

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

PAR
OMAR MSAAF

VALIDATION DES CARACTÉRISTIQUES D'USINAGE PAR
DES GRAMMAIRES D'USINAGE ATTRIBUÉES
UNE CONTRIBUTION À LA PRISE EN COMPTE
DES CONTRAINTES D'USINAGE EN COURS DE CONCEPTION

MONTRÉAL, LE 12 DÉCEMBRE 2002

©droits réservés de Omar Msaaf

**CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

M. Roland Maranzana, directeur de thèse

Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. René Soënen, codirecteur de thèse

Université Claude Bernard Lyon 1

M. Dominique Deneux, codirecteur de thèse

LAMIH -Université de Valenciennes, France

M. Jean-François Chatelain, président du jury

Département du génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Christophe Cuillère, professeur

Département de génie mécanique à l'Université du Québec à Trois-Rivières

M. Alain Desrochers, professeur

Université de Sherbrooke

M. Christian Mascle, professeur

École Polytechnique

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 21 OCTOBRE 2002

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

**VALIDATION DES CARACTÉRISTIQUES D'USINAGE PAR DES
GRAMMAIRES D'USINAGE ATTRIBUÉES :
UNE CONTRIBUTION À LA PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES
D'USINAGE EN COURS DE CONCEPTION**

Omar MsAAF

SOMMAIRE

Pour rester concurrentielles, les entreprises oeuvrant à la conception et à l'usinage de pièces mécaniques unitaires ou en petites séries doivent relever le défi continual de livrer des produits en un temps très court et avec un rapport qualité/prix meilleur que celui de leurs concurrents. L'application de l'ingénierie concourante est une des alternatives pour ces entreprises dans le but d'atteindre leurs objectifs. Cette philosophie amène les entreprises à prendre en compte en phase de conception l'ensemble des contraintes liées aux différents métiers intervenant au cours du cycle de vie du produit. Bien que considérée depuis une trentaine d'années, la prise en compte des contraintes de l'usinage en cours de conception reste un problème de recherche d'actualité.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur une méthodologie permettant l'intégration de l'analyse d'usinage en phase de conception. Cette méthodologie a pour but de permettre au concepteur de valider, en cours de conception, des propositions de conception parfois non entièrement définies. Nous validons les données (géométriques et technologiques) du modèle produit par le biais de grammaires d'usinage attribuées qui se basent sur des modèles de machines et outils. Cette validation ne nécessite pas une conception finalisée, elle s'appuie sur un ensemble de caractéristiques d'usinage qui contiennent non seulement les données du modèle produit validées, mais également un procédé candidat et les méthodes d'analyse utilisées. Ces caractéristiques sont hiérarchisées afin d'assister le concepteur dans le processus de décision entre les alternatives de conception. Les modèles de machines et d'outils proposés sont valides pour cinq familles de procédés, à savoir, fraisage, tournage, perçage, alésage et brochage.

Les structures de données ainsi que les composants d'une maquette logicielle sont spécifiés dans le dernier chapitre. Un exemple illustre ensuite notre démarche et nos concepts. Les perspectives de recherche qui découlent de nos travaux concernent d'une part le développement d'une grammaire générative qui, partant des formes fonctionnelles spécifiées par le concepteur, suggère les formes non fonctionnelles pour obtenir une conception usinable et d'autre part, le développement d'un module d'analyse et

d'évaluation incrémentale d'usinage de pièces indiquant au concepteur les modifications ayant le plus d'impact d'un point de vue usinage.

**VALIDATING MANUFACTURING FEATURES BY ATTRIBUTED
MACHINING GRAMMARS**
**A CONTRIBUTION TO TAKING INTO ACCOUNT THE MACHINING
CONSTRAINTS DURING DESIGN**

Omar Msaaaf

ABSTRACT

In order to remain competitive, the companies that design and machine single and small quantities of mechanical parts are confronted to the continuous challenge of yielding parts in a short time to market with a quality/price ratio better than their competitors. Concurrent engineering is a philosophy that helps those companies reach their goals. It exhorts companies to consider the constraints of the crafts interacting during the life cycle of a product during design phase. Taking into account machining constraints during design remains a major problem even though many research attempts have tried to tackle it.

The work reported in this thesis deals with a methodology that allows the integration of machining analysis in the design process. This methodology aims at allowing a designer to validate design proposals though they are not entirely defined. We present, in this work, machine-tools and tools models that are valid for five machining processes families which are milling, turning, drilling, boring and broaching. We propose to break up machining analyses in regards to available product data. These analyses validate product model data (geometrical and technological), by using attributed machining grammars which are based on machine-tools and models of tools. This validation does not require a finalized design and results in a set of machining features. These features contain validated product data model, besides a candidate machining process and the applied analyses methods. We offer a hierarchy of these features in order to assist the designer in the process of taking decisions between the different design alternatives.

The data structures as well as the components of a software mock-up are specified in the latest chapter. An example illustrates afterward our approach and our concepts. Some research prospects are thought to be, on the one hand, the development of a generative grammar that starting with functional forms assists the designer by proposing non-functional surfaces in order to get a machinable design and on the other hand, the development of an analysis and incremental evaluation of the machining of mechanical parts in order to point to the designer the modifications and part regions that have the higher impact from a machining point of view.

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH UMR CNRS n° 8530) de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis U.V.H.C. d'une part et du Laboratoire d'Ingénierie des Produits Procédés et Systèmes (L.I.P.P.S.) d'autre part. Ils ont été supportés par Bombardier Aéronautique et le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) du Canada.

Je souhaite exprimer ma gratitude à René Soënen, Professeur à l'Université Claude Bernard-Lyon1 Lyon, pour m'avoir accueilli dans le groupe de Recherche « système de Production », et m'avoir dirigé dans mes travaux et pour les conseils et la confiance qu'il m'a accordés.

Je remercie chaudement Roland Maranzana, Professeur à l'École de technologie supérieure, qui m'a également accueilli dans son laboratoire (le LIPPS) à Montréal. Ses conseils avisés et sa direction m'ont été d'un grand secours.

Ma gratitude va tout particulièrement à Dominique Deneux, Maître de Conférence à l'Université de Valenciennes. Ses conseils, ses encouragements et ses efforts ont été l'une des assises de ce travail.

Je remercie, également, Monsieur, Jean-François Chatelain, Professeur à l'École de Technologie Supérieure, ainsi que Messieurs Jean-Christophe Cuillère Professeur à l'Université du Québec à Trois Rivières, Alain Desrochers, Professeur à l'université de Sherbrooke et enfin Christian Mascle Professeur à l'École Polytechnique, qui me font l'honneur de faire partie du jury.

Je ne peux pas oublier mes amis des laboratoires que j'ai fréquentés. Je remercie plus particulièrement Youri Juteau dont la gentillesse et les connaissances en usinage et en programmation m'ont été d'un grand secours. Je ne peux pas oublier les membres du LIPPS et du LAMIH. Je passe des noms sous silence, le souvenir des personnes rencontrées au cours de ma thèse restera néanmoins gravé dans mon cœur et dans ma mémoire.

Je voudrais enfin remercier mes parents et ma famille qui ont toujours été au rendez-vous et dont le soutien et le support ont constamment été inconditionnels et sans faille.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS	iv
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES.....	xvi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 L'INTÉGRATION DE L'ANALYSE D'USINAGE EN COURS DE CONCEPTION.....	5
1.1 Introduction	5
1.2 Les phases d'élaboration du produit	5
1.2.1 Introduction	5
1.2.2 La conception	6
1.2.3 La fabrication.....	8
1.2.4 La préparation à la fabrication.....	9
1.2.5 Conclusion.....	10
1.3 Intégration des phases d'élaboration du produit	10
1.3.1 Ingénierie série	10
1.3.2 Ingénierie concourante	11
1.3.3 Conclusion.....	12
1.4 Modèles support du LAMIH	13
1.4.1 Le modèle produit.....	13
1.4.2 Le processus de conception	14
1.4.3 Synthèse.....	17
1.5 Prise en compte des contraintes d'usinage en conception	18
1.5.1 Introduction de l'analyse de fabrication en conception	18

1.5.2	Les approches pour une conception usinable	20
1.5.2.1	La conception par contraintes.....	20
1.5.2.2	La conception pour la fabrication.....	21
1.5.2.2.1	La conception pour la fabrication et l'assemblage.....	21
1.5.2.2.2	Systèmes support à la conception basés sur la préparation à la fabrication.....	23
1.5.2.3	Synthèse.....	24
1.6	Conclusion.....	24
CHAPITRE 2	MÉTHODES ET MODÈLES POUR L'ANALYSE D'USINAGE EN COURS DE CONCEPTION	26
2.1	Introduction	26
2.2	Les procédés d'usinage	27
2.2.1	Définition des procédés	27
2.2.2	Les machines	28
2.2.3	Les outils	29
2.2.3.1	Introduction	29
2.2.3.2	Modélisation de la partie coupante des outils.....	30
2.2.4	Les «capabilités» des procédés d'usinage.....	31
2.2.4.1	Introduction	31
2.2.4.2	«Capabilité» de génération de formes [Chang 1990]	32
2.2.4.3	«Capabilité» dimensionnelle	33
2.2.4.4	«Capabilité» de tolérances.....	34
2.2.4.5	«Capabilité» de propriétés de surfaces	35
2.2.4.6	«Capabilité» d'usinage de matériaux	35
2.2.4.7	Les contraintes d'usinage	36
2.2.4.7.1	Contraintes géométriques	36
2.2.4.7.2	Contraintes technologiques	38
2.2.5	Conclusion.....	38
2.3	Les données du produit pouvant être analysées au cours de la conception...	39
2.3.1	Données déterminées au niveau de modélisation technique publique	39
2.3.2	Données déterminées au niveau de modélisation technique privé	40
2.3.3	Données du produit à analyser d'un point de vue usinage.....	40
2.3.3.1	Caractéristique de forme.....	40
2.3.3.2	Caractéristiques de tolérances	41
2.3.3.3	Caractéristique d'état de surface	42
2.3.3.4	Caractéristique de matériau	42
2.3.4	Conclusion.....	43
2.4	Les approches d'intégration des contraintes d'usinage en conception	43
2.4.1	Introduction	43
2.4.2	Approches de validation d'usinage	44
2.4.2.1	Définitions des caractéristiques	44

2.4.2.2	Définitions des caractéristiques d'usinage	45
2.4.2.3	Reconnaissance des caractéristiques d'usinage	46
2.4.2.3.1	Les approches d'extraction des caractéristiques de forme.....	48
2.4.2.3.1.1	Les approches à base de règles.....	49
2.4.2.3.1.2	Les approches à base de graphes.....	50
2.4.2.3.1.3	Les approches de représentation symbolique du produit fini.....	51
2.4.2.3.1.4	Les approches d'extraction de volumes.....	51
2.4.2.3.1.5	L'approche basée sur la notion d'angle matière.....	52
2.4.2.3.1.6	Synthèse	53
2.4.2.3.2	Correspondance entre les caractéristiques de forme et les procédés d'usinage	53
2.4.2.4	Conclusion.....	56
2.4.3	Validation globale d'usinage considérant les alternatives d'usinage	56
2.4.3.1	Introduction	56
2.4.3.2	Revue de la littérature.....	57
2.4.3.3	Synthèse.....	60
2.5	Conclusion.....	60
CHAPITRE 3 LES CARACTÉRISTIQUES D'USINAGE : UN PONT ENTRE LES DOMAINES DE LA CONCEPTION ET DE L'USINAGE		63
3.1	Introduction	63
3.2	Caractérisation des procédés d'usinage.....	64
3.2.1	Introduction	64
3.2.2	Définitions des mouvements d'avance et de coupe	65
3.2.3	Caractérisation des machines	65
3.2.3.1	Le repère lié à la machine.....	66
3.2.3.2	Caractérisation des mouvements d'avance des machines.....	67
3.2.4	Caractérisation des outils.....	70
3.2.4.1	Caractérisation de la géométrie des outils	71
3.2.4.1.1	Définition du repère lié aux outils	71
3.2.4.1.2	Définition du contour d'arêtes coupantes des outils.....	72
3.2.4.2	Caractérisation des mouvements d'avance de l'outil générateurs de surfaces	75
3.2.4.2.1	Exemple de génération de surfaces	75
3.2.4.2.2	Caractérisation des mouvements d'avance générateurs de surfaces	76
3.2.5	Caractérisation des mouvements d'avance de l'outil combiné à la machine.....	79
3.2.6	Hiérarchisation des procédés d'usinage	83
3.2.6.1	Hiérarchisation des machines	83
3.2.6.2	Hiérarchisation des outils	84
3.2.6.3	Hiérarchisation des procédés.....	84
3.2.7	Conclusion	84
3.3	L'intégration des contraintes d'usinage en cours de conception	85

3.3.1	Les niveaux d'analyse	85
3.3.2	Les éléments des analyses	87
3.3.3	L'ordre des analyses.....	89
3.3.4	Contribution à une analyse globale d'usinage	92
3.3.5	Conclusion.....	95
3.4	Les caractéristiques d'usinage.....	95
3.4.1	Définition des caractéristiques d'usinage	95
3.4.2	Hiérarchie des caractéristiques d'usinage.....	98
3.4.3	Synthèse.....	100
3.5	Conclusion.....	100
CHAPITRE 4 LA GRAMMAIRE D'USINAGE : MODÉLISATION DU POUVOIR GÉNÉRATIF DES PROCÉDÉS D'USINAGE		102
4.1	Introduction	102
4.2	Règles liant les données des modèles géométrique et topologique aux procédés d'usinage	103
4.2.1	Introduction	103
4.2.2	Génération de surfaces par un mouvement de coupe circulaire	103
4.2.2.1	Génération de surfaces simples	104
4.2.2.2	Génération d'associations de surfaces.....	105
4.2.2.2.1	Génération d'associations binaires de surfaces	106
4.2.2.2.2	Génération d'associations n-aires de surfaces	108
4.2.3	Génération de surfaces par un mouvement de coupe linéaire	109
4.2.3.1	Génération de surfaces simples	109
4.2.3.2	Génération d'associations de surfaces.....	110
4.2.4	Conclusion.....	111
4.3	Grammaire attribuée	111
4.3.1	Introduction	111
4.3.2	Notions de grammaire	112
4.3.3	Formalisation de la grammaire attribuée	113
4.3.4	Conclusion.....	114
4.4	Analyseur syntaxique d'une grammaire attribuée d'usinage.....	114
4.4.1	Choix d'un analyseur syntaxique	114
4.4.2	Analyseur LL(1) d'une grammaire d'usinage	115
4.4.2.1	Les terminaux	117
4.4.2.2	Les non-terminaux	117
4.4.2.3	Le symbole de départ.....	118
4.4.2.4	Les règles de production.....	118
4.4.2.4.1	Règles de définition.....	118
4.4.2.4.2	Règles d'association.....	123
4.4.2.5	Présentation et illustration de la construction d'un arbre syntaxique	126
4.4.3	Conclusion.....	129
4.5	Exploitation de la grammaire attribuée d'usinage	129

4.5.1	L'intérêt de l'utilisation de l'arbre syntaxique et des caractéristiques d'usinages abstraites	129
4.5.2	Correspondance entre les analyses d'usinage et les règles de la grammaire	131
4.5.3	Conclusion	132
4.6	Conclusion	133
CHAPITRE 5 SPÉCIFICATION DE MISE EN OEUVRE ET VALIDATION		135
5.1	Introduction	135
5.2	Module d'analyse d'usinage	135
5.2.1	Introduction	135
5.2.2	L'approche OO et le langage UML	137
5.2.3	Cas d'utilisation du composant d'analyse d'usinage	138
5.2.4	L'architecture du module d'analyse d'usinage	140
5.2.5	Spécification du composant d'analyse d'usinage	142
5.2.5.1	Les structures de données	142
5.2.5.1.1	La structure des procédés et de leurs composants	142
5.2.5.1.2	La structure des règles des grammaires d'usinage	145
5.2.5.1.3	La structure des caractéristiques d'usinage	146
5.2.5.2	Les modules de traitement	147
5.2.5.2.1	Extraction de caractéristiques de forme (C.F.)	147
5.2.5.2.2	Génération des graphes conceptuels des données du modèle produit	148
5.2.5.2.3	Générateur des règles des grammaires d'usinage attribuées	151
5.2.5.2.4	Validation locale par un analyseur syntaxique et sémantique	153
5.2.5.2.5	Validation globale d'usinage	154
5.2.6	Conclusion	155
5.3	Analyse d'une pièce mécanique	156
5.3.1	Introduction	156
5.3.2	Construction d'un procédé d'usinage	156
5.3.2.1	Modélisation d'une fraise torique	157
5.3.2.1.1	Détermination du modèle géométrique	160
5.3.2.1.2	Détermination des mouvements des arêtes coupantes	160
5.3.2.1.3	Détermination des surfaces générées par les arêtes coupantes de l'outil	163
5.3.2.2	Modélisation d'une fraiseuse 3 axes	164
5.3.2.3	Procédé {Fraiseuse 3 axes ; Fraise 2 tailles torique}	165
5.3.3	Validations d'usinage	165
5.3.3.1	Validation d'une surface	166
5.3.3.2	Validation d'un ensemble de surfaces	166
5.3.3.3	Validation d'un ensemble faces	169
5.3.3.4	Validation d'une solution technique	170
5.3.4	Validation d'usinage d'un produit	174
5.4	Perspectives	176
5.5	Conclusion	177

CONCLUSION GÉNÉRALE.....	179
1: Classification des procédés d'usinage	185
2: Présentation des travaux relatifs aux caractéristiques ou features	187
3: Extraction de caractéristiques de forme pré-définies	194
4: Arêtes de coupe, mouvements d'avance et surfaces générées	200
5: Grammaire attribuée.....	226
6: Les graphes conceptuels.....	233
7: Outils informatiques nécessaires.....	239
8: Formalisation de la «capabilité» de génération d'un procédé de fraisage	246
BIBLIOGRAPHIE	256

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Analyses d'usinage et données requises
Tableau II	127
Tableau III	Analyse syntaxique d'une chaîne de surfaces et d'arêtes.....
Tableau IV	132
Tableau V	Correspondance entre analyses d'usinage et règles de la grammaire.....
Tableau VI	161
Tableau VII	Les types des arêtes droites considérées dans cet exemple.....
Tableau VIII	175
Tableau IX	Association des caractéristiques de forme aux procédés d'usinage
Tableau VI	185
Tableau VII	Attributs d'une surface.....
Tableau VIII	201
Tableau IX	Génération de surfaces élémentaires par une arête droite
Tableau X	203
Tableau XI	Propriétés des arcs en fonction des relations conceptuelles.....
Tableau XII	236

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1	Cycle de vie du produit (Inspiré de [Zhang et Zhang 95]).....	6
Figure 2	Détermination du coût du cycle de vie [Boothroyd et al. 1994]	7
Figure 3	Coût d'une erreur de conception.....	8
Figure 4	Cycle de conception par fonctionnalités [Cocquebert 1991].....	14
Figure 5	Méta-modèle d'élaboration des solutions	15
Figure 6	Les cinq niveaux de modélisation du produit	16
Figure 7	Modèle d'élaboration des solutions techniques.....	17
Figure 8	Etapes de l'approche DFMA [Boothroyd et al. 1994].....	22
Figure 9	Fraisage en bout et en roulant	30
Figure 10	Classes d'outils [Mawussi et al. 2000]	31
Figure 11	Géométrie des arêtes de coupe et mouvements possibles	33
Figure 12	Contraintes géométriques [Chang 1990].....	37
Figure 13	Exemples de caractéristiques de forme	41
Figure 14	Un trou exigeant plusieurs règles de définition.....	50
Figure 15	Décomposition en ASV d'un polyèdre [Kim 1992]	52
Figure 16	Application du principe de l'angle matière (Inspiré de [Deneux 1993])... ..	53
Figure 17	Opérateurs pour l'extraction de volumes d'usinage élémentaires [Shirur et al. 1998].....	54
Figure 18	Alternatives de conception et les activités d'usinage associées [Feng et al. 1996].....	58
Figure 19	Schéma cinématique et repère lié à une fraiseuse	67
Figure 20	Attributs des arêtes coupantes d'une fraise à bout sphérique	73
Figure 21	Attributs des arêtes coupantes d'un outil utilisé sur un tour.....	74
Figure 22	Arêtes coupantes d'un outil de brochage	75
Figure 23	Génération d'une caractéristique de forme en tournage	76
Figure 24	Modélisation des arêtes coupantes d'une pastille utilisée en tournage.....	78
Figure 25	Mouvements d'avance des arêtes coupantes d'un outil de tournage.....	78
Figure 26	Fraise 2 tailles à bout torique pouvant plonger dans la matière	82
Figure 27	Conception prenant en compte les contraintes d'usinage	86
Figure 28	Analyses des données du modèle géométrique	88
Figure 29	Analyse d'usinabilité de deux solutions techniques	88
Figure 30	Ordre d'exécution des différentes analyses d'usinage	90
Figure 31	Contraintes d'antériorité entre différents procédés d'usinage	93
Figure 32	Données de la caractéristique d'usinage.....	96
Figure 33	Exemple d'ajout de surfaces modifiant les C.F.....	97
Figure 34	Caractéristique d'usinage abstraite	98
Figure 35	Spécialisation d'une caractéristique d'usinage abstraite	99

Figure 36	Génération de surfaces élémentaires par les arêtes coupantes considérées	104
Figure 37	Non respect d'une condition de génération de deux surfaces par une arête	107
Figure 38	Génération de deux surfaces adjacentes par deux arêtes adjacentes.....	107
Figure 39	Outil de brochage composé d'arêtes droites.....	110
Figure 40	Chaines de surfaces et d'arêtes traitées par la grammaire.....	117
Figure 41	Surfaces de même nature générées par des arêtes distinctes.....	119
Figure 42	Description des attributs d'un non-terminal <Surface>	119
Figure 43	Attributs d'un non-terminal	121
Figure 44	Forme générale des non terminaux	123
Figure 45	Analyse par un procédé abstrait	126
Figure 46	Arbre syntaxique de l'analyse d'une association de surfaces	128
Figure 47	Cas d'utilisation du composant d'analyse d'usinage	139
Figure 48	Architecture globale du composant d'analyse d'usinage	141
Figure 49	Connexion du module d'usinage aux applications de CAO.....	142
Figure 50	Représentation UML d'un outil	143
Figure 51	Représentation UML d'une machine.....	144
Figure 52	Représentation UML d'un procédé d'usinage.....	144
Figure 53	Diagramme objet des règles d'usinage	146
Figure 54	Représentation UML d'une caractéristique d'usinage	147
Figure 55	Diagramme objet des données du modèle produit	149
Figure 56	Création de graphe conceptuel	151
Figure 57	Contour spécifié par l'expert en fabrication	152
Figure 58	Surfaces générées par les deux outils de la Figure 57	152
Figure 59	Diagramme objet du graphe des contraintes d'antériorité	154
Figure 60	Dessin coté de la pièce exemple.....	158
Figure 61	Indication des surfaces sur la pièce exemple	159
Figure 62	Modélisation géométrique d'une fraise torique	160
Figure 63	Mouvements proposés et retenus pour l'arête A1	161
Figure 64	Mouvements proposés par le module et retenus par l'expert pour l'arête A2	162
Figure 65	Mouvements proposés par le module et retenus par l'expert pour l'arête A3	162
Figure 66	Surfaces générées par l'arête A1	164
Figure 67	Fraiseuse avec 3 degrés de translation	164
Figure 68	Caractéristique de forme analysée	166
Figure 69	Orientations de la broche par rapport à la pièce.....	168
Figure 70	Arbre syntaxique d'une analyse de surfaces.....	169
Figure 71	Deux caractéristiques d'usinage abstraites pour une C.F	171
Figure 72	Une évaluation résultant en une conception non usinable	172
Figure 73	Etapes suivies par le concepteur	174
Figure 74	Modélisation des outils nécessaires à l'usinage de la pièce	176
Figure 75	Deux propositions d'usinage pour une solution de conception	177

Figure 76	Deux points de vue d'une même pièce [Deneux 1993]	190
Figure 77	Reconnaissance automatique de caractéristiques.....	191
Figure 78	Conception par les caractéristiques [Shah 1988]	192
Figure 79	Différentes arêtes droites possibles.	204
Figure 80	Angles des arêtes droites.....	206
Figure 81	Relation entre le rayon de l'outil et l'angle du cylindre où cône	207
Figure 82	Exemples de fraises avec arêtes courbes convexes ou concaves	211
Figure 83	Génération de surfaces par une Fraise torique concave	212
Figure 84	Différents types d'opérations de tournage	215
Figure 85	Différents types d'arêtes de type 1	216
Figure 86	Conditions sur les points du cercle déterminant un tore	219
Figure 87	Génération de tore par un outil courbe.....	222
Figure 88	Exemple de graphe conceptuel.....	234
Figure 89	Taxonomie des objets et relations dans FROOM [Salomons 1995].....	235
Figure 90	Taxonomie des objets et relation conceptuelles.....	236
Figure 91	Représentation des données du modèle produit par un graphe conceptuel	237
Figure 92	Exemple de diagramme de classes	241
Figure 93	Diagramme de cas d'utilisation	242
Figure 94	Composants distribués	243
Figure 95	Surfaces générées par A1	247
Figure 96	Surfaces générées par A2	249

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

ABC	Activity Based Costing
API	Application Program Interface
ASV	Alternating Sum of Volumes
ASVP	Alternating Sum of Volumes with Partitioning
B-Rep	Boundary Representation
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
C.F.	Caractéristique de Forme
CFAO	Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur
COM	Component Object Model
CSG	Constructive Solid Geometry
C.U.	Caractéristique d'Usinage
DFM	Design For Manufacturing
DFMA	Design For Manufacturing and Assembly
DVD	Delta Volume Decomposition
FAAG	Face Adjacency Graph
FAG	Face Adjacency Attributed Graph
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
IC	Ingénierie Concourante
GUA	Grammaire d'Usinage Attribuée
LAMIH	Laboratoire d'Automatique, de Mécanique, d'Informatique Industrielles et Humaines
MSREV	Material Shape Removal Element Volumes
N	Non Terminal
OO	Orienté Objet
P	Production d'une grammaire
PFAO	Préparation à la Fabrication Assistée par Ordinateur
T	Terminal
S	Symbol de départ d'une grammaire
UML	Unified Modeling Language

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les entreprises qui conçoivent et fabriquent des produits mécaniques font face à une importante concurrence. Pour se démarquer, elles doivent proposer des produits répondant aux besoins du client et ayant un cycle d'obtention consommant le moins de ressources et de temps. Cette responsabilité incombe principalement au concepteur. Il y a un peu plus de 20 ans, celui-ci devait uniquement respecter le cahier des charges imposé par le client. Aujourd'hui, il doit également considérer les contraintes des métiers (intervenant dans le cycle de vie du produit) et proposer une conception proche de l'optimum global.

Parmi ces métiers, l'usinage est très répandu pour obtenir des pièces mécaniques répondant à des fortes exigences de précision. Son utilisation nécessite de déterminer les moyens économiques à utiliser et, éventuellement, l'achat de systèmes de mise en position particuliers. L'adoption, souvent obligatoire, de cette technologie de fabrication entraîne souvent des coûts de fabrication assez élevés.

Dans le cadre, encore plus particulier, des produits mécaniques usinés de manière unitaire ou en petites séries, proposer une conception en adéquation avec les moyens de fabrication est critique tout en étant ardu. En effet, les pièces sont souvent différentes d'un produit à l'autre et doivent souvent être rapidement livrées. Ceci peut mener à des erreurs de conception (ex : omissions de contraintes, sur spécifications) aux conséquences désastreuses sur les coûts et temps de fabrication. En effet, le faible volume de pièces produites ne permet pas d'améliorer le processus de fabrication ou d'amortir les coûts engagés. Enfin, des spécifications difficiles à respecter peuvent mener à des demandes de modifications de la part des ingénieurs de la fabrication.

L'ingénierie concourante est l'une des solutions proposées à ce genre de problèmes. Elle permet de réduire les coûts de production et de compresser le temps de mise sur le marché du produit. Pour ce faire, elle préconise de mener de manière simultanée les phases de développement du produit. Il en découle une conception prenant mieux en compte les contraintes des différents métiers intervenant dans le cycle de vie du produit (conception, fabrication, contrôle, etc.).

Pour atteindre cet objectif, deux approches complémentaires ont été proposées :

- coordonner le travail des acteurs des différents métiers intervenant dans le cycle de vie du produit dans une équipe multidisciplinaire,
- intégrer grâce à des d'outils, les savoir-faire de différents métiers en cours de conception.

Il serait faux de prétendre qu'une approche est meilleure que l'autre. Elles visent le même but, mais elles adoptent des solutions distinctes qui sont parfois combinées dans certaines entreprises. La prise en compte des aspects humains est complexe, de plus la formation et la gestion des équipes multidisciplinaires dépendent fortement de la structure de l'entreprise. Nous désirons intégrer les domaines de la conception et de l'usinage en nous affranchissant de telles contraintes. Conséquemment, nous adoptons la deuxième solution.

Les outils et approches industriels actuels visent la validation d'usinage ou l'aide à la génération de gammes d'usinage automatiques de produits entièrement définis. Par conséquent, leur utilisation implique un déroulement séquentiel de la conception puis de la fabrication.

Le but de cette thèse est d'apporter une contribution au développement d'un outil intégrant les contraintes d'usinage au sein même du processus de conception. Le but d'un tel outil est, d'une part, de permettre au concepteur de valider l'usinage en cours de

conception de pièces composant des produits non entièrement définis et d'autre part, de fournir les informations relatives aux solutions d'usinage retenues. Nous mettrons de l'avant dans cette thèse l'importance d'assister le concepteur à concevoir un produit en adéquation avec les procédés d'usinage, et ce, dès les premières phases de la conception. Nous proposerons également les modèles et procédés nécessaires pour atteindre cette adéquation.

Nous présentons dans le premier chapitre les phases d'élaboration du produit en concluant sur la nécessité d'intégrer les domaines de conception et de préparation à l'usinage. Nous présentons ensuite le modèle produit et le processus de conception développés au LAMIH et qui constituent la base de notre travail. Par la suite, nous étudions les approches visant à intégrer les contraintes d'usinage en conception et nous nous basons sur les conclusions de cette étude pour dégager la problématique de l'intégration des contraintes d'usinage en cours de conception.

Dans la première section du second chapitre, nous présentons les modèles des machines et outils. Nous étudions, ensuite, les «capabilités» des procédés et les contraintes d'usinage. Par la suite, nous définissons les données du modèle produit ainsi que les phases de modélisation au cours desquelles elles deviennent disponibles pour une analyse. La dernière section se concentre sur l'analyse et la validation d'usinage. Ce chapitre nous permet de déterminer les limites de notre étude ainsi que les modèles et méthodes à développer pour intégrer l'analyse d'usinage en cours de conception.

Dans le troisième chapitre, nous proposons des modèles de machines et d'outils valides pour tous les procédés d'usinage étudiés. Ces modèles caractérisent les «capabilités» de génération de forme des procédés d'usinage. Pour intégrer l'analyse d'usinage au processus de conception, nous proposons une hiérarchisation des machines, des outils ainsi que des procédés d'usinage. Par la suite, nous présentons les analyses d'usinage possibles en cours de conception ainsi que les contraintes d'antériorité relatives à leur

application. La dernière section de ce chapitre présente une nouvelle définition des caractéristiques d'usinage. Celles-ci constitueront le pont entre les domaines de la conception et de l'usinage.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons des règles géométriques de génération de surfaces simples ou associées. Ces règles se basent d'une part sur des opérateurs géométriques décrivant les mouvements d'avance des arêtes coupantes et d'autre part sur les propriétés géométriques de ces dernières. Nous introduisons, ensuite, les grammaires attribuées, et présentons un analyseur de grammaires d'usinage basé sur les règles de génération de surfaces. Nous montrons, ensuite, comment l'utilisation de la hiérarchie des caractéristiques d'usinage associée à la grammaire permet de faciliter et de structurer l'analyse d'usinage. La dernière section de ce chapitre montre la correspondance entre les analyses d'usinage présentées dans le troisième chapitre et les règles de la grammaire d'usinage proposée.

Dans le cinquième et dernier chapitre, nous présentons, tout d'abord, les spécifications d'un système informatique d'analyse d'usinage. Nous y détaillons les structures de données et les modules nécessaires au processus de validation d'usinage. Par la suite, nous appliquons nos concepts à une pièce exemple et nous illustrons l'application de l'analyse d'usinage.

CHAPITRE 1

L'INTÉGRATION DE L'ANALYSE D'USINAGE EN COURS DE CONCEPTION

1.1 Introduction

Il incombe au concepteur de proposer un produit respectant les exigences fonctionnelles. Toutefois, il doit toujours considérer les contraintes des autres métiers et notamment les contraintes globales relatives aux coûts et/ou délais. Ce chapitre décrit les méthodes permettant d'intégrer le savoir-faire d'usinage dans le processus de conception. Nous nous plaçons dans le cadre de la conception de pièces mécaniques fabriquées de manière unitaire ou en petites séries obtenues par usinage.

Nous présentons, tout d'abord, les phases d'élaboration du produit et montrons la nécessité d'intégrer une analyse de l'usinage dans le processus de conception. Cette intégration est préconisée par l'ingénierie concourante que nous introduisons. Nous présentons, ensuite, le modèle produit développé au LAMIH pour supporter le concepteur. Nous étudions, enfin, les approches permettant l'intégration des domaines de la conception et de la fabrication.

1.2 Les phases d'élaboration du produit

1.2.1 Introduction

Le développement d'un produit passe par plusieurs étapes depuis la conception jusqu'à la vente avant d'être finalement détruit ou recyclé (voir la Figure 1).

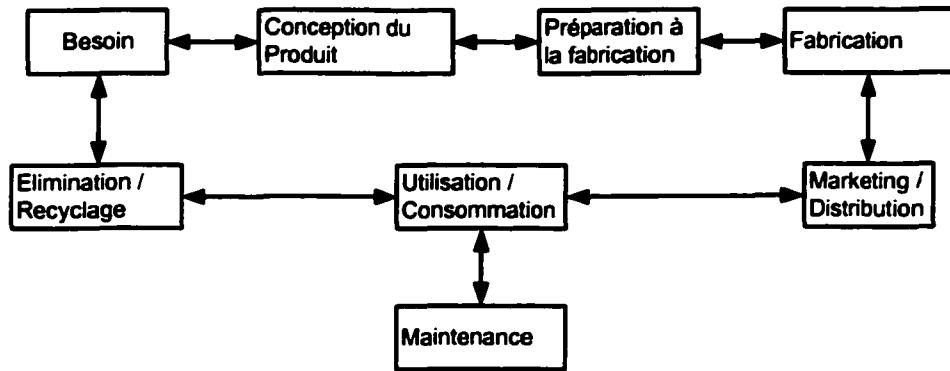


Figure 1 Cycle de vie du produit (Inspiré de [Zhang et Zhang 95])

Les phases intervenant dans l'élaboration du produit ont un impact important sur la capacité de l'entreprise à être concurrentielle, car elles sont, en majeure partie, responsables du coût final du produit. En effet, les coûts et temps de maintenance, de contrôle qualité et de recyclage dépendent des choix accomplis lors de la conception.

En outre, une condition nécessaire, non suffisante, d'élaboration d'un produit est qu'il puisse être fabriqué. Ceci implique que la conception respecte un certain nombre de contraintes relatives aux possibilités des moyens de fabrication (*préparation à la fabrication*) et à la disponibilité de ces derniers (*fabrication*). Dans ce qui suit, nous allons présenter ces trois phases.

1.2.2 La conception

La conception, également définie comme résolution de problèmes, est un processus cognitif associant des connaissances diverses (métier, fournisseurs, sous-traitants, partenaires,...). Le processus de conception commence par l'identification des besoins et des objectifs et par leur formalisation [Bahrami et Dagli 1993]. Son coût constitue une légère proportion du coût total du produit. Cependant une grande partie des coûts de fabrication est déterminée durant la phase de conception. Selon [Wolfram et Ehrlenspiel

1993], 70% des réductions des coûts de fabrication sont causées par des mesures prises par le département de conception. Selon [Suh 1990], 70 à 80 % des coûts manufacturiers sont déterminés lors de l'étape de conception. [Boothroyd et al. 1994], [Miller 1993] et [Huthwaite 1987] estiment que la conception intervient dans 5% des coûts totaux du produit, mais que 75% du coût du produit sont influencés par celle ci (Cf. Figure 2).

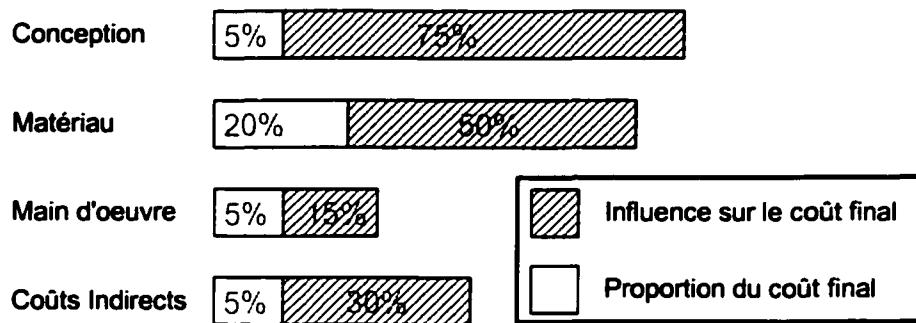


Figure 2 Détermination du coût du cycle de vie [Boothroyd et al. 1994]

Selon [Boothroyd et al. 1994], la conception d'un produit mécanique peut être considérée comme le choix du matériau, des formes et des tolérances des composants individuels d'un produit. Cette activité génère des spécifications détaillées qui sont délivrées aux ingénieurs de fabrication. La tâche de ces derniers est d'optimiser les procédés de fabrication du produit. Généralement, c'est au niveau de la préparation à la fabrication ou de la fabrication que les problèmes sont rencontrés et que les requêtes pour des changements de conception sont émises. Malheureusement, plus les changements arrivent tard dans le cycle de développement du produit, plus leurs coûts sont élevés. Selon [Miller 1993], une erreur relative à la fabrication *découverte et corrigée en cours de conception* est comparativement peu coûteuse à corriger. Si cette même erreur est découverte lors de la phase de fabrication, la correction peut valoir jusqu'à 100 fois plus cher à cause des investissements déjà réalisés et perdus, des temps de préparation à la fabrication, de re-conception et de fabrication ainsi que du temps perdu avant la mise sur le marché (Cf. Figure 3).

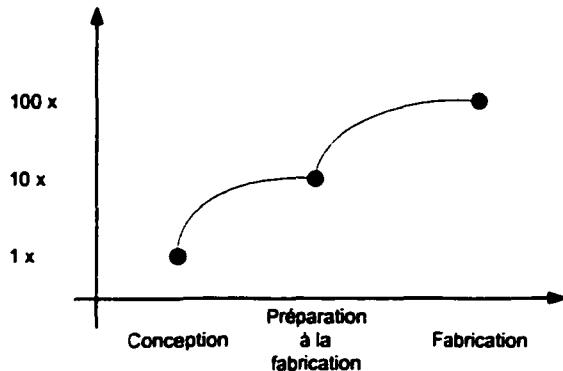


Figure 3 Coût d'une erreur de conception

Par conséquent, la prise en compte des contraintes de fabrication dans le processus de conception doit intervenir au plus tôt.

1.2.3 La fabrication

La fabrication est une activité qui vise, à partir de produits bruts, à générer un produit fini respectant les définitions exigées par le concepteur. Nos travaux se concentrent sur les procédés d'usinage. Ces derniers permettent d'obtenir les surfaces spécifiées par le concepteur par enlèvement de copeaux d'une pièce. Selon [Boothroyd et al. 1994], 80 à 90 % des machines de fabrication sont conçues pour enlever du matériau par usinage.

Cette activité a été fortement influencée par l'introduction de la Commande Numérique (CN) et du contrôle de la Commande Numérique par Ordinateur. Ces machines remplacent peu à peu les machines conventionnelles en offrant une plus grande flexibilité, une meilleure précision et des cycles de production plus courts.

1.2.4 La préparation à la fabrication

La préparation à la fabrication établit une liste de procédés candidats, ainsi que leurs paramètres pour obtenir la pièce spécifiée par le concepteur à partir d'un brut. Plusieurs facteurs affectent cette activité dont la forme, les tolérances, les états de surface, les dimensions, le type de matériau, la taille du lot à fabriquer et le système de fabrication disponible. Tous ces facteurs contribuent à la sélection des opérations de fabrication ainsi qu'à leur agencement. Le préparateur à la fabrication sélectionne également les fixations et les systèmes de mise en position des pièces lors des phases de fabrication.

Selon [Zeid 1991] et [Deneux 1993], l'activité de préparation à la fabrication peut être décomposée en trois étapes majeures :

- l'interprétation des données de conception et des spécifications telles que les caractéristiques géométriques, les dimensions, les tolérances, les états de surface, le matériau et le nombre de pièces à produire,
- la sélection des procédés d'usinage appropriés et leur agencement, la préparation du brut, le choix des systèmes de fixation et de mise en position des pièces, les vitesses d'avance et de coupe et l'outillage,
- le calcul des coûts et temps standards dont le résultat est une gamme d'usinage. Cette gamme est documentée sous la forme de programme de commande numérique et/ou d'instructions écrites.

La préparation à la fabrication est le lien entre la conception et la fabrication. Elle détermine pour beaucoup les coûts et gains de fabrication. Une fois fini, le produit conçu est présenté à la préparation à la fabrication qui décide si les pièces composant le produit peuvent être fabriquées au sein de l'entreprise ou doivent être sous-traitées.

1.2.5 Conclusion

L'intégration des contraintes de fabrication en général et d'usinage en particulier, dans la phase de conception est nécessaire. En effet, le coût et temps de mise sur le marché du produit sont améliorés si une erreur est décelée lors de la conception alors que la détection de ces erreurs lors de la préparation à la fabrication ou de la fabrication peut être préjudiciable à la compétitivité d'un produit. Nous présentons, dans ce qui suit, les approches permettant l'agencement des phases d'élaboration du produit en vue d'en dégager une permettant l'intégration de l'usinage en conception..

1.3 Intégration des phases d'élaboration du produit

Il existe deux approches d'agencement des phases d'élaboration du produit [Jacquet 1998]:

- L'ingénierie série,
- L'ingénierie concourante.

1.3.1 Ingénierie série

Suite à la révolution industrielle, les entreprises possédaient une structure Taylorienne et étaient divisées en fonctions métiers. Dans une telle approche d'ingénierie, les concepteurs se contentent de répondre aux exigences fonctionnelles et ne sont concernés que par la performance et la fonctionnalité de leur produit. A la fin de la spécification du produit, ils transmettent leurs résultats aux ingénieurs de fabrication. Ces derniers retournent fréquemment les conceptions pour différentes raisons telles que :

- la non prise en compte des contraintes des moyens de fabrication par manque de connaissance ou par inadvertance,
- l'insuffisance ou surnombre de contraintes,
- les erreurs de spécification,

- la réduction des temps de mise en position et d'usinage ainsi que des équipements spéciaux.

Malheureusement, ces demandes de modifications interviennent tard dans le cycle de vie du produit pour être prises en compte. Si elles sont vraiment nécessaires, elles impliquent parfois de répéter entièrement le processus de conception. Ces interventions ont donc pour résultat d'augmenter les délais de mise sur le marché ainsi que les coûts du produit et parfois même de diminuer la qualité du produit. Afin de pallier aux manques de l'ingénierie série, l'ingénierie concourante a été développée.

1.3.2 Ingénierie concourante

L'ingénierie concourante a été définie par [Pennel et al. 1988] comme "*une approche systémique de la conception intégrée des produits et des processus qui leur sont reliés, y compris la fabrication et le support. Cette approche est destinée à inciter les concepteurs, et ce dès le début, à considérer tous les éléments du cycle de vie du produit depuis la conception jusqu'à l'élimination, en incluant la qualité, le coût et les exigences du client.*". Selon [Hartley 92], elle combine les efforts des acteurs du cycle de vie du produit en un ensemble cohérent et tente de remplacer des améliorations ponctuelles par des améliorations sur tous les aspects du produit. En effet, le plus grand pourcentage des coûts d'usinage autres que ceux provenant du matériau proviennent de la re-conception. Ainsi, même si les coûts de conception sont doublés (de 7 à 15% du coût total du produit) il est possible de réduire le coût total du produit de 60%. Par ailleurs, dans un tel environnement, le temps de mise sur le marché peut être réduit de 40% même si cela nécessite de doubler le temps de conception. Pour résumer, nous pouvons dire que l'ingénierie concourante vise :

- un temps de mise sur le marché plus court,
- une qualité meilleure,
- un coût plus faible,

- la considération du cycle de vie dans sa globalité.

Afin de réaliser ces objectifs, l'ingénierie concourante se base sur deux mécanismes: le chevauchement des activités du cycle de vie du produit et l'accroissement de disponibilité des informations concernant toutes les phases du cycle de vie du produit [Zhang et Zhang 1995]. Le premier mécanisme implique l'organisation d'équipes où des ingénieurs des différentes phases du cycle de vie du produit se réunissent lors de la conception du produit. Le second mécanisme a pour but de réduire

- la redondance des informations et des tâches,
- les temps d'accès à ces informations.

Le premier mécanisme peut nécessiter une réorganisation de l'entreprise. Par ailleurs, la gestion d'équipes multidisciplinaires peut être complexe pour des raisons humaines ou physiques (entreprises distribuées). Le second mécanisme, quant à lui, implique de rendre disponible lors de la conception les informations concernant le produit et les savoir-faire des métiers intervenant dans le cycle de vie du produit. Il nécessite alors la formalisation du savoir-faire.

1.3.3 Conclusion

L'ingénierie concourante fournit un cadre général pour l'intégration des contraintes de fabrication dans les phases de conception. Les aspects humains ainsi que la dispersion géographique des acteurs du cycle de vie font que nous concentrerons notre étude sur la proposition d'un outil dont le but est de rendre disponible les contraintes d'usinage lors de la conception. La création d'un tel outil nécessite d'une part de formaliser les processus et l'objet de conception et d'autre part de connaître les méthodes d'analyse d'usinage à adopter en fonction des phases de conception. Nous présentons dans ce qui suit la formalisation des processus et objet de conception développés au sein du LAMIH.

1.4 Modèles support du LAMIH

L'approche de modélisation du produit proposée au LAMIH se compose des deux aspects inter-reliés: le modèle du produit et le modèle de processus de conception. La méthode de conception, présentée dans [Jacquet 1998] et [Ben Amara 1998], a pour but de prendre en compte simultanément les points de vue des différents acteurs de la conception en partant de l'expression du besoin.

1.4.1 Le modèle produit

Le modèle produit est une collection de modèles non nécessairement disjoints qui couvre le cycle de vie du produit depuis l'expression du besoin jusqu'à son démantèlement. L'étude de ce cycle de vie permet de distinguer cinq types de modèles décrits dans [Jacquet 1998] :

- **Modèle de représentation du besoin** : représente les besoins du client sous la forme d'exigences spécifiant les services que doit satisfaire le produit et l'ensemble des contraintes qu'il doit respecter,
- **Modèle de représentation des exigences fonctionnelles du besoin** : représente "comment" répondre à chacun des services identifiés dans le modèle précédent. Il ne présume ni du lieu ni des moyens permettant de satisfaire le service à remplir,
- **Modèle de représentation technologique** : représente les fonctions opératoires, identifiées dans le modèle précédent, sous la forme d'un ensemble de fonctions de base dédiées métier spécifiant technologiquement le produit. Ce modèle global décrit le produit suivant les points de vue de chaque métier,
- **Modèle de représentation technique publique** : représente les fonctions de base du produit, identifiées dans le modèle précédent sous la forme d'un ensemble d'éléments physiques spécifiant techniquement le produit et visible par tous les autres métiers,

- **Modèle de représentation technique privé** : représente de façon exhaustive les caractéristiques détaillées des différents éléments physiques constituant le produit. Ces représentations sont spécifiques à un seul métier et ne sont donc pas partagées.

1.4.2 Le processus de conception

Le processus de conception générique formalisé dans [Jacquet 1998] et [Ben Amara 1998] est le prolongement des travaux développés au LAMIH concernant la conception basée sur le concept de fonctionnalité. Cette démarche favorise la traçabilité du cycle de conception. Ce cycle modélise les tâches génériques d'élaboration des solutions métiers ainsi que leurs interactions. Ces tâches sont la spécification, le choix de solutions technologiques et techniques, l'évaluation et la validation (Cf. Figure 4).

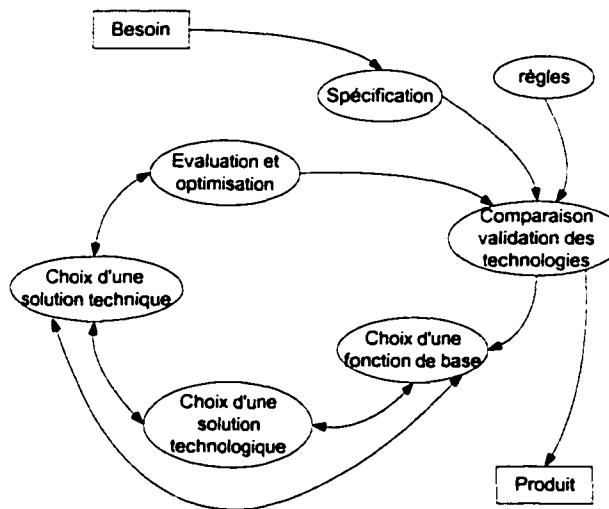


Figure 4 Cycle de conception par fonctionnalités [Cocquebert 1991]

Cette démarche est à la base d'un "Méta-modèle" proposé pour élaborer les solutions relatives à chaque niveau de modélisation du produit. Ce "Méta-modèle" est caractérisé

par des fonctions génériques permettant de répondre aux questions, illustrées Figure 5, et d'évaluer les solutions par rapport à l'ensemble des contraintes [Ben Amara 1998]. Les fonctions génériques du méta-modèle sont :

- Quoi ?* : Identifier le problème à résoudre.
- Avec Quoi ?* : Identifier les moyens nécessaires pour élaborer la solution.
- Quelle Valeur ?* : Définir la valeur des différents paramètres.
- Comment ?* : Identifier les procédures utilisables pour résoudre le problème.
- Evaluation* : Evaluer les résultats par rapport aux contraintes et aux objectifs.

Ce méta-modèle permet de générer les modèles d'élaboration des solutions spécifiques à chaque niveau de modélisation du produit.

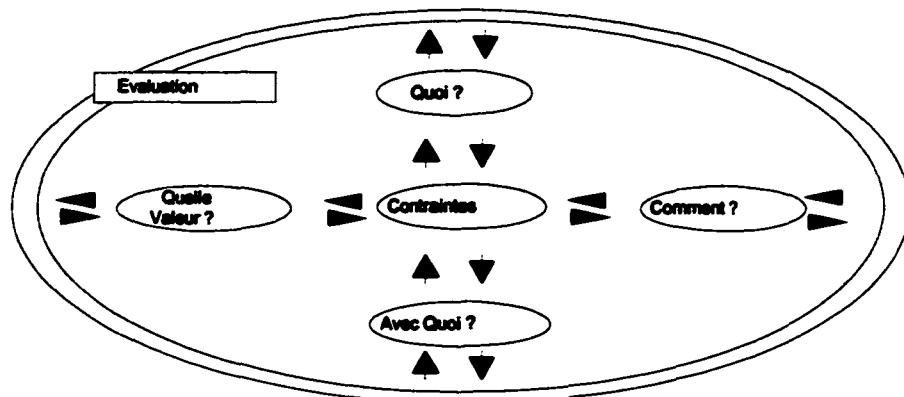


Figure 5 Méta-modèle d'élaboration des solutions

La méthode de conception proposée instancie le méta modèle présenté ci-dessus dans les différents niveaux de modélisation du produit pour générer les modèles particuliers d'élaboration de chacune des solutions. Les tâches de conception de même nature sont regroupées dans un même niveau même si elles sont accomplies par différents acteurs (mécanicien, automatien, etc..). La figure suivante montre la corrélation entre les cinq niveaux du modèle produit décrits ci-dessus et les quatre domaines de conception : fonctionnel, technologique, technique publique et technique privé.

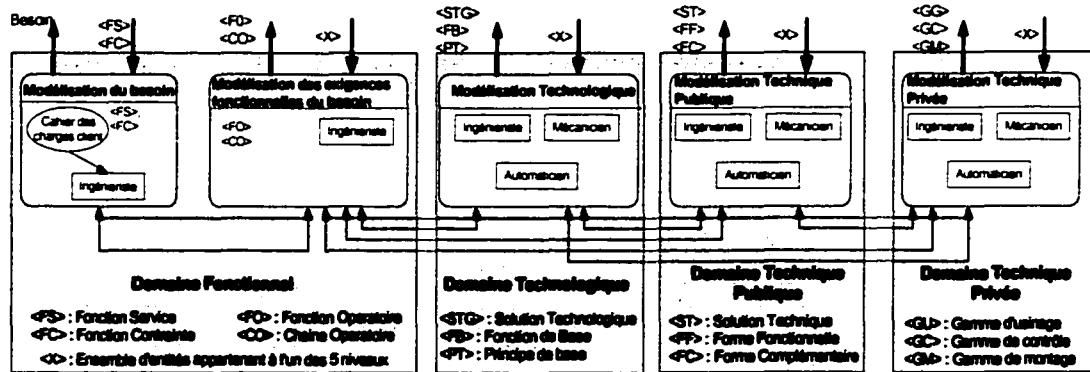


Figure 6 Les cinq niveaux de modélisation du produit

Chaque métier doit respecter les fonctions opératoires le concernant ainsi que les contraintes générées par les autres métiers. La conception du produit s'effectue donc de manière non séquentielle et distribuée. Le processus de conception proposé est un processus non monotone car le concepteur peut choisir l'aspect du produit qu'il veut spécifier suivant son envie et les informations dont il dispose. En effet, il est possible de passer d'un niveau de modélisation à un autre sans être obligé de respecter un ordre prédéfini. Dans la Figure 6, les flèches explicitent les échanges entre les différents niveaux de modélisation. Il est ainsi possible de voir la possibilité de communication entre les différents niveaux ainsi que les types d'informations échangées.

Les travaux de Ben Amara ont porté sur la spécification du modèle produit et du processus de conception mécanique pour les deux niveaux de conception technologique et technique publique. Quand le concepteur se place au niveau de conception technologique, il détermine les principes technologiques sans présumer des moyens mis en œuvre. Une solution technique correspond à l'ensemble des solutions physiques permettant de matérialiser les principes technologiques. L'élaboration des solutions techniques consiste à instancier le méta-modèle d'élaboration des solutions au niveau de modélisation technique publique (Cf. Figure 7).

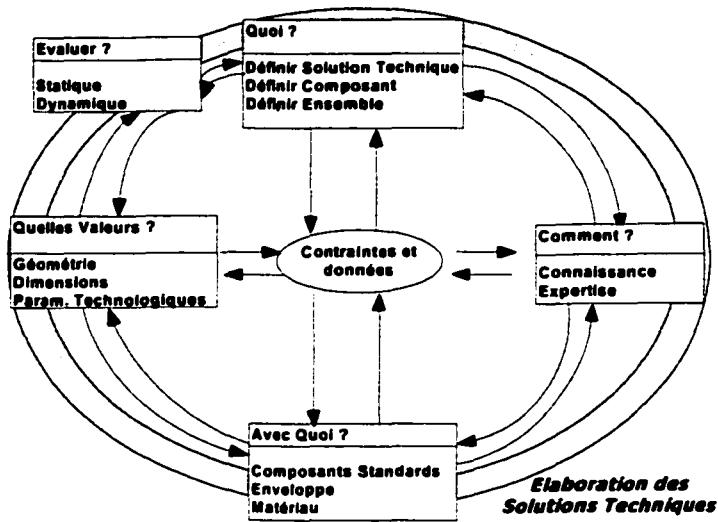


Figure 7 Modèle d'élaboration des solutions techniques

Pour réaliser une solution technique, le concepteur doit spécifier des formes fonctionnelles appartenant aux composants mécaniques et celles imposées par la présence de composants standards choisis (ex: roulement à billes). Chaque composant mécanique est caractérisé par une enveloppe, un matériau et un comportement. L'enveloppe englobe les formes fonctionnelles et les formes complémentaires. Par opposition aux formes fonctionnelles, les formes complémentaires ne matérialisent pas une fonction. Leur présence n'est justifiée que par l'impératif de cohésion des composants mécaniques.

1.4.3 Synthèse

L'ingénierie concourante exige une simultanéité dans l'intervention des acteurs du cycle de vie. La démarche de conception proposée au LAMIH fournit les modèles et méthodes pour intégrer à la conception les contraintes d'autres métiers. Les travaux de [Jacquet 1998] (automaticien) et [Ben Amara 1998] (mécanicien) le prouvent. Cependant, aucun

travail concernant la prise en compte des contraintes d'usinage n'a encore été proposé au sein de ce laboratoire. Ces contraintes peuvent être technologiques (le produit est usinable ou non) ou économiques (une alternative de conception est meilleure pour des raisons de coût ou de temps). Dans ce qui suit, nous étudions des approches d'intégration des contraintes d'usinage en conception.

1.5 Prise en compte des contraintes d'usinage en conception

Dans cette section, nous présentons, tout d'abord, une définition de l'analyse d'usinage. Par la suite, nous montrons que l'intégration des contraintes de fabrication (et en particulier l'usinage) en conception peut être atteinte en menant les processus de validation de fabrication et de conception de manière parallèle. Nous étudions ensuite les approches d'analyse de fabrication permettant l'intégration des contraintes d'usinage au processus de conception.

1.5.1 Introduction de l'analyse de fabrication en conception

Le but d'une analyse de fabrication est d'atteindre une conception compatible avec les réalités de la fabrication [Sanchez et al. 1997]. Selon [Gupta et al. 1994], l'analyse de fabrication peut être définie par les étapes qui suivent :

- déterminer si le produit est fabricable en vérifiant ses dimensions, formes, tolérances, états de surface, etc.,
- si le produit est fabricable, évaluer sa fabrication pour refléter la facilité ou la difficulté avec laquelle le produit peut être fabriqué,
- si le produit n'est pas fabricable, identifier les attributs de conception qui posent problème du point de vue de la fabrication.

L'analyse de fabrication ne correspond pas à une analyse unique mais plutôt à des interactions continues avec la phase de conception et ce dès la conception

conceptuelle [Sanchez et al. 1997]. [Klocke et al. 2000] ont proposé une analyse de fabrication structurée par les phases de conception. Ils introduisent une méthodologie aidant à la détermination des moyens de fabrication d'un produit lors des différentes étapes de conception. Les auteurs décomposent le *processus de validation de fabrication* d'un produit en trois niveaux. Chacun vise des buts différents, car d'une part, l'impact potentiel des changements et le degré de coûts prédéterminés diminue d'un niveau à l'autre. D'autre part, la consommation de ressources, la certitude et qualité des informations concernant le produit et les moyens de production requis augmentent d'un niveau à l'autre. Les trois niveaux proposés sont : (1) **chaînes technologiques**, (2) **séquences de fabrication** et enfin (3) **procédés d'usinage**. Le niveau **chaînes technologiques** ne considère que les activités de transformation du produit à valeur ajoutée ainsi que les interdépendances entre les différentes technologies considérées (formage, usinage, moulage). Ce niveau part d'une spécification du produit *non complète* et identifie les *technologies de fabrication* candidates. Le niveau **séquences de fabrication** projette les alternatives de fabrication sur des moyens concrets de fabrication. Il permet une évaluation et une sélection plus spécifique. Les activités de transport, stockage et de manutention liées à l'environnement de production sont prises en compte. L'environnement de production est décrit par la localisation et les «capabilités» des machines et outils. L'évaluation des séquences de fabrication s'effectue en trois étapes : (a) comparaison basée sur la logique floue entre les «capabilités» de machines et les exigences du produit (b) prise en compte des activités sans valeur ajoutée et enfin (c) une analyse multicritères où chaque critère possède un poids en fonction des besoins de l'entreprise étudiée. Dans le niveau **procédés d'usinage**, les auteurs préconisent l'optimisation des procédés retenus. Les travaux disponibles présentent uniquement la démarche générale afin d'intégrer des contraintes de fabrication. Ces auteurs sont, cependant, parmi les rares à considérer que l'analyse de fabrication est un processus pouvant être mené de manière parallèle au processus de conception.

1.5.2 **Les approches pour une conception usinable**

Nous étudions, dans cette section, les travaux visant l'obtention d'une conception en adéquation avec les moyens de fabrication. Notre but est d'en déduire une approche permettant la prise en compte des contraintes d'usinage en conception.

1.5.2.1 **La conception par contraintes**

[Jaques et al. 1991] proposent une conception par contraintes basée sur une librairie de caractéristiques prédéfinies (Pour plus de détails sur les caractéristiques se référer à la section 2.3.3). Cette approche prend en compte des contraintes d'usinage telles que les types de machines, les outils ainsi que leur matériau, les formes brutes et le matériau des pièces. Elle permet de simuler la mise en position des pièces et leur usinage et de spécifier les tolérances. La conception est restreinte à certaines formes géométriques fabricables, ce qui bride la liberté du concepteur et exige de ce dernier une bonne connaissance du domaine d'usinage et des capacités des machines. Initialement, cette approche cherchait à relier différents attributs d'une pièce à des procédés d'usinage afin que des règles de conception puissent être utilisées pour évaluer la fabricabilité. Or, les caractéristiques interagissent souvent, il est alors difficile d'isoler des instances pour appliquer les règles. De plus, il existe toujours plusieurs manières d'usiner une pièce. Dans de tels cas, il est impossible d'identifier les problèmes de fabrication avec les seules règles de conception. La limitation de l'horizon créatif du concepteur, l'incapacité de cette approche à prendre en compte l'éventail de possibilités d'usinage, sont des lacunes importantes.

1.5.2.2 La conception pour la fabrication

La conception pour la fabrication (DFM pour *Design For Manufacturing*) est une démarche qui tend, dès les premières étapes de conception, à considérer les contraintes et savoir-faire liés à la mise en œuvre du produit. Son objectif est d'obtenir dès la conception une adéquation entre les fonctions à assurer, les solutions proposées et les procédés de fabrication à mettre en œuvre [Mawussi et al. 2000].

Il existe deux manières d'implanter le DFM [Zhang et Zhang 1995]. La première approche est appelée la conception pour la fabrication et l'assemblage (DFMA pour *Design For Manufacture and Assembly*). Elle tente de fournir au concepteur une méthodologie à respecter. La seconde s'apparente à un système support de la conception. Elle essaie de mettre les connaissances et savoir-faire de fabrication à disposition des ingénieurs de conception sous la forme d'outils informatiques d'aide à la prise de décision.

1.5.2.2.1 La conception pour la fabrication et l'assemblage

Cette approche se concentre essentiellement sur les méthodologies de conception.

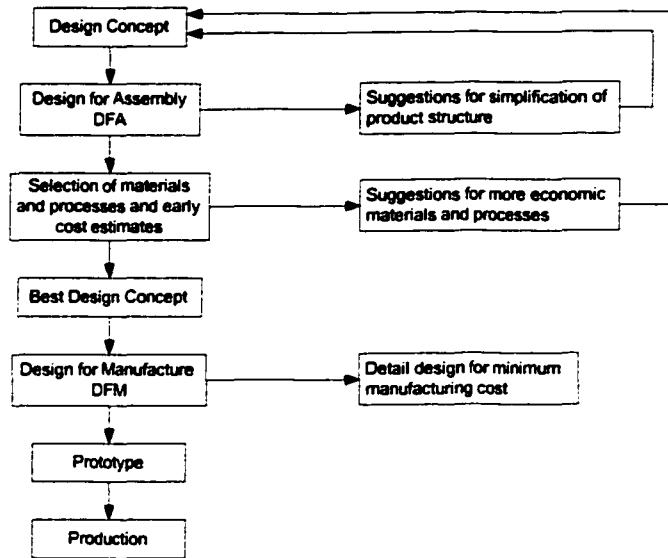


Figure 8 **Etapes de l'approche DFMA** [Boothroyd et al. 1994]

La figure, ci-dessus, résume les étapes prises lors de l'utilisation de la démarche de la DFMA proposée par [Boothroyd et al. 1994]. Tout d'abord, la conception pour l'assemblage est effectuée, menant à une simplification de la structure du produit. Par la suite, les meilleurs matériaux et procédés sont sélectionnés. Une fois les procédés choisis, la DFM est appliquée à une conception détaillée et considère que le concepteur a la charge d'affiner la conception d'une pièce connaissant d'avance les procédés et les matériaux. Ces modifications sont effectuées à un niveau local, mais elles ne doivent pas contrevénir aux contraintes globales telles que le comportement et la qualité mécanique. L'approche de DFMA nécessite des connaissances très poussées en usinage de la part du concepteur (procédés utilisables, coûts d'usinage, influence du matériau sur les vitesses de coupe, etc.). En outre, elle suppose que le concepteur détecte toutes les erreurs de conception.

1.5.2.2.2 Systèmes support à la conception basés sur la préparation à la fabrication

Ces systèmes mettent l'accent sur le rôle de la préparation à la fabrication et possèdent par conséquent une architecture interne similaire aux systèmes de préparation à la fabrication assistée par ordinateur (PFAO). Ces systèmes se composent en général de trois modules [Chang 1990]:

- une description du produit,
- des bases de données de fabrication,
- des algorithmes et une logique de prise de décision.

Nous nous sommes particulièrement intéressés aux systèmes de support à la conception basés sur l'usinage. Leurs bases de données contiennent les procédés d'usinage et leurs «capabilités» (détailées dans le deuxième chapitre). Leurs algorithmes, quant à eux, tentent de valider les données des pièces (types des surfaces, dimensions, etc.) en se basant sur les «capabilités» des machines [Chang 1990].

Suite à l'analyse d'usinage, ces systèmes tentent de proposer des alternatives d'usinage plutôt qu'une seule manière d'usiner car il serait maladroit de rejeter une manière de fabriquer sans en aviser le concepteur. En effet, il est impossible de prévoir les impératifs que ce dernier doit respecter. Une solution acceptable pour lui peut à un moment donné être la moins coûteuse, à un autre moment la plus rapide à produire, et enfin à un autre moment un compromis entre les deux. [Dong et al. 1996], [Liu et al. 1995], [Park et al. 1993] et [Peihua 1994] ont tenté de fournir des alternatives d'usinage par l'extraction d'ensembles alternatifs de caractéristiques d'usinage (Cf. le chapitre 2).

Ces systèmes nécessitent des modèles géométriques complètement déterminés et ne procèdent à l'analyse d'usinage qu'à la fin de la phase de conception détaillée. Par conséquent, le concepteur ne peut pas procéder à la validation de solutions techniques.

Ils impliquent donc, dans leur état actuel, un enchaînement séquentiel entre la conception et la fabrication.

1.5.2.3 Synthèse

Nous avons étudié les approches pour une conception fabricable afin d'en déduire une permettant l'obtention d'une conception usinable. Au contraire de la DFMA, les systèmes basés sur la préparation à l'usinage exigent relativement peu de connaissances du domaine d'usinage du concepteur. En effet, ils nécessitent de modéliser les procédés d'usinage ainsi que leurs «capacités». Ils utilisent, ensuite, ces dernières pour valider les pièces à analyser. Ces systèmes peuvent proposer des manières alternatives pour usiner une pièce, mais ils ne sont, actuellement, utilisés qu'à la fin du processus de conception.

1.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons tout d'abord souligné l'importance de l'intégration des contraintes d'usinage en cours de conception. Les temps de mise sur le marché et les coûts du produit peuvent être diminués, améliorant ainsi la compétitivité de l'entreprise.

Nous avons ensuite présenté le modèle produit développé au LAMIH. Celui-ci supporte la modélisation des aspects fonctionnels du produit. Par ailleurs, il propose un processus de conception *non monotone*. Les contraintes de différents métiers du cycle de vie du produit y ont été intégrées. Le métier de préparation à l'usinage n'a, cependant, pas été traité.

Nous avons, par la suite, pu voir que l'analyse de fabrication est elle-même un *processus* pouvant être mené simultanément au processus de conception. Des approches d'intégration des contraintes de fabrication et d'usinage en conception ont été présentées,

à savoir : la conception par contraintes, la DFMA, et enfin l'utilisation d'outils basés sur la préparation à l'usinage. Les deux premières approches imposent au concepteur des démarches limitant sa créativité. En outre, elles presupposent une bonne connaissance des procédés de fabrication. La dernière approche s'inspire de la préparation à l'usinage et possède plusieurs avantages. Elle ne contraint pas le concepteur dans sa démarche créatrice et met à sa disposition le savoir-faire d'usinage sous une forme pouvant être facilement utilisée. Ainsi, elle ne l'oblige pas à posséder des connaissances qui n'entrent pas dans son champ de compétences. En effet, les procédés d'usinage et leurs «capacités» sont stockés pour être utilisés par des algorithmes permettant la validation des pièces à usiner. Cette approche peut proposer différentes manières alternatives pour usiner le produit. Malheureusement, son utilisation n'a été envisagée qu'en fin de conception.

Notre objectif est d'assister le concepteur en cours de conception de pièces mécaniques destinées à être usinées de manière unitaire ou en petites séries. Par conséquent, nous étudierons, dans le second chapitre, les méthodes et modèles pour atteindre cet objectif. Nous dégagerons les données ainsi que les méthodes nécessaires à une analyse d'usinage. Ceci implique que nous étudierons les modèles des procédés, ainsi que leurs différentes «capacités». Nous déterminerons également les données du modèle du produit devant être analysées et à quel moment elles peuvent être validées. Nous verrons, enfin, les méthodes de validation d'usinage.

CHAPITRE 2

MÉTHODES ET MODÈLES POUR L'ANALYSE D'USINAGE EN COURS DE CONCEPTION

2.1 **Introduction**

Dans le chapitre précédent, nous avons vu qu'il était nécessaire d'intégrer les contraintes d'usinage au plus tôt dans le processus de conception. Nous avons également vu que prendre en compte ces contraintes revenait à effectuer une analyse, à différentes étapes du processus de conception, suivant un point de vue usinage. Cette analyse est possible grâce à des systèmes qui valident les données du modèle produit en se basant sur les «capabilités» des procédés.

Intégrer l'analyse d'usinage au processus de conception revient à répondre aux questions suivantes :

- **Quoi ?** quels sont les éléments analysés ?
- **Pourquoi ?** Dans quel but ?
- **Quand ?** quand analyse t-on ?
- **Comment ?** par quels moyens et par quelles méthodes ?

Dans ce chapitre, nous tenterons de dégager les méthodes d'analyse d'usinage, les données analysées, et enfin les modèles utilisés lors de l'analyse.

Nous détaillons tout d'abord, les éléments constitutifs des procédés, à savoir les machines et outils. Nous présentons ensuite les «capabilités» correspondantes.

En nous basant sur le modèle produit et le modèle du processus de conception développés entre autres auteurs par [Deneux 1993], [Ben Amara 1998] et [Jacquet 1998], nous présentons ensuite les types d'information devant être analysés ainsi que les étapes de conception au cours desquelles ces analyses peuvent avoir lieu.

Dans la dernière section de ce chapitre, nous décrivons les méthodes envisagées pour mener cette analyse.

2.2 Les procédés d'usinage

Dans cette section, nous commençons par définir les procédés d'usinage. Nous présentons ensuite leurs constituants, à savoir, les outils et les machines. Nous proposons enfin une étude des « capacités » des procédés d'usinage.

2.2.1 Définition des procédés

Les procédés d'usinage sont utilisés pour obtenir les nouvelles surfaces d'une pièce par enlèvement de copeaux à partir d'un bloc de matière. Le volume enlevé est l'intersection entre, d'une part, le volume occupé par les parties coupantes de l'outil en mouvement et d'autre part, la pièce qui peut, elle aussi, être en mouvement. Les mouvements de l'outil et/ou de la pièce sont portés par une machine [Chang 1990]. Selon ce dernier, les «capacités» (géométriques et technologiques) d'un procédé d'usinage sont influencées par la machine et l'outil utilisés. L'association de ces deux éléments permet de définir un procédé d'usinage [Maltais 1994]

Selon [Chang 1990], il existe trois niveaux de représentation de la connaissance relative aux procédés : **universel**, **atelier** et **machine**. Au **niveau universel**, on procède à l'association entre un procédé et les formes qu'il peut générer avec un certain intervalle de précision (par exemple, le procédé de perçage peut générer des trous avec une

certaine précision). Cette association est vraie quelle que soit l'entreprise considérée. Au **niveau atelier**, des détails additionnels sont pris en compte. Ce niveau correspond à la connaissance des possibilités spécifiques aux machines d'un atelier donné. Ces connaissances sont internes à l'entreprise et doivent être mises à jour en fonction des « capacités » effectives des machines, elles peuvent varier avec le temps. Le **niveau machine** correspond à la connaissance des « capacités » d'une machine en particulier. En effet, toutes les machines d'un même atelier ne possèdent pas les mêmes « capacités ». Etant donné que nos travaux visent à fournir une contribution générique, nous centrons notre étude sur le niveau universel.

Selon [Chang 1990], les procédés d'usinage peuvent être classifiés en familles (Annexe 1). Nous nous intéresserons dans notre étude aux familles de procédés suivants : **Fraisage, Perçage, Alésage, Tournage et Brochage**. Dans ce qui suit, nous présentons tout d'abord les paramètres caractérisant les machines et les outils. Nous présenterons ensuite les différentes « capacités » des procédés ainsi que les contraintes les régissant.

2.2.2 Les machines

Afin de caractériser les machines de façon générale, les informations suivantes sont principalement à prendre en compte [Chang 1990] :

1. le type de la machine : fraiseuse 3 axes, tour, brocheuse, etc.
2. le type du procédé,
3. l'enveloppe de travail,
4. la puissance à la broche,
5. les limites des vitesses d'avance et de coupe,
6. le couple des axes,
7. la précision des mouvements
8. le coût,

Toutefois, nos travaux n'ayant pas pour objet l'optimisation des gammes de fabrication, nous ne considérerons pas les points **4, 5, 6 et 8**. Nous considérerons uniquement : l'enveloppe de travail, la précision des machines, le type de machine et de procédé.

2.2.3 Les outils

2.2.3.1 Introduction

Une surface usinée est générée par le mouvement relatif entre la pièce et l'outil coupant. L'action des outils sur le métal provoque une compression puis un cisaillement. Le métal glisse sur la face de coupe de l'outil en formant un copeau. Les surfaces engendrées par ces outils sont les surfaces enveloppes des positions occupées par ces derniers. La forme obtenue est, donc, fonction : **a) du profil de la partie active de l'outil**, ainsi que **b) de son mouvement**.

Selon [Chang 1990], les outils peuvent être caractérisés par les paramètres suivants :

- le type de l'outil : foret, fraise, alésoir, etc.
- la géométrie de l'outil (rayon du bec, angles de coupe, etc.). Elle est sélectionnée en se basant sur la géométrie de la forme à usiner, les conditions du matériau de la pièce usinée et le matériau de l'outil.
- Les dimensions de l'outil (longueur totale, diamètre, etc.). La longueur totale de l'outil est sélectionnée de manière à s'assurer que la broche possède un mouvement libre de toute collision.
- le matériau de l'outil (HSS, carbures métalliques, etc.) cette sélection est basée sur le matériau de la pièce et sa dureté.
- l'assemblage de l'outil (pastille de coupe, fixation, etc.).

Les paramètres pouvant être considérés au niveau universel sont la géométrie de la partie coupante de l'outil ainsi que le matériau de l'outil. Plusieurs livres de référence

permettent de déterminer le matériau de l'outil en fonction du matériau de la pièce à usiner (ex : [Boothroyd et al. 1994]). Nous allons présenter dans ce qui suit certains travaux de modélisation de la géométrie des arêtes coupantes des outils.

2.2.3.2 Modélisation de la partie coupante des outils

Dans le cadre de l'intégration des contraintes d'usinage en conception, peu de travaux se sont intéressés à la modélisation de la partie coupante des outils. [Mawussi et al. 2000] proposent un modèle simplifié pour les outils de forme. Les outils étudiés sont les forets, les fraises cylindriques 2 ou 3 tailles et les fraises à rainurer en T ou en queue d'aronde. Les modes de travail considérés sont le fraisage en bout, en roulant avec une plongée axiale ou latérale, ou une combinaison des deux précédents modes (voir Figure 9).

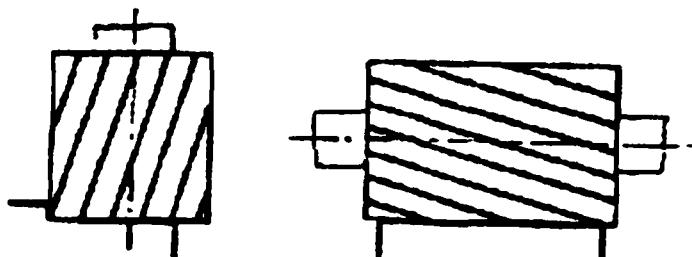


Figure 9 **Fraisage en bout et en roulant**

L'étude se limite aux outils possédant des arêtes de coupe de section droite. Les outils sont représentés par les informations suivantes : l'axe de rotation et les arêtes coupantes. Les arêtes coupantes correspondent aux surfaces fonctionnelles des outils. Les outils considérés peuvent avoir au plus trois surfaces fonctionnelles notées BGB. Si un outil ne possède pas l'une de ces surfaces, la lettre indiquant cette surface est remplacée par un X. Les 4 types d'outils considérés sont illustrés à la Figure 10.

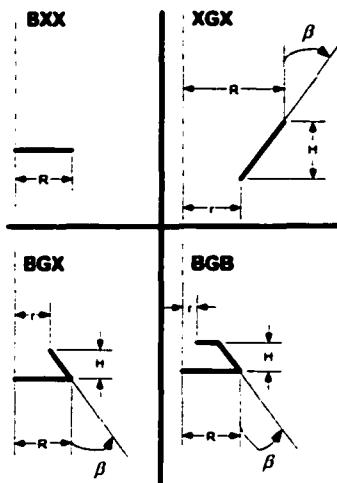


Figure 10 Classes d'outils [Mawussi et al. 2000]

Ces travaux ne considèrent que la modélisation de certains outils utilisés en fraisage. Les modèles présentés peuvent certes inclure les outils de perçage, mais ils ne permettent pas de modéliser les outils de brochage et certains outils utilisés en tournage.

2.2.4 Les «capabilités» des procédés d'usinage

2.2.4.1 Introduction

Les caractéristiques géométriques et technologiques des surfaces usinées dépendent des «capabilités» des procédés utilisés. Ces dernières sont décomposées en «capabilités» géométriques et technologiques. Les «capabilités» des procédés d'usinage dépendent du couple {machine ; outil} et tout en devant respecter certaines contraintes elles sont caractérisées par :

- les formes pouvant être générées,
- les dimensions des formes,
- les tolérances pouvant être obtenues,
- les états de surface atteignables,

- les matériaux pouvant être usinés.

Deux types de contraintes régissent ces «capabilités» :

- géométriques,
- technologiques.

Nous allons détailler, dans ce qui suit, les différentes caractéristiques des «capabilités» des procédés d'usinage.

2.2.4.2 «Capabilité» de génération de formes [Chang 1990]

La «capabilité» de génération de formes correspond aux surfaces et ensembles de surfaces qu'un procédé peut usiner. Elle dépend de la géométrie coupante des outils et de la cinématique de la machine. Le processus de génération de formes procède à partir de deux facteurs : *l'élément génératrice* et *le mouvement génératrice*. L'élément génératrice peut correspondre à une courbe (outil en tournage) ou à une surface (fraise deux tailles). Cet élément est produit par le mouvement de coupe des arêtes coupantes de l'outil. Le mouvement génératrice est le mouvement relatif entre la pièce et l'outil. Les surfaces usinées sont créées par un balayage quelconque de l'élément génératrice et peuvent exister en nombre très grand.

Il existe un grand nombre de procédés différents. Cependant, leur «capabilité» de génération de forme peut être caractérisée par la cinématique des machines et par la géométrie coupante des outils. La figure suivante permet de voir, dans le cas de deux outils, les arêtes coupantes (arêtes noircies) et les mouvements d'avance ou de coupe possibles des outils (flèches).

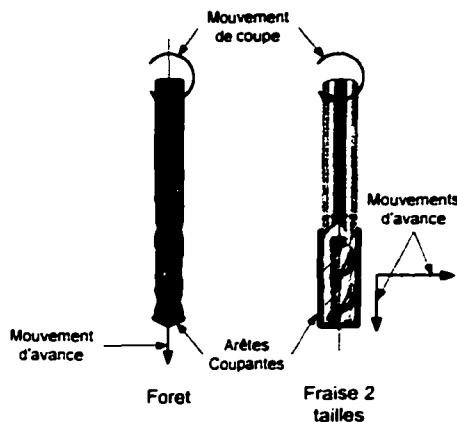


Figure 11 Géométrie des arêtes de coupe et mouvements possibles

Nous avons pu voir qu'il est possible de déduire la «capacité» de génération de formes à partir des outils de coupe et de leurs mouvements. Cependant l'analyse d'usinage considère le problème inverse, à savoir, *"pour une forme donnée, quel procédé choisir ?"*. La «capacité» de génération des formes ne peut être stockée dans une base de données car les surfaces et ensembles de surfaces pouvant être générées sont infinies. Par conséquent, la détermination de cette «capacité» exigera un raisonnement géométrique basé sur la géométrie coupante des outils et sur la cinématique des machines.

2.2.4.3 «Capacité» dimensionnelle

Tout procédé possède des limites dimensionnelles concernant les «capacités» de génération de formes. Ces limites correspondent à la «capacité» dimensionnelle qui est déterminée par la taille de l'outil et/ou l'enveloppe de travail de la machine. Cette «capacité» correspond à des contraintes sur les dimensions des surfaces et ensembles de surfaces pouvant être usinées.

Pour un travail de forme, la «capacité» dimensionnelle est généralement déterminée par les dimensions de l'outil. Par exemple, le procédé de perçage ne peut pas percer de grands trous relativement profonds, ni des trous infiniment petits. Il ne peut générer que des trous avec des incrément discrets sur le diamètre. Le travail d'enveloppe, quant à lui, est limité par les dimensions de l'outil, mais également par la machine sur laquelle l'opération est effectuée. Les problèmes rencontrés lors de la détermination des «capacités» dimensionnelles sont les interférences entre la broche et la pièce et les courses maximales de la machine.

Etant donné que cette «capacité» est liée à la «capacité» de génération de formes, elle ne pourra pas non plus être stockée dans une base de données. Elle devra être calculée.

2.2.4.4 «Capacité» de tolérances

Cette «capacité» permet de vérifier si la précision d'un procédé est plus faible que les tolérances spécifiées par le concepteur. Plusieurs facteurs affectent cette précision à savoir : l'usure et la déflexion de l'outil, le phénomène de broutage, la déformation thermique des éléments de la machine de l'outil et de la pièce, les imprécisions de contrôle, les erreurs de mise en position, etc. La «capacité» de tolérance est une combinaison de ces éléments. Il n'est pas toujours possible de prédire les tolérances atteignables de manière certaine. On utilise, en général, des données expérimentales pouvant être stockées dans une base de données et liées aux procédés correspondants. Rappelons que nous nous situons au niveau universel. Par conséquent, les données stockées concerneront un type de procédé (un ensemble de machines et outils) et non un procédé particulier en opposition au niveau atelier ou machine.

2.2.4.5 «Capabilité» de propriétés de surfaces

L'état de surface d'une surface possède deux composantes [Stephenson et Agapiou 1996]. La première composante dite **géométrique** dépend de la vitesse d'avance et de coupe, du rayon du bec de l'outil de coupe et de l'angle de l'outil par rapport à la surface. La seconde composante, dite **naturelle** résulte de l'usure de l'outil, des hétérogénéités dans le matériau et des vibrations de la machine. Des formules ont été proposées pour calculer la composante géométrique en fonction du procédé. La valeur obtenue par ces formules fournit une indication sur la limite inférieure de précision des procédés. Cette limite n'est pas toujours atteinte à cause de la composante naturelle. Etant donnée la difficulté à déterminer, de manière précise, les «capabilités» de propriétés de surface, la plupart des travaux proposent de stocker les résultats des expérimentations dans des bases de données exactement comme dans le cas des «capabilités» de tolérances.

2.2.4.6 «Capabilité» d'usinage de matériaux

La «capabilité» d'usinage de matériaux ou indice d'usinabilité se réfère à la facilité (ou difficulté) avec laquelle un matériau ou un groupe de matériaux peuvent être usinés. Plusieurs attributs du matériau affectent l'usinabilité. Les plus importants sont la composition chimique, la microstructure, les propriétés mécaniques (ex : dureté) et physiques (ex : conductivité thermique). L'usinabilité est également affectée par le matériau de l'outil et les conditions de coupe. L'usinabilité d'un matériau ne peut dès lors être obtenue que par expérimentation et son évaluation dépend des conditions du test. Selon [Boothroyd et al. 1994] l'expression la plus utilisée pour calculer l'indice d'usinabilité dans les tables de propriétés des matériaux fournies dans les livres de référence est :

$$I_m = 100 \times \frac{(V_{60})_{mat}}{(V_{60})_{ref}}$$

Où

- $(V_{60})_{\text{mat}}$ est la vitesse de coupe pour laquelle l'outil possède une durée de vie de 60 minutes pour le matériau étudié,
- $(V_{60})_{\text{réf}}$ est la vitesse de coupe pour laquelle l'outil possède une durée de vie de 60 minutes pour un matériau dont l'indice est de 100.

Ces vitesses sont obtenues sous les mêmes conditions. Les pratiques d'usinage changent avec le temps en fonction de nouveaux développements dans les matériaux, des natures d'outils ainsi que des capacités des machines. Pour que les indices d'usinabilité de matériau disponibles soient toujours valides, il faut les stocker dans une base de données et les mettre régulièrement à jour.

2.2.4.7 Les contraintes d'usinage

Lors de la modélisation des «capacités» d'un procédé, il n'est pas suffisant de considérer les «capacités» de génération de formes et dimensionnelles. En effet, un certain nombre de contraintes doivent être respectées par tous les procédés. Il existe deux types de contraintes : *géométriques* et *technologiques* [Chang 1990].

2.2.4.7.1 Contraintes géométriques

Ces contraintes sont identifiées à partir des relations géométriques entre les formes à usiner. Il existe plusieurs raisons à ces contraintes [Chang 1990] (pp. 128) :

1. interférence entre les parties non coupantes de l'outil et la pièce,
2. raisons technologiques.

Les limitations de l'outil dues à la géométrie sont celles imputables aux parties non coupantes. Plusieurs de ces contraintes découlent des interférences entre les parties non coupantes de l'outil et de la pièce. Par exemple, il est impossible d'aléser un trou qui n'a

pas été préalablement percé car le fond de l'alésoir, partie non coupante, serait en contact avec le matériau.

Certaines contraintes technologiques dépendent de facteurs géométriques, elles sont classées en tant que contraintes géométriques. Nous pouvons citer le perçage d'un trou à partir d'une surface plane oblique. Le glissement du foret fait que la position et la forme du trou sont difficiles à contrôler. Nous pouvons également citer le cas du perçage d'un trou interférant avec une longue rainure (Cf. Figure 12). En effet, les force et couple de coupe déforment la rainure. La figure suivante, sans vouloir être exhaustive, permet d'illustrer certaines des contraintes géométriques à prendre en compte.

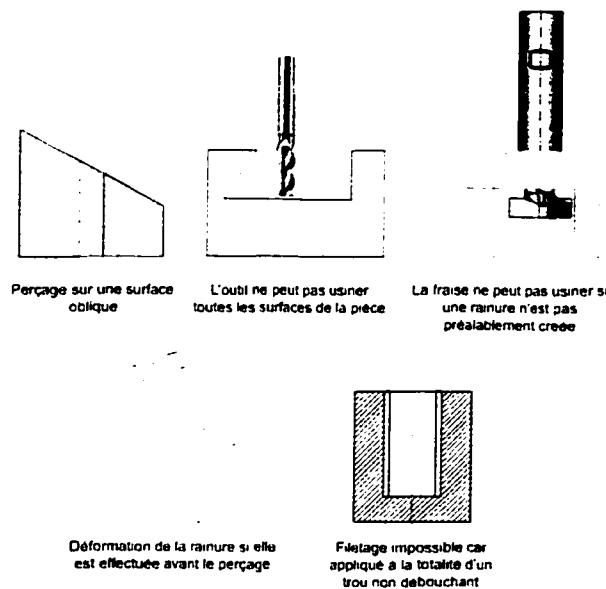


Figure 12 Contraintes géométriques [Chang 1990]

Pour un procédé donné, les contraintes géométriques ne varient pas au contraire des contraintes technologiques. En effet, la géométrie générale de coupe des outils ne varie pas. La prise en compte de ces contraintes nécessite le développement d'un raisonnement

géométrique. Ce raisonnement nécessite le développement d'algorithmes utilisant les capacités des modèles solides [Chang 1990].

2.2.4.7.2 Contraintes technologiques

Ces contraintes correspondent aux limites imposées par la puissance des machines et les efforts de coupe. Il existe d'autres contraintes technologiques dues aux déflexions de la pièce et à la dureté du matériau. Plusieurs variables interviennent dans le calcul des efforts de coupe pour un outil donné (vitesses d'avance et de coupe, profondeur et largeur de coupe, le fluide de refroidissement, le matériau de la pièce et l'affûtage de l'outil). La prédiction exacte des efforts de coupe dans un environnement de production est impossible. Cependant, selon [Chang 1990], la connaissance des valeurs exactes n'est pas nécessaire pour générer des gammes d'usinage. Une estimation grossière est suffisante et peut être obtenue par le biais de formules empiriques. Les paramètres de ces formules sont obtenus expérimentalement.

2.2.5 Conclusion

Après avoir étudié les «capacités» des procédés ainsi que leurs contraintes, nous pouvons dire que l'analyse d'usinage revient à poser la question suivante : *"en considérant des contraintes géométriques et technologiques, pour une forme donnée, quel procédé choisir?"*

Nous avons vu que l'analyse des «capacités» de tolérances, d'état de surface, et d'usinage de matériau peut se baser sur le résultat d'expérimentations, compilées dans des bases de données. La «capacité» de génération de formes et les «capacités» dimensionnelles peuvent être déduites suite à des raisonnements géométriques basés sur la géométrie des parties coupantes des outils et sur la cinématique des machines [Chang

1990]. Par conséquent, certaines données des procédés sont analysées de manière *comparative*, tandis que d'autres le sont de manière *analytique*.

Nous allons présenter, dans la section qui suit, les données du produit devant être analysées, les phases de conception dans lesquelles elles sont déterminées, ainsi que les approches existantes pour mener les analyses d'usinage.

2.3 Les données du produit pouvant être analysées au cours de la conception

Nous avons pu voir au premier chapitre que la conception passait par plusieurs niveaux de modélisation. Or, ce n'est qu'à partir du niveau de modélisation technique publique que le concepteur associe une solution *physique* avec des formes géométriques aux concepts du modèle technologique. Dans ce paragraphe, nous présentons, tout d'abord les données susceptibles d'être analysées et déterminées dans les niveaux de modélisation technique publique et privé. Nous détaillons, ensuite, chacun des modèles de ces données.

2.3.1 Données déterminées au niveau de modélisation technique publique

Lorsque le concepteur se situe au niveau technique publique, il spécifie les solutions techniques en définissant les formes fonctionnelles des composants. Toute solution technique peut être supportée par des composants standards (roulement, joint, etc.) ou secondaires (couverture) porteuses de formes fonctionnelles. La présence d'une forme fonctionnelle est liée à la matérialisation d'une liaison mécanique entre deux composants. Une forme fonctionnelle est définie par les caractéristiques suivantes [Ben Amara 1998] :

- une association de surfaces fonctionnelles,
- des caractéristiques de tolérances

- des caractéristiques de propriétés de surfaces,
- des caractéristiques de matériau.

2.3.2 **Données déterminées au niveau de modélisation technique privé**

Le produit final est composé de formes fonctionnelles, mais également de formes complémentaires. L'existence de ces dernières n'est justifiée que par l'impératif de cohésion des composants élémentaires. Elles peuvent être considérées comme des formes permettant le raccordement entre les surfaces fonctionnelles disjointes. Cependant, certaines pièces mécaniques peuvent n'être décrites que par des formes fonctionnelles. Les surfaces composant les formes complémentaires peuvent être décrites par les caractéristiques de forme. Dans la section suivante nous détaillons les données devant être analysées.

2.3.3 **Données du produit à analyser d'un point de vue usinage**

2.3.3.1 **Caractéristique de forme**

Une caractéristique de forme est un ensemble de données topologiques et géométriques obtenues suite à une opération d'usinage de finition. Les surfaces à usiner, résultent de l'application de plusieurs opérations (ébauche, demi-finition et finition). Le nombre de ces opérations dépend de l'état de surface spécifié et des conditions initiales de l'usinage (brut). Nous nous intéresserons dans nos travaux aux opérations d'usinage de finition permettant l'obtention des surfaces finales (fonctionnelles ou non).

Les caractéristiques de forme peuvent correspondre à :

- une face (ex : Face plane, trou,...)
- un ensemble de faces devant être usinées de manière dépendante quel que soit le procédé d'usinage utilisé : l'usinage d'une des faces affecte systématiquement

les autres faces appartenant à l'association [Deneux 1993]. Les associations analysées peuvent ne pas respecter la relation d'*Euler–Poincaré*.

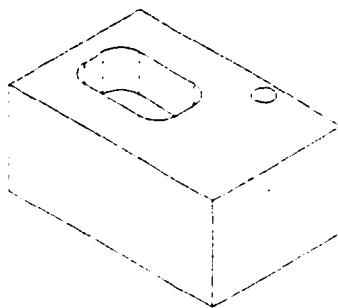


Figure 13 Exemples de caractéristiques de forme

En général, les surfaces fonctionnelles appartiennent à l'ensemble suivant : Cône, Cylindre, Plan, Sphère, Tore. Les surfaces gauches, générées sur des machines à 4 ou 5 axes ne seront pas prises en compte. Les machines avec moins de 4 axes sont actuellement très répandues et permettent d'usiner les surfaces fonctionnelles des pièces que nous étudions. Nous nous limiterons à ces machines et ne traiterons pas les machines à 4 et 5 axes.

2.3.3.2 Caractéristiques de tolérances

L'utilisation des tolérances résulte du fait que les moyens de fabrication sont incapables de générer des formes parfaites. Elles spécifient les variations permises pour les dimensions, la position, l'orientation et la forme des caractéristiques d'une pièce dans un assemblage mécanique. Leur spécification doit garantir que :

- le produit fonctionnera correctement,
- les composants du produit sont interchangeables,
- les pièces sont assemblables.

Deux classes majeures de tolérances sont distinguées, la première est celle des **tolérances dimensionnelles** qui spécifient les déviations permises par rapport à une certaine dimension nominale. La seconde est celle des **tolérances géométriques** divisées en plusieurs types : position, forme et battement.

2.3.3.3 Caractéristique d'état de surface

L'aptitude d'une pièce à une fonction donnée peut dépendre des états de ses surfaces. Par exemple, l'étanchéité entre un arbre et un cylindre peut être fonction de l'état de surface de l'alésage du cylindre et de l'usure du joint élastique appliqué entre l'arbre et le cylindre. Les critères les plus utilisés, qui correspondront aux attributs de la caractéristique d'état de surface sont :

- W : Amplitude moyenne de l'ondulation
- Aw : Pas moyen de l'ondulation
- R : Amplitude moyenne de la rugosité,
- Ar : Pas moyen de la rugosité,
- R_{max} : Amplitude maximale de rugosité
- Ra : Critère moyen arithmétique par rapport à la ligne moyenne.

2.3.3.4 Caractéristique de matériau

Les attributs concernant le matériau peuvent inclure [Ben Amara 1998]:

- Son nom,
- Un code de composition qui peut être standard ou propriétaire aux entreprises,
- Les propriétés du matériau (Composition chimique),
- Les traitements thermiques et traitements de surfaces.

2.3.4 Conclusion

Nous avons présenté les données du produit pouvant être analysées d'un point de vue usinabilité. Celles-ci sont définies dans le domaine de modélisation technique publique (resp. privé) quand elles appartiennent aux formes fonctionnelles (resp. complémentaires).

Les analyses d'usinage des données, dans ces deux niveaux de modélisation, se basent sur les «capabilités» de génération de formes, dimensionnelles, de tolérances, de propriétés de surface et d'usinage de matériaux. Nous avons également cerné le sous-ensemble de procédés que nous étudierons. Il correspond aux procédés permettant la génération de surfaces fonctionnelles de pièces mécaniques courantes.

Pour intégrer les contraintes d'usinage dans le processus de la conception, il faut fournir au concepteur des méthodes pour l'assurer de l'usinabilité de ses propositions. Celles-ci sont composées de données de natures distinctes dont l'analyse requiert des entités de haut niveau sémantique. La plupart des travaux de recherche se basent sur les caractéristiques. Nous proposerons dans le paragraphe suivant les méthodes d'analyse du produit basées sur ces entités.

2.4 Les approches d'intégration des contraintes d'usinage en conception

2.4.1 Introduction

L'intégration des contraintes d'usinage au niveau du processus de conception nécessite l'utilisation d'entités de haut niveau sémantique et dans ce cadre les caractéristiques d'usinage constituent un concept privilégié comme le montrent les travaux de [Klocke et al. 2000] et de [Maropoulos et Baker 2000] qui ont proposé des approches pour valider les propositions d'une conception non entièrement détaillée. Dans cette section, nous

présentons, tout d'abord, les approches de validation d'usinage basées sur les caractéristiques. Nous concluons par les approches de validation globale représentant les alternatives d'usinage d'une proposition de conception.

2.4.2 Approches de validation d'usinage

Les approches de validation d'usinage utilisent les techniques d'extraction et de validation des caractéristiques de forme. Nous introduirons, tout d'abord, les définitions des caractéristiques et des caractéristiques d'usinage. Nous présenterons, ensuite, les méthodes de validation d'usinage basées sur les caractéristiques d'usinage.

2.4.2.1 Définitions des caractéristiques

Les caractéristiques, sous leur forme générale, peuvent être considérées comme un ensemble d'informations référant à des aspects géométriques ou technologiques du produit, pouvant être utilisées pour raisonner à propos de sa conception ou de sa fabrication [Salomons 1993]. Elles ont été définies par [Shah 1991] comme la signification d'un point de vue d'ingénierie de la géométrie d'une pièce ou d'un assemblage. Selon [Shah et Mäntylä 1995], elles représentent des formes génériques auxquelles les ingénieurs peuvent associer certains attributs et connaissances utiles pour raisonner à propos du produit. Selon d'autres auteurs, une caractéristique est un terme général qui indique les caractéristiques non uniques qu'une forme devrait posséder pour être réalisée par certains procédés d'usinage à partir d'une pièce brute (rainures, ...).

Nous pouvons déduire de ce qui précède que les caractéristiques représentent la signification, d'un point de vue ingénierie, des informations relatives au produit. Elles possèdent une signification sémantique élevée et permettent des raisonnements complexes concernant les domaines intervenant dans le cycle de vie du produit. Nous

invitons le lecteur à se référer à l'annexe 2, s'il désire plus d'informations à propos des caractéristiques.

2.4.2.2 Définitions des caractéristiques d'usinage

La plupart des travaux, visant à contribuer à l'intégration entre les systèmes de CAO et de PFAO définissent les caractéristiques d'usinage comme des entités géométriques. Ces entités correspondent aux caractéristiques de forme et sont issues du modèle géométrique du produit [Waco 1994] [Lin et al. 1997] [Han et Requicha 1998]. D'autres travaux, cependant, proposent des définitions qui, outre la géométrie nominale, incluent les paramètres technologiques du produit tels les tolérances, l'état de surface et la rugosité [Cheng 1996].

[Chep et Tricarico 1999] ont proposé de définir les caractéristiques d'usinage comme étant composées de caractéristiques primaires. Ces dernières peuvent être directement issues du modèle géométrique obtenu à partir des systèmes CAO existants. Elles correspondent à l'une des trois catégories suivantes :

- caractéristiques de forme ;
- caractéristiques de précision : elles sont liées à des faces et correspondent aux tolérances et états de surface ;
- caractéristiques technologiques : elles définissent des informations liées au matériau de la pièce.

Une définition générique des caractéristiques d'usinage est proposée par [Shah et Mäntylä 1995]. Selon ces derniers, les caractéristiques d'usinage correspondent "à une collection de faces ou d'éléments géométriques reliés qui correspondent à une méthode ou à un procédé d'usinage particulier ou, qui peuvent être utilisés afin de raisonner à propos des méthodes ou procédés d'usinage appropriés pour créer la géométrie". Les

éléments géométriques, dans cette définition, incluent la géométrie et topologie ainsi que les informations technologiques (état de surface, tolérances et matériau).

2.4.2.3 Reconnaissance des caractéristiques d'usinage

Les approches basées sur les caractéristiques d'usinage considèrent qu'un produit est usinable quand ses caractéristiques d'usinage permettent la mise en œuvre d'opérations d'usinage connues. Ces approches passent par deux étapes majeures. La première étape *d'extraction* permet d'obtenir les caractéristiques d'usinage à partir de la représentation du modèle produit. La seconde étape, *de validation*, vérifie que les caractéristiques extraites sont usinables. Deux approches de validation existent.

La première approche de validation, dite *a priori* [Shirur et al. 1998], regroupe les travaux cherchant à créer une correspondance entre des primitives prédefinies et un sous-ensemble extrait de la représentation du produit. Chaque type de caractéristique est associé à un ensemble de procédés et par conséquent, cette approche ne peut pas gérer de "nouvelles" caractéristiques d'usinage non prédefinies. Elle nécessite d'énumérer tous les types de caractéristiques et de coder les règles de sélection des procédés à ces dernières.

La seconde approche de validation regroupe les travaux de [Shirur et al. 1998], [Mawussi et al. 2000] et [Msaaaf et al. 2000]. Dans cette approche, il importe peu de connaître la nature spécifique de la caractéristique de forme. Les procédés sont modélisés, permettant ainsi de capturer la connaissance qui s'y rapporte, tout en évitant de définir toutes les caractéristiques d'usinage possibles. Cette approche est appelée en anglais "*mapping from volumes to processes*" [Shirur et al. 1998].

La phase de validation est la phase la plus délicate pour l'approche basée sur des primitives prédefinies. Certes, cette approche possède l'avantage de stocker, pour toute

caractéristique prédéfinie, les procédés candidats ainsi que les paramètres de coupe, cependant, les inconvénients sont nombreux. Tout d'abord, il faut lister toutes les caractéristiques de forme possibles. Cette tâche est fastidieuse au vu de toutes les possibilités de forme offertes par les procédés d'usinage. Par ailleurs, il faut mettre à jour la base de données des entités prédéfinies dès que :

- un nouveau procédé est introduit : il faut l'associer aux caractéristiques déjà stockées qu'il peut générer. Il faut également enrichir la base de données avec les caractéristiques de forme qu'il peut générer et n'y figurant pas.
- une nouvelle caractéristique de forme est trouvée : il faut chercher les procédés candidats, et si un nouveau procédé est trouvé procéder aux modifications citées dans le point ci-dessus.

Enfin, le résultat de l'intersection entre caractéristiques est difficile à reconnaître et nécessite souvent de développer des heuristiques ou de traiter des cas particuliers. En effet, les motifs permettant d'identifier les caractéristiques sécantes sont modifiés ou détruits. L'approche de validation basée sur des caractéristiques prédéfinies ne nous paraît pas assez robuste ni assez générale pour permettre d'intégrer les contraintes d'usinage. Si le lecteur désire néanmoins consulter les travaux de validation basés sur cette approche, il peut se référer à l'annexe 3.

L'approche de validation par les procédés d'usinage utilise des techniques permettant une correspondance entre les caractéristiques de forme et les modèles des procédés. Afin de capturer la connaissance de fabrication, il paraît plus judicieux d'utiliser les procédés d'usinage plutôt qu'une bibliothèque de caractéristiques de forme idéales. Cette approche possède les avantages suivants :

- elle permet une formalisation des modèles des procédés d'usinage,
- les procédés existent en nombre fini, leur caractérisation et la mise à jour de leur base de données est plus simple en comparaison de la mise à jour de la base de données des caractéristiques de forme prédéfinies,

- elle se base sur le fruit de la conception (géométrie, tolérances, etc.) et sur les moyens de fabrication créant ainsi un lien explicite entre les domaines de la conception et la fabrication.
- elle évite le problème de reconnaissance de caractéristiques inter-sécantes car elle ne tente pas de reconnaître des motifs prédéfinis,
- elle permet de valider des caractéristiques de forme n'ayant jamais été définies auparavant,

Dans ce qui suit, nous présentons les travaux d'extraction des caractéristiques de forme.

2.4.2.3.1 Les approches d'extraction des caractéristiques de forme

La plupart des approches d'extraction des caractéristiques de forme parcourant les limites d'un solide à la recherche de structures de faces et d'arêtes obéissant à des relations géométriques et topologiques [Subrahmanyam 1995]. Les algorithmes d'extraction des caractéristiques de forme peuvent être classifiés en plusieurs catégories :

- **Les algorithmes basés sur les arbres CSG** travaillent à partir des représentations CSG des modèles solides. Leur objectif est de réarranger l'arbre CSG en un ensemble de caractéristiques distinctes. Cependant, une même pièce peut être représentée par plusieurs arbres CSG. Il n'est, par conséquent, pas possible d'obtenir un seul modèle de caractéristiques pour un même produit. Pour cette raison, nous avons décidé de rejeter cette approche.
- **Les algorithmes à base de règles** identifient les caractéristiques sur la base de certaines règles spécifiées qui les caractérisent.
- **Les algorithmes à base de graphes** organisent le B-Rep d'un objet en une structure de graphes et cherchent des sous-graphes correspondant à divers types de caractéristiques.

- **Les techniques de représentation symbolique du produit fini** se décomposent en deux techniques a) Utilisation de grammaires de caractéristiques, b) La reconnaissance syntaxique de motifs.
- **Les algorithmes basés sur les delta-volumes** recherchent des volumes en se basant sur des techniques de décomposition du delta volume entre le brut et la pièce usinée.
- **L'algorithme basé sur la notion d'angle matière** exploite la concavité des arêtes pour associer des faces voisines. Tous les ensembles de faces partageant une face commune sont ensuite regroupés.

Nous allons présenter, un peu plus en détail, les différentes techniques d'extraction de caractéristiques de forme, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients.

2.4.2.3.1.1 Les approches à base de règles

Dans ces techniques la topologie des caractéristiques de forme est définie par des règles. Ainsi, un trou peut être défini par : *"Le trou commence avec une face d'entrée. Toutes les faces du trou partagent un axe commun. Toutes les faces du trou sont séquentiellement adjacentes. Le trou se termine par un fond de trou valide"* [Shah et Mäntylä 1995].

Plusieurs problèmes sont soulevés lors de l'utilisation de ces techniques. Tout d'abord, on ne peut recenser toutes les caractéristiques de forme et par conséquent on ne peut déterminer toutes les règles de production [Lin et al. 1997]. Par ailleurs, les règles ne sont pas uniques aux caractéristiques d'usinage. En effet, étant donné que les règles concernent la topologie et géométrie des caractéristiques et non les procédés d'usinage, une même caractéristique peut nécessiter plusieurs règles (Cf. Figure 14).

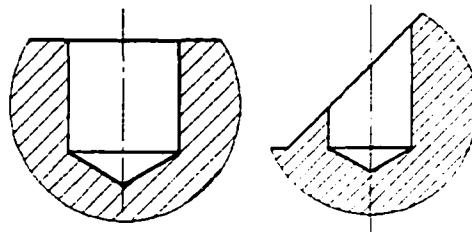


Figure 14 Un trou exigeant plusieurs règles de définition

2.4.2.3.1.2 Les approches à base de graphes

Ces approches cherchent dans le modèle solide, organisé sous forme de graphe, des sous-graphes pré-définis. Deux types de graphes sont utilisés le Graphe d'Adjacence de Faces ou (*Face Adjacency Graph FAG*) et le Graphe d'Adjacence de Faces Attribué FAAG. Lors du processus de reconnaissance de sous-graphes, dès qu'une caractéristique est reconnue, son sous-graphe est effacé du graphe représentant la géométrie du produit.

Un pré-traitement est nécessaire afin de construire les graphes et des calculs supplémentaires sont nécessaires pour extraire les sous-graphes des caractéristiques du reste du graphe représentant le produit. Ces approches ont des difficultés à reconnaître les intersections entre caractéristiques car leurs conditions d'existence ne sont plus satisfaites. De plus, elles ne peuvent reconnaître des caractéristiques incomplètes ou partielles car leurs géométrie et topologie non standard les rendent difficiles à caractériser et à reconnaître. Par ailleurs, ces méthodes manquent de généralité et produisent un seul modèle de caractéristiques par pièce. Enfin, ces approches rencontrent des problèmes d'explosion combinatoire et peuvent ne pas converger en un temps polynomial. Par conséquent, des heuristiques sont requises pour limiter la recherche à des zones et à des sous-motifs du modèle.

2.4.2.3.1.3 Les approches de représentation symbolique du produit fini

Une grammaire de graphes est une description formelle d'une classe de graphes qui peut être créée en appliquant une séquence de règles définies dans la grammaire. A partir d'une grammaire de graphe et d'un graphe, un algorithme d'analyse de graphe peut déterminer si le graphe appartient au langage de la grammaire et, le cas échéant, les règles nécessaires afin de générer le graphe. Les approches basées sur les grammaires de graphes rencontrent les mêmes difficultés que celles citées pour les techniques basées sur les graphes.

2.4.2.3.1.4 Les approches d'extraction de volumes

Il existe deux approches principales d'extraction de volumes : Somme de Volumes Alternées ASV (connue comme (*Convex Hull Decomposition*), et la décomposition du Delta Volume DVD (*Delta Volume Decomposition*).

L'approche de décomposition ASV calcule tout d'abord la coque convexe H_0 de l'objet original S_0 . La coque convexe peut être considérée comme le volume obtenu en étirant une membrane élastique autour de l'objet, elle constitue la coque convexe minimale entourant l'objet considéré. En soustrayant S_0 de H_0 , l'objet S_1 est obtenu. L'objet S_1 soustrait de sa coque convexe H_1 donne S_2 . Le processus récursif continue jusqu'à obtenir un objet équivalent à sa propre coque. Cette méthode a été proposée par [Woo 1982] et divergeait souvent. Une proposition a été faite afin de corriger les problèmes de divergence. La méthode dite ASVP pour *Alternating Sum of Volumes with Partitioning*, se base sur une analyse des sommets d'un objet ASV non convergent. Pour plus d'informations sur cette méthode voir [Kim 1992]. Cette méthode a le grand inconvénient que les objets extraits durant la décomposition en ASV peuvent être des formes n'ayant aucune utilité pour des applications telles que l'usinage.

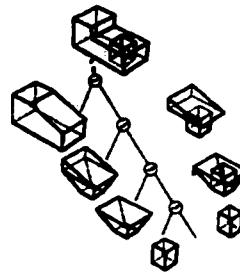


Figure 15 Décomposition en ASV d'un polyèdre [Kim 1992]

Les delta volumes sont censés correspondre à des volumes usinés. Des volumes sont tout d'abord déterminés par des différences booléennes entre le brut et la pièce usinée. Ils sont ensuite décomposés en volumes non sécants. Une fois obtenus, il s'agit de classifier les volumes par l'utilisation de règles de reconnaissance appliquées à leur géométrie et topologie.

2.4.2.3.1.5 L'approche basée sur la notion d'angle matière

[Deneux 1993] définit les caractéristiques d'usinage comme des associations de faces devant, pour des raisons dépendant des possibilités physiques des machines, être usinées de manière dépendante. Ces associations sont le fruit de ce que Deneux nomme une association géométrique obligatoire. Ces associations sont liées à la notion d'angle matière que l'on retrouve dans les manuels traitant d'usinage (Voir [Dietrich et al. 1981] p. 130). La méthode proposée s'effectue en deux étapes. La première étape consiste à appliquer des règles de fixation. Il s'agit d'interroger le modèle topologique et géométrique du solide afin d'extraire les paires de faces qui partagent une arête concave et dont l'angle matière au niveau de l'arête est supérieur à 180 degrés. La seconde étape consiste à appliquer les règles de propagation dont le fruit consiste à regrouper les groupes de faces possédant une face en commun.

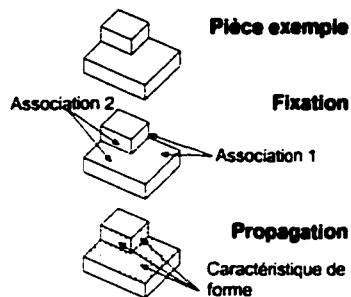


Figure 16 Application du principe de l'angle matière (Inspiré de [Deneux 1993])

2.4.2.3.1.6 Synthèse

Shah et Mantylä ont proposé de tester la robustesse des techniques d'extraction des caractéristiques de forme par extraction de volumes d'usinage sécants. Les approches d'extraction se basant sur les techniques suivantes sont les plus robustes **a)** sur les volumes et **b)** sur l'association de faces par calcul de l'angle matière. En conséquence, nous ne présenterons, dans la section suivante, que les approches de validation des caractéristiques de forme extraites par ces deux techniques.

2.4.2.3.2 Correspondance entre les caractéristiques de forme et les procédés d'usinage

Parmi les rares travaux œuvrant dans ce sens, nous pouvons citer les travaux de deux équipes présentés dans les articles de [Shen et Shah 1998] et de [Shirur et al. 1998] d'une part et de [Mawussi et al. 2000] d'autre part.

La première équipe propose une démarche en deux étapes. La première étape part de la pièce finie et de son brut initial. Elle extrait des volumes correspondant à des opérations d'usinage. La technique d'extraction utilisée HSPCE (*Half Space Partitioning at Concave Edges*) considère des volumes bornés par des surfaces "régulières" (i.e. plan,

cylindre, cône, et sphère) [Shen et Shah 1998]. La seconde étape a pour but de créer une correspondance entre ces volumes et des procédés d'usinage [Shirur et al. 1998]. Pour ce faire, les auteurs définissent un *volume élémentaire d'usinage* pour chaque nouveau procédé. Ce volume est le volume de matériau enlevé par l'outil lors du mouvement de coupe sans mouvement d'avance. Les volumes élémentaires ainsi que les contraintes les concernant (mouvements possibles des volumes, types d'interférence,..) sont stockés dans une base de données qui est mise à jour dès l'ajout d'un nouveau procédé. Les auteurs ont défini des opérateurs géométriques équivalents aux mouvements d'avance des procédés. Lorsque ces opérateurs géométriques sont appliqués aux volumes élémentaires d'usinage, ils permettent de définir la «capacité» de génération de formes des procédés (ensemble de surfaces pouvant être usinées). Le but de cette deuxième étape est de vérifier qu'il existe un ensemble d'opérateurs géométriques pouvant être appliqués au volume élémentaire afin d'obtenir le volume extrait. L'application de l'inverse de ces opérateurs géométriques au volume extrait permet d'obtenir le volume élémentaire. Ces opérateurs inverses sont déduits en analysant les degrés de liberté des volumes extraits par rapport à la pièce finie. Trois types de degrés de liberté ont été définis, à savoir, (1) degrés de liberté de translation **TDOF**, (2) degrés de liberté de rotation **RDOF** et (3) les degrés de liberté d'accessibilité radiale **rDOF**. Un exemple de leur démarche peut être vu dans la Figure 17.

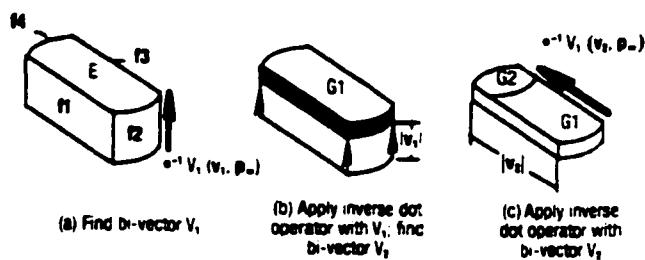


Figure 17 Opérateurs pour l'extraction de volumes d'usinage élémentaires
[Shirur et al. 1998]

Dans cet exemple, le volume extrait E possède un degré de translation selon l'axe OZ. L'application d'opérateurs géométriques permet de déduire tout d'abord le volume G1, et ensuite le volume élémentaire G2 (cylindre = volume élémentaire d'une opération de fraisage).

[Mawussi et al. 2000] procèdent à l'extraction de caractéristiques d'usinage en utilisant l'approche d'angle matière. Ces caractéristiques sont ensuite classifiées en trois grandes familles grâce à l'analyse de leur graphe d'adjacence. Les principales classes sont les suivantes : **Evidement** l'une des faces est reliée à toutes les autres faces, **Lumière** chacune des faces est liée à deux autres formant ainsi une boucle, **Enfoncement** toute caractéristique ne correspondant à aucune des deux autres classes. Mawussi et consorts proposent deux modèles simplifiés l'un pour les outils et l'autre pour les machines. Le modèle des outils étudiés est présenté dans le paragraphe 2.3.2 de ce chapitre. Le modèle proposé pour les machines est défini à partir des paramètres pilotés par le directeur commande numérique de la machine. L'association entre les caractéristiques extraites et les outils est possible à partir d'un ensemble de contraintes définies par l'auteur. Ces contraintes portent sur les faces et associations de faces que les outils peuvent générer. Elles permettent de prendre en compte l'accessibilité des faces usinées par rapport à l'outil utilisé. Le choix des machines se base sur l'orientation relative entre l'outil et la caractéristique d'usinage. Cependant, les propositions au niveau des orientations des caractéristiques par rapport aux machines n'en sont encore qu'à leurs débuts. Enfin, les surfaces étudiées sont restreintes à des plans et cylindres. Les travaux ont abouti à une maquette réalisée sous CATIA V4,

Les deux travaux cités ci-dessus proposent des modèles de procédés d'usinage. Ces modèles sont utilisés afin de valider des caractéristiques extraites. L'un des inconvénients de ces approches est que la validation des pièces se fait uniquement en fin de conception. En outre, ces deux travaux se sont limités aux procédés de fraisage.

Enfin, seuls Mawussi et consorts ont offert des modèles explicites des machines et outils constituant les procédés d'usinage.

2.4.2.4 Conclusion

La validation d'usinage locale d'une caractéristique peut utilement s'accompagner de l'identification de plusieurs procédés d'usinage candidats qu'il est important de ne pas rejeter. Nous présentons dans la prochaine section les approches de validation globale d'usinage représentant les alternatives d'usinage.

2.4.3 Validation globale d'usinage considérant les alternatives d'usinage

2.4.3.1 Introduction

Le concepteur est souvent amené à faire des choix entre différentes alternatives de conception. Pour aider celui-ci, il faut lui permettre d'effectuer des validations locales et globales. Les validations locales concernent les caractéristiques de forme de chaque alternative de conception. Cependant, chaque caractéristique de forme extraite et validée correspond à un ou plusieurs procédés. Donc, la validation globale d'une alternative de conception (parfois non complètement définie) résulte en un ensemble d'alternatives d'usinage. Le choix du concepteur est ensuite influencé par la "valeur d'usinage" de chacune des alternatives de conception. La "valeur d'usinage" d'une alternative de conception est égale à celle de sa "meilleure" alternative d'usinage [Gupta et al. 1994]. Cependant, la notion de "meilleure" dépend fortement du contexte, car, le critère de choix peut varier selon les circonstances (temps ou coût). Par conséquent, il est important de garder et représenter le résultat de la validation globale d'usinage qui consiste en un ensemble d'alternatives d'usinage.

2.4.3.2 Revue de la littérature

[Gupta et al. 1994] et [Gupta et Nau 1995] proposent une méthode basée sur les MSREV. Un MSREV (Material Shape Removal Element Volumes) est associé à une caractéristique de forme prédéfinie, possède une direction d'accessibilité et correspond à une opération d'usinage. Cette approche valide l'usinage des pièces avant d'évaluer leurs temps d'usinage pour des fraiseuses 3 axes. Elle fournit au concepteur des évaluations d'une pièce en fonction des alternatives d'usinage générées automatiquement. Une pseudo-gamme est composée d'un ensemble non redondant et ordonné de MSREV et se constitue de deux types d'activités : opération d'usinage et changement de mise en position. Ces travaux supposent que les opérations d'usinage sont effectuées sur une seule machine.

[Feng et al. 1996] proposent une méthodologie qui prédéfinit des caractéristiques de forme et les associe à des opérations d'usinage. Les pseudo-gammes générées regroupent les activités suivantes (a) opération d'usinage, (b) changement d'outil, (c) changement de système de fixation (d) changement de machine et (e) chargement et déchargement des machines. Cette approche modélise les différentes alternatives de conception avant de calculer leur coût. Elle n'a, cependant, pas approfondi l'étude des alternatives d'usinage pour une conception donnée. Les différentes activités d'usinage sont ordonnancées grâce à un graphe bipartite (Figure 18), dont les arcs représentent les activités et dont les nœuds représentent le début ou la fin d'une activité. Les chemins du graphe correspondent aux alternatives d'usinage et précisent les coûts d'usinage correspondants. Les coûts proposés dans cet article servent à illustrer les concepts des auteurs et ne se basent pas sur une méthode de calcul de coûts.

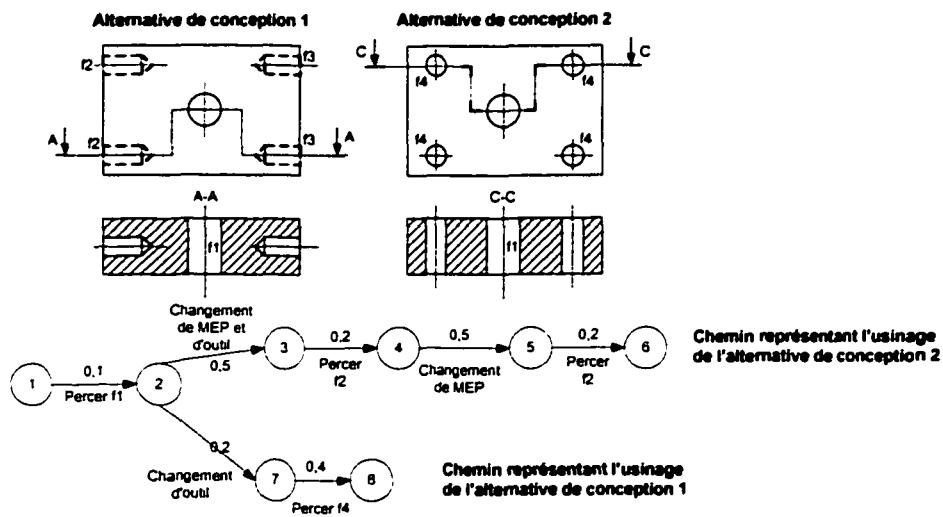


Figure 18 Alternatives de conception et les activités d'usinage associées [Feng et al. 1996]

L'ordonnancement des alternatives d'usinage dans ces deux approches ne prend en compte que des considérations géométriques et ignore les paramètres technologiques. Ces lacunes sont comblées dans l'approche proposée dans [Deneux 1993].

Ce dernier a spécifié une approche de génération de gammes dites "universelles". Les alternatives d'obtention d'une même pièce y sont explicitement présentes. Elles concernent, d'une part, les moyens techniques (outils, montages et machines) et d'autre part, le choix des associations des usinages de différentes faces avec différents moyens techniques. Une telle gamme résulte de l'application de décisions objectives lors de l'analyse de préparation à l'usinage du produit. Ceci implique que les décisions dépendant du savoir-faire du préparateur à l'usinage ou de l'environnement de fabrication ne sont pas considérées. Cette démarche procède en quatre étapes :

- reconnaître les caractéristiques de forme,
- choisir les procédés d'usinage,
- séquencer les opérations,

- structurer la gamme.

Les deux premières étapes correspondent à l'extraction de caractéristiques de forme et à leur association à des procédés.

La troisième étape "séquencer les opérations" génère le graphe d'antériorité. Elle cherche les différentes contraintes d'antériorité dues aux attributs technologiques, à savoir :

- Antériorité (ex : tolérance géométrique entre des faces),
- Simultanéité (ex : faces composant une caractéristique de forme),
- Indifférence : contrainte non ordonnée entre deux faces (ex : cote),
- Totale Indifférence : aucune contrainte n'existe entre les faces.

La dernière étape "structurer la gamme" a pour but d'évaluer, tout en respectant la chronologie fonctionnelle de création de faces représentée par le graphe des antériorités, les possibilités physiques d'associations des usinages élémentaires. Cette étude fait appel à deux types de critères d'association : techniques et technologiques. Les critères techniques consistent à générer des associations en phases, sous-phases, ou opérations en fonction des machines, orientations, et outils. Les critères technologiques visent à mettre en évidence le caractère impératif de certains regroupements, ce qui implique l'élimination de regroupements alternatifs.

Cette démarche possède l'avantage de traiter les données technologiques et géométriques du produit pour générer des alternatives d'usinage. Cependant, la génération de gammes n'est proposée qu'à la fin du processus de conception. Par ailleurs, la seule activité explicitée dans la gamme universelle est l'activité "opération d'usinage".

2.4.3.3 Synthèse

Les travaux cités ci-dessus proposent des approches de validation globale de l'usinage. Le résultat de cette validation correspond à un ensemble d'alternatives d'usinage pouvant être utilisées pour évaluer ou comparer des propositions de conception. Les activités d'usinage devant être incluses dans les alternatives d'usinage ont été énumérées par [Feng et al. 1996] et correspondent à :

- opération d'usinage,
- changement d'outil,
- changement de mise en position,
- changement de machine.

Les deux premières approches souffrent de lacunes relativement à l'ordonnancement des activités d'usinage. En effet, elles ne considèrent que des facteurs géométriques (ex : accessibilité) ignorant les attributs technologiques. Enfin, la génération des alternatives d'usinage n'est proposée que lorsque le concepteur a entièrement déterminé la géométrie du produit (i.e. à la fin du niveau de modélisation privé).

[Deneux 1993] a proposé une méthodologie robuste de génération de gammes d'usinage dites "universelles". Quoique développée pour assister un préparateur à la fabrication et n'intervenant, donc, qu'à la fin du processus de conception, cette approche peut être adaptée et intégrée au processus de conception. Pour y parvenir, la gamme universelle doit expliciter les activités d'usinage spécifiées par [Feng et al. 1996].

2.5 Conclusion

Le but de ce chapitre était de présenter les approches d'intégration des contraintes d'usinage au processus de conception. Pour ce faire, nous avons défini les procédés d'usinage avant d'introduire les approches de modélisation de leurs constituants : les

machines et les outils. Nous avons, ensuite, étudié les «capabilités» des procédés. Nous en avons conclu que les «capabilités» de génération de formes et «capabilités» dimensionnelles pouvaient être vérifiées à partir de l'étude du modèle cinématique de la machine et des mouvements possibles des parties coupantes des outils. Les autres «capabilités» dépendent de facteurs variant en fonction de l'environnement manufacturier et du temps. Ces données peuvent être validées à partir de bases de données recueillies grâce aux résultats d'expérimentations et à la littérature de référence.

Par la suite, nous avons pu voir que l'analyse d'usinage peut être appliquée aux données du modèle produit déterminées durant le niveau de modélisation technique publique. Par ailleurs, étant donné la nature des surfaces fonctionnelles nous avons limité notre champ d'étude en excluant le fraisage en 4 et 5 axes.

Nous avons ensuite vu que les approches d'analyse d'usinage appropriées à notre contexte procèdent en deux étapes. Ainsi, les caractéristiques de forme sont extraites avant d'être validées par une association à des procédés d'usinage. Nous adoptons la technique de [Deneux 1993] pour extraire les caractéristiques de forme car elle nécessite moins d'heuristiques que les techniques d'extraction de volumes. Nous avons ensuite constaté que la validation des caractéristiques de forme se fait par le biais de modèles des procédés. Cependant, les approches oeuvrant dans ce sens se sont limitées à un nombre très limité de procédés d'usinage et n'ont pas tenté de fournir de modèle ou d'approche générales.

Dans la dernière section, nous avons étudié les approches de validation globale d'usinage conduisant à déterminer les alternatives d'usinage. Nous avons pu identifier les éléments constitutifs des alternatives d'usinage [Feng et al. 1996] et nous avons vu que leur ordonnancement pouvait être envisagé selon l'approche de génération de gammes universelles proposée par Deneux.

L'intégration de l'analyse d'usinage des données de ces modèles au processus de conception présenté au LAMIH, correspond dans notre cadre d'étude à :

- proposer une modélisation homogène pour les procédés d'usinage que nous considérons,
- proposer une analyse d'usinage adaptée à la non monotonie de la conception,
- déterminer une entité de haut niveau sémantique créant le lien entre les données des deux domaines de conception et d'usinage,
- proposer une approche validant les données du modèle produit basée sur les modèles des procédés et incluant le résultat d'une validation globale.

Les deux chapitres suivants montreront comment nous proposons de répondre à ces exigences. Tout d'abord, le troisième chapitre a pour but de présenter les modèles des éléments considérés lors de l'analyse d'usinage, à savoir, les procédés d'usinage et le produit. Ensuite, le quatrième chapitre introduira une méthode pour créer la correspondance entre les procédés d'usinage et les caractéristiques de forme.

CHAPITRE 3

LES CARACTÉRISTIQUES D'USINAGE : UN PONT ENTRE LES DOMAINES DE LA CONCEPTION ET DE L'USINAGE

3.1 Introduction

Le chapitre précédent a permis de dégager deux inconvénients majeurs des approches d'analyses d'usinage existantes. D'une part, elles sont appliquées à la fin du processus de conception et ne permettent de la sorte que la validation d'un produit entièrement défini. D'autre part, peu d'entre elles valident la géométrie du produit en prenant en compte les procédés d'usinage.

Dans ce chapitre, nous présentons, tout d'abord, une caractérisation originale et homogène des procédés d'usinage et plus particulièrement des paramètres décrivant les machines et les outils. Ces paramètres décrivent les «capabilités» de génération de formes et les «capabilités» dimensionnelles des procédés.

La section suivante présente un cadre général d'intégration du processus d'analyse d'usinage au sein du processus de conception. Elle souligne les étapes de conception à partir desquelles on peut procéder aux analyses d'usinage, les éléments du produit devant être analysés, les éléments des modèles des procédés utilisés et les types d'analyses nécessaires.

La dernière section introduit une définition des caractéristiques d'usinage liant les deux domaines de la conception et de l'usinage et facilitant ainsi l'analyse d'usinage du produit.

3.2 Caractérisation des procédés d'usinage

3.2.1 Introduction

Nous définirons, dans nos travaux, un procédé d'usinage par un couple {machine ; outil} ([Maltais 1994] et [Mawussi et al. 2000]). Nous avons vu dans le précédent chapitre que les «capabilités» de tolérances, d'état de surface, et d'usinage de matériau d'un procédé peuvent être vérifiées en interrogeant des bases de données. Cependant, la caractérisation des «capabilités» de génération de formes ainsi que les «capabilités» dimensionnelles nécessitent de modéliser la cinématique des machines et la partie coupante des outils. Nous nous intéresserons, dans cette section, aux familles de procédés d'usinage retenues dans le deuxième chapitre, soit, Alésage, Brochage, Fraisage, Perçage et Tournage.

Cette section sera structurée de la manière suivante. Nous définirons, pour commencer, les mouvements d'avance et de coupe. Etant donné que le nombre des procédés appartenant aux familles citées ci-dessus est très élevé, nous caractériserons, tout d'abord, les outils et les machines de manière indépendante. Nous proposons ensuite une approche déduisant les «capabilités» de génération de forme ainsi que les «capabilités» dimensionnelles des procédés à partir de la caractérisation proposée des outils et des machines. Nous nous démarquons ainsi des approches définies dans [Mawussi et al. 2000], [Shirur et al. 1998] qui limitent l'étude au fraisage et caractérisent les mouvements d'avance des outils en supposant connue la machine utilisée. Nous proposerons ensuite une hiérarchisation des machines, outils et procédés, cohérente avec les différents niveaux d'analyse d'usinabilité. En effet, cette analyse a pour but de valider des produits parfois non complètement définis. Par conséquent, les données disponibles du modèle produit ne permettent, parfois, de déterminer qu'un sous-ensemble des données des modèles des procédés.

3.2.2 Définitions des mouvements d'avance et de coupe

Le couple outil/pièce peut être soumis à deux mouvements : le mouvement de coupe (lié à la vitesse de coupe) et le mouvement d'avance (lié à la vitesse d'avance) [Bourgeois et Cognet 1994]. Ces deux mouvements sont confondus pour le brochage. Pour les autres familles de procédés, la norme de la vitesse de coupe est supérieure à la norme de la vitesse d'avance.

Le mouvement de coupe est *rectiligne* ou *circulaire* :

- Il est rectiligne pour les procédés de brochage.
- Lorsqu'il est circulaire, il peut animer l'outil ou la pièce.
 - dans le cas du tournage, la pièce est animée d'un mouvement de coupe circulaire et l'outil est animé des mouvements d'avance,
 - dans le cas du fraisage, l'outil est animé d'un mouvement de coupe circulaire, le mouvement d'avance dépend de la nature et de la cinématique de la machine,
 - dans le cas du perçage, l'outil est animé des deux mouvements et la pièce reste immobile.

3.2.3 Caractérisation des machines

Dans le cadre de la représentation des «capabilités» de génération des formes et des «capabilités» dimensionnelles, les machines sont caractérisées par les paramètres suivants :

- la nature du mouvement de coupe,
- le nombre d'axes autorisant des déplacements simultanés,
- le nombre et la variété des axes permettant les mouvements d'avance,
- les courses selon les axes permettant les mouvements d'avance.

Le modèle cinématique de la machine permet, grâce aux deux derniers ensembles de paramètres, de connaître les mouvements relatifs entre l'outil et la pièce. Dans ce qui suit, nous allons tout d'abord présenter le repère lié à la machine. Nous montrerons par la suite, comment nous procédons à la caractérisation des mouvements d'avance de la machine.

3.2.3.1 Le repère lié à la machine

La norme ISO 841 définit un système de coordonnées machine et les mouvements de la machine de telle façon que la description des opérations d'usinage ne considère que les mouvements relatifs entre l'outil et la pièce. Le système normalisé de coordonnées est un système cartésien orthonormé direct de dimension 3. Il définit trois axes X, Y et Z et trois axes de rotation autour de chacun de ces axes appelés respectivement A, B et C. Les axes X, Y et Z sont définis de la manière suivante :

- L'axe **Z** est parallèle à l'axe de la broche principale de la machine. Lorsque la broche principale est pivotante ou orientable, l'axe **Z** est parallèle à l'axe de la broche quand cette dernière est dans la position zéro. La position zéro de référence est de préférence celle où la broche est perpendiculaire à la surface de bridage de la pièce.
- L'axe **X** est orthogonal à **Z** et décrit généralement l'axe de plus grande course de la machine.
- L'axe **Y** de mouvement forme avec les axes **X** et **Z** un trièdre de sens direct.

Les axes **A**, **B** et **C** définissent les mouvements de rotation effectués respectivement autour des axes **X**, **Y** et **Z** [Chevalier et Bohan 1993].

Toujours selon la norme, le sens positif des axes est défini de manière telle qu'un mouvement de translation dans une direction positive augmente les valeurs positives de

la position de la pièce par rapport à la machine. La figure suivante donne un exemple de repère lié à une broche normalisé pour une fraiseuse.

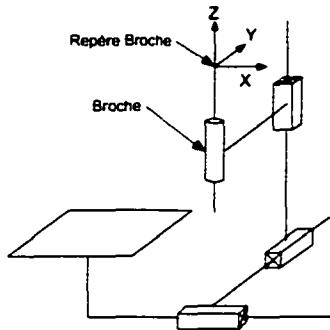


Figure 19 Schéma cinématique et repère lié à une fraiseuse

3.2.3.2 Caractérisation des mouvements d'avance des machines

De manière générale, le mouvement relatif entre une pièce et un outil est engendré par différents déplacements suivant plusieurs axes de la machine. Nous distinguerons, d'une part, les axes supportant un déplacement contrôlé en vitesse et en position et d'autre part, les axes supportant un déplacement contrôlé en position. En effet, la deuxième catégorie d'axes ne participe pas à la génération de surfaces. A titre d'exemple, une fraiseuse 3 axes avec une table tournante indexée autour de l'axe Z ne permet pas de génération de surfaces lors de la rotation de la table tournante. Ce mouvement permet uniquement un changement d'orientation relatif entre la pièce et la broche. Enfin et pour caractériser de manière rigoureuse les déplacements entre une pièce et un outil sur une machine déterminée, il est important de déterminer les mouvements d'avance générés par des axes contrôlés en vitesse et en position déplaçables de manière simultanée.

Pour résumer, nous avons besoin d'objets mathématiques permettant d'exprimer :

- le nombre maximal de mouvements d'avance pouvant être combinés simultanément et qui contribuent aux mouvements d'avance durant l'enlèvement de matière,
- les mouvements d'avance durant lesquels le mouvement de coupe n'est pas possible, i.e., changement de position (ex : pour une machine de fraisage 2½ axes), ou changement d'orientation.

Tout mouvement d'avance relatif entre la pièce et l'outil, permis par la machine, sera considéré comme un degré de liberté de la machine. Plusieurs travaux proposent une notation simplifiée des degrés de liberté. [Mascle et al. 1994] en a proposé une sous la forme de pseudo matrices de liaisons. Chaque pseudo matrice est de dimension 3x4 et contient 12 demi-degrés de liaison. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$S = \left(\begin{array}{cc|cc} dx & \overline{dx} & dyz & \overline{dyz} \\ dy & \overline{dy} & dxz & \overline{dxz} \\ dz & \overline{dz} & dxy & \overline{dxy} \end{array} \right)$$

Les trois lignes représentent les degrés de liberté définis par les trois axes X, Y et Z. Les deux premières colonnes représentent les translations respectivement suivant les sens positifs et négatifs, les colonnes 3 et 4 représentent respectivement les rotations suivant les sens positifs et négatifs. Lorsqu'un mouvement de translation ou de rotation est possible dans un sens donné la composante le traduisant est égale à 1, sinon elle vaut 0.

Pour exprimer chacun des ensembles de mouvements d'avance décrits ci-dessus et en nous basant sur la pseudo matrice de Mascle, nous proposons une pseudo matrice exprimant un des ensembles des degrés de liberté d'une machine de taille 3x2 notée **D**. Cette pseudo matrice est exprimée dans le repère de la broche et s'écrit comme suit :

$$D = \left(\begin{array}{c|c} a_x & w_{yz} \\ a_y & w_{xz} \\ a_z & w_{xy} \end{array} \right)$$

Repère de la Broche

Chaque composante indique la présence ou l'absence d'un degré de liberté. Les composantes a_x , a_y et a_z expriment un mouvement possible de translation. Les composantes w_{yz} , w_{xz} , w_{xy} , quant à elles, expriment un mouvement possible de rotation respectivement autour des axes X, Y ou Z. Nous ne distinguons pas de sens positif ou négatif pour les mouvements d'avance de la machine. Nous ne faisons cette distinction que pour les outils et expliquerons ceci plus en détail dans la section 3.2.4.2.

Pour distinguer les mouvements d'avances simultanés des mouvements d'indexation, nous avons recours à deux types de pseudo matrices, similaires mathématiquement, mais dont la signification est différente. Une première pseudo matrice, notée D_C , permet de connaître les ensembles de mouvements d'avance simultanés qu'une machine peut avoir lors de l'application d'un mouvement de **coupe**. Etant donné les types de surfaces que nous considérons, les mouvements d'avance de translation ou de rotation exprimés par D_C sont plans. La seconde pseudo matrice, notée D_i , permet de connaître les mouvements (**d'indexation**) durant lesquels aucun mouvement de coupe n'est possible. Les degrés de liberté de rotation de D_i (ex : table rotative contrôlée en position) expriment un changement d'orientation possible entre la pièce et l'outil. Les degrés de liberté de translation (ex : demi degré de liberté d'une fraiseuse 2 axes et demi), quant à eux, expriment un changement de position possible entre la pièce et l'outil.

Exemple : Centre d'usinage 4 axes avec une table rotative indexée :

Considérons un centre d'usinage avec trois mouvements de translation possibles et un mouvement de rotation autour de l'axe Y. Nous supposerons, d'une part, que l'axe rotatif n'est pas asservi en vitesse (il permet uniquement des changements d'orientation entre la pièce et la broche). D'autre part, nous considérerons que seuls 2 axes de translation peuvent être simultanément asservis en vitesse lors de la génération de surfaces. Les degrés de liberté de ce centre d'usinage sont exprimés par les pseudo matrices suivantes :

$$Dc(1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Repère de} \\ \text{la Broche} \end{array} \quad Dc(2) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Repère de} \\ \text{la Broche} \end{array} \quad Dc(3) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Repère de} \\ \text{la Broche} \end{array} \quad D_i = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Repère de} \\ \text{la Broche} \end{array}$$

Le but de cette représentation est de déduire les surfaces qu'un procédé peut générer (par l'application d'un mouvement d'avance et de coupe) dans une orientation donnée (ayant, peut être, nécessité un changement d'orientation). Son exploitation sera présentée dans le prochain chapitre.

3.2.4 Caractérisation des outils

Les outils sont caractérisés par les paramètres suivants :

- le nombre et nature des arêtes coupantes de l'outil,
- les dimensions des arêtes,
- les relations topologiques entre les arêtes coupantes,
- le mouvement de coupe (similaire à celui de la machine),
- les mouvements d'avance possibles de chaque arête coupante,
- les contraintes concernant l'encombrement de l'outil.

Nous présenterons, tout d'abord, la caractérisation de la géométrie de l'outil qui inclut les trois premiers paramètres. Nous introduisons, ensuite, une caractérisation des mouvements d'avance de l'outil. Nous ne traiterons pas l'encombrement de l'outil car il peut être vérifié par simulation grâce aux modeleurs solides actuels. Cette simulation est effectuée suite à la détermination des machines et outils permettant d'usiner une caractéristique de forme donnée.

3.2.4.1 Caractérisation de la géométrie des outils

Il existe deux types de mouvements de coupe. Lorsque celui-ci est une *rotation*, l'outil peut être géométriquement défini grâce à un contour plan d'arêtes perpendiculaire à la vitesse de coupe linéaire. Ce contour possède un axe de révolution qui correspond à l'axe Z de la broche. Ce raisonnement est justifié autant pour une fraise, pour un outil à lamer ou pour un outil de tournage et exploite la symétrie permise par le mouvement de coupe de rotation.

Lorsque le mouvement de coupe est une *translation*, l'outil peut être modélisé par un contour d'arêtes appartenant à un plan perpendiculaire à la vitesse de coupe et donc à l'axe de la broche. Seuls les outils de brochage sont concernés par ce cas de figure.

Par conséquent, une manière homogène de représenter la géométrie des outils (indépendamment de la nature du mouvement de coupe) consiste à modéliser la géométrie des arêtes coupantes des outils par les éléments suivants :

- un repère plan perpendiculaire au mouvement de coupe,
- un contour représentant les arêtes coupantes appartenant à ce plan.

3.2.4.1.1 Définition du repère lié aux outils

Ce repère sera composé de deux axes U et V. Rappelons que la modélisation de la partie coupante des outils de tournage, fraisage, perçage et alésage répond à des règles distinctes de celles concernant les outils de brochage. Par conséquent, la spécification du repère lié aux deux groupes d'outils sera différente.

Procédés de tournage, fraisage, perçage et alésage

Le premier axe **U** de ce repère sera confondu avec l'axe **Z** de la broche. Le second axe **V** est perpendiculaire à l'axe **Z**. L'origine de ce repère est confondue avec celle du repère de la broche.

Procédé de brochage

Le repère dans lequel sera défini le contour d'arêtes coupantes est perpendiculaire à l'axe **Z**. Les deux axes **U** et **V** de ce repère seront confondus avec les deux axes **X** et **Y** du repère lié à la broche. L'origine de ce repère est également confondue avec celle du repère de la broche.

3.2.4.1.2 Définition du contour d'arêtes coupantes des outils

Dans cette section, nous définirons, tout d'abord, une structure de données du contour d'arêtes coupantes, générale à tous les outils que nous étudions. Nous montrerons, ensuite, comment cette structure s'applique aux types d'outils que nous considérons.

De manière générale, le contour d'arêtes coupantes est composé d'un ensemble d'arêtes coupantes A_i possédant des propriétés intrinsèques et/ou extrinsèques.

Les propriétés intrinsèques de chaque arête A_i sont les suivantes :

- la nature de l'arête : droite ou courbe. Une arête courbe correspond à une portion de cercle,
- les deux points extrêmes : notés P_i et P_{i+1} .

En fonction de leur nature, les arêtes possèdent d'autres attributs. Ainsi, toute arête droite sera caractérisée par un ensemble d'informations pouvant être déduites de P_i et de P_{i+1} . Ces informations correspondent à :

- sa longueur L_i ,
- l'angle θ_i défini entre le vecteur P_iP_{i+1} et l'axe **U**.

Par ailleurs, toute arête courbe sera caractérisée par son centre de courbure O_i , mais également par un ensemble d'informations pouvant être calculés à partir de O_i , P_i et P_{i+1} à savoir :

- son rayon de courbure R_i ,
- l'angle β_i déterminant la longueur curviligne de l'arête.

Enfin, quelle que soit leur nature, deux arêtes adjacentes A_i et A_{i+1} possèdent la propriété extrinsèque suivante :

- l'angle γ_{ij} extérieur à la matière aux deux arêtes considérées. Cet angle est défini grâce aux tangentes T_i et T_{i+1} extérieures aux deux arêtes au point de leur intersection (voir les exemples dans la Figure 20 et dans la Figure 21).

Pour un *mouvement de coupe de rotation*, notre représentation du contour d'arêtes coupantes distingue deux types d'outils. Le premier type réunit les outils pour lesquels la position des arêtes, par rapport à l'origine du repère de la broche, ne varie pas. Il s'agit des fraises (Cf. Figure 20), des outils à lamer, des forets, etc.

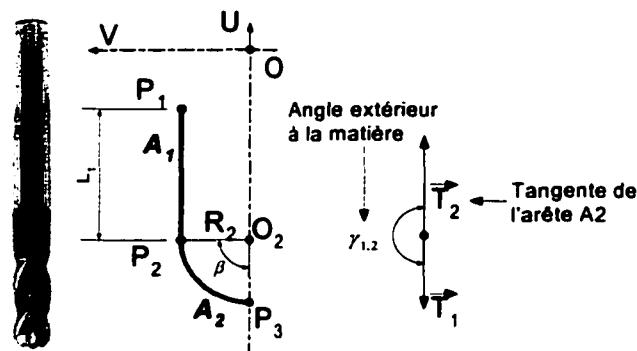


Figure 20 Attributs des arêtes coupantes d'une fraise à bout sphérique

Le second type réunit une grande partie des outils utilisés uniquement en tournage et pour lesquels la position des arêtes par rapport à l'origine du repère de la broche varie. L'intervalle de variation dépend des courses de la machine (Cf. Figure 21). Afin de générer des surfaces, l'outil se déplace par rapport à la broche. Par conséquent, les distances entre l'origine du repère et les sommets des arêtes coupantes (en l'occurrence les points P₁, P₂ et P₃) varient en fonction des déplacements imposés à l'outil.

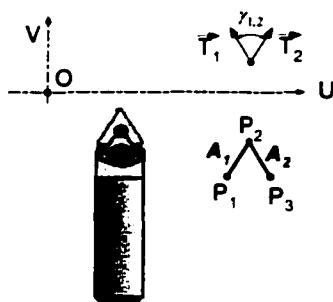


Figure 21 Attributs des arêtes coupantes d'un outil utilisé sur un tour

Pour un *mouvement de coupe de translation* (outils de brochage), les arêtes droites sont séparées en deux types (Cf. Figure 22). L'arête de type 1 est une arête coupante. L'arête de type 2 correspond à la génératrice des plans usinés perpendiculaires aux arêtes coupantes de l'outil. La longueur de cette arête dépend de la distance entre la première et la dernière dent de la broche.

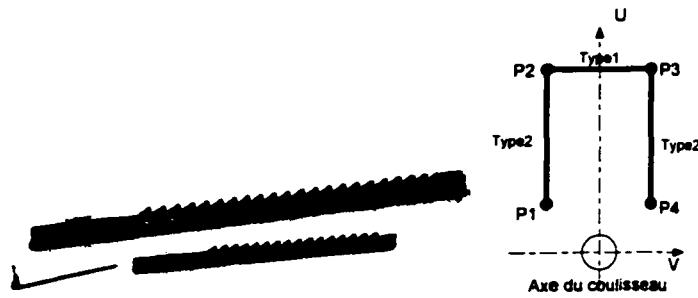


Figure 22 Arêtes coupantes d'un outil de brochage

3.2.4.2 Caractérisation des mouvements d'avance de l'outil générateurs de surfaces

Le but de cette section est de présenter un objet mathématique exprimant les ensembles de mouvements d'avance permettant à un outil et, plus particulièrement, à ses arêtes coupantes, de générer des surfaces. Nous présentons, tout d'abord, un exemple de génération de surfaces par un outil. Nous proposons, ensuite, un objet mathématique valide quel que soit l'outil ou le type et la variété des mouvements d'avance des arêtes coupantes.

3.2.4.2.1 Exemple de génération de surfaces

Considérons la pièce suivante. Nous nous intéressons plus particulièrement à la manière de générer la caractéristique de forme interne délimitée par les surfaces S1 et S2.

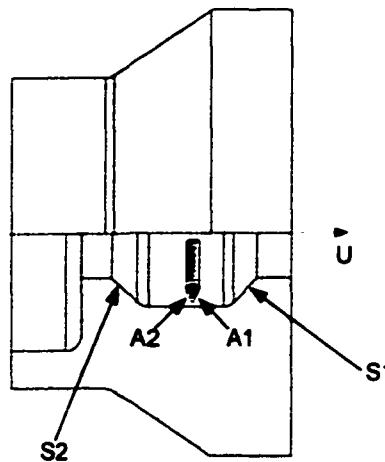


Figure 23 Génération d'une caractéristique de forme en tournage

La géométrie des arêtes coupantes d'un outil candidat pour générer cette caractéristique de forme est modélisée dans la Figure 21. Durant le mouvement d'avance parallèle à U dans la direction positive générant la surface $S1$, l'arête utilisée est $A1$ tandis que l'arête $A2$ *ne génère pas de surfaces*. Ceci illustre que les arêtes coupantes d'un même outil peuvent avoir des mouvements d'avance générateurs de surfaces distincts.

Dans la section suivante, nous présentons un modèle caractérisant les mouvements d'avance permettant aux arêtes coupantes d'un outil de générer des surfaces.

3.2.4.2.2 Caractérisation des mouvements d'avance générateurs de surfaces

Nous avons vu que, pour un même outil, les mouvements générateurs de surfaces peuvent être distincts en fonction des arêtes coupantes. Par conséquent, il paraît plus judicieux de caractériser les mouvements d'avance générateurs de surfaces des arêtes et non des outils. Par défaut, les ensembles de mouvements d'avance générateurs de surfaces seront associés aux arêtes. Cependant, si un ensemble de mouvements générateurs de surfaces est commun à toutes les arêtes coupantes, il sera affecté à l'outil.

Nous utiliserons une pseudo matrice pour représenter chacun des ensembles des mouvements d'avance simultanés durant lesquels une arête peut générer des surfaces. Cette pseudo matrice considère les mouvements d'avance possibles de l'outil indépendamment de toute contrainte imposée par la machine. Ce choix permet de prendre en compte la grande diversité des couples (machine ; outil) car il est plus simple de modéliser, d'une part, les mouvements générateurs de surfaces des arêtes de l'outil et d'autre part les mouvements d'avance des machines. Par la suite, il est possible de combiner les mouvements des machines et des outils comme nous le montrons dans la section 3.2.5.

De manière générale, nous notons une pseudo matrice j relative à une arête Ai par $D(Ai, j)$, et une pseudo matrice j associée à un outil O par $D(O, j)$. La forme générale d'une pseudo matrice, qu'elle soit associée à une arête ou à un outil, sera comme suit :

$$\left(\begin{array}{c|c} ax & wyz \\ ay & wxz \\ az & wxy \end{array} \right) \quad \text{Répère de la Broche}$$

Cette pseudo matrice est similaire à celle affectée à la machine. La seule distinction est que les composantes exprimant les *translations* des arêtes coupantes doivent également représenter la direction de celles-ci. Afin d'y parvenir, nous adoptons la convention proposée par [Shirur et al. 1998] à savoir :

- toute composante exprimant un mouvement d'avance dans les deux directions sera égale à 1,
- toute composante exprimant un mouvement d'avance dans le sens positif de l'axe considéré sera égale à 1/2,
- toute composante exprimant un mouvement d'avance dans le sens négatif de l'axe considéré sera égale -1/2.

Prenons l'exemple d'un outil de tournage utilisant une pastille modélisée dans la Figure 24.

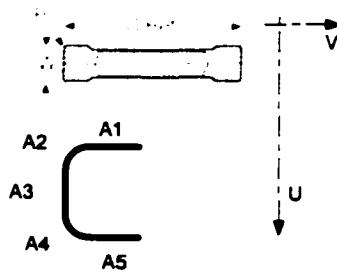


Figure 24 Modélisation des arêtes coupantes d'une pastille utilisée en tournage

Les mouvements d'avance, permettant aux arêtes coupantes de générer des surfaces, sont illustrés dans la Figure 25. Ainsi, l'arête A1 peut générer des surfaces grâce à un mouvement de translation dans le sens négatif de l'axe Z. L'arête A2 peut avoir un mouvement quelconque dont le vecteur directeur est inclus dans le quart de plan défini par X+ et Z-. L'arête A3 peut générer des surfaces par un mouvement de translation parallèle à l'axe Z.

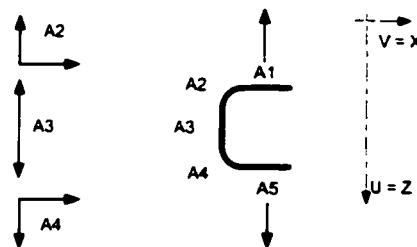


Figure 25 Mouvements d'avance des arêtes coupantes d'un outil de tournage

Les pseudo matrices traduisant les mouvements générateurs de surfaces de chacune des arêtes sont les suivantes :

$$D(A1) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1/2 & 0 \end{pmatrix} \text{ Repère de la Broche}$$

$$D(A2) = \begin{pmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1/2 & 0 \end{pmatrix} \text{ Repère de la Broche}$$

$$D(A3) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ Repère de la Broche}$$

$$D(A4) = \begin{pmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1/2 & 0 \end{pmatrix} \text{ Repère de la Broche}$$

$$D(A5) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1/2 & 0 \end{pmatrix} \text{ Repère de la Broche}$$

Considérons maintenant une fraise à surfacer. Les mouvements d'avance permettant la génération de surfaces sont, en général, des mouvements quelconques dans le plan XY. Ceux-ci seront représentés par la pseudo matrice suivante.

$$D(O) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ Repère de la Broche}$$

En ce qui concerne les outils de brochage, étant donné que le seul mouvement permis est une translation suivant l'axe Z, la pseudo matrice est associée à l'outil et aura toujours cette forme :

$$D(O) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ Repère de la Broche}$$

Dans ce qui suit, nous présenterons comment obtenir les pseudo matrices permettant d'exprimer les mouvements d'avance des outils lorsqu'ils sont combinés à des machines.

3.2.5 Caractérisation des mouvements d'avance de l'outil combiné à la machine

Nous avons pu voir dans les sections précédentes une caractérisation des mouvements d'avance des machines et des outils. Cependant, pour calculer les «capacités» de génération de formes ainsi que les «capacités» dimensionnelles des procédés d'usinage,

il est important de connaître les mouvements d'avance de l'outil lorsqu'il est utilisé sur une machine donnée.

La prise en compte des contraintes imposées par les machines consiste à trouver les mouvements d'avance des arêtes coupantes permis par la machine. Il s'agit donc de trouver un opérateur comparant les mouvements d'avance des arêtes et ceux des machines. Cet opérateur est défini comme suit :

- Soit "a" une composante de la pseudo matrice de la machine exprimant un degré de liberté selon un axe donné.
- Soit "b" une composante de la pseudo matrice de l'arête exprimant le même type de degré de liberté selon le même axe.
- Alors la combinaison de ces deux composantes doit respecter ce qui suit :
 - Si $a \neq 0$, alors le résultat de la combinaison vaut b
 - Si $a = 0$, alors le résultat de la combinaison vaut 0.

L'opérateur ne pourra être appliqué qu'à des outils et machines possédant un mouvement de coupe similaire. Nous l'appellerons *ET d'usinage* et le noterons par \bigcirc^U . Il sera appliqué de manière similaire indépendamment du mouvement de coupe tel que présenté ci-dessous.

Mouvement de coupe linéaire

Toutes les arêtes des outils de brochages partagent le même mouvement d'avance linéaire selon l'axe OZ. Cela signifie que les pseudo matrices exprimant les degrés de liberté des machines et des outils de brochage sont les suivantes :

$$D_{\text{Brocheuse}} = D(O) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \text{Repère de la Broche}$$

Afin de connaître les degrés de liberté permis aux outils de brochage par les machines, nous appliquons l'opérateur d'usinage et obtenons le résultat suivant

$$D(O)_{\text{Brochage}} = D_{\text{Brocheuse}} \circ D(O) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \text{Repère de la Broche}$$

$D(O)_{\text{Brochage}}$ correspond à la pseudo matrice exprimant les mouvements d'avance de l'outil par rapport à la machine. Dans le cas du brochage, cette pseudo matrice confirme le fait que le mouvement d'avance de l'outil est selon l'axe Z.

Mouvement de coupe circulaire

Au contraire du brochage, où l'expression des degrés de liberté des arêtes permis par les machines est assez simple, les autres procédés possèdent des mouvements d'avance plus complexes. L'équation suivante donne l'expression générale permettant l'obtention des mouvements d'avance d'une arête ou d'un outil par une machine donnée.

$$D(A_{i,j})_{\text{Procédé}} = D_{c_{(\text{Machine})}} \circ D(A_{i,j}) = \begin{pmatrix} a_{xM} & a_{xij} & w_{yzM} & w_{yzij} \\ a_{yM} & a_{yij} & w_{xzM} & w_{xzij} \\ a_{zM} & a_{zij} & 0 & \end{pmatrix} \text{Repère de la Broche}$$

Les indices ij ci-dessus indiquent les termes appartenant à la pseudo matrice j de l'arête Ai. De manière similaire, les termes possédant un indice M appartiennent à la pseudo matrice de la machine.

Exemple : Procédé = {Fraiseuse usinant en 2½ axes ; Fraise deux tailles à bout torique}

Pour illustrer, nous allons considérer une fraiseuse ayant des mouvements d'avance quelconques selon le plan XY. Les mouvements selon l'axe Z ne peuvent être simultanés à ceux selon le plan XY et sont exprimés par les pseudo matrices suivantes :

$$Dc_{(Machine)}(1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \text{Repère de la Broche} \end{matrix}$$

$$Dc_{(Machine)}(2) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \text{Repère de la Broche} \end{matrix}$$

Voyons maintenant la fraise 2 tailles à bout torique de la Figure 26.

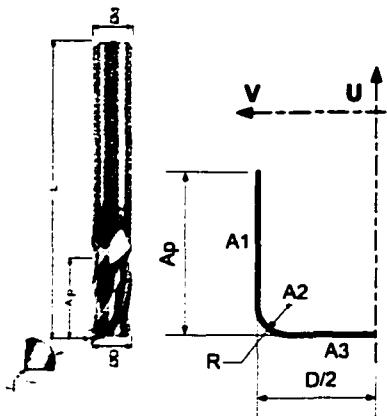


Figure 26 Fraise 2 tailles à bout torique pouvant plonger dans la matière

La pseudo matrice exprimant les mouvements de cet outil est la suivante :

$$D(O) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ -1/2 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \text{Repère de la Broche} \end{matrix}$$

Cette pseudo matrice illustre que les arêtes coupantes de l'outil peuvent générer des surfaces durant des mouvements appartenant : au plan XY et à n'importe quel plan contenant Z mais avec un mouvement dans le sens négatif de l'axe Z.

Il s'agit maintenant de trouver pour ce procédé les mouvements (permis par la machine) durant lesquels les arêtes coupantes peuvent générer des surfaces. Pour ce faire, nous appliquons l'opérateur d'usinage vu ci-dessus. Nous obtenons les résultats suivants :

$$D(O)_{\text{Procédé}}(1) = Dc_{(\text{Machine})}(1) \circ D(O) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$D(O)_{\text{Procédé}}(2) = Dc_{(\text{Machine})}(2) \circ D(O) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1/2 & 0 \end{pmatrix}$$

L'équation ci-dessus indique que le fait de monter l'outil sur ce type de fraiseuse fait que les mouvements de l'outil permettant à ses arêtes de générer des surfaces sont parallèles à l'axe Z et vont dans le sens négatif de celui-ci ou appartiennent au plan XY.

3.2.6 Hiérarchisation des procédés d'usinage

La hiérarchisation des procédés d'usinage est importante pour faciliter le raisonnement d'analyse d'usinage. Supposons qu'à partir de données du modèle produit, l'analyse trouve comme solution un sous-ensemble d'outils possédant la même géométrie de coupe et les mêmes mouvements possibles, mais que certaines dimensions puissent varier. Plutôt que de manipuler tous les outils candidats, il est plus simple de manipuler une classe représentant des outils avec un ensemble de paramètres communs. Ce raisonnement est également vrai pour les machines. Nous déterminerons dans ce qui suit les hiérarchies des outils, machines et procédés. Ces hiérarchies s'inspirent du principe de hiérarchisation proposé dans l'approche de programmation orientée objet.

3.2.6.1 Hiérarchisation des machines

La représentation hiérarchique des machines est composée de quatre niveaux :

- Le *premier niveau* correspond à une machine générique dont aucun paramètre n'est déterminé. Il permet de définir la structure de données de la machine.
- Le *deuxième niveau* permet de classer les machines en fonction de la nature du mouvement de coupe, i.e. circulaire ou linéaire.

- Le *troisième niveau* regroupe les machines partageant les mêmes degrés de liberté.
- Le *quatrième niveau*, enfin, prend en compte les courses des machines.

3.2.6.2 Hiérarchisation des outils

La représentation hiérarchique des outils est également composée de quatre niveaux :

- Le *premier niveau* correspond à un outil générique dont aucun paramètre n'est attribué. Il permet de définir la structure de données de l'outil.
- Le *deuxième niveau* permet de déterminer la nature du mouvement de coupe des outils, à savoir circulaire ou linéaire.
- Dans le *troisième niveau* on regroupera les outils dont les invariants sont (a) nombre et nature des arêtes composant le contour, (b) les angles extérieurs à la matière entre les couples d'arêtes et (c) les mouvements d'avance des arêtes,
- Enfin le *quatrième niveau* spécifie les dimensions et positions des arêtes par rapport à l'axe Z de la broche.

3.2.6.3 Hiérarchisation des procédés

Nous hiérarchisons les procédés en deux classes. Si tous les paramètres de la machine et de l'outil appartenant au procédé ont été déterminés, alors le procédé sera considéré *spécialisé*. Sinon, il sera considéré *abstrait*, i.e. il correspond à un ensemble de procédés candidats respectant des contraintes relatives aux paramètres des outils et des machines.

3.2.7 Conclusion

La hiérarchisation proposée pour les outils, machines et procédés permet une certaine classification, dont nous montrerons l'utilité dans les prochains chapitres. Dans la section

à venir, nous présentons un cadre général d'analyse des données de conception en fonction des niveaux de modélisation et des données des modèles des procédés.

3.3 L'intégration des contraintes d'usinage en cours de conception

Pour intégrer les contraintes d'usinage en cours de conception, il faut permettre au concepteur d'accomplir une analyse d'usinage locale ou globale en cours de conception. Pour effectuer ces analyses, il faut déterminer les données à valider ainsi que les analyses à appliquer. Nous détaillons, dans les sections qui suivent, les analyses d'usinage à appliquer, le niveau de modélisation pour les appliquer et enfin l'ordre de leur application. Nous concluons par une approche de validation globale utilisant les données géométriques et technologiques et prenant en compte la multiplicité des solutions d'usinage d'une proposition de conception même inachevée.

3.3.1 Les niveaux d'analyse

La démarche de conception intégrée proposée au LAMIH a été validée au regard de l'intégration de plusieurs domaines d'expertise tels que l'automatique, la maintenance et le calcul mécanique. L'analyse de fabrication (et plus particulièrement l'usinage) n'a, pour le moment, été considérée qu'à la fin du niveau de modélisation technique privé. Or, l'analyse d'usinage peut être appliquée à des données déterminées par le concepteur dès le niveau de modélisation technique publique. La Figure 27 inspirée de [Deneux 1993] illustre l'intégration de l'analyse d'usinage au processus de conception.

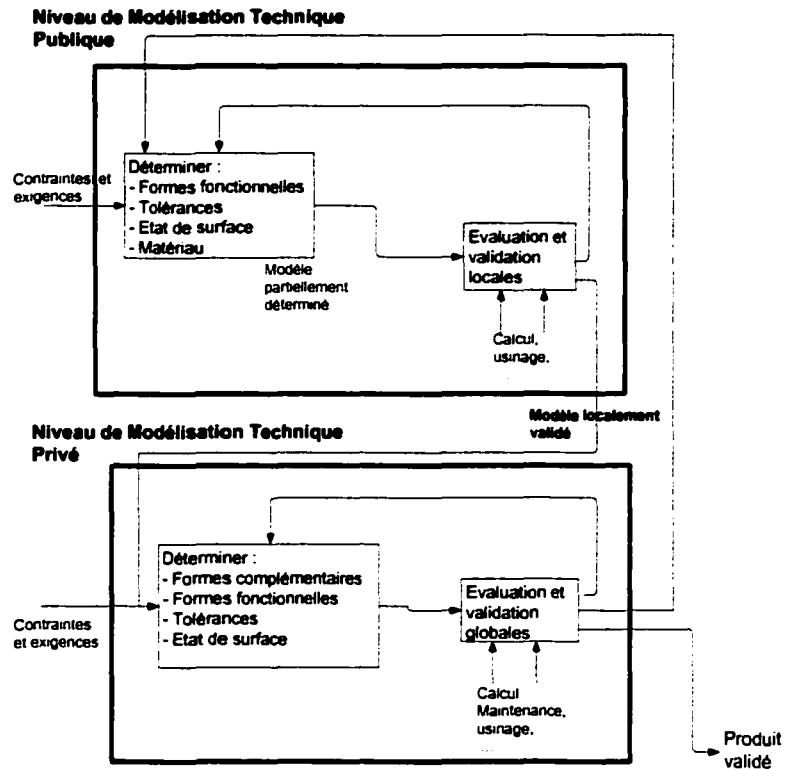


Figure 27 Conception prenant en compte les contraintes d'usinage

Au niveau de la modélisation technique publique, le concepteur peut déterminer plusieurs solutions techniques pour chaque fonction de base retenue au niveau de la modélisation technologique. Pour choisir entre ces alternatives, il procède habituellement à des calculs mécaniques de dimensionnement et d'évaluation. Une analyse d'usinage locale devra être possible dès ce niveau. Celle-ci validera les données de conception disponibles (qu'elles soient de nature géométrique ou technologique) ou sélectionnées par le concepteur.

Au niveau de la modélisation technique privé, le concepteur détermine les formes complémentaires liant les formes fonctionnelles. Il peut alors procéder à une analyse d'usinage globale. Celle-ci peut initialement mettre en cause les formes

complémentaires, mais elle peut également questionner le choix de certaines formes fonctionnelles et par conséquent le choix de solutions techniques validées auparavant. Ceci illustre un effet rétroactif entre la conception et l'analyse d'usinabilité rendue possible *en cours de conception*.

Pour intégrer l'analyse d'usinage au domaine de modélisation technique, nous proposons de la décomposer selon les types de données à analyser. Cette décomposition permettra au concepteur d'identifier les éléments dont les caractéristiques les rendent non usinables (ex : état de surface trop constraint, alors que la géométrie et la topologie sont usinables). Dans la section qui suit, nous détaillerons les analyses d'usinage ainsi que leur ordonnancement. Nous développerons dans le quatrième chapitre les analyses relatives aux modèles géométrique et topologique.

3.3.2 Les éléments des analyses

L'analyse d'usinage des modèles géométrique et topologique dépend de l'état d'avancement de la conception et des données que le concepteur désire valider. Les analyses d'usinage relatives à ces modèles sont les suivantes :

- **Analyse d'une surface** est appliquée à une face non dimensionnée. Elle vérifie l'existence de procédés afin d'usiner un type donné de surfaces,
- **Analyse d'un ensemble de surfaces** est appliquée à une association de surfaces dont les liaisons topologiques sont déterminées. Elle vérifie l'existence de procédés capables de générer la topologie déterminée par le concepteur.
- **Analyse d'une face** est appliquée à une face dimensionnée. Elle vérifie l'existence de procédés pour un type de face donné, avec la prise en compte des courses de la machine et de l'espace de travail des outils,
- **Analyse d'un ensemble de faces** est appliquée à une association de faces dimensionnées. Elle vérifie l'existence de procédés afin de générer la topologie en respectant les contraintes dimensionnelles.

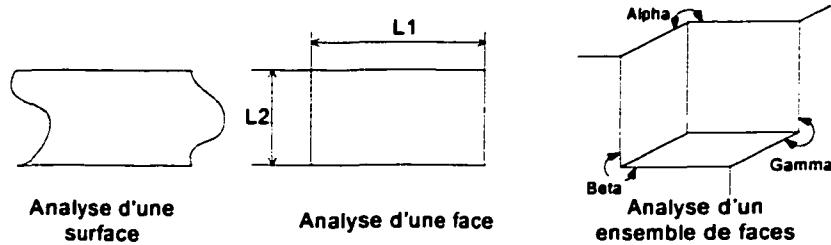


Figure 28 Analyses des données du modèle géométrique

Les deux premières analyses sont appliquées au niveau de la modélisation technique publique. Elles permettent à un concepteur de vérifier une première faisabilité d'une solution technique avant de passer à une analyse plus approfondie (usinage, calcul,...). Dans l'exemple qui suit, deux chapes sont proposées au niveau de la modélisation technique publique (à ce niveau, seules les surfaces fonctionnelles sont normalement définies, mais pour une meilleure compréhension du dessin, toutes les surfaces sont ici représentées). Cependant, une analyse d'usinabilité locale devrait rejeter la seconde solution si une brocheuse est indisponible car la forme est non usinable.

Etude d'une Chape : Fonction désirée Blocage en Translation

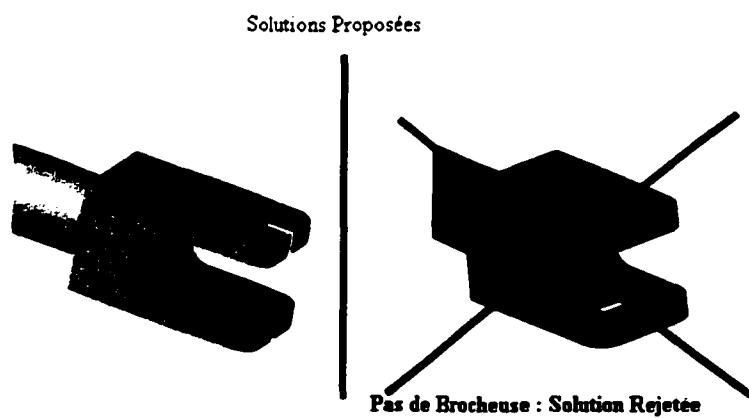


Figure 29 Analyse d'usinabilité de deux solutions techniques

Outre les données géométriques et topologiques, il est nécessaire de valider les données technologiques. Cette validation correspond aux analyses suivantes :

- l'analyse de l'état de surface,
- l'analyse du matériau,
- l'analyse des tolérances de forme, et
- l'analyse des tolérances de position ou de battement.

Ces analyses peuvent être menées en recourant à des bases de données technologiques. Les analyses d'usinage présentées jusqu'à présent traitent chacune d'un aspect différent du produit, cependant elles ne sont pas indépendantes. En effet, certaines doivent être effectuées avant d'autres car elles y contribuent implicitement. Dans la section à venir, nous allons présenter les relations d'antériorité entre les analyses d'usinage.

3.3.3 L'ordre des analyses

Le premier type d'analyse concerne les modèles géométrique et topologique et correspond à *l'analyse d'une surface*. Cette analyse peut être effectuée dès le niveau de modélisation technique publique. Elle permet de déterminer si les types de surfaces fonctionnelles sont usinables. Cette analyse détermine, d'ores et déjà, des familles de procédés candidats. *L'analyse d'une face* prend en compte le type et les dimensions de la face, tandis que *l'analyse d'un ensemble de surfaces* vérifie l'existence d'un procédé permettant de générer dans une même orientation toutes les surfaces. Ces deux dernières analyses peuvent être effectuées selon un ordre indifférent. Enfin, *l'analyse d'un ensemble de faces* est obligatoirement effectuée après ces deux analyses.

L'analyse du matériau vient restreindre l'ensemble des procédés déduits suite à une analyse du modèle géométrique. Par conséquent, le concepteur peut valider le matériau du produit dès qu'il a déterminé au moins une surface fonctionnelle. Donc, l'analyse du matériau est postérieure à l'analyse d'une surface et à l'analyse d'une face. Il en va de

même pour *l'analyse de l'état de surface*. Celle-ci consulte les précisions des procédés retenus et vérifie que les états de surface exigés par le concepteur appartiennent aux intervalles d'états de surface atteignables. Nous avons placé l'analyse du matériau et de l'état de surface de manière postérieure à l'analyse d'une face car la prise en compte des dimensions peut diminuer le nombre de procédés candidats. Les deux analyses de matériau et d'état de surface permettent de limiter encore plus le nombre des procédés retenus.

Chaque tolérance de forme est liée à une face donnée. En outre, la capacité d'un procédé à respecter une telle tolérance dépend des dimensions des faces. Par conséquent, *l'analyse des tolérances de forme* ne peut être effectuée qu'à la suite de *l'analyse d'une face*. Nous limitons notre étude aux analyses citées ci-dessus et ne traiterons pas l'analyse des tolérances extrinsèques qui ne peut être appliquée qu'à la suite de l'analyse d'un ensemble de faces.

Le schéma suivant résume les analyses d'usinage et illustre les contraintes d'antériorité les régissant. Le concepteur pourra, à tout moment de la conception, exiger

- une analyse des données qu'il aura déterminées
- une analyse particulière en fonction de ses besoins.

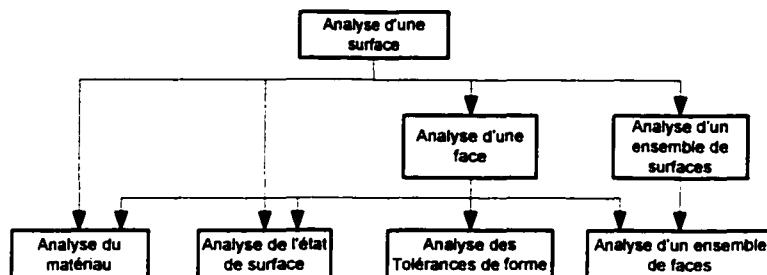


Figure 30 Ordre d'exécution des différentes analyses d'usinage

Ceci implique que lorsque le concepteur demande la validation d'une solution technique, celle-ci doit être composée d'au moins une surface. Par la suite, le concepteur pourra ajouter le matériau, l'état de surface ou les dimensions de la surface et revalider l'usinage.

Le tableau suivant montre les analyses d'usinage pouvant être accomplies par le concepteur. Il montre également les données des procédés que ces analyses permettent de déterminer.

Tableau I
Analyses d'usinage et données requises

Analyse d'usinage possible	Données des modèles des procédés déterminées suite à l'analyse
Analyse d'une surface	Nature du mouvement de coupe (translation, rotation), Nombre et nature des degrés de liberté, Nature de l'arête coupante de l'outil, Contraintes sur l'orientation entre la broche et la pièce.
Analyse d'une face	Données issues d'une analyse d'une surface, Enveloppe de travail de la machine, Dimensions de l'arête coupante.
Analyse d'un ensemble de surfaces	Données issues d'une analyse d'une surface, Nature et topologie des arêtes coupantes de l'outil, Contraintes supplémentaires sur l'orientation entre la broche et la pièce
Analyse d'un ensemble de faces	Données issues d'une analyse d'une face, Données issues d'une analyse d'un ensemble de surfaces.
Analyse d'état de surface, Analyse des tolérances de forme,	Données issues d'une analyse d'une face, Contraint la précision atteignable par le procédé
Analyse du matériau	Données issues d'une analyse d'une surface ou face, Contraint le matériau de l'outil

Pour une analyse d'usinage donnée, nous ne répliquons pas les données déterminées par les analyses lui étant antérieures. Ainsi, l'analyse d'une face détermine les données indiquées dans le Tableau I en plus de celles déterminées durant l'analyse d'une surface.

3.3.4 Contribution à une analyse globale d'usinage

Une analyse globale des propositions de conception (entièremment définies ou non) peut également être exigée par le concepteur en cours de conception. Cette analyse permet de vérifier l'accessibilité des outils et des machines, déterminés dans les analyses locales, en se basant sur une simulation utilisant un corps simplifié de l'outil et de la machine. Les procédés interférant avec les surfaces déterminées par le concepteur sont rejétés.

L'analyse d'usinage globale part des résultats des analyses d'usinage locales. Ces dernières associent à chaque caractéristique de forme validée un ensemble de procédés caractérisés par une orientation relativement à la pièce. Par conséquent, le résultat de l'analyse globale correspond à un ensemble d'alternatives d'usinage qu'il convient d'organiser. Ces alternatives peuvent, par la suite, être exploitées par le concepteur pour effectuer une analyse qualitative ou par le préparateur à la fabrication pour avoir une idée des différents moyens d'usinage.

Pour structurer les alternatives d'usinage générées par une analyse globale, nous utilisons l'approche de [Deneux 1993]. La première étape consiste à extraire les caractéristiques de forme (C.F.) en se basant sur le principe d'angle matière. La seconde étape, développée dans le prochain chapitre, détermine pour chaque C.F. les procédés d'usinage et pour chaque procédé candidat les orientations relatives entre la broche et la pièce.

La troisième étape établit le graphe ordonné. Celui-ci réunit les contraintes d'antériorité qui définissent l'ordre de réalisation des C.F. Ces contraintes sont déduites suite à l'analyse des dimensions et des tolérances extrinsèques entre les surfaces.

Nous partons de ce graphe pour générer les alternatives contenant les activités d'usinage. Ainsi, toute *association entre une C.F. et un procédé dans une certaine orientation par rapport à la pièce* sera assimilée à une activité "*opération d'usinage*". Le nombre de procédés candidats associés à chaque C.F. influe donc sur le nombre d'opérations lui étant associées. Pour générer les alternatives d'usinage, nous remplaçons dans le graphe d'antériorité toute C.F. par les opérations d'usinage lui étant associées. Ces opérations respecteront les mêmes contraintes d'antériorité que celles de la C.F. leur correspondant (Cf. Figure 31).

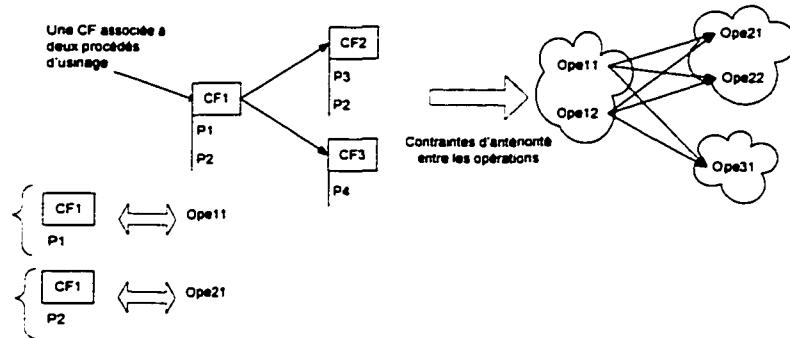


Figure 31 Contraintes d'antériorité entre différents procédés d'usinage

Nous pouvons remarquer que pour une pièce composée de plusieurs C.F. associées à plusieurs procédés, les alternatives d'usinage peuvent devenir complexes et difficiles à exploiter. Pour en faciliter la structuration et la construction, nous ajoutons deux objets au graphe ordonné qui correspondent à "*phase*" et "*sous-phase*". Ces deux objets permettent de regrouper les opérations d'usinage en respect de ce qui suit :

- *une "phase"* regroupe les opérations se succédant dans le graphe d'antériorité et obtenues sur la même machine,
- *une "sous-phase"* regroupe les opérations, d'une même phase, accomplies sans démontage de la pièce. Pour les procédés étudiés, l'orientation entre la broche et la pièce est la même pour toutes les opérations d'une même sous-phase.

Nous structurons donc, tout comme [Deneux 1993], les alternatives d'usinage selon trois niveaux hiérarchiques : *opération, sous-phase et phase*. Les alternatives d'usinage apparaissent au niveau "opération" comme un graphe représentant toutes les activités d'usinage. Au niveau "sous-phase", elles sont une simplification du graphe au niveau "opération", suite à l'agrégation des opérations d'usinage en sous-phases. Par extension, les alternatives d'usinage au niveau "phase" sont une simplification de la représentation au niveau "sous-phase" en agrégeant les sous-phases en phases.

Voici les étapes de génération des alternatives d'usinage d'une proposition de conception suite à une validation globale :

- une "opération d'usinage" est créée pour chaque association entre une C.F. et un de ses procédés dans une orientation donnée. Les antériorités entre deux "opérations d'usinage" seront les mêmes que celles entre leur C.F.,
- une "phase" est créée pour tout ensemble "d'opération d'usinage" se succédant dans le graphe d'antériorité et utilisant la même machine,
- un "changement de machine" est créé entre deux phases successives,
- une "sous-phase" regroupe les opérations d'usinage appartenant à une phase se succédant et partageant la même direction d'accessibilité par rapport à la broche,
- un "changement de position" est créé entre des "sous-phases d'usinage" se succédant dans une même phase d'usinage,
- un "changement d'outil" est créé entre deux "opération d'usinage" successives d'une même "sous-phase" n'utilisant pas le même outil.

Ces alternatives d'usinage seront représentées par des graphes conceptuels composés de deux types de nœuds : les objets et les relations conceptuelles. Les objets de ce graphe correspondront aux activités d'usinage en plus des entités "phase" et "sous-phase". Les relations conceptuelles seront les contraintes d'antériorité.

3.3.5 Conclusion

Nous avons pu voir, dans cette section, comment nous intégrons l'analyse d'usinage au processus de conception développé au LAMIH. Nous avons, ainsi, vu que l'analyse d'usinage peut être appliquée dans les niveaux de modélisation techniques publique et privé. Cette analyse peut être décomposée en différentes analyses dépendant des éléments que le concepteur cherche à valider. Les analyses disponibles doivent respecter certaines contraintes d'antériorité que nous avons présentées. Nous avons ensuite proposé les entités et les traitements nécessaires pour représenter les résultats d'une validation d'usinage globale i.e. des alternatives d'usinage contenant les activités d'usinage. Nous allons, à présent, introduire le concept de caractéristique d'usinage dont le but est d'associer le modèle produit, aux modèles des procédés, par le biais des analyses d'usinage accomplies.

3.4 Les caractéristiques d'usinage

3.4.1 Définition des caractéristiques d'usinage

Selon [Chang 1990], les caractéristiques d'usinage doivent fournir une interface entre les procédés de fabrication et le processus de développement du produit. Partant de cette hypothèse et des problèmes d'intégration de la conception et de l'usinage présentés dans le premier chapitre, nous proposons une nouvelle définition des caractéristiques d'usinage.

Tout d'abord, nous introduisons une **condition d'existence** pour les caractéristiques d'usinage. Nous exigeons que *l'analyse d'usinage des données du modèle produit confirme leur usinabilité et leur associe un ou plusieurs procédés candidats*. Si cette condition est vérifiée, alors nous définissons une caractéristique d'usinage par la composition des données suivantes (Cf. Figure 32) :

- les données du modèle produit que le concepteur désire valider,
- un des procédés utilisés afin de valider les données du modèle produit, ainsi que l'orientation relative entre la broche et la caractéristique de forme,
- les analyses d'usinage créant la correspondance entre les données du modèle produit et le procédé retenu.

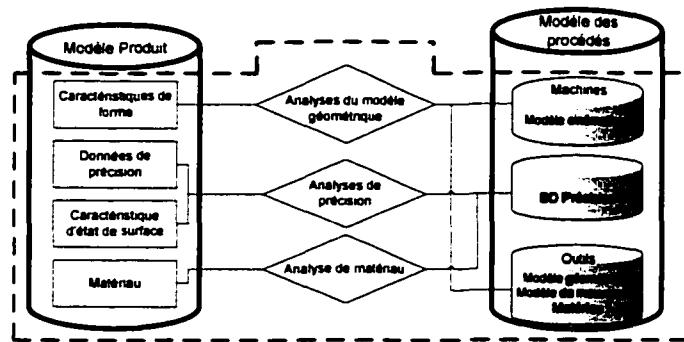


Figure 32 Données de la caractéristique d'usinage

Nous avons vu qu'une analyse d'usinage inclut au moins une analyse du modèle géométrique. Donc, la caractéristique d'usinage contient toujours une C.F. On déduit également qu'une C.F. matérialisant une solution technique est usinable par autant de manières que de caractéristiques d'usinage lui étant associées.

La définition des caractéristiques d'usinage influe, aussi, sur la manière d'analyser la pièce. Si le concepteur ajoute ou modifie les dimensions d'une des surfaces de cette C.F. alors on prend en compte les nouveaux attributs dans l'analyse d'usinage du modèle géométrique. Dans le cas où le procédé ne peut pas respecter les contraintes imposées par les dimensions, alors la caractéristique d'usinage est supprimée. En effet, sa condition d'existence n'est plus vérifiée. Ce raisonnement de validation reste similaire quand le concepteur :

- ajoute ou modifie l'état de surface ou la tolérance de forme d'une surface de la C.F.,
- spécifie le matériau de la pièce.

Cependant, si le concepteur ajoute ou enlève des surfaces à une C.F. extraite alors on reprend le processus de construction des caractéristiques d'usinage. En effet, il faut extraire et valider les nouvelles C.F. qui peuvent avoir été construites par le processus d'ajout ou de destruction de surfaces (Cf. Figure 33).

Figure 33 Exemple d'ajout de surfaces modifiant les C.F.

Outre un meilleur contrôle de la validité des caractéristiques d'usinage, cette définition apporte des avantages au niveau de l'évaluation autant locale que globale de la pièce. En effet, l'évaluation d'usinage d'une zone du produit est fortement reliée aux procédés utilisés. Chaque caractéristique d'usinage permet une évaluation locale des données du modèle produit car elle contient le procédé utilisé. Par ailleurs, les caractéristiques d'usinage aident à la détermination des alternatives d'usinage. En effet, elles contiennent la machine (phase), l'orientation de la broche par rapport à la C.F. (sous-phase) et l'outil utilisé (changement d'outil, opération d'usinage). Nous allons montrer, dans la prochaine section, la hiérarchisation proposée pour les caractéristiques d'usinage.

3.4.2 Hiérarchie des caractéristiques d'usinage

Nous adoptons pour la caractéristique d'usinage une hiérarchisation similaire à celle des procédés d'usinage. Par conséquent la caractéristique d'usinage sera *abstraite* (resp. *spécialisée*) si le procédé qu'elle contient est *abstrait* (resp. *spécialisé*).

Nous allons illustrer l'utilité des notions de caractéristiques d'usinage abstraites et spécialisées par le biais d'un exemple. Considérons le cas où un concepteur désire valider l'usinabilité d'une solution technique dont la solution technologique correspond à une liaison pivot. Supposons, en outre, que le concepteur ait choisi la solution technique constituée d'un arbre et d'un alésage. La validation d'un point de vue usinage correspond à la validation de l'arbre et de l'alésage. Etudions plus particulièrement l'alésage.

Supposons qu'initialement, le concepteur ne détermine pas les dimensions de l'alésage. L'analyse de celui-ci permettra de déterminer un ensemble de contraintes relativement aux procédés d'usinage. Pour poursuivre notre exemple, nous considérerons uniquement les contraintes listées dans la Figure 34. Nous pouvons alors voir la forme que peut avoir une caractéristique d'usinage abstraite associée aux données de conception déterminées à ce stade de la conception.

Caractéristique d'usinage abstraite			
Données du modèle produit	Analyse d'usinage	Données des modèles des procédés	
Cylindre	Analyse d'une surface	Machine	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Mouvement de coupe circulaire ➢ Mouvement d'avance parallèle à l'axe de la broche
		Outil	Arête droite perpendiculaire à l'axe du cylindre

Figure 34 Caractéristique d'usinage abstraite

Considérons, maintenant, que le concepteur détermine le diamètre de l'alésage à une valeur de 45mm et la longueur à 50mm. Une nouvelle analyse exigée par le concepteur cherchera les machines et outils se spécialisant de la machine et de l'outil appartenant à la caractéristique d'usinage abstraite *et* respectant les nouvelles contraintes. La machine pourrait être spécialisée par une fraiseuse 3 axes ou par un tour. L'outil, quant à lui, pourrait être spécialisé par un outil de tournage à arête droite ou par une fraise deux tailles. Voici un exemple de la spécialisation de la caractéristique d'usinage abstraite obtenue plus haut :

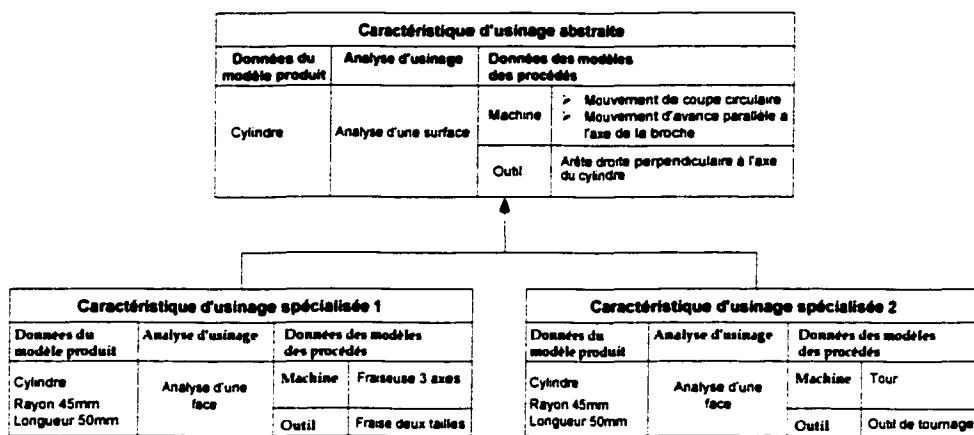


Figure 35 Spécialisation d'une caractéristique d'usinage abstraite

Le processus peut continuer par la spécification des autres attributs technologiques de la pièce. Ceux-ci permettront de limiter le faisceau de solutions et de rejeter les solutions inadéquates. Nous proposons de garder l'association entre les caractéristiques d'usinage (C.U.) abstraites et les C.F. Ceci permettra de ne pas reprendre le raisonnement de validation depuis le début s'il n'existe plus de C.U. spécialisée suite à un changement de dimensions, d'état de surface ou de tolérance de forme. Il "suffira" de vérifier s'il existe des C.U. spécialisant la C.U. abstraite respectant les nouvelles contraintes. Dans le cas contraire, le concepteur est prévenu de l'impossibilité de générer sa proposition de conception.

3.4.3 Synthèse

Nous avons introduit une nouvelle définition des caractéristiques d'usinage se basant sur les données du modèle produit, les analyses d'usinage utilisées afin de valider le produit et enfin les procédés permettant d'obtenir les données du modèle produit. Nous avons vu les implications de cette nouvelle définition sur le processus d'analyse et sur la génération d'alternatives d'usinage. Nous avons également pu voir que les caractéristiques d'usinage possèdent deux niveaux hiérarchiques illustrés par un exemple simple. Le cinquième chapitre illustre plus en détail ces niveaux hiérarchiques.

3.5 Conclusion

Le but de ce chapitre était de présenter l'intégration des processus d'analyse d'usinage et de conception, ainsi que les différents modèles nécessaires.

Nous avons, tout d'abord, présenté une caractérisation des «capabilités» de génération de forme des procédés d'usinage. Cette caractérisation possède l'avantage d'être applicable de manière uniforme aux principales familles de procédés d'usinage, que nous avons définies dans le deuxième chapitre. Nous avons ainsi caractérisé les mouvements d'avance des machines et des arêtes coupantes des outils par la notion de pseudo matrice des degrés de liberté notée **D**. Nous avons ensuite montré comment nous déduisons, pour tout outil les mouvements d'avance permis par une machine donnée. Nous avons enfin classifié les machines, outils et procédés d'usinage en fonction de paramètres géométriques et technologiques.

Dans la deuxième section, nous avons structuré l'analyse d'usinage pour permettre aux processus de conception et d'analyse d'usinage d'être concourants. Nous sommes partis du constat que le concepteur détermine différents types de données au cours de la

conception. Par conséquent, nous avons décomposé l'analyse d'usinage en fonction des éléments du produit que le concepteur détermine. Par la suite, nous avons montré les contraintes d'antériorité liant ces analyses d'usinage. Nous avons enfin présenté une approche pour structurer les alternatives d'usinage résultant d'une validation d'usinage globale.

Dans la troisième et dernière section, nous avons introduit une nouvelle définition des caractéristiques d'usinage. Celles-ci correspondent à l'association des données du modèle produit analysées, un procédé les validant dans une orientation particulière et enfin l'analyse d'usinage créant la correspondance entre les données du modèle produit et le procédé d'usinage. Cette caractéristique crée donc un pont entre les modèles du produit et des procédés d'usinage pris en compte dans nos travaux. Nous avons ainsi vu qu'une caractéristique d'usinage ne peut exister, à notre sens, que si l'analyse d'usinage associe au moins un procédé d'usinage aux formes analysées. Nous avons, ensuite, présenté et illustré une hiérarchisation des caractéristiques d'usinage similaire à celle des procédés d'usinage.

Le chapitre suivant présente une méthode liant les parties coupantes des outils aux surfaces usinées. Cette méthode permet des analyses autres que géométriques en prenant en compte les contraintes dues aux états de surface, aux tolérances et au matériau.

CHAPITRE 4

LA GRAMMAIRE D'USINAGE : MODÉLISATION DU POUVOIR GÉNÉRATIF DES PROCÉDÉS D'USINAGE

4.1 **Introduction**

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté différents types d'analyse d'usinage intégrables au processus de conception. Nous y avons démontré l'utilité d'une analyse d'usinage décomposée en fonction des données du modèle produit.

Le but de ce chapitre est de présenter un outil basé sur des règles objectives pour accomplir ces analyses. Nous nous intéressons principalement aux règles liant, d'une part, les arêtes coupantes de l'outil et leurs mouvements d'avance, et d'autre part, les surfaces générées par ces mouvements. Nous exploitons ces règles pour associer des procédés aux données du produit à valider.

Nous présentons, dans la première section, les règles de génération de surfaces par les arêtes coupantes des outils. Ces règles sont, tout d'abord, spécifiées pour la génération de surfaces seules. Par la suite, nous présentons les règles et conditions de génération d'associations de surfaces.

La section qui suit présente les grammaires attribuées. Cet outil a été choisi pour formaliser les règles et conditions spécifiées plus haut. Nous spécifions ensuite un analyseur syntaxique descendant permettant d'associer les données du modèle produit aux procédés d'usinage.

Dans la dernière section, nous montrons comment il est possible d'exploiter les grammaires d'usinage attribuées. Nous voyons ensuite comment l'utilisation de la hiérarchisation des caractéristiques d'usinage associée à la grammaire permet de faciliter et de structurer l'analyse d'usinage. La dernière section de ce chapitre met en évidence la correspondance entre les analyses d'usinage possibles en cours de conception et les règles de la grammaire d'usinage.

4.2 Règles liant les données des modèles géométrique et topologique aux procédés d'usinage

4.2.1 Introduction

Les surfaces que nous étudions sont créées par le balayage d'un élément générateur le long d'une courbe quelconque (le mouvement d'avance d'un outil) [Mortenson 1985]. Nous avons vu dans le deuxième chapitre que les surfaces fonctionnelles appartiennent principalement aux cinq familles suivantes : Plan, Cylindre, Sphère, Tore et Cône. La géométrie de ces surfaces nous permet de restreindre les mouvements d'avance des machines à des arcs de cercles et à des portions de droite. Nous spécifierons dans ce qui suit des règles géométriques permettant de lier les arêtes coupantes et leurs mouvements (d'avance et de coupe) aux surfaces que nous étudions et à leurs attributs.

4.2.2 Génération de surfaces par un mouvement de coupe circulaire

Les familles de procédés capables de produire ce mouvement de coupe sont les suivantes : Alésage, Fraisage, Perçage, Tournage.

4.2.2.1 Génération de surfaces simples

Nous avons introduit la notion de pseudo matrice pour décrire les mouvements d'avance d'outils permettant aux arêtes coupantes de générer des surfaces. Nous allons montrer dans cette section comment nous traduisons les pseudo matrices d'une arête coupante en un ensemble d'opérateurs géométriques permettant de déduire les surfaces pouvant être générées. Nous exprimerons un mouvement de rotation autour d'un axe **U** (resp. de translation) exprimé dans une pseudo matrice par l'opérateur géométrique **R_U** (resp. **T_U**). Dans ce qui suit, l'indice **U** correspond toujours à l'un des axes **X**, **Y** ou **Z** du repère de la broche.

Nous sommes dans le cadre de mouvement de coupe circulaire. Par conséquent, toute arête coupante **A_i** est animée par un mouvement de rotation traduit par l'opérateur géométrique **R_z(A_i)**. L'application de cet opérateur permet de déduire un ensemble de surfaces élémentaires. Dans la Figure 36, nous montrons la liaison entre les types d'arêtes coupantes que nous considérons et leur surface élémentaire.

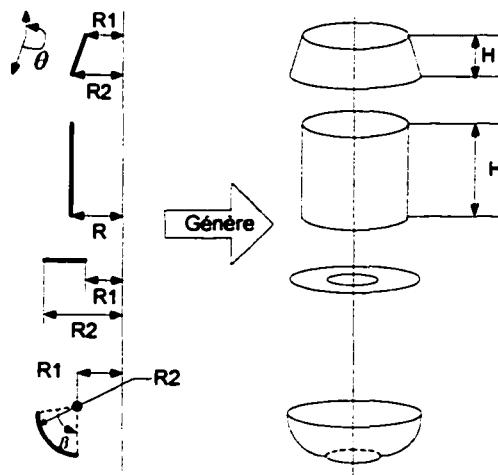


Figure 36 Génération de surfaces élémentaires par les arêtes coupantes considérées

La génération de surfaces par usinage se fait par l'application de mouvements d'avance et de coupe. Par conséquent, si un degré de liberté de translation est possible pour une arête Ai selon un axe U ($a_U \neq 0$) alors les surfaces générées par l'application du mouvement d'avance à l'arête sont géométriquement notées par $T_U \circ R_z(Ai)$. Si deux degrés de liberté de translation sont possibles (ex : a_x et $a_y \neq 0$) alors les surfaces générées sont celles générées par les opérateurs géométriques suivants : $T_x \circ R_z(Ai)$, $T_y \circ R_z(Ai)$, $T_{xy} \circ R_z(Ai)$ et $C_{xy} \circ R_z(Ai)$. T_{xy} correspond à une translation quelconque dans le plan XY tandis que C_{xy} correspond à un mouvement de rotation (modélisé par un arc de cercle) dans le plan XY donc autour de l'axe Z (Exemple : *contournage* en *fraisage*).

Chaque surface est, donc, générée par l'application d'un opérateur géométrique (résultant de l'application d'un mouvement d'avance et de coupe) à une arête coupante (avec un type, une orientation et une position par rapport à la broche). Etant donné le nombre élevé de combinaisons entre les arêtes coupantes, leurs mouvements de coupe et les mouvements d'avance possibles, nous avons développé l'étude relative aux surfaces générées par des opérateurs géométriques dans l'annexe 4. Cette étude géométrique a pris comme assise la propriété de tangence entre les surfaces usinées et les surfaces élémentaires des arêtes coupantes. Nous allons présenter, dans la section suivante, les règles caractérisant la génération d'associations de surfaces par les outils.

4.2.2.2 Génération d'associations de surfaces

Avant de caractériser la génération d'une association n-aire de surfaces, nous caractérisons tout d'abord la génération de couples de surfaces. Nous spécifierons par la suite les règles à respecter pour générer des associations n-aires de surfaces.

4.2.2.2.1 Génération d'associations binaires de surfaces

Un outil coupant peut générer deux surfaces adjacentes par l'utilisation **d'une arête coupante ou de deux arêtes coupantes adjacentes**. Nous allons décrire les conditions géométriques respectées par l'outil lors de cette génération.

Il existe deux cas de figure où **une arête coupante** peut générer deux surfaces adjacentes :

- Les deux surfaces appartiennent à un ensemble de surfaces générées lors d'un même mouvement d'avance,
- Le mouvement d'avance appliqué à l'arête n'est pas le même lors de la génération des deux surfaces.

Cependant, la propriété géométrique qui est toujours respectée lors de la génération de deux surfaces adjacentes par une même arête coupante est la suivante :

Hypothèses :

- Soient S_i et S_j deux surfaces adjacentes,
- Soit $A_{S_i S_j}$ l'arête d'intersection des deux surfaces,

Condition : Si l'arête A_i génère les deux surfaces S_i et S_j alors :

Propriété 1 :

- La surface élémentaire de A_i (tangente en $A_{S_i S_j}$ à S_i) et S_j doivent être tangentes sinon leur intersection doit être vide,
- La surface élémentaire de A_i (tangente en $A_{S_i S_j}$ à S_j) et S_i doivent être tangentes sinon leur intersection doit être vide.

La Figure 37 illustre le cas de deux surfaces adjacentes non usinables par l'arête A_i d'une fraise deux tailles.

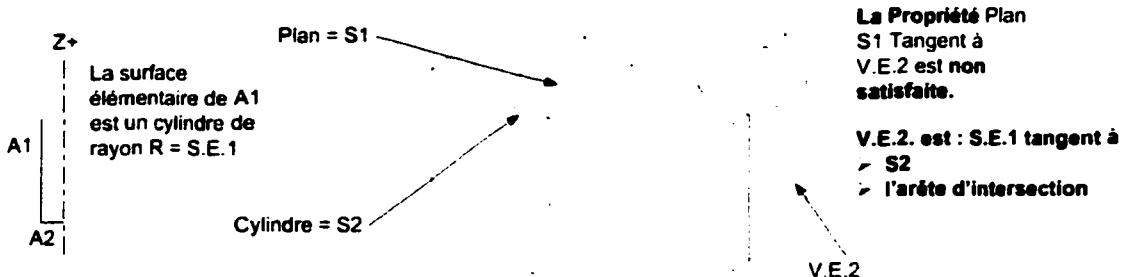


Figure 37 Non respect d'une condition de génération de deux surfaces par une arête

Deux surfaces adjacentes peuvent également être générées par **deux arêtes coupantes adjacentes** animées d'un mouvement d'avance (Figure 38). La propriété géométrique toujours respectée dans ce cas est la suivante.

Hypothèses :

- Soient deux arêtes coupantes adjacentes A_i et A_j .
- Soient S_i et S_j deux surfaces adjacentes.
- Soit $A_{S_i S_j}$ l'arête d'intersection des deux surfaces.

Condition : Si A_i (resp. A_j) génère les deux surfaces S_i (resp. S_j) alors :

Propriété 2 : l'angle matière entre S_i et S_j en $A_{S_i S_j}$ est égal à l'angle extérieur à la matière entre A_i et A_j .

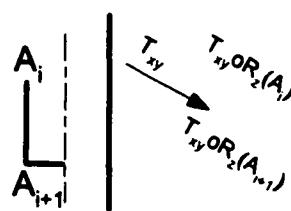


Figure 38 Génération de deux surfaces adjacentes par deux arêtes adjacentes

4.2.2.2.2 Génération d'associations n-aires de surfaces

La génération d'associations n-aires de surfaces est un cas général de génération d'associations binaires de surfaces. Nous avons limité l'étude aux procédés d'usinage 3 axes. Par conséquent, nous nous baserons sur les conditions implicites de génération d'associations binaires de surfaces, c'est à dire :

- la broche garde la même orientation lors de l'usinage d'un ensemble de surfaces,
- chacune des surfaces de cet ensemble est usinée par une seule arête coupante,
- tout couple de surfaces est généré en respect d'une des deux propriétés énoncées dans la section précédente.

Ces conditions valident la génération d'un ensemble de surfaces sans considérer l'accessibilité de l'outil. Pour une validation locale, il faut s'appuyer sur un modèleur solide et simuler le mouvement de l'outil.

Une simulation permettant une validation locale respectera la propriété géométrique suivante :

Hypothèses :

- Soit $A_{S_i S_j}$ l'arête d'intersection de deux surfaces S_i et S_j appartenant à l'ensemble de surfaces devant être validées,
- A_i (resp. A_j) génère les deux surfaces S_i (resp. S_j),

Conditions :

- Pour tout point M_i de $A_{S_i S_j}$, si
 - L'outil est tangent à $A_{S_i S_j}$ en M_i
 - La surface élémentaire de A_i est tangente à S_i ,
 - La surface élémentaire de A_j est tangente à S_j ,

Propriété 3 :

- Les surfaces élémentaires des arêtes coupantes et les surfaces usinées doivent être tangentes, sinon leur intersection doit être vide.

Il est possible durant cette simulation de simplifier le corps de la machine et vérifier qu'il n'existe pas de problèmes d'interférence pour la machine et la broche.

4.2.3 Génération de surfaces par un mouvement de coupe linéaire

4.2.3.1 Génération de surfaces simples

Le brochage est un procédé d'usinage de surfaces intérieures et extérieures par mouvement de coupe rectiligne à l'aide d'outils de coupe à dents multiples appelées broches. Les arêtes sont droites ou correspondent à des portions de cercles. Les surfaces générées par ces arêtes sont le fruit du balayage des arêtes le long du mouvement d'avance.

Nous avons également vu que les arêtes droites sont séparées en deux types (Cf. Figure 39). Ces arêtes génèrent un plan respectant les contraintes suivantes :

- Normale de sens opposé à la normale extérieure de l'arête coupante,
- $H_{Plan} = H_{Arête}$ si arête de type1
- $H_{Plan} \leq H_{Arête}$ si arête de type2

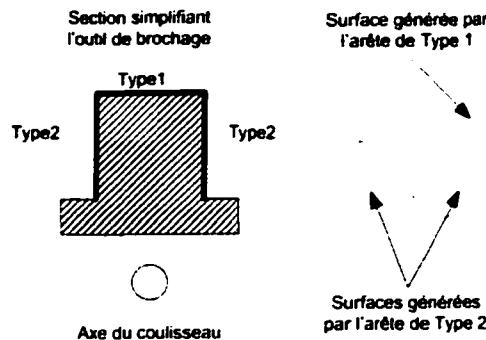


Figure 39 Outil de brochage composé d'arêtes droites

Outre les arêtes droites, le contour d'une broche peut également être composé d'arêtes courbes. Celles-ci génèrent des cylindres respectant les contraintes suivantes :

- Axe OZ parallèle à l'axe OZ de la broche
- $R_{Cylindre} = R_{Arête}$,
- $\theta_{Cylindre} = \theta_{Arête}$,
- Concavité complémentaire à celle de l'arête.

Toute arête A_i , du contour d'une broche, ne peut générer qu'une seule surface que l'on notera S_i .

4.2.3.2 Génération d'associations de surfaces

Toutes les arêtes des outils de brochage possèdent le même mouvement d'avance (confondu avec le mouvement de coupe). Par conséquent, les ensembles de surfaces générées par un outil peuvent être résumées par la propriété qui suit :

- Si un outil est composé d'un contour d'arêtes $Contour = \{A_i / i \in [1, n]\}$,
- Si chaque arête A_i génère une surface S_i
 - Alors les ensembles de surfaces générés par cet outil sont un sous-ensemble de l'ensemble de surfaces $S = \{S_i / i \in [1, n]\}$ où l'angle

matière entre S_i et S_{i+1} est égal à l'angle extérieur à la matière entre les arêtes A_i et A_{i+1} , pour $i \in [1, n - 1]$

4.2.4 Conclusion

Nous avons présenté dans cette section les règles géométriques de génération de surfaces par des arêtes coupantes. Ces règles définissent la nature et les attributs des surfaces en fonction du type et des attributs de l'arête ainsi qu'en fonction des mouvements d'avance et de coupe. Nous avons ensuite défini les hypothèses, conditions et propriétés de génération de couples de surfaces. Nous avons, enfin, généralisé ces règles à la génération d'associations n-aires de surfaces et présenté une procédure pour prendre en compte les contraintes d'accessibilité des outils. Dans le paragraphe qui suit, nous allons justifier la nécessité d'utiliser une grammaire attribuée. Nous montrons ensuite comment utiliser cet outil pour formaliser les règles de génération de surfaces.

4.3 Grammaire attribuée

4.3.1 Introduction

Il existe un nombre infini de C.F. pouvant être analysées d'un point de vue d'usinage. En outre, pour chaque C.F. il peut exister non pas un mais plusieurs procédés candidats. Il n'est donc pas possible d'utiliser un système expert traditionnel. En effet, ces derniers nécessitent d'établir une machine d'états explicitant pour chaque étape de l'analyse la ou les règles à utiliser. Nous pouvons donc nous attendre à une explosion combinatoire ou à une machine d'états ingérable.

Pour analyser un ensemble quasi-infini résultant d'un ensemble fini de symboles et de règles, nous montrerons que la solution appropriée est la grammaire. Nous présenterons une grammaire attribuée qui permet la formalisation des règles d'usinage et la prise en

compte des attributs des surfaces (dimensions, état de surface, tolérance). Le lecteur est invité à l'annexe 5 s'il désire plus d'informations sur les grammaires attribuées et l'analyseur syntaxique choisis.

4.3.2 Notions de grammaire

Les grammaires formelles ont été initialement proposées par [Chomsky 1957]. Une grammaire est une spécification formelle d'un ensemble possiblement infini de terminaux, dérivés d'un ensemble fini de non-terminaux grâce à un ensemble de règles de production. Les règles précisent les combinaisons acceptables des non-terminaux. Elles sont appelées des *règles de réécriture* car elles permettent la réécriture d'un ou plusieurs symboles par une chaîne de symboles. L'application récursive des règles permet à la grammaire de générer l'ensemble appelé *langage de la grammaire*. En résumé, la grammaire d'une langue est la théorie qui dit de manière formelle et explicite quelles séquences d'éléments fondamentaux de la langue sont permises. Prenons l'exemple de la langue française. L'ensemble des non-terminaux est constitué de morphèmes (mots, verbes, etc.). L'ensemble des terminaux est constitué de phrases grammaticalement correctes. Ces phrases sont générées suite à des combinaisons de morphèmes en respect des règles de la grammaire linguistique.

Il existe 4 types de grammaires décrites dans l'annexe 5. Nous choisissons les grammaires dont les règles permettent, à chaque étape, la réécriture d'un seul symbole non-terminal par une chaîne pouvant être composée de terminaux et/ou de non-terminaux. Ces grammaires sont appelées *non contextuelles* ou CFG (*Context Free Grammars*) car le traitement d'un des symboles n'affecte pas celui des autres parties de la structure [Shih et Shmidt 94]. Ces grammaires sont répandues dans le domaine de la programmation car :

- elles sont faciles à comprendre,
- elles permettent de décomposer la complexité du traitement,

- elles sont faciles à maintenir,
- elles permettent la construction automatique d'analyseurs efficaces, dont la construction permet de révéler les ambiguïtés de la grammaire.

[Knuth 1968] a proposé une extension aux grammaires spécifiées par Chomsky. Cette extension ajoute des attributs aux symboles manipulés par la grammaire. Ces attributs sont de deux types : hérités ou synthétisés. Nous allons présenter une formalisation de ces grammaires dans la section suivante.

4.3.3 Formalisation de la grammaire attribuée

Formellement, une grammaire attribuée est un T-uple $GA = (G, A, F)$ avec :

- $G = (N, T, P, S)$ une grammaire CFG
 - N est l'ensemble de non terminaux ;
 - T est l'ensemble de terminaux, $N \cap T = \emptyset$;
 - S est la racine des non-terminaux appelée Symbole de départ, $S \in N$;
 - P est l'ensemble des règles de production, p tels que :

$$p : X_0 \rightarrow X_1 \dots X_n, \text{ avec } X_0 \in N, \text{ et } X_i \in (T \cup N).$$
- $A = \bigcup_{X \in N} (H(X) \cup S(X))$ est l'ensemble des attributs, avec $H(X)$ les attributs hérités et $S(X)$ les attributs synthétisés de $X \in N$;
- $F = \bigcup_{p \in P} ; F(p)$ est l'ensemble des règles sémantiques f_{p,a,X_i} . Chacune de ces règles définit l'occurrence de l'attribut $a(X_i)$ dans la règle $p : X_0 \rightarrow X_1 \dots X_n$ avec $a \in A(X_i)$.

Chaque attribut $\alpha \in U(X)$ possède un ensemble possible de valeurs D_α . Les règles sémantiques sont utilisées afin d'assigner des valeurs aux attributs des symboles manipulés.

4.3.4 Conclusion

Le langage des grammaires peut être constitué d'un ensemble infini de chaînes de symboles. Les grammaires ne cherchent pas à caractériser chacun des éléments de cet ensemble. Leur avantage est qu'elles spécifient *comment obtenir tout élément de cet ensemble*. Par ailleurs, la nature des symboles des chaînes traitées peut être quelconque. Rappelons que nous désirons vérifier s'il existe un ou des procédés permettant de générer un ensemble déterminé, par le concepteur, de surfaces possédant des attributs géométriques et technologiques. Pour répondre à ce besoin, il faut utiliser les analyseurs syntaxiques des grammaires. Nous allons présenter ceux-ci dans la section suivante.

4.4 Analyseur syntaxique d'une grammaire attribuée d'usinage

4.4.1 Choix d'un analyseur syntaxique

Le processus de validation d'un ensemble de symboles est appelé *analyse syntaxique* (*syntax analysis*). De manière générale, pour chaque grammaire il faut construire un analyseur syntaxique. L'approche générale de ces analyseurs est la suivante. Une règle de la grammaire est appliquée à une chaîne de symboles *dès que* le membre de gauche de cette règle est vrai et que la condition accompagnant la règle est vérifiée. L'analyseur de la grammaire boucle de manière cyclique et passe en revue toutes les règles à chaque fois que la représentation de la chaîne est modifiée. L'analyse s'arrête si on prouve que la chaîne appartient au langage ou si l'analyseur ne trouve pas de règles à appliquer à la chaîne de symboles avant d'avoir atteint son objectif.

L'avantage principal d'un analyseur syntaxique, par rapport à un système expert, est que *l'ordre d'application des règles n'est pas spécifié*. Le résultat de l'analyseur inclut la décision d'accepter les terminaux analysés, mais également un arbre dit de dérivation. Il existe deux approches d'analyse des grammaires : descendante et ascendante.

Selon [Lewis et Stearns 1968], ces deux méthodes sont équivalentes pour deux raisons. D'une part, certaines grammaires sont analysées de manière plus efficace par des approches descendantes tandis que d'autres le sont mieux par des méthodes ascendantes. Donc, l'efficacité de l'analyseur dépend de la grammaire. D'autre part, [Griffiths et Petrick 1965] ont prouvé que si G est une grammaire analysée efficacement par une des deux méthodes, alors il est possible d'en développer une version transformée qui peut être analysée efficacement par l'autre méthode.

Nous avons choisi d'adopter un analyseur communément utilisé dans l'analyse de programmes. Il s'agit de l'analyseur descendant de type LL(1) i.e. permettant une analyse de gauche à droite (*Left to right parse*) avec une dérivation du terme le plus à gauche (*Leftmost derivation*), pouvant travailler de manière déterministe s'il lui est permis de connaître 1 symbole à droite (1 symbol Look-ahead) de sa position courante dans la chaîne analysée [Lewis et Stearns 1968]. L'approche adoptée afin d'implanter cet analyseur ainsi que les contraintes relatives sont détaillées en annexe 5.

4.4.2 Analyseur LL(1) d'une grammaire d'usinage

Chaque procédé d'usinage peut générer un ensemble de surfaces et d'associations de surfaces. La génération de cet ensemble nécessite le développement d'une grammaire d'usinage attribuée. Cependant, si l'on veut savoir si un ensemble de surfaces peut être généré par un procédé d'usinage, il faut utiliser un analyseur syntaxique relatif à la grammaire exprimant la «capacité» de génération de formes du procédé d'usinage. Donc, l'analyseur de chaque grammaire ne reconnaîtra que les ensembles de surfaces pouvant être générés par cette grammaire particulière. Ceci implique que l'on doit construire autant de grammaires G_1, G_2, \dots, G_n que de procédés possibles. Pour un ensemble quelconque de surfaces x le problème d'analyse d'usinage se ramène à répondre à la question suivante :

Soient n procédés pour lesquels nous construisons n grammaires G_i

Est ce que $x \in L(G_i)$ pour $i = 1, \dots, n$?

Le raisonnement de validation d'associations de surfaces porte essentiellement sur deux entités géométriques : les surfaces et les arêtes. Pour fournir à l'analyseur syntaxique des chaînes de surfaces et d'arêtes nous proposons la démarche qui suit. Nous proposons tout d'abord de décrire les données du modèle produit par un graphe conceptuel. Ces graphes offrent l'avantage de ne pas se limiter à la représentation d'informations géométriques et peuvent inclure les données technologiques. Nous présentons, en annexe 6, un graphe conceptuel incluant les données devant être analysées d'un point de vue usinage.

Pour connaître toutes les chaînes composant un graphe nous utilisons l'arbre de recouvrement du graphe (Cf. Figure 40). Cet arbre ne contient que des arêtes et surfaces. A partir de cet arbre, nous pouvons déterminer les chaînes de surfaces et d'arêtes à analyser. Nous validons également les données de précision intrinsèques aux surfaces (état de surface, tolérances de forme) par le biais de fonctions sémantiques attachées aux règles lexicales. Les chaînes fournies à la grammaire auront la particularité de ne contenir que des arêtes liant deux surfaces comme illustré dans la figure qui suit. En effet l'arête ne figure dans la chaîne analysée que parce qu'elle contient l'angle matière entre deux surfaces adjacentes.

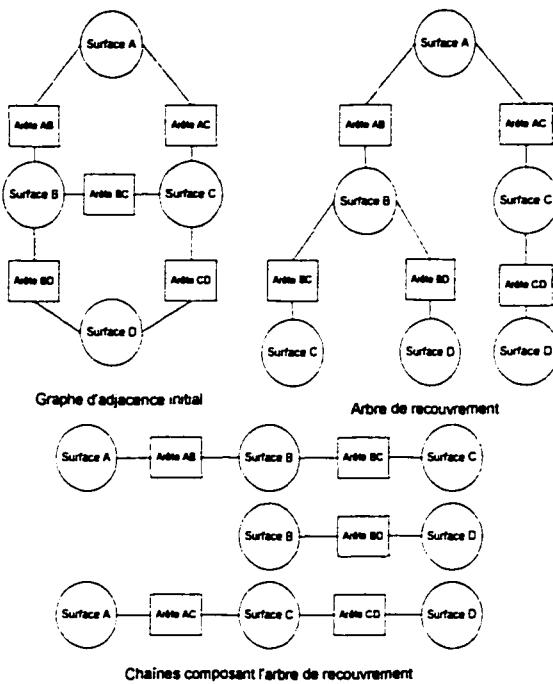


Figure 40 Chaînes de surfaces et d'arêtes traitées par la grammaire

Dans ce qui suit, nous allons déterminer les terminaux et les non-terminaux, avant de spécifier les règles de production de la grammaire d'usinage.

4.4.2.1 Les terminaux

Les terminaux de la grammaire sont les surfaces composant la caractéristique de forme, qui prennent leurs valeurs dans la liste : Cylindre, Cône, Plan, Sphère et Tore.

4.4.2.2 Les non-terminaux

Notre grammaire est composée de plusieurs non-terminaux. Le premier est lié à une surface simple et est noté <Surface>. Les deux non-terminaux <Association> et <Association'> expriment un ensemble de surfaces liées par des arêtes représentées par

le non-terminal <Arête>. Nous détaillerons chacun de ces non-terminaux ainsi que leurs attributs au niveau des règles de production.

4.4.2.3 Le symbole de départ

Nous adoptons comme symbole de départ le symbole <Association>.

4.4.2.4 Les règles de production

Nous spécifions dans ce qui suit les règles de production pouvant appartenir à une grammaire d'usinage donnée.

4.4.2.4.1 Règles de définition

Ces règles sont aussi dites règles lexicales. Leur forme générale est comme suit :

R1 : <Surface> → <Plan>

R2 : <Surface> → <Cylindre>

R3 : <Surface> → <Cône>

R4 : <Surface> → <Tore>

R5 : <Surface> → <Sphère>

Si un procédé ne génère pas une surface donnée (ex : les sphères pour tout procédé contenant une fraise deux tailles) alors sa grammaire ne contient pas de règle générant cette surface.

Cependant, si un procédé peut générer une surface avec des arêtes coupantes différentes, alors nous accolons un indice *i* aux terminaux, relatifs à la surface, (ex : <Plan*i*>) exprimant des contraintes différentes (arête, orientation de la broche par rapport à la surface, dimensions). Prenons l'exemple d'une fraise deux tailles. Les deux arêtes

coupantes de cette fraise peuvent chacune générer un plan (Cf. Figure 41). Cependant, ces plans ne respecteront pas les mêmes contraintes dimensionnelles. Les dimensions du plan généré par l'arête perpendiculaire à la broche seront contraintes par les courses de la machine selon le plan XY. Les dimensions du plan généré par l'autre arête seront contraintes par la course de la machine selon l'axe Z.

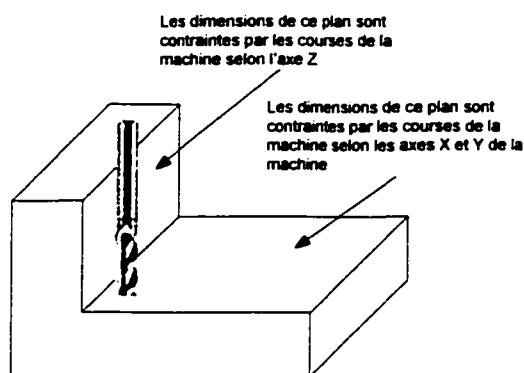


Figure 41 Surfaces de même nature générées par des arêtes distinctes

Une première étape consiste à créer les règles de définition en se basant sur les recommandations précisées dans l'annexe 4. Le non-terminal `<Surface>` de la règle possède les attributs précisés Figure 42.

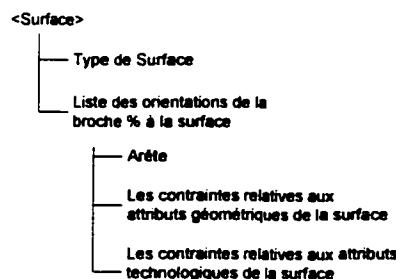


Figure 42 Description des attributs d'un non-terminal `<Surface>`

Nous parlons de liste d'orientations de la broche par rapport aux surfaces car le procédé peut générer une surface, respectant les mêmes contraintes géométriques et

technologiques, avec une même arête coupante mais dans différentes orientations par rapport à la pièce. Les ensembles d'orientations peuvent correspondre :

- à deux vecteurs de sens opposés (ex : outils neutres de tournage),
- aux génératrices d'un cône défini par son demi-angle au sommet (ex : génération d'un plan par une fraise conique)
- à un plan (ex : génération d'un plan en fraisage Cf. Figure 43)

Afin que l'analyseur syntaxique approuve l'application d'une règle de définition, il passe par plusieurs étapes dont l'application peut être obligatoire ou non en fonction de l'analyse exigée par le concepteur. La première étape vérifie que le type de la surface étudiée est similaire à celui du non-terminal. Par la suite, le module vérifie si les dimensions de la surface analysée respectent les contraintes spécifiées dans <Surface>. Il vérifie enfin si les attributs technologiques de la surface sont atteignables par le procédé.

Dans ce qui suit, nous allons proposer la forme générale des règles de définition d'un procédé spécialisé. Rappelons que ces règles spécifient les surfaces simples qu'un procédé peut générer ainsi que l'arête coupante et l'orientation entre la broche et la pièce. Les règles sémantiques de ces productions sont organisées en étapes. L'échec à une étape implique que le procédé ne respecte pas une des contraintes spécifiées par le concepteur.

Règle de définition

R : <Surface> → <Une_Surface>

Pseudo-code des fonctions sémantiques attachées à une règle de définition

Vérification des dimensions

Vérifier que les dimensions de la surface respectent les contraintes des surfaces spécifiées dans l'annexe 4.

Vérification des données technologiques

Vérifier si l'état de surface et tolérance de forme sont atteignables par le procédé considéré,

Attribution du non-terminal en fonction des attributs de l'arête

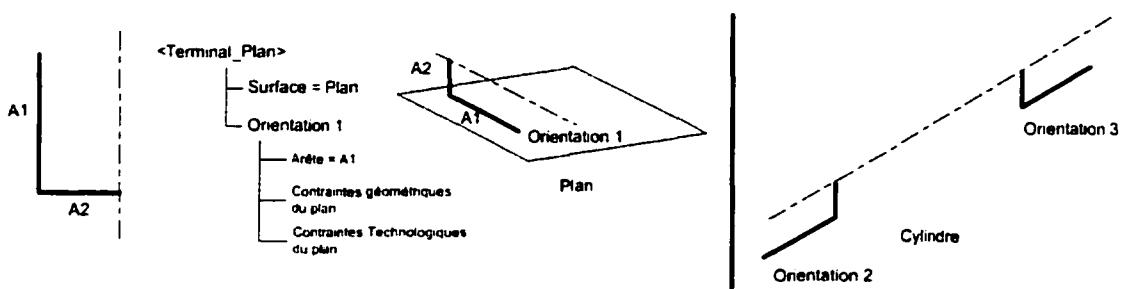
Si les vérifications donnent un résultat positif alors on attribue <Surface> (On fixe l'orientation de la broche par rapport à la surface, ainsi que l'arête coupante)

Fin des Fonctions sémantiques

Fin de la règle de définition

La règle lexicale de la règle de définition (<Surface> → <Une_Surface>) ne vérifie que le type de la surface. Cette vérification ne prend en compte que le type de l'arête coupante, ainsi que les mouvements d'avance et de coupe possibles. Elle ne considère donc que les propriétés du procédé abstrait. La règle de définition d'un procédé abstrait ne contiendra, par conséquent, que la règle lexicale amputée des fonctions sémantiques (*vérification des dimensions, vérification des données technologiques*).

Exemple : Voyons un exemple de règles de définition pour un plan et un cylindre, dans le cas où le procédé considéré est constitué d'une fraiseuse et d'une fraise deux tailles. Tant le plan que le cylindre peuvent être générés dans deux orientations distinctes. Dans un premier cas, il est généré par l'arête A1 lors d'un mouvement quelconque dans le plan XZ. Dans le second cas, le plan est généré par l'arête A2 lors d'un mouvement dans le plan XY. Les règles de définition du Plan et du Cylindre seront comme suit :



Règles de définition d'un plan

R : <Surface> → <Plan₁>

Fonctions sémantiques

Vérification des dimensions

Vérifier que les dimensions du plan sont inférieures à celles des courses de la machine selon les axes X et Y

Vérification des données technologiques

Vérifier que l'état de surface du plan est inférieur à l'état de surface spécifié pour le procédé

Attribution du non-terminal

Orientation 1 (Cf. Figure 43)

Arête coupante = A2

Fin des Fonctions sémantiques

Règle de définition d'un cylindre

R : <Surface> → <Cylindre₁>

Fonctions sémantiques

Vérification des dimensions

Vérifier que (Cylindre.H ≤ Course de la machine suivant OZ) ET

Vérifier que {(Cylindre.R = A1.R) ET (Cylindre.TETA ≤ π)} OU

{(Cylindre.R ≥ A1.R) ET (Cylindre.TETA respecte condition en Annexe 4)}

Vérification des données technologiques

Vérifier que l'état de surface du cylindre est inférieur à l'état de surface spécifié pour le procédé

Attribution du non-terminal

Orientation = Orientation 2 (Cf. Figure 43)

Arête coupante = A2

Fin des Fonctions sémantiques

4.4.2.4.2 Règles d'association

Les règles d'association permettent de déterminer de manière récursive si les associations de surfaces (prises deux à deux) sont usinables par un procédé donné. Les règles permettant cette vérification sont les suivantes :

$R_{ASSOC1} : \langle Association \rangle \rightarrow \langle Surface \rangle \langle Association' \rangle$

$R_{ASSOC2} : \langle Association' \rangle \rightarrow \langle Arête \rangle \langle Association \rangle$

$R_{ASSOC3} : \langle Association' \rangle \rightarrow \emptyset$

Les attributs du non-terminal $\langle Arête \rangle$ correspondent à :

- la nature de l'arête (droite ou courbe),
- l'angle matière entre les deux surfaces que l'arête relie.

Voici une illustration de la forme générale des deux non-terminaux $\langle Association' \rangle$ et $\langle Association \rangle$.

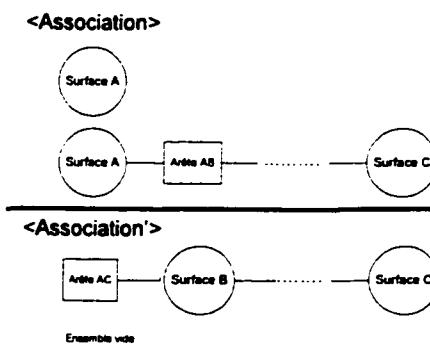


Figure 44 Forme générale des non terminaux

Les attributs courants de $\langle Association \rangle$ correspondront toujours à ceux de la surface figurant à gauche de la chaîne de surfaces composant l'association de surfaces. Les

attributs courants de <Association>, lorsqu'il ne correspond pas au symbole nul, seront les attributs de l'arête ainsi que ceux de la surface attachée à l'arête. Nous noterons cette surface dans l'algorithme qui suit par <Surface>.

L'application des règles de type R_{ASSOC1} est postérieure à l'application des règles de définitions. Ces dernières fixent l'orientation et les arêtes coupantes utilisées pour l'usinage des surfaces analysées. Les règles de type R_{ASSOC1} doivent vérifier par le biais de leurs fonctions sémantiques les propriétés géométriques énoncées dans 4.2.2.2.1. Nous avons vu qu'il existait deux propriétés selon que l'on utilise une ou deux arêtes coupantes. Nous aurons donc deux types de règles R_{ASSOC1} . Elles seront comme suit :

Pseudo-code des fonctions sémantiques des règles R_{ASSOC1} attachées à deux arêtes coupantes (type1) pour une orientation fixée

POUR une orientation fixée

SI les arêtes coupantes sont distinctes **ET** adjacentes **FAIRE** {

 Si l'angle matière du terminal <Arête> est égal à l'angle extérieur à la matière des arêtes coupantes **FAIRE** {

 Succès de la règle d'association

 }

SINON FAIRE{

 Echec de la règle

}FINSI

}FINSI

Fin du Pseudo-code

Pseudo-code des fonctions sémantiques des règles R_{ASSOC1} attachées à une arête coupante (type2) pour une orientation fixée

POUR une orientation fixée

SI l'arête coupante est similaire pour les deux surfaces **FAIRE** {

```

    Calculer le volume élémentaire VE1 attaché à <Surface> au niveau de <Arête>.
    Calculer le volume élémentaire VE2 attaché à <Surface> au niveau de <Arête>.
    SI (VE1 est tangent ou ne coupe pas <Surface>) ET (VE2 est tangent ou ne
    coupe pas <Surface>) FAIRE {
        Succès de la règle d'association
    }
    SINON FAIRE {
        Echec de la règle
    }FINSI
}FINSI
Fin du Pseudo-code

```

Ces règles d'association sont définies pour un procédé *spécialisé* donné. Les fonctions sémantiques des règles d'association des procédés *abstraits* vérifieront uniquement que pour une orientation fixée, deux surfaces adjacentes peuvent être générées par une même arête ou par deux arêtes adjacentes. La vérification de l'angle matière ou de la tangence n'est accomplie que lorsqu'on valide un procédé spécialisé.

Voici un exemple où nous analysons un couple de surfaces planes. L'analyse par le procédé abstrait {Fraiseuse 2 axes ; Outil} trouve que pour l'orientation Orientation1, chacune des deux surfaces peut être générée par l'arête A1. Ceci implique qu'une règle d'association de *type2* est appliquée. L'application de cette règle d'association pour un procédé spécialisé prenant en compte la nature et le diamètre de l'outil invalidera cette solution.

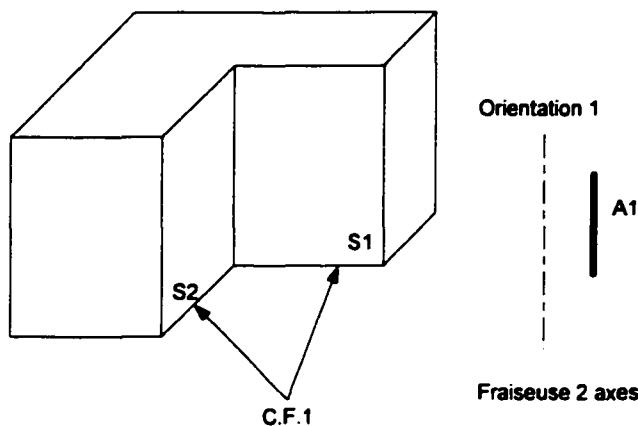


Figure 45 Analyse par un procédé abstrait

Notre définition des règles de définition et d'association pour les procédés abstraits permet de simplifier l'analyse d'usinage. En effet, les procédés d'usinage peuvent exister en nombre très élevé à cause des variations des dimensions des outils, sans oublier les courses qui varient d'une machine à l'autre. L'application des règles de définition et d'association au niveau des procédés abstraits permet de procéder à un premier filtre. Prenons comme exemple la caractéristique de forme ci-dessus, les outils abstraits correspondant aux forets ou aux fraises coniques seront rejettés. Par conséquent aucun procédé incluant un outil dérivant de ces outils abstraits ne sera retenu.

4.4.2.5 Présentation et illustration de la construction d'un arbre syntaxique

L'analyse lexicale s'accompagne par la construction d'un arbre syntaxique. Le calcul ou la vérification des attributs peut se faire à la fin de la construction de cet arbre syntaxique. Ce calcul s'effectue par des parcours (avec des aller-retours dans l'arbre suivant l'ordre nécessaire pour évaluer les attributs). Cette méthode est très coûteuse en mémoire (stockage de l'arbre). Mais l'avantage est que l'on n'est pas dépendant de l'ordre de visite des sommets de l'arbre syntaxique imposé par l'analyse syntaxique. Dans cet exemple S1, S2 et S3 correspondent à des terminaux de type surface. Surface peut être

cylindre, plan, cône sphère ou tore. L'index à la fin de chaque règle indique l'ordre dans lequel les règles sont appliquées.

Tableau II
Analyse syntaxique d'une chaîne de surfaces et d'arêtes

Symbol de départ	Pile	Indicateur
S1 – A12 – S2- A13 – S3		
– A12 – S2 – A23 – S3	S1	Déplacer
– A12 – S2 – A23 – S3	Surface	R _{DEFINITION1}
S2 – A23 – S3	Surface – A12	Déplacer
A23 – S3	Surface – A12 – S2	Déplacer
A23 – S3	Surface – A12 – Surface	R _{DEFINITION2}
S3	Surface – A12 – Surface – A23	Déplacer
	Surface – A12 – Surface – A23 – S3	Déplacer
	Surface – A12 – Surface – A23 – Surface	R _{DEFINITION3}
	Surface – A12 – Surface – A23 – <Association>	R _{ASSOC14}
	Surface – A12 – Surface – <Association>	R _{ASSOC25}
	Surface – A12 – <Association>	R _{ASSOC16}
	Surface <Association>	R _{ASSOC27}
	<Association>	R _{ASSOC18}
	<Objectif>	Réussite

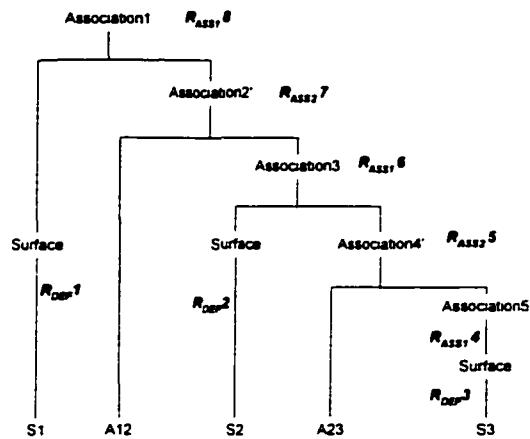


Figure 46 Arbre syntaxique de l'analyse d'une association de surfaces

Le processus proposé pour construire l'arbre syntaxique se base, d'une part, sur le type des surfaces (quelle règle de définition appliquer ?) et d'autre part sur les arêtes utilisées pour générer un couple de surfaces (quelle règle d'association appliquer ?). Rappelons que nous considérons que l'orientation de la broche ne change pas lors de la génération d'un ensemble de surfaces. Donc, la première règle de définition, appliquée lors de l'analyse, constraint l'orientation entre la pièce et la broche. Les autres règles de définition seront appliquées si elles respectent ces contraintes d'orientation. La procédure de construction de l'arbre ne considère que les contraintes fixées par un procédé abstrait. Donc, tous les procédés spécialisés d'un procédé abstrait partageront le même arbre syntaxique. Chaque arbre syntaxique permettra de connaître pour une chaîne de surfaces donnée, le procédé abstrait utilisé ainsi que l'orientation entre la pièce et la broche.

La validation par un procédé spécialisé correspondra à appliquer les fonctions sémantiques de ses règles de définition (*vérification des dimensions, vérification des attributs technologiques*) et d'association (*vérification des propriétés géométriques au niveau des arêtes*). Si les contraintes imposées par ces fonctions peuvent être respectées, alors le procédé spécialisé est candidat pour la génération de la chaîne de surfaces.

Si toutes les chaînes décrivant une C.F. sont usinables par un procédé donné dans une orientation donnée, alors la C.F. sera usinable par ce procédé dans cette orientation.

4.4.3 Conclusion

Nous avons détaillé, dans cette section, l'analyseur syntaxique utilisé pour valider l'usinabilité des données spécifiées par le concepteur. Nous en avons défini et précisé les terminaux, non-terminaux ainsi que les règles de production pour les procédés spécialisés. Nous avons également précisé les règles de production pour les procédés abstraits et montré l'intérêt de procéder tout d'abord à une analyse syntaxique pour des procédés abstraits. Nous allons montrer dans la section qui suit comment nous exploitons l'analyseur syntaxique dans le cadre de l'intégration de l'analyse d'usinage au cours de la conception.

4.5 Exploitation de la grammaire attribuée d'usinage

4.5.1 L'intérêt de l'utilisation de l'arbre syntaxique et des caractéristiques d'usinages abstraites

Nous avons vu qu'il est préférable de générer l'arbre syntaxique des procédés abstraits. Dès la création d'un tel arbre, on peut créer une caractéristique d'usinage abstraite constituée du procédé abstrait, de l'arbre syntaxique, et des données de conception validées (i.e. uniquement les types et orientations des surfaces).

L'arbre syntaxique d'un procédé abstrait est le même pour tous les procédés en dérivant. Donc, la validation de contraintes dimensionnelles ou de spécifications d'état de surface ou de tolérances de forme affine le résultat de l'analyse d'usinage en trouvant un ou plusieurs procédés spécialisés. Pour chaque procédé spécialisé permettant de valider les contraintes spécifiées, on crée une caractéristique d'usinage spécialisée.

Pour faciliter l'analyse d'usinage d'une C.F., nous proposons le stockage de toutes les caractéristiques d'usinage autant abstraites que spécialisées. Ceci signifie que l'on ne rejette pas de caractéristiques d'usinage même si on ne parvient pas à les instancier.

On peut voir l'impact du stockage de ces informations si le concepteur effectue une des actions suivantes :

- modifie les dimensions des surfaces,
- modifie l'angle matière des arêtes d'intersection,
- ajoute ou modifie des attributs technologiques (état de surface, ou tolérance de forme)

Pour prendre en compte ces modifications, deux actions sont accomplies. D'une part, on relance les analyses sémantiques des caractéristiques d'usinage spécialisées existantes. D'autre part, on essaie de spécialiser les caractéristiques d'usinage abstraites stockées en prenant en compte les données nouvellement spécifiées par le concepteur.

Illustrons ceci par un exemple. Considérons l'analyse d'un alésage (trou débouchant) par deux outils : une fraise deux tailles et un foret. Supposons que le diamètre du foret soit plus petit que celui de la fraise deux tailles. Une première étape de l'analyse de l'alésage validera les deux procédés et générera deux caractéristiques d'usinage abstraites. Si, initialement le concepteur spécifie un diamètre de trou égal à celui du foret, alors la fraise deux tailles sera rejetée. Mais sa caractéristique d'usinage abstraite sera retenue. Si le concepteur décide de spécifier un diamètre d'alésage plus grand que le diamètre de la fraise, alors le foret sera rejeté, tandis que la fraise deux tailles sera maintenue.

Dans la section qui suit, nous allons montrer le lien entre les règles des grammaires d'usinage et les analyses d'usinage décrites dans la section 3.3.2.

4.5.2 Correspondance entre les analyses d'usinage et les règles de la grammaire

Nous avons décomposé dans le troisième chapitre les analyses d'usinage en fonction des données du modèle produit disponible. Le but de cette section est de montrer la correspondance entre ces différentes analyses et les règles spécifiées plus haut.

Nous avons vu que les analyses proposées à un concepteur sont les suivantes :

- Analyse d'une surface, notée A1,
- Analyse d'une face, notée A2,
- Analyse d'un ensemble de surfaces, notée A3,
- Analyse d'un ensemble de faces, notée A4,
- Analyse d'état de surface, de tolérance de forme ou de matériau notée A5.

Le tableau qui suit permet de voir les analyses d'usinage, les règles lexicales correspondantes et les fonctions sémantiques qu'il est nécessaire d'appliquer.

Tableau III
Correspondance entre analyses d'usinage et règles de la grammaire

Analyse d'usinage	Règles Lexicales	Fonctions sémantiques
A1	Règle de définition	
A2	Règle de définition	Vérification des dimensions
A3	Règle de définition pour chaque surface	
	Règle d'association	Vérification des propriétés géométriques à l'arête d'intersection
A4	Règle de définition pour chaque face	Vérification des dimensions, Vérification des propriétés géométriques à l'arête d'intersection
	Règle d'association	
A5	Règle de définition	Vérification des données technologiques

4.5.3 Conclusion

Cette section a illustré la contribution de la grammaire d'usinage à l'intégration de la conception et de l'analyse d'usinage.

Nous avons, tout d'abord, montré que l'association de l'arbre syntaxique et de la caractéristique d'usinage permet de faciliter, par le biais du mécanisme de hiérarchisation des caractéristiques d'usinage :

- la validation d'usinage,
- la prise en compte d'ajout ou de modifications des attributs des surfaces ou des spécifications d'état de surface, de tolérance de forme ou de matériau.

Par la suite, nous avons montré les différents besoins d'analyse du concepteur, ainsi que leur correspondance avec les règles de la grammaire d'usinage.

4.6 Conclusion

Nous avons défini, dans la première section, des règles basées sur des opérateurs géométriques pour connaître les surfaces qu'une arête coupante peut générer. Ces règles définissent la nature et les attributs des surfaces en fonction du type et des attributs de l'arête ainsi qu'en fonction des mouvements d'avance et de coupe. Nous avons, par la suite, spécifié des règles et contraintes pour la génération d'associations de surfaces par un outil donné. Ces règles ont été présentées pour les procédés possédant des mouvements de coupe autant circulaire que linéaire. Les contraintes incluaient dans le cas du mouvement de coupe circulaire une procédure basée sur une simulation pour prendre en compte l'accessibilité de l'outil.

Dans la deuxième section, nous avons introduit les grammaires attribuées. Nous avons ensuite vu qu'il faut spécifier une grammaire par procédé. Pour chaque grammaire, il faut développer un analyseur syntaxique LL(1) qui détermine si un ensemble de surfaces peut être généré par le procédé de la grammaire.

Nous avons ensuite vu qu'une grammaire d'usinage pour un procédé d'usinage abstrait prend en compte : les degrés de liberté de la machine ; les arêtes coupantes et les mouvements de l'outil. La grammaire d'usinage d'un procédé spécialisé est similaire à celle de son procédé abstrait. Elle contient, en plus, des règles sémantiques prenant en compte les courses des machines, les dimensions et les angles matière de l'outil et enfin, les précisions atteignables par le procédé.

La validation d'une caractéristique de forme par un procédé d'usinage implique la génération d'un arbre syntaxique. L'arbre syntaxique d'un procédé abstrait est vrai pour tous les procédés spécialisés en dérivant. Nous avons vu que cette propriété couplée aux caractéristiques d'usinage spécialisées et abstraites facilitait l'analyse d'usinage lorsque le concepteur procédait à l'ajout ou à la modification des dimensions des surfaces ou des spécifications d'état de surface, de tolérance de forme ou de matériau. L'analyse d'usinage peut par conséquent aider le concepteur à vérifier l'existence d'alternatives d'usinage et ce, dès qu'il a déterminé les surfaces fonctionnelles.

La dernière section a permis de voir la correspondance entre les analyses d'usinage de différents types de données du modèle produit pouvant être demandées par le concepteur et les règles de la grammaire. Ceci vient confirmer que l'analyse d'usinage permet de valider des données de différents types en cours de conception.

Pour résumer ce chapitre :

- Nous avons montré que la grammaire d'usinage est un outil formel basé sur des règles objectives permettant une analyse d'usinage de pièces entièrement définies ou non.
- Nous avons également montré que l'analyse d'usinage est possible en cours de conception. En effet, la grammaire d'usinage proposée respecte la décomposition de l'analyse d'usinage prescrite dans le troisième chapitre.
- Nous avons enfin montré que le fait d'utiliser des caractéristiques d'usinage hiérarchisées qui contiennent les données du modèle produit, le procédé candidat et l'analyse appliquée facilitait l'analyse d'usinage dans le cadre de la modification ou de l'ajout de dimensions de surfaces ou de spécifications d'attributs technologiques.

Dans le chapitre suivant, nous présentons tout d'abord, les spécifications d'un logiciel d'analyse d'usinage. Nous illustrerons ensuite les différents concepts présentés dans les chapitres 3 et 4.

CHAPITRE 5

SPÉCIFICATION DE MISE EN OEUVRE ET VALIDATION

5.1 Introduction

Le but des travaux présentés dans cette thèse est de contribuer à l'intégration de l'analyse d'usinage au processus de conception. Pour ce faire, nous avons détaillé dans le troisième chapitre les modèles des procédés d'usinage, les données du modèle produit à analyser, ainsi que le modèle des caractéristiques d'usinage. Nous avons par la suite présenté dans le quatrième chapitre une grammaire d'usinage permettant de créer le lien entre les modèles des procédés et le modèle produit. Cette grammaire permet de procéder aux analyses d'usinage nécessaires durant les différents niveaux de conception.

Dans la première section de ce cinquième chapitre, nous présentons les spécifications d'un système d'analyse d'usinage informatique. Nous spécifions, tout d'abord, les structures de données des entités utilisées dans ce système. Par la suite, nous spécifions les modules logiciels permettant de procéder à l'analyse d'usinage.

Dans la dernière section de ce chapitre, nous prendrons l'exemple d'une pièce aéronautique sur laquelle nous illustrons notre démarche de validation d'usinage

5.2 Module d'analyse d'usinage

5.2.1 Introduction

Il a longtemps existé une différence notable entre les stratégies des entreprises développant les outils de CAO (ex : Dassault Systèmes avec CATIA et Parametric

Technology Corporation avec Pro-Engineer) et les entreprises manufacturières. Les premières désiraient développer des outils aussi génériques que possible pour s'adresser au plus large marché d'utilisateurs. Les secondes, pour mener efficacement leur activité spécifique, avaient besoin d'outils (informatiques ou non) spécifiques. Pendant longtemps, ces deux stratégies ont été antagonistes.

Pour permettre aux entreprises manufacturières de développer des modules personnalisés, il existe deux solutions. La première consiste en un partenariat avec les entreprises développant les logiciels qui détachent des équipes au sein de l'entreprise manufacturière ayant besoin de nouvelles fonctionnalités. Cette solution était la seule option disponible pendant longtemps. Elle était et reste coûteuse et, seules de grandes firmes (Bombardier, Boeing, etc.) peuvent se l'offrir.

La seconde alternative consiste à permettre aux entreprises manufacturières d'utiliser directement les fonctionnalités du logiciel. Cette solution n'était pas possible à moins de livrer le code source. Cependant, l'avènement des API et de l'architecture COM a rendu cette solution plus acceptable pour les sociétés de service en développement logiciel et très attractive pour les petites et moyennes entreprises manufacturières. En effet, les API permettent d'accéder aux fonctionnalités des logiciels sans livrer le détail d'implantation. L'architecture COM garantit, quand à elle, une cohérence entre les différentes versions logicielles livrées. De la sorte, les entreprises manufacturières peuvent, aujourd'hui, personnaliser les outils à leurs besoins et les fournisseurs de logiciels sont assurés de toucher un plus grand spectre de clients tout en se garantissant la confidentialité de leur code source.

Notre spécification du prototype se place dans la seconde optique. Nous proposons une architecture basée sur les composants afin de tirer parti des interfaces de programmation des outils de CFAO sans dépendre d'un outil particulier. Le module d'analyse d'usinage, que nous proposons, doit permettre au concepteur d'analyser une conception :

- finalisée (modèle solide où tout est renseigné),
- incomplète (la définition d'une ou plusieurs solutions techniques).

5.2.2 L'approche OO et le langage UML

Nous avons proposé des entités relativement complexes pouvant se décliner à l'infini lorsque l'on change les valeurs de leurs attributs (machines, outils, etc.). En outre, certaines entités sont une agrégation d'autres entités (la CU est l'association entre un procédé, des données du modèle produit et des analyses d'usinage). Par ailleurs, pour supporter l'aspect évolutif de la conception, nous avons besoin d'entités hiérarchisées dont le niveau de détail s'affine au fur et à mesure que le concepteur spécifie les données du modèle produit. Enfin, des mécanismes permettant de propager des modifications entre différentes entités sont également nécessaires. Citons comme exemple les symboles manipulés par les règles (terminaux et non-terminaux) qui dépendent des arêtes coupantes des outils, des machines et de leur précision.

Il existe plusieurs approches pour l'implantation de modèles dans le monde du logiciel [Booch et al. 1999]. Les plus communes sont l'approche algorithmique et l'approche orientée objet (OO). L'approche algorithmique crée des systèmes fragiles, car au fur et à mesure que leur complexité s'accroît et que les exigences évoluent, les systèmes créés deviennent difficiles à maintenir. En outre, l'approche algorithmique permet de représenter des entités complexes, mais la gestion des mécanismes de propagation des modifications est ardue. Enfin, la hiérarchisation n'est pas possible. Nous adoptons l'approche OO car elle répond aux exigences de modélisation des entités nécessaires au module d'analyse d'usinage. Nous pouvons citer comme exemple l'abstraction et la hiérarchie. L'**abstraction** permet aux objets de se définir par ce qu'ils savent d'eux-mêmes et les actions qu'ils accomplissent (leurs opérations ou leurs comportements). La **hiérarchie** représente l'ordre des objets du monde réel. Deux types de hiérarchie existent : la **composition** (est partie de) et l'**héritage** (est du type de).

Pour spécifier les exigences relatives au composant d'usinage, nous nous basons sur le langage formel UML (Unified Modeling Language). Celui ci permet de modéliser les aspects statiques et dynamiques d'un système donné. Il permet également d'en modéliser et d'en étudier les comportements et fonctionnalités. Le langage UML ainsi que l'approche OO sont détaillés dans l'annexe 7.

UML permet, par le biais d'un modèle appelé "cas d'utilisation", de décrire les fonctions d'un système donné. Un cas d'utilisation est une description d'un ensemble d'actions que le système accomplit pour générer un résultat générant une valeur ajoutée à un acteur extérieur au système. Nous étudierons, dans la section suivante, les cas d'utilisation du composant d'analyse d'usinage afin d'en expliciter les fonctionnalités attendues.

5.2.3 Cas d'utilisation du composant d'analyse d'usinage

Nous avons déterminé quatre cas d'utilisation interagissant avec trois acteurs, illustrés dans la Figure 47 et détaillés ci-dessous.

Le cas d'utilisation "*Mettre à jour les bases de données des procédés*" correspond à l'insertion ou à la modification (dans les BD des procédés) des spécifications des outils et des machines par l'acteur "*Expert en Fabrication*". Les règles des grammaires d'usinage attribuées GUA dépendent des «capabilités» de génération de forme des procédés. Par conséquent, la mise à jour des bases de données relatives aux procédés par ajout, retrait ou modification d'outils ou de machines nécessitera de mettre à jour la base de données des règles des grammaires d'usinage.

Le cas d'utilisation "*Mettre à jour la base de données des règles des grammaires d'usinage*" correspond à un module logiciel qui s'exécute dès que les bases de données des procédés sont modifiées et qui opère en deux phases. Dans la première phase, le

module analyse le type des arêtes coupantes et leurs mouvements possibles d'avance. Il propose, ensuite, les surfaces que le procédé est capable de générer. L'expert en fabrication peut alors rejeter les propositions inappropriées en se basant sur son savoir-faire. Dans la deuxième phase automatisée, le module génère, à partir des surfaces retenues, les règles de définition et d'association des grammaires. Enfin, il ajoute ou met à jour ces règles dans la base de données des règles des grammaires d'usinage.

Une fois les bases de données des règles des grammaires d'usinage créées, il devient possible d'utiliser le module d'analyse d'usinage (Cas d'utilisation "Analyse d'usinage"). Ce module permet au concepteur d'accomplir une analyse d'usinage locale ou globale. L'analyse locale utilise les règles des grammaires d'usinage et vérifie localement l'usinabilité des données spécifiées par le concepteur. Si la proposition de conception est usinable, le résultat de l'analyse d'usinage associe à chaque C.F. un ensemble de procédés candidats. Suite à une analyse locale menée à bien, le concepteur peut exiger une analyse globale d'une proposition de conception (même incomplète). Cette analyse vérifie que les procédés retenus n'interfèrent pas avec les surfaces spécifiées et exploite les informations géométriques et technologiques pour générer un ensemble d'alternatives d'usinage.

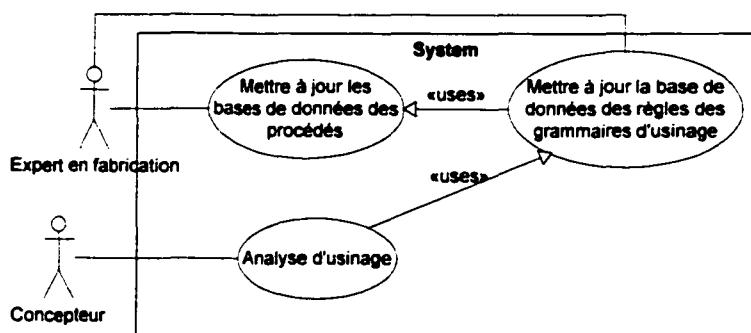


Figure 47 Cas d'utilisation du composant d'analyse d'usinage

5.2.4 L'architecture du module d'analyse d'usinage

Les cas d'utilisation précédents avaient pour but de nous aider à déterminer les différents modules et bases de données nécessaires à la création du module d'analyse d'usinage.

Les bases de données nécessaires contiennent les entités suivantes :

- les machines,
- les outils,
- les procédés,
- les règles de la grammaire d'usinage,
- les caractéristiques d'usinage.

Pour relier ces bases de données, les modules suivants sont nécessaires :

- Traduction des données du modèle produit en graphes conceptuels,
- Extraction de caractéristiques de forme,
- Génération des règles des grammaires d'usinage,
- Analyse syntaxique et sémantique pour effectuer une analyse d'usinage locale,
- Analyse globale et structuration de ses résultats.

Le schéma suivant représente les interactions entre les modules et bases de données composant le module d'analyse d'usinage. Les flèches permettent de voir les flux de données entre les constituants.

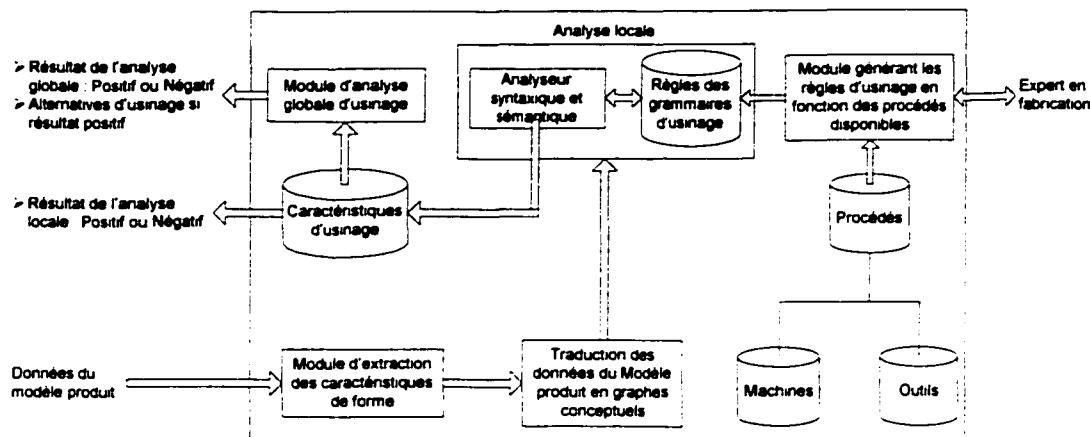


Figure 48 Architecture globale du composant d'analyse d'usinage

Le module d'analyse d'usinage doit être développé en tant que composant séparé et indépendant de tout outil de conception. Conséquemment, il nécessite le développement d'un module permettant de traduire les données internes des logiciels de CAO en données exploitables par le module d'analyse d'usinage. Ce "traducteur" se charge de transformer les données des modèles géométrique et topologique, ainsi que les données technologiques en format neutre (exemple STEP). La plupart des applications permettent d'ores et déjà de sauvegarder leurs modèles en tant que fichiers STEP. Cette norme est actuellement en mesure de transférer les données géométriques et technologiques.

La Figure 49 montre comment le composant d'analyse d'usinage peut interagir avec les applications de CAO. Elle contient des interfaces (ensemble de services devant être rendus par une classe ou par un composant) ainsi que des composants (sous-ensemble physique et remplaçable d'un système qui permet la réalisation d'un ensemble d'interfaces).

Le module "conversion des données du modèle produit en format neutre" récupère les données du modèle produit des applications CAO et les convertit en format neutre. Ces données converties sont à la disposition du composant de validation d'usinage par le

biais de l'interface "Format Neutre". Les applications de CAO peuvent utiliser le module de validation d'usinage en faisant appel à ses deux interfaces ("Analyse d'usinage locale" ou "Analyse d'usinage globale").

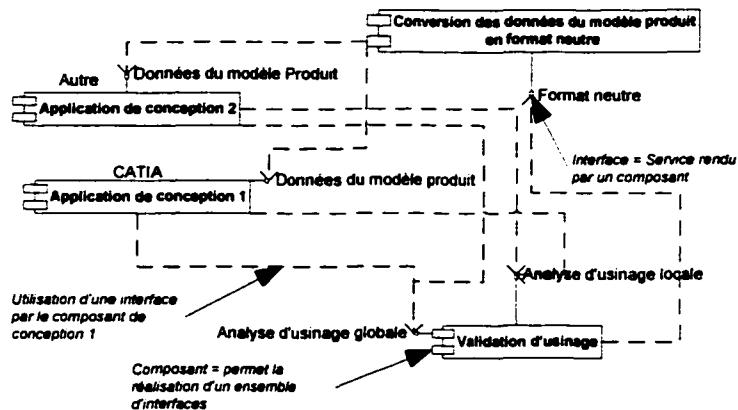


Figure 49 Connexion du module d'usinage aux applications de CAO

5.2.5 Spécification du composant d'analyse d'usinage

Nous allons spécifier les structures de données des éléments nécessaires au module d'analyse d'usinage et présenterons ensuite les modules nécessaires à son fonctionnement.

5.2.5.1 Les structures de données

5.2.5.1.1 La structure des procédés et de leurs composants

Un procédé est caractérisé par un outil et par une machine. Nous allons présenter la représentation UML de ceux-ci avant de modéliser les procédés d'usinage.

Un outil est caractérisé par :

- un repère plan,
- un contour plan représentant ses arêtes coupantes.

Il possède également un matériau. La Figure 50 montre qu'un outil est composé (agrégation) d'une ou plusieurs (*1..n*) arêtes coupantes ainsi que d'un repère outil. Les arêtes, structurées en une liste, possèdent des attributs intrinsèques et peuvent être (héritage) des droites ou des courbes. Deux associations relient l'arête à la classe "repère_outil" indiquant que le calcul de certains de ses attributs (ici *P_début* et *P_fin*) dépendent du repère de l'outil. Enfin, étant donné que les angles extérieurs à la matière sont extrinsèques aux arêtes, nous les stockons au niveau de l'outil. Nous pouvons également voir que le repère outil est composé (agrégation) de deux axes U et V. Ces deux axes dépendent du repère de la broche (flèche avec des traits pointillés).

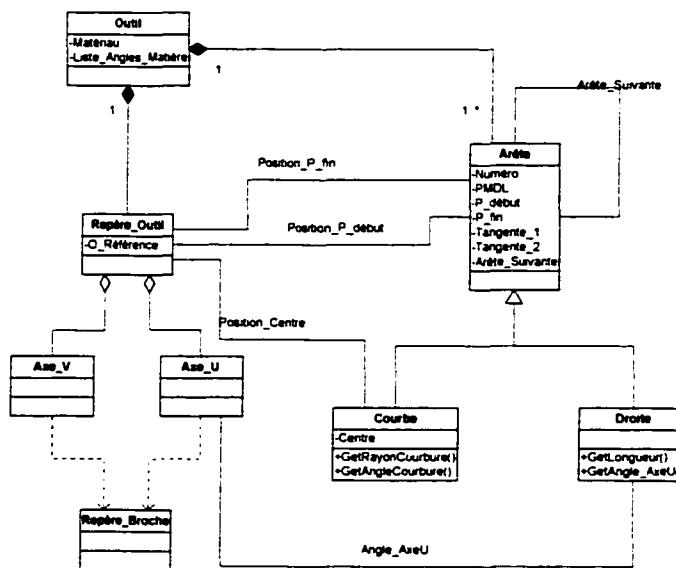


Figure 50 Représentation UML d'un outil

Une machine est caractérisée par :

- un repère lié à la broche,
- ses pseudo matrices,

- son mouvement de coupe,
- et enfin ses courses le long des axes.

Par conséquent, la structure des machines sera comme suit

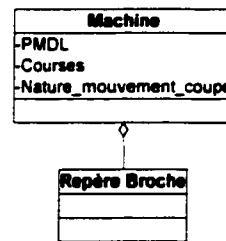


Figure 51 Représentation UML d'une machine

Dans la Figure 52, un procédé correspond à l'association entre une machine et outil. Nous considérons que les précisions à respecter sont associées au procédé et peuvent être recueillies dans une BD regroupant les résultats d'expérimentations et des livres de référence. Chaque procédé peut être abstrait, i.e. des attributs de la machine ou de l'outil n'ont pas encore été définis suite à l'analyse d'usinage. Il peut également être spécialisé, i.e. tous les paramètres de la machine et de l'outil ont été spécifiés suite à l'analyse d'usinage.

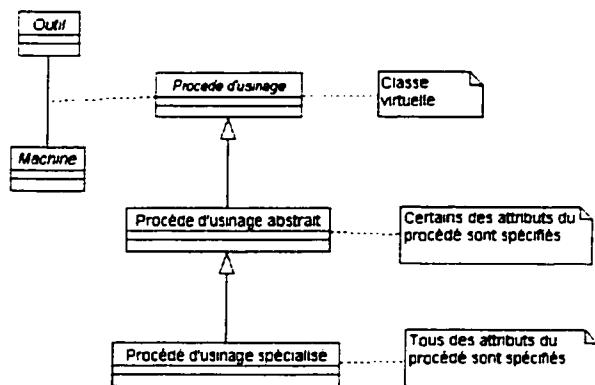


Figure 52 Représentation UML d'un procédé d'usinage

5.2.5.1.2 La structure des règles des grammaires d'usinage

Les règles des grammaires d'usinage sont des règles *de définition ou d'association*. Elles se composent (agrégation) de ce qui suit :

- des termes à droite pouvant être des terminaux et/ou des non terminaux,
- d'un terme à gauche pouvant être uniquement un non-terminal.

Les règles de définition permettent de connaître les surfaces simples pouvant être générées par les arêtes coupantes de l'outil. Il existera une règle de définition pour chaque surface qu'une arête coupante peut générer. Les fonctions sémantiques de cette règle fixent les contraintes dimensionnelles de la surface, les précisions atteignables par le procédé ainsi que l'orientation entre la boîte et la surface. La forme générale des règles de définition est comme suit :

$$R_i : \langle \text{Surface} \rangle \rightarrow \langle \text{Terminal_Surface}_i \rangle$$

Les terminaux peuvent être (spécialisation) une des cinq surfaces suivantes : Plan, Cylindre, Cône, Tore et Sphère.

Il existe trois types de *règles d'association*.

$$R_{ASSOC1} : \langle \text{Association} \rangle \rightarrow \langle \text{Surface} \rangle \langle \text{Association}' \rangle$$

$$R_{ASSOC2} : \langle \text{Association}' \rangle \rightarrow \langle \text{Arête} \rangle \langle \text{Association} \rangle$$

$$R_{ASSOC3} : \langle \text{Association}' \rangle \rightarrow \emptyset$$

Les règles d'association (R_{ASSOC1}) vérifient par le biais de leurs fonctions sémantiques si deux surfaces adjacentes peuvent être générées par :

- *une arête coupante* (cas 1 dans la Figure 53) ou,
- *deux arêtes coupantes adjacentes* (cas 2 dans la Figure 53).

Les règles d'association (R_{ASSOC2}) permettent la propagation des attributs des surfaces et des arêtes pour un traitement local par les règles d'association (R_{ASSOC1}).

Les non-terminaux correspondent à : `<Surface>`, `<Association>`, `<Association>`, `<Arête>`, ϕ . Le premier non-terminal contient le type de surfaces usinée, les informations géométriques et technologiques de la surface, l'arête coupante, ainsi que l'orientation relative entre la surface et la broche de la machine. Le deuxième non-terminal contient les attributs des non-terminaux `<Arête>` et `<Association>`. Ce dernier non-terminal contient les attributs d'un non terminal `<Surface>` si la règle (R_{ASSOC1}) est appliquée avec succès. Le diagramme suivant illustre cette situation.

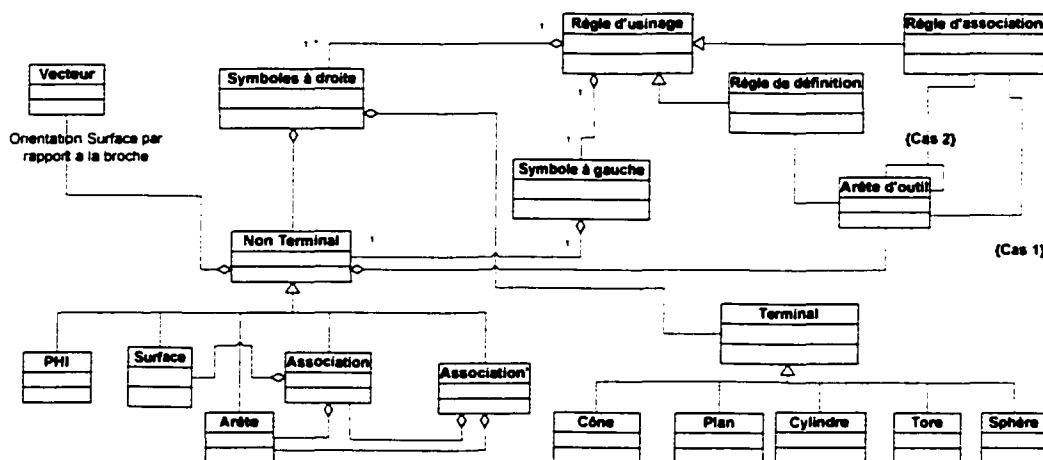


Figure 53 Diagramme objet des règles d'usinage

5.2.5.1.3 La structure des caractéristiques d'usinage

Les caractéristiques d'usinage correspondent à l'association entre :

- les données du modèle produit que le concepteur désire valider,
 - un des procédés utilisés afin de valider les données du modèle produit, ainsi que l'orientation relative entre la broche et la caractéristique de forme,

- les analyses d'usinage créant la correspondance entre les données du modèle produit et le procédé retenu.

Une caractéristique d'usinage correspond, donc, à une association n-aire entre trois types de données comme illustré dans la Figure 54. Une caractéristique d'usinage peut être abstraite. Enfin, de toute caractéristique abstraite peuvent dériver plusieurs caractéristiques spécialisées.

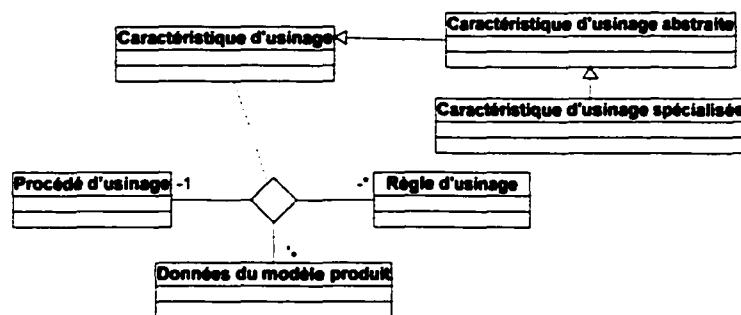


Figure 54 Représentation UML d'une caractéristique d'usinage

5.2.5.2 Les modules de traitement

5.2.5.2.1 Extraction de caractéristiques de forme (C.F.)

Ce module extrait les C.F. en se basant sur le principe de l'angle matière. Nous avons vu que deux types d'analyses d'usinage sont possibles : locale ou globale.

Pour une analyse locale, certaines des données du produit peuvent ne pas être spécifiées. Par conséquent, le processus d'extraction doit être initié par le concepteur. Celui-ci sélectionne la ou les surfaces fonctionnelles qu'il désire valider. Le module extrait, ensuite, la ou les C.F. incluant les surfaces à analyser.

Si le concepteur exige une analyse globale, il peut, comme lors d'une analyse locale, sélectionner les surfaces fonctionnelles à valider. Alternativement, il est possible que le module parcoure le modèle produit et extraie uniquement les surfaces contraintes par des attributs technologiques. Ceci évite d'extraire des surfaces brutes qui ne seront pas usinées. Par la suite, les C.F. extraites sont transformées en graphes conceptuels et analysées par la GUA.

5.2.5.2.2 Génération des graphes conceptuels des données du modèle produit

Les données du modèle produit sont fournies au système sous format neutre. Elles sont ensuite traduites sous forme de graphes conceptuels analysés par la GUA. Ces données sont de natures différentes (géométrie, et attributs technologiques) et doivent être validées par le biais de la GUA. Le modèle objet du graphe conceptuel représentant les données du modèle produit est le suivant.

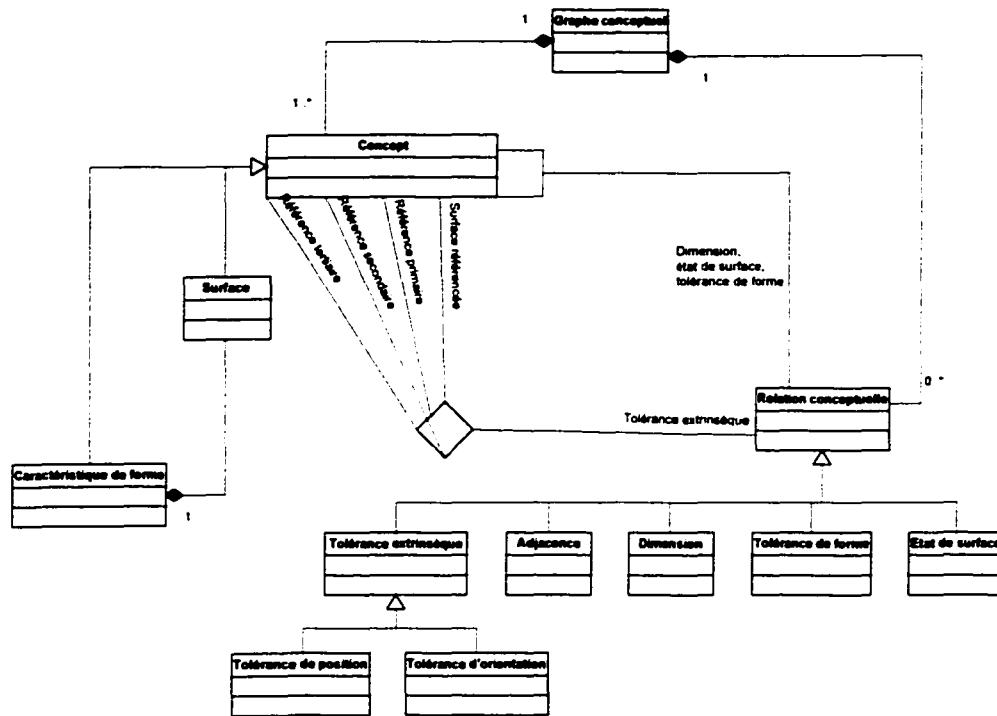


Figure 55 Diagramme objet des données du modèle produit

La classe dimension, qui correspond aux dimensions d'une surface, contient la tolérance qui lui correspond. La définition des graphes conceptuels implique que chaque relation conceptuelle lie deux concepts. Donc, si une relation conceptuelle est liée à un seul concept, alors elle lui est liée deux fois. Cette notion est illustrée dans Figure 56 où la relation conceptuelle est l'état de surface et où la surface est notée A.

Pour générer le graphe conceptuel relatif à l'ensemble des surfaces devant être analysées le module procède en plusieurs étapes présentées ci-dessous. Toutes les surfaces seront initialement considérées comme non traitées et auront un attribut pour indiquer qu'elles ont été traitées ou non.

Pour toute surface non traitée, le module crée un concept "*surface*" (ce concept pouvant être plan, cylindre, etc.) et marquera cette surface comme traitée. Si cette surface possède un état de surface et/ou une tolérance de forme, le module crée également une relation conceptuelle "*état de surface*" et/ou "*tolérance de forme*" qu'il reliera doublement au concept "*surface*" (chaque relation conceptuelle doit relier au moins deux concepts). Pour la surface courante, le module recherche l'ensemble des surfaces adjacentes. Pour toute surface appartenant à cet ensemble et non traitée, il crée un concept "*surface*" avec l'attribut "non traité" ainsi qu'une relation conceptuelle "*adjacence*" la liant à la surface en cours de traitement. Une fois que toutes les adjacences sont traitées, le module vérifie si la surface considérée possède une tolérance de position ou d'orientation. Dans l'affirmative, il crée une relation conceptuelle relative à la tolérance, la surface en cours sera liée à cette tolérance par un lien indiquant qu'elle est la surface référencée. Le module vérifie ensuite que les références de la tolérance appartiennent au graphe, sinon, il crée les concepts correspondant avant de lier ces concepts à la relation conceptuelle tolérance. Lorsque tous les attributs technologiques de la surface en cours de traitement sont ajoutés, le module passe à une autre surface non traitée. Un exemple est donné à la Figure 56.

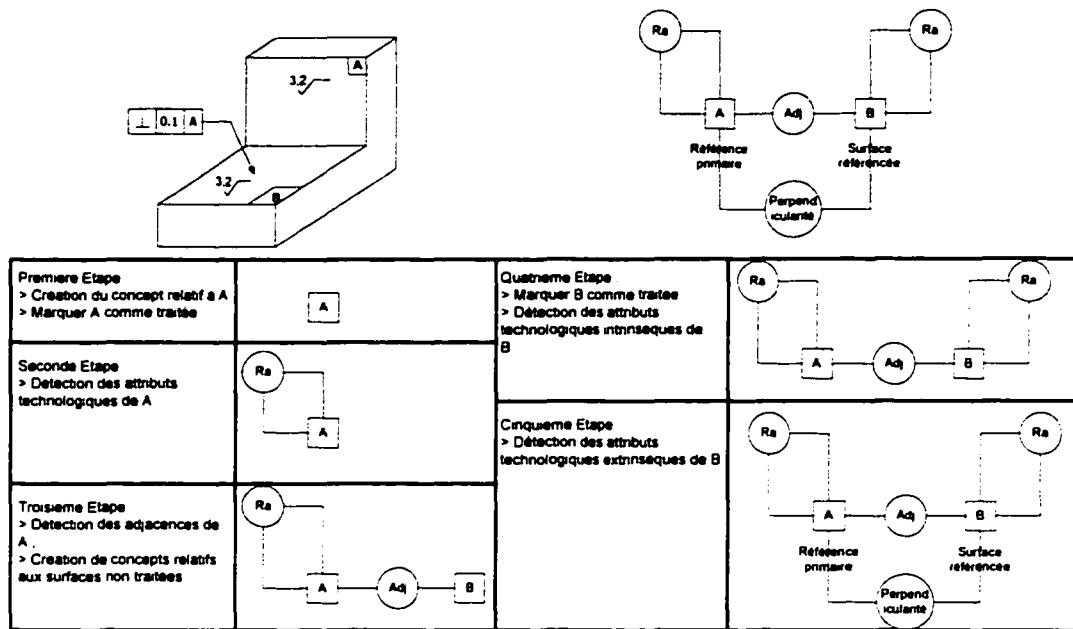


Figure 56 Crédit de graphe conceptuel

5.2.5.2.3 Générateur des règles des grammaires d'usinage attribuées

Nous avons vu, dans la section 5.2.3, que la génération des règles des grammaires d'usinage s'effectue en deux étapes. Dans la première phase le module interagit avec un préparateur à la fabrication, tandis que la seconde est automatisée.

Durant *la première phase*, le préparateur à la fabrication précise le contour des arêtes coupantes des nouveaux outils. Il associe ensuite aux arêtes coupantes les mouvements d'avance permettant de générer des surfaces.

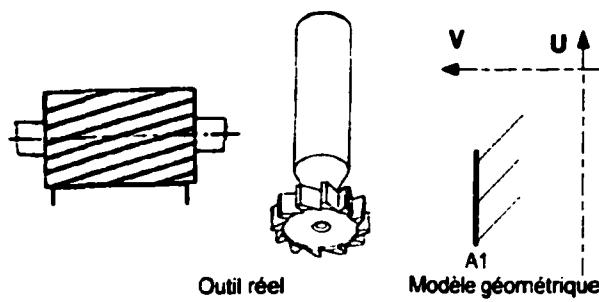


Figure 57 Contour spécifié par l'expert en fabrication

A partir de la nature des arêtes coupantes et des mouvements d'avance, le module suggère alors, en se basant sur l'annexe 4, l'ensemble des surfaces que les arêtes coupantes peuvent générer. Il revient au préparateur à la fabrication de décider (en fonction de son savoir-faire et du type d'outil) quelles surfaces les arêtes peuvent effectivement générer. Nous pouvons voir dans la Figure 58 que les deux outils spécifiés dans la Figure 57, quoique possédant le même modèle géométrique, génèrent des ensembles de surfaces distincts.

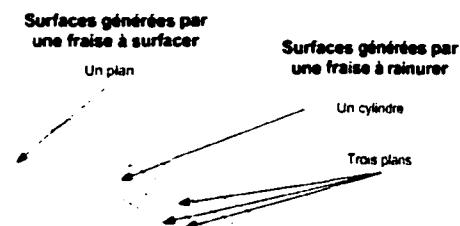


Figure 58 Surfaces générées par les deux outils de la Figure 57

Durant la *seconde phase*, le module génère et stocke automatiquement les règles de la grammaire d'usinage d'un procédé. Nous allons présenter dans ce qui suit les conditions régissant la création des règles de la grammaire d'usinage.

Pour chaque surface qu'une arête peut générer dans un mouvement d'avance donné, le module crée une règle de définition.

Le module de génération de règles d'usinage créera une règle d'association R_{ASSOC1} dans chacun des cas suivants :

- Cas 1 : une arête coupante génère plusieurs surfaces.
- Cas 2 : deux arêtes coupantes adjacentes génèrent des surfaces durant des mouvements d'avance communs aux deux arêtes.

Si pour un procédé donné, une ou plusieurs règles R_{ASSOC1} sont créées alors le module crée une règle d'association R_{ASSOC2} et une règle R_{ASSOC3} . Ces deux règles permettent d'éviter la spécification d'une grammaire LL(1) non normalisée.

5.2.5.2.4 Validation locale par un analyseur syntaxique et sémantique

Un analyseur syntaxique est un programme élaboré en fonction d'une grammaire et a pour fonction l'analyse syntaxique et sémantique d'un intrant de type déterminé. L'intrant, dans le cas de notre prototype, consiste en une chaîne de concepts et de relations conceptuelles. Nous avons vu au quatrième chapitre que chaque procédé d'usinage spécifie un langage distinct (potentiel de génération de formes usinables). Pour valider le graphe conceptuel du produit, l'analyseur étudie le langage de chacun des procédés existant dans la BD des procédés d'usinage. Si pour un procédé donné et pour une orientation déterminée de la broche par rapport à la pièce, toutes les chaînes décrivant une caractéristique de forme sont valides, alors une caractéristique d'usinage est créée.

5.2.5.2.5 Validation globale d'usinage

Ce module part du résultat de l'analyse locale à savoir :

- la caractéristique de forme devant être usinée,
- le procédé d'usinage utilisé et enfin,
- l'orientation relative entre la broche et la pièce.

Il effectue ensuite une simulation, basée sur un modeleur solide, où il vérifie que les procédés choisis n'interfèrent pas avec les surfaces spécifiées par le concepteur. Cette analyse peut être effectuée même si les surfaces fonctionnelles ou complémentaires n'ont pas été totalement déterminées.

Ce module organise ensuite les résultats des analyses locales en alternatives d'usinage. Ces alternatives sont représentées par un graphe conceptuel dont les concepts et les relations conceptuelles sont spécifiés dans la Figure 59.

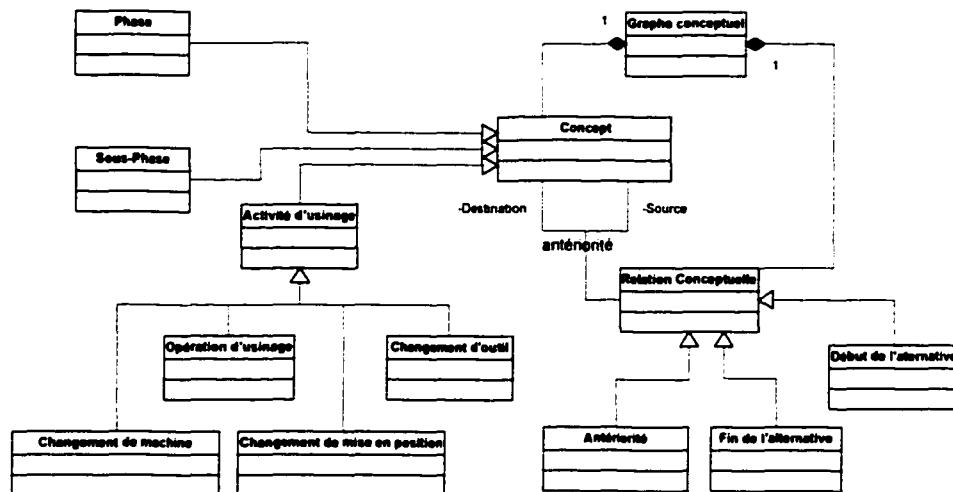


Figure 59 Diagramme objet du graphe des contraintes d'antériorité

Le module génère, tout d'abord, le graphe ordonné en se basant sur les attributs technologiques des faces. Par la suite, il remplace toute C.F. par autant d'opérations qu'elle possède de caractéristiques d'usinage (procédé + orientation). Il utilise, enfin, la démarche décrite dans le chapitre 3 pour créer les alternatives d'usinage.

5.2.6 Conclusion

Nous avons spécifié les structures de données ainsi que les modules pour créer un outil accomplissant des analyses d'usinage en cours de conception.

Les structures présentées correspondent aux procédés et leurs composants, les règles des grammaires d'usinage et enfin les caractéristiques d'usinage.

Nous avons également présenté les modules d'extraction des C.F. et de traduction de ces dernières en graphes conceptuels. Nous avons ensuite décrit le module de génération des règles des grammaires d'usinage. Ce module permet de distinguer notre approche des approches grammaticales traditionnelles. En effet, l'administrateur des BD n'est plus obligé de créer et d'insérer les règles d'association ou de définition pour les procédés. Nous proposons une démarche où un expert à la fabrication peut spécifier le contour géométrique ainsi que les mouvements d'avance des arêtes coupantes. Le module se base sur ces données et sur l'annexe 4 afin de suggérer les surfaces que le procédé peut générer. L'expert en fabrication décide par la suite si les surfaces proposées sont pertinentes. La dernière étape de création et d'insertion des règles dans la BD est entièrement automatisée.

Ces règles constituent l'essence de l'analyseur syntaxique et sémantique utilisé pour une validation locale. Les résultats de cette analyse peuvent ensuite être utilisés pour une analyse globale dont le résultat est un ensemble d'alternatives d'usinage représentées par des graphes conceptuels.

Nous allons montrer dans ce qui suit une illustration des concepts introduits dans les chapitres 3 et 4.

5.3 Analyse d'une pièce mécanique

5.3.1 Introduction

Afin d'illustrer les concepts présentés dans nos travaux, nous traiterons une pièce utilisée dans l'industrie aéronautique. La pièce est nommée "*House Bearings Support*" et sert à positionner des roulements à billes. Le plan de définition de cette pièce ainsi que le schéma incluant les numéros assignés aux surfaces sont inclus dans les figures suivantes.

Dans la section qui suit, nous illustrons les étapes permettant de définir un procédé d'usinage grâce à une fraiseuse 3 axes et à une fraise 2 tailles Torique. Différentes analyses d'usinage sont ensuite présentées illustrant l'utilisation des concepts présentés dans les chapitres précédents. Les surfaces pouvant être générées par le procédé présenté ainsi que les règles de la grammaire d'usinage seront présentées en annexe 8.

5.3.2 Construction d'un procédé d'usinage

Cette construction est accomplie en plusieurs étapes. La première étape consiste à définir les constituants du procédé d'usinage. D'une part, il faut spécifier la nature des arêtes coupantes et leurs mouvements d'avances pour en déduire les surfaces générées. D'autre part, il faut spécifier les degrés de liberté de la machine. La combinaison des mouvements d'avance de l'outil et de la machine permettra de connaître les surfaces pouvant être générées par le procédé d'usinage.

5.3.2.1 Modélisation d'une fraise torique

Pour illustrer les concepts présentés dans les troisième et quatrième chapitre, nous étudierons une fraise torique. Nous présenterons, tout d'abord, son modèle géométrique, nous présenterons, ensuite, comment le module peut supporter l'expert en fabrication dans la détermination des mouvements de l'outil. Lorsque l'expert en fabrication aura déterminé les mouvements de l'outil, nous montrerons la génération des arêtes.

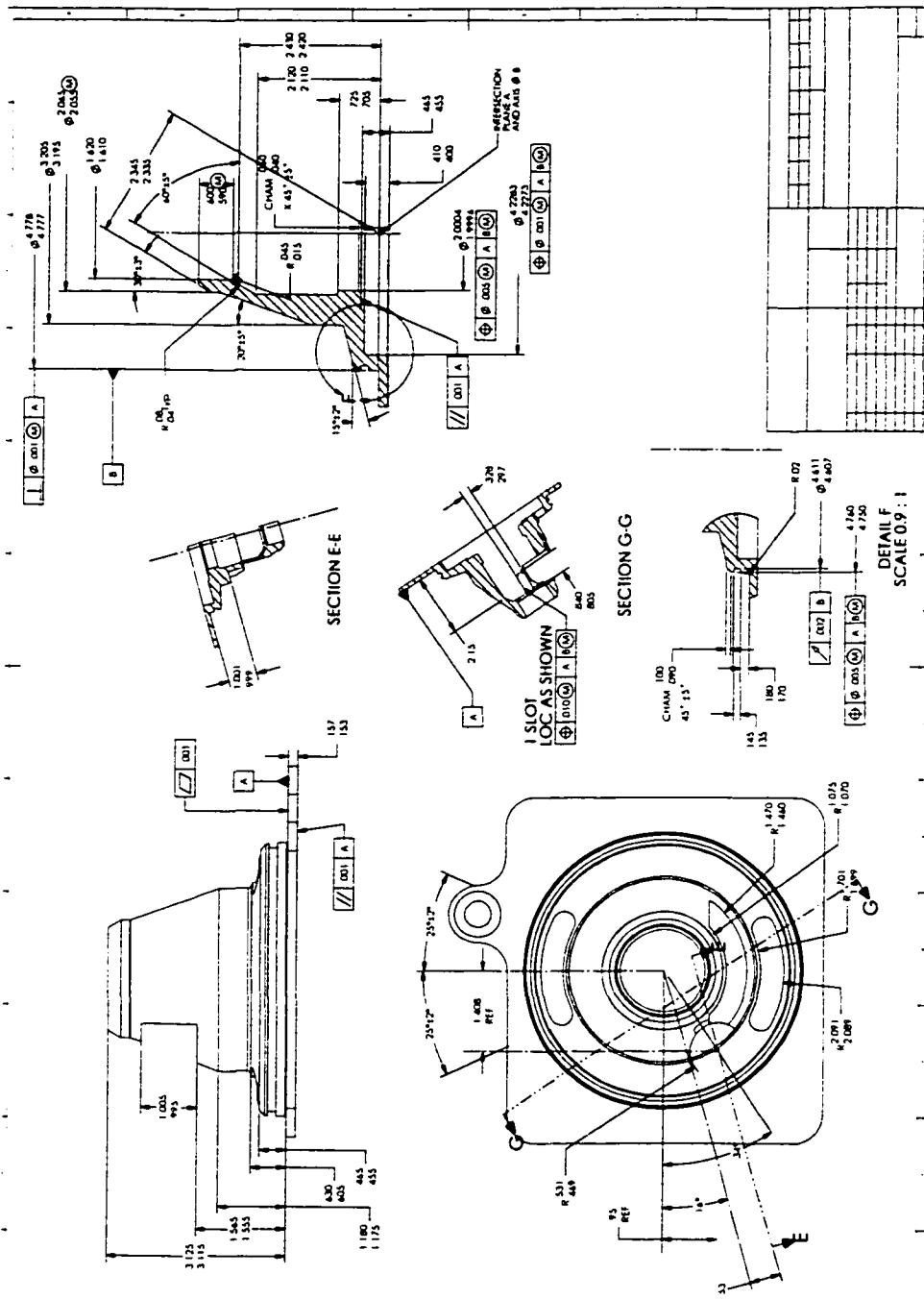
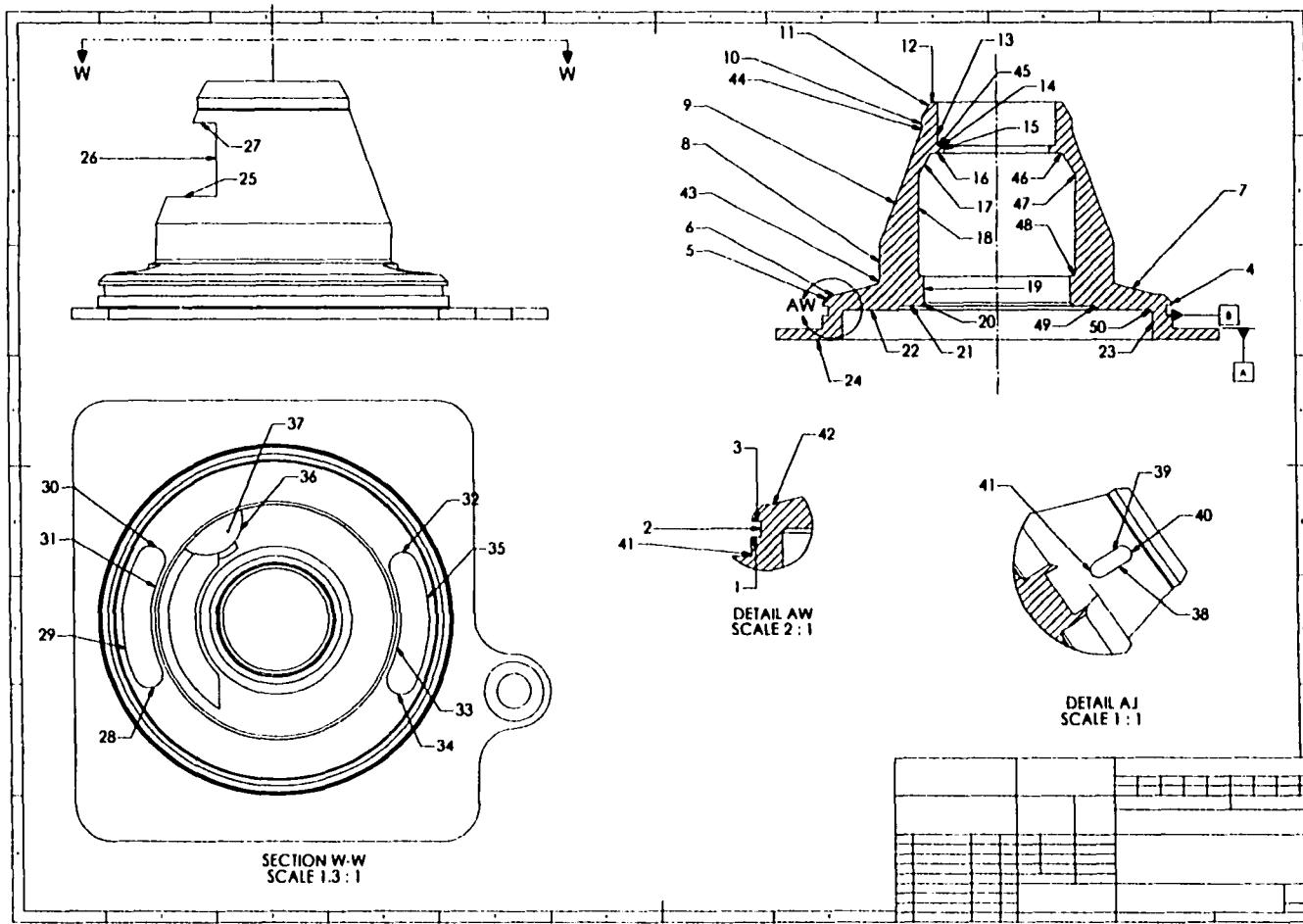


Figure 60 Dessin coté de la pièce exemple

Figure 61 Indication des surfaces sur la pièce exemple



5.3.2.1.1 Détermination du modèle géométrique

La première étape pour l'expert de fabrication consiste à déterminer le contour coupant de chaque outil. Voici une fraise deux tailles torique telle que décrite dans un catalogue ISCAR et à ses côtés la modélisation géométrique que nous en proposons.

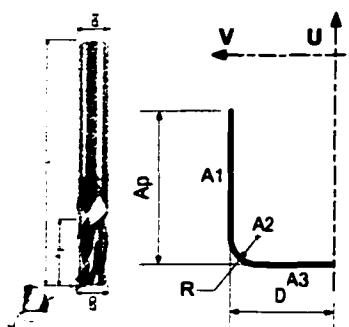


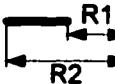
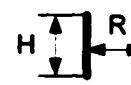
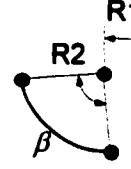
Figure 62 Modélisation géométrique d'une fraise torique

5.3.2.1.2 Détermination des mouvements des arêtes coupantes

Une fois le modèle géométrique de l'outil déterminé, il s'agit de spécifier les mouvements d'avance de chaque arête. L'expert de fabrication n'est pas livré à lui même. En effet, nous avons prédéfini les types des arêtes et pour chaque type les mouvements d'avance possibles.

L'arête A1 est une arête de type 3, l'arête A2 est une arête de type 4 tandis que l'arête A3 est une arête de type 2. Nous allons voir, dans ce qui suit, les mouvements proposés par le module pour chacune des arêtes. Nous verrons ensuite les choix de l'expert.

Tableau IV
Les types des arêtes droites considérées dans cet exemple

Géométrie des arêtes	Type des arêtes
	Type2
	Type3
	Type4

En ce qui concerne l'arête A1, le module propose à l'expert (Cf. Figure 63) un mouvement quelconque selon le plan XY modélisé par la pseudo matrice suivante. Rappelons que la représentation que nous proposons est contenue dans un plan radial

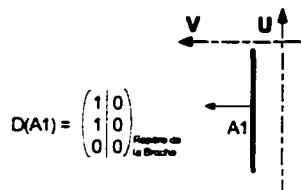


Figure 63 Mouvements proposés et retenus pour l'arête A1

L'arête A2 correspond à un arc de cercle qui exprime le bout torique de la fraise. Par défaut, le module propose les mouvements suivants (Figure 64) :

- Mouvement plan selon XY
- Mouvement de translation dans le sens négatif de l'axe Z
- Combinaison des deux mouvements ci-dessus.

Nous supposerons que pour cette fraise deux tailles, les mouvements possibles seront les mouvements dans le plan XY.

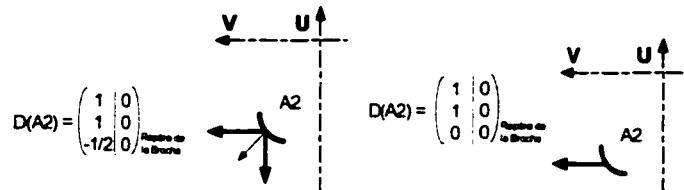


Figure 64 Mouvements proposés par le module et retenus par l'expert pour l'arête A2

Pour la troisième et dernière arête A3, le module propose deux mouvements distincts (Figure 65), une translation selon le sens négatif de l'axe OZ et un mouvement quelconque selon le plan XY. L'expert ne retient dans ce cas de figure que le mouvement selon le plan XY.

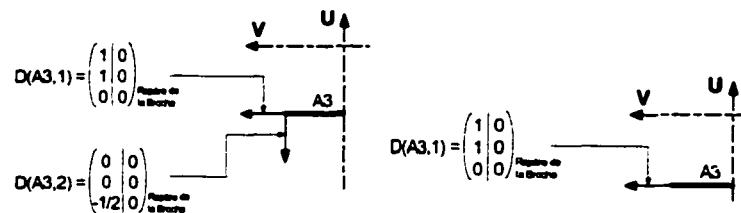


Figure 65 Mouvements proposés par le module et retenus par l'expert pour l'arête A3

Nous pouvons remarquer que toutes les arêtes partagent une même pseudo matrice qu'on peut écrire comme suit :

$$D(O) = \left(\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right) \text{Repère de la Broche}$$

Enrichi par les informations qui viennent d'être saisies (nature dimensions et mouvements des arêtes), le module peut maintenant suggérer des surfaces candidates que l'outil peut créer. Nous présentons dans la prochaine section les surfaces générées par l'arête A1. Nous détaillons cependant toutes les surfaces générées par l'outil dans l'annexe 8.

5.3.2.1.3 Détermination des surfaces générées par les arêtes coupantes de l'outil

L'arête A1 peut être animée de mouvements de translation et de rotation dans le plan XY. Les surfaces générées par l'application de ces mouvements sont les suivantes.

Le mouvement de translation, de A1, dans le plan XY génère

1. un plan respectant les contraintes suivantes :

- la normale est perpendiculaire à l'axe de la broche,
- tangent à la surface élémentaire,

2. un cylindre concave respectant les contraintes suivantes :

- axe parallèle à l'axe de la broche,
- $R_{Cylindre} = R$
- L'angle $\theta_{Cylindre}$ doit respecter la contrainte d'accessibilité de l'outil suivante : $\theta_{Cylindre} \leq \pi$

Le Mouvement de rotation, de A1, dans le plan XY génère :

3. un Cylindre concave respectant les contraintes suivantes :

- Axe parallèle à l'axe de la broche,
- $R_{Cylindre} \geq R$

4. Un Cylindre convexe :

- Axe parallèle à l'axe de la broche,

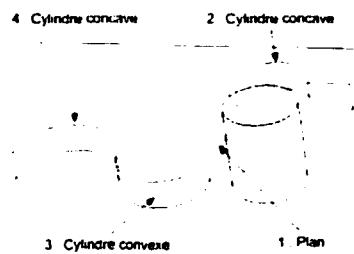


Figure 66 Surfaces générées par l'arête A1

5.3.2.2 Modélisation d'une fraiseuse 3 axes

Nous prendrons comme exemple de modélisation de machines, une fraiseuse 3 axes, dont voici une illustration :

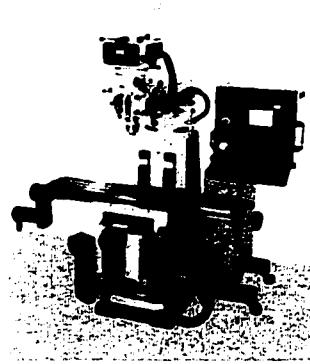


Figure 67 Fraiseuse avec 3 degrés de translation

Cette machine permet des translations simultanées selon les trois axes X, Y et Z. Ses mouvements sont décrits par la pseudo matrice suivante :

$$D_C = \left(\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{array} \right) \text{Repère de la Broche}$$

Dans la section qui suit, nous présentons le procédé composé de l'association entre la fraiseuse 3 axes et la fraise 2 tailles torique présentés ci-dessus. Nous y illustrerons l'opérateur ET d'usinage pour trouver les degrés de liberté de l'outil permis par la machine et par conséquent, les surfaces pouvant être générées par le procédé.

5.3.2.3 Procédé {Fraiseuse 3 axes ; Fraise 2 tailles torique}

Les surfaces générées par l'outil monté sur la fraiseuse correspondent à un sous-ensemble des surfaces présentées dans la section 5.3.2.1.3. Pour déterminer ce sous-ensemble, nous utilisons l'opérateur vu dans la section 3.2.5 et trouvons les mouvements d'avance de l'outil que la machine ne bloque pas. Nous obtenons ce qui suit :

$$D(O)_{\text{Procédé}} = D_M \circ D(O) = \left(\begin{array}{c|c} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{array} \middle| \begin{array}{c} 0 \circ 0 \\ 0 \circ 0 \\ 0 \circ 0 \end{array} \right) \text{Repère de la Broche} = \left(\begin{array}{c|c} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right) \text{Repère de la Broche}$$

Nous pouvons remarquer que, dans ce cas particulier, la machine ne bloque aucun degré de liberté de l'outil. Donc l'ensemble de surfaces générées par le procédé est similaire à l'ensemble généré par l'outil. Les règles de la grammaire d'usinage associée à ce procédé sont présentées dans l'annexe 8.

5.3.3 Validations d'usinage

Nous avions vu que les analyses d'usinage requises par le concepteur dépendent des types de données qu'il définit. Dans cette section, nous proposons différents exemples de

validation d'usinage. Nous illustrons également comment ces validations peuvent guider certains choix du concepteur.

5.3.3.1 Validation d'une surface

Dans les trois sections qui suivent, nous étudierons la caractéristique formée des surfaces A-41-B.

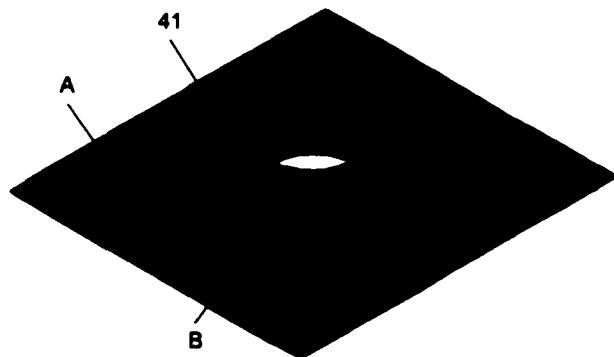


Figure 68 Caractéristique de forme analysée

Rappelons que *l'analyse d'une surface* vérifie uniquement le type de la surface. Ceci implique que l'analyseur n'applique pas les fonctions de vérification dimensionnelle ou technologique.

Supposons que le concepteur veuille vérifier le congé de raccordement ou face 41. L'analyseur parcourra les règles de définition, cherchant celles dont le terme gauche correspond à un tore. Il trouvera, alors, les règles 4 et 5. A cette étape, nous pouvons assurer le concepteur que les données qu'il désirait analyser sont usinables.

5.3.3.2 Validation d'un ensemble de surfaces

Cette analyse vérifie l'existence d'une orientation permettant à un procédé de générer toutes les surfaces de la C.F. Nous déterminons pour chaque orientation un arbre syntaxique comprenant les règles de définition et d'association. Les fonctions sémantiques de ces règles ne sont pas appliquées pour cette analyse.

L'analyseur commence par le premier élément de la chaîne analysée, à savoir la surface A. Il scrute alors les règles de définition. La *règle 1* accepte comme terme gauche un plan et fixe une contrainte sur l'orientation entre le procédé et la pièce (Figure 69). Cette contrainte (relative à l'orientation entre le procédé et la pièce) devra être respectée par les autres règles de définition. L'analyseur teste s'il existe une règle de définition pour le congé de raccordement (41) respectant la contrainte d'orientation imposée ci-dessus. Il trouve que les règles 4 et 5 acceptent comme terme gauche une face de type Tore. Cependant, aucune des deux orientations fixées par ces règles ne respecte la contrainte imposée par la première règle. Par conséquent, le procédé ne peut générer cette C.F. dans cette orientation. L'analyseur rejette donc la *règle 1* pour A et cherche une autre règle de définition.

Suite au rejet de la *règle 1*, l'analyseur continue son itération sur les règles de définition avant de trouver la *règle 6*. Celle-ci constraint l'axe de la broche à être dans le même sens que la normale extérieure à la matière de la face A. L'analyseur traite, ensuite, la surface 41 (Tore). Il s'agit de trouver une règle de définition dont le terme gauche est un tore, qui respecte la contrainte d'orientation fixée par la *règle 6*. Dans ce cas de figure, la *règle 4* vérifie cette condition. La dernière surface à analyser est la surface B. Deux règles de définition (2 et 3) peuvent être appliquées, mais une seule respecte la contrainte d'orientation. Nous supposerons que l'orientation du cylindre dans le modèle solide valide la *règle 2*. Nous voici donc parvenus à la fin de la chaîne de symboles.

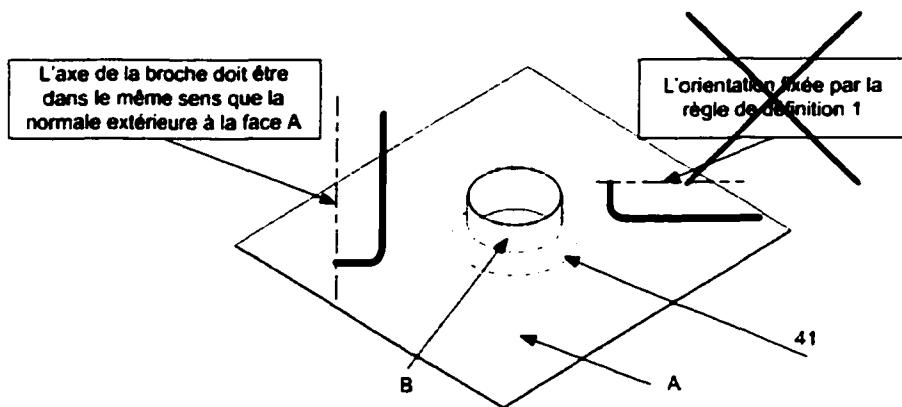


Figure 69 Orientations de la broche par rapport à la pièce

Il s'agit, maintenant, de déterminer les règles d'association à appliquer. L'analyseur traite les deux surfaces B et 41. Suite à son itération sur les règles d'association, il retient la règle d'association 14. Cette règle est applicable car ces surfaces sont générées par les deux arêtes adjacentes A3 et A2. L'analyseur vérifie ensuite les surfaces 41 et A. Il retient la règle d'association 14, car les deux surfaces sont générées par les deux arêtes adjacentes A2 et A1. Nous avons donc vérifié toutes les surfaces ainsi que leurs associations. L'arbre syntaxique issu de l'analyse de cette chaîne de surfaces est ci-dessous.

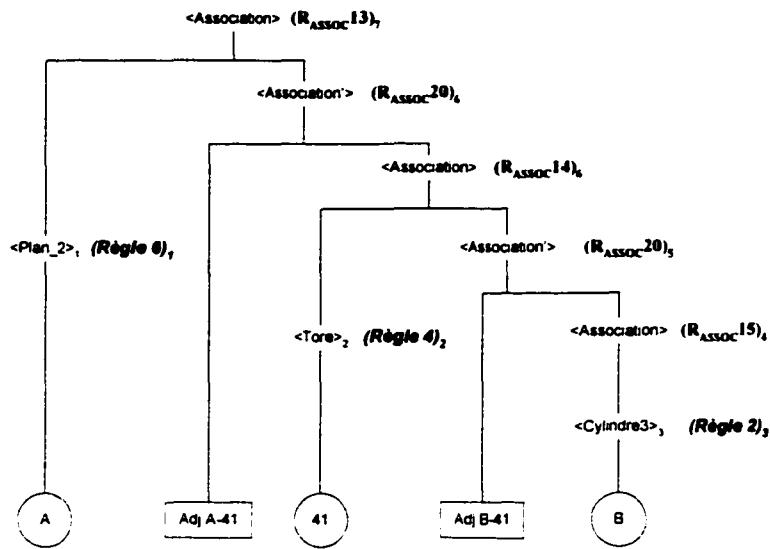


Figure 70 Arbre syntaxique d'une analyse de surfaces

Cet arbre syntaxique est valide pour le procédé abstrait associé au procédé {Fraiseuse ; Fraise 2 tailles Torique}. En effet, les dimensions n'ont pas été vérifiées, pas plus que les conditions aux arêtes. Seuls l'orientation et les types de surfaces ont été analysés.

5.3.3.3 Validation d'un ensemble faces

La validation d'un ensemble de faces est un cas particulier de la validation d'un ensemble de surfaces. Cette validation est accomplie pour un procédé spécialisé donné. Elle se base sur l'arbre syntaxique trouvé ci-dessus. L'apport de cette analyse est qu'elle vérifie les dimensions des faces et les propriétés géométriques au niveau de l'arête d'intersection vues dans le quatrième chapitre. Elle prend, donc, en compte les fonctions sémantiques des règles de définition et d'association.

Comme nous l'avons vu dans le quatrième chapitre, une fois l'arbre syntaxique construit, les règles sémantiques peuvent être appliquées dans n'importe quel ordre.

Au niveau des règles d'association de cet arbre, l'analyseur vérifie les angles extérieurs à la matière ou les interférences entre les volumes élémentaires et les surfaces usinées.

Au niveau des règles de définition, l'analyseur vérifie les dimensions suivantes :

- Pour qu'une machine soit retenue, il faut que :
 - les dimensions du plan vérifient la formule spécifiée dans la règle 1,
 - la hauteur du cylindre soit inférieure à la course de la machine selon Z.
- pour qu'un outil soit retenu,
 - il faut que le rayon interne de <41> soit égal au rayon de l'arête A2,

Outre la vérification géométrique, l'analyseur compare les attributs technologiques des surfaces aux valeurs atteignables par les procédés stockées dans une BD. Les valeurs vérifiées dans ce cas de figure correspondent à :

- une tolérance de planéité de la surface A,
- une tolérance de cylindricité de la surface B.

5.3.3.4 Validation d'une solution technique

Nous allons montrer, dans cette section, comment les caractéristiques d'usinage permettent d'intégrer l'analyse d'usinage au processus de conception. Nous illustrons ceci par un exemple où différentes analyses d'usinage valident et guident les choix du concepteur lorsqu'il spécifie et modifie des dimensions et des informations technologiques.

Illustration de l'analyse d'un ensemble de surfaces

Supposons que le concepteur désire assurer une fonction d'étanchéité entre la pièce que nous étudions et une pièce supplémentaire. Pour y parvenir, il pense à un joint à lèvres inséré dans la rainure composée des surface 1 2 et 3. Supposons qu'à cette étape, le

concepteur désire valider la forme générale de la solution sans prendre en compte les dimensions (*analyse d'un ensemble de surfaces*).

Etant donné que cette analyse ne prend en compte que la géométrie des outils et les mouvements d'avance des machines, elle trouve (tel qu'illustré en Figure 71) les procédés abstraits des deux procédés suivants :

- {fraiseuse trois axes ; fraise trois tailles},
- {tour ; outil GRIP302 Y}.

Donc à cette étape de la conception, ce que le concepteur a spécifié (forme générale) est usable.

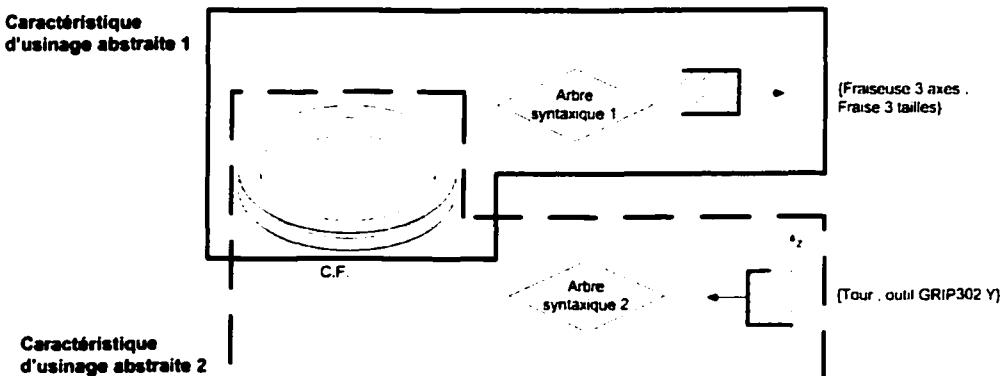


Figure 71 Deux caractéristiques d'usinage abstraites pour une C.F.

Illustration de l'analyse d'un ensemble de faces

Supposons qu'après un calcul de dimensionnement quelconque (ex : éléments finis), le concepteur spécifie la largeur de la rainure. Supposons que la largeur de la rainure soit plus petite que la largeur de l'outil de tournage et de la fraise trois tailles. Le concepteur va lancer une nouvelle analyse d'usinage ("analyse d'un ensemble de faces"). Cette analyse se base sur les arbres syntaxiques générés lors de l'analyse d'un ensemble de

surfaces. Elle vérifiera les dimensions des faces, les angles matière, ainsi que l'accessibilité de l'outil. Dans le cas présent, les dimensions des faces, les angles matière sont vérifiés. Cependant, l'accessibilité locale de l'outil n'est pas vérifiée. En effet, la largeur spécifiée pour la rainure est inférieure à la largeur des deux outils retenus lors de l'analyse d'un ensemble de surfaces.

A cette phase de l'analyse, il est possible d'afficher un message d'erreur au concepteur le prévenant que les modifications depuis la dernière étape d'analyse d'usinage ont invalidé l'usinage de sa conception. En effet, il n'existe aucune caractéristique d'usinage incluant toutes les données spécifiées par le concepteur.

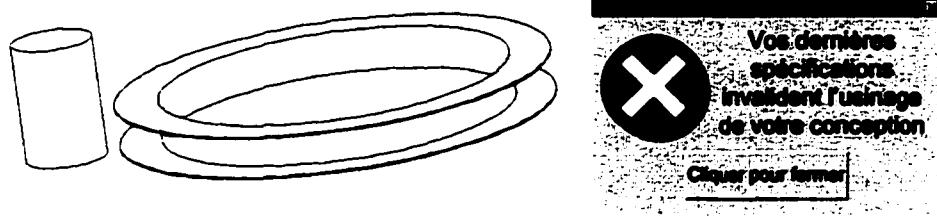


Figure 72 Une évaluation résultant en une conception non usinable

Deux cas de figure se présentent. Dans le premier, le concepteur décide de changer de C.F. pour respecter sa fonction. Ceci implique que les caractéristiques d'usinage abstraites sont effacées. Le second cas de figure que nous allons explorer consiste à modifier la largeur de la rainure. Nous avons toujours deux caractéristiques d'usinage abstraites associées à la C.F. La modification des dimensions nécessite d'exécuter les règles sémantiques. Supposons que cette exécution valide le procédé de fraisage et non celui de tournage. A cette étape de l'analyse, nous proposons de ne pas écarter la C.U. abstraite associée au procédé de tournage.

Voyons une exploitation possible des C.U. abstraites par le biais du scénario suivant. Toujours en ce qui concerne la rainure, supposons que le concepteur spécifie maintenant un état de surface important pour la fonctionnalité (limiter une usure rapide du joint d'étanchéité) mais ne pouvant être obtenu par le procédé de fraisage. Nous nous retrouvons devant une conception non usinable. L'état de surface étant primordial, le concepteur va spécifier une autre largeur et profondeur de la rainure puis redemander une autre analyse d'usinage. Etant donné que les C.U. abstraites sont encore associées à la C.F., la prise en compte des nouvelles dimensions et de la spécification d'état de surface revient à lancer les règles sémantiques des analyseurs des procédés spécialisant les procédés abstraits associés initialement à la C.F. Ceci évite de relancer le processus de validation de toutes les grammaires stockées. Dans ce cas particulier, le procédé {tour; outil GRIP302 Y} respecte les nouvelles dimensions spécifiées, ainsi que l'état de surface exigé pour le respect de la fonction.

Voici un diagramme montrant le déroulement de ce scénario de conception ainsi que les analyses d'usinage et leurs résultats successifs.

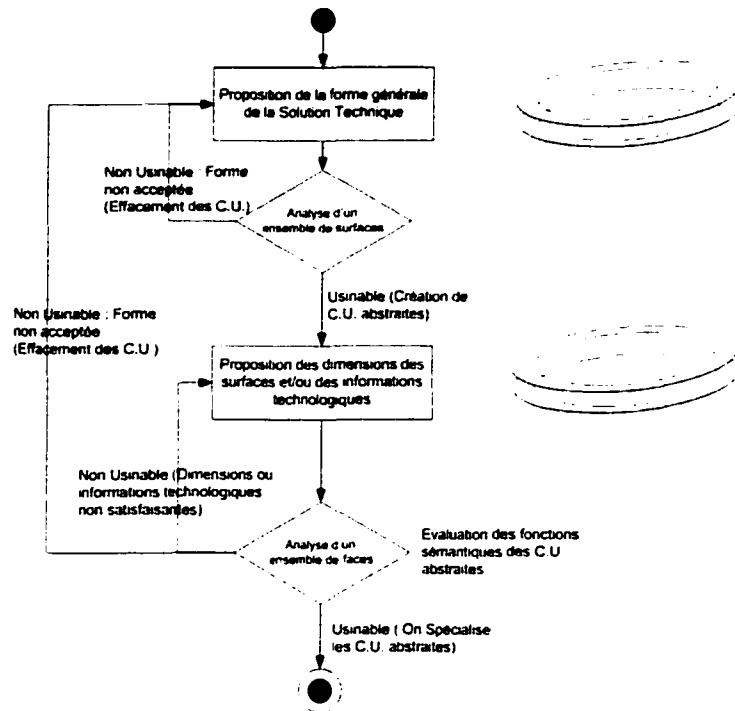


Figure 73 Etapes suivies par le concepteur

5.3.4 Validation d'usinage d'un produit

A partir du modèle solide généré par le concepteur, l'application de l'algorithme de l'angle matière présenté par Deneux permet d'extraire l'ensemble suivant de caractéristiques de forme. Ces dernières sont, suite à l'application des grammaires d'usinage, associées aux procédés listés dans le Tableau V.

Tableau V
Association des caractéristiques de forme aux procédés d'usinage

Caractéristiques de forme	Fraiseuse 3 axes	Procédés d'usinage candidats	
		Porte Plaquette	Outil
A 41 B	Fraise Torique	MDJNR	DNMG-332
1 2 3	Fraise trois tailles	HELIR/L	GRIP302 Y
6 7 43 8	Fraise de forme	MDJNR	DNMG-332
9 44 10	Fraise de forme	MDJNR	DNMG-332
13 45 14	Fraise Torique	A-MDU	DNMG-332
16 46 17 47 18 48	Non Applicable	GHIR/L	GIDA 80-40CB IDS
21 49	Fraise torique	A-MDU	DNMG-332
22 50 23	Fraise torique	A-MDU	DNMG-332
25 26 27	Fraise deux tailles	Non Applicable	Non Applicable
28 29 30 31	Fraise deux tailles Fraise Torique	Non Applicable	Non Applicable
32 33 34 35	Fraise deux tailles Fraise Torique	Non Applicable	Non Applicable
36 37	Fraise deux tailles	Non Applicable	Non Applicable
38 39 40	Fraise deux tailles Fraise Torique	Non Applicable	Non Applicable

La géométrie des différents outils cités dans ce tableau est présentée ci-dessous.

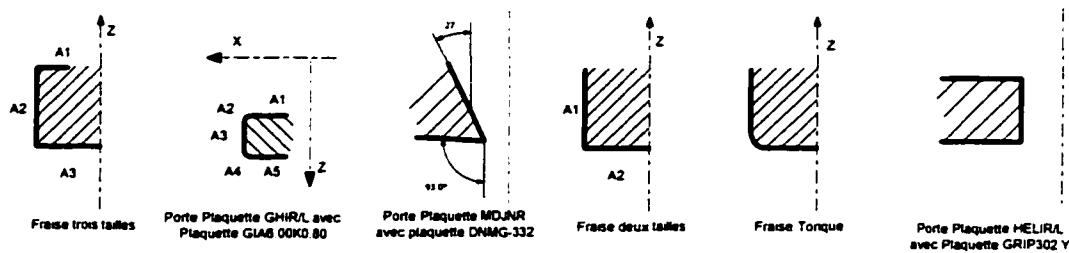


Figure 74 Modélisation des outils nécessaires à l'usinage de la pièce

5.4 Perspectives

Le développement progressif de nos travaux nous a fait penser à plusieurs pistes de recherche.

Il convient tout d'abord d'étendre notre modèle de machines pour prendre en compte les axes de rotation permettant de changer l'orientation sans aucun mouvement de coupe. Il serait alors possible de regrouper les caractéristiques de forme ne possédant pas la même orientation mais pouvant être usinées sur une même machine.

Il faut également prospecter les possibilités offertes par les grammaires d'usinage. En effet, nous ne les utilisons actuellement que pour *valider* une partie ou la globalité du produit. Nous pensons, cependant, que le pouvoir génératif des grammaires permettrait une approche où le concepteur ne spécifie que les formes fonctionnelles. Les grammaires permettraient alors de *suggérer* les formes non fonctionnelles usinées. Le concepteur pourrait, par la suite, choisir la solution qui respecte les contraintes des métiers intervenant dans la conception du produit telles que le calcul ou la maintenance.

Considérons comme exemple une rainure de clavette. Les surfaces fonctionnelles sont les deux plans de côté et le fond de la rainure. Les deux autres surfaces n'interviennent pas au niveau de la fonction. Par conséquent le concepteur pourra utiliser le pouvoir génératif de la grammaire d'usinage afin de déterminer les surfaces pouvant être

générées par les procédés respectant les contraintes fonctionnelles (géométriques et/ou technologiques). Ces surfaces dépendront de l'outil utilisé et des contraintes relatives aux surfaces fonctionnelles. Dans la première figure montrée ci-dessous, les surfaces proposées sont le fruit d'une fraise deux tailles, tandis que la seconde figure est relative à une fraise trois tailles.

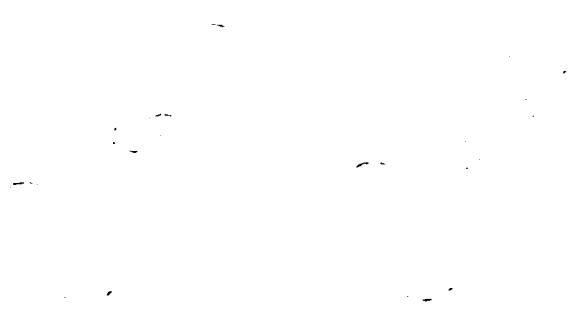


Figure 75 Deux propositions d'usinage pour une solution de conception

Une autre piste consiste à développer un outil permettant une analyse et une évaluation incrémentales du produit. Cet outil permettrait au concepteur de vérifier et de voir l'impact de ses modifications au fur et à mesure que le processus de conception évolue. L'évaluation d'usinage serait basée sur un indice qualitatif proportionnel à la difficulté d'usinage. Cet indice indiquerait au concepteur les modifications ayant *probablement* les plus grandes implications sur les coûts et temps d'usinage.

5.5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté les exigences de la maquette logicielle devant intégrer les contraintes d'usinage au processus de conception à savoir la validation d'informations géométriques et technologiques par le biais d'une grammaire d'usinage

Nous avons ensuite présenté une pièce aéronautique pour illustrer plusieurs de nos concepts. Nous avons tout d'abord illustré la génération d'un arbre syntaxique. Nous avons montré ensuite l'utilisation des caractéristiques d'usinage abstraites et spécialisées pour intégrer l'analyse d'usinage au processus de conception.

En guise de perspectives, nous avons tout d'abord proposé de prendre en compte de nouveaux types de machines dans nos modèles. Nous avons ensuite indiqué un nouveau champ d'application des grammaires. Celles-ci permettraient d'assister la conception en suggérant des surfaces usinées non fonctionnelles. Nous avons enfin suggéré le développement d'un outil d'analyse et d'évaluation d'usinage incrémentales permettant au concepteur de voir l'impact probable des modifications apportées.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La conception et la fabrication unitaire ou en petites séries de pièces mécaniques sont des activités posant de sérieux problèmes aux entreprises concernées, car elles doivent concevoir et usiner les produits dans les plus brefs délais avec des coûts de plus en plus bas. En effet, la compression du temps de conception et la variété des pièces mécaniques conçues augmentent la probabilité de propositions de conception non usinables ou difficiles à usiner. Pour être compétitives, ces entreprises doivent intégrer lors de la conception les contraintes d'usinage. Les outils et approches actuels prennent en compte les contraintes d'usinage mais uniquement à la fin du processus de conception. C'est dans ce contexte que se sont inscrits nos travaux de recherche. Ceux-ci ont visé une contribution à un outil permettant d'une part, la validation d'usinage au cours de la conception et d'autre part de fournir au concepteur des informations relatives à l'usinage du produit.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les phases d'élaboration du produit dont l'intégration est nécessaire pour réduire les coûts et temps de production. Nous avons ensuite présenté une proposition fournissant un cadre général pour intégrer les contraintes des différents métiers intervenant dans le cycle de vie du produit en cours de conception. Il s'agit du modèle produit et du processus de conception développés au LAMIH. Ces travaux n'ayant pas pris en compte les contraintes d'usinage, nous nous sommes intéressés aux travaux d'intégration des contraintes de l'usinage en cours de conception. Nous avons, tout d'abord, montré la nécessité de considérer l'analyse de fabrication comme un processus simultané au processus de conception. Ensuite, l'étude des approches d'analyse d'usinage lors et pour la conception a montré l'adéquation entre certains de nos besoins et les outils basés sur la préparation à la fabrication. En effet, ces derniers ne contraignent pas le concepteur dans son approche créatrice et ne presupposent pas de connaissances de fabrication. En outre, ils offrent plusieurs

alternatives d'usinage pour une même pièce. Cependant, ils ne sont actuellement utilisés qu'en fin de conception.

Nous avons étudié, dans le deuxième chapitre, les modèles et méthodes nécessaires pour procéder à une analyse d'usinage en cours de conception. Nous avons commencé par l'étude des «capabilités» des procédés et des contraintes d'usinage. Nous en avons déduit la nécessité de modéliser la cinématique des machines et la géométrie des outils pour analyser la «capacité» de génération de formes des procédés. Les autres «capabilités» peuvent être analysées grâce à l'interrogation de bases de données construites grâce aux données recueillies par expérimentations et dans la littérature. Par la suite, nous avons déterminé les données du produit devant être analysées ainsi que les niveaux de modélisation où elles sont déterminées. Nous avons déduit de la nature des surfaces fonctionnelles que nous pouvions exclure de l'étude les machines possédant plus de 3 axes asservis en position et/ou en vitesse. Une revue de la littérature des approches d'analyse d'usinage nous a permis de choisir comment créer de manière efficace la correspondance entre les domaines de la conception et de l'usinage. Une première étape consiste à extraire les caractéristiques de forme du modèle produit par l'approche d'angle matière. La seconde étape consiste à valider ces données extraites par des modèles des procédés d'usinage. Dans la dernière section, nous avons étudié les approches de validation d'usinage globale représentant les alternatives d'usinage.

Dans le troisième chapitre, nous avons, tout d'abord, proposé des modèles pour représenter la cinématique des machines ainsi que la géométrie coupante et les mouvements d'avance des outils. Ces modèles sont génériques aux différents procédés d'usinage que nous étudions. Nous avons ensuite proposé une hiérarchisation des procédés, machines et outils. Par la suite, nous avons présenté les analyses d'usinage possibles en cours de conception ainsi que les contraintes d'antériorité les liant. Nous avons également présenté une méthodologie de validation globale générant des alternatives d'usinage basées sur les activités d'usinage. Nous avons conclu ce chapitre

par une nouvelle notion de caractéristiques d'usinage. Celles-ci contiennent les données du produit à analyser, les analyses d'usinage utilisées, ainsi que le procédé validant les données du modèle produit. Les caractéristiques d'usinage créent ainsi un pont explicite entre les domaines de la conception et de l'usinage. Nous avons, enfin, présenté la hiérarchisation des caractéristiques d'usinage avant d'en illustrer l'intérêt.

Nous avons présenté dans le quatrième chapitre un outil accomplissant les différentes analyses d'usinage en cours de conception et se basant sur les modèles des procédés. Cet outil se base, d'une part, sur des règles géométriques modélisant la génération de surfaces par des arêtes coupantes durant des mouvements d'avance modélisés par des opérateurs géométriques. Il se base, d'autre part, sur des règles de génération d'associations de surfaces. Il ne considère donc pas les contraintes subjectives dues au savoir faire ou à l'environnement manufacturier d'une entreprise. Cet outil correspond à l'analyseur d'une grammaire attribuée d'usinage. Nous avons présenté comment l'analyseur permet d'appliquer les différentes analyses d'usinage vues dans le troisième chapitre par le biais des règles lexicales et des fonctions sémantiques. Nous avons enfin vu comment l'utilisation de l'analyseur de la grammaire et des caractéristiques d'usinage abstraites pouvait faciliter l'analyse d'usinage dans certains cas de figure.

Une maquette logicielle d'analyse d'usinage en cours de conception et de génération d'alternatives d'usinage a été spécifiée dans le cinquième chapitre. Nous en avons décrit la structure générale, ainsi que les structures de données et les différents modules. Nous avons enfin présenté une pièce mécanique sur laquelle nous avons illustré comment la grammaire d'usinage crée le lien entre des données de conception et des procédés d'usinage. Nous avons également montré comment l'utilisation des caractéristiques d'usinage abstraites permet d'intégrer l'analyse d'usinage au cours du processus de conception. Nous avons, enfin, présenté un exemple de génération d'alternatives d'usinage.

Les principales contributions, constituant l'originalité de nos travaux, sont résumées par les points ci-dessous :

- **Modélisation homogène des procédés d'usinage** : Nous avons présenté des modèles de machines et d'outils s'appliquant autant au tournage, au fraisage, à l'alésage, au perçage qu'au brochage. Nous nous démarquons ainsi des études rencontrées qui se limitent à modéliser les procédés de fraisage ou de tournage.
- **Analyse d'usinage en cours de conception** : Nous considérons que cette analyse est un processus devant être parallèle au processus de conception. Le concepteur est ainsi informé des contraintes d'usinage lors de la conception et n'a pas à attendre que le produit soit finalisé. La boucle d'intégration entre la conception et l'usinage est, par conséquent, plus courte.
- **Lien entre le modèle produit et le modèle des procédés** : Beaucoup d'approches de validation d'usinage se basent sur des raisonnements entièrement tournés vers la géométrie sans prendre en compte les «capabilités» de génération de surfaces des procédés. Dans notre approche, nous créons un lien explicite entre les procédés d'usinage et les données déterminées par le concepteur.
- **Approche formelle de validation d'usinage** : Afin de valider les données du modèle produit, nous nous sommes basés sur les grammaires d'usinage. Elles ont permis de formaliser les règles de génération de surfaces simples et d'associations de surfaces. Les règles prises en compte dans ces grammaires correspondent à des règles objectives déduites d'opérateurs géométriques. Nous avons préféré laisser de côté les règles subjectives dues au savoir-faire qui peuvent être prises en compte à la fin de l'analyse.

L'immersion dans nos travaux nous a fait sentir que le chemin à parcourir avant de parvenir à un outil idéal d'intégration des contraintes d'usinage en cours de conception peut être encore long. De nouvelles perspectives à court et long terme découlent directement de nos travaux :

- Au niveau des perspectives à court terme, il faudrait développer une maquette d'analyse d'usinage. Cette maquette permettrait d'appliquer les concepts présentés au cours de cette thèse. Toujours à court et moyen terme, il serait intéressant d'englober dans nos modèles les machines 4 axes avec un axe de rotation indexé. Ces travaux auraient pour but de trouver les caractéristiques de forme ne possédant pas la même orientation, mais pouvant être générées dans la même mise en position.
- Au niveau des perspectives à long terme, nous pensons qu'il serait intéressant d'utiliser le pouvoir génératif de la grammaire afin d'aider le concepteur à suivre une démarche de conception par engagement minimal (*least commitment design*). Dans une telle approche, le concepteur spécifie les formes fonctionnelles et utilise la capacité de génération de formes des grammaires d'usinage afin de spécifier les formes non fonctionnelles devant être usinées.
- Toujours au niveau des perspectives à long terme, nous pensons à un outil d'analyse et d'évaluation incrémentale du produit prenant en compte les modifications apportées par le concepteur au fur et à mesure qu'il progresse dans le processus de conception. La spécification de nouvelles données correspondrait à augmenter un indice d'usinage du produit. Cet indice augmenterait de manière proportionnelle à la difficulté d'usinage. Il serait une sorte de garde fou pour prévenir le concepteur des modifications ayant *probablement* les plus grandes implications sur le coût d'usinage.

ANNEXE 1
Classification des procédés d'usinage

CLASSIFICATION DES PROCÉDÉS D'USINAGE

Voici une énumération non exhaustive de procédés d'usinage proposée dans [Chang 1990].

Tableau VI
Procédés d'usinage, machines et outils [Chang 1990]

Procédé	Sous Procédé	Machines	Outils
Fraisage	Fraisage en bout	Fraiseuse verticale Fraiseuse Horizontale	Fraise à lames rapportées Fraise simple
	Fraisage en roulant	Centre d'usinage	Fraise simple Fraise une taille à rainurer Fraise à lames rapportées Fraise conique Fraise pour rainure en T
	Fraisage combiné		Fraise simple Fraise en bout Fraise à bout creux Fraise sphérique
Perçage		Groupe de perçage Perceuse radiale Machine à Têtes multiples Machine à percer d'établi	Forêt hélicoïdal Forêt à langue d'aspic Forêt pour trous profonds Forêt à goujures droites Forêt à centrer Outil à percer et à lamer combiné Outil de lamage Outil à lamer en bout
Alésage		Perceuse sensitive Tour Alésouse Machine à pointer	manchon d'alésage alésoir expansible en bout alésoir expansible en bout alésoir conique barre d'alésage ajustable barre d'alésage simple
Tournage	Tournage Dressage Tronçonnage	Tour Rapide Tour parallèle Tour universel	Outil Simple Outil à lames rapportées
	Alésage Perçage		barre d'alésage Alésoir Forêt
Brochage		Machine de brochage extérieur Machine à Brocher horizontale	Outils de forme

ANNEXE 2

Présentation des travaux relatifs aux caractéristiques ou Features

PRÉSENTATION DES TRAVAUX RELATIFS AUX CARACTÉRISTIQUES OU FEATURES

1. Les propriétés des caractéristiques

L'une des principales raisons de l'utilisation des caractéristiques est qu'elles permettent d'encapsuler un ensemble d'informations, géométriques ou non, relatives à un domaine donné, et permettent d'accomplir les raisonnements requis par ce domaine. Certaines des propriétés des caractéristiques peuvent être intrinsèques, d'autres sont extrinsèques. Les propriétés fournies ci-dessous servent d'illustration et ne sont pas exhaustives.

1.1. Propriétés intrinsèques

Parmi ces propriétés nous pouvons citer les suivantes :

- *Forme géométrique*
- *Nom ou l'identifiant de la caractéristique* : Identifiant qui distingue une caractéristique des autres au sein du modèle et permet à l'outil une meilleure compréhension de l'utilisateur ex : T-Slot, Rainure, Trou, etc..
- *Les dimensions ou paramètres spécifiés par l'utilisateur* : Paramètres spécifiés par l'utilisateur et ne découlant d'aucun calcul
- *Les tolérances intrinsèques* : Les tolérances de forme sont toujours intrinsèques. Les autres tolérances sont intrinsèques quand les deux surfaces liées par la tolérance appartiennent à la caractéristique.

1.2. Propriétés extrinsèques

Ces propriétés sont celles qui font intervenir au moins deux caractéristiques. Nous pouvons citer les propriétés suivantes :

- *Les Dimensions et paramètres dérivés d'autres caractéristiques* : lors de l'ajout de nouvelles caractéristiques au modèle, certains paramètres dépendent d'attributs de caractéristiques existantes.
- *La Localisation et l'orientation de la caractéristique* : ces paramètres permettent de localiser les caractéristiques et de connaître leur orientation.
- *Les Tolérances extrinsèques* : la plupart des tolérances nécessitent la spécification d'une référence. quand la surface de référence et la surface tolérancée n'appartiennent pas à la même caractéristique, on peut parler de tolérance extrinsèque (tolérances de battement, de position, d'orientation).

Les caractéristiques, étant une "simple description" du produit pour un domaine donné, il faut noter que la notion d'attribut intrinsèque et extrinsèque est liée à ce domaine. En effet, une tolérance géométrique extrinsèque pour une caractéristique d'assemblage peut être considérée comme intrinsèque pour l'usinage par exemple. On peut déduire de ce qui précède que les attributs sont classés relativement aux caractéristiques considérées mais aussi par rapport au point de vue considéré.

2. Méthodes de création des caractéristiques

Les caractéristiques sont définies par les relations entre leurs attributs géométriques. Les systèmes diffèrent dans la manière de gérer les contraintes entre ces attributs. Il existe deux approches: *procédurale* et *déclarative*.

L'approche procédurale définit les caractéristiques par un ensemble de procédures et de règles. Ces règles gèrent la manière de copier et déplacer les caractéristiques, ainsi que

la manière de dériver certains paramètres. Certaines caractéristiques de ces systèmes sont que [Shah et Mäntylä 1995]:

- Les règles d'héritage définies créent une chaîne uni-directionnelle pour la propagation des changements. Si l'objet référence est modifié, l'objet référencé l'est aussi. Il n'existe aucun mécanisme pour assurer le changement dans l'autre sens.
- Les conflits dans les valeurs des paramètres sont évités en utilisant une hiérarchie de paramètres.

L'approche déclarative, quant à elle, définit les caractéristiques en explicitant les relations spatiales qui doivent exister entre les entités géométriques les constituant. Au contraire de l'approche procédurale où il est nécessaire de spécifier des procédures spécifiques à chaque cas, les contraintes sont génériques. Par ailleurs, la propagation des contraintes dans l'approche déclarative n'est pas uni-directionnelles comme dans l'approche procédurale.

3. Classification selon le type d'informations

[Shah 1991] a proposé une classification permettant de distinguer les différents types des caractéristiques comme suit :

- Caractéristiques de forme : représentent la géométrie nominale d'une pièce et son esthétique,
- Caractéristiques de précision : spécifient la déviation permise par rapport aux dimensions nominales et prennent en compte les différents types de tolérances ainsi que les états de surface,
- Caractéristiques de matériau : spécifient la composition du matériau,
- Caractéristiques fonctionnelles : ensemble de caractéristiques reliées à une fonction spécifique pouvant inclure l'intention de conception, des paramètres non-géométriques reliés à la fonction, à la performance, etc.

- **Caractéristiques d'assemblage** : groupements de caractéristiques variées afin de définir les relations d'un assemblage, telles que les positions relatives, les différents types de jeux, et les relations cinématiques.

4. Classification selon le domaine d'application

Les caractéristiques peuvent également être classifiées selon le domaine d'application tel que la conception ou la fabrication. Ces caractéristiques peuvent contenir des caractéristiques de forme, de précision, d'assemblage etc. Elles traduisent le savoir-faire relié au métier correspondant à certaines caractéristiques du produit. Ainsi, un alésage avec une rainure pourra être considéré comme une caractéristique de conception traduisant la fonction de transmission d'un mouvement de rotation. Une interprétation d'usinage de cette même forme géométrique arbre sera de la considérer comme le fruit successif d'un perçage et d'un brochage. Il peut donc exister pour un même produit plusieurs modèles de caractéristiques dépendant du contexte ou de l'application. Voici un exemple de pièce avec les vues de conception et de fabrication.

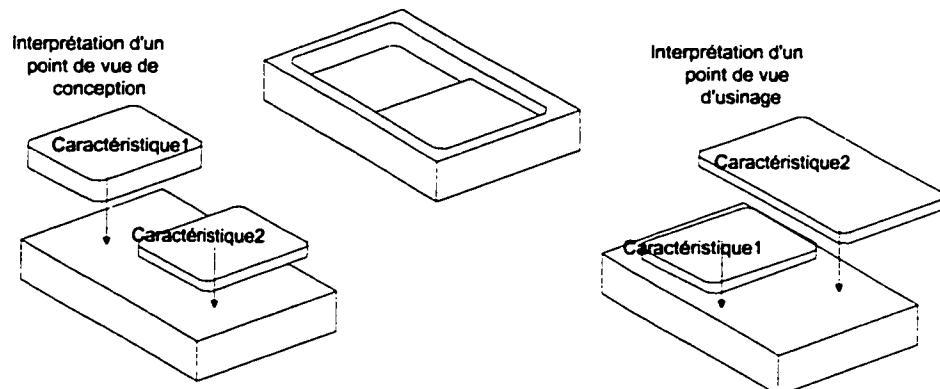


Figure 76 Deux points de vue d'une même pièce [Deneux 1993]

5. Obtention de modèles de caractéristiques

En général, les modèles à base de caractéristiques peuvent être obtenus par deux principales techniques :

1. *Conception basée sur les caractéristiques* : La géométrie de la pièce est créée en termes de caractéristiques,
2. *Reconnaissance automatique des caractéristiques* : un logiciel parcourt un modèle géométrique à la recherche de caractéristiques.

5.1. Reconnaissance automatique des caractéristiques

Ces techniques essaient de fournir des mécanismes d'extraction d'informations de haut niveau sémantique en appliquant un ensemble de règles pour chercher une géométrie et une topologie spécifiques.

Le processus général de reconnaissance des caractéristiques prédéfinies se déroule en trois étapes majeures [Prabhakar et Henderson 1992] :

- La définition des caractéristiques (définir les règles de reconnaissance),
- La classification des caractéristiques,
- L'extraction des caractéristiques (à partir du modèle solide).

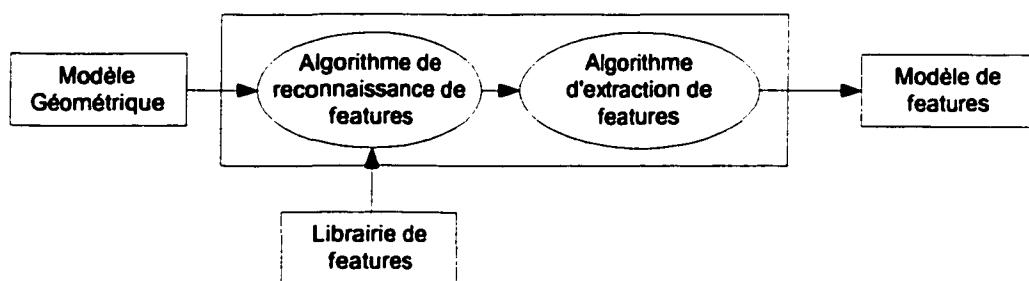


Figure 77 Reconnaissance automatique de caractéristiques

Selon [Shah et Mäntylä 1995], l'extraction de caractéristiques d'usinage possède un inconvénient majeur. Les informations issues de l'étape de conception ne pourraient pas être transférées au domaine de préparation à la fabrication. Les informations de dimensionnement et de tolérancement seraient perdues dans le processus de reconnaissance. Le bénéfice de cette approche est qu'elle part d'une représentation géométrique du produit et ne constraint pas le concepteur.

5.2. Conception basée sur les caractéristiques

Dans cette approche, l'utilisateur part d'une librairie de caractéristiques. Afin de créer le produit final, il instancie une caractéristique et attribue des valeurs numériques aux paramètres de la caractéristique.

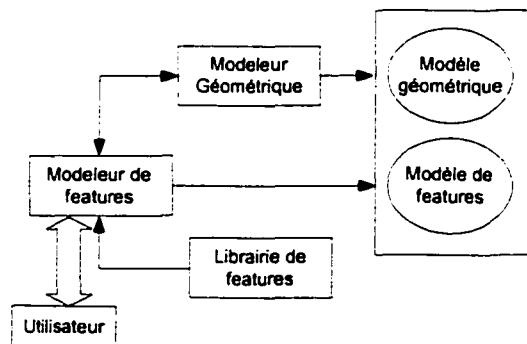


Figure 78 Conception par les caractéristiques [Shah 1988]

La conception avec des caractéristiques de conception répond au problème du manque de liberté de modélisation du concepteur. Par ailleurs, il est possible ainsi de conserver la sémantique liée non seulement au domaine d'application, mais également au savoir-faire particulier de l'entreprise. Cette approche permet, au contraire des modeleurs géométriques, d'associer des informations non géométriques, y compris la justification de choix d'une solution au détriment d'une autre.

ANNEXE 3
Extraction de caractéristiques de forme pré-définies

EXTRACTION DE CARACTÉRISTIQUES DE FORME PRÉ-DÉFINIES

1. Les approches à base de règles

[Liu et al. 1995] présentent un système expert SMARTDFM qui utilise le raisonnement flou lors de la conception pour l'usinage dans le cas particulier du tournage. La reconnaissance se fait grâce à des facteurs tels que les rapports longueur/diamètre pour les pièces de révolution, et longueur/profondeur ainsi que longueur/hauteur pour les pièces qui ne sont pas de révolution. Le moteur d'inférence affiche les différentes règles de production applicables aux formes reconnues.

[Lin et al. 1997] proposent une méthodologie pour extraire des caractéristiques d'usinage à partir d'un modèle produit à base de caractéristiques de conception. Les règles concernent le nombre de faces des caractéristiques d'usinage, leur type, les positions relatives des faces et les relations topologiques des faces. L'implantation s'est faite sur Pro/ENGINEER pour la modélisation et Pro/DEVELOP pour l'extraction.

2. Les approches à base de graphes

[Gavankar et Henderson 1990] ont utilisé cette approche afin de trouver les caractéristiques de proéusion et de dépression. [Sakurai et Gossard 1990] ont employé des techniques de reconnaissance de caractéristiques basées sur les graphes avec un support pour les types de caractéristiques définies par l'utilisateur. [Chuang et Henderson 1990] ont été les premiers à noter le besoin d'aborder la complexité calculatoire et le problème de décision lors de la définition du problème de reconnaissance de caractéristiques. Leur article a formalisé le problème de reconnaissance des caractéristiques (y inclus les caractéristiques composées) en procédant à une analyse d'une représentation basée sur les graphes d'une pièce et en utilisant une grammaire

réseau. Une approche pour prendre en compte les interactions et intersections entre les caractéristiques a été présentée par [Marefat et Kashyap 1990]. Le travail a utilisé une nouvelle combinaison de système expert et de techniques de tests hypothétiques afin d'extraire des surfaces depuis des polyèdres.

[Kumar et al. 1996] présentent une approche pour reconnaître des caractéristiques de forme simples ainsi que les caractéristiques sécantes pour des pièces prismatiques. L'approche utilisée se base sur les FAAG. Afin de reconnaître les caractéristiques sécantes, les auteurs procèdent à la création de faces virtuelles afin de créer des caractéristiques correspondant aux caractéristiques prédéfinies.

[Nezis et Vosniakos 1997] présentent une étude utilisant les réseaux de neurones préalablement entraînés, s'appuyant uniquement sur des données topologiques modélisées grâce à un FAAG. Ils utilisent des heuristiques pour décomposer les graphes en sous graphes. Les sous-graphes reconnus sont ensuite présentés au réseau de neurones qui essaie de les classer en poche, rainure, trou etc. Lors de l'enseignement du réseau, le nombre de caractéristiques appartenant à chaque classe doit être égal, sinon le système pense qu'il existe une préférence pour une classe plutôt qu'un autre. En outre, les réseaux de neurones ne peuvent reconnaître une caractéristiques sécantes si une face ou plus sont détruites.

3. Les approches de représentation symbolique du produit fini

Des méthodes basées sur des grammaires de graphes ont été utilisées afin de reconnaître les caractéristiques [Pinilla et al. 1989] [Safier et Finger 1990] et pour accomplir la traduction entre différentes représentations de caractéristiques [Rosen et al. 1992].

[Peters 1992] analyse la complexité combinatoire des approches grammaticales et basées sur les graphes pour la reconnaissance des caractéristiques et présente une heuristique pour la réduire.

[De Martino et al. 1994] présentent un système de reconnaissance automatique de caractéristiques à partir d'un modèle CAO. La représentation des caractéristiques est faite grâce à un graphe hiérarchique où les nœuds correspondent aux volumes des caractéristiques, décrits par une représentation B-Rep, et où les arcs décrivent les relations d'adjacence entre ces volumes. Le graphe hiérarchique permet de déterminer les contraintes d'accessibilité ainsi que des séquences possibles entre caractéristiques. La reconnaissance des caractéristiques combine les deux stratégies de grammaires de caractéristiques et de correspondance de graphes. Les grammaires de caractéristiques analysent les adjacences entre faces et déterminent si les caractéristiques sont des dépressions ou des protubérances. Ils utilisent la correspondance de graphes afin de vérifier si les caractéristiques extraites correspondent aux caractéristiques prédéfinies ou "enseignées" par l'utilisateur. L'apprentissage correspond à l'ajout par l'utilisateur de nouvelles formes géométriques.

4. Les approches d'extraction de volumes

[Ko et Park 1994] présentent un système de conception par caractéristiques et de reconnaissance automatique de caractéristiques de forme. La reconnaissance des caractéristiques est basée sur la décomposition du delta volume. Seule la géométrie nominale est considérée. Les interactions des caractéristiques ne sont pas traitées par les auteurs qui s'appuient sur l'utilisateur pour le faire. Lors de modifications par ajout ou suppression de caractéristiques de forme, le modèle n'est mis à jour que pour les zones affectées.

[Gupta et al. 1994] présentent une méthodologie, basée sur le delta volume, pour extraire plusieurs interprétations alternatives d'un modèle CAO sous forme de collections de MRSEV (*Material Removal Shape Element Volume*). Les MSREV sont des caractéristiques volumétriques définies dans [Kramer 1991]. Les caractéristiques considérées dans ces travaux sont une sous-classe des caractéristiques générées par un balayage linéaire, à savoir, les trous avec un fond conique avec un angle de 120°, les poches avec des profiles généraux, et les poches avec des îlots. Les caractéristiques correspondant à un balayage linéaire sont définies comme résultant du balayage d'un profile fermé le long d'une ligne perpendiculaire au plan du profile. Les MSREV sont initialement associées à une ou plusieurs opérations d'usinage. Dans ces travaux, tout solide est décrit comme la différence entre le modèle solide du brut et un ensemble d'instances des MRSEV permettant ainsi de reconnaître des caractéristiques de forme même quand elles sont sécantes. Une limitation de cette approche est que les primitives des caractéristiques de forme sont générées manuellement en prolongeant la trajectoire de chaque outil. Aucune tentative d'automatisation de cette génération n'a été proposée. Les travaux de [Regli et al. 1995] viennent compléter les travaux de [Gupta et al. 1994]. Les caractéristiques associées aux opérations de perçage, de fraisage de chanfreinage et de filletage sont considérées. Les contraintes prises en compte lors de l'extraction des caractéristiques sont : les dimensions physiques de l'outillage, une simplification de la contrainte d'accessibilité, ainsi que la faisabilité des angles droits. Cette approche algorithmique détermine les caractéristiques des classes citées ci-dessus même dans le cas d'intersection de ces dernières.

[Vandenbrande et Requicha 1993] ont proposé une approche d'extraction basée sur les delta volumes. Leur méthode est capable de trouver des interprétations alternatives des caractéristiques en se basant sur les directions d'accessibilité de ces dernières. Ils ont fourni un cadre de travail pour reconnaître une classe significative de caractéristiques en utilisant des techniques d'intelligence artificielle avec des requêtes auprès d'un modèle solide. Pour chaque classe de caractéristiques, ils présentent des indices d'extraction. Les

indices sont extraits à partir du modèle solide et sont classifiés à partir de leur potentiel pour construire les instances des caractéristiques. Certaines des caractéristiques ne seront pas reconnues si les indices sont effacés ou classés comme non prometteurs. De plus, le nombre de caractéristiques alternatives n'est pas contrôlable. [Requicha 1996] a approfondi l'approche des indices. Le module IF² (voir [Han et Requicha 1994, 1995, 1997]) collecte des signes d'évidence à partir de plusieurs sources : **a)** les faces du modèle, **b)** les tolérances (exemple le parallélisme entre deux faces est un indice pour une rainure), **c)** les attributs (un taraudage implique l'existence d'un trou) ; et enfin, **d)** les caractéristiques de conception définies par l'utilisateur. A partir de tels signes d'évidence, des *indices* sont générés. Un *indice* est le cadre de représentation incomplet d'une caractéristique. L'*indice* contient le type des caractéristiques et des paramètres facilement extractibles. Les signes d'évidence ont des *poids heuristiques* pour refléter les préférences des auteurs. Les poids heuristiques sont combinés afin de produire des indices. La recherche des caractéristiques tente de prendre en compte les directions d'accessibilité. Le système n'extrait pas toutes les alternatives, mais se limite à une seule proposition, qui peut être modifiée si elle n'est pas acceptée par le préparateur à la fabrication. L'un des inconvénients de cette démarche est que dans son état actuel, les poids des heuristiques sont donnés en fonction d'exemples, aucun cadre général n'est présenté, même si le système semble bien se comporter sur les exemples choisis.

ANNEXE 4

Arêtes de coupe, mouvements d'avance et surfaces générées

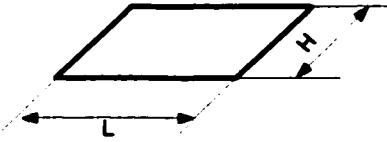
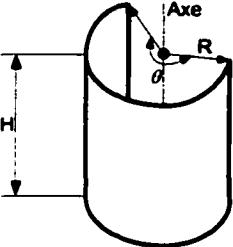
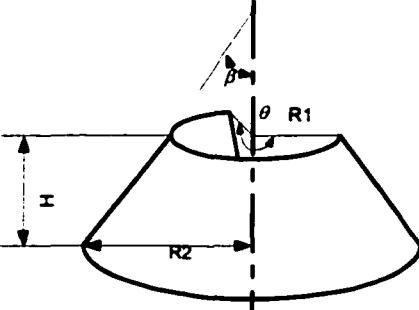
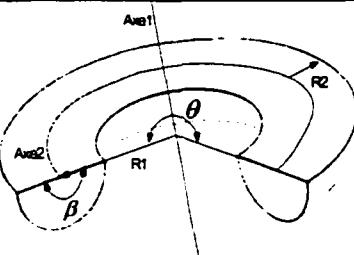
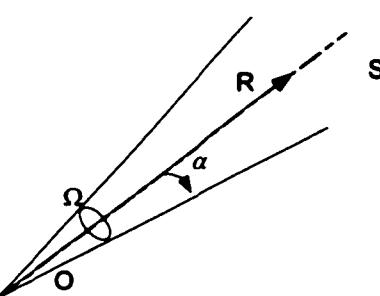
ARÈTES DE COUPE, MOUVEMENTS D'AVANCE ET SURFACES GÉNÉRÉES

1. Introduction des paramètres géométriques des surfaces et des arêtes coupantes

1.1. Spécification des attributs des surfaces

Les attributs géométriques caractérisant les surfaces géométriques lors de l'analyse d'usinage sont les suivants.

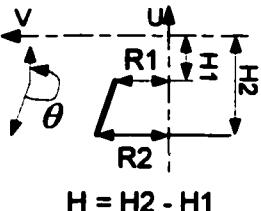
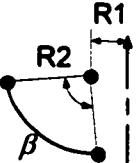
Tableau VII
Attributs d'une surface

Surface	Représentation	Attributs caractérisant la surface
<i>Plan</i>		Longueur : L, Largeur : H, Normale externe à la matière.
<i>Cylindre</i>		Axe de révolution : Axe Rayon de courbure : R. Hauteur : H, Angle : θ . Attribut de convexité
<i>Cône</i>		Axe de révolution : Axe, Petit Rayon : R1 Grand rayon : R2, Hauteur : H Angle : θ . Demi-angle plan au sommet : β . Attribut de convexité
<i>Tore</i>		Axe de révolution primaire : Axe1, Axe de révolution secondaire : Axe2 distance entre les Axe : R1, Rayon : R2, Angle noté : θ Angle du cercle de révolution : β Attribut de convexité.
<i>Sphère</i>		Centre : O, Rayon de courbure : R, Angle solide : Ω {Un angle solide $d\Omega$ délimite un cône dans l'espace (en stéradians, Sr). L'angle solide d'un cône de révolution dont le demi-angle plan au sommet est α vaut : $\Omega = 2 \pi (1 - \cos \alpha) \text{ Sr.}$ } Attribut de convexité.

1.2. Lien entre surfaces élémentaires et arêtes coupantes

Cette annexe a pour but de créer la relation entre les attributs des surfaces d'une part, et la nature, attributs et mouvements des arêtes coupantes d'autre part. Nous allons tout d'abord nommer les différents types d'arêtes et lier chaque type aux surfaces qu'il peut générer. Le tableau ci-dessous reprend le contenu de la Figure 37

Tableau VIII
Génération de surfaces élémentaires par une arête droite

Géométrie des arêtes	Type des arêtes	Surface élémentaire pour un mouvement de coupe de rotation
 $H = H_2 - H_1$	Type1	Cône
	Type2	Disque
	Type3	Cylindre
	Type4	Tore (Sphère)

Tous les paramètres des surfaces, non indiqués dans ce qui suit, ne sont pas contraints. Nous adoptons la convention de notation suivante : les attributs de dimensions appartiennent par défaut aux outils, à moins que l'on indique par un indice la surface à laquelle ils appartiennent.

2. Section commune aux arêtes droites (Type1 Type 2 et Type3)

Ces arêtes appartiennent à des outils de tournage, de fraisage, d'alésage et de perçage. Afin de distinguer où se situe la matière relativement à l'arête et l'axe de la broche, nous

calculons le produit scalaire entre la normale extérieure à la matière de l'arête et le vecteur directeur de l'axe OV noté \vec{V} . Il existe deux cas de figure :

1. Si $\vec{N} \cdot \vec{V} \geq 0 \Rightarrow$ La matière est comprise entre l'arête et l'axe de la broche (fraisage, certaines utilisations des outils de tournage) Cas 1.a et Cas 1.b.
2. Si $\vec{N} \cdot \vec{V} \leq 0 \Rightarrow$ La matière se situe de l'autre côté de l'arête (la plus grande partie des outils de tournage Cas 2.a et Cas 2.b).

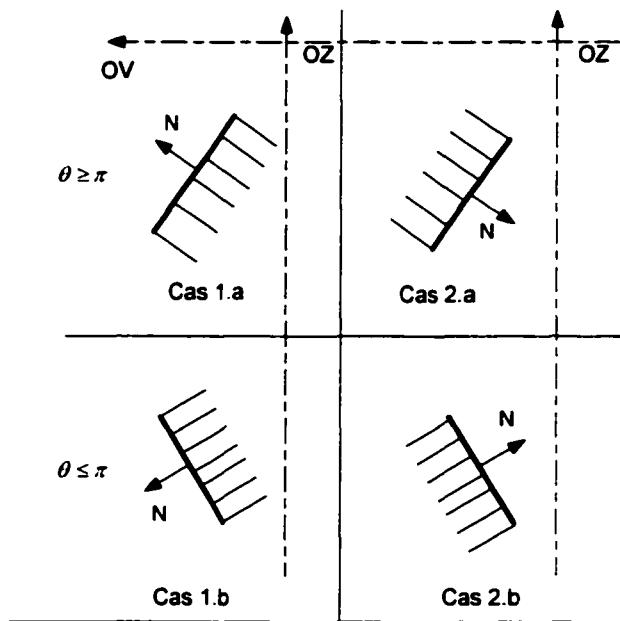


Figure 79 Différentes arêtes droites possibles.

Afin d'obtenir une indication de l'emplacement de la matière des surfaces usinées par rapport à l'axe OZ, nous nous basons sur le produit scalaire entre la normale extérieure à la matière de l'arête et le vecteur directeur de l'axe Z (Exemple l'orientation d'un cône par rapport à la broche). Nous rappelons que la normale extérieure à la matière d'une surface générée, notée $\vec{N}_{Surface}$, est de sens contraire à la normale extérieure à la matière de l'arête coupante. Nous nous basons sur l'équation suivante :

$$\bar{N} \cdot \bar{Z} = \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \theta\right) = -\sin(\theta)$$

Les mouvements de translation selon l'axe OZ sont également contraints par ce produit scalaire. Le mouvement d'avance selon cet axe possède le sens du vecteur \vec{A} déterminé par les équations suivantes :

1. si $\theta \geq \pi$ alors $\bar{N} \cdot \bar{Z} \leq 0$; $\bar{N}_{Surface} \cdot \bar{Z} \geq 0$; $\bar{A} \cdot \bar{Z} \leq 0$
2. si $\theta \leq \pi$ alors $\bar{N} \cdot \bar{Z} \geq 0$; $\bar{N}_{Surface} \cdot \bar{Z} \leq 0$; $\bar{A} \cdot \bar{Z} \geq 0$

Les arêtes droites, pour lesquelles la matière est comprise entre l'arête et l'axe OZ, seront considérées convexes.

3. Outils de Fraisage, alésage, perçage

Pour les outils de ces procédés le produit scalaire entre N et V est positif

3.1. Arêtes de Type1

Ce cas de figure inclut les outils de fraisage, d'alésage et de perçage. Exemple : Fraise 2 tailles cône inversé ($\theta \leq \pi$), ou fraise 2 tailles cône direct ($\theta \geq \pi$).

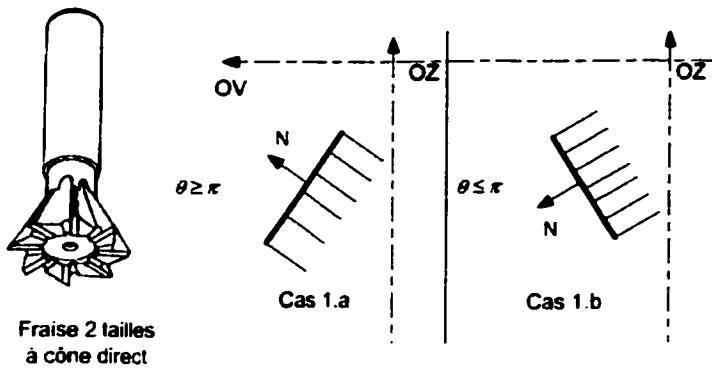


Figure 80 Angles des arêtes droites

Quand il n'existe pas de contrainte à propos de la convexité des surfaces, on suppose que $\vec{N}_{Surface} = -\vec{N}_{Arête}$ (Condition à vérifier dans tous les cas de figure).

Mouvement rectiligne radial de l'outil (Tx, Ty, Txy)oRz(A)

Ce mouvement génère deux types de surfaces :

1. Un plan ayant les caractéristiques suivantes :
 - l'angle entre la normale externe et l'axe de la broche est égal à $\theta - \pi/2$
 - $H_{Plan} \leq H$,
2. Un cône concave ayant les caractéristiques suivantes :
 - Axe1 est parallèle à l'axe OZ,
 - $\beta_{Cône} = \text{Abs}(\theta - \pi)$,
 - $R1_{Cône} \leq R1$ et $R2_{Cône} \leq R2$,
 - L'angle $\theta_{Cône}$ doit respecter la contrainte d'accessibilité de l'outil suivante : $\theta_{Cône} \leq \pi$

Mouvement circulaire de l'outil RzoRz(A)

Ce mouvement génère deux types de surfaces

1. un cône concave ayant les caractéristiques suivantes :

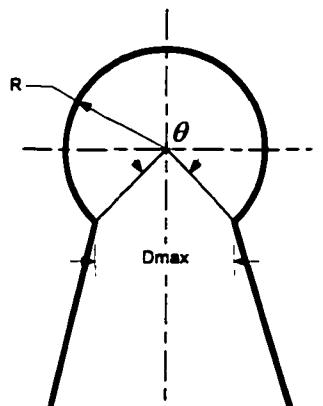
- Axe1 est parallèle à l'axe OZ,
- $\beta_{\text{Cône}} = \text{Abs}(\theta - \pi)$
- $R1_{\text{Cône}} \geq R1$ et $H_{\text{Cône}} \leq H$,
- L'angle $\theta_{\text{Cône}}$ doit respecter la contrainte d'accessibilité de l'outil que l'on peut déduire à partir de la Figure 81 :

$$R(h)_{\text{Cône}} \times \sin\left(\frac{2\pi - \theta}{2}\right) \geq R(h)_{\text{Arête}}$$

et ce pour $H1_{\text{Cône}} \leq h \leq H2_{\text{Cône}}$

2. un cône convexe ayant les caractéristiques suivantes :

- Axe1 est parallèle à l'axe OZ,
- $\beta_{\text{Cône}} = \text{Abs}(\theta - \pi)$
- $R1_{\text{Cône}} \geq R1$ et $H_{\text{Cône}} \leq H$,



$$R_{\text{outil}} \leq \frac{D_{\text{max}}}{2} = R \times \sin\left(\frac{2\pi - \theta}{2}\right)$$

Figure 81 Relation entre le rayon de l'outil et l'angle du cylindre où cône

Mouvement quelconque dans le plan XY CxyoRz(A)

Nous considérons que tout mouvement quelconque Cxy est composé de mouvements correspondants à des mouvements circulaires Rz ou rectilignes radiaux (Tx, Ty, Txy).

Mouvement rectiligne selon l'axe OZ TzoRz(A)

Le mouvement est contraint par l'équation vue en section 2. Ces mouvements permettent de générer les surfaces suivantes :

1. Un Cylindre concave ayant les caractéristiques suivantes :

- $R = \max(R1, R2)$
- Axe est parallèle à l'axe OZ,

2. Un Cône concave tel que :

- Axe1 est parallèle à l'axe OZ,
- $\beta_{\text{Cône}} = \text{Abs}(\theta - \pi)$,
- $R1_{\text{Cône}} \leq R1$ et $R2_{\text{Cône}} \leq R2$,

3.2. Arêtes de Type2

Mouvement rectiligne radial de l'outil (Tx, Ty, Txy)oRz(A)

Ces mouvements génèrent un plan respectant les contraintes suivantes

- la normale est parallèle à l'axe OZ.

Mouvement rectiligne selon l'axe OZ TzoRz(A)

Ce mouvement n'est possible que si $R1$ est nul. Il génère un cylindre concave ayant les caractéristiques suivantes :

- $R_{\text{Cylindre}} = R2$,
- Axe_{Cylindre} parallèle à l'axe OZ.

3.3. Arêtes de Type3

Mouvement rectiligne radial de l'outil (Tx, Ty, Txy)oRz(A)

Ce mouvement génère les surfaces suivantes :

1. un plan respectant les contraintes suivantes :
 - la normale est perpendiculaire à l'axe de la broche,
 - Tangent à la surface élémentaire,
2. un plan respectant les contraintes suivantes : (ex : Fraise 1 taille à rainurer)
 - la normale est parallèle à l'axe de la broche,
 - **Contrainte d'encombrement de la broche** $H \leq R - R_{\text{interne}}$ (R_{interne} correspond au rayon de l'emplacement où la broche est en contact avec l'outil)
3. un cylindre concave respectant les contraintes suivantes :
 - Axe est parallèle à l'axe de la broche,
 - $R_{\text{Cylindre}} = R$
 - L'angle θ_{Cylindre} doit respecter la contrainte d'accessibilité de l'outil suivante : $\theta_{\text{Cylindre}} \leq \pi$

Mouvement circulaire de l'outil Rz0Rz(A)

Ce mouvement génère deux types de cylindres :

1. un plan respectant les contraintes suivantes : (ex : Fraise 1 taille à rainurer)
 - la normale est parallèle à l'axe de la broche,
 - **Contrainte d'encombrement de la broche** $H_{\text{Plan}} \leq R - R_{\text{interne}}$ (R_{interne} correspond au rayon de l'alésage interne pour positionner la broche)
2. un Cylindre concave respectant les contraintes suivantes :
 - Axe est parallèle à l'axe de la broche,
 - $R_{\text{Cylindre}} \geq R$
 - L'angle θ_{Cylindre} doit respecter la contrainte d'accessibilité de l'outil que l'on peut déduire à partir de la Figure 81 :

$$R_{\text{Cylindre}} \times \sin\left(\frac{2\pi - \theta_{\text{Cylindre}}}{2}\right) \geq R$$

3. Un Cylindre convexe :

- Axe est parallèle à l'axe de la broche,

Mouvement quelconque dans le plan XY CxyoRz(A)

Nous considérons que tout mouvement quelconque est composé de mouvements correspondant à des mouvements circulaires Rz ou rectilignes radiaux (Tx, Ty, Txy).

Mouvement rectiligne selon l'axe OZ TzoRz(A)

Ce mouvement est vrai particulièrement pour les alésoirs ou pour les barres à alésier. Il génère un cylindre concave respectant les contraintes suivantes :

- Axe parallèle à l'axe de la broche
- $R_{Cylindre} = R$
- $H_{Cylindre} \leq H$

3.4. Arêtes de Type4

Nous définissons Rmax comme la distance du point de l'arête le plus éloigné de l'axe OZ selon l'axe V.

L'arête est concave en fraisage pour des outils de forme. Nous pouvons citer comme exemples : Ball endmill, fraises concaves pour demi-cercle, ou pour quart de cercle.

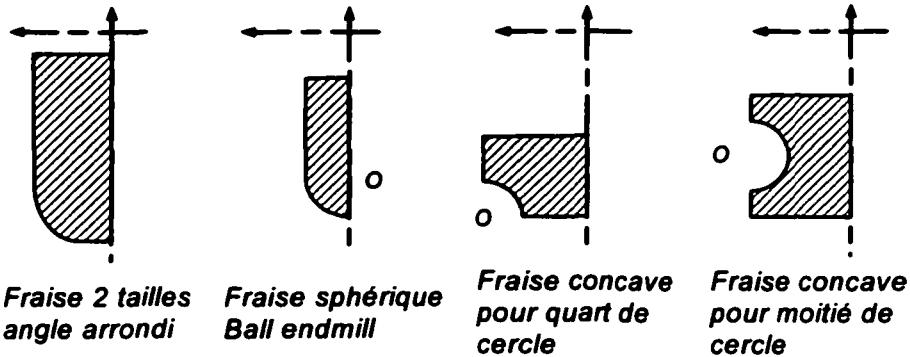


Figure 82 Exemples de fraises avec arêtes courbes convexes ou concaves

Nous ne traiterons pas ici le cas de fraises spéciales ne rentrant pas dans l'un des deux cas suivants :

1. $\beta = \pi/2$ avec OP_i vertical et OP_{i+1} horizontal (ex : Figure 82 a et b)
2. $\beta = \pi$ avec P_iP_{i+1} vertical (ex : fraises concaves et convexe pour demi-cercle).

Les fraises sphériques (Teardrop mill) ne seront pas prises en compte (Génération de surfaces quelconques par approximation).

Mouvement rectiligne radial de l'outil (T_x, T_y, T_{xy})oRz(A)

Ce mouvement génère les surfaces suivantes :

1. Un tore respectant les contraintes suivantes :
 - Axe1 parallèle à l'axe OZ,
 - Axe2 perpendiculaire à l'axe OZ,
 - $R_{2\text{Tore}} = R_2$,
 - $R_{1\text{Tore}} = R_1$,
 - $\beta_{\text{Tore}} \leq \beta$,
 - $\theta \leq \pi$ (contrainte d'accessibilité de l'outil).
 - La concavité du tore est complémentaire à celle de l'arête.

2. Un cylindre respectant les contraintes suivantes :

- $R_{Cylindre} = R$
- $\theta_{Cylindre} \leq \beta$ (Contrainte relative à l'outil de forme)
- Axe_{Cylindre} perpendiculaire à l'axe OZ
- La concavité du cylindre est complémentaire à celle de l'arête.

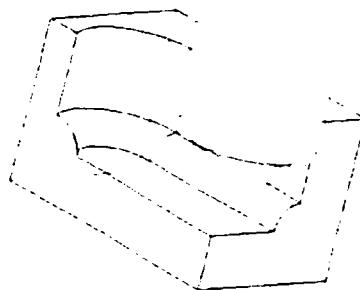


Figure 83 Génération de surfaces par une Fraise torique concave

Mouvement circulaire Rz0Rz(A)

Ce mouvement génère les deux types de tores suivants :

1. Le premier type de tore respecte les contraintes suivantes :

- Axe1 parallèle à l'axe OZ,
- Axe 2 perpendiculaire à l'axe OZ,
- $R2_{Tore} = R2$,
- $R1_{Tore} \geq R1$,
- $\beta_{Tore} \leq \beta$,
- Concavité complémentaire à celle de l'arête
- $R1 - R2 \leq R \leq R1$

2. Le second type de tore respecte les contraintes suivantes :

- Axe 1 parallèle à l'axe OZ,
- Axe 2 perpendiculaire à l'axe OZ,
- $R2_{Tore} = R2$,
- $\beta_{Tore} \leq \beta$,
- Concavité complémentaire à celle de l'arête.
- $R1 \leq R \leq R1 + R2$

Mouvement quelconque dans le plan XY CxyoRz(A)

Nous considérons que tout mouvement quelconque est composé de mouvements correspondant à des mouvements circulaires Rz ou rectilignes radiaux (Tx, Ty, Txy).

Mouvement rectiligne TzoRz(A)

Seules les arêtes appartenant au premier cas de figure cité dans 3.4 permettent un mouvement selon l'axe OZ ($\beta = \pi/2$). Les surfaces pouvant être générées sont :

1. Un cylindre concave respectant les contraintes suivantes :

- $R_{Cylindre} = R2 + R1$
- $\theta_{Cylindre} \leq \beta$
- Axe parallèle à l'axe OZ.

2. Un tore respectant les contraintes suivantes :

- $R1_{Cône} = R1$
- $R2_{Cône} = R$
- $\beta_{Cône} \leq \beta$
- Axe 1 parallèle à l'axe de la broche
- Concavité complémentaire à celle de l'arête.

Mouvement quelconque dans l'espace

Il est possible de générer des approximations de plusieurs types de surfaces grâce à ces arêtes sur une machine 4 ou 5 axes. Il peut s'agir de portions de cône, de sphère ou de cylindre. Ces types de mouvements ne seront pas considérés dans le cadre de nos travaux.

4. Tournage

Le tournage est un procédé d'usinage qui permet l'obtention de surfaces planes ainsi que des surfaces de révolution concaves ou convexes. Les mouvements des arêtes des outils de coupe appartiennent au plan (Z V). L'axe V correspond à l'axe OX de la broche. Par conséquent, les mouvements permettant de générer des surfaces sont Tx, Tz, Txz et Ry. Les opérations les plus usitées en tournage sont les suivantes : chariotage (conique ou cylindrique), chanfreinage (opération de forme), dressage, gorge (opération de forme), piquage (opération de forme), alésage, embrèvement, chambrage. Les deux dernières opérations sont les seules à ne pas être élémentaires car elles impliquent plusieurs mouvements d'avance.

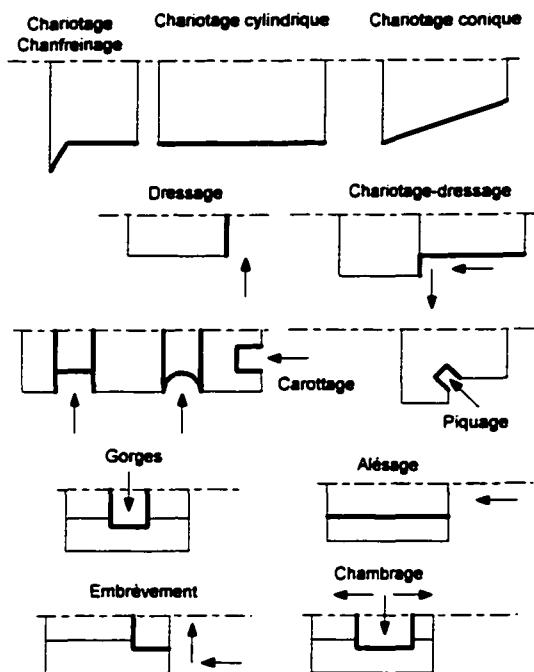


Figure 84 Différents types d'opérations de tournage

Certains outils peuvent être utilisés pour une ou plusieurs opérations élémentaires dans un sens ou l'autre de l'axe OZ en fonction de la nature de l'outil (outil à droite, à gauche, ou neutre). Nous considérons que tout outil pouvant être utilisé pour une seule des opérations élémentaires suivantes (alésage, gorge à fond droit, épaulement, dressage) sera modélisée par une arête perpendiculaire à la surface générée (ex : dans le cas du dressage, l'outil sera simplifié par une arête parallèle à OZ).

Le travail d'enveloppe de plusieurs outils de coupe se fait grâce au point situé à l'intersection de deux arêtes coupantes de type 1 qui possèdent un certain angle par rapport à l'axe de la broche. Cet angle est en général supérieur au demi angle au sommet des cônes générés d'au moins 5 degrés. Dans la plupart des cas qui suivent, lorsqu'on parlera de génération de surface grâce à un travail d'enveloppe, l'arête impose l'angle de la surface qui est générée par un point génératrice appelé P_G . Il en résulte que dans ces

cas de figure la surface élémentaire est un cercle de rayon égal à la distance du point génératrice par rapport à l'axe de la broche.

4.1. Arêtes Type1

La figure qui suit permet de montrer les différents cas de figure des outils dont une des arêtes est de type1. Nous pouvons remarquer que les arêtes de type1 pouvant être utilisées en tournage extérieur sont celles figurant dans les cas 2.b et 2.a. De manière similaire, les outils pouvant être utilisés en tournage intérieur sont ceux figurant dans les cas 1.a et 1.b.

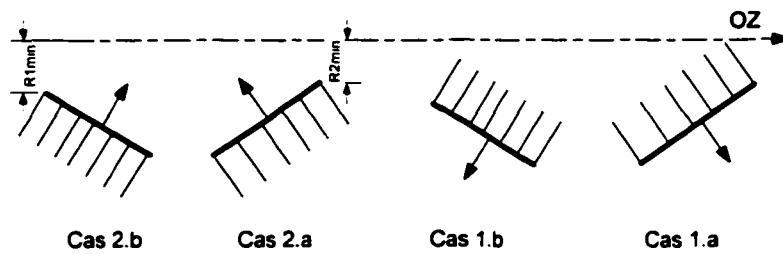


Figure 85 Différents types d'arêtes de type 1

Les surfaces générées par les arêtes de type1 cas 2.b et 2.a (tournage intérieur) possèdent une contrainte supplémentaire relative à l'accessibilité de l'outil. Cette contrainte impose une distance minimale entre tout point de la surface générée et l'axe de la broche égale à la valeur $R1\text{min}$ ou $R2\text{min}$ indiquées sur la Figure 85.

Mouvement rectiligne radial de l'outil $Tx0Rz(A)$

Ce mouvement génère des surfaces respectant les contraintes suivantes :

1. Un plan respectant les contraintes suivantes (travail d'enveloppe) :
 - Normale parallèle à l'axe OZ,

- La face correspond en général à un cercle dont les rayons interne et externe sont déterminés par la course de la machine selon l'axe OX.
2. Un cône respectant les contraintes suivantes (travail de forme) :
- $H_{\text{Cône}} \leq H$,
 - $\beta_{\text{Cône}} = \text{Abs}(\theta - \pi)$,
 - Concavité complémentaire à celle de l'arête

Mouvement rectiligne selon l'axe OZ TzoRz(A)

Ce mouvement génère des surfaces respectant les contraintes suivantes :

1. Si l'arête est convexe, un cylindre concave (usinage de l'alésage) est généré respectant les contraintes suivantes :
 - Axe parallèle à l'axe OZ,
 - $R_{\text{Cylindre}} = \max(R1, R2)$,
2. Si l'arête est concave, un cylindre convexe (usinage de l'arbre) est généré respectant les contraintes suivantes :
 - Axe parallèle à l'axe OZ,
 - $R_{\text{Cylindre}} = \min(R1, R2)$,
3. Un cône (travail de forme) respectant les contraintes suivantes :
 - $H_{\text{Cône}} \leq H$,
 - $\beta_{\text{Cône}} = \text{Abs}(\theta - \pi)$,
 - Concavité complémentaire à celle de l'arête.

Mouvement rectiligne selon le plan OXZ TxzoRz(A)

Ce mouvement génère pour un *travail d'enveloppe* des surfaces respectant les contraintes suivantes :

1. Un cône respectant les contraintes suivantes :
 - Axe parallèle à l'axe OZ,
 - $R_{\text{Cône}} \geq \min(R1, R2)$,

- $\beta_{\text{Cône}} \leq \text{Abs}(\theta - \pi)$ (les pentes du cône et de l'arête possèdent le même sens)
- Concavité complémentaire à celle de l'arête.

Ce même mouvement génère pour *un travail de forme (piquage)*, si l'encombrement de l'arête le permet, lors d'un mouvement perpendiculaire à l'arête, des surfaces respectant les contraintes suivantes :

2. Un cône respectant les contraintes suivantes :

- Axe parallèle à l'axe OZ
- $H_{\text{Cône}} = H_{\text{Arête}}$,
- $\beta_{\text{Cône}} = \text{Abs}(\theta - \pi)$ (les pentes du cône et de l'arête possèdent le même sens)
- Concavité complémentaire à celle de l'arête.

3. Deux cônes l'un convexe l'autre concave respectant les contraintes suivantes :

- Axe parallèle à OZ
- $\beta_{\text{Cône}} = \pi/2 - \text{Abs}(\theta - \pi)$ (Normale extérieure à la matière perpendiculaire à la normale de l'arête)
- $H_{\text{Cône}}$ dépend du mouvement d'avance de l'arête

Mouvement quelconque selon le plan OXZ RyoRz(A)

Ce mouvement génère, lors du tournage extérieur, des surfaces respectant les contraintes suivantes : (travail d'enveloppe)

1. Un tore concave respectant les contraintes suivantes :

- Axe parallèle à l'axe OZ,
- L'arête de type 2.b fixe une contrainte sur le point limite de coordonnées inférieures à celles du centre suivant OZ. L'angle entre la tangente au cercle et l'arête en ce point est supérieur à une certaine valeur déterminée par expérience (en général 5 degrés \Leftrightarrow L'angle entre la tangente extérieure à la matière et l'arête coupante doit être inférieur à 85°).

- L'arête de type 2.a fixe une contrainte sur le point limite de coordonnées supérieurs à celles du centre suivant OZ. L'angle entre la tangente au cercle et l'arête en ce point est supérieur à une certaine valeur déterminée par expérience.

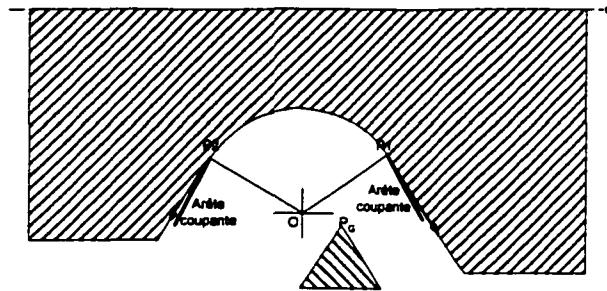


Figure 86 Conditions sur les points du cercle déterminant un tore

2. Un tore convexe respectant les contraintes suivantes :

- Axe parallèle à l'axe OZ,
- L'arête de type 2.b fixe une contrainte sur le point limite de coordonnées supérieures à celles du centre suivant OZ. L'angle entre la tangente au cercle et l'arête en ce point est supérieur à une certaine valeur déterminée par expérience.
- L'arête de type 2.a fixe une contrainte sur le point limite de coordonnées inférieures à celles du centre suivant OZ. L'angle entre la tangente au cercle et l'arête en ce point est supérieur à une certaine valeur déterminée par expérience.

Ce mouvement génère, lors du tournage intérieur, des surfaces respectant les contraintes suivantes (travail d'enveloppe) :

3. Un tore concave respectant les contraintes suivantes :

- Axe parallèle à l'axe OZ,

- L'arête de type 1.a fixe une contrainte sur le point limite de coordonnées inférieures à celles du centre suivant OZ. L'angle entre la tangente au cercle et l'arête en ce point est supérieur à une certaine valeur déterminée par expérience (en général 5 degrés).
- L'arête de type 1.b fixe une contrainte sur le point limite de coordonnées supérieurs à celles du centre suivant OZ. L'angle entre la tangente au cercle et l'arête en ce point est supérieur à une certaine valeur déterminée par expérience.

4. Un tore convexe respectant les contraintes suivantes :

- Axe parallèle à l'axe OZ,
- L'arête de type 1.a fixe une contrainte sur le point limite de coordonnées supérieures à celles du centre suivant OZ. L'angle entre la tangente au cercle et l'arête en ce point est supérieur à une certaine valeur déterminée par expérience.
- L'arête de type 1.b fixe une contrainte sur le point limite de coordonnées inférieures à celles du centre suivant OZ. L'angle entre la tangente au cercle et l'arête en ce point est supérieur à une certaine valeur déterminée par expérience.

Mouvement quelconque dans le plan XZ Cxz o Rz(A)

Nous considérons que tout mouvement quelconque Cxz est composé de mouvements correspondants à des mouvements circulaires Ry ou rectilignes radiaux (Tx, Tz, Txz).

4.2. Arêtes Type2

Mouvement rectiligne selon l'axe OZ Tx o Rz(A)

Ce mouvement génère les surfaces suivantes :

1. un cylindre convexe respectant les contraintes suivantes :

- Axe parallèle à l'axe OZ,
 - $R_{Cylindre} = R1$
2. un cylindre concave respectant les contraintes suivantes :
- Axe parallèle à l'axe OZ,
 - $R_{Cylindre} = R2$
3. un plan respectant les contraintes suivantes :
- Normale parallèle à l'axe OZ,
 - le sens de la normale est inverse à celui de la normale externe à l'arête coupante

4.3. Arêtes Type3

Mouvement rectiligne radial de l'outil TzoRz(A)

Ce mouvement génère les surfaces suivantes :

1. Deux plans (travail d'enveloppe) dont la normale est parallèle à l'axe OZ
2. Un cylindre (travail de forme) respectant les contraintes suivantes :
 - Axe parallèle à l'axe OZ,
 - $H_{Cylindre} = H$.

4.4. Arêtes Type4

Nous ne considérons dans ce qui suit que les arêtes concaves.

Mouvement radial de l'outil TxzoRz(A)

Ce mouvement génère les surfaces suivantes :

1. Un tore (travail de forme ex : *gorge*) respectant les contraintes suivantes :
 - Axe parallèle à l'axe OZ,

- Le cercle définissant le tore dans le plan OXZ appartient à la partie commune entre :
 - La portion de cercle définissant l'arête coupante,
 - la moitié de cercle définie par l'intersection du cercle définissant l'arête et le diamètre perpendiculaire au mouvement d'avance.
2. Deux cônes (concave et convexe) respectant les contraintes suivantes :
- Axe parallèle à l'axe OZ,
 - Le demi-angle au sommet est égal à l'angle du mouvement d'avance par rapport à l'axe OZ,
 - La pente de l'arête définissant le tore dans le plan XZ est égale à celle du mouvement d'avance.
 - $H_{\text{Cône}} \leq \text{avance de l'outil}$

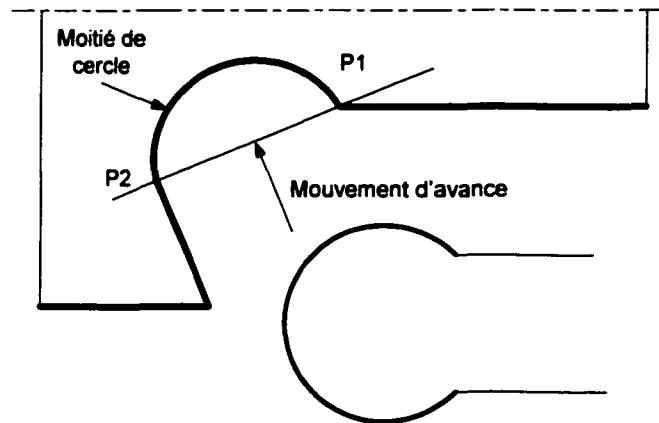


Figure 87 Génération de tore par un outil courbe

Si le mouvement est parallèle ou perpendiculaire à OZ, nous n'obtenons plus un tore en ce qui concerne la seconde surface. Nous allons expliciter celle-ci dans ce qui suit.

Mouvement rectiligne radial de l'outil TxoRz(A)

Ce mouvement génère les surfaces suivantes :

1. un plan (travail d'enveloppe) généré par les points où l'arête est tangente à l'axe OX. La normale du plan est parallèle à l'axe OZ et de sens inverse à celui de la normale extérieure à l'arête au point générant la surface. si l'arête est tangente à l'axe OX
2. Un tore tel que défini dans 4.4 dans la règle 1

Mouvement rectiligne selon l'axe OZ TzoRz(A)

Ce mouvement génère les surfaces suivantes :

1. Un cylindre (travail d'enveloppe) généré par les points où l'arête est tangente à l'axe OZ respectant les contraintes suivantes :
 - Axe parallèle à l'axe OZ
 - $R_{\text{Cylindre}} = \text{distance entre le point génératrice et l'axe OZ}$
 - Normale extérieure matière de sens contraire à celui de la normale extérieure matière de l'outil au point de génération,
2. Un tore tel que défini dans 4.4 dans la règle 1

Mouvement de rotation RyoRz(A)

Ce mouvement génère les surfaces suivantes :

1. Un tore concave respectant les contraintes suivantes :
 - Axe parallèle à l'axe OZ
 - $R2_{\text{Cône}} \geq R2$
 - Le cercle définissant ce tore est limité entre deux points tels que :
 - la normale extérieure à la matière au premier point est parallèle à la tangente à l'arête au premier point de l'arête.

- la normale extérieure à la matière au dernier point définissant le cercle est parallèle à la tangente au dernier point de l'arête.
- L'angle interne du cercle tel que défini dans le cadre du fraisage respecte la condition suivante :

$$R(h)_{Cône} \times \sin\left(\frac{2\pi - \theta}{2}\right) \geq R(h)_{Arête}$$

2. Un tore convexe respectant les contraintes suivantes :

- Axe parallèle à l'axe OZ
- Le cercle définissant ce tore est limité entre deux points tels que :
 - la normale extérieure à la matière au premier point est parallèle à la tangente à l'arête du second point de l'arête.
 - la normale extérieure à la matière au dernier point définissant le cercle est parallèle à la tangente à au premier point de l'arête.

Mouvement quelconque dans le plan XZ CxzoRz(A)

Nous considérons que tout mouvement quelconque Cxz est composé de mouvements correspondants à des mouvements circulaires Ry ou rectilignes radiaux (Tx, Tz, Txz).

ANNEXE 5
Grammaire attribuée

GRAMMAIRE ATTRIBUÉE

1. Formalisation de la grammaire attribuée

Une grammaire est une spécification formelle d'un ensemble (possiblement infini) de terminaux, dérivés d'un ensemble fini de non-terminaux grâce à un ensemble de règles de production. Ces dernières précisent les combinaisons admissibles des non-terminaux. L'application récursive des règles aux non-terminaux permet à la grammaire de générer l'ensemble appelé le langage. L'ensemble des non-terminaux N constitue pour la grammaire linguistique l'ensemble des morphèmes. L'ensemble des terminaux T est constitué de phrases syntaxiquement et sémantiquement correctes. Ces phrases sont générées suite à des combinaisons de morphèmes en respect aux règles de la grammaire.

Formellement une grammaire syntagmatique (appelée en anglais *Phrase Structure grammar*) est un T -uple $G = (N, T, P, S)$ avec :

- N est l'ensemble de non terminaux ;
- T est l'ensemble de terminaux, $N \cap T = \emptyset$;
- S est la racine des non-terminaux appelée Symbole de départ, $S \in N$;
- P est l'ensemble des règles de production, p tels que :
$$p : X_0 \rightarrow X_1 \dots X_n, \text{ avec } X_0 \in N, \text{ et } X_i \in (T \cup N).$$

[Chomsky 1957] a divisé les grammaires syntagmatiques en différents types selon leurs productions. Pour les grammaires de **type 0** il n'existe pas de restriction sur les productions. Celles-ci peuvent avoir n'importe quelle chaîne à droite ou à gauche de la production. Ce type de grammaires est trop général afin d'être utile. Les grammaires de **type 1** sont des grammaires contextuelles où les non terminaux peuvent être remplacés par des terminaux ou non terminaux en fonction du contexte. Enfin les grammaires de

type 2 sont des grammaires où chaque règle de production accepte la réécriture d'un seul symbole non-terminal à la fois par une chaîne pouvant être composée de terminaux et/ou de non-terminaux. Ces règles ne peuvent avoir qu'un seul symbole à gauche. Ces grammaires sont appelés non contextuelles ou CFG car le traitement d'un des symboles composant la proposition traitée n'affecte pas le traitement des autres parties de la structure [Shih et Shmidt 1994]. Les grammaires non contextuelles sont utilisées de manière très étendue dans le domaine de la programmation afin d'analyser et d'interpréter des programmes.

L'utilisation informatique des grammaires s'est accompagnée par un besoin d'attribuer les entités manipulées. Les attributs peuvent être évalués à partir des attributs des primitives composées en fonction des productions de la grammaire ; ou grâce à un ensemble séparé de fonctions ou règles qui ne sont pas nécessairement définies en conjonction avec les productions de la grammaire.

Knuth a proposé d'attribuer les langages non contextuels [Knuth 1968]. Les attributs sont de deux types : hérités et synthétisés. Dans chaque production d'une grammaire non contextuelle, les *fonctions sémantiques* sont spécifiées et définissent d'une part tous les attributs synthétisés des symboles du côté gauche de la production et d'autre part les attributs hérités des symboles du côté droit de la production. Dans un langage non contextuel -en principe- les attributs synthétisés seuls sont suffisants afin de définir la signification d'une chaîne, mais l'inclusion des attributs hérités mène souvent à des simplifications importantes dans l'évaluation des attributs.

Formellement une grammaire attribuée est un T-uple $\mathbf{GA} = (G, A, F)$ avec :

- $G = (N, T, P, S)$ une grammaire CFG
- $A = \bigcup_{X \in N} (H(X) \cup S(X))$ est l'ensemble des attributs, avec $H(X)$ les attributs hérités et $S(X)$ les attributs synthétisés de $X \in N$;

- $F = \bigcup_{p \in P} F(p)$; $F(p)$ est l'ensemble des fonctions sémantiques, où f_{p,a,X_i} désigne la fonction sémantique définissant l'occurrence de l'attribut $a(X_i)$ dans la règle p : $X_0 \rightarrow X_1 \dots X_n$ avec $a \in A(X_i)$.

Chaque attribut $\alpha \in U(X)$ possède un ensemble possible de valeurs D_α à partir duquel une valeur peut être sélectionnée pour chaque apparition de X dans l'indicateur syntagmatique. Les fonctions sémantiques sont utilisées afin d'assigner des valeurs aux attributs des symboles manipulés.

2. Analyse syntaxique d'un langage

2.1. Analyse descendante

Cette méthode commence avec le symbole de départ de la grammaire S . Elle procède, ensuite, à des substitutions successives des non-terminaux de S pour trouver la chaîne voulue. Un pur analyseur descendant est dit orienté vers un objectif (S). L'hypothèse est faite que la chaîne à analyser est correcte en respect avec la grammaire G considérée. Par conséquent, la première étape est de voir si la chaîne peut être réduite à la première partie $X_1 X_2 \dots X_n$ d'une production

$$S \rightarrow X_1 X_2 \dots X_n$$

Pour que l'application de la production soit valide, si X_1 est un symbole terminal, alors la chaîne analysée doit commencer avec ce terminal. Si X_1 est un non terminal, un sous-objectif est établi et essayé : *Vérifier si le début d'une chaîne peut être réduit à X_1 .* Si cela est possible, X_2 est testé, suivi de X_3, \dots, X_n . Si aucune correspondance n'est trouvée pour X_i alors l'application d'une production alternative $S \rightarrow X_1' X_2' \dots X_n'$ est tentée.

Des sous-objectifs A avec $A \in N$ sont testés de la même manière. Une production $A \rightarrow X_1 X_2 \dots X_n$ est testée afin de vérifier qu'elle peut être appliquée. Ainsi de nouveaux sous-

objectifs sont continuellement générés. Si un sous-objectif ne peut être respecté, l'échec est reporté à un plus haut niveau qui doit tester une production alternative.

Ces grammaires rencontrent des problèmes avec les règles récursives à gauche du genre $A \rightarrow A\alpha$ qui peuvent causer des boucles infinies. En effet, quand A devient sous-objectif, la première étape est de créer un sous-objectif A . Le problème de récursivité est résolu en transformant la grammaire ou l'analyseur.

2.2. Analyse ascendante

La méthode ascendante commence avec la phrase et applique les productions dans le sens contraire, essayant de réduire le symbole de la phrase. En d'autres mots, on parcourt la chaîne à la recherche des sous-chaînes qui font partie de la composante droite d'une production. Ces sous-chaînes sont ensuite remplacées par la partie gauche de la production. Un pur analyseur ascendant ne possède pas d'objectifs à long terme, à l'exception de l'objectif implicite S .

2.3. Conclusion

Une comparaison générale entre les deux méthodes d'analyse est difficile pour deux raisons. Tout d'abord certaines grammaires sont analysées de manière plus efficace par des approches descendantes et d'autres par des méthodes ascendantes, donc l'efficacité dépend de la grammaire. D'autre part, si une grammaire particulière est analysée inefficacement par une méthode, une version transformée, qui peut être analysée efficacement par l'une des méthodes, peut en général être trouvée. [Griffiths et Petrick 1965] ont fait une comparaison entre des analyseurs en se basant sur les machines de Turing correspondant à chacun de ces analyseurs. Ils ont montré qu'il existe toujours une grammaire équivalente qui peut être analysée par une méthode descendante de manière équivalente à l'originale qui a été analysée par une méthode ascendante.

3. Analyseur descendant LL(1)

3.1. Introduction

Un problème des analyseurs descendants est le non déterminisme du choix des règles de production avec la conséquence de retour en arrière (backtracking). Pour résoudre ce problème, il faut se baser sur les symboles terminaux de la chaîne examinée. Un analyseur LL(k) peut travailler de manière déterministe s'il lui est permis de connaître k symboles à analyser à droite de sa position courante [Lewis et Stearns 1968]. L'idée derrière les grammaires LL(k), est que si nous tentons de construire une dérivation à gauche $S \Rightarrow^* g w$ et que nous ayons déjà construit

$$S \Rightarrow^* g \alpha_1 \Rightarrow^* g \dots \dots \Rightarrow^* g \alpha_i$$

Tel que $\alpha_i \Rightarrow^* g w$, alors nous pouvons construire α_{i+1} en connaissant uniquement α_i et les k symboles de w de la position courante de l'analyseur.

Les grammaires LL(0) sont très restrictives, tandis que les grammaires LL(k) telles que $k > 1$ sont difficiles à créer et à mettre en œuvre. Aussi, avons nous choisi les analyseurs descendants LL(1) (i.e. basés sur la prévision du seul symbole).

Ces analyseurs se basent sur deux ensembles afin de prévoir les règles à appliquer : *PREMIER* et *SUIVANT*.

Pour tout $\alpha \in G$, l'ensemble *PREMIER* représente l'ensemble de tous les *terminaux* qui sont le début d'une chaîne dérivable à gauche partant de α :

- $\text{PREMIER}(\alpha) = \{x \mid \alpha \Rightarrow^* g x \gamma / \text{pour } \gamma \text{ donné}\}$
- $\epsilon \in \text{PREMIER}(\alpha)$ si et seulement si $\alpha \Rightarrow^* \epsilon$ (ϵ symbole nul arrêt de production)

Si "a" est un symbole terminal, alors $\text{PREMIER}(a) = \{ a \}$; et $\text{PREMIER}(\epsilon) = \{ \}$. Dans le cas d'une production de la forme $\alpha \Rightarrow^* g B\beta$, alors $\text{PREMIER}(B) \subset \text{PREMIER}(\alpha)$. De plus, si B peut produire ϵ , alors $\text{PREMIER}(\beta) \subset \text{PREMIER}(\alpha)$.

SUIVANT est défini par l'ensemble des terminaux pouvant suivre éventuellement un symbole non terminal. Dans une production de la forme $\alpha \Rightarrow^* g \dots BX\dots$ où X est un terminal ou non terminal, α et B deux symboles non terminaux, $\text{PREMIER}(X)$ est inclus dans *SUIVANT*(B), si B et X sont séparés par un ou plusieurs non terminaux pouvant produire ϵ .

Un analyseur LL(1) doit respecter les deux contraintes suivantes :

- (1) Soient deux productions distinctes $A \rightarrow \alpha \mid \beta$ alors $\text{Premier}(\alpha) \cap \text{Premier}(\beta) = \emptyset$
- (2) Pour tout symbole non terminal A à partir duquel on peut générer ϵ l'intersection de $\text{PREMIER}(A)$ avec *SUIVANT*(A) doit être vide. En effet, dans le cas d'une production de la forme :
 - i. $S \Rightarrow A a$
 - ii. $A \Rightarrow a \mid \epsilon$

L'analyseur, lorsqu'il est en présence du symbole "a", ne sait pas s'il se rapporte à la règle (i) ou à la règle (ii).

ANNEXE 6
Les graphes conceptuels

LES GRAPHES CONCEPTUELS

1. Représentation des données de conception devant être analysées d'un point de vue d'usinage

1.1. Les graphes et graphes conceptuels

Les FAG et FAAG ont l'inconvénient d'être limités à la seule représentation de la géométrie et topologie des produits. Afin de pallier leurs manques, [Salomons 1995] a proposé l'utilisation du concept de graphes conceptuels de [Sowa 1976]. Ces graphes sont des graphes bipartites i.e. contenant deux types de nœuds nommés : "concept", et "relation conceptuelle". Chaque relation conceptuelle possède un ou plusieurs arcs, chacun devant lier à un concept. Si une relation conceptuelle possède n-arcs, elle est dite n-adique. Monoadique est synonyme de 1-adique, biadique est synonyme de 2-adique. Un concept peut à lui seul constituer un graphe conceptuel, mais toute relation conceptuelle doit être reliée à un concept. Les concepts sont représentés par des rectangles. Les relations conceptuelles sont représentées par des cercles. La figure suivante montre un exemple de graphe conceptuel proposé par Sowa. (<http://www.bestweb.net/~sowa/cg/cgdpansw.htm>)

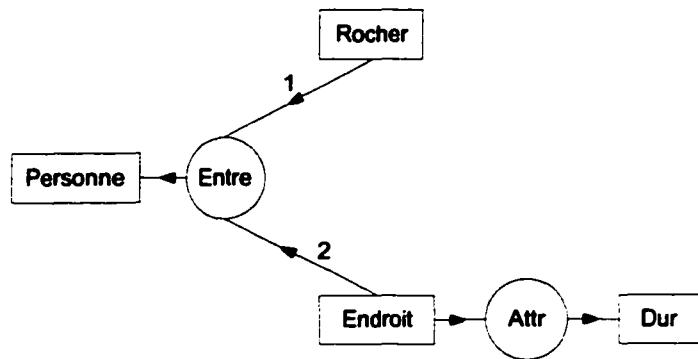


Figure 88 Exemple de graphe conceptuel

Chaque relation possède une signature qui permet de contraindre les types de concepts qui peuvent être liés à ses arcs. Dans l'exemple précédent la signature de *Entre* est (Entité, Entité, Entité), qui montre que les trois concepts doivent être de type entité, qui est, dans la classification de Sowa, le type le plus général et qui n'impose pas de contraintes. Ce graphe peut être lu comme : "*Une personne se situe entre un rocher et un endroit dur*". Les concepts sont (Personne, Rocher, Endroit et Dur). La direction des arcs dépend des définitions des relations. Ainsi le sens de l'arc dirigé reliant les deux concepts endroit et dur peut être interprété comme suit :

- un endroit possède un Attribut (*A place which has an Attribute*) ou,
- un attribut qui vaut dur (*An Attribute which is Hard*).

L'utilisation des graphes conceptuels nécessite une étape préliminaire durant laquelle il est nécessaire de déterminer le contexte d'utilisation ainsi que, les concepts et relations conceptuelles. Le contexte d'utilisation des graphes conceptuels dans les travaux de [Salomons 1995] est la représentation d'entités "importantes" lors du processus de (re)conception. Les entités considérées comme les objets des graphes conceptuels sont: assemblage, composant, caractéristique de forme, et des entités géométriques de plus bas niveau. Une taxonomie des objets et relations a été proposée et est illustrée ci-dessous.

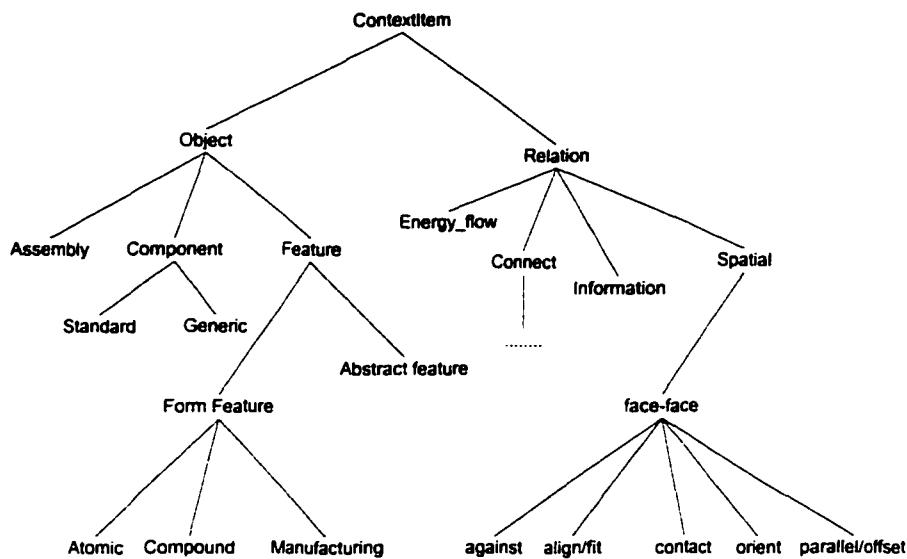


Figure 89 Taxonomie des objets et relations dans FROOM [Salomons 1995]

La taxonomie présentée par Salomons permet de voir que les graphes conceptuels permettent de représenter les données qu'il est nécessaire d'analyser du point de vue de l'usinage.

2. Représentation des données du modèle produit par les graphes conceptuels

Afin de représenter les propositions du concepteur, les objets considérés seront les faces et les caractéristiques de forme extraites par le biais de la méthodologie de Deneux. Les relations conceptuelles de notre graphe seront constituées des entités suivantes :

- les données de précision intrinsèques aux surfaces (état de surface, tolérance de forme),
- les tolérances extrinsèques aux surfaces (tolérances de battement et de position),
- les dimensions traduisant les besoins fonctionnels (les tolérances dimensionnelles sont considérées comme des attributs de ces dimensions),
- la caractéristique de matériau,

- les adjacences entre faces.

L'arbre suivant montre la taxonomie que nous proposons pour les objets et relations des graphes conceptuels que nous comptons utiliser.

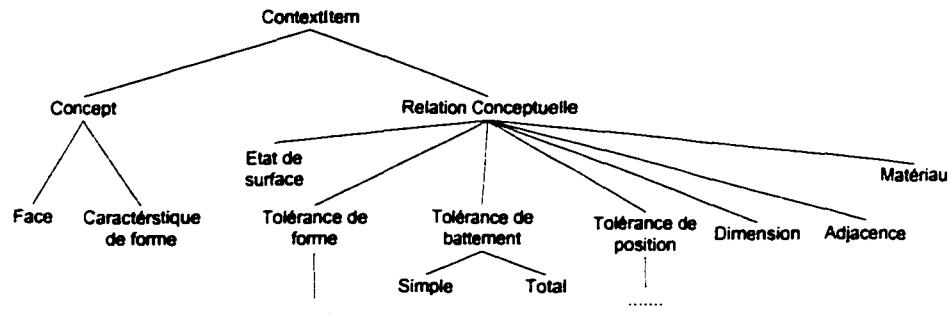


Figure 90 Taxonomie des objets et relation conceptuelles

Dans ce qui suit, nous allons voir en fonction des relations du graphe conceptuel la possibilité de diriger ou de numérotter les arcs du graphe conceptuel représentant le produit. Ces informations servent à déduire les contraintes d'antériorité d'usinage.

Tableau IX
Propriétés des arcs en fonction des relations conceptuelles

Relations		Existence et sens des arcs dirigés	Arcs Numérotés
Dimension	Face Usinée-Face Usinée	Non	Non
	Face Usinée-Face Brute	Brute → Usinée	
Tolérance géométrique		Surfaces de référence → Surface référencée	Oui s'il existe plus de deux surfaces de référence
Adjacence		Non	Non

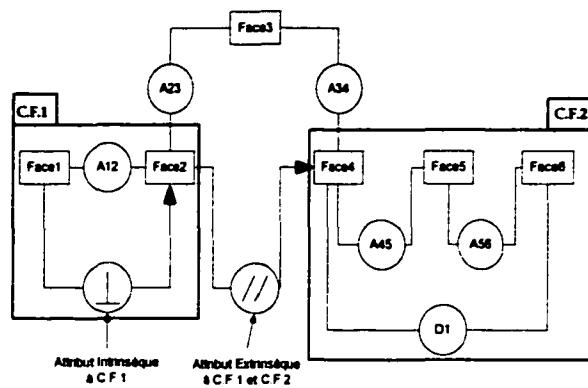


Figure 91 Représentation des données du modèle produit par un graphe conceptuel

ANNEXE 7
Outils informatiques nécessaires

OUTILS INFORMATIQUES NÉCESSAIRES

1. Formalisme orienté objet UML

Afin de décrire les informations relatives au modèle produit et aux caractéristiques d'usinage, nous adoptons l'approche orientée objet. L'attrait de cette approche réside dans les avantages qu'elle fournit dans la conception et le développement de systèmes logiciels complexes, dont nous pouvons citer [Usher 1995] :

- De la conception orientée objet résultent des petits systèmes en comparaison aux approches algorithmiques ou procédurales,
- Les systèmes orientés objet sont plus flexibles en terme de modification et de gestion de l'évolution,
- Ces systèmes sont conçus pour évoluer incrémentalement, rendant facile la création et la maintenance de systèmes plus grands et plus complexes,
- La décomposition orientée objet résulte en modules réutilisables qui peuvent être appliqués au développement d'autres systèmes, réduisant ainsi l'effort de développement.

Cette approche nécessite d'identifier un ensemble d'objets du système étudié et d'exprimer les opérations du système comme étant des interactions entre ces objets [Booch et al. 1998]. Contrairement aux approches algorithmiques, l'approche orientée objet est construite autour d'un ensemble de classes qui modélisent le comportement d'objets appartenant au monde réel. Le comportement est défini en fonction de ce qu'un objet du monde réel peut accomplir. Les principaux éléments caractérisant l'approche orientée objet sont l'**abstraction**, l'**encapsulation**, la **hiérarchie** et le **polymorphisme**. Nous allons fournir une courte définition de chacun de ces éléments. L'**abstraction** permet aux objets de se définir par ce qu'ils savent d'eux-mêmes (leur état interne, leurs

caractéristiques) et les actions qu'ils accomplissent (leurs opérations ou leurs comportements). L'**encapsulation** consiste à inclure les données avec les fonctions et traite également de la visibilité des classes. Elle consiste à cacher les détails d'une classe qui ne contribuent pas à ses caractéristiques essentielles. La **hiérarchie** représente l'ordre des objets du monde réel. Deux types de hiérarchie existent : la composition (est partie de), et l'héritage (est du type de). Le **polymorphisme** rend possible à une classe d'accéder aux méthodes du type de base sans connaître les particularités des classes dérivées. Ceci résulte en un système qui peut-être facilement étendu.

Le modèle UML propose différents outils afin de modéliser les aspects statiques et dynamiques d'un système. Afin de modéliser les aspects statiques de nos concepts, nous utiliserons le *diagramme de classes*. Ce diagramme permet de montrer un ensemble de classes, leurs collaborations et leurs relations. [Booch et al. 1998]. Nous allons présenter les principaux éléments constitutifs de ces diagrammes que nous utiliserons dans notre modélisation.

Les diagrammes de classe contiennent en général :

- *Des classes* : une classe est une description d'un ensemble d'objets qui partagent les mêmes attributs, opérations relations et sémantique.
- *Des relations de dépendance* : le changement dans la classe de référence peut affecter la classe référencée mais non réciproquement.
- *Des relations de généralisation* : expriment la contrainte "est de type de", et exprime la liaison entre une classe mère et les classes qui en dérivent.
- *Des relations d'association* : relation spécifiant que les objets d'une des classes associées sont liés à ceux de l'autre. Chaque relation peut avoir un nom. Chaque classe peut avoir un rôle et une cardinalité. Il peut exister des associations n-aires connectant plusieurs classes.

- *Des relations d'agrégation* : association entre deux classes représentant une relation entre deux classes au même niveau. Elle peuvent exprimer la relation (partie de/contenant)

Voici un schéma regroupant certains des concepts que nous avons présenté ci-dessus.

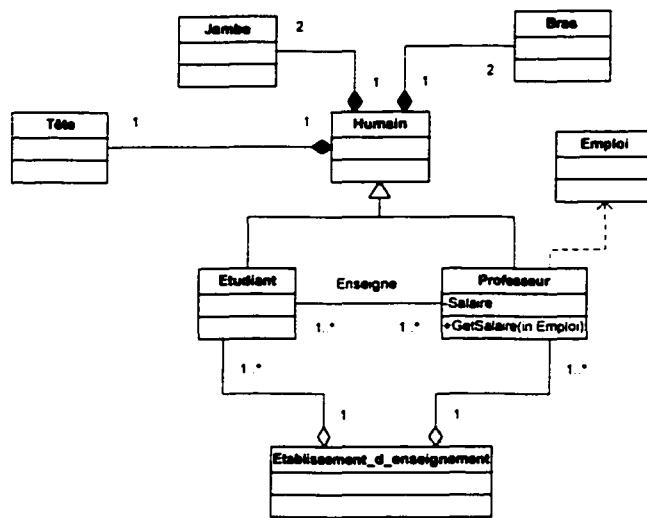


Figure 92 Exemple de diagramme de classes

Nous pouvons voir qu'un être humain peut être un étudiant ou un enseignant (spécialisation). Tout être humain possède (agrégation) deux jambes, deux bras et enfin une seule tête. Un professeur enseigne à un ou plusieurs étudiants. Par ailleurs, un étudiant possède un ou plusieurs professeurs. La dernière association affichée est la dépendance. En effet, le salaire de tout enseignant dépend de son emploi. Enfin, tout étudiant ou enseignant appartient à un seul établissement d'enseignement.

Outre les diagrammes de classes, nous utilisons les diagrammes des cas d'utilisation. Ceux-ci permettent d'illustrer les fonctionnalités externes aux composants constituant une application. Un cas d'utilisation est une séquence d'interactions d'un acteur avec le système étudié, et produit des résultats visibles par l'acteur. Un acteur est quelque chose

ou quelqu'un en dehors du système qui interagit directement avec celui-ci, ex un utilisateur ou des systèmes externes ayant besoins d'informations du système courant. Les liaisons entre les cas d'utilisation peuvent être de deux types :

- *extends* : montre des fonctionnalités optionnelles ou des comportements différents d'un système. Dans l'exemple ci-dessous, le cas d'utilisation "normal" modélisé correspond à la capture d'un marché entre un client et un vendeur. Le cas d'utilisation "exceptionnel" correspond à un marché conclu portant sur une somme dépassant les limites prescrites pour la catégorie du client.
- *uses* : indique que le cas d'utilisation utilise la fonctionnalité d'un autre cas d'utilisation. Ainsi le cas "Analyse de risque" utilise les résultats du cas d'utilisation "évaluation".

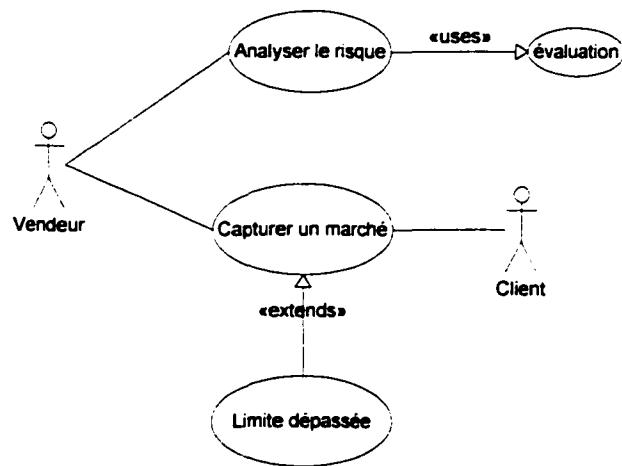


Figure 93 Diagramme de cas d'utilisation

2. L'architecture COM

COM (*Component Object Model*) est une spécification pour créer des composants logiciels et en construire des applications. Au contraire des applications traditionnelles

qui ne peuvent être modifiées une fois compilées, la technologie COM permet de diviser les applications en différentes composants se connectant les uns aux autres lors de l'exécution (*Run-Time*). Un composant est une mini application compilée et liée (*compiled and linked*).

COM fournit les caractéristiques suivantes aux applications logicielles : la personnalisation, les librairies de composants, et les composants distribués. Les deux premiers points étant simples à appréhender nous n'expliquerons que le dernier. Si l'application est divisée en composants fonctionnels, il est possible de substituer un composant par un autre dont le seul but est communiquer avec un composant situé à distance. Dans la figure qui suit, les composants C et D ne sont pas situés sur la même machine que l'application. Ils ont été remplacés localement par deux composants qui transmettent les requêtes aux composants distants. L'application peut, ainsi, ignorer où les composants se situent vraiment.

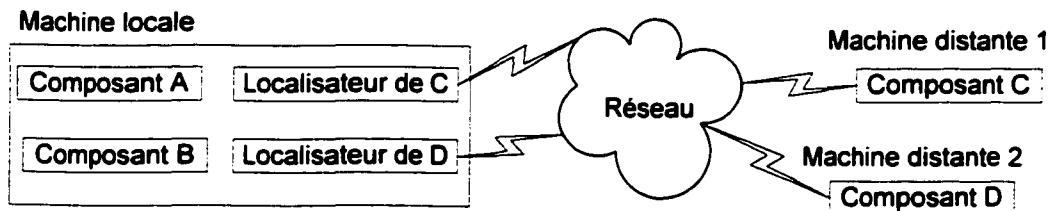


Figure 94 Composants distribués

Les avantages de cette architecture résultent de la capacité des composants à se lier et délier dynamiquement aux applications et entre eux. Pour ce faire, les composants doivent respecter deux exigences. Ils doivent être capables :

- de se lier dynamiquement (sinon il faudrait lier et compiler l'application pour chaque modification ou ajout de composant comme pour les applications monolithiques),

- d'encapsuler les détails de leur implantation.

Le lien dynamique requiert l'encapsulation. En effet, la modification d'un composant exige de le déconnecter afin d'en connecter un nouveau. La connexion des deux composants à l'application doit être similaire, sinon, il faudra réécrire recompiler et relier les composants de l'application connectés au composant à modifier. La connexion entre différents composants est faite par le biais d'interfaces. Ces interfaces ne doivent pas être modifiées d'une version de composant à une autre. Pour que ces exigences soient toujours respectées, il faut que :

- le langage d'implantation utilisé soit caché (ex : C++, JAVA, etc.)
- les fichiers soient livrés sous forme binaire (DLL ou EXE) (compilés, liés et prêts pour utilisation) afin de cacher le langage d'implantation.
- Les interfaces ne doivent pas changer d'une version à l'autre,
- Les composants doivent être automatiquement localisables sur le réseau.

En conclusion, COM est une spécification pour construire des composants qui peuvent être dynamiquement interchangés. Elle n'est pas une API (*Application Program Interface*), mais une manière d'écrire des composants permettant de fournir des services sous la forme d'interfaces de programmation. L'avantage d'utiliser l'architecture COM est qu'elle permet :

- de réutiliser du code testé et utilisé par d'autres applications, et de développer des applications qui peuvent être personnalisées selon les besoins des utilisateurs,
- de corriger facilement des anomalies,
- d'ajouter des caractéristiques à l'application après qu'elle ait été distribuée aux clients, évitant ainsi une réécriture totale,
- de développer indifféremment des applications distribuées ou non.

ANNEXE 8

Formalisation de la «capabilité» de génération d'un procédé de Fraisage

FORMALISATION DE LA «CAPABILITÉ» DE GÉNÉRATION D'UN PROCÉDÉ DE FRAISAGE

1. Détermination des surfaces générées par les arêtes coupantes de la Fraise deux tailles Torique

L'arête A1 peut être animée de mouvements de translation et de rotation dans le plan XY. Les surfaces générées par l'application de ces mouvements sont les suivantes.

Le mouvement de translation, de A1, dans le plan XY génère

1. un plan respectant les contraintes suivantes :

- la normale est perpendiculaire à l'axe de la broche,
- Tangent à la surface élémentaire,

2. un cylindre concave respectant les contraintes suivantes :

- Axe est parallèle à l'axe de la broche,
- $R_{Cylindre} = R$
- L'angle $\theta_{Cylindre}$ doit respecter la contrainte d'accessibilité de l'outil suivante : $\theta_{Cylindre} \leq \pi$

Le Mouvement de rotation, de A1, dans le plan XY génère :

3. un Cylindre concave respectant les contraintes suivantes :

- Axe est parallèle à l'axe de la broche,
- $R_{Cylindre} \geq R$

4. Un Cylindre convexe :

- Axe est parallèle à l'axe de la broche,

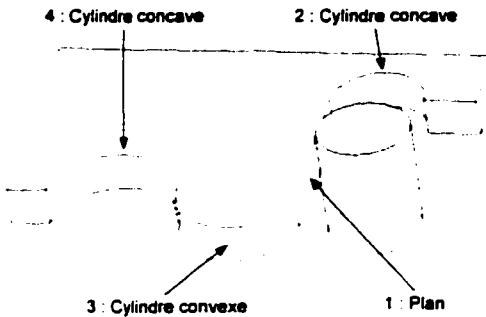


Figure 95 Surfaces générées par A1

La seconde arête A2 peut être animée par des mouvements de translation et de rotation.

Le mouvement de translation, de A2, dans le plan XY génère

5. Un tore respectant les contraintes suivantes :

- Axe1 parallèle à l'axe OZ,
- $R_{2\text{Tore}} = R_2$,
- $R_{1\text{Tore}} = R_1$,
- $\beta_{\text{Tore}} \leq \pi/2$,
- $\theta \leq \pi$ (contrainte d'accessibilité de l'outil).
- La section plane du tore est concave.
- $R_1 - R_2 \leq R \leq R_1$

6. Un cylindre respectant les contraintes suivantes :

- $R_{\text{Cylindre}} = R$
- $\theta_{\text{Cylindre}} \leq \pi/2$
- Axe_{Cylindre} perpendiculaire à l'axe OZ
- Le cylindre est concave

A propos de la concavité du tore, nous rappelons que nous définissons la concavité du tore dans une section du tore incluant l'axe principal.

Le mouvement de rotation, de A2, dans le plan XY génère :

7. Le premier type de tore respecte les contraintes suivantes :

- Axe1 parallèle à l'axe OZ,
- $R2_{Tore} = R2$,
- $R1_{Tore} \geq R1$,
- $\beta_{Tore} \leq \pi/2$
- La section plane du tore est concave
- $R1 - R2 \leq R \leq R1$

8. Le second type de tore respecte les contraintes suivantes :

- Axe1 parallèle à l'axe OZ,
- $R2_{Tore} = R2$,
- $\beta_{Tore} \leq \pi/2$
- La section plane du tore est concave
- $R1 \leq R \leq R1 + R2$

Le tore défini dans la cinquième règle correspond à un cas particulier du tore décrit dans la règle 7. Il n'existera, par conséquent, au niveau de la grammaire que la règle de définition décrivant la génération du tore décrit en 7. Voici par ailleurs une illustration de ces surfaces.

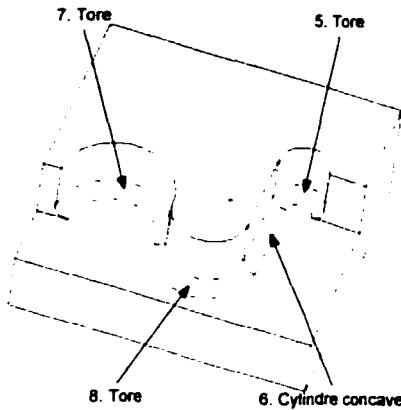


Figure 96 Surfaces générées par A2

L'arête A3 est animée de mouvement plan quelconque.

Le mouvement quelconque, de A3, dans le plan XY génère

1. un plan respectant les contraintes suivantes

- la normale est parallèle à l'axe OZ.

2. Spécification des règles de la grammaire d'usinage

Nous ne présentons, dans ce qui suit, que les règles de la grammaire que nous utilisons dans l'exemple de validation d'usinage de la caractéristique d'usinage A-41-B.

Règles de définition

Règle 1 : <Plan1> → <Terminal_Plant>

On fixe l'orientation du procédé : Normale du plan \perp Axe de la broche

Fonctions sémantiques :

vérification dimensionnelle

Vérifier que Longueur \leq Course selon Z

Vérifier que Largeur $\leq \sqrt{C_X^2 + C_Y^2}$ [avec C_X : Course selon X]

Vérification technologique

Vérifier que l'état de surface et la tolérance de forme spécifiés sont atteignables

Attribution du non-terminal <Plan1>

Arête = A1 + les attributs relatifs à la surface

Les deux règles suivantes expriment un cylindre pouvant être obtenu en contournage.

Règle 2 : <Cylindre2_1> → <Terminal_Cylindre>

<Terminal_Cylindre> doit être convexe pour que la règle lexicale soit vraie

On fixe l'orientation du procédé : Axe de la broche // Axe du cylindre (sens positif de l'axe du cylindre)

Fonctions sémantiques :

vérification dimensionnelle

Vérifier que Hauteur du cylindre ≤ Course selon l'axe Z de la machine

Vérification technologique

Vérifier que l'état de surface et la tolérance de forme spécifiés sont atteignables

Attribution du non-terminal <Cylindre2>

Arête = A1 + les attributs relatifs à la surface

Règle 3 : <Cylindre2_2> → <Terminal_Cylindre>

<Terminal_Cylindre> doit être convexe pour que la règle lexicale soit vraie

On fixe l'orientation du procédé : Axe de la broche // Axe du cylindre (sens négatif de l'axe du cylindre)

Fonctions sémantiques :

vérification dimensionnelle

Vérifier que Hauteur du cylindre ≤ Course selon l'axe Z de la machine

Vérification technologique

Vérifier que l'état de surface et la tolérance de forme spécifiés sont atteignables

Attribution du non-terminal <Cylindre2>

Arête = A1 + les attributs relatifs à la surface

Règle 4 : <Tore_1> → <Terminal_Tore>

La section de <Terminal_Tore> doit être concave pour que la règle lexicale soit vraie

On fixe l'orientation du procédé : Axe de la broche // Axe1 du Tore

Fonctions sémantiques :

vérification dimensionnelle

Axe1 parallèle à l'axe OZ,

$R2 = R2(A2)$,

$R1 \geq R1(A2)$,

$B \leq \pi/2$

$R1(A2) - R2(A2) \leq R \leq R1(A2)$

Vérification technologique

Vérifier que l'état de surface et la tolérance de forme spécifiés sont atteignables

Attribution du non-terminal <Tore>

Arête = A2 + les attributs relatifs à la surface

Règle 5 : <Tore_2> → <Terminal_Tore>

La section de <Terminal_Tore> doit être concave pour que la règle lexicale soit vraie

On fixe l'orientation du procédé : Axe de la broche // Axe1 du Tore

Fonctions sémantiques :

vérification dimensionnelle

Axe1 parallèle à l'axe OZ,

$R2 = R2(A2)$,

$B \leq \pi/2$

$R1(A2) \leq R \leq R1(A2) + R2(A2)$

Vérification technologique

Vérifier que l'état de surface et la tolérance de forme spécifiés sont atteignables

Attribution du non-terminal <Tore>

Arête = A2 + les attributs relatifs à la surface

Règle 6 : <Plan_2> → <Terminal_Plan>

On fixe l'orientation du procédé : Axe de la broche de même sens que la normale extérieure à la matière

Fonctions sémantiques :

vérification dimensionnelle

Vérifier que Largeur et Longueur $\leq \sqrt{C_x^2 + C_y^2}$

Vérification technologique

Vérifier que l'état de surface et la tolérance de forme spécifiés sont atteignables

Attribution du non-terminal <Plan1>

Arête = A3 + les attributs relatifs à la surface

<Association> est en général composé d'une chaîne de non-terminaux relatifs à des surfaces. Les attributs de <Association> sont composés de ceux du premier non-terminal de la chaîne que nous nommerons <Surface> et de l'angle matière lié à l'arête d'intersection des deux surfaces inclus dans le non-terminal <Arête>.

R_{ASSOC10} : <Association> → <Surface> <Association>

POUR une orientation fixée

SI l'arête coupante est similaire pour les deux surfaces et vaut Procédé1.A1 **FAIRE** {

 Calculer le volume élémentaire VE1 attaché à <Surface> au niveau de <Arête>.

 Calculer le volume élémentaire VE2 attaché à <Surface> au niveau de <Arête>.

SI (VE1 est tangent ou ne coupe pas <Surface>) **ET** (VE2 est tangent ou ne coupe pas <Surface>) **FAIRE** {

Succès de la règle d'association
 }
SINON FAIRE {
Echec de la règle
}FINSI
}FINSI

R_{ASSOC11} : <Association> → <Surface> <Association'>

POUR une orientation fixée

SI l'arête coupante est similaire pour les deux surfaces et vaut Procédé1.A2 **FAIRE {**

 Calculer le volume élémentaire VE1 attaché à <Surface> au niveau de <Arête>.

 Calculer le volume élémentaire VE2 attaché à <Surface'> au niveau de <Arête>.

SI (VE1 est tangent ou ne coupe pas <Surface'>) **ET** (VE2 est tangent ou ne coupe pas <Surface>) **FAIRE {**

Succès de la règle d'association

 }

SINON FAIRE {

Echec de la règle

}FINSI

}FINSI

R_{ASSOC12} : <Association> → <Surface> <Association'>

POUR une orientation fixée

SI l'arête coupante est similaire pour les deux surfaces et vaut Procédé1.A1 **FAIRE {**

 Calculer le volume élémentaire VE1 attaché à <Surface> au niveau de <Arête>.

 Calculer le volume élémentaire VE2 attaché à <Surface'> au niveau de <Arête>.

SI (VE1 est tangent ou ne coupe pas <Surface'>) **ET** (VE2 est tangent ou ne coupe pas <Surface>) **FAIRE {**

Succès de la règle d'association

```

    }
SINON FAIRE {
    Echec de la règle
}FINSI
}FINSI

```

R_{ASSOC13} : <Association> → <Surface> <Association’>

POUR une orientation fixée

SI les arêtes coupantes sont A1 et A2 **FAIRE {**

Si l'angle matière du terminal <Arête> est égal à l'angle extérieur à la matière des arêtes coupantes **FAIRE {**

Succès de la règle d'association

}

SINON FAIRE {

Echec de la règle

}FINSI

}FINSI

R_{ASSOC14} : <Association> → <Surface> <Association’>

POUR une orientation fixée

SI les arêtes coupantes sont A2 et A3 **FAIRE {**

Si l'angle matière du terminal <Arête> est égal à l'angle extérieur à la matière des arêtes coupantes **FAIRE {**

Succès de la règle d'association

}

SINON FAIRE {

Echec de la règle

}FINSI

}FINSI

R_{ASSOC15} : <Association> → <Surface> <Association’>

Si <Association> est NUL ET (Arête génératrice de <Surface> est A1 OU A2 OU A3)

{

Les attributs de <Association> sont mis égaux à ceux de <Surface>

Succès de la règle

}

Les règles d'association de type 2 sont surtout des règles permettant de propager les attributs entre différents non terminaux.

R_{ASSOC20} : <Association> → <Arête> <Association>

L'attribut <Surface'> du non terminal <Association> récupère les attributs du premier non terminal de la <Surface> contenu dans le non terminal <Association>

L'attribut <Arête'> du non terminal <Association> récupère l'angle matière inclus dans le non terminal <Arête>

R_{ASSOC30} : <Association> → \emptyset (l'ensemble vide)

BIBLIOGRAPHIE

Bahrami, A., Dagli, C.H. (1993). *Models of Design Processes. Concurrent Engineering: Contemporary Issues and Modern Design Tools*. Parsaei, H.R. and Sullivan W.G., editors, 113-126, Chapman and Hall.

Ben Amara, A. (1998). *Contribution à l'intégration de la composante calcul dans une démarche de conception fonctionnelle intégrée*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France.

Booch, G., Rumbaugh, J., Jacobson, I. (1999) *The unified modeling language user guide*. Addison-Wesley object technology series. ISBN 0-201-57168-4

Boothroyd, G. (1988). *American Machinist*. 132, August, 54-7.

Boothroyd, G., Dewhurst, P. (1987). *Concevoir pour concevoir et assembler par robot*. ISBN 2-85400-110-9

Boothroyd G., Dewhurst P., Knight W. (1994). *Product Design for manufacture and assembly*", ISBN : 0-8247-9176-2

Bourgeois, R. Cognet, R. (1994). *Memotech seconde productique*. Editions Casteilla ISSN 0986-4024

Bradley, H.D., Maropoulos, P.G. (1998). *A relation-based product model for computer-supported early design assessment*", Journal of Material processing Technology 76, 88-95

Chang, T-C. (1990). *Expert process planning for manufacturing*", ISBN 0-201-18297-1

Cheng, C.-C.P., Gadh, R. (1996). *Feature Based approach for set-up minimization of process design from product design*. Computer Aided Design. 28(5), pp. 321-332.

Chep, A., Tricarico, L. (1999). *Object-oriented analysis and design of a manufacturing feature representation*. International Journal of Production Research, 37(10), 2349-2376

Chevalier, Bohan, (1993). *Guide du technicien en productique pour la maîtrise de la production industrielle*. Editions Hachette, ISBN 2.01.020108.6.

Chomsky, N. (1957). *Syntactic structures*. The Hague: Editions Mouton.

- Chuang, S.H., Henderson, M.R. (1991). *Compound feature recognition by web grammar parsing*. Research in Engineering Design, 2(3), 147-158
- Chu, C-C, P., Gadh, R. (1996). *Feature Based approach for set-up minimization of process design from product design*. Computer Aided Design, 28(5), 321-332
- Cocquebert, E., Chaouch, D., Soenen, R. (1991). *The functionalities : A continuous Information Flow between CAD and CAPP*. Conférence sur la préparation à la fabrication de formes complexes utilisant des méthodes d'intelligence artificielle. Gaussig, RFA, 27-29
- De Martino, T., Falcidieno, B., Giannini, F. (1994). *An adaptive feature recognition process for machining contexts*. Advances in engineering software, 20, 91-105.
- Dean, E. B. (1989). *Parametric Cost Analysis: A Tutorial*. Second Joint National Conference of the National Estimating Society and the Institute of Cost Analysis, Washington DC, 5-7
- Deneux, D. (1993). *Méthodologie de reconnaissance de caractéristiques d'usinages dans un modèle technologique de produit*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France.
- Dietrich, R., Garsaud, D., Gentillon, S., Nicolas. (1981). *Précis de méthodes d'usinage, méthodologie, production et normalisation*. AFNOR, Nathan, ISSN 0765-5142
- Dong, J., Parsaei, H.R., Leep, H.R. (1996). *Manufacturing process planning in a Concurrent design and manufacturing environment*. Computers industrial engineering, 30(1), 83-93
- Feng, C.X., Kusiak, A., Huang, C.C. (1996). *Cost evaluation in design with form features*. Computer aided design, 28(11), 897-885,
- Gavankar, P, Henderson, M.R. (1989). *Graph-based Extraction of protrusions and depressions from boundary representations*. Computer Aided Design, 22 (7), 442-450.
- Geiger, T.S., Dilts, D. (1996). *Automated Design-to cost: Integrating costing into the design decision*. Computer-Aided Design, 28(6/7), 423-438
- Griffiths, T.V., Petrick, S.R. (1965) *On the relative efficiencies of context-free grammar*, Communications of the ACM, 8(5), 289-300
- Gupta, S.K., Kramer, T.R., Nau, D.S., Regli, W.C., Zhang, G. (1994). *Building MSREV models for CAM applications*. Advances in engineering Software 20 (2/3) pp. 121-139

- Gupta, S.K., Nau, D.S. (1995). *A systematic Approach for analyzing the manufacturability of machined parts*. Computer Aided Design 27(5) 343-342
- Han, J.H., Requicha, A.A.G., (1994). *Incremental recognition of machining features*. Computers in Engineering, Proceedings of the International Conference and Exhibit, Proceedings of the 1994 ASME International Computers in Engineering Conference and Exhibition. Part 1 (of 2), Minneapolis, MN, USA. 143-149
- Han, J.H., Requicha, A.A.G., (1995). *Integration of feature based design and feature recognition*. ASME Database Symposium, 1995, Computers in Engineering, Proceedings of the 1995 Database Symposium, Boston, MA, USA. 569-578
- Han, J.H., Requicha, A.A.G., (1998) *Feature recognition from CAD models*. IEEE Computer Graphics and Applications, 18(2), 80-94
- Hartley, J.R. (1992). *Concurrent Engineering*. Productivity Press, Portland, Oregon, ISBN 1-56327-006-4
- Huthwaite, B. (1987). *Product design for manufacture and assembly: the five fundamentals*. Proceedings of the 2nd International Conference on Product Design for Manufacture and Assembly, Newport, Rhode Island
- Jacquet, L. (1998). *Contribution à l'élaboration d'une démarche de spécification fonctionnelle*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France.
- Jaques, W.S., Billingsley, J., Harrison D, (1991). *Generative feature-based design-by-constraints as a means of integration within the manufacturing industry*. Computer Aided Engineering Journal, 261-267.
- Kim, Y.S. (1992). *Recognition of form features using convex decomposition*, Computer Aided Design, Vol. 24 (9), 461-476
- Klocke, F., Fallböhmer, M., Kopner, A., Trommer, G. (2000). *Methods and tools supporting modular process design*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 16, 411-423
- Knuth, (1968). *The Art of Computer Programming*. Fundamental Algorithms, Addison-Wesley
- Ko, H., Kim, M., Park, H., Kim, S. (1994) *Face Sculpturing Robot with Recognition Capabilities*, Computer Aided Design, 26(11), 814-821

- Kramer, T.R., (1992) *A library of material shape element volumes (MSREVs)*. Technocal Report NISTIR 4809, The national Institute of Standards and Technology
- Kumar, A.S, Salim, F.K, Nee A.Y.C., (1996). *Automatic recognition of design and machining features from prismatic parts*. The International Journal of Adv. Manufacturing Technology, 11, 136-145.
- Lewis, P.M., Stearns, R.E. (1968). *Syntax-Directed Transduction*. Journal of ACM, 465-488.
- Lin, A.C., Lin, S.-Y., Cheng, S.-B. (1997). *Extraction of manufacturing features from a feature based design model*. International Journal of Production Research. 35(12), 3249-3288.
- Liu, T.I., Yang, X.M., Kalambur, G.J. (1995). *"Design for machining using expert system and fuzzy logic approach*. Journal of Materials Engineering and Performance, 4(5) 599-609
- Mascle, C., Dupinet, E., Maranzana, R. (1994). *Feature Modeling in Assembly Planning*. Proceedings of the IFIP international Conference on Feature modeling and recognition in advanced CAD/CAM Systems. 605-625.
- Maltais, Y. (1994). *Utilisation des grammaires régulières pour la liaison des procédés d'usinage aux caractéristiques d'usinage*. Thèse de maîtrise, École de technologie supérieure
- Marefat, M., Kashyap, R.L. (1990) *Geometric reasoning for recognition of three-dimensional object features*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 12(10), 949-965
- Maropoulos, P.G., Baker, R.P. (2000). *Integration of tool selection with design Part 1. Feature creation and selection of operations and tools*. Journal of Materials Processing Technology , 107(1-3), 127-134.
- Mawussi, K., Duong, V.-H., Ponsonnet R. (2000). *Détermination de ressources virtuelles pour la conception intégrée*. IDMME 2000 SCGM, Presses internationales Polytechnique, pp. 59. 2000
- McMahon, C.; Browne, J. (1998). *CADCAM : principles, practice and manufacturing management*. ISBN 0-201-17819-2
- Méry, B. (1997). *Machines à commandes Numériques, de l'étude des structures à la maîtrise du langage*. Ed. Hermès.

- Miller, L.,C.G. (1993). *Concurrent engineering design : integrating the best practices for process improvement.* ISBN 0-87263-433-7,
- Mortenson, M.E. (1985). *Geometric Modeling.* Wiley J. & Sons, ISBN 0-471-88279-8.
- Msaâf, O., Deneux, D., Soenen, R., Maranzana, R. (2000). *In-design validation of extracted machining features, A grammar-based approach.* IDMME 2000 SCGM, Presses internationales Polytechnique, p. 59.
- Nezis K., Vosniakos G., (1997). *Recognizing a 2 ½ D Shape features using a neural network and heuristics,* Computer aided Design, 29(7), 523-539.
- Park, J.Y., Khoshnevis, B. (1993). *A Real Time computer aided process planning system as a support tool for economic product design.* Journal of manufacturing Systems. 12(2), 181-193
- Peihua, G. (1994). *A Feature representation scheme for supporting integrated manufacturing.* Computers industrial Engineering. 26(1), 55-74
- Pennel, (1988). *DARPA Concurrent Design/Concurrent Engineering Workshop*", Final Report, KeyWest, FL
- Peters, T.J. (1992). *Encoding mechanical design features for recognition via neural nets.* Research in Engineering Design, 4(2), 67-74.
- Pinilla, J.M., Finger, S., Prinz, F.B. (1989). *Shape feature description using an augmented topology graph grammar.* Proceedings NSF Engineering Design Research Conference. 285-300.
- Prabhakar, S., Henderson, M.R. (1992) *Automatic form-feature recognition using neural-network-based techniques on boundary representations of solid models.* Computer Aided Design, 24(7), 381-393
- Regli, W.C., Gupta, S.K., Nau, D.S. (1995). *Extracting Alternative Machining features: An Algorithmic approach.* Research in Engineering Design. 7, 173-192.
- Requicha, A.A.G., (1996). *Geometric reasoning for intelligent manufacturing.* Communications of the ACM, 39(2), 71-76.
- Rosen, D.W., Dixon, J.R., Finger, S. (1992). *Conversions of feature based representations via graph grammar parsing.* in ASME Design Theory Methodology Conference, 1992, ASME Press NY.

- Safier, S.A., Finger, S. (1990). *Parsing features in solid geometric models*. European Conference on Artificial Intelligence.
- Salomons, O.W., Van Houten F.J.A.M., Kals, H.J.J. (1993). *Review of research in feature based design*. Journal of Manufacturing System. 12(2)
- Salomons, O.W., van Slooten, F., van Houten, F.J.A.M.; Kals, H.J.J., *Conceptual graphs in constraint based re-design*. Symposium on Solid Modeling and Applications - Proceedings, 1995, Proceedings of the 3rd Symposium on Solid Modeling and Applications, Salt Lake City, UT, USA, 55-64
- Sakurai, H., Gossard, D.C. (1990). *Recognizing Shape Features in Solid Models*. IEEE Computer Graphics and Applications. 10(5), 22-33
- Sanchez, J.M., Priest, J. W., Soto, R. (1997). *Intelligent reasoning assistant for incorporating manufacturability issues into the design process*. Expert Systems with Applications, 12(1), 81-88
- Shah, J.J. (1990). *An assessment of features technology*. Proceedings CAMI-I Features Symposium, Boston, Ma, p. 55
- Shah, J.J., Hsiao, D., Robinson, R. (1990). *A framework for manufacturability evaluation in a feature based CAD system*. Design and Manufacturing Grantees Workshop.
- Shah, J.J., (1991). *Conceptual development of form features and feature modelers*. Research in Engineering Design, 2, 93-108
- Shah, J.J., Mantyla, M. (1995). *Parametric and Feature-Based CAD/CAM*. John Wiley and Sons. ISBN0-471-00214-3
- Shen, Y., Shah, J.J. (1988). *Recognition of machining features based on HSPCE decomposition, feature composition, and process centered classification*. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 120(4), 668-677
- Shih, S.G, Shmidt, G, (1994). *The use of post interpretation for grammar-based generative systems*. Formal Design Methods for CAD Gero J.S, And Tyugu. E. (Eds).Elseiver Science B.V.
- Shirur, A., Shah, J.J., Hirode, K. (1998). *Machining Algebra for Mapping Volumes to machining operations for developing extensible generative CAPP*. Journal of manufacturing Systems, 17(3), 167-182.

- Sowa, J.F. (1976). *Conceptual graphs for a database interface*. IBM Journal of Research and Development, 20(4), 336-357.
- Stephenson, D.A., Agapiou, J.S. (1996). *Metal cutting theory and practice*. ISBN 0-8247-9579-2,
- Subrahmanyam, S. (1995). *Feature attributes and their role in product modeling*. Proceedings of the 3rd Symposium on Solid Modeling and Applications, pp. 115-124
- Suh, N.P. (1990). *The principles of design*. Oxford Series on advanced manufacturing. Oxford university press.
- Vandenbrande, J.H., Requicha, A.A.G., (1993) *Spatial reasoning for the automatic recognition of machinable features in solid models*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 15(12), 1269-1285
- Waco, D.L., Kim, Y.S. (1994). *Geometric reasoning for machining features using convex decomposition*. Computer Aided Design, 26(6), 477-489.
- Winchell, W. (1989). *Realistic cost estimating for manufacturing*. Society of manufacturing engineers
- Wolfram, M., Ehrlenspiel K. (1993). *Design concurrent calculation in a CAD-System environment*. Design for manufacturability. ASME. pp. 63-67
- Woo, T. (1982). *Feature extraction by volume decomposition*. Proc. Conf. CAD/CAM Technology in Mechanical Engineering, Cambridge, USA
- Zeid, I. (1991). *CAD/CAM - Theory and Practice*. Mc Graw-Hill series in Mechanical Engineering.
- Zhang, H.C., Zhang, D. (1995). *Concurrent Engineering : An Overview from manufacturing engineering perspectives* Concurrent Engineering : Research and Applications. 3(3), 221-236