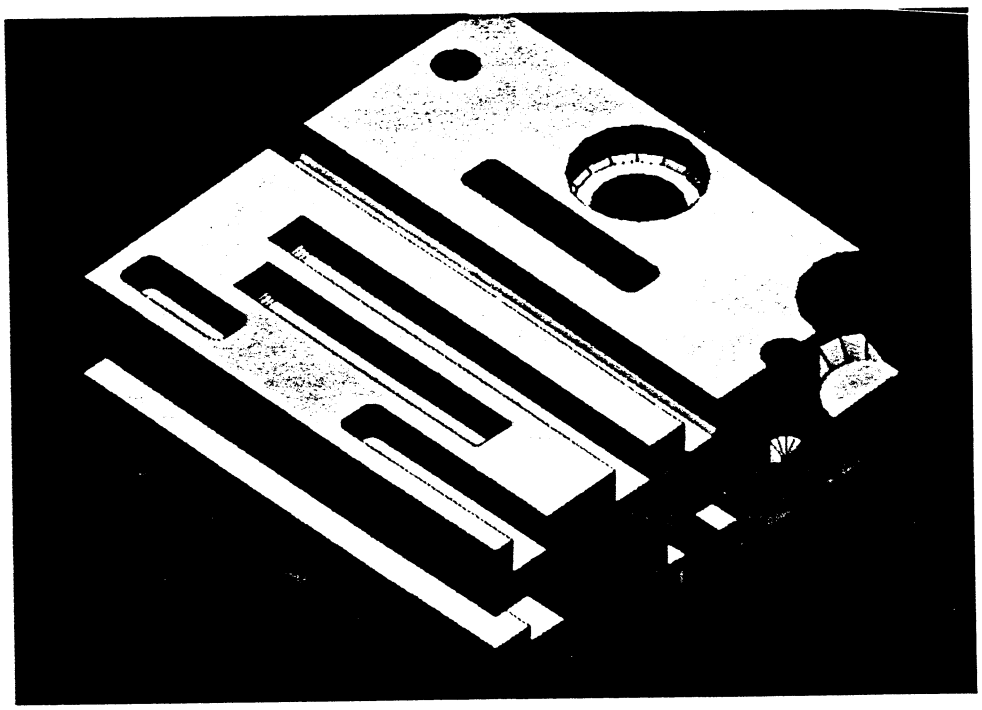
RO : rayon théorique de l'outil
RR : rayon réel de l'outil
A : avance de l'outil
V : vitesse de rotation de l'outil

Figure A.13 : Une Macro d'Usinage

B

Annexe B

Les Modèles d'Usinage traités par GAG-MAT



Les Modèles d'Usinage représentés par DIMAT

Nous présentons dans cette annexe les Modèles d'Usinages (MU) que GAGMAT utilise actuellement pour décrire les Volume d'Usinage (VU) qui composent les pièces. Ils sont au nombre de 16 :

6 MU cylindriques vides
1 MU parallélépipédique plein
9 MU parllélépipédiques vides

Deux remarques s'imposent :

- Bien que relativement peu nombreux, ces MU permettent néanmoins de représenter plus de 80% des pièces de la mécanique des mécanismes.
- GAGMAT ne sait usiner pour le moment que des VU vides, c'est la raison pour laquelle les MU présentés ci-dessous sont pratiquement tous vides (15 sur 16). Le parallélépipède plein sert de volume de base pour décrire les pièces, on suppose toujours qu'il est déjà usiné.

Avant de décrire en détails chacun de ces MU, effectuons quelques commentaires d'ordre général :

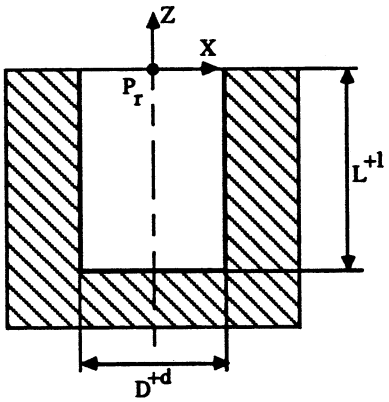
- A chaque MU est associé un référentiel qui permet de positionner les VU correspondants dans la pièce, dont l'origine P_r sert de point de référence pour les Macros d'Usinage qui usinent les VU.
- Les tolérances des cotes peuvent ne pas être spécifiées ; si c'est le cas, celles-ci doivent découler des relations qui positionnent le VU.
- A chaque MU est associé un ou des axes d'outil, exprimés dans le référentiel du MU,
- Les tolérances peuvent s'exprimer sous la forme de "qualités" : il existe un tableau de correspondance qui permet de passer des qualités aux tolérances et réciproquement, en fonction de la valeur des cotes.

1 Les MU cylindriques

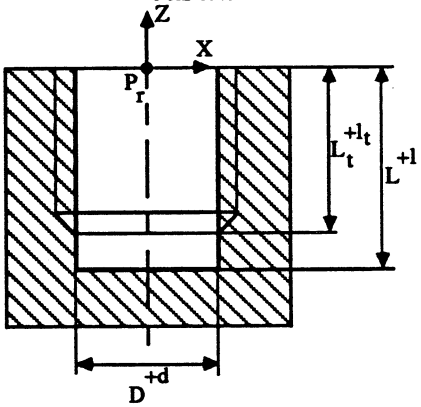
L'axe d'outil de tous les MU cylindriques vides est $Z+$.

1.1 Alésages non débouchants

Alésage-non-débouchant



Alésage-non-débouchant-taraudé

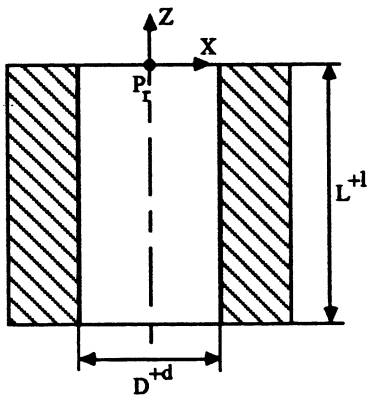


D'autres paramètres sont spécifiés :

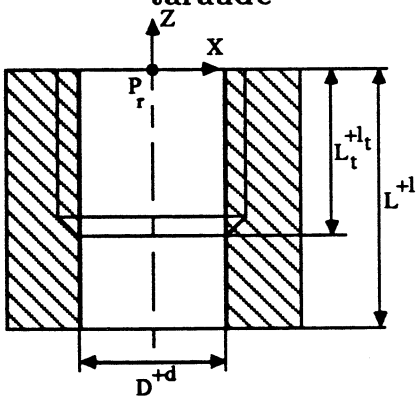
- la nature du fond de l'alésage : 2 possibilités *plat* ou *pointu*.
- le pas du filetage.

1.2 Alésages débouchants

Alésage-débouchant

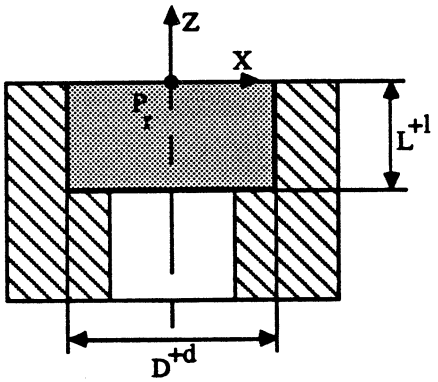


Alésage-débouchant-taraudé



Mêmes paramètres supplémentaires que précédemment.

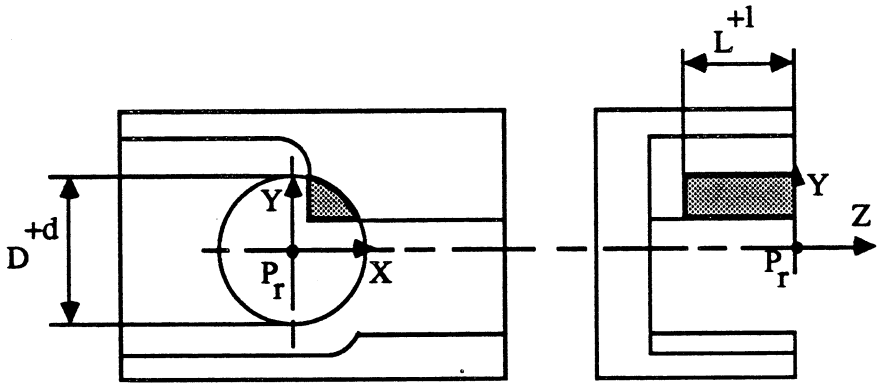
1.3 Lamage



Une valeur importante pour chercher le Processus d'Usinage (PU) d'un lamage est le diamètre de l'alésage sur lequel il doit être usiné. Il existe donc un paramètre, appelé *alésage-support*, dont la valeur est le nom de l'alésage correspondant.

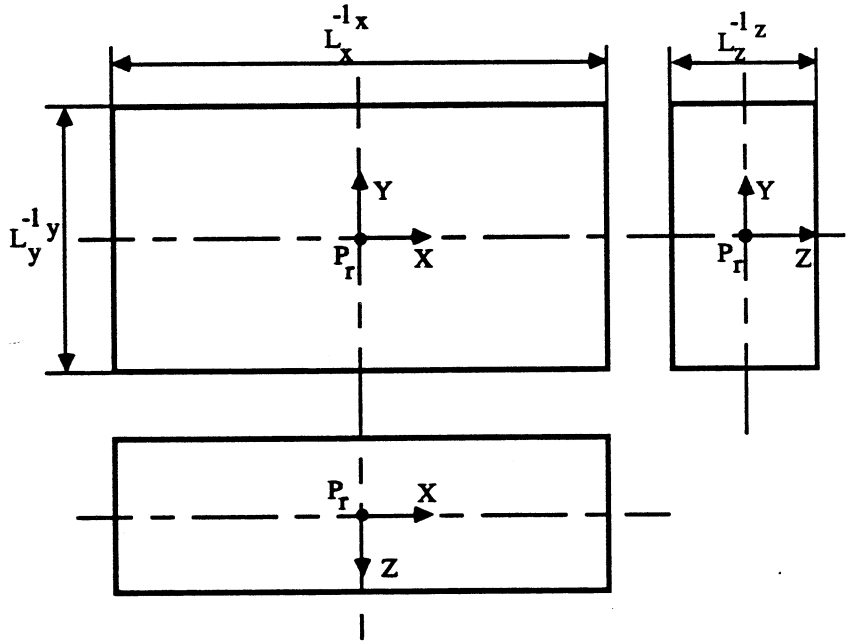
1.4 Plongée

Ce MU est équivalent à un alésage-non-débouchant. Il a cependant été créé car les méthodes pour usiner les VU de type *plongée* sont totalement différentes. En effet, la fonction de ces VU est totalement différente que celle d'un alésage ; une plongée sert généralement à "casser" des angles, et la matière à enlever se situe par conséquent sur une faible partie du cylindre. Il faut noter que les tolérances sont en général importantes. Le fond est toujours plat.



2 Le MU parallélépipédique plein

Boite



Remarquer que toutes les tolérances sont négatives. Les cotes sont en effet des cotes mâles (cf. annexe A).

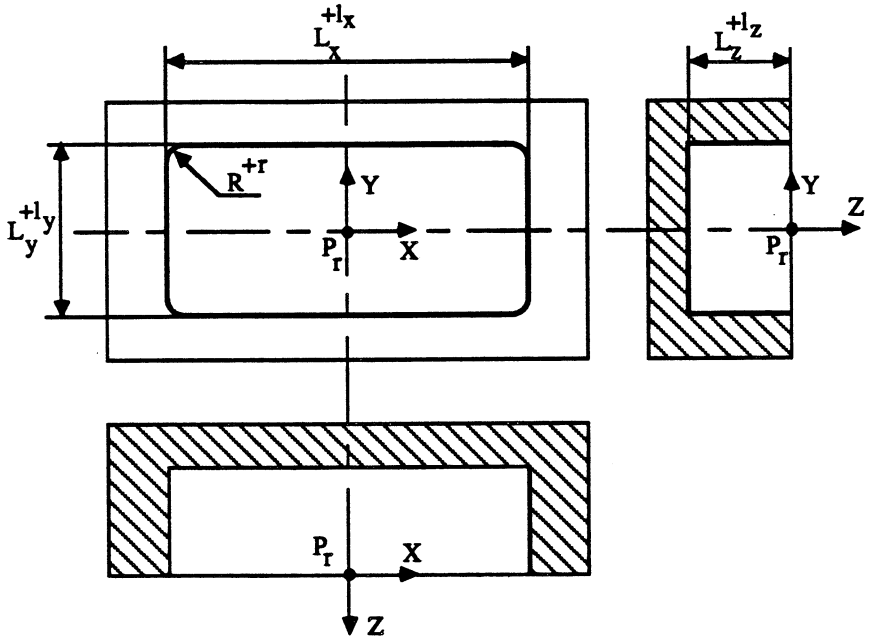
3 Les MU parallélépipèdiques vides

Tous les MU parallélépipédiques vides sont usinés en technologie fraisage. Selon le type de fraisage utilisé, fraisage 2 tailles (F2T) ou fraisage 3 tailles (F3T), les axes d'outil sont différents. Pour chacun des MU ci-dessous, nous donnons des n-uplets, où le premier élément est le type de fraisage, et les suivants les axes d'outils possibles correspondants.

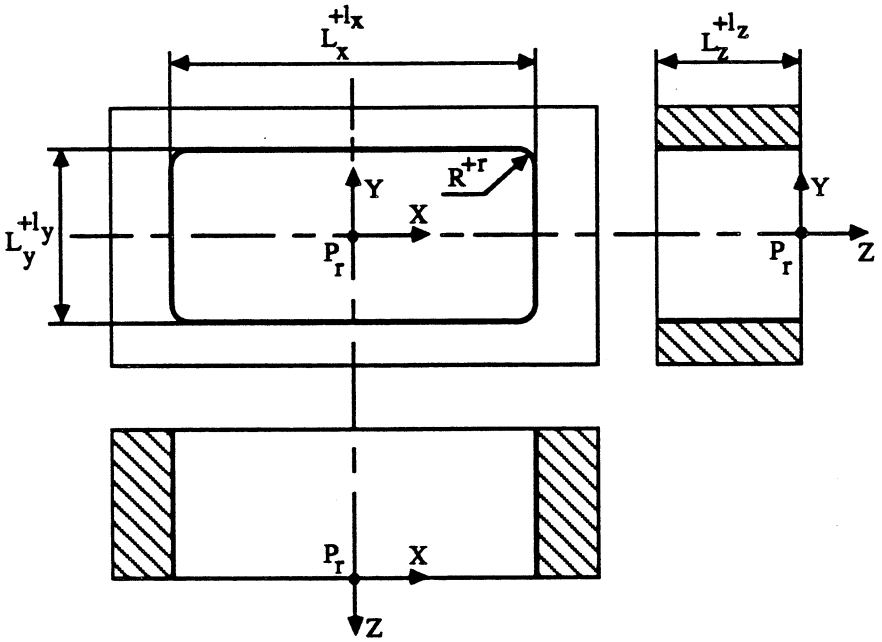
Les rayons représentés sur les dessins sont des rayons contournés par l'outil lors de l'usinage ; pour chacun des MU ci-dessous, il peut exister aussi des rayons ou des chanfreins affutés (qui correspondent aux formes des outils utilisés), que nous n'avons pas représentés.

3.1 Les poches

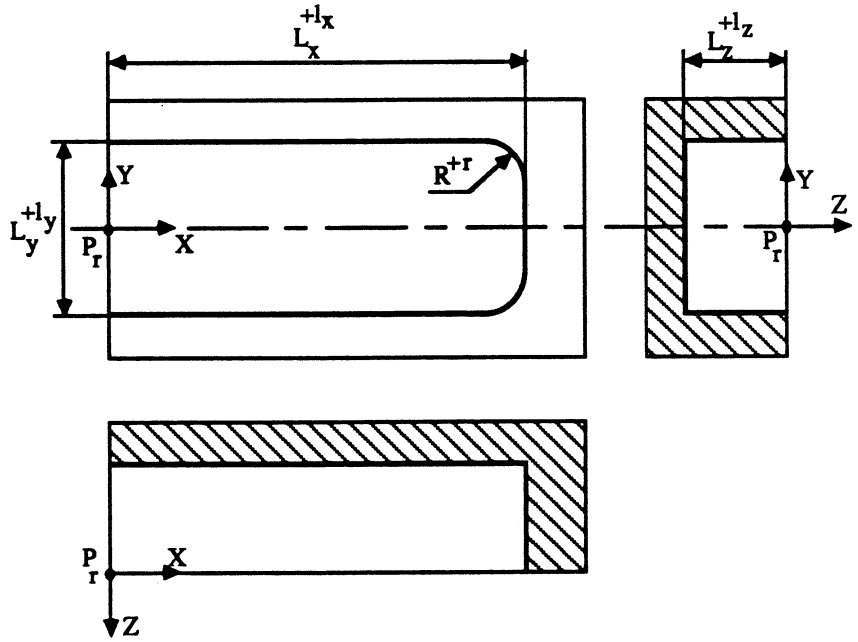
Poche (F2T Z+)



Poche-sans-fond (F2T Z+)

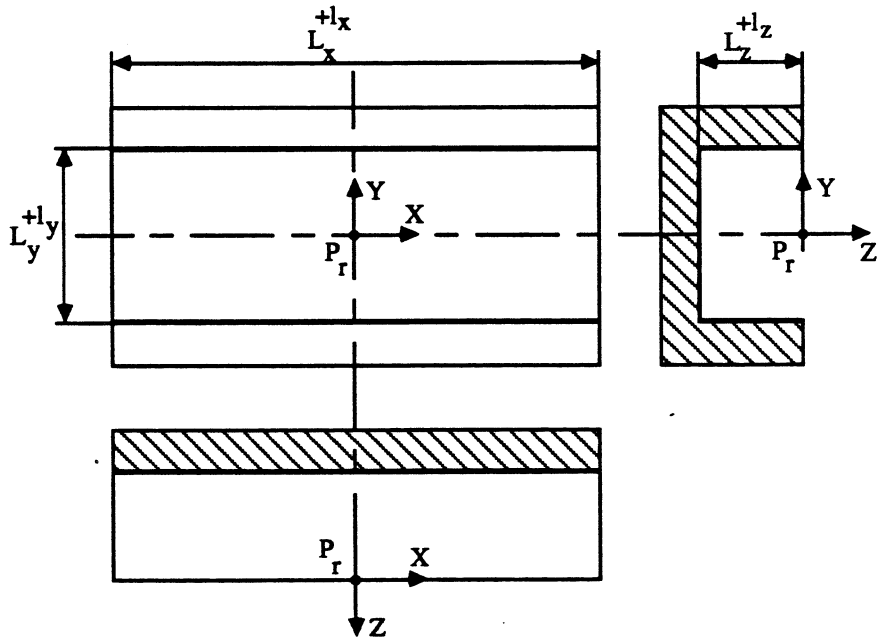


Poche-débouchante (F2T Z+)

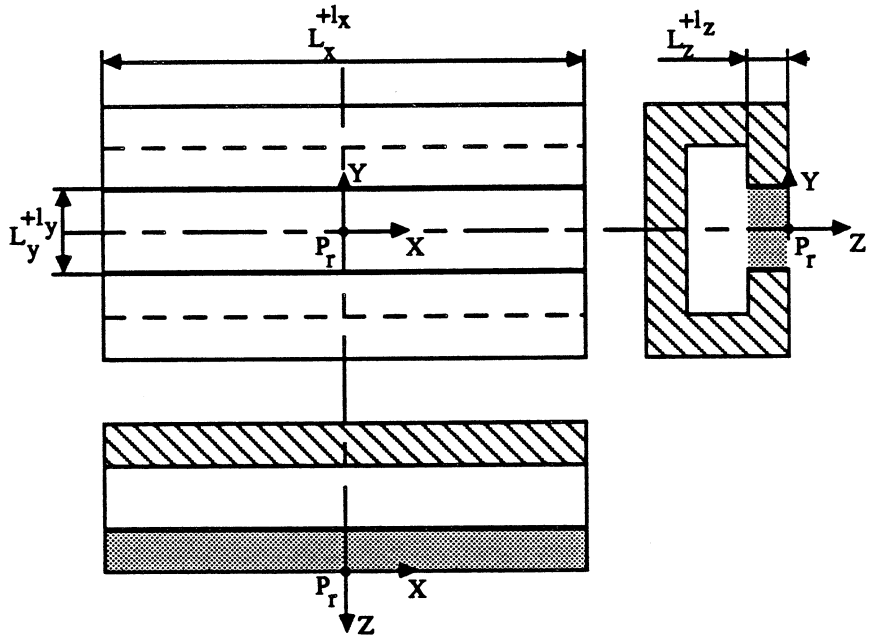


3.2 Les rainures

Rainure (F2T Z+) (F3T Y+ Y−)

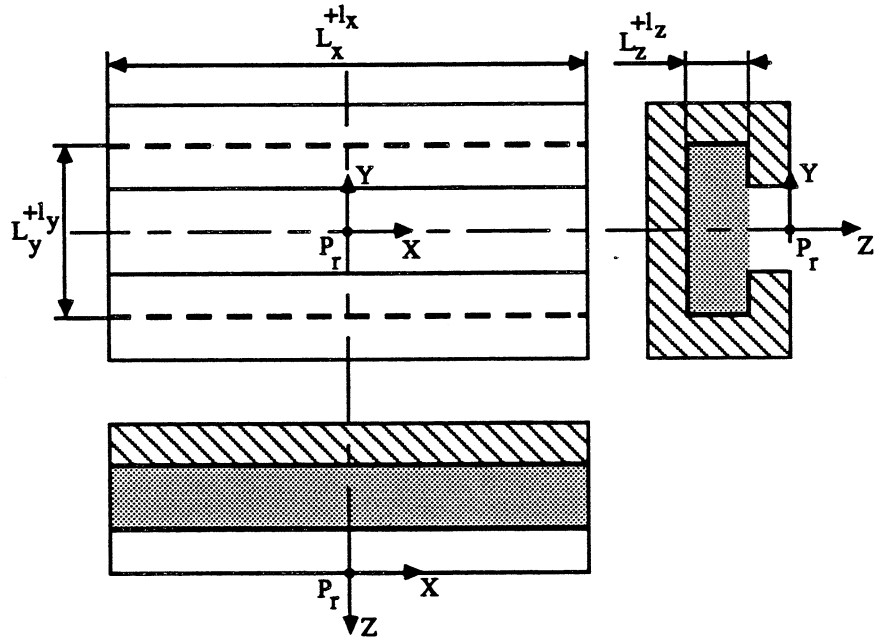


Rainure-sans-fond (F2T Z+) (F3T Y+ Y−)

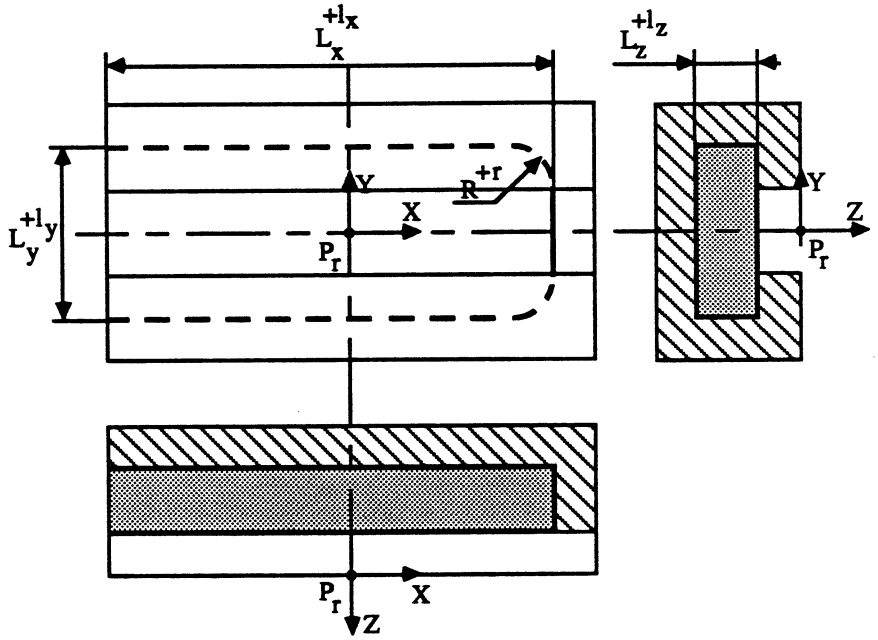


3.3 Les coulisses

Coulisse (F3T Z+)

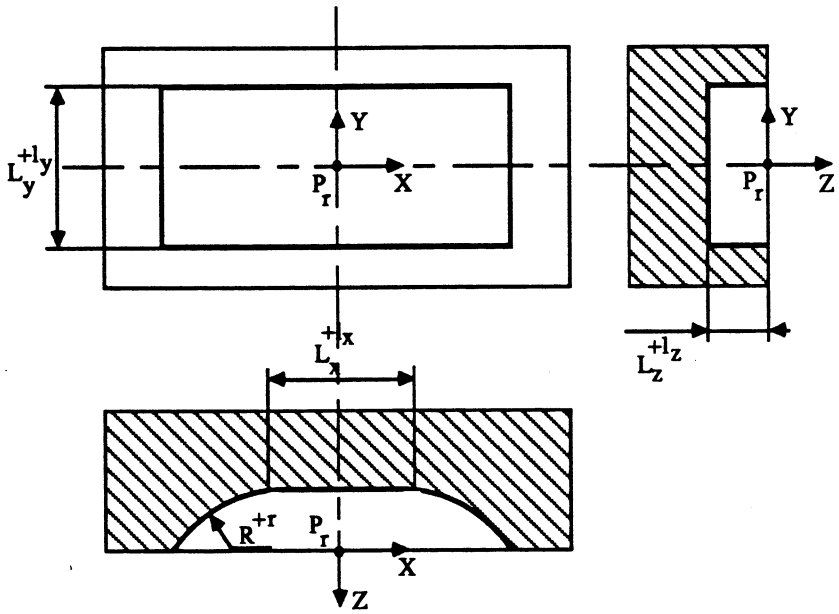


Coulisse-débouchante (F3T Z+)

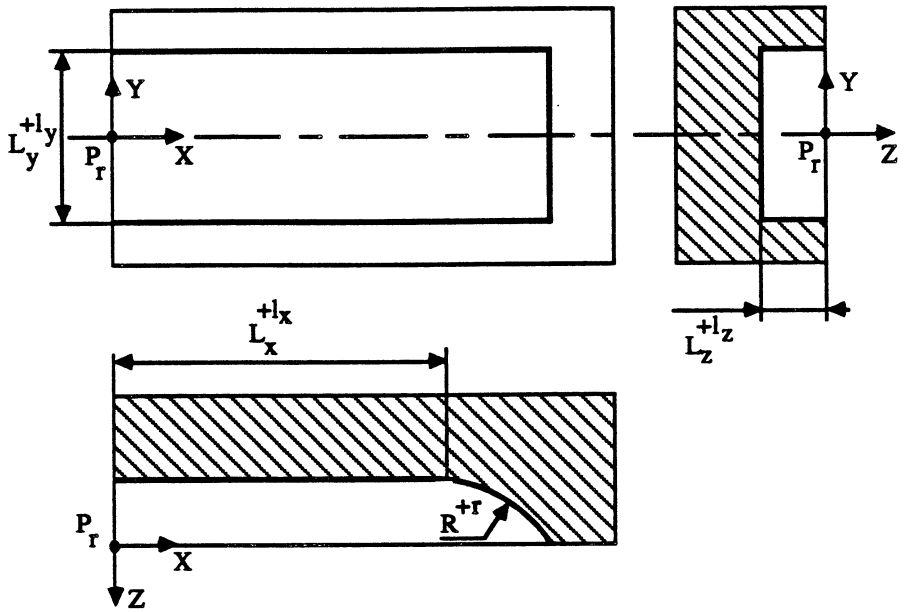


3.4 Les entailles

Entaille (F3T Y+ Y−)



Entaille-débouchante (F3T Y+ Y−)



C

Annexe C

Outils et ateliers

1 Les outils

Voici l'ensemble des outils qui composent le standard que nous avons décrit pour GAGMAT. Cette base comporte 707 outils différents, qui sont tous décrits par familles, suivant le schéma suivant :

(no-famille type-outil (`nom des paramètres dimensionnels représentatifs`*)*
(no-outil `valeurs des paramètres`*) ...)*

```
(5001 fraise2t (diametre longueur-taillee)
        (40000005 3 8 )    (40000006 3 12)    (40000007 4 11)    (40000008 4 19)
        (40000009 5 13)    (40000010 5 24)    (40000011 6 13)    (40000012 6 24)
        (40000013 7 16)    (40000014 7 30)    (40000015 8 19)    (40000016 8 38)
        (40000017 9 19)    (40000018 9 38)    (40000019 10 22)   (40000020 10 45)
        (40000021 11 22)   (40000022 11 45)   (40000023 12 26)   (40000024 12 53)
        (40000025 13 26)   (40000026 14 26)   (40000027 14 53))
;-----------------------------------------------------------------
(5002 fraise2t (diametre longueur-taillee)
        (40000028 16 63)   (40000029 18 63)   (40000030 22 38)   (40000031 22 75)
        (40000032 24 45)   (40000033 28 45)   (40000034 28 90))
;-----------------------------------------------------------------
(5003 fraise2t (diametre longueur-taillee)
        (40000035 16 32)   (40000036 18 32)   (40000037 20 38)   (40000038 20 75)
        (40000039 25 45)   (40000040 30 53)   (40000041 32 53)   (40000042 32 106)
        (40000043 36 53)   (40000044 40 63)   (40000045 40 125)  (40000046 50 75)
        (40000047 50 150))
;-----------------------------------------------------------------
(ns20 fraise2t (diametre longueur-taillee)
        (ns0020 7 45)      (ns0021 6 42)      (ns0022 5 42))
;-----------------------------------------------------------------
(5004 fraise2t-carbure (diametre longueur-taillee)
        (40000048 4 12)    (40000049 5 13)    (40000050 6 16)    (40000051 7 20)
        (40000052 8 23)    (40000053 10 22)   (40000054 12 28)   (40000055 14 30))
```

```
(5005 fraise2t-carbure (diametre longueur-taillee)
        (40000056 16 32)    (40000057 20 38))
;-----------------------------------------------------------------
(5006 fraise2t-carbure (diametre longueur-taillee)
        (40000953 20 40)    (40000058 25 50)    (40000059 32 50)    (40000060 40 50))
;-----------------------------------------------------------------
(5007 fraise2t (diametre longueur-taillee)
        (40000061 50 36)    (40000062 63 40)    (40000063 80 45)    (40000064 100 50)
        (40000065 125 56)   (40000066 63 40)    (40000067 80 45)    (40000068 125 56))
;-----------------------------------------------------------------
(5008 fraise2t-ravageuse (diametre longueur-taillee)
        (40000069 12 26)    (40000070 12 53)    (40000071 14 26)    (40000072 14 53)
        (40000073 16 32)    (40000074 16 63)    (40000075 18 32)    (40000076 18 63)
        (40000077 20 38)    (40000078 20 75)    (40000079 25 45)    (40000080 25 90)
        (40000081 28 45)    (40000082 28 90)    (40000083 32 53)    (40000084 32 106)
        (40000085 40 63)    (40000086 40 125))
;-----------------------------------------------------------------
(5009 fraise2t-ravageuse (diametre longueur-taillee)
        (40000087 40 32)    (40000088 50 36)    (40000089 63 40))
;-----------------------------------------------------------------
(5010 fraise-coupe-centre (diametre longueur-taillee)
        (40000090 2.5 8)    (40000091 3 8)      (40000092 3.5 10)   (40000093 4 11)
        (40000094 4.5 7)    (40000095 5 13)     (40000096 5.5 8)    (40000097 6 13)
        (40000098 6.5 10)   (40000099 7 16)     (40000100 7.5 10)   (40000101 8 19)
        (40000102 8.5 11)   (40000103 9 19)     (40000104 9.5 11)   (40000105 10 22)
        (40000106 10 45)    (40000107 11 22)    (40000108 12 26)    (40000109 12 53)
        (40000110 13 16)    (40000111 14 26)    (40000112 15 16)    (40000113 16 32))
;-----------------------------------------------------------------
(5011 fraise-coupe-centre (diametre longueur-taillee)
        (40000114 18 32)    (40000115 20 38)    (40000116 22 38)    (40000117 26 45)
        (40000118 28 45)    (40000119 32 53))
;-----------------------------------------------------------------
;; outils non standard
(ns50 fraise-coupe-centre (diametre longueur-taillee)
        (ns0001 6 45)       (ns0002 5 41))
;-----------------------------------------------------------------
(5015 fraise3t (diametre longueur-taillee diametre-partie-degageable)
        (40000139 8 1 3)        (40000140 8 2 3)        (40000141 10 2 4)
        (40000142 10 3 4)       (40000143 10 4 4)       (40000144 10 5 4)
        (40000145 12 1.5 4.5)   (40000146 12 2.5 4.5)   (40000147 12 3.5 4.5)
        (40000148 12 4.5 4.5)   (40000149 14 1 5)       (40000150 14 2 5)
        (40000151 14 3 5)       (40000152 16 2.5 6)     (40000153 16 3.5 6)
        (40000154 18 2 6)       (40000155 18 3 6)       (40000156 18 4 6)
        (40000157 18 5 6)       (40000158 18 6 6)       (40000159 20 2.5 7)
        (40000160 20 3.5 7)     (40000161 20 4.5 7)     (40000162 20 6.5 7)
        (40000163 20 7.5 7)     (40000164 25 2 8)       (40000165 25 3 8)
        (40000166 25 4 8)       (40000167 25 5 8)       (40000168 25 6 8)
        (40000169 25 6 8)       (40000170 30 3 10)      (40000171 30 4 10)
        (40000172 30 5 10)      (40000173 30 10 10)     (40000174 35 3 12)
        (40000175 40 4 13)      (40000176 40 7 13)      (40000177 40 8 13)
        (40000178 40 12 13)     (40000179 50 4 16))
;-----------------------------------------------------------------
(5016 fraise3t (diametre longueur-taillee diametre-partie-degageable)
        (40000180 18 5 8)       (40000181 18 6 8)       (40000182 20 8 8)
        (40000183 20 10 8)      (40000184 25 8 10)      (40000185 25 12 10)
        (40000186 30 5 12)      (40000187 30 6 12)      (40000188 30 8 12)
        (40000189 30 10 12)     (40000190 30 12 12)     (40000191 35 5 12)
        (40000192 35 6 12)      (40000193 35 10 12)     (40000194 35 14 12)
        (40000195 40 5 16)      (40000196 40 6 16)      (40000197 40 10 16)
        (40000198 40 12 16)     (40000199 40 16 16)     (40000200 40 18 16)
        (40000201 50 5 16)      (40000202 50 6 16)      (40000203 50 8 16)
        (40000204 50 10 16)     (40000205 50 12 16)     (40000206 50 14 16)
        (40000207 50 16 16)     (40000208 50 20 16)     (40000209 60 8 16)
        (40000210 60 10 16)     (40000211 60 12 16)     (40000212 60 14 16)
        (40000213 60 16 16)     (40000214 60 18 16)     (40000215 60 20 16))
;-----------------------------------------------------------------
;; Pour les familles 5019, 5021 et 5022, le standard definit le
;; diametre de l'alesage. La valeur du diametre de la partie
```

```
;; degageable est le diametre de la bague correspondante de
;; montage de la fraise sur son arbre
(5019 fraise3t (diametre longueur-taillee diametre-partie-degageable)
        (40000231 80 3 41)      (40000232 80 4 41)      (40000233 80 5 41)
        (40000234 80 6 41)      (40000235 80 7 41)      (40000236 80 8 41)
        (40000237 80 10 41)     (40000238 80 12 41)     (40000239 80 14 41)
        (40000240 100 4 47)     (40000241 100 6 47)     (40000242 100 8 47)
        (40000243 100 9 47)     (40000244 100 10 47)    (40000245 100 16 47)
        (40000246 100 18 47)    (40000247 100 20 47)    (40000248 125 5 47)
        (40000249 125 6 47)     (40000250 125 8 47)     (40000251 125 10 47)
        (40000252 125 14 47)    (40000253 125 18 47)    (40000254 125 25 47)
        (40000255 160 5 55)     (40000256 160 6 55)     (40000257 160 10 55)
        (40000258 160 12 55)    (40000259 160 14 55)    (40000260 160 15 55)
        (40000261 200 12 55))
;-----------------------------------------------------------------
(5022 fraise3t-extensible (diametre longueur-taillee-min longueur-taillee-max
                           diametre-partie-degageable)
        (40000280 100 16 18.2 47)       (40000281 100 20 23 47))
;-----------------------------------------------------------------
(5025 fraise2t-chanfreinee (chanfrein diametre longueur-taillee)
        (40000296 1 10 22)      (40000297 1 16 32)      (40000298 1 25 45)
        (40000299 1 32 53)      (40000300 2 16 32)      (40000301 2 25 45)
        (40000302 2 32 53)      (40000303 2 50 75)      (40000304 3 16 32)
        (40000305 3 25 45)      (40000306 3 50 75)      (40000307 4 20 38)
        (40000308 4 32 53)      (40000309 4 50 75)      (40000310 5 32 53)
        (40000311 5 50 75))
;-----------------------------------------------------------------
(5026 fraise2t-rayonnee (rayon diametre longueur-taillee)
        (40000312 1 8 19)       (40000313 1 12 26)      (40000314 1 20 38)
        (40000315 1 32 53)      (40000316 1.5 10 22)    (40000317 1.5 16 32)
        (40000318 1.5 25 45)    (40000319 2 16 32)      (40000320 2 20 38)
        (40000321 2 32 53)      (40000322 2.5 16 32)    (40000323 2.5 25 45)
        (40000324 2.5 32 53)    (40000325 3 16 32)      (40000326 3 25 45)
        (40000327 3 32 53)      (40000328 4 20 38)      (40000329 4 32 53)
        (40000330 4 50 75)      (40000331 5 32 53)      (40000332 5 50 75))
;-----------------------------------------------------------------
(5050 foret-a-pointer (diametre)
        (40000468 8)    (40000469 10)   (40000470 10)   (40000471 12))
;-----------------------------------------------------------------
(5053 foret-helicoidal (diametre longueur-taillee)
        (40000481 7.5 34)       (40000482 8 37)         (40000483 9.5 40)       (40000484 10 43)
        (40000485 10.5 43)      (40000486 11 47)        (40000487 11.5 47)      (40000488 12 51)
        (40000489 12.5 51)      (40000490 13 51)        (40000491 13.5 54)      (40000492 14 54)
        (40000493 14.5 56)      (40000494 15 56)        (40000495 15.5 58)      (40000496 16 58)
        (40000497 16.5 60)      (40000498 17 60)        (40000499 17.5 62)      (40000500 18 62)
        (40000501 18.5 64)      (40000502 19 64)        (40000503 19.5 66)      (40000504 20 66)
        (40000505 20.5 68)      (40000506 21.5 70)      (40000507 22 70)        (40000508 22.5 72))
;-----------------------------------------------------------------
(5054 foret-helicoidal (diametre longueur-taillee)
        (40000509 0.5 6)        (40000510 0.6 7)        (40000511 0.7 9)        (40000512 0.8 10)
        (40000513 0.9 11)       (40000514 1 12)         (40000515 1.05 12)      (40000516 1.1 14)
        (40000517 1.2 16)       (40000518 1.3 16)       (40000519 1.4 18)       (40000520 1.5 18)
        (40000521 1.6 20)       (40000522 1.65 20)      (40000523 1.7 20)       (40000524 1.8 22)
        (40000525 1.9 22)       (40000526 2 24)         (40000527 2.05 24)      (40000528 2.1 24)
        (40000529 2.2 27)       (40000530 2.3 27)       (40000531 2.4 30)       (40000532 2.5 30)
        (40000533 2.55 30)      (40000534 2.6 30)       (40000535 2.65 30)      (40000536 2.7 33)
        (40000537 2.8 33)       (40000538 2.9 33)       (40000539 3 33)         (40000540 3.05 36)
        (40000541 3.1 36)       (40000542 3.2 36)       (40000543 3.3 36)       (40000544 3.4 39)
        (40000545 3.5 39)       (40000546 3.6 39)       (40000547 3.7 39)       (40000548 3.8 43)
        (40000549 3.9 43)       (40000550 4 43)         (40000551 4.05 43)      (40000552 4.1 43)
        (40000553 4.2 43)       (40000554 4.3 47)       (40000555 4.4 47)       (40000556 4.5 47)
        (40000557 4.6 47)       (40000558 4.7 47)       (40000559 4.8 52)       (40000560 4.9 52)
        (40000561 5 52)         (40000562 5.1 52)       (40000563 5.2 52)       (40000564 5.3 52)
        (40000565 5.4 57)       (40000959 5.5 57)       (40000566 5.6 57)       (40000567 5.7 57)
        (40000568 5.8 57)       (40000569 5.9 57)       (40000570 6 57)         (40000571 6.1 63)
        (40000572 6.2 63)       (40000573 6.3 63)       (40000574 6.4 63)       (40000575 6.5 63)
        (40000576 6.6 63)       (40000577 6.7 63)       (40000578 6.8 69)       (40000579 6.9 69)
```

```
(40000580 7 69)      (40000581 7.1 69)    (40000582 7.2 69)    (40000583 7.3 69)
(40000584 7.4 69)    (40000585 7.5 69)    (40000586 7.6 75)    (40000587 7.7 75)
(40000588 7.8 75)    (40000589 7.9 75)    (40000590 8 75)      (40000591 8.1 75)
(40000592 8.2 75)    (40000593 8.3 75)    (40000594 8.4 75)    (40000595 8.5 75)
(40000596 8.6 81)    (40000597 8.7 81)    (40000598 8.8 81)    (40000599 8.9 81)
(40000600 9 81)      (40000601 9.1 81)    (40000602 9.2 81)    (40000603 9.3 81)
(40000604 9.4 81)    (40000605 9.5 81)    (40000606 9.6 87)    (40000607 9.7 87)
(40000608 9.8 87)    (40000609 9.9 87)    (40000610 10 87)     (40000611 10.1 87)
(40000612 10.2 87)   (40000613 10.3 87)   (40000614 10.4 87)   (40000615 10.5 87)
(40000616 10.6 87)   (40000617 10.7 94)   (40000618 10.8 94)   (40000619 10.9 94)
(40000620 11 94)     (40000621 11.2 94)   (40000622 11.5 94)   (40000623 11.6 94)
(40000624 11.7 94)   (40000625 11.8 94)   (40000626 12 101)    (40000627 12.1 101)
(40000628 12.2 101)  (40000629 12.5 101)  (40000630 12.8 101)  (40000631 13 101)
(40000632 13.5 108)  (40000633 13.7 108)  (40000634 14 108)    (40000635 14.5 114)
(40000636 15 114)    (40000637 15.5 120)  (40000638 15.8 120)  (40000639 16 120)
(40000640 16.5 125)  (40000641 17 125)    (40000642 17.5 130)  (40000643 18 130)
(40000644 19 135)    (40000645 20 140))
;-----------------------------------------------------------------------
(5055 foret-helicoidal (diametre longueur-taillee)
(40000646 1.15 37)   (40000647 1.3 41)    (40000648 1.5 45)    (40000649 1.6 50)
(40000650 1.7 50)    (40000651 1.8 53)    (40000652 1.9 56)    (40000653 2 56)
(40000654 2.3 59)    (40000655 2.4 62)    (40000656 2.5 62)    (40000657 2.55 62)
(40000658 2.8 66)    (40000659 2.9 66)    (40000660 3 66)      (40000661 3.05 69)
(40000662 3.1 69)    (40000663 3.2 69)    (40000664 3.3 69)    (40000665 3.4 73)
(40000666 3.5 73)    (40000667 3.8 78)    (40000668 4 78)      (40000669 4.1 78)
(40000670 4.2 82)    (40000671 4.5 82)    (40000672 4.6 82)    (40000673 4.8 87)
(40000674 5 87)      (40000675 5.1 87)    (40000676 5.2 87)    (40000677 5.3 87)
(40000678 5.5 91)    (40000679 5.6 91)    (40000680 5.8 91)    (40000681 5.9 91)
(40000682 6 91)      (40000683 6.5 97)    (40000684 6.8 102)   (40000685 7 102)
(40000686 7.5 102)   (40000687 8 103)     (40000688 8.5 103)   (40000689 9 115)
(40000690 9.5 115)   (40000691 10 121)    (40000692 10.5 121)  (40000693 11 128)
(40000694 11.5 128)  (40000695 12 134)    (40000696 12.5 134)  (40000697 13 134)
(40000698 14 140)    (40000699 15 144)    (40000700 16 149)    (40000701 17 154))
;-----------------------------------------------------------------------
(5056 foret-helicoidal (diametre longueur-taillee)
(40000702 14.5 114)  (40000703 15 114)    (40000704 15.5 120)  (40000705 16 120)
(40000706 16.5 125)  (40000707 17 125)    (40000708 17.5 130)  (40000709 18 130)
(40000710 18.5 135)  (40000711 19 135)    (40000712 19.5 140)  (40000713 20 140)
(40000714 20.5 145)  (40000715 21 145)    (40000716 21.5 150)  (40000717 22 150)
(40000718 22.5 155)  (40000719 23 155)    (40000720 23.5 155)  (40000721 24 160)
(40000722 24.5 160)  (40000723 25 160)    (40000724 25.5 165)  (40000725 26 165)
(40000726 26.5 165)  (40000727 27 170)    (40000728 27.5 170)  (40000729 28 170)
(40000730 29 175)    (40000731 30 175)    (40000732 31 180)    (40000733 32 185)
(40000734 33 185)    (40000735 34 190)    (40000736 35 190)    (40000737 36 195)
(40000738 37 195)    (40000739 38 200)    (40000740 40 200)    (40000741 42 205)
(40000742 45 210)    (40000743 50 220)    (40000744 55 230)    (40000745 60 235))
;-----------------------------------------------------------------------
(5059 foret-helicoidal-carbure (diametre longueur-taillee)
(40000369 2 24)      (40000370 3 33)      (40000371 4 43)      (40000372 5 52)
(40000373 6 57)      (40000374 7 69)      (40000375 8 75)      (40000376 10 87)
(40000377 12 101))
;-----------------------------------------------------------------------
(5070 alesoir-4-levres (diametre longueur-taillee)
(40000768 3 50)      (40000769 3.5 60)    (40000770 4 60)      (40000771 4.5 75)
(40000772 5 75)      (40000773 5.5 80)    (40000774 6 80)      (40000775 6.5 80)
(40000776 7 80)      (40000946 7.5 90)    (40000777 8 90)      (40000778 8.5 90)
(40000779 9 90)      (40000780 9.5 100)   (40000781 10 100)    (40000782 10.5 100)
(40000783 11 100)    (40000784 11.5 100)  (40000785 12 100))
;-----------------------------------------------------------------------
(5071 alesoir-carbure (diametre longueur-taillee)
(40000786 3 14)      (40000787 3.5 16)    (40000788 4 16)      (40000789 4.5 18)
(40000790 5 18)      (40000791 5.5 21)    (40000792 6 21)      (40000793 6.5 21)
(40000794 7 25)      (40000947 7.5 25)    (40000795 8 25)      (40000796 8.5 25)
(40000797 9 29)      (40000798 9.5 29)    (40000799 10 29)     (40000800 10.5 29)
(40000801 11 33)     (40000802 11.5 33)   (40000803 12 33))
;-----------------------------------------------------------------------
(5072 alesoir-4-levres (diametre longueur-taillee)
```

```
        (40000804 12 100)   (40000805 12.5 100)  (40000806 13 100)   (40000807 13.5 100)
        (40000808 14 100)   (40000809 14.5 100)  (40000810 15 100)   (40000811 15.5 105)
        (40000812 16 105)   (40000813 16.5 105)  (40000814 17 105)   (40000815 18 120)
        (40000816 18.5 120) (40000817 19 120)    (40000818 19.5 130) (40000819 20 130)
        (40000820 21 130)   (40000821 22 130)    (40000822 23 130)   (40000823 24 150)
        (40000824 25 150)   (40000825 26 150)    (40000826 27 150)   (40000827 28 150)
        (40000828 29 150)   (40000829 30 150))
;-----------------------------------------------------------------------
(5073 alesoir-heli-armor (diametre longueur-taillee)
        (40000830 3 24)     (40000831 4 24)      (40000832 5 24)     (40000833 6 24)
        (40000834 7 27)     (40000835 8 27)      (40000836 9 27)     (40000837 10 30)
        (40000838 11 30)    (40000839 12 30)     (40000840 13 33)    (40000841 14 33)
        (40000842 15 37)    (40000843 16 37)     (40000844 17 37)    (40000845 18 37)
        (40000846 19 37)    (40000847 20 42)     (40000848 21 42)    (40000849 22 42))
;-----------------------------------------------------------------------
(6000 alesoir-2-grains (diametre-min diametre-max longueur-taillee)
        (41000197 23 31 40)     (41000199 30 40 45)     (41000220 39 51 65)
        (41000222 50 65 72))
;-----------------------------------------------------------------------
(6001 alesoir-1-grain (diametre-min diametre-max longueur-taillee)
        (41000201 23 31 40)     (41000203 30 40 45)     (41000205 39 51 65)
        (41000224 50 65 72))
;-----------------------------------------------------------------------
(6002 alesoir-1-grain (diametre-min diametre-max longueur-taillee)
        (41000226 2 24 62.5))
;-----------------------------------------------------------------------
(7000 foret-plaquette-carbure (diametre longueur-taillee)
        (42000001 10 20)    (42000002 11 20)     (42000003 12 20)    (42000004 13 20)
        (42000005 14 25)    (42000006 15 25)     (42000007 16 25)    (42000008 17 25)
        (42000009 18 25)    (42000011 19 30)     (42000012 20 30)    (42000013 21 30)
        (42000014 22 30)    (42000015 23 40)     (42000016 24 40)    (42000017 25 40))
;-----------------------------------------------------------------------
(7001 foret-plaquette-carbure (diametre longueur-taillee)
        (42000018 10 45)    (42000019 11 45)     (42000020 12 45)    (42000021 13 45)
        (42000022 14 55)    (42000023 15 55)     (42000024 16 55)    (42000025 17 65)
        (42000026 18 65)    (42000027 19 70)     (42000028 20 70)    (42000029 21 70)
        (42000030 22 70)    (42000031 22 70)     (42000032 23 80)    (42000033 24 80)
        (42000034 25 80))
;-----------------------------------------------------------------------
(5091 taraud-trou-debouchant (diametre pas)
        (40000903 3 0.5)    (40000904 3.5 0.6)   (40000905 4 0.7)    (40000906 4.5 0.75)
        (40000907 5 0.8)    (40000908 6 1)       (40000909 7 1)      (40000910 8 1.25)
        (40000911 9 1.25)   (40000912 10 1.5)    (40000913 11 1.5)   (40000914 12 1.75)
        (40000915 14 2)     (40000916 16 2)      (40000917 18 2.5)   (40000918 20 2.5))
;-----------------------------------------------------------------------
(5092 taraud-trou-borgne (diametre pas)
        (40000919 3 0.5)    (40000920 3.5 0.6)   (40000921 4 0.7)    (40000922 4.5 0.75)
        (40000923 5 0.8)    (40000924 6 1)       (40000925 7 1)      (40000926 8 1.25)
        (40000927 9 1.25)   (40000928 10 1.5)    (40000929 11 1.5)   (40000930 12 1.75)
        (40000931 14 2)     (40000932 16 2)      (40000933 18 2.5)   (40000934 20 2.5))
```

2 Deux descriptions d'ateliers

Voici deux exemples d'atelier : le premier est constitué d'un seul Centre d'Usinage, sur lequel tous les outils du standard peuvent se monter ; le second est un atelier traditionnel, composé uniquement de machines à un seul axe.

La description d'un atelier doit comporter des informations de deux types :

- La donnée du standard outil utilisé :

(outils nom-du-standard)

- Les descriptions de chaque machine, selon le format suivant :

  (machine nom-de-la-machine
  (type type-machine)
  (magasin-outil no-famille1 no-famille2 ...))

  Le magasin d'outil est spécifié via les numéros des familles d'outils ; on suppose donc que tous les outils d'une même famille peuvent se monter sur une même machine.

2.1 Atelier avec Centre d'Usinage

```
;; donnee du standard des outils
(outils standard_mat)

;; description du centre d'usinage
(machine cu1
        (type cu-1-axe)
        (magasin-outil f5001 f5002 f5003 f5004 f5005 f5006 f5007
                       f5008 f5009 f5010 f5011 f5015 f5016
                       f5019 f5022 f5025
                       f5026 f5050 f5053 f5054
                       f5055 f5056 f5059 f5070 f5071
                       f5072 f5073 f6000 f6001 f6002
                       f7000 f7001 f5091 f5092
                       fns20 fns50))
```

2.2 Atelier traditionnel

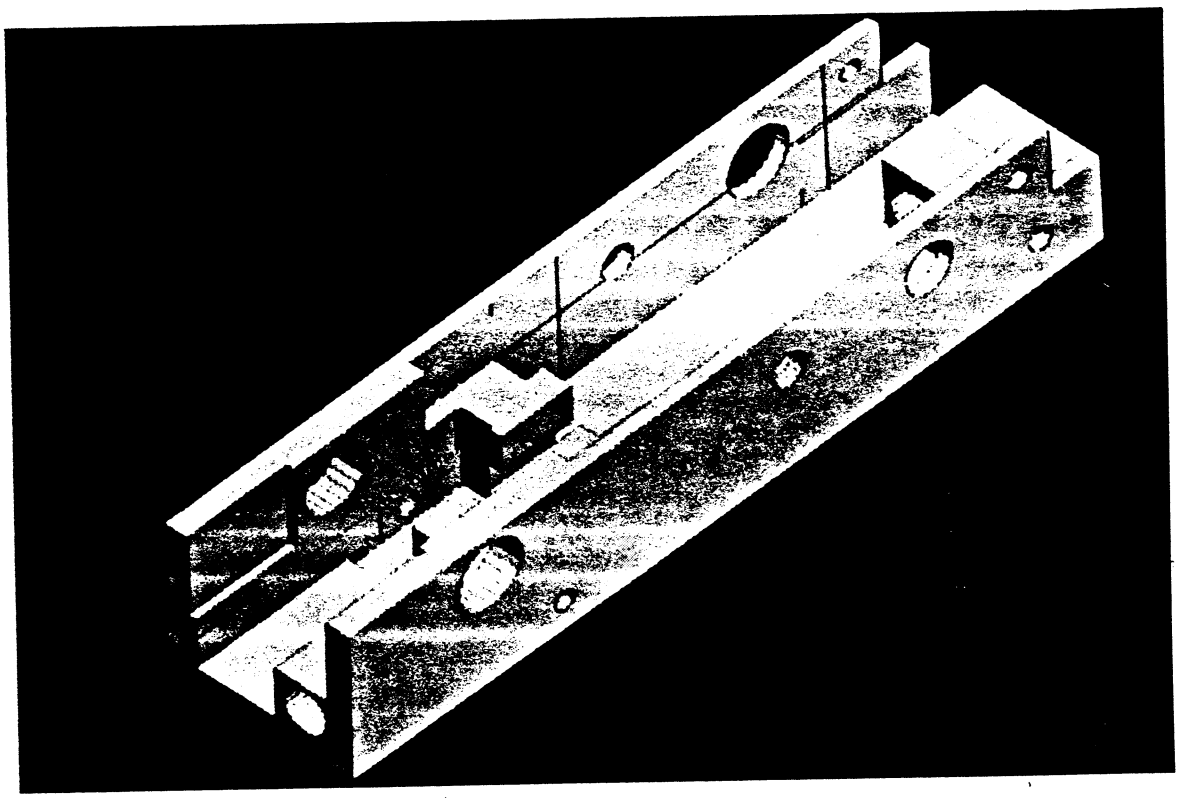
```
;; donnee du standard des outils
(outils standard_mat)

;; description des machines
(machine fraiseuse-vert
        (type fraiseuse-verticale)
        (magasin-outil f5001 f5002 f5003 f5004 f5005 f5006 f5007
                       f5008 f5009 f5010 f5011 f5015 f5016 f5025
                       f5026))

(machine perceuse-vert
        (type perceuse-verticale)
        (magasin-outil f5050 f5053 f5054
                       f5055 f5056 f5059 f5070 f5071
```

```
                    f5072 f5073 f6000 f6001 f6002
                    f7000 f7001 f5091 f5092))

(machine fraiseuse-hor
        (type fraiseuse-horizontale)
        (magasin-outil f5001 f5002 f5003 f5004 f5005 f5006 f5007
                    f5008 f5009 f5010 f5011 f5015 f5016 f5025
                    f5026))

(machine perceuse-hor
        (type perceuse-horizontale)
        (magasin-outil f5050 f5053 f5054
                    f5055 f5056 f5059 f5070 f5071
                    f5072 f5073 f6000 f6001 f6002
                    f7000 f7001 f5091 f5092))
```

D

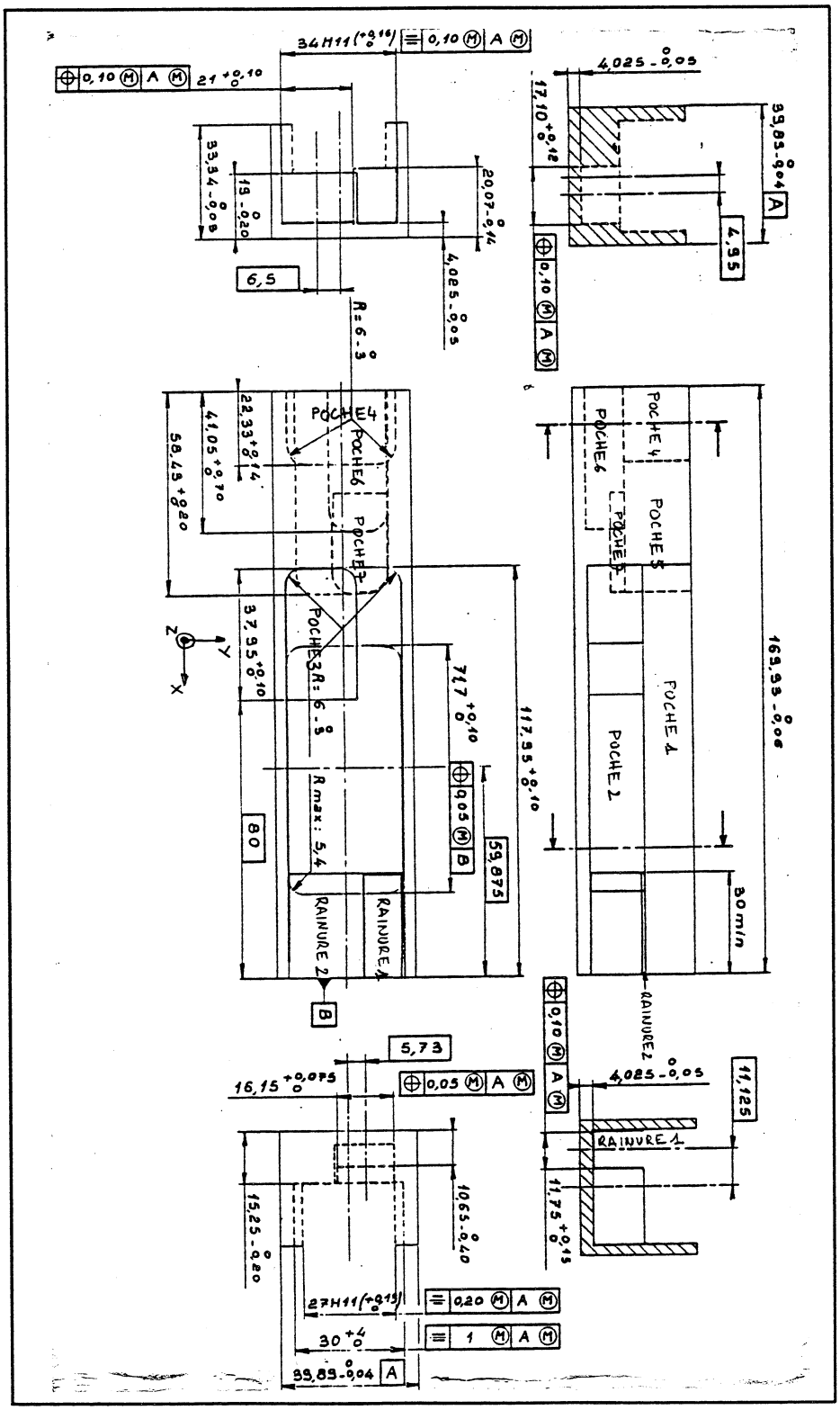
Annexe D

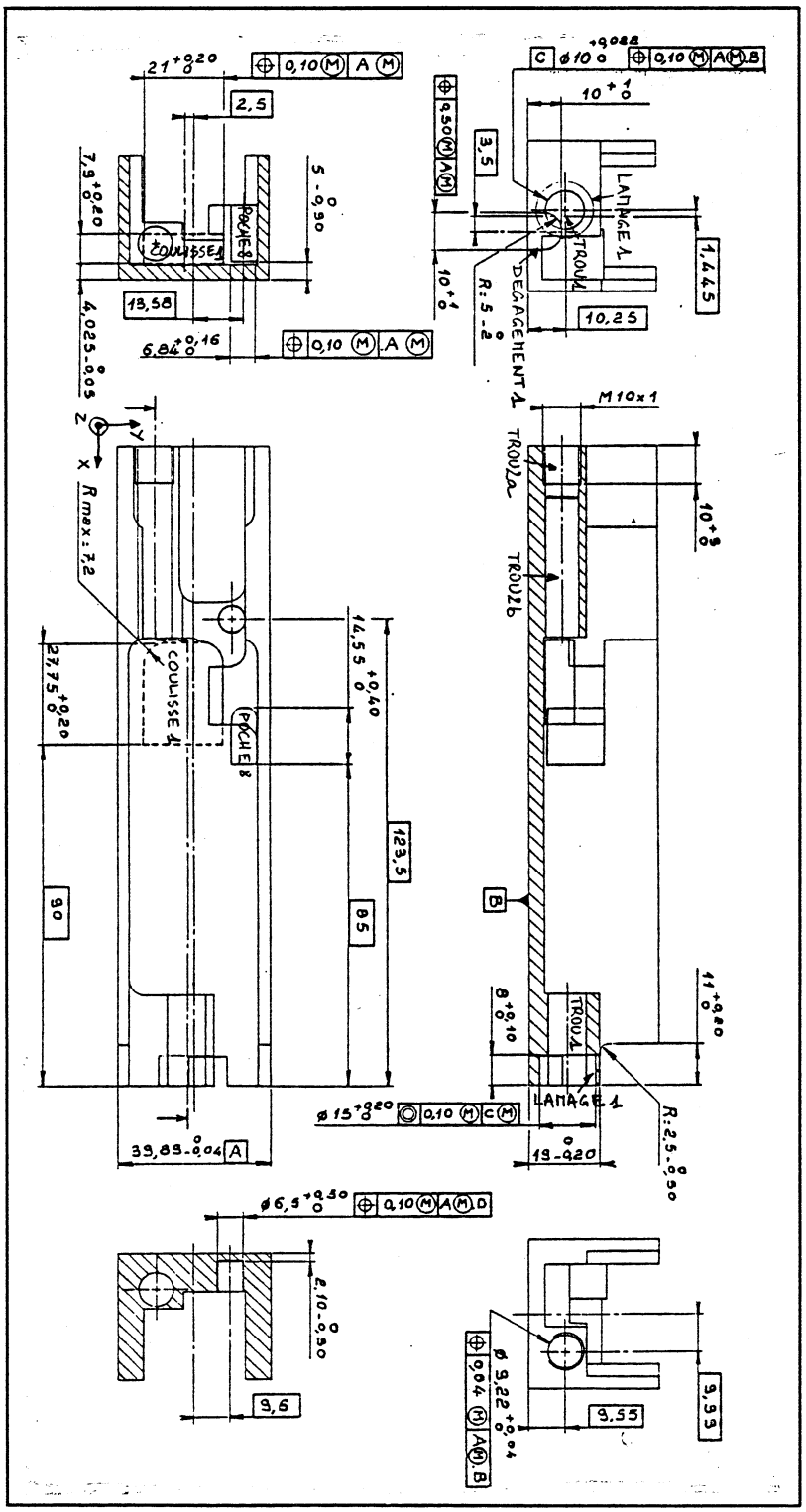
Le Boîtier

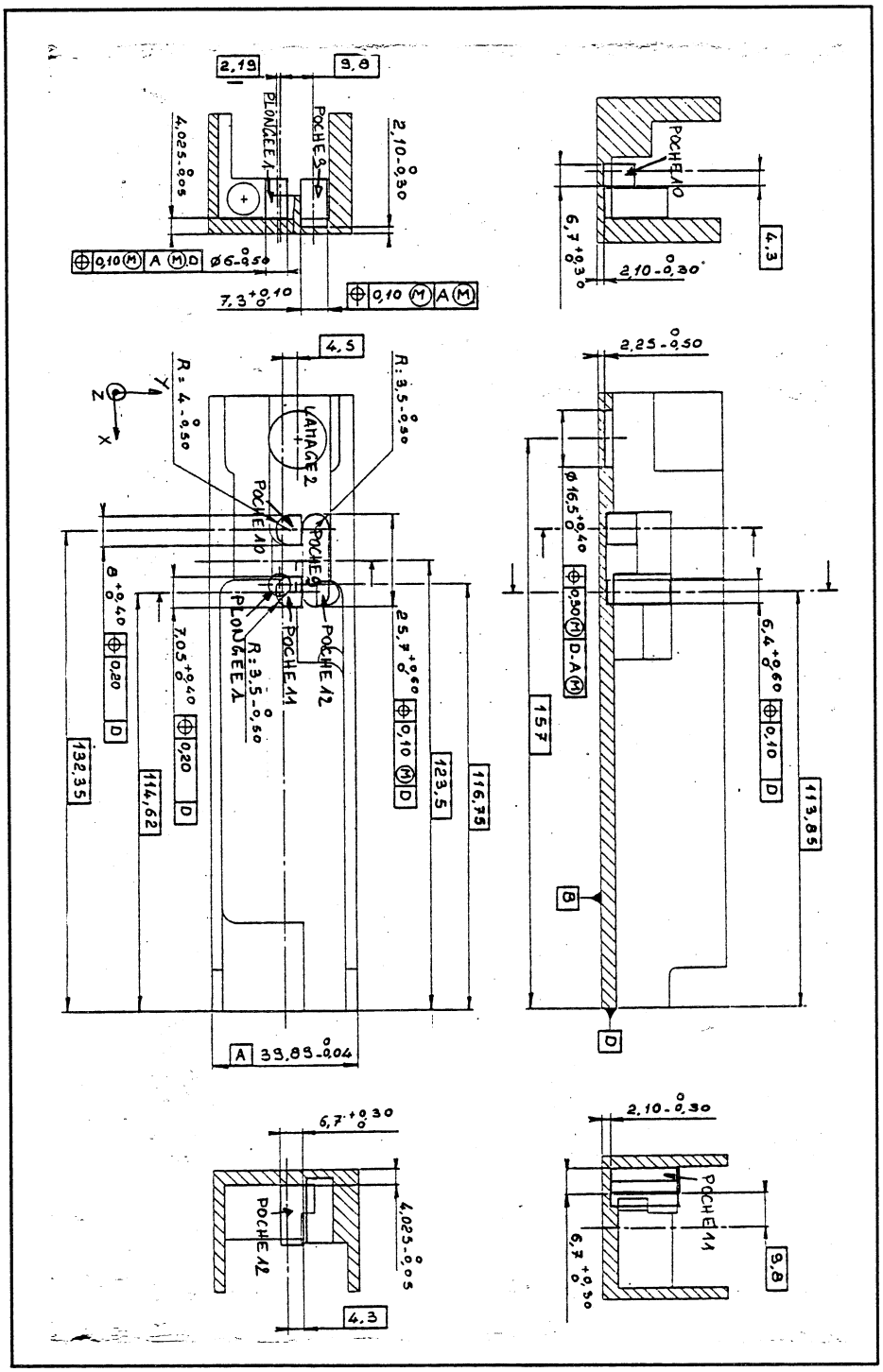


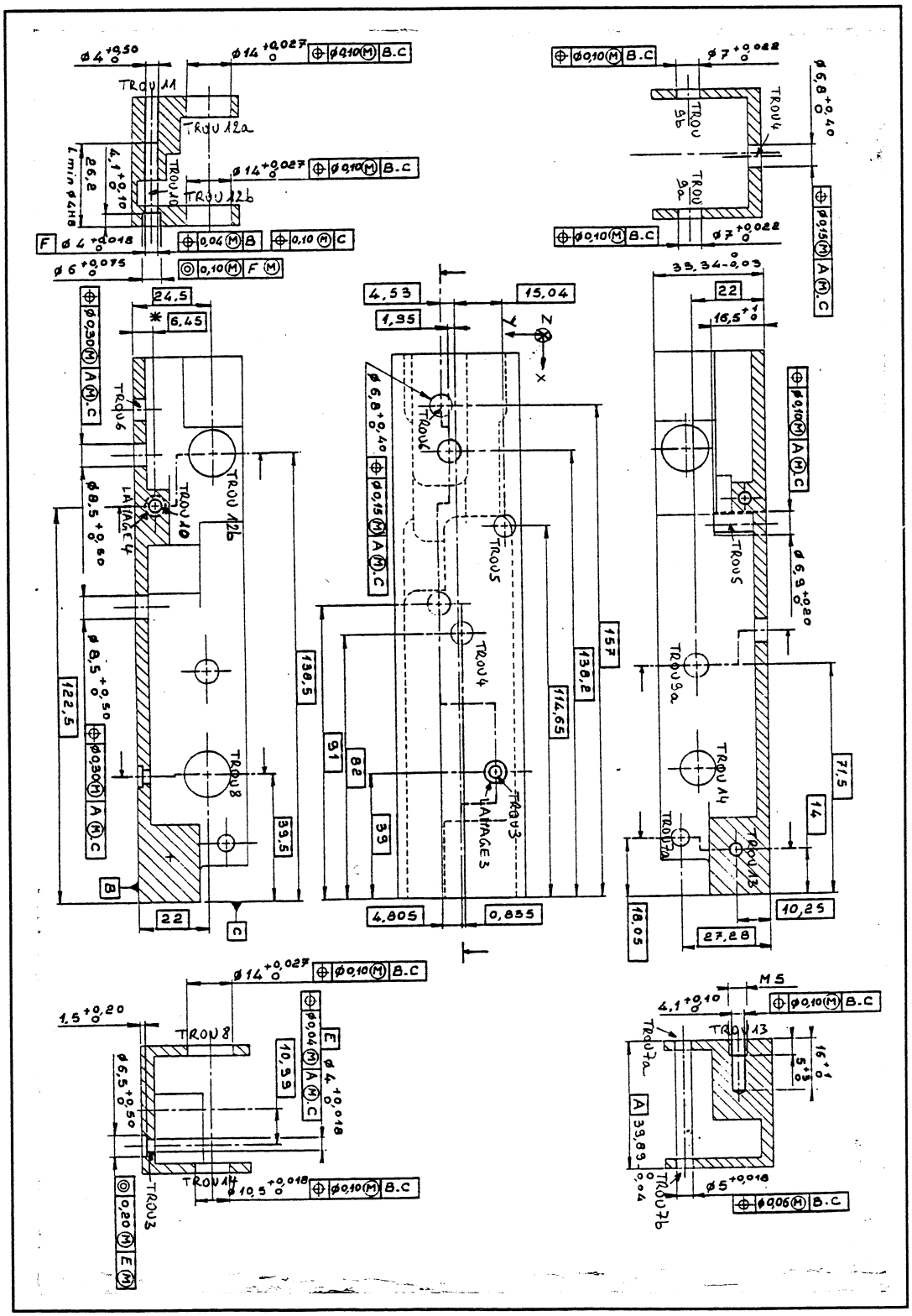
Le Boîtier
(image issue de DIMAT)

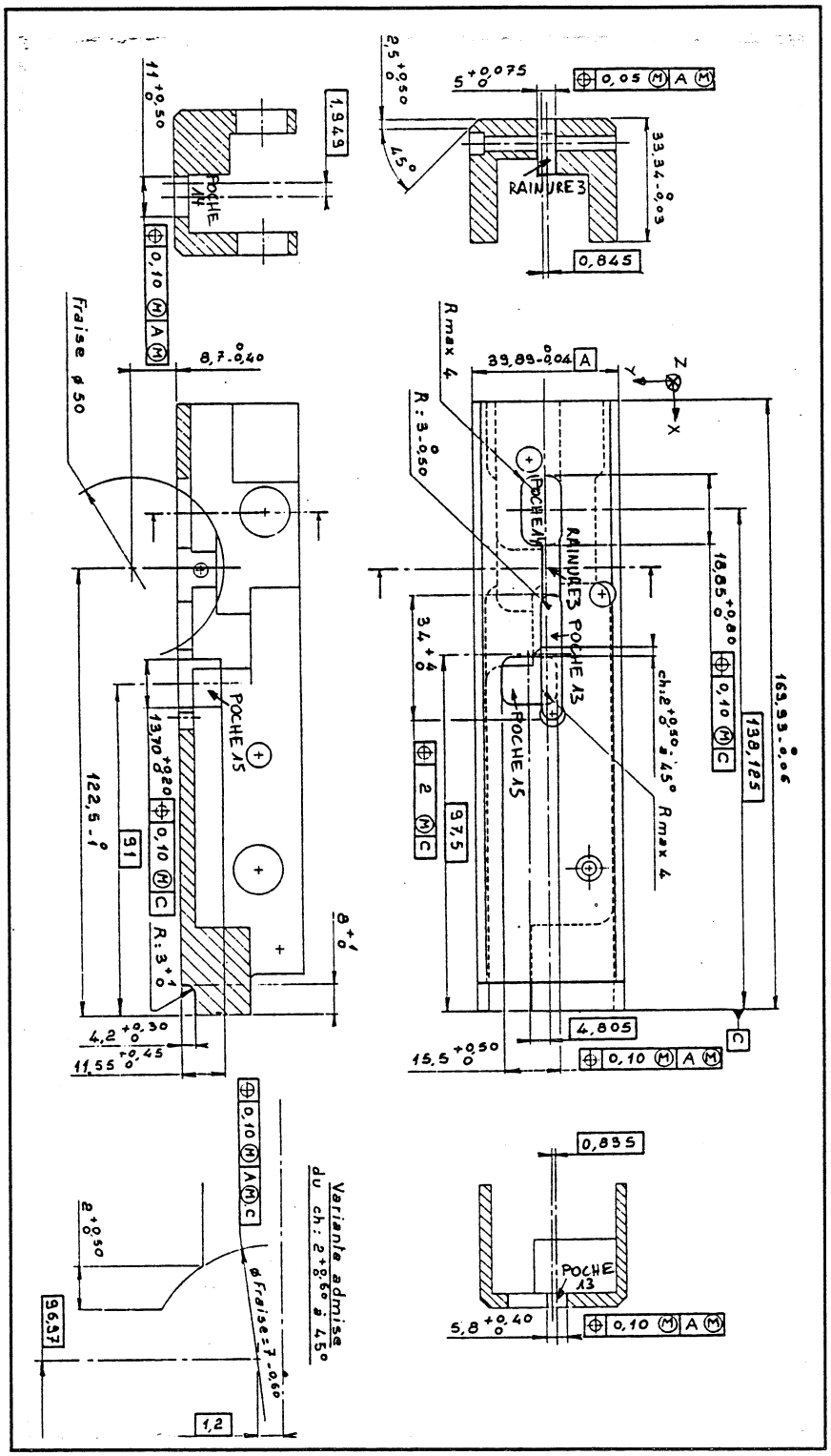
1 Les plans du Boîtier




21 +0,20 0
0,10 M A M
2,5
7,9 +0,20 0
COULISSE 1
POCHE 8
5 -0,90 0
13,58
4,025 -0,05 0
6,84 +0,16 0
0,10 M A M
0,50 M A M
3,5
10 +1 0
R: 5 -2 0
DEGAGEMENT 1
C ø10 +0,022 0
0,10 M A M B
10 +1 0
LAMAGE 1
TROU 1
1,445
10,25
M10x1
TROU 2a
TROU 2b
10 +0,5 0
B
8 +0,10 0
TROU 1
11 +0,20 0
LAMAGE 1
R: 2,5 -0,50 0
19 -0,20 0
ø15 +0,20 0
0,10 M C M
R max: 7,2
COULISSE 1
POCHE 8
27,75 +0,20 0
14,55 +0,40 0
123,5
90
85
39,85 -0,04 0
A
ø6,5 +0,50 0
0,10 M A M D
2,10 -0,50 0
9,6
ø 9,22 +0,04 0
0,04 M A M B
9,55
9,33


2,19
9,8
PLONGEE 1
POCHE 3
4,025-0,05
2,10-0,30
0,10 M A M D
Ø6-0,50
7,3+0,10
0,10 M A M
POCHE 10
6,7+0,30
4,3
4,5
R: 3,5-0,50
R = 4-0,50
Y
Z
X
LAMAGE 2
POCHE 10
POCHE 9
POCHE 12
POCHE 11
PLONGEE 1
R: 3,5-0,50
8+0,40
0,20
D
7,05+0,40
0,20
D
25,7+0,60
0,10 M D
132,35
114,62
123,5
116,75
A 33,89-0,04
2,25-0,50
Ø16,5+0,40
0,50 M D A M
157
6,4+0,60
0,10
D
113,85
B
D
6,7+0,30
4,025-0,05
POCHE 12
4,3
2,10-0,30
POCHE 11
6,7+0,30
9,8


TROU 11
TROU 12a
TROU 12b
TROU 10
TROU 6
TROU 8
TROU 4
TROU 5
TROU 3
TROU 9a
TROU 9b
TROU 14
TROU 13
TROU 7a
TROU 7b
LAMAGE 4
LAMAGE 3
B.C
A.C
E.C
F.C
157
138,8
114,65
138,5
122,5
71,5
39,5
51
82
39
24,5
22
14
10,25
27,28
18,05
4,805
0,855
15,04
4,53
1,95
6,45
16,5
39,34-0,03
M5


RAINURE 3
POCHE A4
POCHE A5
POCHE A3
RAINURES 3 POCHE A3
Fraise ø 50
Variante admise du ch : 2 +0,60 à 45°
ø Fraise = 7 -0,60
R max 4
R : 3 -0,50
ch : 2 +0,50 à 45°
0,05 M A M
0,10 M A M
0,10 M C
0,845
0,835
1,9 49
9,1
9,7,5
4,805
1,2
36,37
138,125
163,95 -0,06
39,89 -0,04
33,34 -0,03
122,5 -1
11,55 +0,45 0
15,5 +0,50 0
5,8 +0,40 0
4,2 +0,30 0
13,70 +0,20 0
18,85 +0,80 0
34 +4 0
5 +0,075 0
2,5 +0,50 0
11 +0,50 0
8,7 -0,40
45°

2 Description du Boîtier

Cette pièce est la plus compliquée pour laquelle GAGMAT a généré une gamme. C'est elle qui a servi de banc d'essai au système ; sa description a d'ailleurs été de nombreuses fois modifiée dans le but de tester GAGMAT sur des configurations différentes (la deuxième Gamme d'Usinage de la section 4, concerne par exemple un nombre restreint de Volumes d'Usinages).

Nous donnons ci-dessous la description complète du boîtier (seuls quelques VU, qui font l'objet d'usinages très spécifiques, n'ont pas été étudiés). Il y a 45 VU, dont 44 sont à usiner ; il n'y a pas création de super-VU lors du traitement préliminaire par GAGMAT de cette description.

```
(piece boitier-de-detente
   (matiere acier)
   (durete-initiale 80)
   (durete-finale 120)
   (Ra 3.2)
   (qualite 10)
   (LX 170)
   (LY 40)
   (LZ 34)
   (type-piece parallelepipedique))                                    10
;.....................................................................
;                          BOITE
;.....................................................................
(VU boite
   (type boite)
   (a-usiner non)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (longueur 169.93 -0.06)
   (largeur 39.89 -0.04)
   (hauteur 33.34 -0.03))                                              20
;.....................................................................
;                          POCHE1
;.....................................................................
(VU poche1
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (Ra 6.3)
   (longueur 117.95 +0.06)
   (largeur 34 H11)                                                    30
   (hauteur 13.3)
   (R-contourne 6 -3))
(distance-face-face-int (poche1 z-) (boite z-) 20.07 -0.14)
(symetrie (poche1 y) (boite y) 0.1)
(faces-collees-int (poche1 x+) (boite x+))
(faces-collees-int (poche1 z+) (boite z+))
;.....................................................................
;                          RAINURE1
;.....................................................................
(VU rainure1                                                           40
   (type rainure)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (Ra 6.3)
   (debouche-dans poche2)
   (longueur 30)
   (largeur 34 H11)
```

```
   (hauteur 1.07))
(symetrie (rainure1 y) (boite y) 0.1)
(faces-collees-int (rainure1 x+) (boite x+))
(faces-collees-ext (rainure1 z+) (poche1 z-))
(distance-face-face-int (rainure1 z-) (boite z-) 19 -0.20)
;.....................................................
;                    RAINURE2
;.....................................................
(VU rainure2
   (type rainure)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (Ra 6.3)
   (longueur 30)
   (largeur 11.75 +0.15)
   (hauteur 15))
(distance-plan-plan (rainure2 y) (boite y) 11.125 0.1)
(faces-collees-int (rainure2 x+) (boite x+))
(faces-collees-ext (rainure2 z+) (rainure1 z-))
(distance-face-face-int (rainure2 z-) (boite z-) 4.025 -0.05)
;.....................................................
;                    POCHE2
;.....................................................
(VU poche2
   (type poche)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (Ra 6.3)
   (longueur 71.7 0.1)
   (largeur 34 H11)
   (hauteur 16)
   (R-contourne 5.4))
(symetrie (poche2 y) (boite y) 0.1)
(distance-plan-face-int (poche2 x) (boite x+) 59.875 0.05)
(distance-face-face-int (poche2 z-) (boite z-) 4.025 -0.05)
(faces-collees-ext (poche2 z +) (rainure1 z -))
;.....................................................
;                    POCHE3
;.....................................................
(VU poche3
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (Ra 6.3)
   (support poche1)
   (debouche-dans poche2)
   (longueur 37.95 0.1)
   (largeur 21 0.1)
   (hauteur 16)
   (R-contourne 6 -3))
(distance-plan-plan (poche3 y) (boite y) -6.5 0.1)
(distance-face-face-int (poche3 x+) (boite x+) 80 0)
(distance-face-face-int (poche3 z-) (boite z-) 4.025 -0.05)
(faces-collees-ext (poche3 z+) (rainure1 z-))
;.....................................................
;                    POCHE4
;.....................................................
(VU poche4
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X- Y- Z+))
   (Ra 6.3)
   (longueur 22.33 0.14)
   (largeur 30 +4)
   (hauteur 18)
   (R-contourne 6 -3))
(symetrie (poche4 y) (boite y) 1)
(faces-collees-int (poche4 x+) (boite x-))
(faces-collees-int (poche4 z+) (boite z+))
```

```
(distance-face-face-int (poche4 z-) (boite z-) 15.25 -0.2)
;.....................................................
;                    POCHE5
;.....................................................
(VU poche5
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X- Y- Z+))
   (Ra 6.3)
   (debouche-dans poche4)
   (longueur 36.43 0.2)
   (largeur 27 H11)
   (hauteur 18)
   (R-contourne 5))
(symetrie (poche5 y) (boite y) 0.2)
(distance-face-face-int (poche5 x+) (boite x-) 22 0)
(distance-face-face-int (poche5 z-) (boite z-) 15.25 -0.2)
(faces-collees-int (poche5 z+) (boite z+))
;.....................................................
;                    POCHE6
;.....................................................
(VU poche6
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X- Y- Z+))
   (Ra 6.3)
   (support poche4 poche5)
   (longueur 41.05 0.7)
   (largeur 17.10 0.12)
   (hauteur 11)
   (R-contourne 5))
(distance-plan-plan (poche6 y) (boite y) 4.95 0.10)
(faces-collees-int (poche6 x+) (boite x-))
(faces-collees-ext (poche6 z+) (poche5 z-))
(distance-face-face-int (poche6 z-) (boite z-) 4.025 -0.05)
;.....................................................
;                    POCHE7
;.....................................................
(VU poche7
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X- Y- Z+))
   (Ra 6.3)
   (support poche5)
   (debouche-dans poche6)
   (longueur 29.43 0.2)
   (largeur 16.15 0.075)
   (hauteur 4.6)
   (R-contourne 5))
(distance-plan-plan (poche7 y) (boite y) 5.73 0.05)
(distance-face-face-int (poche7 x+) (boite x-) 31 0)
(distance-face-face-int (poche7 z-) (boite z-) 10.65 -0.4)
(faces-collees-ext (poche7 z+) (poche5 z-))
;.....................................................
;                    TROU1
;.....................................................
(VU trou1
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y- Z- X+))
   (debouche-dans poche2)
   (diametre 10 0.022)
   (longueur 24))
(distance-plan-plan (trou1 x) (boite y) -1.445 0.1)
(distance-plan-face-int (trou1 y) (boite z-) 10.25 0.1)
(faces-collees-int (trou1 z+) (boite x+))
(faces-collees-ext (trou1 z-) (poche2 x+))
;.....................................................
;                    LAMAGE1
```

```
;.....................................................................
(VU lamage1
   (type lamage)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y- Z- X+))                                              190
   (alesage-support trou1)
   (diametre 15 0.2)
   (longueur 8 0.1))
(coaxialite (lamage1 z) (trou1 z) 0.1)
(faces-collees-int (lamage1 z+) (boite x+))
;.....................................................................
;                          TROU2a
;.....................................................................
(VU trou2a
   (type trou-taraude-non-debouchant)                                200
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ Z- X-))
   (longueur 10 3)
   (diametre M10)
   (pas 1))
(distance-plan-plan (trou2a x) (boite y) -9.99 0.1)
(distance-plan-face-int (trou2a y) (boite z-) 9.55 0.1)
(faces-collees-int (trou2a z+) (boite x-))
;.....................................................................
;                          TROU2b                                     210
;.....................................................................
(VU trou2b
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ Z- X-))
   (support trou2a)
   (debouche-dans poche3)
   (diametre 9.22 0.04)
   (longueur 42))
(distance-plan-plan (trou2b x) (boite y) -9.99 0.04)                 220
(distance-plan-face-int (trou2b y) (boite z-) 9.55 0.04)
(faces-collees-int (trou2b z+) (trou2a z-))
(faces-collees-ext (trou2b z-) (poche2 x-))
;.....................................................................
;                          DEGAGEMENT1
;.....................................................................
(VU degagement1
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Z- Y+ X+))                                              230
   (Ra 6.3)
   (support trou1)
   (longueur 10 1)
   (largeur 10 1)
   (hauteur 8 0.1)
   (R-contourne 5 -2))
(distance-plan-plan (degagement1 y) (boite y) 3.5 0.5)
(faces-collees-int (degagement1 z+) (boite x+))
(faces-collees-int (degagement1 x+) (boite z-))
;.....................................................................  240
;                          POCHE8
;.....................................................................
(VU poche8
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (Ra 6.3)
   (support poche1)
   (debouche-dans poche2)
   (longueur 14.55 +0.4)                                             250
   (largeur 6.84 0.16)
   (hauteur 15)
   (R-contourne 3 -0.5))
(distance-face-face-int (poche8 z-) (boite z-) 5 -0.9)
```

```
(distance-plan-plan (poche8 y) (boite y) 13.58 0.1)
(distance-face-face-int (poche8 x+) (boite x+) 85 0)
(faces-collees-ext (poche8 z+) (rainure1 z-))
;.....................................................
;                    COULISSE1
;.....................................................
;(VU coulisse1
;   (type coulisse-debouchante)
;   (a-usiner oui)
;   (matrice (X+ Y+ Z+))
;   (Ra 6.3)
;   (support poche1 poche3)
;   (debouche-dans poche2)
;   (longueur 27.75 +0.2)
;   (largeur 21 0.2)
;   (hauteur 7.9 0.2)
;   (R-contourne 7.2))
;(distance-face-face-int (coulisse1 z-) (boite z-) 4.025 -0.05)
;(distance-plan-plan (coulisse1 y) (boite y) -2.5 0.1)
;(distance-face-face-int (coulisse1 x+) (boite x+) 90 0)
;.....................................................
;                    POCHE9
;.....................................................
(VU poche9
   (type poche)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (Ra 6.3)
   (support poche5)
   (longueur 25.7 0.6)
   (largeur 7.3 0.1)
   (hauteur 13.15)
   (R-contourne 3.5 -0.5))
(distance-plan-plan (poche9 y) (boite y) 9.8 0.1)
(distance-plan-face-int (poche9 x) (boite x+) 123.5 0.1)
(distance-face-face-int (poche9 z-) (boite z-) 2.10 -0.3)
(faces-collees-ext (poche9 z+) (poche7 z-))
;.....................................................
;                    POCHE10
;.....................................................
(VU poche10
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ X- Z+))
   (Ra 6.3)
   (support poche7)
   (debouche-dans poche9)
   (longueur 6.7 0.15)
   (largeur 8 0.4)
   (hauteur 8.5)
   (R-contourne 4 -0.3))
(distance-face-face-int (poche10 z-) (boite z-) 2.1 -0.3)
(distance-plan-face-int (poche10 y) (boite x+) 132.35 0.2)
(distance-plan-plan (poche10 x) (boite y) 0.95 0.15)
(faces-collees-ext (poche10 z+) (poche7 z-))
;.....................................................
;                    POCHE11
;.....................................................
(VU poche11
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ X- Z+))
   (Ra 6.3)
   (support poche5)
   (debouche-dans poche9)
   (longueur 6.7 0.15)
   (largeur 7.05 0.4)
   (hauteur 16)
```

```
   (R-contourne 3.5 -0.5))
(distance-face-face-int (poche11 z-) (boite z-) 4.025 -0.05)
(distance-plan-face-int (poche11 y) (boite x+) 114.62 0.2)
(distance-plan-plan (poche11 x) (boite y) 0.95 0.15)
(faces-collees-ext (poche11 z+) (poche7 z-))
;.....................................................
;                    POCHE12                                    330
;.....................................................
(VU poche12
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y- X+ Z+))
   (Ra 6.3)
   (support poche1)
   (debouche-dans poche9)
   (longueur 6.7 0.15)
   (largeur 6.4 0.6)                                            340
   (hauteur 18)
   (R-contourne 3 -0.5))
(distance-face-face-int (poche12 z-) (boite z-) 2.1 -0.3)
(distance-plan-face-int (poche12 y) (boite x+) 113.85 0.1)
(distance-plan-plan (poche12 x) (boite y) 13.15 0.15)
(faces-collees-ext (poche12 z+) (rainure1 z-))
;.....................................................
;                    LAMAGE2
;.....................................................
(VU lamage2                                                     350
   (type lamage)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (alesage-support trou6)
   (diametre 16.5 0.4)
   (longueur 2))
(distance-plan-plan (lamage2 y) (boite y) 4.5 0.3)
(distance-plan-face-int (lamage2 x) (boite x +) 157 0.3)
(distance-face-face-int (lamage2 z-) (boite z-) 2.25 -0.5)
(faces-collees-ext (lamage2 z+) (poche6 z-))                    360
;.....................................................
;                    PLONGEE1
;.....................................................
(VU plongee1
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (type-fond plat)
   (support poche1 poche5)
   (diametre 5.5 +0.5)                                          370
   (longueur 11))
(distance-plan-plan (plongee1 y) (boite y) -2.19 0.1)
(distance-plan-face-int (plongee1 x) (boite x+) 116.75 0.1)
(distance-face-face-int (plongee1 z-) (boite z-) 4.025 -0.05)
(faces-collees-ext (plongee1 z+) (rainure1 z-))
;.....................................................
;                    TROU3
;.....................................................
(VU trou3
   (type alesage-debouchant)                                    380
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y- Z-))
   (debouche-dans poche2)
   (diametre 4 0.018)
   (longueur 4))
(distance-plan-plan (trou3 y) (boite y) -10.99 0.04)
(distance-plan-face-int (trou3 x) (boite x+) 39 0.04)
(faces-collees-int (trou3 z+) (boite z-))
(faces-collees-ext (trou3 z-) (poche2 z-))
;.....................................................          390
;                    LAMAGE3
;.....................................................
(VU lamage3
```

```
   (type lamage)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y- Z-))
   (diametre 6.5 0.5)
   (longueur 1.5 0.2)
   (alesage-support trou3))
(coaxialite (lamage3 z) (trou3 z) 0.2)                                  400
(faces-collees-int (lamage3 z+) (boite z-))
;.....................................................................
;                          TROU4
;.....................................................................
(VU trou4
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y- Z-))
   (debouche-dans poche2)
   (diametre 6.8 0.4)                                                   410
   (longueur 4))
(distance-plan-plan (trou4 y) (boite y) -0.835 0.15)
(distance-plan-face-int (trou4 x) (boite x+) 82 0.15)
(faces-collees-int (trou4 z+) (boite z-))
(faces-collees-ext (trou4 z-) (poche2 z-))
;.....................................................................
;                          TROU5
;.....................................................................
(VU trou5
   (type alesage-non-debouchant)                                        420
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y- Z-))
   (diametre 6.9 0.2)
   (longueur 16.5 0.1))
(distance-plan-plan (trou5 y) (boite y) -15.04 0.1)
(distance-plan-face-int (trou5 x) (boite x+) 114.65 0.1)
(faces-collees-int (trou5 z+) (boite z-))
;.....................................................................
;                          TROU6
;.....................................................................  430
(VU trou6
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (support poche6)
   (diametre 6.8 0.4)
   (longueur 4))
(distance-plan-plan (trou6 y) (boite y) 1.95 0.15)
(distance-plan-face-int (trou6 x) (boite x+) 157 0.15)
(faces-collees-int (trou6 z+) (boite z-))                               440
(faces-collees-ext (trou6 z-) (poche6 z-))
;.....................................................................
;                          TROU7a
;.....................................................................
(VU trou7a
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z- Y+))
   (debouche-dans poche1)
   (diametre 5 0.018)                                                   450
   (longueur 3))
(distance-plan-face-int (trou7a x) (boite x+) 18.05 0.06)
(distance-plan-face-int (trou7a y) (boite z-) 27.28 0.06)
(faces-collees-int (trou7a z+) (boite y-))
(faces-collees-ext (trou7a z-) (poche1 y-))
;.....................................................................
;                          TROU7b
;.....................................................................
(VU trou7b
   (type alesage-debouchant)                                            460
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (debouche-dans poche1)
```

```
   (diametre 5 0.018)
   (longueur 3))
(distance-plan-face-int (trou7b x) (boite x+) 18.05 0.06)
(distance-plan-face-int (trou7b y) (boite z-) 27.28 0.06)
(faces-collees-int (trou7b z+) (boite y+))
(faces-collees-ext (trou7b z-) (poche1 y+))
;.....................................................................
;                          TROU8
;.....................................................................
(VU trou8
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z- Y-))
   (debouche-dans poche1 poche2)
   (diametre 14 0.027)
   (longueur 3))
(distance-plan-face-int (trou8 x) (boite x+) 39.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou8 y) (boite z-) 22 0.1)
(faces-collees-int (trou8 z+) (boite y+))
(faces-collees-ext (trou8 z-) (poche2 y+))
;.....................................................................
;                          TROU9a
;.....................................................................
(VU trou9a
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X- Z- Y-))
   (debouche-dans poche1)
   (diametre 7 0.022)
   (longueur 3))
(distance-plan-face-int (trou9a x) (boite x+) 71.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou9a y) (boite z-) 22 0.1)
(faces-collees-int (trou9a z+) (boite y-))
(faces-collees-ext (trou9a z-) (poche2 y-))
;.....................................................................
;                          TROU9b
;.....................................................................
(VU trou9b
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X- Z+ Y+))
   (debouche-dans poche1)
   (diametre 7 0.022)
   (longueur 3))
(distance-plan-face-int (trou9b x) (boite x+) 71.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou9b y) (boite z-) 22 0.1)
(faces-collees-int (trou9b z+) (boite y+))
(faces-collees-ext (trou9b z-) (poche1 y+))
;.....................................................................
;                          TROU10
;.....................................................................
(VU trou10
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z- Y+))
   (traverse poche9)
   (diametre 4 0.018)
   (longueur 27))
(distance-plan-face-int (trou10 x) (boite x+) 122.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou10 y) (boite z-) 6.45 0.04)
(faces-collees-int (trou10 z+) (boite y+))
;.....................................................................
;                          LAMAGE4
;.....................................................................
(VU lamage4
   (type lamage)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z- Y-))
   (diametre 6 0.075)
```

```
   (longueur 4.1 0.1)
   (alesage-support trou10))
(coaxialite (lamage4 z) (trou10 z) 0.1)
(faces-collees-int (lamage4 z+) (boite y+))
;.....................................................
;                    TROU11
;.....................................................
(VU trou11                                                    540
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (debouche-dans trou10)
   (diametre 4 0.5)
   (longueur 15))
(distance-plan-face-int (trou11 x) (boite x+) 122.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou11 y) (boite z-) 6.45 0.04)
(faces-collees-int (trou11 z+) (boite y-))
;.....................................................         550
;                    TROU12a
;.....................................................
(VU trou12a
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (debouche-dans poche5)
   (diametre 14 0.027)
   (longueur 6.5))
(distance-plan-face-int (trou12a x) (boite x+) 138.5 0.1)     560
(distance-plan-face-int (trou12a y) (boite z-) 24.5 0.1)
(faces-collees-int (trou12a z+) (boite y-))
(faces-collees-ext (trou12a z-) (poche5 y+))
;.....................................................
;                    TROU12b
;.....................................................
(VU trou12b
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z- Y+))                                       570
   (debouche-dans poche5)
   (diametre 14 0.027)
   (longueur 6.5))
(distance-plan-face-int (trou12b x) (boite x+) 138.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou12b y) (boite z-) 24.5 0.1)
(faces-collees-int (trou12b z+) (boite y+))
(faces-collees-ext (trou12b z-) (poche5 y-))
;.....................................................
;                    TROU13
;.....................................................         580
(VU trou13
   (type trou-taraude-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y+))
   (debouche-dans trou1)
   (longueur 16 1)
   (longueur-taraudage 5 3)
   (diametre M5)
   (pas 1))
(distance-plan-face-int (trou13 x) (boite x+) 14 0.1)         590
(distance-plan-face-int (trou13 y) (boite z-) 10.25 0.1)
(faces-collees-int (trou13 z+) (boite y-))
;.....................................................
;                    TROU14
;.....................................................
(VU trou14
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X- Z- Y-))
   (debouche-dans poche1 poche2)                              600
   (diametre 10.5 0.018)
```

```
   (longueur 3))
(distance-plan-face-int (trou14 x) (boite x+) 39.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou14 y) (boite z-) 22 0.1)
(faces-collees-int (trou14 z+) (boite y-))
(faces-collees-ext (trou14 z-) (poche2 y-))
;.....................................................
;                    POCHE13
;.....................................................
(VU poche13                                                    610
   (type poche-sans-fond)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y- Z-))
   (Ra 6.3)
   (debouche-dans poche3)
   (longueur 34 4)
   (largeur 5.8 0.4)
   (hauteur 4)
   (R-contourne 3 -0.5))
(distance-plan-face-int (poche13 x) (boite x+) 97.5 2)         620
(distance-plan-plan (poche13 y) (boite y) -0.835 0.1)
(faces-collees-int (poche13 z+) (boite z-))
(faces-collees-ext (poche13 z-) (poche3 z-))
;.....................................................
;                    POCHE14
;.....................................................
(VU poche14
   (type poche-sans-fond)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y- Z-))                                        630
   (Ra 6.3)
   (debouche-dans poche6)
   (longueur 18.85 0.8)
   (largeur 11 0.5)
   (hauteur 4)
   (R-contourne 4 -1))
(distance-plan-face-int (poche14 x) (boite x+) 138.125 0.1)
(distance-plan-plan (poche14 y) (boite y) 1.949 0.1)
(faces-collees-int (poche14 z+) (boite z-))
(faces-collees-ext (poche14 z-) (poche6 z-))                   640
;.....................................................
;                    RAINURE3
;.....................................................
(VU rainure3
   (type rainure-sans-fond)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y- Z-))
   (Ra 6.3)
   (debouche-dans poche5 poche13 poche14)
   (longueur  13.2)                                            650
   (largeur 5 0.075)
   (hauteur 10.5))
(distance-plan-plan (rainure3 y) (boite y) -0.845 0.05)
(faces-collees-int (rainure3 z+) (boite z-))
(faces-collees-ext (rainure3 z-) (poche5 z-))
(faces-collees-ext (rainure3 x+) (poche13 x-))
(faces-collees-ext (rainure3 x-) (poche14 x+))
;.....................................................
;                    POCHE15
;.....................................................          660
(VU poche15
   (type poche)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y- Z-))
   (Ra 6.3)
   (longueur 15.5 0.5)
   (largeur 13.7 0.2)
   (hauteur 11.55 0.45)
   (R-contourne 4 -1))
(distance-plan-face-int (poche15 y) (boite x+) 91 0.1)         670
```

```
(distance-plan-plan (poche15 x) (boite y) 4.805 0.1)
(faces-collees-int (poche15 z+) (boite z-))
;.....................................................................
;                          POCHE16
;.....................................................................
(VU poche16
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y- X- Z-))
   (Ra 6.3)                                                          680
   (longueur 17.5 2)
   (largeur 5.5 1)
   (hauteur 10 1)
   (R-contourne 2.75 -0.5))
(distance-plan-face-int (poche16 y) (boite x+) 26.70 0.1)
(faces-collees-int (poche16 z+) (boite z-))
(faces-collees-int (poche16 x+) (boite y-))
```

3 Gamme générée pour le Boîtier dans un atelier avec Centre d'Usinage

Cette gamme a été générée pour être réalisée sur un Centre d'Usinage, en utilisant un cube comme type de montage. Elle est composée de 124 Opérations Volumiques, réparties dans 2 phases (c'est le minimum pour usiner des VU sur toutes les faces). La présence de VU volumineux a induit la création d'une Sous-Gamme d'ébauche ; les duretés initiales et finales étant différentes, il y a un Traitement Thermique de trempe+revenu entre les deux Sous-Gammes. GAGMAT a mis à peu près 8 heures pour générer cette gamme, et a appliqué plus de 1300 conseils (ceci n'a rien d'étonnant, étant donné le nombre important d'OV à ordonner et à regrouper).

```
SOUS-GAMME NO 1
===============
     Type : EBAUCHE
     Technologie : FRAISAGE
     Liste des VU associes :
         POCHE1      POCHE2
                                                                     10
*****************************************************************************
PHASE NO 1
---------
Appui : (BOITE-Z--X)
*****************************************************************************
      SOUS-PHASE NO 1
      ---------------
      Machine : (CU1)
      ===============================================
            OPERATION NO 1                                           20
            --------------
            Outil : (O40000118 O40000117)
            ---------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : POCHE2
                  classe : EBAUCHE
                  type   : PERCAGE
            ---------------------------------------------
            OPERATION NO 2                                           30
            --------------
            Outil : (O40000074 O40000073 O40000072 O40000071)
```

```
          ---------------------------------------------
                OV 1
                ---
                VU     : POCHE1
                classe : EBAUCHE
                type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
                ..........................................
                OV 2
                ---
                VU     : POCHE1
                classe : EBAUCHE
                type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
                ..........................................
                OV 3
                ---
                VU     : POCHE2
                classe : EBAUCHE
                type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
                ..........................................
                OV 4
                ---
                VU     : POCHE2
                classe : EBAUCHE
                type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
TRAITEMENT-THERMIQUE NO 1
======================
    Type : TREMPE-REVENU

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

SOUS-GAMME NO 2
===============
    Type : FINITION
    Technologie : FRAISAGE

    Liste des VU associes :
        TROU1        LAMAGE1       TROU2A        TROU2B       LAMAGE2
        PLONGEE1     TROU3         LAMAGE3       TROU4        TROU5
        TROU6        TROU7A        TROU7B        TROU8        TROU9A
        TROU9B       TROU10        LAMAGE4       TROU11       TROU12A
        TROU12B      TROU13        TROU14        POCHE1       RAINURE1
        RAINURE2     POCHE2        POCHE3        POCHE4       POCHE5
        POCHE6       POCHE7        DEGAGEMENT1   POCHE8       POCHE9
        POCHE10      POCHE11       POCHE12       POCHE13      POCHE14
        RAINURE3     POCHE15       POCHE16

**********************************************************************
PHASE NO 1
-----------
Appui : (BOITE-Z--X)
**********************************************************************
      SOUS-PHASE NO 1
      --------------
      Machine : (CU1)
      ================================================
          OPERATION NO 1
          ------------
          Outil : (O40000070 O40000069)
          ---------------------------------------------
                OV 1
                ---
                VU     : POCHE4
                classe : EBAUCHE
                type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
                ..........................................
                OV 2
                ---
                VU     : POCHE4
                classe : EBAUCHE
                type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
                ..........................................
                OV 3
                ---
                VU     : POCHE5
                classe : EBAUCHE
                type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
                ..........................................
                OV 4
                ---
                VU     : POCHE5
```

```
        classe : EBAUCHE
        type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 2
--------------
Outil : (O40000071 O40000072)
-----------------------------------------------------  130
        OV 1
        ---
        VU     : POCHE6
        classe : EBAUCHE
        type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
        ......................................
        OV 2
        ---
        VU     : POCHE7
        classe : EBAUCHE                                140
        type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 3
--------------
Outil : (O40000106 O40000105)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : RAINURE2
        classe : EBAUCHE                                150
        type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
        ......................................
        OV 2
        ---
        VU     : POCHE2
        classe : FINITION
        type   : PLONGEE-DES-ANGLES
        ......................................
        OV 3
        ---                                             160
        VU     : POCHE6
        classe : FINITION
        type   : PLONGEE-DES-ANGLES
        ......................................
        OV 4
        ---
        VU     : POCHE7
        classe : FINITION
        type   : PLONGEE-DES-ANGLES
        ......................................          170
        OV 5
        ---
        VU     : POCHE5
        classe : FINITION
        type   : PLONGEE-DES-ANGLES
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 4
--------------
Outil : (O40000020 O40000019 O40000018 O40000017)
-----------------------------------------------------  180
        OV 1
        ---
        VU     : RAINURE2
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DES-FLANCS
        ......................................
        OV 2
        ---
        VU     : RAINURE2
        classe : FINITION                               190
        type   : 1/2-FIN-FIN-DU-FOND
        ......................................
        OV 3
        ---
        VU     : POCHE2
        classe : FINITION
        type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
        ......................................
        OV 4
        ---                                             200
        VU     : POCHE2
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DES-FLANCS
        ......................................
        OV 5
        ---
        VU     : POCHE2
```

```
        classe : FINITION
        type   : 1/2-FIN-FIN-DU-FOND
        ..............................................
        OV 6
        ---
        VU     : POCHE6
        classe : FINITION
        type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
        ..............................................
        OV 7
        ---
        VU     : POCHE6
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DES-FLANCS
        ..............................................
        OV 8
        ---
        VU     : POCHE6
        classe : FINITION
        type   : 1/2-FIN-FIN-DU-FOND
        ..............................................
        OV 9
        ---
        VU     : POCHE7
        classe : FINITION
        type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
        ..............................................
        OV 10
        ---
        VU     : POCHE7
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DU-FOND
        ..............................................
        OV 11
        ---
        VU     : POCHE7
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DES-FLANCS
        ..............................................
        OV 12
        ---
        VU     : POCHE5
        classe : FINITION
        type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
        ..............................................
        OV 13
        ---
        VU     : POCHE5
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DU-FOND
        ..............................................
        OV 14
        ---
        VU     : POCHE5
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DES-FLANCS
-----------------------------------------------------------
OPERATION NO 5
--------------
Outil : (O40000471 O40000470 O40000469 O40000468)
-----------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : TROU2A
        classe : EBAUCHE
        type   : POINTER
-----------------------------------------------------------
OPERATION NO 6
--------------
Outil : (O40000601 O40000600 O40000689)
-----------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : TROU2A
        classe : EBAUCHE
        type   : PERCER
-----------------------------------------------------------
OPERATION NO 7
--------------
Outil : (TARAUD1113)
-----------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : TROU2A
```

```
        classe : FINITION
        type   : TARAUDER
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 8
--------------
Outil : (O40000109 O40000108 O40000107)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : POCHE1                                    300
        classe : FINITION
        type   : PLONGEE-DES-ANGLES
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 9
--------------
Outil : (O40000021 O40000022 O40000023 O40000024)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---                                                310
        VU     : POCHE1
        classe : FINITION
        type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
        ........................................
        OV 2
        ---
        VU     : POCHE1
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DES-FLANCS
        ........................................           320
        OV 3
        ---
        VU     : POCHE1
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DU-FOND
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 10
---------------
Outil : (O40000076 O40000075)
----------------------------------------------------- 330
        OV 1
        ---
        VU     : POCHE3
        classe : EBAUCHE
        type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 11
---------------
Outil : (O40000468 O40000469 O40000470 O40000471)
----------------------------------------------------- 340
        OV 1
        ---
        VU     : TROU1
        classe : EBAUCHE
        type   : POINTER
        ........................................
        OV 2
        ---
        VU     : TROU2B
        classe : EBAUCHE                                   350
        type   : POINTER
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 12
---------------
Outil : (O40000107 O40000108 O40000109)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : POCHE3
        classe : FINITION                                  360
        type   : PLONGEE-DES-ANGLES
        ........................................
        OV 2
        ---
        VU     : POCHE4
        classe : FINITION
        type   : PLONGEE-DES-ANGLES
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 13                                            370
---------------
Outil : (O40000483 O40000607 O40000606 O40000605 O40000604 O40000603
         O40000690)
-----------------------------------------------------
```

```
        OV 1
        ---
        VU    : TROU1
        classe : EBAUCHE
        type   : PERCER
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 14                                        380
--------------
Outil : (O40000781)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU1
        classe : FINITION
        type   : ALESER
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 15                                        390
--------------
Outil : (O40000020 O40000019 O40000018 O40000017)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : DEGAGEMENT1
        classe : FINITION
        type   : FINITION-FOND-FLANCS
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 16                                        400
--------------
Outil : (O40000099)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE9
        classe : FINITION
        type   : PERCAGE
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 17                                        410
--------------
Outil : (O40000014)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE9
        classe : FINITION
        type   : FINITION-FOND-FLANCS
        ......................................
        OV 2                                           420
        ---
        VU    : POCHE10
        classe : FINITION
        type   : FINITION-FOND-FLANCS
        ......................................
        OV 3
        ---
        VU    : POCHE11
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DES-FLANCS                   430
        ......................................
        OV 4
        ---
        VU    : POCHE11
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DU-FOND
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 18
--------------
Outil : (O40000012)                                    440
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE8
        classe : FINITION
        type   : FINITION-FOND-FLANCS
        ......................................
        OV 2
        ---
        VU    : POCHE12                                450
        classe : FINITION
        type   : FINITION-FOND-FLANCS
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 19
--------------
Outil : (O40000118 O40000082 O40000081)
```

```
-----------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : RAINURE1                                  460
      classe : EBAUCHE
      type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
-----------------------------------------------
OPERATION NO 20
--------------
Outil : (O40000039 O40000032 O40000033 O40000034)
-----------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : RAINURE1                                  470
      classe : FINITION
      type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
      ........................................
      OV 2
      ---
      VU    : RAINURE1
      classe : FINITION
      type   : FINITION-DU-FOND
      ........................................
      OV 3                                              480
      ---
      VU    : RAINURE1
      classe : FINITION
      type   : FINITION-DES-FLANCS
-----------------------------------------------
OPERATION NO 21
--------------
Outil : (O40000598 O40000597 O40000596 O40000595 O40000594 O40000593
         O40000592 O40000591 O40000590 O40000589 ...)
-----------------------------------------------  490
      OV 1
      ---
      VU    : TROU2B
      classe : EBAUCHE
      type   : PERCER
-----------------------------------------------
OPERATION NO 22
--------------
Outil : (O40000580 O40000579 O40000578 O40000685 O40000684)
-----------------------------------------------  500
      OV 1
      ---
      VU    : TROU6
      classe : FINITION
      type   : PERCER
-----------------------------------------------
OPERATION NO 23
--------------
Outil : (O40000023 O40000024)
-----------------------------------------------  510
      OV 1
      ---
      VU    : LAMAGE2
      classe : FINITION
      type   : CONTOURNER
      ........................................
      OV 2
      ---
      VU    : POCHE3
      classe : FINITION                                 520
      type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
      ........................................
      OV 3
      ---
      VU    : POCHE3
      classe : FINITION
      type   : FINITION-DES-FLANCS
      ........................................
      OV 4
      ---                                               530
      VU    : POCHE3
      classe : FINITION
      type   : 1/2-FIN-FIN-DU-FOND
      ........................................
      OV 5
      ---
      VU    : POCHE4
      classe : FINITION
      type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
```

```
                                                                    540
            ..............................
            OV 6
            ---
            VU    : POCHE4
            classe : FINITION
            type   : FINITION-DES-FLANCS
            ..............................
            OV 7
            ---
            VU    : POCHE4
            classe : FINITION                                       550
            type   : FINITION-DU-FOND
        ------------------------------------------------
        OPERATION NO 24
        ---------------
        Outil : (O40000097)
        ------------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : PLONGEE1
            classe : FINITION                                       560
            type   : PERCER
        ------------------------------------------------
        OPERATION NO 25
        ---------------
        Outil : (GRAIN1100)
        ------------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : TROU2B
            classe : FINITION                                       570
            type   : ALESER
        ------------------------------------------------
        OPERATION NO 26
        ---------------
        Outil : (O40000112)
        ------------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : LAMAGE1
            classe : FINITION                                       580
            type   : LAMER
*****************************************************************************
PHASE NO 2
----------
Appui : (BOITE-Z+-Y)
*****************************************************************************
    SOUS-PHASE NO 1
    ---------------
    Machine : (CU1)
    ================================================                590
        OPERATION NO 1
        --------------
        Outil : (O40000007 O40000008)
        ------------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : RAINURE3
            classe : EBAUCHE
            type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
            ..............................                          600
            OV 2
            ---
            VU    : RAINURE3
            classe : FINITION
            type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
            ..............................
            OV 3
            ---
            VU    : RAINURE3
            classe : FINITION                                       610
            type   : FINITION-DES-FLANCS
        ------------------------------------------------
        OPERATION NO 2
        --------------
        Outil : (O40000471 O40000470 O40000469 O40000468)
        ------------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : TROU10
            classe : EBAUCHE                                        620
            type   : POINTER
```

OPERATION NO 3

Outil : (O40000548 O40000547 O40000546 O40000545 O40000544 O40000667 O40000666 O40000665)

OV 1

VU : TROU10 630
classe : EBAUCHE
type : PERCER

OPERATION NO 4

Outil : (O40000468 O40000469 O40000470 O40000471)

OV 1

VU : TROU3 640
classe : EBAUCHE
type : POINTER

OV 2

VU : TROU5
classe : EBAUCHE
type : POINTER

OV 3 650

VU : TROU7A
classe : EBAUCHE
type : POINTER

OV 4

VU : TROU7B
classe : EBAUCHE
type : POINTER 660

OV 5

VU : TROU8
classe : EBAUCHE
type : POINTER

OV 6

VU : TROU9A 670
classe : EBAUCHE
type : POINTER

OV 7

VU : TROU9B
classe : EBAUCHE
type : POINTER

OV 8 680

VU : TROU12A
classe : EBAUCHE
type : POINTER

OV 9

VU : TROU12B
classe : EBAUCHE
type : POINTER 690

OV 10

VU : TROU13
classe : EBAUCHE
type : POINTER

OV 11

VU : TROU14 700
classe : EBAUCHE
type : POINTER

OV 12

VU : TROU11
classe : EBAUCHE

```
        type  : POINTER
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 5                                          710
--------------
Outil : (O40000632 O40000491)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU8
        classe : EBAUCHE
        type  : PERCER
        ..............................................
        OV 2                                            720
        ---
        VU    : TROU12A
        classe : EBAUCHE
        type  : PERCER
        ..............................................
        OV 3
        ---
        VU    : TROU12B
        classe : EBAUCHE
        type  : PERCER                                  730
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 6
--------------
Outil : (O40000808)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU8
        classe : FINITION
        type  : ALESER                                  740
        ..............................................
        OV 2
        ---
        VU    : TROU12A
        classe : FINITION
        type  : ALESER
        ..............................................
        OV 3
        ---
        VU    : TROU12B                                 750
        classe : FINITION
        type  : ALESER
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 7
--------------
Outil : (O40000484 O40000611 O40000610 O40000609 O40000608 O40000691)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU14                                  760
        classe : EBAUCHE
        type  : PERCER
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 8
--------------
Outil : (O40000576 O40000577)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU9A                                  770
        classe : EBAUCHE
        type  : PERCER
        ..............................................
        OV 2
        ---
        VU    : TROU9B
        classe : EBAUCHE
        type  : PERCER
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 9                                          780
--------------
Outil : (O40000685 O40000579 O40000580)
-----------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU4
        classe : FINITION
        type  : PERCER
        ..............................................
        OV 2                                            790
        ---
```

```
        VU    : TROU5
        classe : FINITION
        type  : PERCER
        ..........................................
        OV 3
        ---
        VU    : POCHE14
        classe : FINITION
        type  : PERCAGE                                          800
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 10
--------------
Outil : (O40000670 O40000671 O40000672 O40000553 O40000554 O40000555
         O40000556 O40000557 O40000558)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU7A
        classe : EBAUCHE                                         810
        type  : PERCER
        ..........................................
        OV 2
        ---
        VU    : TROU7B
        classe : EBAUCHE
        type  : PERCER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 11
--------------                                                   820
Outil : (GRAIN971)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU7A
        classe : FINITION
        type  : ALESER
        ..........................................
        OV 2
        ---                                                      830
        VU    : TROU7B
        classe : FINITION
        type  : ALESER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 12
--------------
Outil : (O40000776)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---                                                      840
        VU    : TROU9A
        classe : FINITION
        type  : ALESER
        ..........................................
        OV 2
        ---
        VU    : TROU9B
        classe : FINITION
        type  : ALESER
-------------------------------------------------------------  850
OPERATION NO 13
--------------
Outil : (O40000552 O40000551 O40000550 O40000669 O40000668)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU13
        classe : EBAUCHE
        type  : PERCER
-------------------------------------------------------------  860
OPERATION NO 14
--------------
Outil : (O40000665 O40000666 O40000667 O40000544 O40000545 O40000546
         O40000547 O40000548)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU3
        classe : EBAUCHE
        type  : PERCER                                           870
        ..........................................
        OV 2
        ---
        VU    : TROU11
```

```
        classe : EBAUCHE
        type   : PERCER
-------------------------------------------------------
OPERATION NO 15
---------------
Outil : (GRAIN894)                                                    880
-------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : TROU3
        classe : FINITION
        type   : ALESER
        ........................................
        OV 2
        ---
        VU     : TROU10                                               890
        classe : FINITION
        type   : ALESER
        ........................................
        OV 3
        ---
        VU     : TROU11
        classe : FINITION
        type   : ALESER
-------------------------------------------------------
OPERATION NO 16                                                       900
---------------
Outil : (O40000098)
-------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : LAMAGE3
        classe : FINITION
        type   : LAMER
-------------------------------------------------------
OPERATION NO 17                                                       910
---------------
Outil : (O40000097)
-------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : LAMAGE4
        classe : FINITION
        type   : LAMER
-------------------------------------------------------
OPERATION NO 18                                                       920
---------------
Outil : (TARAUD857)
-------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : TROU13
        classe : FINITION
        type   : TARAUDER
-------------------------------------------------------
OPERATION NO 19                                                       930
---------------
Outil : (O40000782)
-------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : TROU14
        classe : FINITION
        type   : ALESER
-------------------------------------------------------
OPERATION NO 20                                                       940
---------------
Outil : (O40000570 O40000569 O40000568 O40000567 O40000566 O40000959
         O40000565 O40000564 O40000563 O40000682 ...)
-------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : POCHE13
        classe : FINITION
        type   : PERCAGE
-------------------------------------------------------                950
OPERATION NO 21
---------------
Outil : (O40000012 O40000011)
-------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
```

```
        VU    : POCHE13
        classe : FINITION
        type  : FINITION-DES-FLANCS
-------------------------------------------------- 960
OPERATION NO 22
---------------
Outil : (O40000110 O40000109 O40000108)
--------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE15
        classe : EBAUCHE
        type  : PERCAGE
-------------------------------------------------- 970
OPERATION NO 23
---------------
Outil : (O40000070 O40000069)
--------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE15
        classe : EBAUCHE
        type  : EBAUCHE-DANS-L-AXE
-------------------------------------------------- 980
OPERATION NO 24
---------------
Outil : (O40000013 O40000014 O40000015 O40000016)
--------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE14
        classe : FINITION
        type  : FINITION-DES-FLANCS
        ..................................... 990
        OV 2
        ---
        VU    : POCHE15
        classe : FINITION
        type  : FINITION-DU-FOND
        .....................................
        OV 3
        ---
        VU    : POCHE15
        classe : FINITION                          1000
        type  : FINITION-DES-FLANCS
--------------------------------------------------
OPERATION NO 25
---------------
Outil : (O40000010 O40000009)
--------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE16
        classe : FINITION                          1010
        type  : FINITION-FOND-FLANCS
```

4 Gamme générée pour le Boîtier dans un atelier traditionnel

Cette gamme est donnée à titre d'exemple, afin de montrer que GAGMAT peut aussi générer des gammes pour usiner des pièces dans des ateliers qui utilisent des machines traditionnelles à un seul axe. Seuls quelques VU représentatifs ont été conservés. La Sous-Gamme de finition est composée de 3 phases, lesquelles se divisent en sous-phase suivant le type de machine utilisé (machine verticale ou horizontale). Le nombre d'OV étant faible, le temps nécessaire à l'élaboration de cette gamme est de l'ordre de 20 minutes. GAGMAT a appliqué 19 conseils pour la première Sous-Gamme, 80 pour

la seconde.

```
SOUS-GAMME NO 1
===============
        Type : EBAUCHE
        Technologie : FRAISAGE

        Liste des VU associes :
               POCHE1      POCHE2

****************************************************************************************
PHASE NO 1
----------
Appui : (BOITE-Z--Y BOITE-Z--X)
****************************************************************************************
          SOUS-PHASE NO 1
          ---------------
          Machine : (FRAISEUSE-VERT)
          ===================================================
                    OPERATION NO 1
                    --------------
                    Outil : (O40000074 O40000073 O40000072 O40000071)
                    ---------------------------------------------
                              OV 1
                              ---
                              VU     : POCHE1
                              classe : EBAUCHE
                              type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
                              ...............................
                              OV 2
                              ---
                              VU     : POCHE1
                              classe : EBAUCHE
                              type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
                    ---------------------------------------------
                    OPERATION NO 2
                    --------------
                    Outil : (O40000118 O40000117 O40000118 O40000117)
                    ---------------------------------------------
                              OV 1
                              ---
                              VU     : POCHE2
                              classe : EBAUCHE
                              type   : PERCAGE
                    ---------------------------------------------
                    OPERATION NO 3
                    --------------
                    Outil : (O40000071 O40000072 O40000073 O40000074 O40000071 O40000072
                             O40000073 O40000074)
                    ---------------------------------------------
                              OV 1
                              ---
                              VU     : POCHE2
                              classe : EBAUCHE
                              type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
                              ...............................
                              OV 2
                              ---
                              VU     : POCHE2
                              classe : EBAUCHE
                              type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
TRAITEMENT-THERMIQUE NO 1
=========================
        Type : TREMPE-REVENU

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
SOUS-GAMME NO 2
===============
        Type : FINITION
        Technologie : FRAISAGE

        Liste des VU associes :
               TROU1      LAMAGE1      POCHE1      POCHE2      POCHE14
****************************************************************************************
PHASE NO 1
----------
```

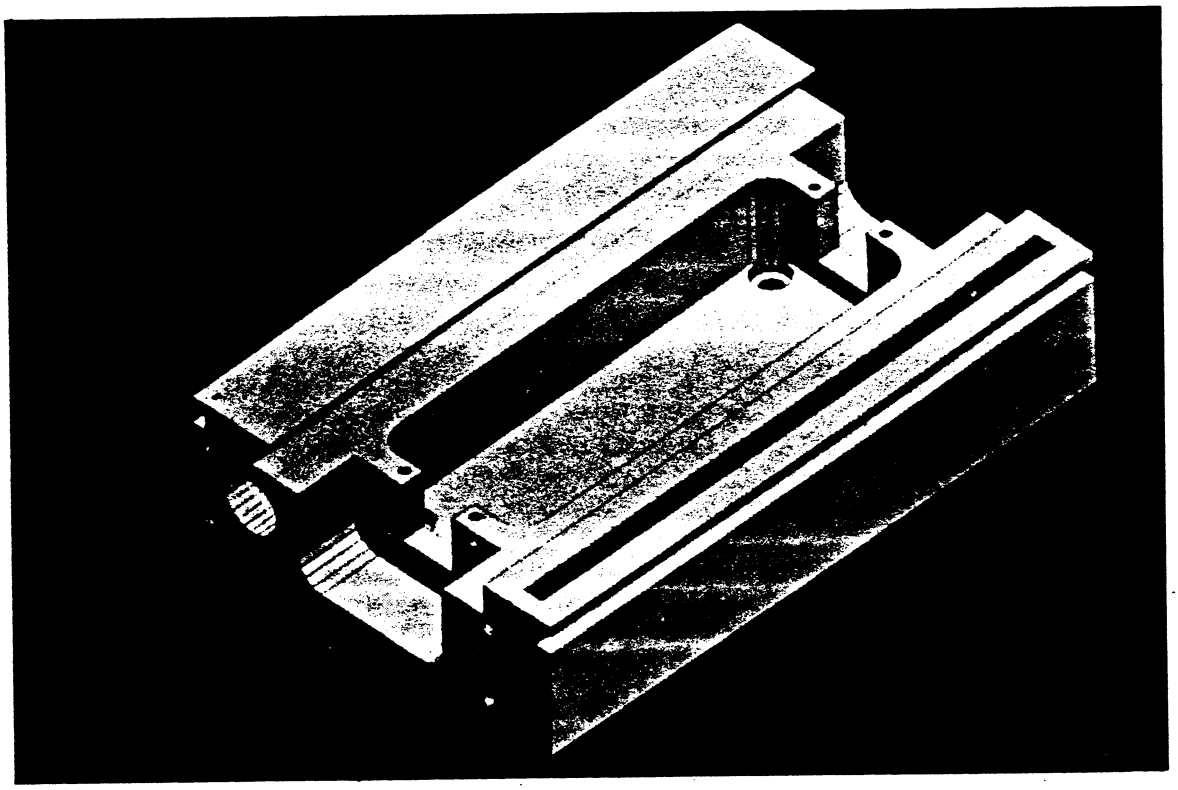
```
Appui : (BOITE-Z+-Y BOITE-Z+-X)
*****************************************************************************************
      SOUS-PHASE NO 1
      ---------------
      Machine : (PERCEUSE-VERT)
      ==========================================================
            OPERATION NO 1
            --------------
            Outil : (O40000684 O40000685 O40000686 O40000687 O40000578 O40000579
                     O40000580 O40000581 O40000582 O40000583 O40000584 O40000585
                     O40000586 O40000587 O40000588 O40000589 O40000590 O40000481
                     O40000482)
            ------------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : POCHE14
                  classe : FINITION
                  type   : PERCAGE
      ==========================================================
      SOUS-PHASE NO 2
      ---------------
      Machine : (FRAISEUSE-VERT)
      ==========================================================
            OPERATION NO 1
            --------------
            Outil : (O40000013 O40000014 O40000015 O40000016)
            ------------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : POCHE14
                  classe : FINITION
                  type   : FINITION-DES-FLANCS
*****************************************************************************************
PHASE NO 2
---------
Appui : (BOITE-Z--Y BOITE-Z--X)
*****************************************************************************************
      SOUS-PHASE NO 1
      ---------------
      Machine : (FRAISEUSE-VERT)
      ==========================================================
            OPERATION NO 1
            --------------
            Outil : (O40000107 O40000108 O40000109)
            ------------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : POCHE1
                  classe : FINITION
                  type   : PLONGEE-DES-ANGLES
            ------------------------------------------------------
            OPERATION NO 2
            --------------
            Outil : (O40000024 O40000023 O40000022 O40000021)
            ------------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : POCHE1
                  classe : FINITION
                  type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
                  ............................
                  OV 2
                  ---
                  VU    : POCHE1
                  classe : FINITION
                  type   : FINITION-DES-FLANCS
                  ............................
                  OV 3
                  ---
                  VU    : POCHE1
                  classe : FINITION
                  type   : FINITION-DU-FOND
            ------------------------------------------------------
            OPERATION NO 3
            --------------
            Outil : (O40000106 O40000105 O40000103 O40000106 O40000105 O40000103)
            ------------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : POCHE2
                  classe : FINITION
                  type   : PLONGEE-DES-ANGLES
```

```
                    ----------------------------------------------
                    OPERATION NO 4
                    --------------
                    Outil : (O40000017 O40000018 O40000019 O40000020 O40000017 O40000018
                             O40000019 O40000020)
                    ----------------------------------------------
                          OV 1
                          ---
                          VU    : POCHE2
                          classe : FINITION                                    180
                          type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
                          ....................................
                          OV 2
                          ---
                          VU    : POCHE2
                          classe : FINITION
                          type   : FINITION-DES-FLANCS
                          ....................................
                          OV 3
                          ---                                                  190
                          VU    : POCHE2
                          classe : FINITION
                          type   : 1/2-FIN-FIN-DU-FOND
*****************************************************************************************
PHASE NO 3
---------
Appui : (BOITE-Z--Y BOITE-Z--X BOITE-Z+-Y BOITE-Z+-X BOITE-Y--X
         BOITE-Y--Z BOITE-Y+-X BOITE-Y+-Z)
*****************************************************************************************
        SOUS-PHASE NO 1                                                        200
        --------------
        Machine : (PERCEUSE-HOR)
        ==============================================
                    OPERATION NO 1
                    --------------
                    Outil : (O40000468 O40000469 O40000470 O40000471)
                    ----------------------------------------------
                          OV 1
                          ---
                          VU    : TROU1                                        210
                          classe : EBAUCHE
                          type   : POINTER
                    ----------------------------------------------
                    OPERATION NO 2
                    --------------
                    Outil : (O40000690 O40000603 O40000604 O40000605 O40000606 O40000607
                             O40000483)
                    ----------------------------------------------
                          OV 1
                          ---                                                  220
                          VU    : TROU1
                          classe : EBAUCHE
                          type   : PERCER
                    ----------------------------------------------
                    OPERATION NO 3
                    --------------
                    Outil : (O40000781)
                    ----------------------------------------------
                          OV 1
                          ---                                                  230
                          VU    : TROU1
                          classe : FINITION
                          type   : ALESER
        ==============================================
        SOUS-PHASE NO 2
        --------------
        Machine : (FRAISEUSE-HOR)
        ==============================================
                    OPERATION NO 1
                    --------------                                             240
                    Outil : (O40000112)
                    ----------------------------------------------
                          OV 1
                          ---
                          VU    : LAMAGE1
                          classe : FINITION
                          type   : LAMER
```

E

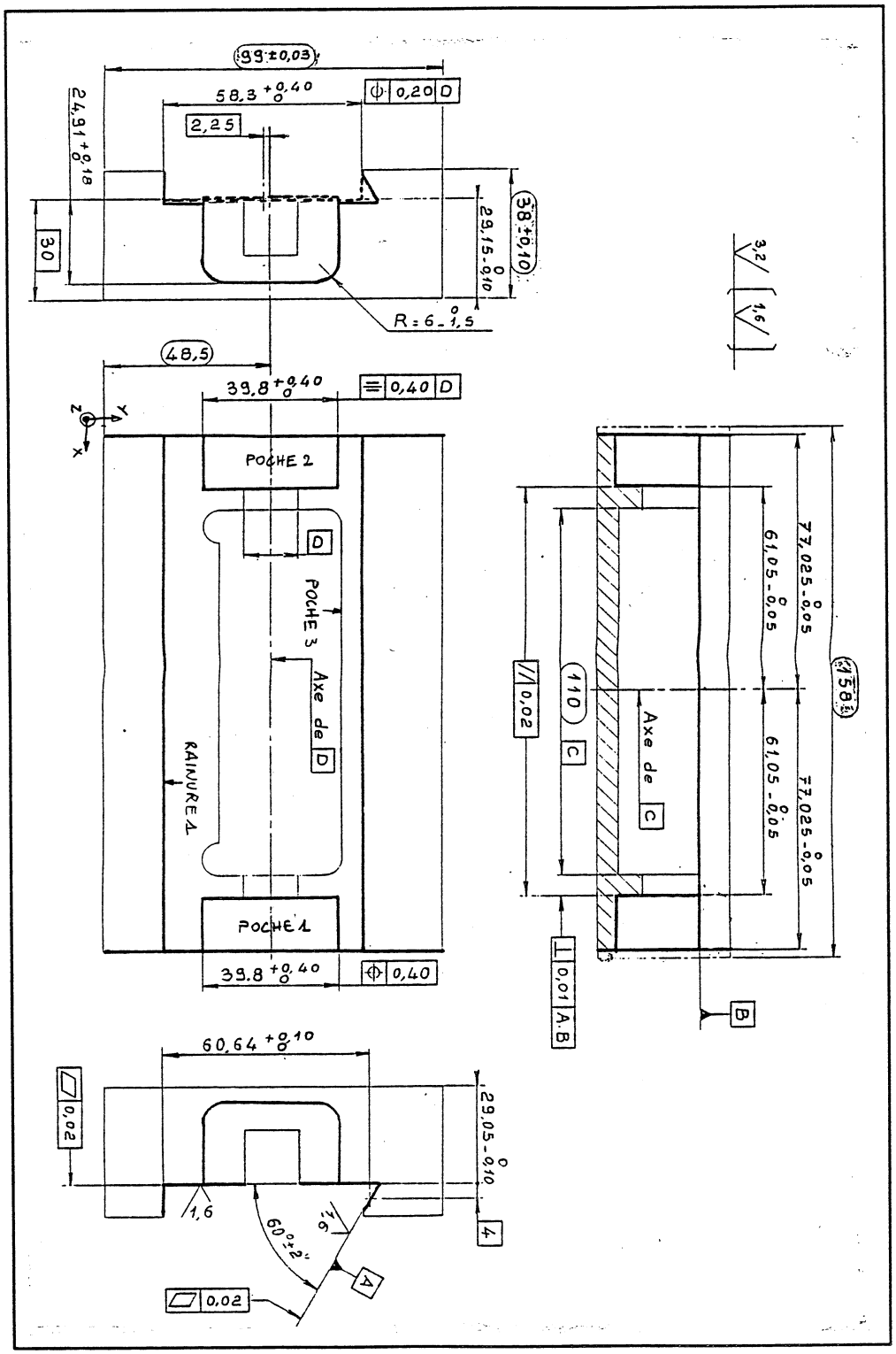
Annexe E

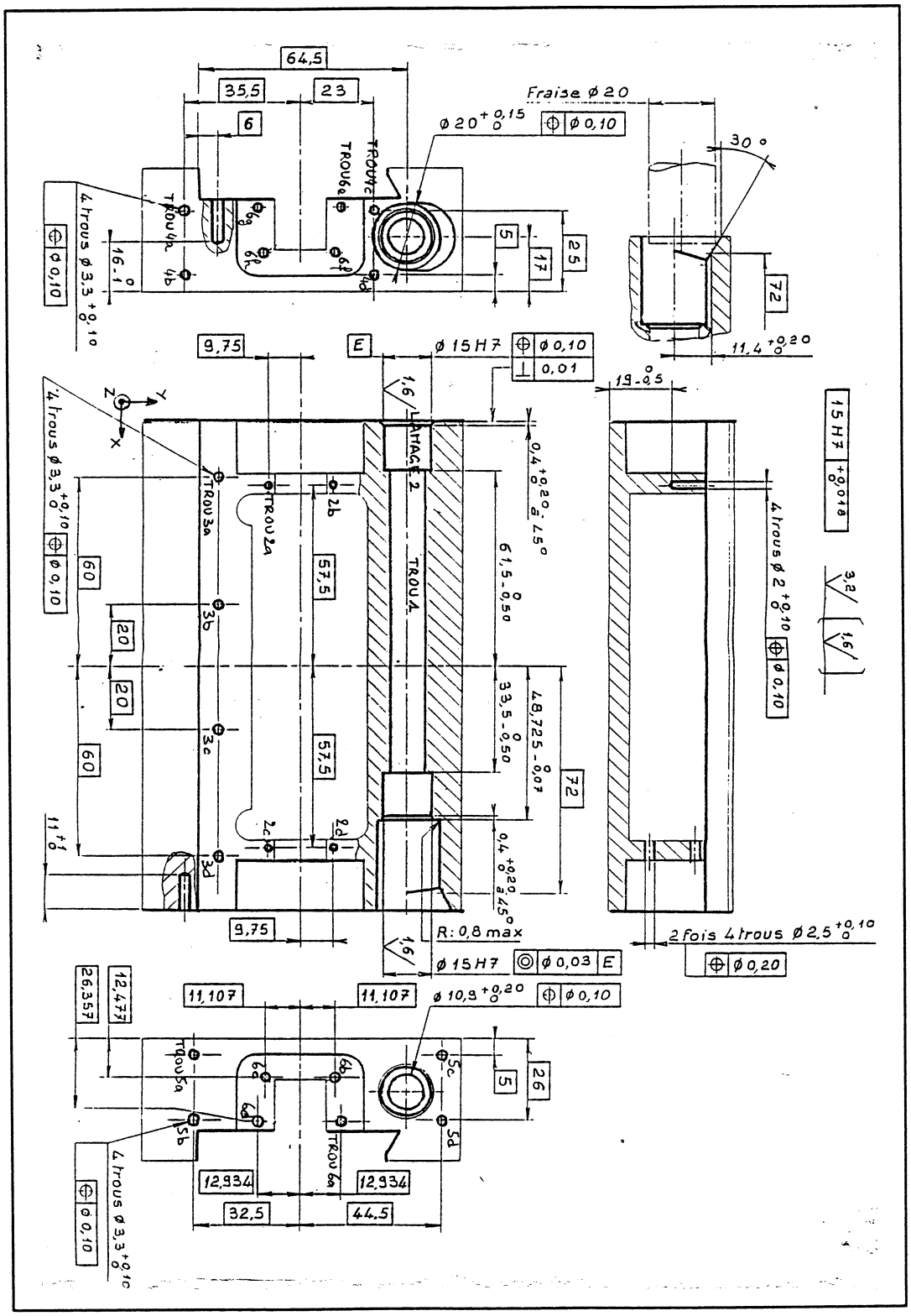
Le Corps

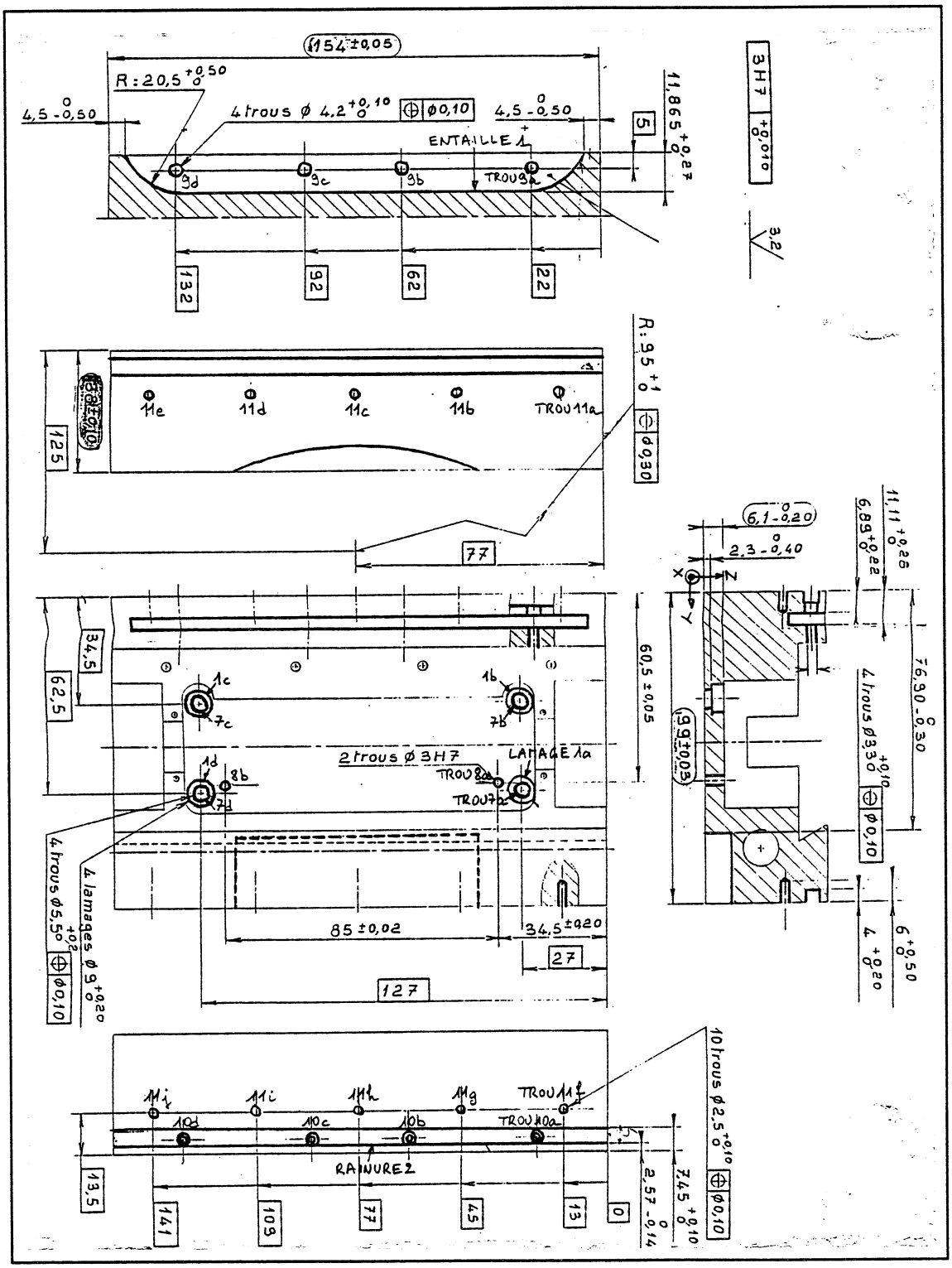


Le Corps
(image issue de DIMAT, avec les traces d'outils)

1 Les plans du Corps




64,5
35,5
23
6
Fraise ø 20
ø 20 +0,15 0
ø 0,10
30 °
TROU 4c
TROU 6c
TROU 4a
TROU 6a
4 trous ø 3,3 +0,10 0
ø 0,10
16 -1 0
5
17
25
72
11,4 +0,20 0
9,75
E
ø 15 H7
ø 0,10
0,01
19 -0,5 0
1,6
Y
Z
X
4 trous ø 3,3 +0,10 0
ø 0,10
TROU 3a
TROU 2a
2b
ATTACH. 2
TROU A
0,4 +0,20 0 à 45°
61,5 -0,50 0
57,5
60
20
20
60
3b
3c
33,5 -0,50 0
48,725 -0,07 0
72
11 +1 0
2c
2d
3d
0,4 +0,20 0 à 45°
9,75
R: 0,8 max
1,6
ø 15 H7
ø 0,03
E
ø 0,20
15 H7 +0,018 0
3,2
1,6
4 trous ø 2 +0,10 0
ø 0,10
2 fois 4 trous ø 2,5 +0,10 0
26,357
12,477
11,107
11,107
ø 10,9 +0,20 0
ø 0,10
TROU 5a
6a
6b
6c
6d
5b
5c
5d
TROU 6a
5
26
12,934
12,934
32,5
44,5
4 trous ø 3,3 +0,10 0
ø 0,10


154 ±0,05
R : 20,5 +0,50 0
4,5 -0,50 0
4 trous ø 4,2 +0,10 0
ø0,10
4,5 -0,50 0
ENTAILLE 1
TROU 9a
9d
9c
9b
5
11,865 +0,27 0
3H7 +0,010 0
3,2
132
92
62
22
R : 9,5 +1 0
ø0,30
11e
11d
11c
11b
TROU 11a
125
77
6,1 -0,20 0
2,3 -0,40 0
11,11 +0,26 0
6,89 +0,22 0
76,90 -0,30 0
4 trous ø3,3 +0,10 0
ø0,10
6 +0,50 0
4 +0,20 0
34,5
62,5
60,5 ±0,05
1c
7c
1b
7b
2 trous ø 3H7
LAMAGE 1a
TROU 8a
TROU 7a
1d
8b
7d
4 trous ø5,5 +0,2 0
ø0,10
4 lamages ø 9 +0,20 0
85 ±0,02
34,5 ±0,20
27
127
11j
11i
11h
11g
TROU 11f
10d
10c
10b
TROU 10a
RAINURE 2
13,5
141
109
77
45
13
0
10 trous ø2,5 +0,10 0
ø0,10
7,45 +0,10 0
2,57 -0,14 0

2 Description du Corps

Cette pièce comporte 62 VU, dont 60 sont à usiner (la *boîte* et la *poche3* centrale n'ont pas à être usinées). Après traitement préliminaire de la description, ce nombre tombe à 21, et il y a 12 super-VU : cette pièce est en effet composée de beaucoup d'alésages identiques). Quelques entités n'ont pas été décrites, notamment la zone se trouvant à l'extrémité du *trou1*.

```
(piece corps-superieur
      (matiere acier)
      (durete-initiale 80)
      (durete-finale 120)
      (Ra 3.2)
      (qualite 10)
      (LX 158)
      (LY 99)
      (LZ 38)
      (type-piece parallelepipedique))
;.....................................................
;                    BOITE
;.....................................................
(VU boite
   (type boite)
   (a-usiner non)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (longueur 154.05 -0.1)
   (largeur 99 -0.06)
   (hauteur 38 -0.2))
;.....................................................
;                    RAINURE1
;.....................................................
(VU rainure1
   (type rainure)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (Ra 1.6)
   (longueur 155)
   (largeur 58.3 0.4)
   (hauteur 8.85))
(distance-plan-plan (rainure1 y) (boite y) 2.25 0.2)
(faces-collees-int (rainure1 x+) (boite x+))
(faces-collees-int (rainure1 x-) (boite x-))
(faces-collees-int (rainure1 z+) (boite z+))
(distance-face-face-int (rainure1 z-) (boite z-) 29.15 -0.10)
;.....................................................
;                    RAINURE2
;.....................................................
(VU rainure2
   (type rainure)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (longueur 154)
   (largeur 4.9 0.22)
   (hauteur 4 0.2))
(distance-face-face-int (rainure2 y+) (boite z+) 2.57 -0.14)
(faces-collees-int (rainure2 z+) (boite y-))
(faces-collees-int (rainure2 x+) (boite x+))
(faces-collees-int (rainure2 x-) (boite x-))
;.....................................................
;                    RAINURE3
;.....................................................
(VU rainure3
   (type rainure)
   (a-usiner oui)
```

```
   (matrice (X- Z+ Y+))
   (longueur 154)
   (largeur 4.9 0.22)
   (hauteur 4 0.2))
(distance-face-face-int (rainure2 y-) (boite z+) 2.57 -0.14)
(faces-collees-int (rainure3 z+) (boite y+))
(faces-collees-int (rainure3 x+) (boite x-))
(faces-collees-int (rainure3 x-) (boite x+))
;.....................................................
;                    POCHE1
;.....................................................
(VU poche1
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Z- Y+ X+))
   (debouche-dans rainure1)
   (Ra 3.2)
   (longueur 24.91 0.18)
   (largeur 39.8 0.4)
   (hauteur 17)
   (R-contourne 6 -1.5))
(symetrie (poche1 y) (boite y) 0.4)
(faces-collees-int (poche1 z+) (boite x+))
(faces-collees-int (poche1 x-) (rainure1 z-))
(distance-face-face-int (poche1 z-) (boite x+) 15.925 0.1)
;.....................................................
;                    POCHE2
;.....................................................
(VU poche2
   (type poche-debouchante)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Z- Y- X-))
   (debouche-dans rainure1)
   (Ra 3.2)
   (longueur 24.91 0.18)
   (largeur 39.8 0.4)
   (hauteur 17)
   (R-contourne 6 -1.5))
(symetrie (poche2 y) (boite y) 0.4)
(faces-collees-int (poche2 z+) (boite x-))
(faces-collees-int (poche2 x-) (rainure1 z-))
(distance-face-face-int (poche2 z-) (boite x-) 15.925 0.1)
;.....................................................
;                    POCHE3
;.....................................................
(VU poche3
   (type poche)
   (a-usiner non)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (Ra 3.2)
   (longueur 110)
   (largeur 40)
   (hauteur 33.75)
   (R-contourne 6 -1.5))
(symetrie (poche3 y) (boite y) 0.4)
(symetrie (poche3 x) (boite x) 0.1)
(faces-collees-int (poche3 z+) (boite z+))
;.....................................................
;                    TROU1
;.....................................................
(VU trou1
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ Z+ X+))
   (diametre 10.9 0.2)
   (longueur 115))
(distance-plan-face-int (trou1 y) (rainure1 y-) 64.5 0.10)
(distance-plan-face-int (trou1 x) (boite z-) 17 0.10)
(faces-collees-int (trou1 z+) (boite z-))
```

```
;.....................................................
;                TROU2a
;.....................................................
(VU trou2a
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2 0.1)
   (longueur 10.5)
   (support rainure1))
(distance-plan-plan (trou2a x) (boite x) -57.5 0.1)
(distance-plan-plan (trou2a y) (boite y) -9.75 0.1)
(faces-collees-ext (trou2a z+) (rainure1 z-))
;.....................................................
;                TROU2b
;.....................................................
(VU trou2b
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2 0.1)
   (longueur 10.5)
   (support rainure1))
(distance-plan-plan (trou2b x) (boite x) -57.5 0.1)
(distance-plan-plan (trou2b y) (boite y) 9.75 0.1)
(faces-collees-ext (trou2b z+) (rainure1 z-))
;.....................................................
;                TROU2c
;.....................................................
(VU trou2c
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2 0.1)
   (longueur 10.5)
   (support rainure1))
(distance-plan-plan (trou2c x) (boite x) 57.5 0.1)
(distance-plan-plan (trou2c y) (boite y) -9.75 0.1)
(faces-collees-ext (trou2c z+) (rainure1 z-))
;.....................................................
;                TROU2d
;.....................................................
(VU trou2d
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2 0.1)
   (longueur 10.5)
   (support rainure1))
(distance-plan-plan (trou2d x) (boite x) 57.5 0.1)
(distance-plan-plan (trou2d y) (boite y) 9.75 0.1)
(faces-collees-ext (trou2d z+) (rainure1 z-))
;.....................................................
;                TROU3a
;.....................................................
(VU trou3a
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 3.3 0.1)
   (longueur 13.5)
   (support rainure1))
(distance-plan-plan (trou3a x) (boite x) -60 0.1)
(distance-plan-face-int (trou3a y) (rainure1 y-) 6 0.1)
```

```
(faces-collees-ext (trou3a z+) (rainure1 z-))
;.....................................................
;                    TROU3b
;.....................................................
(VU trou3b
   (type alesage-non-debouchant)                                  200
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 3.3 0.1)
   (longueur 13.5)
   (support rainure1))
(distance-plan-plan (trou3b x) (boite x) -20 0.1)
(distance-plan-face-int (trou3b y) (rainure1 y-) 6 0.1)
(faces-collees-ext (trou3b z+) (rainure1 z-))
;.....................................................          210
;                    TROU3c
;.....................................................
(VU trou3c
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 3.3 0.1)
   (longueur 13.5)
   (support rainure1))                                            220
(distance-plan-plan (trou3c x) (boite x) 20 0.1)
(distance-plan-face-int (trou3c y) (rainure1 y-) 6 0.1)
(faces-collees-ext (trou3c z+) (rainure1 z-))
;.....................................................
;                    TROU3d
;.....................................................
(VU trou3d
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))                                           230
   (type-fond pointu)
   (diametre 3.3 0.1)
   (longueur 13.5)
   (support rainure1))
(distance-plan-plan (trou3d x) (boite x) 60 0.1)
(distance-plan-face-int (trou3d y) (rainure1 y-) 6 0.1)
(faces-collees-ext (trou3d z+) (rainure1 z-))
;.....................................................
;                    TROU4a
;.....................................................          240
(VU trou4a
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ Z+ X+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 3.3 0.1)
   (longueur 11 1))
(distance-plan-plan (trou4a y) (boite y) -35.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou4a x) (boite z-) 25 0.1)
(faces-collees-int (trou4a z+) (boite x+))                        250
;.....................................................
;                    TROU4b
;.....................................................
(VU trou4b
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ Z+ X+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 3.3 0.1)
   (longueur 11 1))                                               260
(distance-plan-plan (trou4b y) (boite y) -35.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou4b x) (boite z-) 5 0.1)
(faces-collees-int (trou4b z+) (boite x+))
;.....................................................
```

```
;                    TROU4c
;.....................................................
(VU trou4c
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ Z+ X+))                                    270
   (type-fond pointu)
   (diametre 3.3 0.1)
   (longueur 11 1))
(distance-plan-plan (trou4c y) (boite y) 23 0.1)
(distance-plan-face-int (trou4c x) (boite z-) 25 0.1)
(faces-collees-int (trou4c z+) (boite x+))
;.....................................................
;                    TROU4d
;.....................................................
(VU trou4d                                                 280
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ Z+ X+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 3.3 0.1)
   (longueur 11 1))
(distance-plan-plan (trou4d y) (boite y) 23 0.1)
(distance-plan-face-int (trou4d x) (boite z-) 5 0.1)
(faces-collees-int (trou4d z+) (boite x+))
;.....................................................      290
;                    TROU5a
;.....................................................
(VU trou5a
   (type trou-taraude-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y- Z+ X-))
   (type-fond pointu)
   (diametre M4)
   (longueur 11 1)
   (longueur-taraudage 8 0.1)                              300
   (pas 1))
(distance-plan-plan (trou5a y) (boite y) -32.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou5a x) (boite z-) 26 0.1)
(faces-collees-int (trou5a z+) (boite x-))
;.....................................................
;                    TROU5b
;.....................................................
(VU trou5b
   (type trou-taraude-non-debouchant)
   (a-usiner oui)                                          310
   (matrice (Y- Z+ X-))
   (type-fond pointu)
   (diametre M4)
   (longueur 11 1)
   (longueur-taraudage 8 0.1)
   (pas 1))
(distance-plan-plan (trou5b y) (boite y) -32.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou5b x) (boite z-) 5 0.1)
(faces-collees-int (trou5b z+) (boite x-))
;.....................................................      320
;                    TROU5c
;.....................................................
(VU trou5c
   (type trou-taraude-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y- Z+ X-))
   (type-fond pointu)
   (diametre M4)
   (longueur 11 1)
   (longueur-taraudage 8 0.1)                              330
   (pas 1))
(distance-plan-plan (trou5c y) (boite y) 44.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou5c x) (boite z-) 26 0.1)
```

```
(faces-collees-int (trou5c z+) (boite x-))
;.....................................................
;                    TROU5d
;.....................................................
(VU trou5d
   (type trou-taraude-non-debouchant)
   (a-usiner oui)                                      340
   (matrice (Y- Z+ X-))
   (type-fond pointu)
   (diametre M4)
   (longueur 11 1)
   (longueur-taraudage 8 0.1)
   (pas 1))
(distance-plan-plan (trou5d y) (boite y) 44.5 0.1)
(distance-plan-face-int (trou5d x) (boite z-) 5 0.1)
(faces-collees-int (trou5d z+) (boite x-))
;.....................................................  350
;                    TROU6a
;.....................................................
(VU trou6a
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y- Z+ X-))
   (support poche1)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 8))
(distance-plan-plan (trou6a y) (boite y) 12.934 0.2)   360
(distance-plan-face-int (trou6a x) (boite z-) 26.357 0.2)
(faces-collees-ext (trou6a z+) (poche1 z-))
;.....................................................
;                    TROU6b
;.....................................................
(VU trou6b
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y- Z+ X-))
   (support poche1)                                    370
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 8))
(distance-plan-plan (trou6b y) (boite y) 11.107 0.2)
(distance-plan-face-int (trou6b x) (boite z-) 12.477 0.2)
(faces-collées-ext (trou6b z+) (poche1 z-))
;.....................................................
;                    TROU6c
;.....................................................
(VU trou6c
   (type alesage-debouchant)                           380
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y- Z+ X-))
   (support poche1)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 8))
(distance-plan-plan (trou6c y) (boite y) -11.107 0.2)
(distance-plan-face-int (trou6c x) (boite z-) 12.477 0.2)
(faces-collees-ext (trou6c z+) (poche1 z-))
;.....................................................
;                    TROU6d                             390
;.....................................................
(VU trou6d
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y- Z+ X-))
   (support poche1)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 8))
(distance-plan-plan (trou6d y) (boite y) -12.934 0.2)
(distance-plan-face-int (trou6d x) (boite z-) 26.357 0.2)   400
(faces-collees-ext (trou6d z+) (poche1 z-))
;.....................................................
;                    TROU6e
```

```
;.....................................................
(VU trou6e
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ Z+ X+))
   (support poche2)
   (diametre 2.5 0.1)                                    410
   (longueur 8))
(distance-plan-plan (trou6e y) (boite y) 12.934 0.2)
(distance-plan-face-int (trou6e x) (boite z-) 26.357 0.2)
(faces-collees-ext (trou6e z+) (poche2 z-))
;.....................................................
;                    TROU6f
;.....................................................
(VU trou6f
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)                                        420
   (matrice (Y+ Z+ X+))
   (support poche2)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 8))
(distance-plan-plan (trou6f y) (boite y) 11.107 0.2)
(distance-plan-face-int (trou6f x) (boite z-) 12.477 0.2)
(faces-collees-ext (trou6f z+) (poche2 z-))
;.....................................................
;                    TROU6g
;.....................................................   430
(VU trou6g
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ Z+ X+))
   (support poche2)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 8))
(distance-plan-plan (trou6g y) (boite y) -12.934 0.2)
(distance-plan-face-int (trou6g x) (boite z-) 26.357 0.2)
(faces-collees-ext (trou6g z+) (poche2 z-))              440
;.....................................................
;                    TROU6h
;.....................................................
(VU trou6h
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ Z+ X+))
   (support poche2)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 8))                                         450
(distance-plan-plan (trou6h y) (boite y) -11.107 0.2)
(distance-plan-face-int (trou6h x) (boite z-) 12.477 0.2)
(faces-collees-ext (trou6h z+) (poche2 z-))
;.....................................................
;                    TROU7a
;.....................................................
(VU trou7a
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))                                  460
   (diametre 5.5 0.2)
   (longueur 6.1 -0.2))
(distance-plan-face-int (trou7a x) (boite x-) 27 0.1)
(distance-plan-face-int (trou7a y) (boite y-) 62.5 0.1)
(faces-collees-int (trou7a z-) (boite z-))
;.....................................................
;                    TROU7b
;.....................................................
(VU trou7b
   (type alesage-debouchant)                             470
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (diametre 5.5 0.2)
```

```
   (longueur 6.1 -0.2))
(distance-plan-face-int (trou7b x) (boite x-) 27 0.1)
(distance-plan-face-int (trou7b y) (boite y-) 34.5 0.1)
(faces-collees-int (trou7b z-) (boite z-))
;.....................................................
;                    TROU7c
;.....................................................
(VU trou7c
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (diametre 5.5 0.2)
   (longueur 6.1 -0.2))
(distance-plan-face-int (trou7c x) (boite x-) 127 0.1)
(distance-plan-face-int (trou7c y) (boite y-) 62.5 0.1)
(faces-collees-int (trou7c z-) (boite z-))
;.....................................................
;                    TROU7d
;.....................................................
(VU trou7d
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (diametre 5.5 0.2)
   (longueur 6.1 -0.2))
(distance-plan-face-int (trou7d x) (boite x-) 127 0.1)
(distance-plan-face-int (trou7d y) (boite y-) 34.5 0.1)
(faces-collees-int (trou7d z-) (boite z-))
;.....................................................
;                    TROU8a
;.....................................................
(VU trou8a
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (diametre 3 H7)
   (longueur 6.1 -0.2))
(distance-plan-face-int (trou8a x) (boite x-) 34.3 0.4)
(distance-plan-face-int (trou8a y) (boite y-) 60.45 0.1)
(faces-collees-int (trou8a z-) (boite z-))
;.....................................................
;                    TROU8b
;.....................................................
(VU trou8b
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (diametre 3 H7)
   (longueur 6.1 -0.2))
(distance-plan-plan (trou8b x) (trou8a x) 84.98 0.04)
(distance-plan-face-int (trou8b y) (boite y-) 60.45 0.1)
(faces-collees-int (trou8b z-) (boite z-))
;.....................................................
;                    TROU9a
;.....................................................
(VU trou9a
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (debouche-dans entaille1)
   (support rainure2)
   (diametre 4.2 0.1)
   (longueur 3))
(distance-plan-face-int (trou9a x) (boite x-) 22 0.1)
(distance-plan-face-int (trou9a y) (boite z+) 5 0.1)
(faces-collees-ext  (trou9a z+) (rainure2 z-))
(faces-collees-ext (trou9a z-) (entaille1 y-))
;.....................................................
;                    TROU9b
;.....................................................
```

```
(VU trou9b
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (debouche-dans entaille1)
   (support rainure2)
   (diametre 4.2 0.1)
   (longueur 3))
(distance-plan-face-int (trou9b x) (boite x-) 62 0.1)
(distance-plan-face-int (trou9b y) (boite z+) 5 0.1)
(faces-collees-ext  (trou9b z+) (rainure2 z-))
(faces-collees-ext (trou9b z-) (entaille1 y-))
;.....................................................
;                    TROU9c
;.....................................................
(VU trou9c
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (debouche-dans entaille1)
   (support rainure2)
   (diametre 4.2 0.1)
   (longueur 3))
(distance-plan-face-int (trou9c x) (boite x-) 92 0.1)
(distance-plan-face-int (trou9c y) (boite z+) 5 0.1)
(faces-collees-ext  (trou9c z+) (rainure2 z-))
(faces-collees-ext (trou9c z-) (entaille1 y-))
;.....................................................
;                    TROU9d
;.....................................................
(VU trou9d
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (debouche-dans entaille1)
   (support rainure2)
   (diametre 4.2 0.1)
   (longueur 3))
(distance-plan-face-int (trou9d x) (boite x-) 132 0.1)
(distance-plan-face-int (trou9d y) (boite z+) 5 0.1)
(faces-collees-ext  (trou9d z+) (rainure2 z-))
(faces-collees-ext (trou9d z-) (entaille1 y-))
;.....................................................
;                    TROU10a
;.....................................................
(VU trou10a
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (debouche-dans rainure1)
   (support entaille1 trou9a)
   (diametre 3.3 0.1)
   (longueur 6))
(distance-plan-face-int (trou10a x) (boite x-) 22 0.1)
(distance-plan-face-int (trou10a y) (boite z+) 5 0.1)
(faces-collees-ext  (trou10a z+) (rainure1 y-))
(faces-collees-ext (trou10a z-) (entaille1 y+))
;.....................................................
;                    TROU10b
;.....................................................
(VU trou10b
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (debouche-dans rainure1)
   (support entaille1 trou9b)
   (diametre 3.3 0.1)
   (longueur 6))
(distance-plan-face-int (trou10b x) (boite x-) 62 0.1)
```

```
(distance-plan-face-int (trou10b y) (boite z+) 5 0.1)
(faces-collees-ext  (trou10b z+) (rainure1 y-))
(faces-collees-ext (trou10b z-) (entaille1 y+))
;.....................................................
;                    TROU10c
;.....................................................
(VU trou10c
   (type alesage-debouchant)                                    620
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (debouche-dans rainure1)
   (support entaille1 trou9c)
   (diametre 3.3 0.1)
   (longueur 6))
(distance-plan-face-int (trou10c x) (boite x-) 92 0.1)
(distance-plan-face-int (trou10c y) (boite z+) 5 0.1)
(faces-collees-ext  (trou10c z+) (rainure1 y-))
(faces-collees-ext (trou10c z-) (entaille1 y+))                 630
;.....................................................
;                    TROU10d
;.....................................................
(VU trou10d
   (type alesage-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (debouche-dans rainure1)
   (support entaille1 trou9a)
   (diametre 3.3 0.1)                                           640
   (longueur 6))
(distance-plan-face-int (trou10d x) (boite x-) 132 0.1)
(distance-plan-face-int (trou10d y) (boite z+) 5 0.1)
(faces-collees-ext  (trou10d z+) (rainure1 y-))
(faces-collees-ext (trou10d z-) (entaille1 y+))
;.....................................................
;                    TROU11a
;.....................................................
(VU trou11a
   (type alesage-non-debouchant)                                650
   (a-usiner oui)
   (matrice (X- Z+ Y+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 6 0.5))
(distance-plan-face-int (trou11a x) (boite x-) 13 0.1)
(distance-plan-face-int (trou11a y) (boite z+) 13.5 0.1)
(faces-collees-int (trou11a z+) (boite y+))
;.....................................................
;                    TROU11b                                     660
;.....................................................
(VU trou11b
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X- Z+ Y+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 6 0.5))
(distance-plan-face-int (trou11b x) (boite x-) 45 0.1)
(distance-plan-face-int (trou11b y) (boite z+) 13.5 0.1)        670
(faces-collees-int (trou11b z+) (boite y+))
;.....................................................
;                    TROU11c
;.....................................................
(VU trou11c
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X- Z+ Y+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2.5 0.1)                                           680
   (longueur 6 0.5))
(distance-plan-face-int (trou11c x) (boite x-) 77 0.1)
```

```
(distance-plan-face-int (troul1c y) (boite z+) 13.5 0.1)
(faces-collees-int (troul1c z+) (boite y+))
;.....................................................
;                TROU11d
;.....................................................
(VU troul1d
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)                                          690
   (matrice (X- Z+ Y+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 6 0.5))
(distance-plan-face-int (troul1d x) (boite x-) 109 0.1)
(distance-plan-face-int (troul1d y) (boite z+) 13.5 0.1)
(faces-collees-int (troul1d z+) (boite y+))
;.....................................................
;                TROU11e
;.....................................................   700
(VU troul1e
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X- Z+ Y+))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 6 0.5))
(distance-plan-face-int (troul1e x) (boite x-) 141 0.1)
(distance-plan-face-int (troul1e y) (boite z+) 13.5 0.1)
(faces-collees-int (troul1e z+) (boite y+))                710
;.....................................................
;                TROU11f
;.....................................................
(VU troul1f
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 6 0.5))                                       720
(distance-plan-face-int (troul1f x) (boite x-) 13 0.1)
(distance-plan-face-int (troul1f y) (boite z+) 13.5 0.1)
(faces-collees-int (troul1f z+) (boite y-))
;.....................................................
;                TROU11g
;.....................................................
(VU troul1g
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))                                    730
   (type-fond pointu)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 6 0.5))
(distance-plan-face-int (troul1g x) (boite x-) 45 0.1)
(distance-plan-face-int (troul1g y) (boite z+) 13.5 0.1)
(faces-collees-int (troul1g z+) (boite y-))
;.....................................................
;                TROU11h
;.....................................................
(VU troul1h                                                740
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 6 0.5))
(distance-plan-face-int (troul1h x) (boite x-) 77 0.1)
(distance-plan-face-int (troul1h y) (boite z+) 13.5 0.1)
(faces-collees-int (troul1h z+) (boite y-))
;.....................................................      750
;                TROU11i
;.....................................................
```

```
(VU trou11i
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 6 0.5))
(distance-plan-face-int (trou11i x) (boite x-) 109 0.1)
(distance-plan-face-int (trou11i y) (boite z+) 13.5 0.1)
(faces-collees-int (trou11i z+) (boite y-))
;.....................................................
;                    TROU11j
;.....................................................
(VU trou11j
   (type alesage-non-debouchant)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Z+ Y-))
   (type-fond pointu)
   (diametre 2.5 0.1)
   (longueur 6 0.5))
(distance-plan-face-int (trou11j x) (boite x-) 141 0.1)
(distance-plan-face-int (trou11j y) (boite z+) 13.5 0.1)
(faces-collees-int (trou11j z+) (boite y-))
;.....................................................
;                    LAMAGE1a
;.....................................................
(VU lamage1a
   (type lamage)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (alesage-support trou7a)
   (diametre 9 0.20)
   (longueur 3.8))
(coaxialite (lamage1a z) (trou7a z) 0.1)
(distance-face-face-int (lamage1a z-) (boite z-) 2.3 -0.4)
;.....................................................
;                    LAMAGE1b
;.....................................................
(VU lamage1b
   (type lamage)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (alesage-support trou7b)
   (diametre 9 0.20)
   (longueur 3.8))
(coaxialite (lamage1b z) (trou7b z) 0.1)
(distance-face-face-int (lamage1b z-) (boite z-) 2.3 -0.4)
;.....................................................
;                    LAMAGE1c
;.....................................................
(VU lamage1c
   (type lamage)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (alesage-support trou7c)
   (diametre 9 0.20)
   (longueur 3.8))
(coaxialite (lamage1c z) (trou7c z) 0.1)
(distance-face-face-int (lamage1c z-) (boite z-) 2.3 -0.4)
;.....................................................
;                    LAMAGE1d
;.....................................................
(VU lamage1d
   (type lamage)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (alesage-support trou7d)
   (diametre 9 0.20)
   (longueur 3.8))
```

```
(coaxialite (lamage1d z) (trou7d z) 0.1)
(distance-face-face-int (lamage1d z-) (boite z-) 2.3 -0.4)
;..................................................................
;                    LAMAGE2
;..................................................................
(VU lamage2
   (type lamage)
   (a-usiner oui)
   (matrice (Y+ Z+ X-))
   (alesage-support trou1)
   (diametre 15 H7)
   (longueur 16.5 0.5))
(coaxialite (lamage2 z) (trou1 z) 0.1)
(faces-collees-int (lamage2 z+) (boite z-))
;..................................................................
;                    ENTAILLE1
;..................................................................
(VU entaille1
   (type entaille)
   (a-usiner oui)
   (matrice (X+ Y+ Z+))
   (hauteur 11.865 0.27)
   (longueur 145 0.5)
   (largeur 5 0.22)
   (r-extremite 20.5 0.5))
(distance-face-face-int (entaille1 x-) (boite x-) 4.5 -0.5)
(distance-face-face-int (entaille1 x+) (boite x+) 4.5 -0.5)
(distance-face-face-int (entaille1 y-) (boite y-) 6.89 0.22)
(distance-face-face-int (entaille1 y+) (boite y+) 11.11 0.28)
(faces-collees-int (entaille1 z+) (boite z+))
```

3 La Gamme générée pour le Corps

Cette gamme a été élaborée pour un Centre d'Usinage traditionnel, avec montage sur cube. Elle comporte un Traitement Thermique de trempe+revenu, suivi d'une Sous-Gamme de finition. Cette dernière est composée de 54 opérations Volumiques, regroupées en 2 phases. GAGMAT a appliqué et propagé pour celà 272 conseils, ce qui lui a pris 1 h 30 mn.

```
TRAITEMENT-THERMIQUE NO 1
=======================
  Type : TREMPE-REVENU

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

SOUS-GAMME NO 1
===============
     Type : FINITION
     Technologie : FRAISAGE
     Liste des VU associes :
          TROU1      TROU2D     TROU2C     TROU2B     TROU2A
          TROU3D     TROU3C     TROU3B     TROU3A     TROU4D
          TROU4C     TROU4B     TROU4A     TROU5D     TROU5C
          TROU5B     TROU5A     TROU6D     TROU6C     TROU6B
          TROU6A     TROU6H     TROU6G     TROU6F     TROU6E
          TROU7D     TROU7C     TROU7B     TROU7A     TROU8A
          TROU8B     TROU9D     TROU9C     TROU9B     TROU9A
          TROU10D    TROU10C    TROU10B    TROU10A    TROU11E
          TROU11D    TROU11C    TROU11B    TROU11A    TROU11J
          TROU11I    TROU11H    TROU11G    TROU11F    LAMAGE1D
          LAMAGE1C   LAMAGE1B   LAMAGE1A   LAMAGE2    RAINURE1
          RAINURE2   RAINURE3   POCHE1     POCHE2     ENTAILLE1
```

```
*****************************************************************************
PHASE NO 1
---------
Appui : (BOITE-Z--Y)
*****************************************************************************
      SOUS-PHASE NO 1
      --------------
      Machine : (CU1)
      ==================================================
            OPERATION NO 1                                                40
            --------------
            Outil : (O40000161)
            ------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : (RAINURE3 RAINURE2)
                  classe : EBAUCHE
                  type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
            ------------------------------------------------
            OPERATION NO 2                                                50
            --------------
            Outil : (O40000150 O40000151)
            ------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : (RAINURE3 RAINURE2)
                  classe : FINITION
                  type   : FINITION-DES-FLANCS
                  ........................................
                  OV 2                                                    60
                  ---
                  VU    : (RAINURE3 RAINURE2)
                  classe : FINITION
                  type   : FINITION-DU-FOND
            ------------------------------------------------
            OPERATION NO 3
            --------------
            Outil : (O40000088)
            ------------------------------------------------
                  OV 1                                                    70
                  ---
                  VU    : RAINURE1
                  classe : EBAUCHE
                  type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
                  ........................................
                  OV 2
                  ---
                  VU    : RAINURE1
                  classe : EBAUCHE
                  type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE                          80
            ------------------------------------------------
            OPERATION NO 4
            --------------
            Outil : (O40000043 O40000044 O40000045)
            ------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : RAINURE1
                  classe : FINITION
                  type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS                           90
                  ........................................
                  OV 2
                  ---
                  VU    : RAINURE1
                  classe : FINITION
                  type   : FINITION-DES-FLANCS
                  ........................................
                  OV 3
                  ---
                  VU    : RAINURE1                                       100
                  classe : FINITION
                  type   : FINITION-DU-FOND
            ------------------------------------------------
            OPERATION NO 5
            --------------
            Outil : (O40000195)
            ------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : ENTAILLE1                                     110
                  classe : FINITION
                  type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
```

```
-----------------------------------------------
OPERATION NO 6
--------------
Outil : (O40000468 O40000469 O40000470 O40000471)
-----------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : (TROU2D TROU2C TROU2B TROU2A)                    120
      classe : EBAUCHE
      type   : POINTER
      ........................................
      OV 2
      ---
      VU    : (TROU3D TROU3C TROU3B TROU3A)
      classe : EBAUCHE
      type   : POINTER
      ........................................
      OV 3                                                     130
      ---
      VU    : (TROU7D TROU7C TROU7B TROU7A)
      classe : EBAUCHE
      type   : POINTER
      ........................................
      OV 4
      ---
      VU    : (TROU9D TROU9C TROU9B TROU9A)
      classe : EBAUCHE
      type   : POINTER                                         140
      ........................................
      OV 5
      ---
      VU    : (TROU10D TROU10C TROU10B TROU10A)
      classe : EBAUCHE
      type   : POINTER
      ........................................
      OV 6
      ---
      VU    : (TROU11E TROU11D TROU11C TROU11B TROU11A)        150
      classe : EBAUCHE
      type   : POINTER
      ........................................
      OV 7
      ---
      VU    : (TROU11J TROU11I TROU11H TROU11G TROU11F)
      classe : EBAUCHE
      type   : POINTER
      ........................................
      OV 8                                                     160
      ---
      VU    : TROU8A
      classe : EBAUCHE
      type   : POINTER
      ........................................
      OV 9
      ---
      VU    : TROU8B
      classe : EBAUCHE
      type   : POINTER                                         170
-----------------------------------------------
OPERATION NO 7
--------------
Outil : (O40000664 O40000543)
-----------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : (TROU3D TROU3C TROU3B TROU3A)
      classe : FINITION
      type   : PERCER                                          180
      ........................................
      OV 2
      ---
      VU    : (TROU10D TROU10C TROU10B TROU10A)
      classe : FINITION
      type   : PERCER
-----------------------------------------------
OPERATION NO 8
--------------
Outil : (O40000658 O40000537)                                  190
-----------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : TROU8A
      classe : EBAUCHE
```

```
        type  : PERCER
        ..............................................
        OV 2
        ---
        VU    : TROU8B                                                    200
        classe : EBAUCHE
        type  : PERCER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 9
--------------
Outil : (O40000656 O40000657 O40000532 O40000533)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : (TROU11E TROU11D TROU11C TROU11B TROU11A)                 210
        classe : FINITION
        type  : PERCER
        ..............................................
        OV 2
        ---
        VU    : (TROU11J TROU11I TROU11H TROU11G TROU11F)
        classe : FINITION
        type  : PERCER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 10                                                           220
--------------
Outil : (O40000566 O40000959 O40000679 O40000678)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : (TROU7D TROU7C TROU7B TROU7A)
        classe : FINITION
        type  : PERCER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 11                                                           230
--------------
Outil : (O40000768)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU8A
        classe : FINITION
        type  : ALESER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 12                                                           240
--------------
Outil : (GRAIN258)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU8B
        classe : FINITION
        type  : ALESER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 13                                                           250
--------------
Outil : (O40000103)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : (LAMAGE1D LAMAGE1C LAMAGE1B LAMAGE1A)
        classe : FINITION
        type  : LAMER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 14                                                           260
--------------
Outil : (O40000553 O40000670)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : (TROU9D TROU9C TROU9B TROU9A)
        classe : FINITION
        type  : PERCER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 15                                                           270
--------------
Outil : (O40000527 O40000526 O40000653)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : (TROU2D TROU2C TROU2B TROU2A)
```

```
                    classe : FINITION
                    type   : PERCER
*****************************************************************************
PHASE NO 2                                                                  280
---------
Appui : (BOITE-Z+-X BOITE-Z--X)
*****************************************************************************
      SOUS-PHASE NO 1
      ---------------
      Machine : (CU1)
      ===============================================================
            OPERATION NO 1
            --------------
            Outil : (O40000076 O40000075 O40000074 O40000073)         290
            ---------------------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU     : POCHE1
                  classe : EBAUCHE
                  type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
                  ...........................
                  OV 2
                  ---
                  VU     : POCHE1                                     300
                  classe : EBAUCHE
                  type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
                  ...........................
                  OV 3
                  ---
                  VU     : POCHE2
                  classe : EBAUCHE
                  type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
                  ...........................
                  OV 4                                                 310
                  ---
                  VU     : POCHE2
                  classe : EBAUCHE
                  type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
            ---------------------------------------------------------------
            OPERATION NO 2
            --------------
            Outil : (O40000107 O40000108 O40000109)
            ---------------------------------------------------------------
                  OV 1                                                 320
                  ---
                  VU     : POCHE1
                  classe : FINITION
                  type   : PLONGEE-DES-ANGLES
                  ...........................
                  OV 2
                  ---
                  VU     : POCHE2
                  classe : FINITION
                  type   : PLONGEE-DES-ANGLES                          330
            ---------------------------------------------------------------
            OPERATION NO 3
            --------------
            Outil : (O40000024 O40000023 O40000022 O40000021)
            ---------------------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU     : POCHE1
                  classe : FINITION
                  type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS                        340
                  ...........................
                  OV 2
                  ---
                  VU     : POCHE1
                  classe : FINITION
                  type   : FINITION-DES-FLANCS
                  ...........................
                  OV 3
                  ---
                  VU     : POCHE1                                     350
                  classe : FINITION
                  type   : FINITION-DU-FOND
                  ...........................
                  OV 4
                  ---
                  VU     : POCHE2
                  classe : FINITION
                  type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
                  ...........................
                  OV 5                                                 360
```

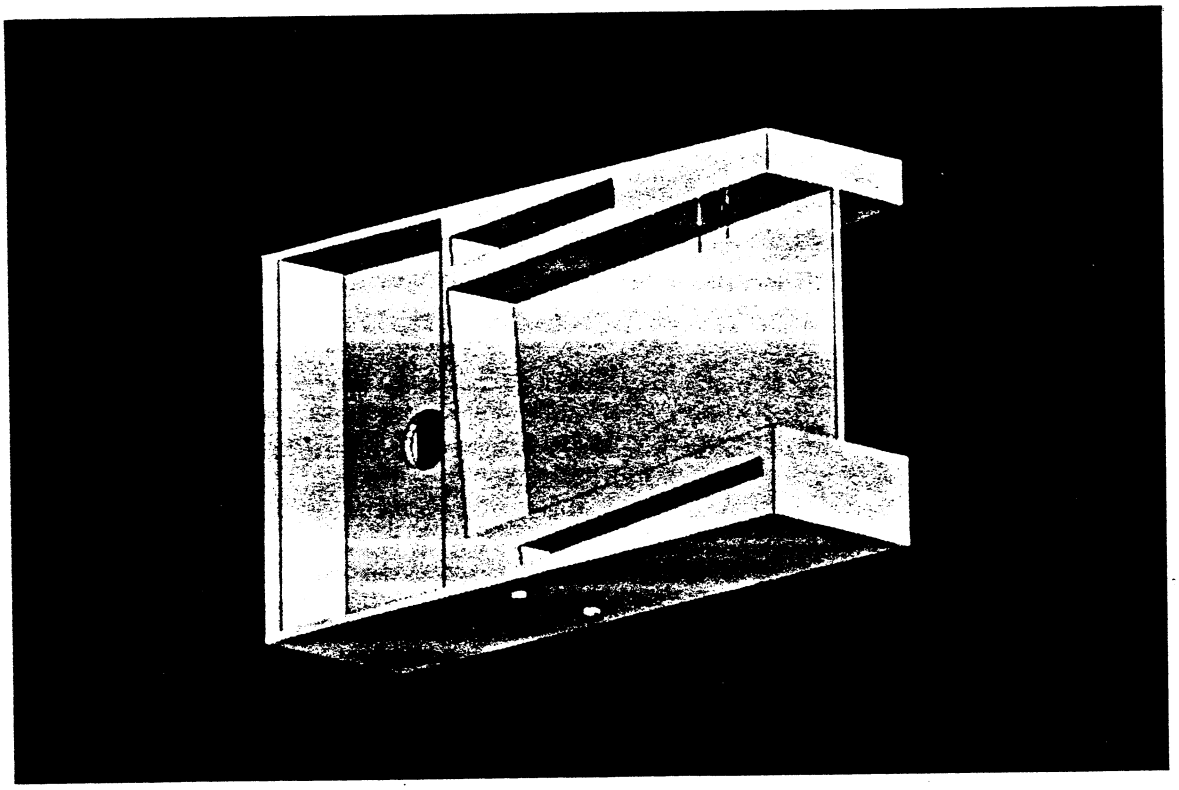
```
        ---
        VU    : POCHE2
        classe : FINITION
        type  : FINITION-DES-FLANCS
        ..........................................
        OV 6
        ---
        VU    : POCHE2
        classe : FINITION
        type  : FINITION-DU-FOND                                    370
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 4
--------------
Outil : (O40000471 O40000470 O40000469 O40000468)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : TROU1
        classe : EBAUCHE
        type  : POINTER                                             380
        ..........................................
        OV 2
        ---
        VU    : (TROU4D TROU4C TROU4B TROU4A)
        classe : EBAUCHE
        type  : POINTER
        ..........................................
        OV 3
        ---
        VU    : (TROU6D TROU6C TROU6B TROU6A)                       390
        classe : EBAUCHE
        type  : POINTER
        ..........................................
        OV 4
        ---
        VU    : (TROU6H TROU6G TROU6F TROU6E)
        classe : EBAUCHE
        type  : POINTER
        ..........................................
        OV 5                                                        400
        ---
        VU    : (TROU5D TROU5C TROU5B TROU5A)
        classe : EBAUCHE
        type  : POINTER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 5
--------------
Outil : (O40000693)
-------------------------------------------------------------
        OV 1                                                        410
        ---
        VU    : TROU1
        classe : FINITION
        type  : PERCER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 6
--------------
Outil : (O40000541 O40000540 O40000539 O40000662 O40000661 O40000660)
-------------------------------------------------------------
        OV 1                                                        420
        ---
        VU    : (TROU5D TROU5C TROU5B TROU5A)
        classe : EBAUCHE
        type  : PERCER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 7
--------------
Outil : (O40000656 O40000657 O40000532 O40000533)
-------------------------------------------------------------
        OV 1                                                        430
        ---
        VU    : (TROU6D TROU6C TROU6B TROU6A)
        classe : FINITION
        type  : PERCER
        ..........................................
        OV 2
        ---
        VU    : (TROU6H TROU6G TROU6F TROU6E)
        classe : FINITION
        type  : PERCER                                              440
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 8
```

```
--------------
Outil : (O40000543 O40000664)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : (TROU4D TROU4C TROU4B TROU4A)
      classe : FINITION
      type  : PERCER                                    450
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 9
--------------
Outil : (TARAUD307)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : (TROU5D TROU5C TROU5B TROU5A)
      classe : FINITION
      type  : TARAUDER                                  460
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 10
--------------
Outil : (O40000112)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : LAMAGE2
      classe : FINITION
      type  : LAMER                                     470
```

F

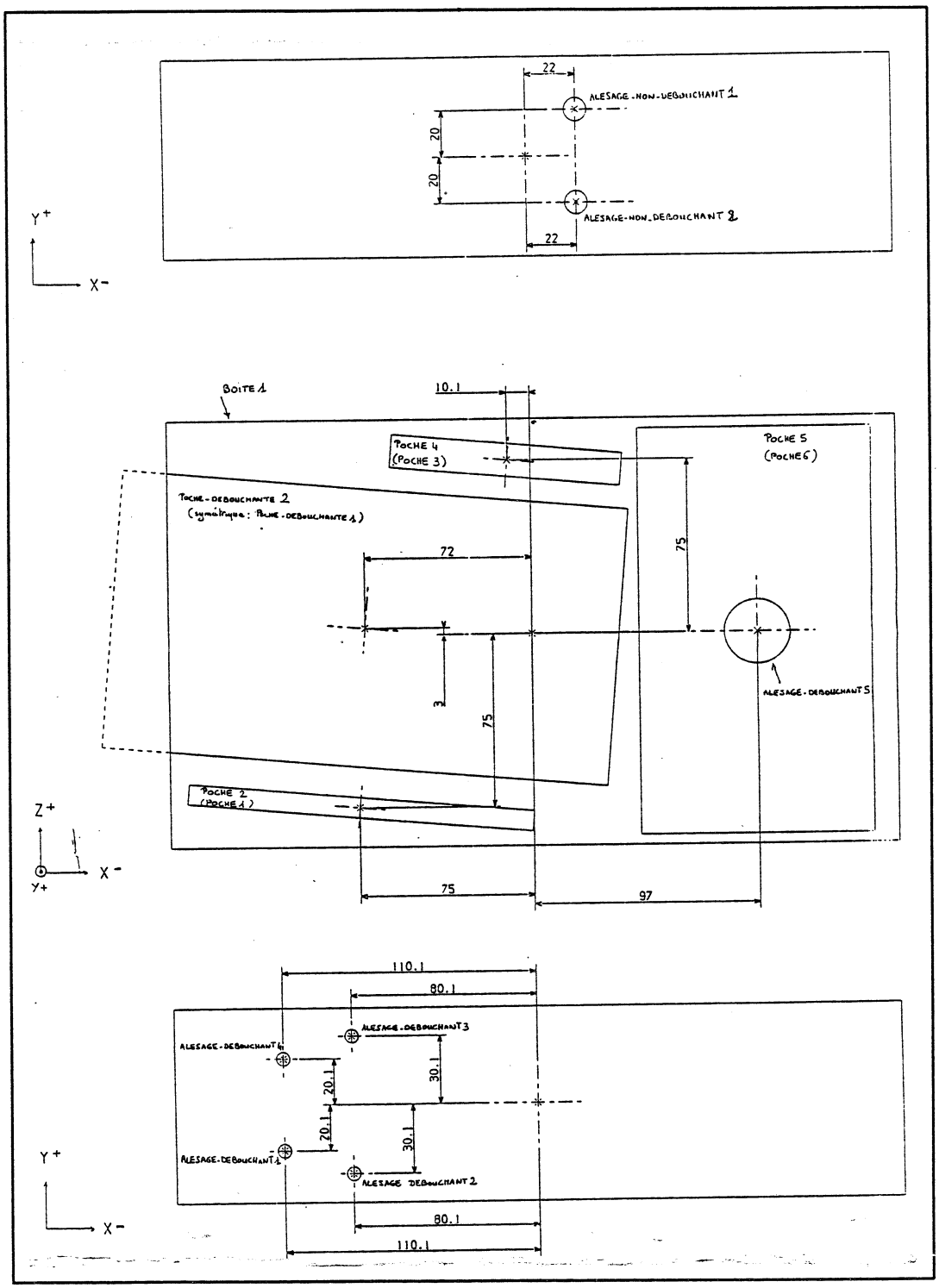
Annexe F

Le Tiroir



Le Tiroir
(image issue de DIMAT)

1 Les plans du Tiroir



2 Description

Cette pièce est moins complexe que les deux précédentes. Elle se compose de 16 VU, dont 15 sont à usiner. Après traitement préliminaire de la description, il n'y en a plus que 11, dont 2 super-VU.

```
(piece tiroir
      ( matiere acier)
      ( durete-initiale 60.10)
      ( durete-finale 60.10)
      ( Ra 6.0)
      ( type-piece parallelepipedique)
      ( LX 315.00)
      ( LY 85.00)
      ( LZ 185.00))
;.....................................................................
;                          boite1
;.....................................................................
(VU boite1
      (type boite)
      ( a-usiner non)
      ( matrice ( X+ Y+ Z+))
      ( Ra 6.0)
      ( longueur 315.00 -0.10)
      ( largeur 85.00 -0.10)
      ( hauteur 185.00 -0.10))
;.....................................................................
;                          poche6
;.....................................................................
(VU poche6
      (type poche)
      ( a-usiner oui)
      ( matrice ( X+ Z+ Y-))
      ( Ra 6.0)
      ( largeur 100.10 0.10)
      ( longueur 176.00 0.10)
      ( hauteur 40.10 0.10)
      ( R-contourne 6 -1))
(faces-collees-int (poche6 y-) (boite1 y-) )
(symetrie (poche6 z) (boite1 z) 0.10)
(distance-plan-plan (poche6 x) (boite1 x) -97.00 0.10)
;.....................................................................
;                          poche5
;.....................................................................
(VU poche5
      (type poche)
      ( a-usiner oui)
      ( matrice ( X+ Z- Y+ ))
      ( Ra 6.0)
      ( largeur 100.10 0.10)
      ( longueur 176.00 0.10)
      ( hauteur 40.10 0.10)
      ( R-contourne 6 -1))
(faces-collees-int (poche5 y+) (boite1 y+) )
(symetrie (poche5 z) (boite1 z) 0.10)
(distance-plan-plan (poche5 x) (boite1 x) -97.00 0.10)
;.....................................................................
;                          poche4
;.....................................................................
(VU poche4
      (type poche)
      ( a-usiner oui)
      ( matrice ( X+ Z- Y+))
      ( Ra 6.0)
      ( longueur 100.10 0.10)
```

```
      ( largeur 14.00 0.10)                                                    60
      ( hauteur 40.10 0.10)
      ( R-contourne 5.1 -1))
(faces-collees-int (poche4 y+) (boite1 y+) )
(distance-plan-plan (poche4 z) (boite1 z) 75.00 0.10)
(distance-plan-plan (poche4 x) (boite1 x) 10.10 0.10)
;.....................................................................
;                          poche3
;.....................................................................
(VU poche3
      (type poche)                                                             70
      ( a-usiner oui)
      ( matrice ( X+ Z+ Y-))
      ( Ra 6.0)
      ( longueur 100.10 0.10)
      ( largeur 14.00 0.10)
      ( hauteur 40.10 0.10)
      ( R-contourne 5.1 -1))
(faces-collees-int (poche3 y-) (boite1 y-) )
(distance-plan-plan (poche3 z) (boite1 z) 75.00 0.10)
(distance-plan-plan (poche3 x) (boite1 x) 10.10 0.10)                          80
;.....................................................................
;                          poche-debouchante2
;.....................................................................
(VU poche-debouchante2
      (type poche-debouchante)
      ( a-usiner oui)
      ( matrice ( X+ Z- Y+))
      ( Ra 6.0)
      ( longueur 220.10 0.10)
      ( largeur 120.10 0.10)                                                   90
      ( hauteur 40.10 0.10)
      ( R-contourne 14 -1))
(faces-collees-int (poche-debouchante2 y+) (boite1 y+) )
(distance-plan-plan (poche-debouchante2 x) (boite1 x) 72.00 0.10)
(distance-plan-plan (poche-debouchante2 z) (boite1 z) 3.00 0.10)
;.....................................................................
;                          poche-debouchante1
;.....................................................................
(VU poche-debouchante1
      (type poche-debouchante)                                                 100
      ( a-usiner oui)
      ( matrice ( X+ Z+ Y-))
      ( Ra 6.0)
      ( longueur 220.10 0.10)
      ( largeur 120.10 0.10)
      ( hauteur 40.10 0.10)
      ( R-contourne 14 -1))
(distance-plan-plan (poche-debouchante1 x) (boite1 x) 72.00 0.10)
(faces-collees-int (poche-debouchante1 y-) (boite1 y-) )
(distance-plan-plan (poche-debouchante1 z) (boite1 z) 3.00 0.10)                110
;.....................................................................
;                          poche2
;.....................................................................
(VU poche2
      (type poche)
      ( a-usiner oui)
      ( matrice ( X+ Z- Y+ ))
      ( Ra 6.0)
      ( longueur 150.10 0.10)
      ( largeur 9.00 0.10)                                                     120
      ( hauteur 40.10 0.10)
      ( R-contourne 3 -1))
(distance-plan-plan (poche2 z) (boite1 z) -75.00 0.10)
(faces-collees-int (poche2 y+) (boite1 y+) )
(distance-plan-plan (poche2 x) (boite1 x) 75.00 0.10)
;.....................................................................
;                          poche1
;.....................................................................
(VU poche1
```

```
        (type poche)                                                    130
        ( a-usiner oui)
        ( matrice ( X+ Z+ Y-))
        ( Ra 6.0)
        ( longueur 150.10 0.10)
        ( largeur 9.00 0.10)
        ( hauteur 40.10 0.10)
        ( R-contourne 3 -1))
(faces-collees-int (poche1 y-) (boite1 y-) )
(distance-plan-plan (poche1 z) (boite1 z) -75.00 0.10)
(distance-plan-plan (poche1 x) (boite1 x) 75.00 0.10)                   140
;.....................................................................
;                    alesage-debouchant5
;.....................................................................
(VU alesage-debouchant5
        (type alesage-debouchant)
        ( a-usiner oui)
        ( matrice ( X+ Z- Y+))
        ( Ra 6.0)
        ( diametre 28.00 0.10)
        ( longueur 5.00)                                                150
        ( debouche-dans poche6)
        (support (poche5 poche6)))
(faces-collees-ext (alesage-debouchant5 z+) (poche5 y-) )
(symetrie (alesage-debouchant5 y) (boite z) 0.10)
(faces-collees-ext (alesage-debouchant5 z-) (poche6 y+) )
(symetrie (alesage-debouchant5 x) (boite x) 0.10)
;.....................................................................
;                    alesage-non-debouchant2
;.....................................................................
(VU alesage-non-debouchant2                                             160
        (type alesage-non-debouchant)
        ( a-usiner oui)
        ( matrice ( X- Y+ Z-))
        ( Ra 6.0)
        ( diametre 10.10 0.10)
        ( longueur 20.10 0.10))
(distance-plan-face-int (alesage-non-debouchant2 y) (boite1 y+) 20.10 0.10)
(distance-plan-plan (alesage-non-debouchant2 x) (boite1 x) -22.00 0.10)
(distance-plan-face-int (alesage-non-debouchant2 z) (boite1 z-) 0.10 0.10)
;.....................................................................  170
;                    alesage-non-debouchant1
;.....................................................................
(VU alesage-non-debouchant1
        (type alesage-non-debouchant)
        ( a-usiner oui)
        ( matrice ( X- Y+ Z-))
        ( Ra 6.0)
        ( diametre 10.10 0.10)
        ( longueur 20.10 0.10))
(distance-plan-face-int (alesage-non-debouchant1 y) (boite1 y-) 20.10 0.10)  180
(distance-plan-plan (alesage-non-debouchant1 x) (boite1 x) -22.00 0.10)
(distance-plan-face-ext (alesage-non-debouchant1 z) (boite1 z-) 0.10 0.10)
;.....................................................................
;                    alesage-debouchant4
;.....................................................................
(VU alesage-debouchant4
        (type alesage-debouchant)
        ( a-usiner oui)
        ( matrice ( X+ Y+ Z+))
        ( Ra 6.0)                                                       190
        ( diametre 6.00 0.10)
        ( longueur 40.10)
        (debouche-dans poche-debouchante2))
(distance-plan-face-int (alesage-debouchant4 y) (boite1 y+) 20.10 0.10)
(distance-plan-plan (alesage-debouchant4 x) (boite1 x) 110.10 0.10)
(faces-collees-int (alesage-debouchant4 z+) (boite1 z+) )
;.....................................................................
;                    alesage-debouchant3
```

```
;.....................................................................
(VU alesage-debouchant3                                                  200
      (type alesage-debouchant)
      ( a-usiner oui)
      ( matrice ( X+ Y+ Z+))
      ( Ra 6.0)
      ( diametre 6.00 0.10)
      ( longueur 40.10)
      (debouche-dans poche-debouchante2))
(distance-plan-face-int (alesage-debouchant3 y) (boitel y+) 30.10 0.10)
(distance-plan-plan (alesage-debouchant3 x) (boitel x) 80.10 0.10)
(faces-collees-int (alesage-debouchant3 z+) (boitel z+) )               210
;.....................................................................
;                        alesage-debouchant2
;.....................................................................
(VU alesage-debouchant2
      (type alesage-debouchant)
      ( a-usiner oui)
      ( matrice ( X+ Y+ Z+))
      ( Ra 6.0)
      ( diametre 6.00 0.10)
      ( longueur 40.10)                                                  220
      (debouche-dans poche-debouchante1))
(distance-plan-face-int (alesage-debouchant2 y) (boitel y-) 30.10 0.10)
(faces-collees-int (alesage-debouchant2 z+) (boitel z+) )
(distance-plan-plan (alesage-debouchant2 x) (boitel x) 80.10 0.10)
;.....................................................................
;                        alesage-debouchant1
;.....................................................................
(VU alesage-debouchant1
      (type alesage-debouchant)
      ( a-usiner oui)                                                    230
      ( matrice ( X+ Y+ Z+))
      ( Ra 6.0)
      ( diametre 6.00 0.10)
      ( longueur 40.10)
      (debouche-dans poche-debouchante1))
(distance-plan-face-int (alesage-debouchant1 y) (boitel y-) 20.10 0.10)
(distance-plan-plan (alesage-debouchant1 x) (boitel x) 110.10 0.10)
(faces-collees-int (alesage-debouchant1 z+) (boitel z+) )
```

3 La Gamme générée pour un Centre d'Usinage

La gamme suivante est conçue pour un Centre d'Usinage traditionnel, avec montage sur cube. Elle est composée d'une seule Sous-Gamme, et il n'y a pas de Traitement Thermique. 54 Opérations Volumiques ont été générées lors de la phase Initialisation. Celles-ci sont regroupées en 3 phases : deux pour usiner chacune des poches débouchantes, où l'orientation du montage correspond au sens où elles débouchent ; une autre pour pouvoir usiner les OV qui n'ont pas pu l'être lors des deux phases précédentes, pour des questions d'accessibilité. GAGMAT a appliqué 108 conseils pour générer cette gamme, et a mis un trentaine de minutes.

SOUS-GAMME NO 1

Type : FINITION
Technologie : FRAISAGE
Liste des VU associes :

```
        ALESAGE-DEBOUCHANT4      ALESAGE-DEBOUCHANT3
        ALESAGE-DEBOUCHANT2      ALESAGE-DEBOUCHANT1
        ALESAGE-NON-DEBOUCHANT2  ALESAGE-NON-DEBOUCHANT1
        ALESAGE-DEBOUCHANT5      POCHE1          POCHE2
        POCHE-DEBOUCHANTE1       POCHE-DEBOUCHANTE2
        POCHE3     POCHE4     POCHE5     POCHE6
*****************************************************************************
PHASE NO 1
---------
Appui : (BOITE1-Y+-X)
*****************************************************************************
    SOUS-PHASE NO 1
    --------------
    Machine : (CU1)
    ===============================================
        OPERATION NO 1
        --------------
        Outil : (O40000085 O40000086)
        ---------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : POCHE-DEBOUCHANTE1
            classe : EBAUCHE
            type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
            ........................................
            OV 2
            ---
            VU    : POCHE-DEBOUCHANTE1
            classe : EBAUCHE
            type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
        ---------------------------------------------
        OPERATION NO 2
        --------------
        Outil : (O40000118)
        ---------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : POCHE-DEBOUCHANTE1
            classe : FINITION
            type   : PLONGEE-DES-ANGLES
            ........................................
            OV 2
            ---
            VU    : POCHE6
            classe : EBAUCHE
            type   : PERCAGE
        ---------------------------------------------
        OPERATION NO 3
        --------------
        Outil : (O40000079 O40000080 O40000081 O40000082)
        ---------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : POCHE6
            classe : EBAUCHE
            type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
            ........................................
            OV 2
            ---
            VU    : POCHE6
            classe : EBAUCHE
            type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
        ---------------------------------------------
        OPERATION NO 4
        --------------
        Outil : (O40000109)
        ---------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : POCHE3
            classe : EBAUCHE
            type   : PERCAGE
            ........................................
            OV 2
            ---
            VU    : POCHE6
            classe : FINITION
            type   : PLONGEE-DES-ANGLES
        ---------------------------------------------
        OPERATION NO 5
        --------------
```

```
Outil : (O40000022 O40000024)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : POCHE6
      classe : FINITION
      type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
      ........................................
      OV 2
      ---                                                100
      VU    : POCHE6
      classe : FINITION
      type   : FINITION-DU-FOND
      ........................................
      OV 3
      ---
      VU    : POCHE6
      classe : FINITION
      type   : FINITION-DES-FLANCS
----------------------------------------------------- 110
OPERATION NO 6
--------------
Outil : (O40000039 O40000032 O40000033 O40000034)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : POCHE-DEBOUCHANTE1
      classe : FINITION
      type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
      ........................................           120
      OV 2
      ---
      VU    : POCHE-DEBOUCHANTE1
      classe : FINITION
      type   : FINITION-DU-FOND
      ........................................
      OV 3
      ---
      VU    : POCHE-DEBOUCHANTE1
      classe : FINITION                                  130
      type   : FINITION-DES-FLANCS
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 7
--------------
Outil : (ONS0001)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : POCHE1
      classe : FINITION                                  140
      type   : PERCAGE
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 8
--------------
Outil : (ONS0021)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : POCHE1
      classe : FINITION                                  150
      type   : 1/2-FIN-FLANCS-FIN-FOND
      ........................................
      OV 2
      ---
      VU    : POCHE1
      classe : FINITION
      type   : FINITION-DES-FLANCS
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 9
--------------                                           160
Outil : (O40000070)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : POCHE3
      classe : EBAUCHE
      type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 10
--------------                                           170
Outil : (O40000106)
-----------------------------------------------------
      OV 1
```

```
                    ---
                    VU    : POCHE3
                    classe : FINITION
                    type   : PLONGEE-DES-ANGLES
              ----------------------------------------------
              OPERATION NO 11
              ---------------                                    180
              Outil : (O40000020)
              ----------------------------------------------
                    OV 1
                    ---
                    VU    : POCHE3
                    classe : FINITION
                    type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
                    ........................................
                    OV 2
                    ---                                          190
                    VU    : POCHE3
                    classe : FINITION
                    type   : FINITION-DU-FOND
                    ........................................
                    OV 3
                    ---
                    VU    : POCHE3
                    classe : FINITION
                    type   : FINITION-DES-FLANCS
*****************************************************************************************  200
PHASE NO 2
----------
Appui : (POCHE-DEBOUCHANTE1-Y--X POCHE6-Y--X BOITE1-Y--X)
*****************************************************************************************
      SOUS-PHASE NO 1
      ---------------
      Machine : (CU1)
      ==============================================
              OPERATION NO 1
              --------------                                     210
              Outil : (O40000085 O40000086)
              ----------------------------------------------
                    OV 1
                    ---
                    VU    : POCHE-DEBOUCHANTE2
                    classe : EBAUCHE
                    type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
                    ........................................
                    OV 2
                    ---                                          220
                    VU    : POCHE-DEBOUCHANTE2
                    classe : EBAUCHE
                    type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
              ----------------------------------------------
              OPERATION NO 2
              --------------
              Outil : (O40000118)
              ----------------------------------------------
                    OV 1
                    ---                                          230
                    VU    : POCHE-DEBOUCHANTE2
                    classe : FINITION
                    type   : PLONGEE-DES-ANGLES
                    ........................................
                    OV 2
                    ---
                    VU    : POCHE5
                    classe : EBAUCHE
                    type   : PERCAGE
              ----------------------------------------------  240
              OPERATION NO 3
              --------------
              Outil : (O40000079 O40000080 O40000081 O40000082)
              ----------------------------------------------
                    OV 1
                    ---
                    VU    : POCHE5
                    classe : EBAUCHE
                    type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
                    ........................................     250
                    OV 2
                    ---
                    VU    : POCHE5
                    classe : EBAUCHE
                    type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
              ----------------------------------------------
```

OPERATION NO 4

Outil : (O40000109)

OV 1

VU : POCHE4
classe : EBAUCHE
type : PERCAGE
.....
OV 2

VU : POCHE5
classe : FINITION
type : PLONGEE-DES-ANGLES

OPERATION NO 5

Outil : (O40000022 O40000024)

OV 1

VU : POCHE5
classe : FINITION
type : CALIBRAGE-DES-FLANCS
.....
OV 2

VU : POCHE5
classe : FINITION
type : FINITION-DU-FOND
.....
OV 3

VU : POCHE5
classe : FINITION
type : FINITION-DES-FLANCS

OPERATION NO 6

Outil : (O40000039 O40000032 O40000033 O40000034)

OV 1

VU : POCHE-DEBOUCHANTE2
classe : FINITION
type : CALIBRAGE-DES-FLANCS
.....
OV 2

VU : POCHE-DEBOUCHANTE2
classe : FINITION
type : FINITION-DU-FOND
.....
OV 3

VU : POCHE-DEBOUCHANTE2
classe : FINITION
type : FINITION-DES-FLANCS

OPERATION NO 7

Outil : (ONS0001)

OV 1

VU : POCHE2
classe : FINITION
type : PERCAGE

OPERATION NO 8

Outil : (ONS0021)

OV 1

VU : POCHE2
classe : FINITION
type : 1/2-FIN-FLANCS-FIN-FOND
.....
OV 2

VU : POCHE2

```
        classe : FINITION                                          340
        type   : FINITION-DES-FLANCS
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 9
--------------
Outil : (O40000070)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : POCHE4
        classe : EBAUCHE                                           350
        type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 10
--------------
Outil : (O40000106)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : POCHE4
        classe : FINITION                                          360
        type   : PLONGEE-DES-ANGLES
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 11
--------------
Outil : (O40000020)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU     : POCHE4
        classe : FINITION                                          370
        type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
        ..............................................
        OV 2
        ---
        VU     : POCHE4
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DU-FOND
        ..............................................
        OV 3
        ---                                                        380
        VU     : POCHE4
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DES-FLANCS
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 12
--------------
Outil : (O40000471 O40000470 O40000469 O40000468)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---                                                        390
        VU     : ALESAGE-DEBOUCHANT5
        classe : EBAUCHE
        type   : POINTER
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 13
--------------
Outil : (O40000500 O40000499 O40000498 O40000497 O40000643 O40000642
         O40000641 O40000640 O40000701 O40000709 O40000708 O40000707
         O40000706)
------------------------------------------------------------- 400
        OV 1
        ---
        VU     : ALESAGE-DEBOUCHANT5
        classe : EBAUCHE
        type   : PERCER1
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 14
--------------
Outil : (O40000727 O40000726)
------------------------------------------------------------- 410
        OV 1
        ---
        VU     : ALESAGE-DEBOUCHANT5
        classe : EBAUCHE
        type   : PERCER2
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 15
--------------
Outil : (O40000827)
------------------------------------------------------------- 420
```

```
                OV 1
                ---
                VU    : ALESAGE-DEBOUCHANT5
                classe : FINITION
                type   : ALESER
*****************************************************************************************
PHASE NO 3
---------
Appui : (POCHE-DEBOUCHANTE1-Y--Z POCHE-DEBOUCHANTE2-Y+-Z
         POCHE5-Y+-Z POCHE6-Y--Z BOITE1-Y+-Z BOITE1-Y--Z)                          430
*****************************************************************************************
      SOUS-PHASE NO 1
      ---------------
      Machine : (CU1)
      ===============================================================
            OPERATION NO 1
            --------------
            Outil : (O40000468 O40000469 O40000470 O40000471)
            ---------------------------------------------------------
                  OV 1                                                              440
                  ---
                  VU    : (ALESAGE-DEBOUCHANT4 ALESAGE-DEBOUCHANT3
                           ALESAGE-DEBOUCHANT2 ALESAGE-DEBOUCHANT1)
                  classe : EBAUCHE
                  type   : POINTER
                  ..............................................
                  OV 2
                  ---
                  VU    : (ALESAGE-NON-DEBOUCHANT2
                           ALESAGE-NON-DEBOUCHANT1)                                 450
                  classe : EBAUCHE
                  type   : POINTER
            ---------------------------------------------------------
            OPERATION NO 2
            --------------
            Outil : (O40000483 O40000607 O40000606 O40000605 O40000604 O40000603
                     O40000690)
            ---------------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---                                                               460
                  VU    : (ALESAGE-NON-DEBOUCHANT2
                           ALESAGE-NON-DEBOUCHANT1)
                  classe : EBAUCHE
                  type   : PERCER
            ---------------------------------------------------------
            OPERATION NO 3
            --------------
            Outil : (O40000568 O40000567 O40000566 O40000680 O40000679)
            ---------------------------------------------------------
                  OV 1                                                              470
                  ---
                  VU    : (ALESAGE-DEBOUCHANT4 ALESAGE-DEBOUCHANT3
                           ALESAGE-DEBOUCHANT2 ALESAGE-DEBOUCHANT1)
                  classe : EBAUCHE
                  type   : PERCER
            ---------------------------------------------------------
            OPERATION NO 4
            --------------
            Outil : (O40000774)
            --------------------------------------------------------- 480
                  OV 1
                  ---
                  VU    : (ALESAGE-DEBOUCHANT4 ALESAGE-DEBOUCHANT3
                           ALESAGE-DEBOUCHANT2 ALESAGE-DEBOUCHANT1)
                  classe : FINITION
                  type   : ALESER
            ---------------------------------------------------------
            OPERATION NO 5
            --------------
            Outil : (O40000781)                                                     490
            ---------------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : (ALESAGE-NON-DEBOUCHANT2
                           ALESAGE-NON-DEBOUCHANT1)
                  classe : FINITION
                  type   : ALESER
```

4 La Gamme générée pour un atelier traditionnel

Voici maintenant la gamme dans le cas d'un atelier traditionnel. On y trouve 4 phases, puisqu'il existe des VU suivant quatre axes différents. GAGMAT a appliqué pour celà 417 conseils et mis une heure. Le nombre de conseils est beaucoup plus important que pour la gamme précédente. Ceci provient du fait que les règles de la troisième phase de contrainte raisonnent sur chaque OV élémentaire, notamment en ce qui concerne leur regroupement dans les sous-phases ; les machines peuvent en effet être différentes pour des OV appartenant à un même Processus d'Usinage, ce qui n'est pas le cas lorsqu'un CU est utilisé (les règles considèrent dans ce cas-là des groupes d'OV).

```
SOUS-GAMME NO 1
===============
    Type : FINITION
    Technologie : FRAISAGE
    Liste des VU associes :
        ALESAGE-DEBOUCHANT4      ALESAGE-DEBOUCHANT3
        ALESAGE-DEBOUCHANT2      ALESAGE-DEBOUCHANT1
        ALESAGE-NON-DEBOUCHANT2  ALESAGE-NON-DEBOUCHANT1
        ALESAGE-DEBOUCHANT5      POCHE1        POCHE2
        POCHE-DEBOUCHANTE1       POCHE-DEBOUCHANTE2
        POCHE3     POCHE4     POCHE5     POCHE6
*******************************************************************************
PHASE NO 1
---------
Appui : (BOITE1-Y+-X BOITE1-Y+-Z)
*******************************************************************************
     SOUS-PHASE NO 1
     --------------
     Machine : (FRAISEUSE-VERT)
     ==========================================================
          OPERATION NO 1
          --------------
          Outil : (O40000085 O40000086)
          ---------------------------------------------------
               OV 1
               ---
               VU    : POCHE-DEBOUCHANTE1
               classe : EBAUCHE
               type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
               ..........................................
               OV 2
               ---
               VU    : POCHE-DEBOUCHANTE1
               classe : EBAUCHE
               type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
          ---------------------------------------------------
          OPERATION NO 2
          --------------
          Outil : (O40000118)
          ---------------------------------------------------
               OV 1
               ---
               VU    : POCHE-DEBOUCHANTE1
               classe : FINITION
               type   : PLONGEE-DES-ANGLES
               ..........................................
               OV 2
               ---
               VU    : POCHE6
               classe : EBAUCHE
               type   : PERCAGE
          ---------------------------------------------------
          OPERATION NO 3
          --------------
          Outil : (O40000079 O40000080 O40000081 O40000082)
          ---------------------------------------------------
               OV 1
```

```
        ---
        VU    : POCHE6
        classe : EBAUCHE
        type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
        ..........................................
        OV 2
        ---
        VU    : POCHE6
        classe : EBAUCHE                                          70
        type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 4
--------------
Outil : (O40000109)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE3
        classe : EBAUCHE                                          80
        type   : PERCAGE
        ..........................................
        OV 2
        ---
        VU    : POCHE6
        classe : FINITION
        type   : PLONGEE-DES-ANGLES
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 5
--------------                                                    90
Outil : (O40000022 O40000024)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE6
        classe : FINITION
        type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
        ..........................................
        OV 2
        ---                                                      100
        VU    : POCHE6
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DU-FOND
        ..........................................
        OV 3
        ---
        VU    : POCHE6
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DES-FLANCS
-------------------------------------------------------------- 110
OPERATION NO 6
--------------
Outil : (O40000039 O40000032 O40000033 O40000034)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE-DEBOUCHANTE1
        classe : FINITION
        type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
        ..........................................            120
        OV 2
        ---
        VU    : POCHE-DEBOUCHANTE1
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DU-FOND
        ..........................................
        OV 3
        ---
        VU    : POCHE-DEBOUCHANTE1
        classe : FINITION                                        130
        type   : FINITION-DES-FLANCS
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 7
--------------
Outil : (ONS0001)
-------------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE1
        classe : FINITION                                        140
        type   : PERCAGE
-------------------------------------------------------------
OPERATION NO 8
--------------
```

```
            Outil : (ONS0021)
            ---------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : POCHE1
                  classe : FINITION                                    150
                  type   : 1/2-FIN-FLANCS-FIN-FOND
                  ..............................
                  OV 2
                  ---
                  VU    : POCHE1
                  classe : FINITION
                  type   : FINITION-DES-FLANCS
            ---------------------------------------------------
            OPERATION NO 9
            --------------                                             160
            Outil : (O40000070)
            ---------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : POCHE3
                  classe : EBAUCHE
                  type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
            ---------------------------------------------------
            OPERATION NO 10
            ---------------                                            170
            Outil : (O40000106)
            ---------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : POCHE3
                  classe : FINITION
                  type   : PLONGEE-DES-ANGLES
            ---------------------------------------------------
            OPERATION NO 11
            ---------------                                            180
            Outil : (O40000020)
            ---------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : POCHE3
                  classe : FINITION
                  type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
                  ..............................
                  OV 2
                  ---                                                  190
                  VU    : POCHE3
                  classe : FINITION
                  type   : FINITION-DU-FOND
                  ..............................
                  OV 3
                  ---
                  VU    : POCHE3
                  classe : FINITION
                  type   : FINITION-DES-FLANCS
*****************************************************************************200
PHASE NO 2
----------
Appui : (BOITE1-Y--X BOITE1-Y--Z)
*****************************************************************************
      SOUS-PHASE NO 1
      ---------------
      Machine : (FRAISEUSE-VERT)
      ==================================================
            OPERATION NO 1
            --------------                                             210
            Outil : (O40000085 O40000086)
            ---------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : POCHE-DEBOUCHANTE2
                  classe : EBAUCHE
                  type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
                  ..............................
                  OV 2
                  ---                                                  220
                  VU    : POCHE-DEBOUCHANTE2
                  classe : EBAUCHE
                  type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
            ---------------------------------------------------
            OPERATION NO 2
            --------------
```

```
Outil : (O40000118)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : POCHE-DEBOUCHANTE2
      classe : FINITION
      type   : PLONGEE-DES-ANGLES
      ..............................................
      OV 2
      ---
      VU    : POCHE5
      classe : EBAUCHE
      type   : PERCAGE
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 3
--------------
Outil : (O40000079 O40000080 O40000081 O40000082)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : POCHE5
      classe : EBAUCHE
      type   : EBAUCHE-DANS-L-AXE
      ..............................................
      OV 2
      ---
      VU    : POCHE5
      classe : EBAUCHE
      type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 4
--------------
Outil : (O40000109)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : POCHE4
      classe : EBAUCHE
      type   : PERCAGE
      ..............................................
      OV 2
      ---
      VU    : POCHE5
      classe : FINITION
      type   : PLONGEE-DES-ANGLES
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 5
--------------
Outil : (O40000022 O40000024)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : POCHE5
      classe : FINITION
      type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
      ..............................................
      OV 2
      ---
      VU    : POCHE5
      classe : FINITION
      type   : FINITION-DU-FOND
      ..............................................
      OV 3
      ---
      VU    : POCHE5
      classe : FINITION
      type   : FINITION-DES-FLANCS
-----------------------------------------------------
OPERATION NO 6
--------------
Outil : (O40000039 O40000032 O40000033 O40000034)
-----------------------------------------------------
      OV 1
      ---
      VU    : POCHE-DEBOUCHANTE2
      classe : FINITION
      type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
      ..............................................
      OV 2
      ---
      VU    : POCHE-DEBOUCHANTE2
      classe : FINITION
      type   : FINITION-DU-FOND
```

```
                                                                    310
        ..............................
        OV 3
        ---
        VU    : POCHE-DEBOUCHANTE2
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DES-FLANCS
    ----------------------------------------------------------
    OPERATION NO 7
    --------------
    Outil : (ONS0001)
    ---------------------------------------------------------- 320
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE2
        classe : FINITION
        type   : PERCAGE
    ----------------------------------------------------------
    OPERATION NO 8
    --------------
    Outil : (ONS0021)
    ---------------------------------------------------------- 330
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE2
        classe : FINITION
        type   : 1/2-FIN-FLANCS-FIN-FOND
        ..............................
        OV 2
        ---
        VU    : POCHE2
        classe : FINITION                                           340
        type   : FINITION-DES-FLANCS
    ----------------------------------------------------------
    OPERATION NO 9
    --------------
    Outil : (O40000070)
    ----------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE4
        classe : EBAUCHE                                            350
        type   : ENLEVEMENT-DE-MATIERE
    ----------------------------------------------------------
    OPERATION NO 10
    ---------------
    Outil : (O40000106)
    ----------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE4
        classe : FINITION                                           360
        type   : PLONGEE-DES-ANGLES
    ----------------------------------------------------------
    OPERATION NO 11
    ---------------
    Outil : (O40000020)
    ----------------------------------------------------------
        OV 1
        ---
        VU    : POCHE4
        classe : FINITION                                           370
        type   : CALIBRAGE-DES-FLANCS
        ..............................
        OV 2
        ---
        VU    : POCHE4
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DU-FOND
        ..............................
        OV 3
        ---                                                         380
        VU    : POCHE4
        classe : FINITION
        type   : FINITION-DES-FLANCS
==========================================================
SOUS-PHASE NO 2
---------------
Machine : (PERCEUSE-VERT)
==========================================================
    OPERATION NO 1
    --------------                                                  390
    Outil : (O40000471 O40000470 O40000469 O40000468)
    ----------------------------------------------------------
```

```
            OV 1
            ---
            VU    : ALESAGE-DEBOUCHANT5
            classe : EBAUCHE
            type   : POINTER
        ----------------------------------------------------
        OPERATION NO 2
        --------------                                          400
        Outil : (O40000500 O40000499 O40000498 O40000497 O40000643 O40000642
                 O40000641 O40000640 O40000701 O40000709 O40000708 O40000707
                 O40000706)
        ----------------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : ALESAGE-DEBOUCHANT5
            classe : EBAUCHE
            type   : PERCER1
        ---------------------------------------------------- 410
        OPERATION NO 3
        --------------
        Outil : (O40000727 O40000726)
        ----------------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : ALESAGE-DEBOUCHANT5
            classe : EBAUCHE
            type   : PERCER2
        ---------------------------------------------------- 420
        OPERATION NO 4
        --------------
        Outil : (O40000827)
        ----------------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : ALESAGE-DEBOUCHANT5
            classe : FINITION
            type   : ALESER
*****************************************************************************************430
PHASE NO 3
----------
Appui : (BOITE1-Y+-Z BOITE1-Y+-X BOITE1-Y--Z BOITE1-Y--X)
*****************************************************************************************
    SOUS-PHASE NO 1
    ---------------
    Machine : (PERCEUSE-HOR)
    ====================================================
        OPERATION NO 1
        --------------                                          440
        Outil : (O40000468 O40000469 O40000470 O40000471)
        ----------------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : (ALESAGE-NON-DEBOUCHANT2
                     ALESAGE-NON-DEBOUCHANT1)
            classe : EBAUCHE
            type   : POINTER
        ----------------------------------------------------
        OPERATION NO 2                                          450
        --------------
        Outil : (O40000483 O40000607 O40000606 O40000605 O40000604 O40000603
                 O40000690)
        ----------------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : (ALESAGE-NON-DEBOUCHANT2
                     ALESAGE-NON-DEBOUCHANT1)
            classe : EBAUCHE
            type   : PERCER                                     460
        ----------------------------------------------------
        OPERATION NO 3
        --------------
        Outil : (O40000781)
        ----------------------------------------------------
            OV 1
            ---
            VU    : (ALESAGE-NON-DEBOUCHANT2
                     ALESAGE-NON-DEBOUCHANT1)
            classe : FINITION                                   470
            type   : ALESER
```

```
*****************************************************************************************
PHASE NO 4
---------
Appui : (BOITE1-Y+-Z BOITE1-Y+-X BOITE1-Y--Z BOITE1-Y--X)
*****************************************************************************************
      SOUS-PHASE NO 1
      ---------------
      Machine : (PERCEUSE-HOR)
      ================================================================ 480
            OPERATION NO 1
            --------------
            Outil : (O40000468 O40000469 O40000470 O40000471)
            ------------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : (ALESAGE-DEBOUCHANT4 ALESAGE-DEBOUCHANT3
                           ALESAGE-DEBOUCHANT2 ALESAGE-DEBOUCHANT1)
                  classe : EBAUCHE
                  type   : POINTER                                   490
            ------------------------------------------------------
            OPERATION NO 2
            --------------
            Outil : (O40000679 O40000680 O40000566 O40000567 O40000568)
            ------------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : (ALESAGE-DEBOUCHANT4 ALESAGE-DEBOUCHANT3
                           ALESAGE-DEBOUCHANT2 ALESAGE-DEBOUCHANT1)
                  classe : EBAUCHE                                   500
                  type   : PERCER
            ------------------------------------------------------
            OPERATION NO 3
            --------------
            Outil : (O40000774)
            ------------------------------------------------------
                  OV 1
                  ---
                  VU    : (ALESAGE-DEBOUCHANT4 ALESAGE-DEBOUCHANT3
                           ALESAGE-DEBOUCHANT2 ALESAGE-DEBOUCHANT1)   510
                  classe : FINITION
                  type   : ALESER
```

G

Annexe G

Exemples d'amendement de gamme

Nous donnons ici deux exemples d'amendement de gamme, l'un à **effet local** et l'autre à **effet global**.

1 La pièce traitée

Il s'agit d'une pièce simple, de type parallélépipédique (appelée *boîte)* dans laquelle il faut usiner 4 entités : *poche1, trou1, trou2* et *lamage1* (cf. figure G.1).

2 Première gamme générée

Voici la séquence des décisions appliquées pour engendrer la première gamme :

cœf	poids	contrainte
9	9	*(appui (première-ov poche1) (boîte_Z-_X boîte_Z+_X boîte_Y-_X boîte_Y+_X))*
9	9	*(même-sous-phase (première-ov trou1) (dernière-ov trou1))*
9	9	*(même-sous-phase (première-ov trou2) (dernière-ov trou2))*
9	9	*(même-sous-phase (première-ov poche1) (dernière-ov poche1))*
9	9	*(même-phase (première-ov trou1) (première-ov lamage1))*
8	8	*(avant (dernière-ov trou1) (première-ov lamage1))*
8	8	*(même-phase (première-ov lamage1) (première-ov trou1))*
8	8	*(appui (première-ov poche1) (boîte_Z-_Y boîte_Z-_X))*
7	7	*(même-phase (première-ov poche1) (première-ov trou1))*
∞		*(non (même-phase (première-ov trou2) (première-ov trou1)))*
∞		*(non (même-phase (première-ov trou2) (première-ov poche1)))*

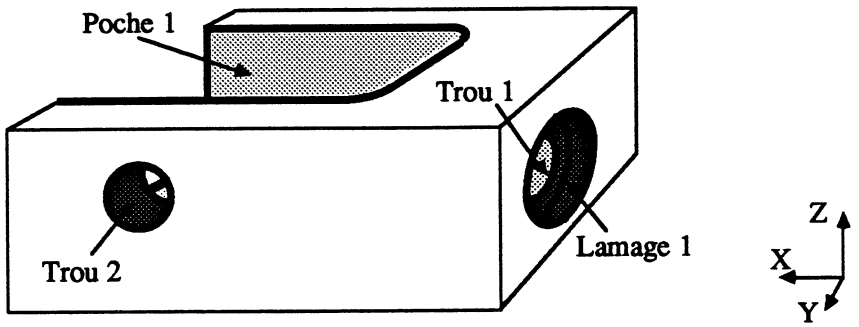


Figure G.1 : La pièce traitée

7	*5*	*(même-sous-phase (première-ov lamage1) (première-ov poche1))*
7	*5*	*(même-sous-phase (première-ov trou1) (première-ov poche1))*
7	*5*	*(même-sous-phase (première-ov trou1) (première-ov lamage1))*
7	*3*	*(même-opération OV11 OV12)*
7	*3*	*(même-opération OV13 OV14)*
7	*3*	*(même-opération OV13 OV15)*
7	*3*	*(même-opération OV14 OV15))*

La gamme proposée est alors la suivante :

Phase 1 :	boite_Z-_X			
	Sous-phase 1 :	Centre-Usinage		
		Operation 1 :	{fraise12, fraise13}	
			OV ebauche ebauche-dans-axe	poche1
			OV ebauche enlevement-matiere	poche1
		Operation 2 :	foret-a-pointer	
			OV ebauche pointer	trou1
		Operation 3 :	{foret15 foret16}	
			OV ebauche percer	trou1
		Operation 4 :	alesoir8	
			OV finition aleser	trou1
		Operation 5 :	fcc4	
			OV finition lamer	lamage1
		Operation 6 :	{fraise21, fraise22}	
			OV finition calibrage-flancs	poche1
			OV finition finition-flancs	poche1
			OV finition finition-fond	poche1
Phase 2 :	{boite_Z-_Y, boite_Z+_Y, boite_Y-_X, boite_Y-_Z}			
	Sous-phase 1 :	Centre-Usinage		
		Operation 1 :	foret-a-pointer	
			OV ebauche pointer	trou2
		Operation 2 :	{foret16, foret17}	
			OV ebauche percer	trou2
		Operation 3 :	grain23	
			OV finition aleser	trou2

3 Amendement à effet local

Première remarque à propos de la gamme proposée, les OV qui concernent l'usinage de la *poche1* sont regroupées en deux opérations qui ne sont pas en séquence dans la première phase. Un expert peut désirer les exécuter à la suite l'une de l'autre, i.e. exécuter la première OV de la *poche1* après l'OV du *lamage1*. Cette remarque peut se traduire sous la forme de la contrainte suivante :

(p (avant (ov lamer lamage1) (première-ov poche1)))

Elle est appliquée à la suite des autres décisions de SDA. Il n'y a pas de contradiction car ces deux OV n'avaient encore aucune contrainte d'ordonnancement entre elles. Le système propose donc immédiatement une nouvelle solution :

Phase 1 :	boite_Z-_X			
	Sous-phase 1 :	Centre-Usinage		
		Operation 1 :	foret-a-pointer	
			OV ebauche pointer	trou1
		Operation 2 :	{foret15 foret16}	
			OV ebauche percer	trou1
		Operation 3 :	alesoir8	
			OV finition aleser	trou1
		Operation 4 :	fcc4	
			OV finition lamer	lamage1
		Operation 5 :	{fraise12, fraise13}	
			OV ebauche ebauche-dans-axe	poche1
			OV ebauche enlevement-matiere	poche1
		Operation 6 :	{fraise21, fraise22}	
			OV finition calibrage-flancs	poche1
			OV finition finition-flancs	poche1
			OV finition finition-fond	poche1
Phase 2 :	{boite_Z-_Y, boite_Z+_Y, boite_Y-_X, boite_Y-_Z}			
	Sous-phase 1 :	Centre-Usinage		
		Operation 1 :	foret-a-pointer	
			OV ebauche pointer	trou2
		Operation 2 :	{foret16, foret17}	
			OV ebauche percer	trou2
		Operation 3 :	grain23	
			OV finition aleser	trou2

4 Amendement à effet global

Le *lamage1*, très proche de la face Z- de la *boîte*, est usiné en s'appuyant sur celle-ci (boîte_Z-_X). L'ablocage correspondant est donc difficile à réaliser, et il serait préférable de ne pas usiner le lamage en appui sur cette face. Cela se traduit par la critique suivante :

(∞ (non-appui (ov lamer lamage1) boîte_Z-_X))

Son application induit une contradiction, conduisant à un retour arrière dans la suite des décisions appliquées :

	cœf	poids	contrainte
	9	9	*(appui (première-ov poche1) (boîte_Z-_X boîte_Z+_X boîte_Y-_X boîte_Y+_X))*
	9	9	*(même-sous-phase (première-ov trou1) (dernière-ov trou1))*
	9	9	*(même-sous-phase (première-ov trou2) (dernière-ov trou2))*
	9	9	*(même-sous-phase (première-ov poche1) (dernière-ov poche1))*
	9	9	*(même-phase (première-ov trou1) (première-ov lamage1))*
	8	8	*(avant (dernière-ov trou1) (première-ov lamage1))*
	8	8	*(même-phase (première-ov lamage1) (première-ov trou1))*
	8	8	*(appui (première-ov poche1) (boîte_Z-_Y boîte_Z-_X))*
	∞		*(non (même-phase (première-ov poche1) (première-ov trou1)))*
→	∞	∞	**(non-appui (ov lamer lamage1) boîte_Z-_X)**
	∞	∞	*(avant (dernière-ov lamage1) (première-ov poche1))*
	∞		*(non (même-phase (première-ov poche1) (première-ov trou1)))*
	∞		*(non (même-phase (première-ov poche1) (première-ov trou2)))*
	7	7	*(même-phase (première-ov trou1) (première-ov trou2))*
	7	5	*(même-sous-phase (première-ov trou1) (première-ov lamage1))*
	7	5	*(même-sous-phase (première-ov trou1) (première-ov trou2))*
	7	5	*(même-sous-phase (première-ov trou2) (première-ov lamage1))*
	7	3	*(même-opération OV11 OV12)*
	7	3	*(même-opération OV13 OV14)*
	7	3	*(même-opération OV13 OV15)*
	7	3	*(même-opération OV14 OV15)*
	7	3	*(même-opération OV31 OV21)*
	7	3	*(même-opération OV32 OV22)*

La nouvelle gamme solution proposée satisfait cet amendement :

Phase 1 :	boite_Y-_X			
	Sous-phase 1 :	Centre-Usinage		
		Operation 1 :	foret-a-pointer	
			OV ebauche pointer	trou1
			OV ebauche pointer	trou2
		Operation 2 :	foret16	
			OV ebauche percer	trou1
			OV ebauche percer	trou2
		Operation 3 :	alesoir8	
			OV finition aleser	trou1
		Operation 4 :	fcc4	
			OV finition lamer	lamage1
		Operation 5 :	grain23	
			OV finition aleser	trou2
Phase 2 :	boite_Z-_X			
	Sous-phase 1 :	Centre-Usinage		
		Operation 5 :	{fraise12, fraise13}	
			OV ebauche ebauche-dans-axe	poche1
			OV ebauche enlevement-matiere	poche1
		Operation 6 :	{fraise21, fraise22}	
			OV finition calibrage-flancs	poche1
			OV finition finition-flancs	poche1
			OV finition finition-fond	poche1

Outre le changement d'appui pour l'usinage de *lamage1*, la satisfaction de la critique a engendré d'autres modifications de la gamme :

- regroupement des OV de *trou1, trou2* et *lamage1* dans la même sous-phase,
- regroupement de OV21 et OV31 dans la même opération car elles utilisent le même outil,
- regroupement de OV22 et OV32 dans la même opération car elles ont un outil commun,
- un seul appui possible pour chacune des phases,
- l'usinage de la *poche1* est effectué dans la deuxième phase.

5 Temps d'exécution

Le temps d'exécution pour générer la première gamme est **3 mn 30** ; l'amendement à **effet local** est quasiment **instantané** ; l'amendement à **effet global** prend **2 mn.**

Dans ce dernier cas, le gain est seulement de 1 mn 30 par rapport à la génération complète. Ceci est dû au fait que le système remonte assez haut dans SDA pour résoudre le conflit engendré par la critique. Il est rare cependant d'émettre de telles critiques, dont les effets sont aussi conséquents sur la structure de la gamme.

Glossaire

Ablocage : dispositif de maintien d'une pièce sur une machine.

CAO : Conception Assistée par Ordinateur.

Centre d'Usinage : machine sur laquelle peuvent être effectués des usinages suivant plusieurs axes par rapport à la pièce.

CFAO : Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur.

CIM : Computer Integrated Manufacturing.

CN : Commande Numérique.

Commande Numérique : langage de programmation des machines-outils.

COP : Combinaison Opportuniste de Plans (stratégie de planification élaborée par Tsang [Tsa 87]).

Cotation : norme servant à définir et à représenter les pièces mécaniques.

Cotation de Liaison : système de cotation qui définit les pièces par leurs surfaces limites, positionnées les unes par rapport aux autres.

Cotation Volumique : système de cotation qui définit les pièces comme des ensembles de volumes, paramétrés et positionnés les uns par rapport aux autres suivant les conventions de la mécanique.

DAO : Dessin Assisté par Ordinateur

DIMAT : DImensionnement MAT, système de CAO basé sur les concepts de la Cotation Volumique, en amont de GAGMAT (il est développé au laboratoire CPAO de l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées).

État de Surface : paramètre technologique qui représente la rugosité d'une surface, noté *Ra* ; plus sa valeur est faible, et plus la surface est lisse (3.2, 6.3, etc).

Fraisage : technologie d'usinage qui fait appel à des machines de type fraiseuse et à des outils de type fraise.

GPAO : Gestion de Production Assitée par Ordinateur

GAGMAT : Génération Automatique de Gammes de la Manufacture d'Armes de Tulle ; nom du système que nous avons implanté.

Gamme d'Usinage : séquence hierarchisée des opération d'usinages à effectuer pour fabriquer une pièce mécanique.

Gammiste : expert chargé de concevoir les Gammes d'Usinage.

GU : Gamme d'Usinage.

IA : Intelligence Artificielle.

Macro d'Usinage : Macro-instruction de CN correpondant à un trajet d'outil évolué ; dans le cas des concepts issus de la Cotation Volumique, une Macro d'Usinage est un trajet d'outill qui usine un volume, et qui correspond à l'exécution d'une OVE.

Montage d'Usinage : Dispositif compolet de maintien d'une pièce sur le plateau d'une machine.

MU : Modèle d'Usinage, type de Volume d'Usinage.

Opération : dans une gamme, une Opération correspond au regroupement d'Opérations Volumiques consécutives qui utilisent le même outil.

OV : Opération Volumique, suite d'OVE servant à usiner un même Volume d'Usinage, et dont on est sûr qu'elles sont exécutées consécutivement dans la gamme finale de la pièce ; les OV sont les actions élémentaires des plans générés par GAGMAT.

OVE : Opération Volumique Elémentaire, elle correspond à l'appel d'une Macro d'Usinage (c'est l'usinage élémentaire et indivisible pour quelque raison que ce soit).

Phase : dans une gamme, une Phase correspond au regroupement de Sous-Phases consécutives réalisées sans changer d'appui, et donc de matériel d'ablocage.

PU : Processus d'Usinage, processus de réalisation d'un Volume d'Usinage, composé d'Opérations Volumiques.

Qualité : paramètre mesurant la tolérance d'une cote, souvant utilisé pour les alésage ; plus la qualité est élevée, et plus la précision requise est faible (valeurs entières 6, 7, 8, ..., 15).

Ra : symbole représentant l'Etat de Surface.

SDA : Séquence des Décisions Appliquées.

SG : Sous-Gamme

Sous-Phase : dans une gamme, une Sous-Phase correspond au regroupement d'Opérations consécutives réalisées sans changer de machine.

Tournage : technologie d'usinage, faissant appel à des machines appelées tours.

TT : Traitement Thermique

VU : Volume d'Usinage, entité de base servant à décrire une pièce suivant les concepts de la Cotation Volumique.

INPG département des études doctorales

AUTORISATION DE SOUTENANCE

VU les dispositions de l'article 3 de l'arrêté du 16 Avril 1974,

VU le rapport de présentation de Monsieur Y. DESCOTTE, Docteur 3ème Cycl

Monsieur DURAND Philippe

est autorisé à présenter une thèse en soutenance pour l'obtention du diplôme de DOCTEUR - INGENIEUR, spécialité " **Informatique** "

Fait à Grenoble, le 2 décembre 1988

Pour le Président de l'I.N.P.-G.
et par délégation,
le Vice-Président
P. VENNEREAU