

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Ing.

PAR
DEROME, Jean-Philippe

L'ASSOCIATION DE STRATÉGIES D'USINAGE POUR LES PIÈCES
STRUCTURELLES EN AÉRONAUTIQUE AVEC DES CARACTÉRISTIQUES DE
FORME EN UTILISANT UN RÉSEAU DE NEURONES

MONTREAL, LE 18 FÉVRIER 2008

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

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. Louis Rivest, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Christian Mascle, co-directeur de thèse
Département de génie mécanique à l'École Polytechnique de Montréal

M. Omar Msaaf, membre externe du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

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

LE 30 NOVEMBRE 2007

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués dans le Laboratoire d'Ingénierie des Produits, Procédés et Systèmes (L.I.P.P.S.) à l'École de Technologie Supérieure. Ils ont été également supportés financièrement par le C.R.I.A.Q.

Je remercie Roland Maranzana, professeur à l'École de Technologie Supérieure, pour son ouverture, ses idées visionnaires, sa passion pour la CFAO et ses précieux conseils pour surmonter des moments de difficultés.

Je remercie Omar Msaaf, associé de recherche à l'École de Technologie Supérieure, pour sa gentillesse et sa patience pour mes mille et une questions. Sa personnalité et sa sagesse m'ont permis de réaliser les bienfaits du travail en recherche.

Je désire remercier mes parents et ma famille qui m'ont toujours supporté durant cette belle odyssée.

Je voudrais finalement remercier Nathalie, ma conjointe, pour sa compréhension, sa douceur et ses encouragements et Béatrice, ma belle-petite-fille-adorée-que-je-serre-très-fort-dans-mes-bras : un monde merveilleux t'attend...

L'ASSOCIATION DE STRATÉGIES D'USINAGE POUR LES PIÈCES STRUCTURELLES EN AÉRONAUTIQUE AVEC DES CARACTÉRISTIQUES DE FORME EN UTILISANT UN RÉSEAU DE NEURONES

DEROME, Jean-Philippe

RÉSUMÉ

Dans le domaine CFAO, ce travail apporte un effort dans l'amélioration de la préparation à la fabrication assistée par ordinateur (PFAO) pour les pièces structurelles en aéronautique. Il propose une méthodologie basée sur les réseaux de neurones pour permettre l'association entre des caractéristiques de forme et ses stratégies d'usinage correspondantes. Cette méthodologie est supportée par différentes modélisations.

Le premier modèle est la caractéristique de forme qui est extraite préalablement d'un modèle B-REP. Cette caractéristique de forme est définie comme une association de surfaces qui est ensuite numérisée à partir de différents paramètres de dénombrement d'entités (le nombre d'arêtes circulaires, par exemple).

La deuxième modélisation se base sur la définition d'une stratégie d'usinage comme étant le mouvement de l'outil de la machine-outil pour usiner une caractéristique de forme. Ce modèle porte donc sur le dénombrement des stratégies d'usinage qui peuvent être utilisés pour la fabrication des pièces structurelles et qui sont disponibles dans les systèmes FAO courants (contournage multiaxes de flancs, par exemple).

Par la suite, ce travail utilise ces modélisations pour proposer une méthodologie qui utilise un réseau de neurones pour associer des caractéristiques de forme (les entrées du réseau) préalablement extraites avec des stratégies d'usinage correspondantes (les sorties du réseau). Un outil de validation informatique est également utilisé pour démontrer la méthodologie.

Mots-clés: PFAO, caractéristique de forme, stratégie d'usinage, réseau de neurones

MAPPING MACHINING STRATEGIES FROM FORM FEATURES OF AERONAUTICAL STRUCTURAL PARTS USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGY

DEROME, Jean-Philippe

ABSTRACT

In the field of CAD/CAM, this work brings a contribution to CAPP systems for aerospace structural parts. It proposes a methodology based on neural network to map form features as machining strategies. This methodology is supported by different models.

The first model is the parametric form feature which has been extracted previously from a B-REP format. This form feature is defined as a surface association that is subsequently transformed in a vector with different numerical parameters (such as the number of vertex, circular edges, for example).

The next model focuses on the definition of machining strategies that are commonly used for aerospace structural parts and that can be found on CAM systems. Machining strategies are defined as finish tool motions to shape a form features (for example a multi-axis flank contouring)

This work finally defines a methodology, using MLP neural networks, to map machining strategies (the outputs of the network) from form features (the inputs of the network). A tool for validation is also used to demonstrate the method.

Keywords: CAPP, form features, machining strategies, neural network

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES.....	XVI
INTRODUCTION	19
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE	22
1.1 Les pièces structurales en aéronautique.....	22
1.2 Définition d'une stratégie d'usinage.....	24
1.3 Gamme d'usinage d'une pièce structurale.....	26
1.4 Gamme typique.....	29
1.4.1 Ébauche de surfacage.....	30
1.4.2 Dégrossissage de la pièce.....	31
1.4.3 Finition des fonds de poches.....	32
1.4.4 Finition des brides de poches.....	33
1.4.5 Perçage des trous.....	34
1.5 PFAO	36
1.6 Limites actuelles de la PFAO dans le contexte aéronautique	37
1.7 Problèmes reliés à la FAO	41
1.8 Objectif du travail	45
CHAPITRE 2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	46
2.1 L'analyse globale d'usinage	46
2.1.1 Définition de l'analyse globale d'usinage.....	46
2.1.2 Définition d'une caractéristique de forme	47
2.1.3 Les étapes de l'analyse globale d'usinage	48
2.1.4 Conclusion	54
2.2 Modèles d'extraction de caractéristiques de forme	55
2.2.1 Méthodes des cavités	55
2.2.2 CAO à partir des caractéristiques	57
2.2.3 Extraction selon le principe d'angle-matière et de propagation	58
2.2.4 Graphes d'adjacence (FAAG).....	61
2.2.5 Super graphes de relation (SRG)	64
2.2.6 Extraction à partir d'un système expert	67
2.2.7 Conclusion sur les modèles d'extraction de caractéristiques de forme	68
2.3 Modèles d'association de caractéristiques de forme en procédés d'usinage	69
2.3.1 Volumes élémentaires d'usinage en procédés d'usinage.....	69
2.3.2 La technologie de groupe.....	70
2.3.3 Extraction de caractéristiques d'usinage à partir de l'angle-matière	71
2.3.4 Reconnaissance de caractéristiques d'usinage utilisant les réseaux de neurones	72

2.3.5	Conclusion sur les modèles d'association de caractéristiques de forme en procédés d'usinage.....	74
2.4	Conclusion	75
CHAPITRE 3 DESCRIPTION DES MODÈLES UTILISÉS		76
3.1	Introduction.....	76
3.2	Modélisation de la caractéristique de forme	77
3.2.1	Caractéristiques de forme typiques de pièces structurales.....	77
3.2.2	Modélisation des paramètres topologiques et géométriques	82
3.2.3	Modélisation des paramètres technologiques	100
3.2.4	Extraction des paramètres	110
3.2.5	Conclusion sur la modélisation des caractéristiques de forme	112
3.3	Modélisation des stratégies d'usinage	113
3.3.1	Stratégies d'usinage modélisées d'une pièce structurale	114
3.3.2	Conclusion sur la modélisation des stratégies d'usinage.....	119
3.4	Modélisation du réseau de neurones	120
3.4.1	Type du réseau de neurones.....	120
3.4.2	Architecture du réseau de neurones	120
3.4.3	Fonction d'activation	124
3.4.4	Conclusion sur la modélisation du réseau de neurones	125
3.5	Conclusion	128
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE DE RECONNAISSANCE DES STRATÉGIES D'USINAGE.....		129
4.1	Introduction.....	129
4.2	Méthodologie envisagée pour la reconnaissance de stratégies d'usinage	130
4.3	Apprentissage du réseau de neurones	132
4.3.1	Nombre de caractéristiques de forme d'entraînement nécessaires	134
4.3.2	Optimisation de l'entraînement du réseau de neurones	135
4.3.3	Optimisation de l'architecture du réseau de neurones	137
4.4	Processus de validation	138
4.4.1	« Paramétrisation » d'une caractéristique de forme.....	138
4.4.2	Création d'un fichier de transfert contenant les paramètres d'entrées.....	158
4.4.3	Association de la caractéristique de forme à la stratégie d'usinage avec le réseau de neurones entraîné	162
4.4.4	Interprétation des résultats de la matrice de sortie.....	165
4.5	Conclusion	167
CHAPITRE 5 VALIDATION AVEC UN OUTIL INFORMATIQUE		168
5.1	Introduction.....	168
5.2	Méthodologie de l'outil informatique.....	169
5.3	Maquette informatique.....	171
5.3.1	Architecture.....	171
5.3.2	Exemple d'utilisation de l'outil de validation informatique	176
5.4	Résultats.....	197
5.4.1	Reconnaissance de stratégies d'usinage.....	197

5.4.2	Influence des paramètres de caractéristiques de forme.....	198
5.5	Conclusion	199
CONCLUSION.....		200
RÉSEAUX DE NEURONES		203
LA MODÉLISATION DES STRATÉGIES D'USINAGE.....		221
BASE DE DONNÉES D'ENTRAÎNEMENT.....		232
BIBLIOGRAPHIE.....		260

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Pièce structurelle en aéronautique	22
Figure 1.2	Caractéristiques géométriques et topologiques d'une pièce structurelle	23
Figure 1.3	Exemple de quelques stratégies d'usinage disponibles dans CATIA V5R16 .	24
Figure 1.4	Exemple de MOCN.....	25
Figure 1.5	Exemple d'outil, une fraise à bout	25
Figure 1.6	Stratégie d'usinage	25
Figure 1.7	Mise en position de l'assemblage	27
Figure 1.8	Mise en position de la pièce d'ébauche	28
Figure 1.9	Gamme d'usinage typique	29
Figure 1.10	Ébauche de surfacage.....	30
Figure 1.11	Dégrossissage de la pièce.....	31
Figure 1.12	Finition des fonds de poches.....	32
Figure 1.13	Finition des brides de poches.....	33
Figure 1.14	Perçage des trous.....	34
Figure 1.15	Rôle de la PFAO durant le processus manufacturier	36
Figure 1.16	Outils disponibles dans le module de PFAO avec CATIA V5R16	37
Figure 1.17	Caractéristiques de forme prismatique pouvant être reconnue	38
Figure 1.18	Poche ne pouvant pas être reconnue en PFAO	39
Figure 1.19	Sélection de la poche avec flancs courbés pour la reconnaissance locale	40
Figure 1.20	Résultat de la reconnaissance d'une poche avec flancs courbés	40
Figure 1.21	Parcours d'outil d'un contournage multiaxe d'une poche	41

Figure 1.22	Association mentale d'une forme avec une stratégie d'usinage	42
Figure 1.23	Divergence des décision des programmeurs CN	43
Figure 1.24	Association mentale d'une forme avec une séquence d'usinage	44
Figure 2.1	CF – Ensemble de faces dépendantes lors de l'usinage	47
Figure 2.2	AGU – Extraction des caractéristiques de forme.....	49
Figure 2.3	AGU – Association des caractéristiques de forme à des stratégies d'usinage	51
Figure 2.4	AGU – Génération de la gamme d'usinage	53
Figure 2.5	Méthode des cavités - surfaces visibles	55
Figure 2.6	Méthode des cavités - surfaces restantes dépouillées	56
Figure 2.7	CAO en utilisant des caractéristiques de forme	57
Figure 2.8	Méthode de Deneux - Principe d'angle matière	58
Figure 2.9	Méthode de Deneux - Principe de propagation.....	59
Figure 2.10	Exemple de classification de caractéristiques de forme	60
Figure 2.11	FAAG - Définition des surfaces et des arêtes d'un flanc	61
Figure 2.12	FAAG - Graphe d'adjacence d'un flanc simple	61
Figure 2.13	Métal en feuille - Graphes topologiques [Liu, et al, 2003].....	62
Figure 2.14	Métal en feuille - Interface pour extraire les formes [Liu et al, 2003].....	63
Figure 2.15	SRG - Technique de super-concavité	64
Figure 2.16	SRG - Extraction de caractéristique de forme	65
Figure 2.17	Volume d'enlèvement de matière.....	69
Figure 2.18	Exemple de classification de technologie de groupe	70
Figure 2.19	Réseau de neurones de type MLP	73
Figure 3.1	Poche fermée.....	77

Figure 3.2	Poche ouverte.....	78
Figure 3.3	Poches avec une ou plusieurs faces communes	78
Figure 3.4	Trous	79
Figure 3.5	Trou avec fond plat	79
Figure 3.6	Trou avec fond en "V"	79
Figure 3.7	Trou simple	80
Figure 3.8	Trou chanfreiné.....	80
Figure 3.9	Trou conique	80
Figure 3.10	Trou lamé	80
Figure 3.11	« Paramétrisation » topologique et géométrique	83
Figure 3.12	Dimension absolue - Rayon de courbure d'un congé.....	86
Figure 3.13	Dimension relative - Angle entre un flanc et la surface de fond	87
Figure 3.14	Mesure absolue - Rayon de courbure d'un congé	88
Figure 3.15	Mesure absolue - Aire de la surface de fond.....	89
Figure 3.16	Mesure absolue - Diamètre d'un trou	90
Figure 3.17	Mesure relative - Profondeur d'une poche	91
Figure 3.18	Mesure relative - Angle entre flanc et surface de fond.....	92
Figure 3.19	Mesure relative - Épaisseur des parois.....	93
Figure 3.20	Dialogue pour définir l'épaisseur de la paroi	93
Figure 3.21	Surface de fond d'une poche.....	95
Figure 3.22	Surface de fond d'un trou ou d'une poche circulaire	96
Figure 3.23	Surface de fond - Principe de propagation.....	97
Figure 3.24	Sélection manuelle de la direction d'usinage dans CATIA V5R16	98

Figure 3.25	« Paramétrisation » technologique de la pièce structurelle.....	100
Figure 3.26	API disponibles dans un environnement CFAO.....	101
Figure 3.27	CFAO - Affectation d'un matériau et de ses propriétés	103
Figure 3.28	Génération de dessins de CATIA V5R16.....	106
Figure 3.29	Exemple de tolérancement géométrique.....	107
Figure 3.30	Catalogues d'outils disponibles pour un procédé dans CATIA V5R16.....	108
Figure 3.31	Dialogue de définition de la géométrie d'outil dans CATIA V5R16.....	109
Figure 3.32	Stratégies d'usinage global - Ébauches surfaciques.....	113
Figure 3.33	Stratégies d'usinage global - Ébauche multi-poches.....	113
Figure 3.34	Stratégie d'usinage - Surfaçage	114
Figure 3.35	Stratégie d'usinage - Contournage prismatique.....	115
Figure 3.36	Stratégie d'usinage - Contournage multiaxes	116
Figure 3.37	Stratégie d'usinage - Perçage.....	117
Figure 3.38	Stratégie d'usinage - Fraisage circulaire.....	118
Figure 3.39	Réseau de neurones de type MLP avec les différentes couches	121
Figure 3.40	Fonction d'activation - Sigmoidale binaire	124
Figure 3.41	Fonction d'activation - Équation de la sigmoïde binaire.....	124
Figure 3.42	Architecture de réseau MLP	126
Figure 4.1	Méthodologie de reconnaissance de stratégies d'usinage.....	130
Figure 4.2	Fiche d'entraînement d'une caractéristique de forme typique.....	133
Figure 4.3	Calcul du nombre d'entités d'entraînement	134
Figure 4.4	Idéalisation des erreurs durant l'entraînement [Moody, 1994]	135
Figure 4.5	Équation de la validation croisée	136

Figure 4.6	Extraction d'une caractéristique de forme « poche.4 »	138
Figure 4.7	Dénombrement des entités à l'aide de CATIA V5R16	139
Figure 4.8	Légende des entités	139
Figure 4.9	Nombre de sommets	140
Figure 4.10	Nombre d'arêtes droites	141
Figure 4.11	Nombre d'arêtes circulaires.....	142
Figure 4.12	Nombre d'arêtes concaves.....	143
Figure 4.13	Nombre de faces planes	144
Figure 4.14	Nombre de faces sphériques	145
Figure 4.15	Nombre de faces courbées	146
Figure 4.16	Nombre de congés.....	147
Figure 4.17	Nombre de face de fond.....	148
Figure 4.18	Outils disponibles pour la mesure d'entités dans CATIA V5R16	149
Figure 4.19	Rayon de courbure de « poche.4 ».....	150
Figure 4.20	Aire de surface de « poche.4 ».....	151
Figure 4.21	Profondeur maximale de « poche.4 »	152
Figure 4.22	Angle maximal de « poche.4 »	153
Figure 4.23	Unité de mesure de « poche.4 ».....	154
Figure 4.24	Définition de l'outil disponible pour la « poche.4 ».....	156
Figure 4.25	Fiche de la caractéristique de forme « poche.4 ».....	157
Figure 4.26	Création d'un fichier de transfert	158
Figure 4.27	Fichier de transfert XML de « poche.4 ».....	161
Figure 4.28	Utilisation du fichier de transfert pour le réseau de neurones	162

Figure 4.29	Association des paramètres avec les neurones d'entrée	163
Figure 4.30	Réponse du réseau de neurones 24-20-5 avec « poche.4 ».....	164
Figure 4.31	Proposition de stratégies d'usinage réordonnée	165
Figure 4.32	Proposition finale de stratégies d'usinage réordonnée	166
Figure 5.1	Méthodologie générique d'outil informatique.....	169
Figure 5.2	Module de génération paramétrique d'architecture.....	173
Figure 5.3	Module d'entraînement du réseau de neurones	174
Figure 5.4	Module d'essai du réseau de neurones	175
Figure 5.5	Étape 1 - Sélection du menu	176
Figure 5.6	Étape 2 - Définition du conteneur.....	176
Figure 5.7	Étape 3 - Sélection du conteneur	177
Figure 5.8	Étape 4 - Création d'un réseau de neurones	177
Figure 5.9	Étape 5 - Sélection du réseau de neurones.....	178
Figure 5.10	Étape 6 - Configuration du réseau de neurones	179
Figure 5.11	Étape 7 - Sélection des entrées.....	180
Figure 5.12	Étape 8 - Charger des paramètres d'entrées types.....	181
Figure 5.13	Étape 9 - Sélection d'un fichier de caractéristique de forme.....	182
Figure 5.14	Étape 10 - Multi-sélection des paramètres d'entrées.....	183
Figure 5.15	Étape 11 - Assignment des paramètres au réseau	184
Figure 5.16	Étape 12 - Sélection des sorties	185
Figure 5.17	Étape 13 - Charger les réponses du réseau.....	186
Figure 5.18	Étape 14 - Sélection d'un fichier de savoir-faire.....	187
Figure 5.19	Étape 15 - Sélection du type de sortie.....	188

Figure 5.20	Étape 16 - Multi-sélection des réponses possibles.....	189
Figure 5.21	Étape 17 - Assignation des réponses possibles au réseau	190
Figure 5.22	Étape 18 - Sélection de l'entraînement	191
Figure 5.23	Étape 19 - Configuration de l'initialisation	192
Figure 5.24	Étape 20 - Configuration de l'entraînement	193
Figure 5.25	Étape 21 - Entraînement du réseau de neurones	194
Figure 5.26	Étape 22 - Sélection d'une caractéristique de forme « test ».....	195
Figure 5.27	Étape 23 - Réponse du réseau de neurones.....	196
Figure 5.28	Étape 24 - Sauvegarde d'un réseau de neurones	196

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

Conception et fabrication mécanique

AGU	Analyse Globale d'Usinage
APT	Advanced Programmed Tool
B-REP	Boundary REPresentation
CAD	Computer Aided Design [CAO]
CAM	Computer Aided Manufacturing [FAO]
CAPP	Computer Aided Process Planning [PFAO]
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CF	Caractéristique de Forme
CN	Commande numérique
CU	Caractéristique d'Usinage
DAO	Dessin Assisté par Ordinateur
FAAG	Face Attributed Adjacency Graphs
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
FEA	Finite Element Analysis
FR	Feature Recognition
GT	Group Technology
IGES	International Graphic Exchange Standard
MOCN	Machine-Outil à Commande Numérique
MPM	Manufacturing Processes Management
PFAO	Préparation de la Fabrication Assistée par Ordinateur

PLM	Product Lifecycle Management
SF	Surface de Fond
SRG	Super Relation Graphs
STEP	STandard Exchange of Product data
STEP-NC	AP-238 – Norme STEP pour la commande numérique
TDM	Tool Data Management

Réseau de neurones

ANN	Artificial Neural Network
ART	Adaptive Resonance Theory
BAM	Bidirectionnal Associative Memory
CV	Cross Validation
MLP	Multi-Layered Perceptron
NCV	Nonlinear Cross Validation
NN	Neural Network
RN	Réseau de Neurones
SNC	Sequential Network Construction

Informatique

API	Application Program Interface
GUI	Graphical User Interface
OOD	Object Oriented Design
XML	eXtensible Markup Language
STL	Standard Template Library
MFC	Microsoft Foundation Classes

INTRODUCTION

L'industrie manufacturière aborde une nouvelle ère, celle de la mondialisation. Un marché mondial offre un bassin immense en termes de clientèle mais impose par le fait même une compétitivité accrue. Par conséquent, le cycle de vie d'un produit doit être raccourci. Cette mondialisation oblige donc les entreprises concernées à rationaliser leurs pratiques et ce, parfois de façon drastique. L'ingénierie simultanée (i.e. ingénierie concourante) est une philosophie industrielle contemporaine et efficace permettant d'obtenir une meilleure approche pour affronter cette ère nouvelle [Shah, J.J., Mantyla, M., 1995].

Plusieurs entreprises faisant face à cette mondialisation œuvrent directement ou indirectement dans le domaine de la fabrication mécanique. Cette fabrication mécanique, plus particulièrement dans le domaine aéronautique avec les pièces structurelles, utilise des modèles CAO et souvent doit usiner des pièces à partir d'ébauche. La majorité de ces industries utilisent des machines-outils à commande numérique (MOCN) qui nécessitent des coûts d'achat importants et demandent aussi une préparation à la fabrication mécanique exigeante pour, dans la plupart des cas, une production en petites séries uniquement. Dans ce contexte, l'ingénierie simultanée préconise une approche d'intégration des savoir-faire des métiers de fabrication dans la conception à l'aide d'outils informatiques génériques offrant une assistance à l'utilisateur [Shah, J.J., Mantyla, M., 1995].

Dans l'industrie manufacturière, les savoir-faire de la fabrication numérique, communément regroupé en tant que « stratégies d'usinage », sont nombreux mais toujours limités, i.e. ils ne sont jamais infinis. Une stratégie d'usinage étant définie dans ce travail comme une technique pour usiner une forme dans une pièce comme par exemple, un surfacage, un contournage, ou encore un balayage, etc. De plus, certaines séries de pièces aéronautiques, plus particulièrement dans la fabrication des pièces structurelles, possèdent souvent de nombreuses similarités dans leur conception, c'est-à-dire qu'elles ont souvent des formes très similaires, voire parfois identiques. Ces deux notions poussent donc à cette assistance

informatique d'utiliser un système de reconnaissance automatique de stratégies d'usinage pour une pièce lors de sa conception mécanique.

La reconnaissance automatique, ou plutôt la reconnaissance de forme, est une méthode d'association entre deux concepts, l'un étant la conception d'une pièce et l'autre, la fabrication de cette même pièce.

Pour obtenir un outil informatique permettant d'utiliser la reconnaissance de forme, l'intelligence artificielle constitue la pierre angulaire comme approche algorithmique. Dans le cadre informatique actuel, l'émergence de l'intelligence artificielle comme technique du domaine non linéaire s'avère être une méthode efficace qui demande une certaine attention et plus particulièrement pour les techniques et applications des réseaux de neurones artificiels qui s'imposent avec un succès sans équivoque dans le vaste domaine de la reconnaissance de forme. Ces réseaux, correctement entraînés, permettent d'obtenir des résultats avec des performances de calculs exceptionnelles [Fausett, 1994].

Le but de ce travail est d'apporter une contribution au développement d'un outil d'analyse globale d'usinage intégré à la conception mécanique. Plus précisément, cette méthodologie permettra de créer un lien entre les stratégies d'usinage et les informations topologiques et géométriques de la pièce en conception. Le but de cet outil de validation est de démontrer une meilleure intégration des méthodes d'usinage mécanique durant la phase de conception pour ultimement atteindre une approche d'ingénierie simultanée. Cet outil comportera une première phase basée sur la conception d'un réseau de neurones modifiable selon les choix de l'utilisateur ainsi que l'entraînement de ce réseau de neurones avec différents paramètres d'usinage disponibles. Deuxièmement, cet outil permettra de proposer les stratégies d'usinage découlant des caractéristiques de forme (conception) de la pièce. Ce mémoire propose le plan suivant :

Dans le premier chapitre, ce travail aborde la problématique. Il discute de la topologie et géométrie typiques d'une pièce structurelle et ensuite détaille les étapes d'une gamme

d'usinage. Finalement, il poursuit avec les limitations actuelles des systèmes PFAO et CFAO et les problèmes qui en découlent.

Dans le second chapitre, il y a une présentation des étapes décrivant l'analyse globale d'usinage ainsi qu'une revue de littérature concernant les techniques d'extraction, de classification et de reconnaissance de caractéristiques de forme ainsi que le sujet de la reconnaissance de stratégies d'usinage à partir de forme.

Au troisième chapitre, ce travail propose la modélisation des caractéristiques de forme et l'importance de leurs paramètres topologiques, géométriques et technologiques. Il y a ensuite une discussion sur différents paramètres pouvant possiblement avoir une influence sur le choix des stratégies d'usinage. Un autre modèle qui est discuté est la liste de stratégies d'usinage possibles pour les pièces structurelles en aéronautique. Le dernier modèle présenté est le réseau de neurones et son architecture.

Par la suite, il sera proposé une méthodologie générale de reconnaissance de stratégies d'usinage de pièces structurelles à partir de caractéristiques de forme numérisées avec un réseau de neurones.

Dans le cinquième et dernier chapitre, ce mémoire propose un outil de validation informatique permettant de générer des réseaux de neurones qui sont capable de reconnaître des stratégies d'usinage à partir de caractéristiques de forme. Une discussion et justification sur les résultats seront ensuite faites pour finalement poser un regard sur les perspectives du projet de recherche.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE

1.1 Les pièces structurelles en aéronautique

Dans le domaine aéronautique, les pièces structurelles, généralement en aluminium, possèdent une topologie qui offre plusieurs similarités. Du à la contrainte de poids, les pièces constituant la structure de l'avion doivent réduire le plus possible leur poids tout en gardant leurs fonctionnalités et leurs capacités physiques (surtout au niveau de la rigidité). Cette réduction de poids s'obtient surtout par un enlèvement prononcé de matière par l'usinage de la pièce (*Voir Figure 1.1*). Cette condition impose naturellement aux industries une préparation à la fabrication adéquate.

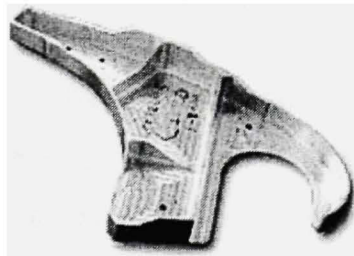


Figure 1.1 Pièce structurelle en aéronautique

Les pièces structurelles en aéronautique ont également une topologie et une géométrie qui semblent être similaires d'une pièce à l'autre. Ces caractéristiques sont, par exemple, des poches fermées et/ou ouvertes avec des brides minces (communément appelé flancs ou parois) pour délimiter ces poches avec une surface de fond (SF) plane, des trous pour fixer la pièce à la structure de l'aéronef, des congés (des rayons de courbure), etc. De plus, certaines poches de la pièce peuvent posséder des flancs inclinés, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas perpendiculaires à la surface de fond (*Voir Figure 1.2*).

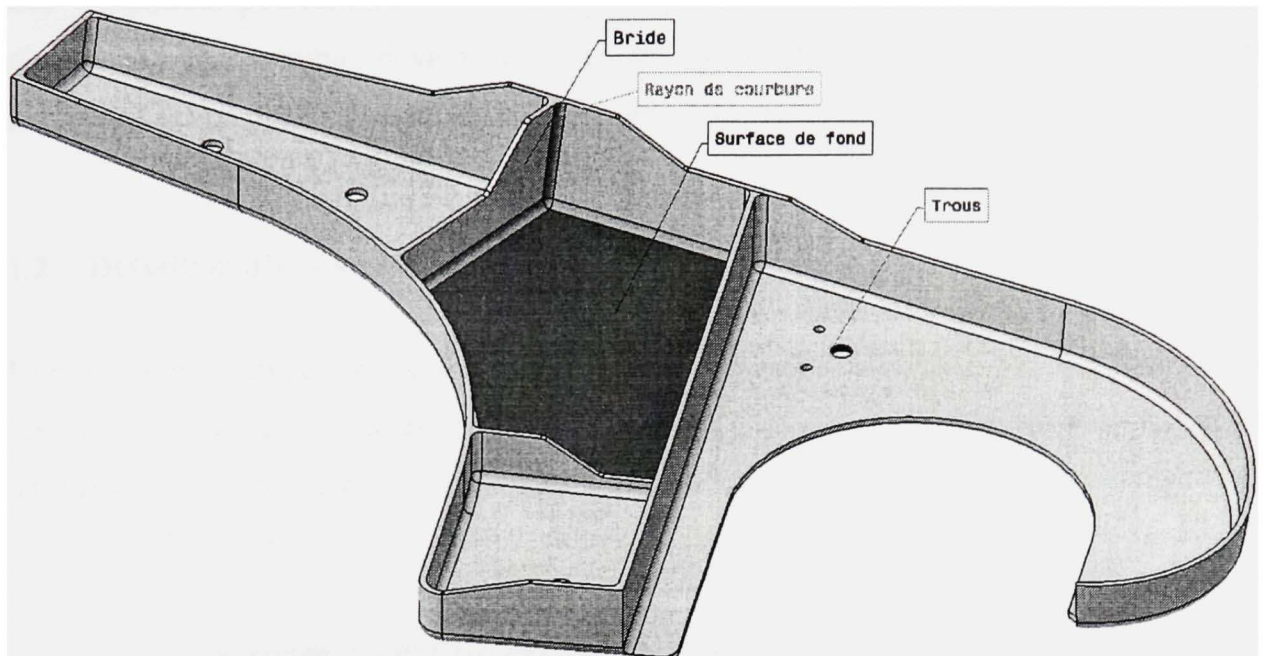


Figure 1.2 Caractéristiques géométriques et topologiques d'une pièce structurelle

Topologie typique d'une pièce structurelle en aéronautique :

- Surface de fond mince et plane (constituant la plus grande aire de surface)
- Composé de poches (la majeure partie de l'enlèvement de matière)
- Poches ouvertes ou fermées
- Poche entouré de brides ou de flancs (parois mince)
- Flancs peuvent être inclinés (non-perpendiculaire à la surface de fond)
- Rayons de courbure tangents pour joindre les surfaces (congés)
- Trous de différents diamètres dans la surface de fond ou dans les flancs
- Etc.

La préparation à la fabrication est vitale dans l'industrie aéronautique, elle permet d'automatiser ou d'assister le domaine de la FAO à partir de la CAO. Cependant, le processus de la préparation à la fabrication (PFAO) peut être long et onéreux : plusieurs facteurs doivent être pris en considération par les ingénieurs manufacturiers.

Ces similitudes pourront être ensuite assimilées par le système. Les poches d'une pièce structurelle, par exemple, deviennent ainsi des caractéristiques de forme qui peuvent être reconnues par un outil informatique en caractéristiques d'usinage.

1.2 Définition d'une stratégie d'usinage

Une stratégie d'usinage est définie dans ce travail comme une technique pour usiner une forme, ou encore le mouvement de l'outil, dans une pièce comme par exemple, un surfacage, un contournage, ou encore un balayage, etc. et se trouvent disponibles dans les systèmes FAO (*Voir Figure 1.3*).

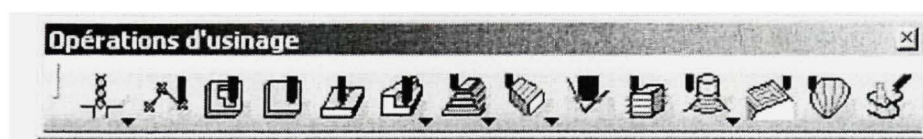


Figure 1.3 Exemple de quelques stratégies d'usinage disponibles dans CATIA V5R16

Cette fonction dans le système FAO utilise deux outils : la MOCN, c'est-à-dire les « capacités » disponibles avec cette MOCN [Msaaf, 2002] (*Voir Figure 1.4*) et la forme de l'outil disponible (*Voir Figure 1.5*). Avec ces deux informations, l'utilisateur sélectionne la forme à usiner et le système FAO utilise un algorithme de génération de trajectoire pour obtenir le résultat final : la stratégie d'usinage (*Voir Figure 1.6*).

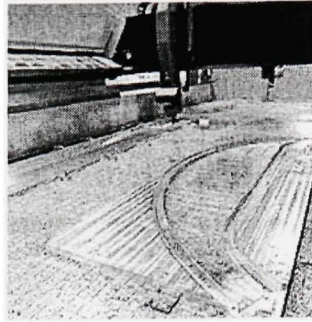


Figure 1.4 Exemple de MOCN

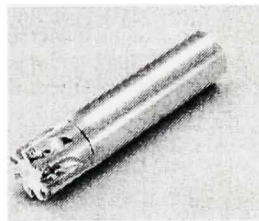


Figure 1.5 Exemple d'outil, une fraise à bout

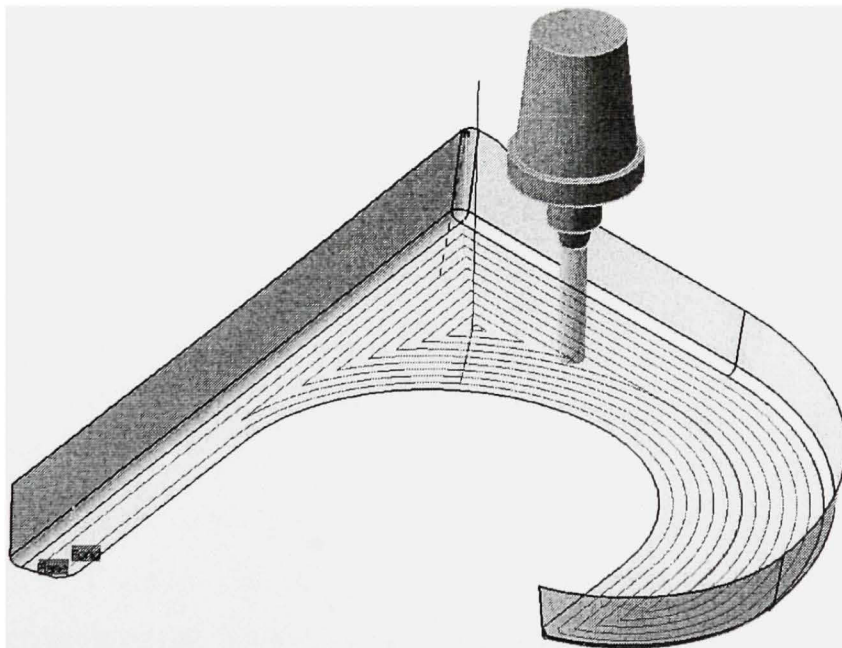


Figure 1.6 Stratégie d'usinage

1.3 Gamme d'usinage d'une pièce structurelle

Lors de la préparation à la fabrication, une gamme d'usinage, c'est-à-dire la séquence des opérations manufacturières est générée. Cette gamme est issue de quelques instants de réflexion de la part du programmeur CN (son expérience et ses connaissances deviennent des facteurs importants) pour déterminer la mise en position de la pièce sur la machine, l'outillage nécessaire, le type d'opérations (le choix des stratégies d'usinage) et évidemment, la séquence des opérations.

La séquence des opérations est importante puisque certaines opérations peuvent être complétées seulement si d'autres le sont. Cependant, la création d'une séquence demeure un problème d'ordre ultérieur. Celui-ci nécessite tout d'abord de réduire le problème en un sous-ensemble de la gamme d'usinage, soit le choix de la stratégie d'usinage à partir d'une forme dans le modèle CAO.

En utilisant, par exemple, la mise en position de l'assemblage (ébauche – système de fixation – pièce finie) de la pièce structurale pour l'usinage (Voir Figure 1.7), le programmeur CN peut commencer à préparer sa gamme d'usinage.

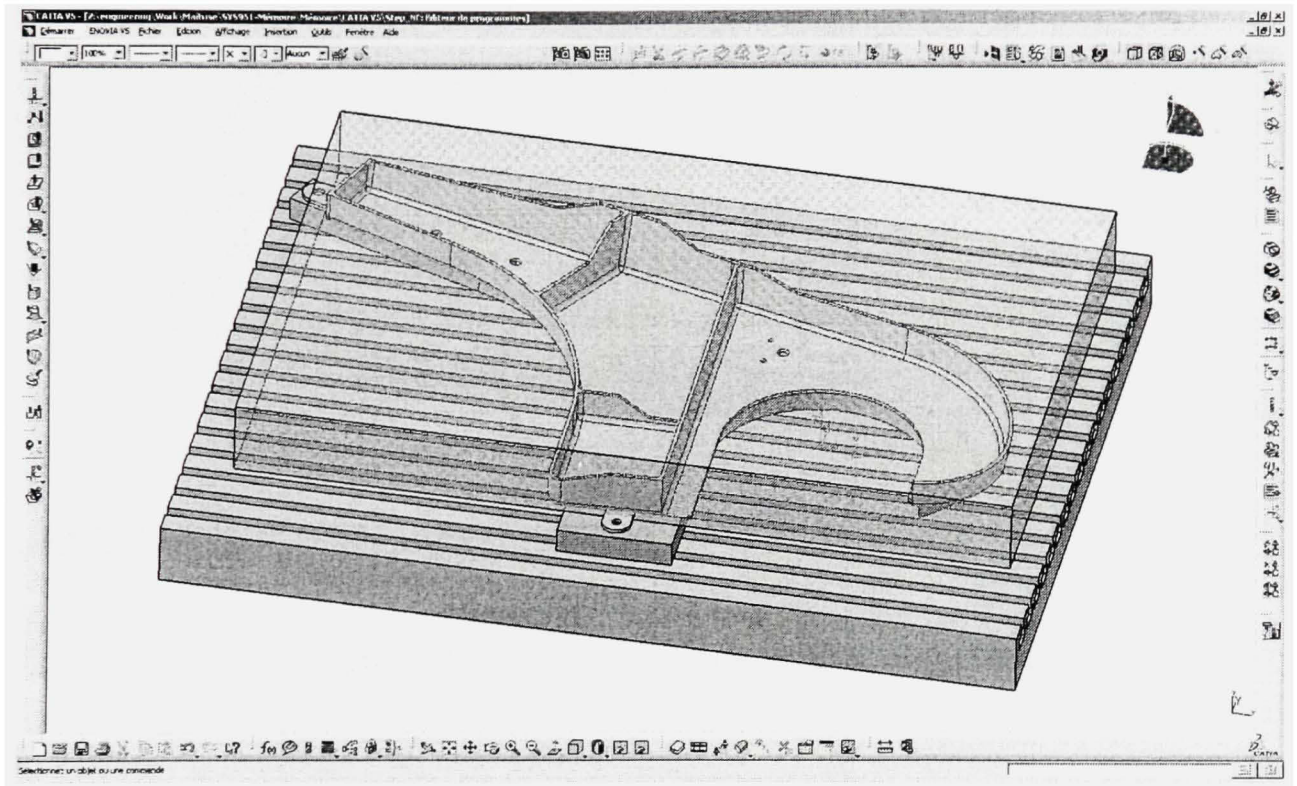


Figure 1.7 Mise en position de l'assemblage

À partir d'une pièce brute en aluminium ayant pour forme un prisme rectangulaire (Voir Figure 1.8), une gamme typique utilise une ou des opération(s) d'ébauche permettant d'enlever le plus possible de matériel en fonction du temps. Par la suite, l'usinage se concentre sur la finition de la pièce en utilisant des stratégies d'usinage spécifiques pour chaque caractéristique de forme désirée. Dans les systèmes FAO, le choix de ces stratégies d'usinage de finition demeure très peu automatisé et/ou assisté. Le programmeur CN doit faire ces choix et programmer manuellement ces stratégies d'usinage même si elles sont semblables d'une pièce à l'autre.

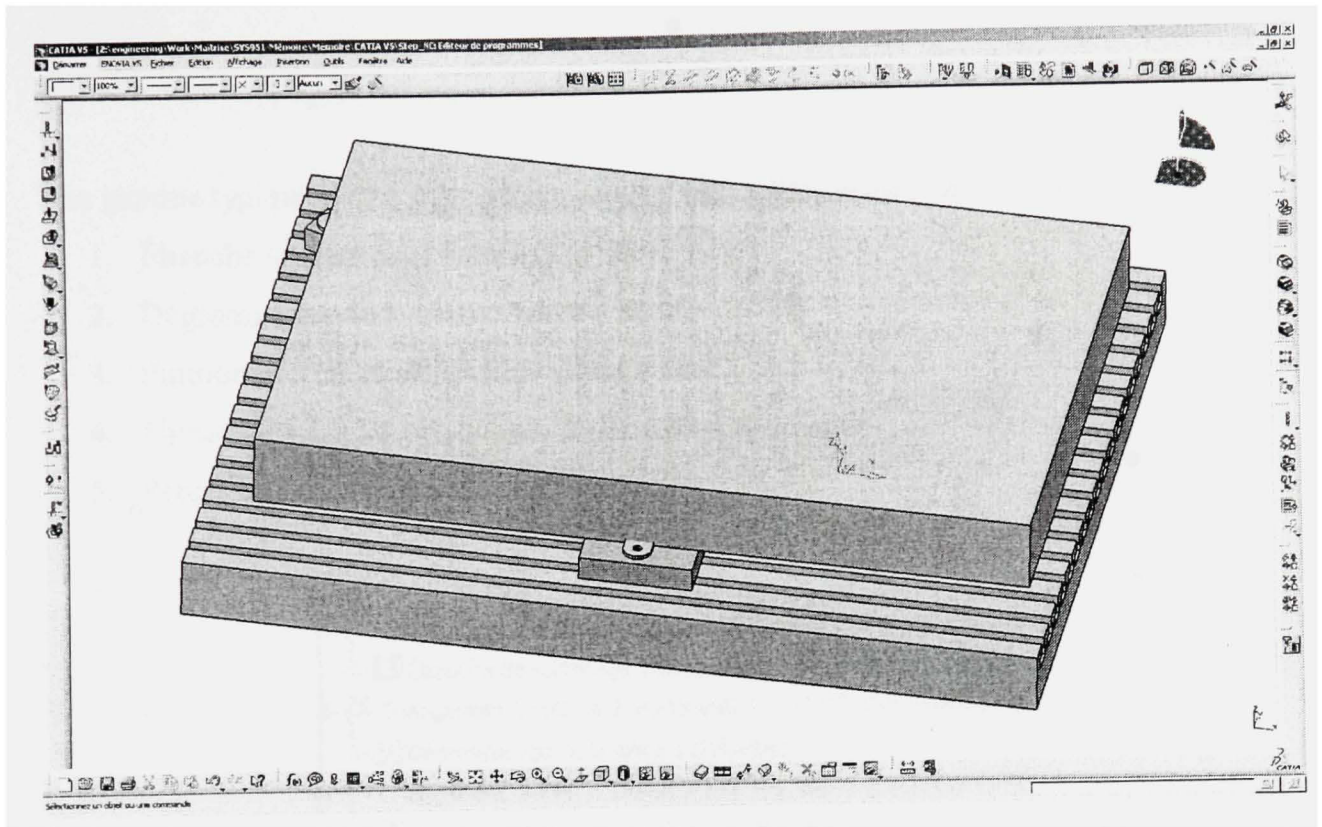


Figure 1.8 Mise en position de la pièce d'ébauche

1.4 Gamme typique

Une gamme typique d'une pièce structurale en aéronautique est (*Voir Figure 1.9*):

1. Ébauche de surfaçage / fraise à surfacer
2. Dégrossissage de la pièce / fraise à bout
3. Finition des fonds de poches / fraise à bout
4. Finition des brides de poches / fraise à bout sphérique
5. Perçage des trous / foret

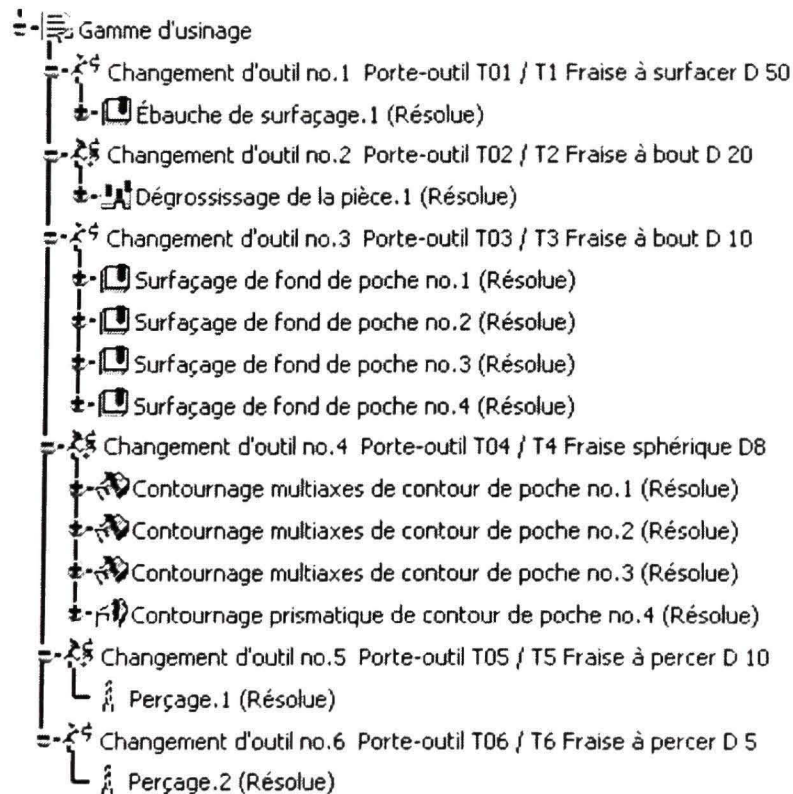


Figure 1.9 Gamme d'usinage typique

1.4.1 Ébauche de surfacage

L'ébauche de surfacage est une étape pour enlever le plus possible de matériel brut de la surface du prisme rectangulaire (*Voir Figure 1.10*). Elle permet d'éviter des profondeurs de coupe superflues lors du dégrossissage de la pièce. Cette opération est normalement faite avec une fraise à surfacer ayant un diamètre nominal important.

Le choix de cette stratégie d'usinage est peu assisté et encore moins automatisé durant l'étape de PFAO. Elle doit souvent être faite de façon manuelle par le programmeur CN dans le module de FAO.

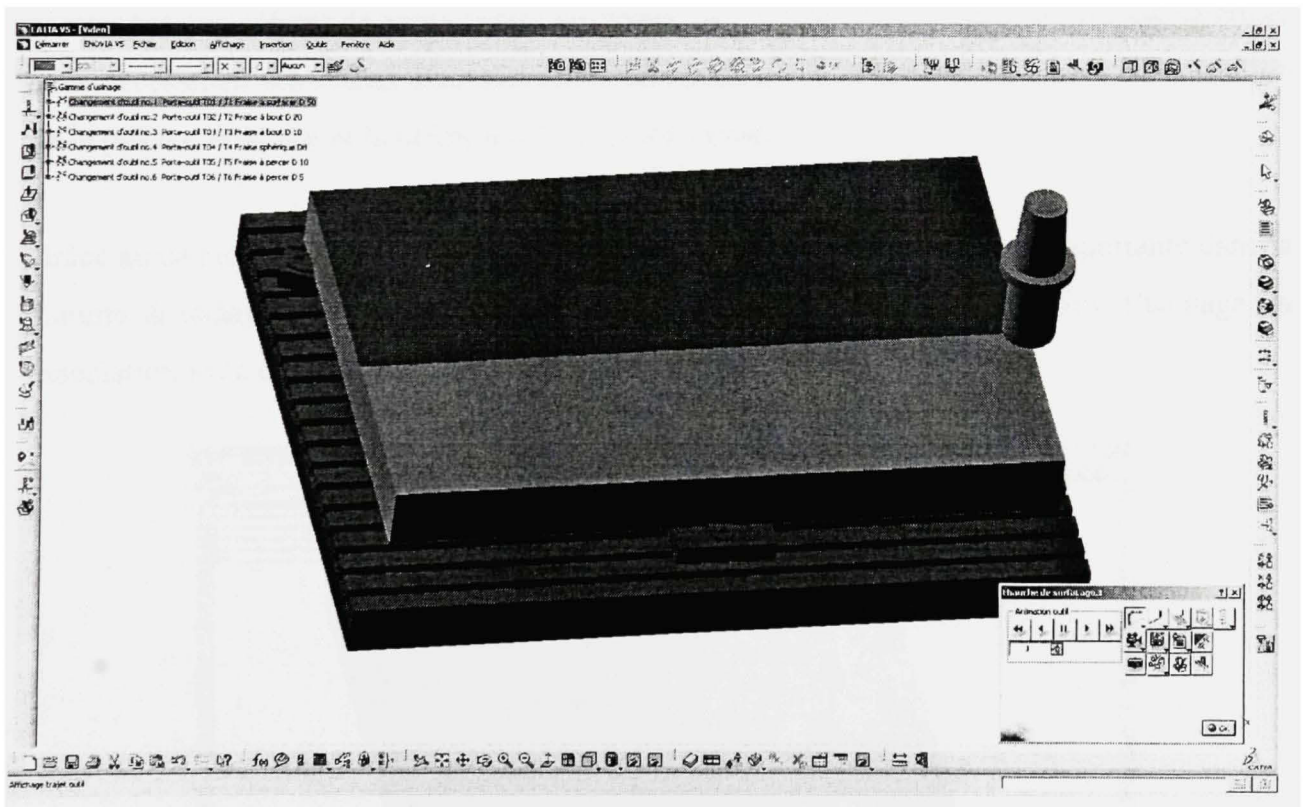


Figure 1.10 Ébauche de surfacage

1.4.2 Dégrossissage de la pièce

Le dégrossissage de la pièce est une étape primordiale dans l'usinage des pièces structurales (*Voir Figure 1.11*). Elle consiste en un enlèvement de matière majeur, suivant une multitude des paramètres de coupe telle la profondeur de passe, la surépaisseur du fond et des flancs, etc.

Cette stratégie d'usinage est un calcul volumétrique entre la pièce d'ébauche et la pièce finale. Cette stratégie est globale, c'est-à-dire qu'elle ne se concentre pas sur une caractéristique de forme uniquement mais bien un ensemble de celles-ci. Les systèmes FAO contemporains offrent de nombreuses stratégies de ce type. Pour la plupart des algorithmes, elles nécessitent seulement trois sélections de volumes : la définition de l'outil, la définition de la pièce d'ébauche et la définition de la pièce finale.

Grâce au calcul volumétrique, on peut dire que cette opération globale est importante dans la gamme d'usinage mais ne concerne pas ou très peu le choix de stratégies d'usinage en association avec des caractéristiques de forme.

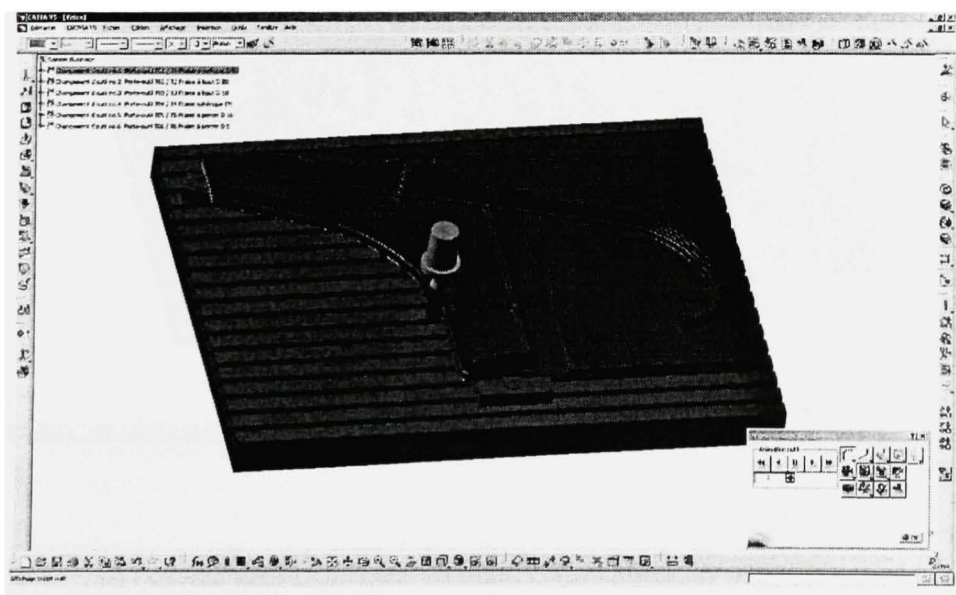


Figure 1.11 Dégrossissage de la pièce

1.4.3 Finition des fonds de poches

La finition des fonds de poches consiste à utiliser une stratégie de type « surfacage », c'est-à-dire ramener la surface de fond préalablement dégrossie avec une certaine surépaisseur à la profondeur et le fini de surface aux valeurs correspondants à la définition de la pièce finie (Voir Figure 1.12).

Malgré sa simplicité apparente, ce choix de stratégie d'usinage est peu assisté. Le programmeur doit sélectionner la géométrie, l'outil de coupe, le type de parcours d'outil et les vitesses de coupe. Le problème devient plus important si la pièce possède plusieurs poches. Puisque cette stratégie se limite à la définition d'une surface à la fois, le programmeur doit recommencer la création de cette stratégie d'usinage pour chacune des poches.

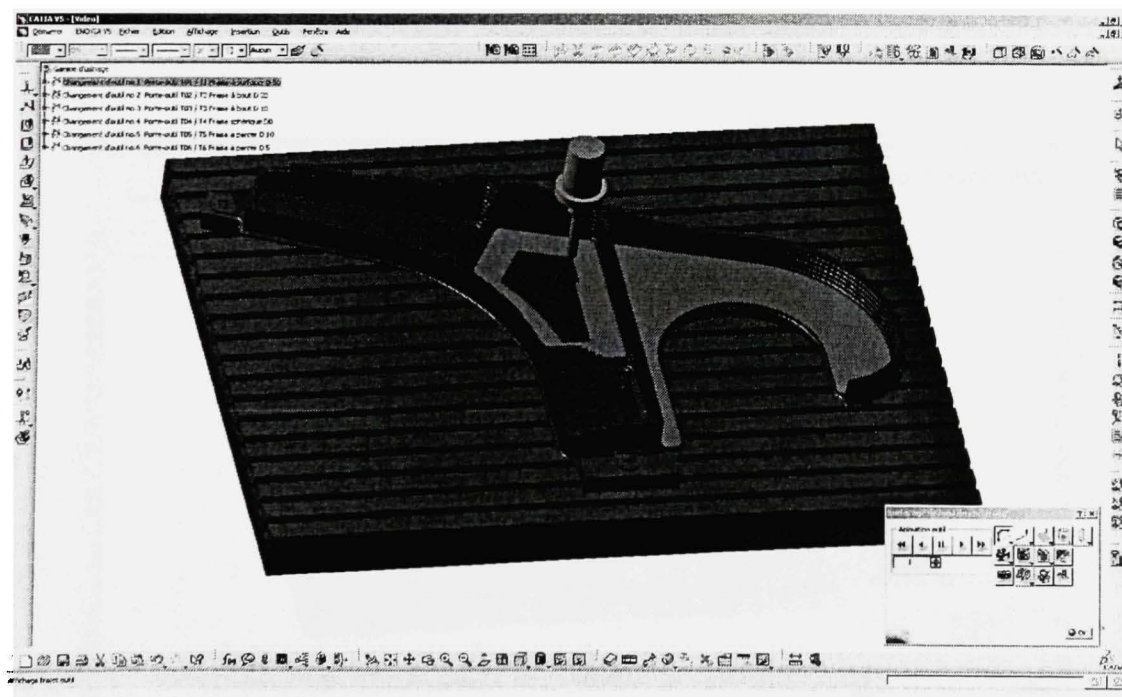


Figure 1.12 Finition des fonds de poches

1.4.4 Finition des brides de poches

La finition des brides (des flancs) de poches est une étape plus difficile techniquement puisqu'elle nécessite un savoir-faire du programmeur exigeant une bonne connaissance de la MOCN utilisée. Cette stratégie consiste à utiliser une stratégie de type « contournage », c'est-à-dire à finir les flancs avec l'épaisseur désirée, suite au dégrossissage (*Voir Figure 1.13*).

Les flancs peuvent également être courbés, nécessitant ainsi un axe de l'outil de coupe qui varie en fonction de la position. Cette variation de l'axe de l'outil requiert habituellement la sélection de contournage multiaxes qui nécessitent des paramètres de coupe différents d'un usinage prismatique.

Encore une fois, le choix de ces stratégies d'usinage demeure un fardeau sur les épaules du programmeur CN et il doit recommencer la création et le choix d'une stratégie d'usinage pour chacune des poches.

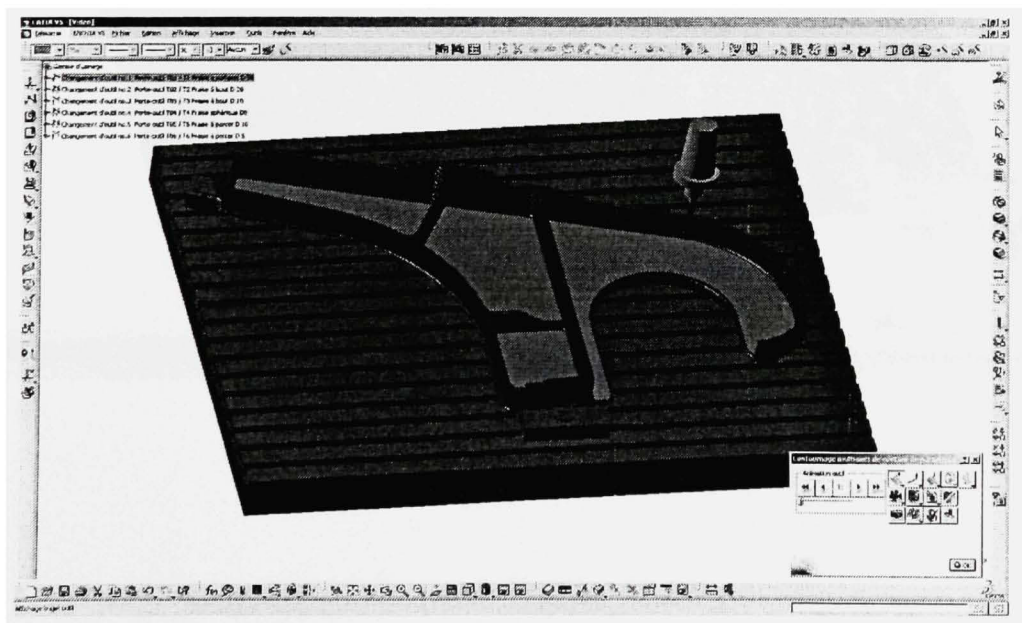


Figure 1.13 Finition des brides de poches

1.4.5 Perçage des trous

Le perçage de trous est une stratégie d'usinage simple qui consiste à créer des surfaces cylindriques avec un foret (*Voir Figure 1.14*).

Quelques algorithmes de reconnaissance de forme sont disponibles avec certains systèmes de PFAO et peuvent créer des opérations de perçage automatiquement en associant une géométrie avec une opération et un outil disponible dans un catalogue prédéfini.

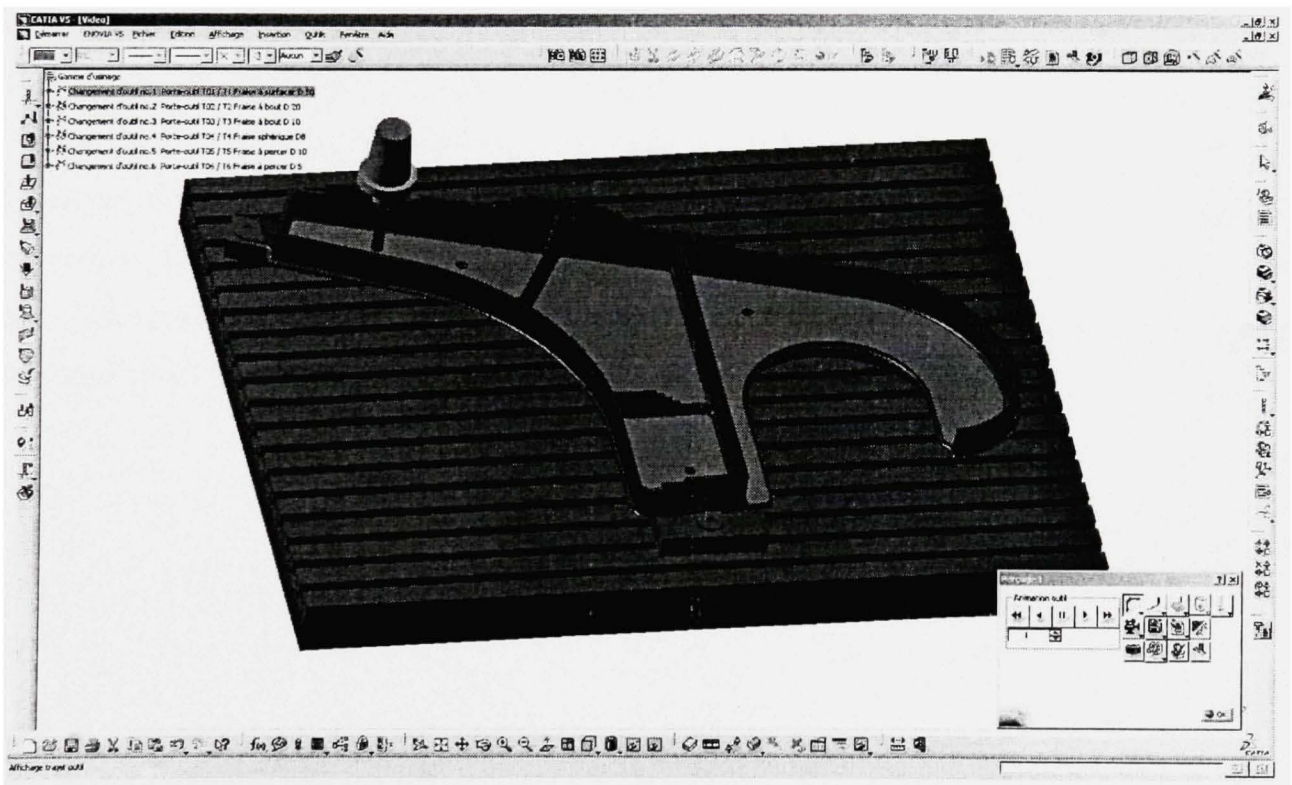


Figure 1.14 Perçage des trous

Une gamme d'usinage d'une pièce structurelle semble offrir une similitude au niveau des opérations et de l'ordre de la séquence des opérations. Cependant, lors du passage du module CAO vers le module FAO, le travail du programmeur CN est très peu facilité, malgré toutes ces similarités. Les choix des stratégies d'usinage, la séquence d'usinage, les outils et la sélection de leurs géométries dans le modèle sont très peu assistés.

1.5 PFAO

Pour améliorer la préparation à la fabrication numérique de pièces structurales en aéronautique à partir de la conception assistée par ordinateur, il est primordial d'utiliser un système PFAO qui complémente de façon adéquate le système CAO/FAO sans pour autant limiter les méthodes d'usinage disponibles. La PFAO est un module peu connu mais peut devenir la pierre angulaire d'un système CAO/FAO automatisé ou assisté.

La PFAO prépare la fabrication numérique, par exemple, elle peut proposer des gammes d'usinage, choisir les outils et les paramètres de coupe en se basant sur le savoir-faire de la compagnie, etc. D'ailleurs, en raison de l'évolution constante des pièces structurales, un bon système PFAO doit être flexible pour palier aux années à venir. Une entreprise ne peut se permettre de changer de système CAO/FAO tous les deux ou trois ans parce qu'il est désuet, les pertes seraient trop importantes (logiciel, entraînement, implémentation, maintenance, etc.). Un système PFAO devrait être considéré comme un ensemble d'outils pour préparer l'usinage avec le module de FAO (*Voir Figure 1.15*).

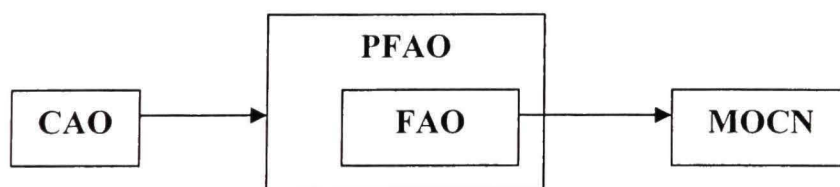


Figure 1.15 Rôle de la PFAO durant le processus manufacturier

De plus, intégrer la PFAO avec la FAO permet une réutilisation efficace de la même information numérique. Une pièce structurale est créée une seule fois, l'environnement de travail (le logiciel) possède la même ergonomie, même interface, etc. Tous ces facteurs démontrent le potentiel du monde de l'intégration CAO/PFAO/FAO. Cependant, cette intégration demeure limitée avec les systèmes CFAO actuels.

1.6 Limites actuelles de la PFAO dans le contexte aéronautique

Aujourd'hui, l'utilisation des systèmes PFAO demeure limitée parce qu'il y a présentement très peu d'outils disponibles dans la PFAO [Shah, J.J., Mantyla, M., 1995] (*Voir Figure 1.16*). Il faut noter un manque d'assistance dans la génération de gammes d'usinage de pièces structurales aéronautiques. La plupart des outils de reconnaissance de forme se limitent sur des formes prismatiques (trous, poches, etc...), c'est-à-dire que les flancs sont perpendiculaires à la surface de fond (*Voir Figure 1.17*).



Figure 1.16 Outils disponibles dans le module de PFAO avec CATIA V5R16

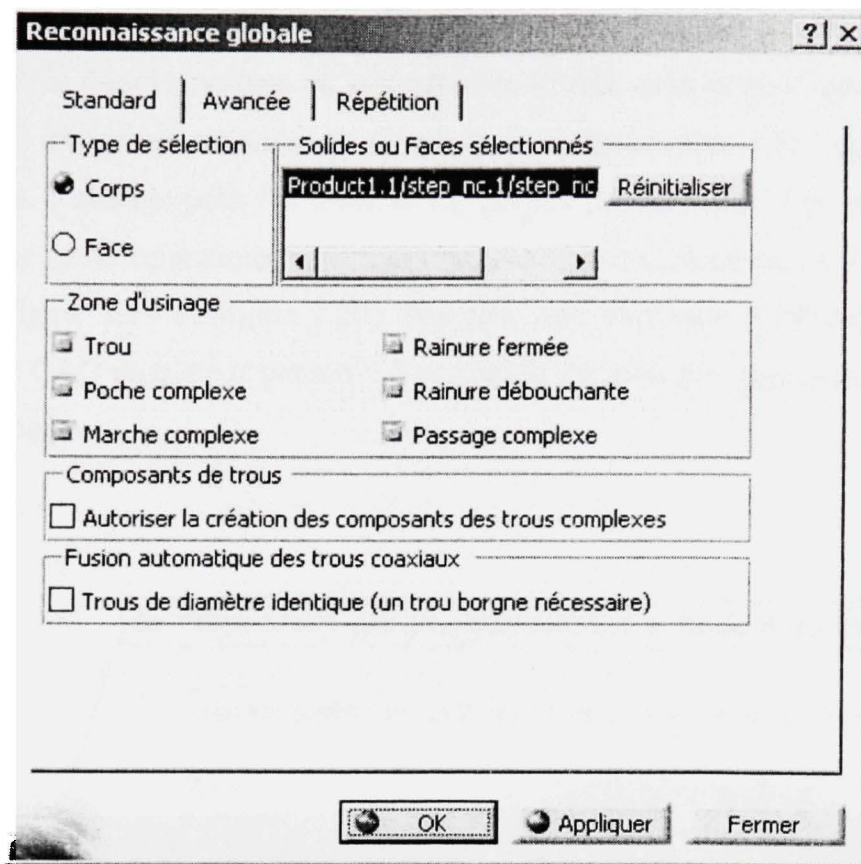


Figure 1.17 Caractéristiques de forme prismatique pouvant être reconnue

Des outils de reconnaissance de caractéristiques de forme demeurent donc des fonctions de PFAO qui sont encore peu utilisées pour les pièces structurales. La définition de la pièce B-REP est transférée dans le système ou le module de PFAO, celui-ci peut, par la suite, utiliser un algorithme de reconnaissance de forme pour implémenter une reconnaissance de caractéristiques d'usinage pour les trous et les poches prismatiques. Les poches ayant des brides courbées (pour opérations multiaxes) ne peuvent être reconnues correctement (*Voir* Figure 1.18, Figure 1.19 et Figure 1.20). Pourtant, une multitude d'informations contenue dans le modèle CAO possède le potentiel d'assister la création des séquences d'usinage et le choix des stratégies.

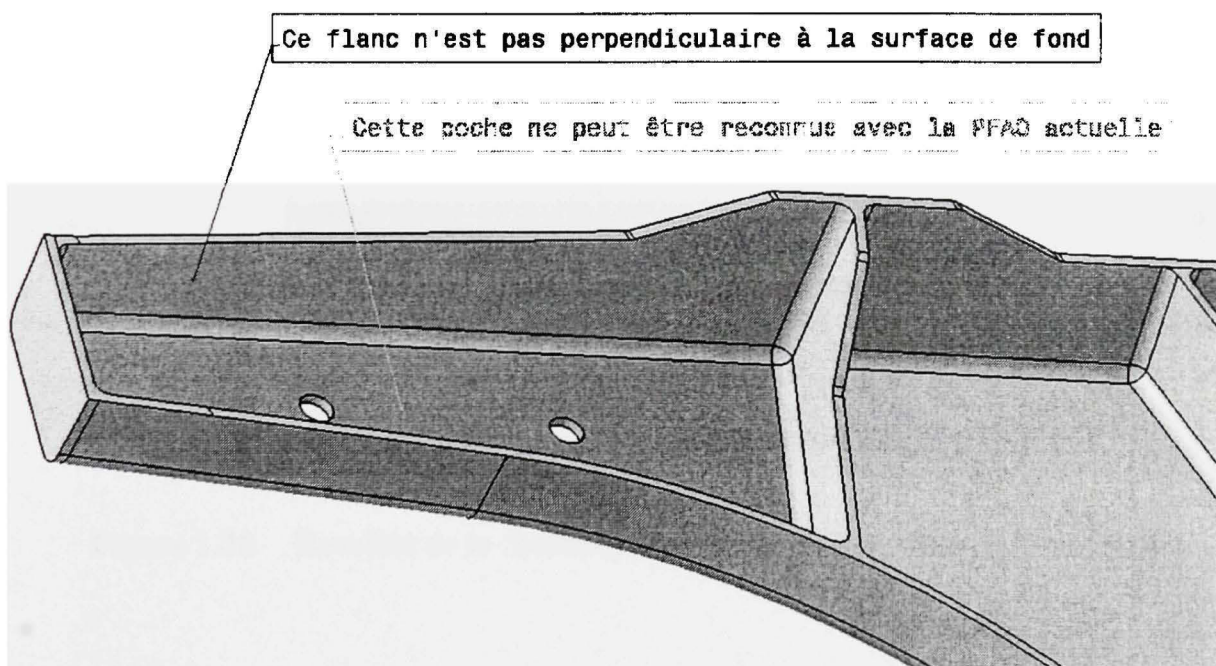


Figure 1.18 Poche ne pouvant pas être reconnue en PFAO

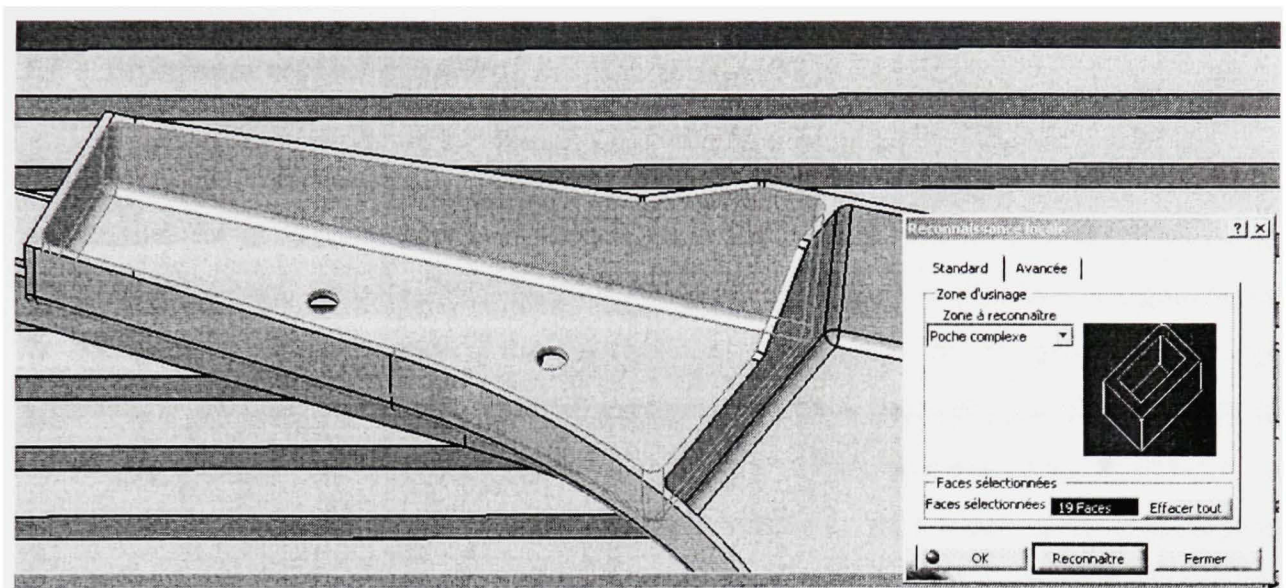


Figure 1.19 Sélection de la poche avec flancs courbés pour la reconnaissance locale

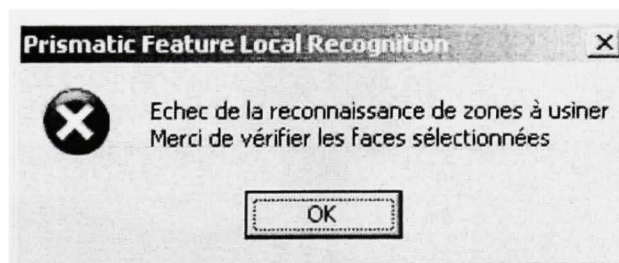


Figure 1.20 Résultat de la reconnaissance d'une poche avec flancs courbés

1.7 Problèmes reliés à la FAO

Également, les systèmes FAO sont très peu développés en termes d'assistance à la préparation de la fabrication, mais demeurent toutefois flexibles en termes de choix de stratégies d'usinage. Ils permettent de créer des parcours d'outils et d'utiliser des paramètres de coupe, mais laisse le reste à la charge du programmeur CN. Le programmeur doit sélectionner un outil de coupe, ensuite l'opération d'usinage désirée, ajuster les paramètres de coupe, désigner la caractéristique de forme de la pièce, puis compiler l'opération et générer le code machine (*Voir Figure 1.21*). Pour choisir le type d'opération adéquat pour usiner une forme, le programmeur CN regarde la caractéristique de forme (par exemple une poche) puis sélectionne l'opération correspondante qui permettrait d'usiner la forme. Cette étape est recommencée pour chaque caractéristique de forme à usiner dans la pièce.

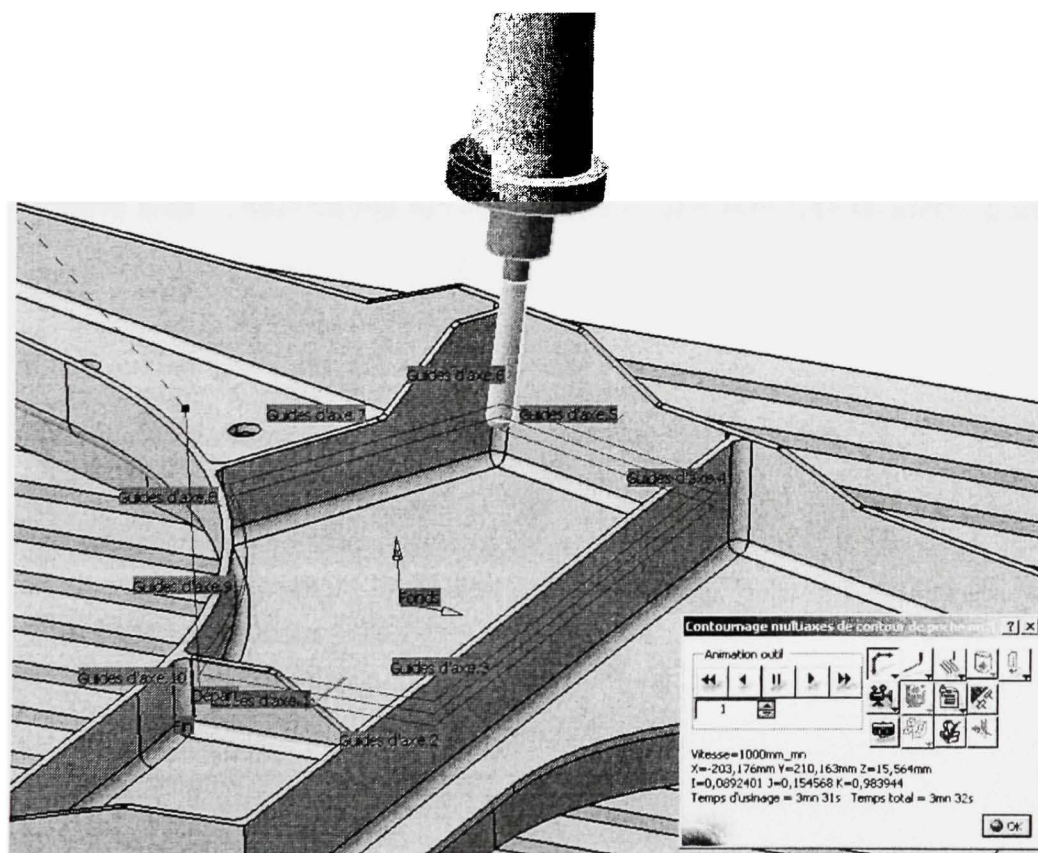


Figure 1.21 Parcours d'outil d'un contournage multiaxe d'une poche

Le processus mental d'analyse traité par le programmeur CN demande quand même une logique rigoureuse de l'ordre du domaine manufacturier ainsi qu'une connaissance approfondie de la topologie d'une pièce mécanique. Ainsi, lorsque le programmeur détecte une poche dans la pièce structurale, il va, en quelques instants, lui associer une opération de contournage (multiaxe ou prismatique) correspondante avec des paramètres de coupe, des outils à utiliser, etc. Bref, son savoir-faire et la normalisation des procédures corporatives le guide dans le choix sa stratégie d'usinage (*Voir Figure 1.22*).

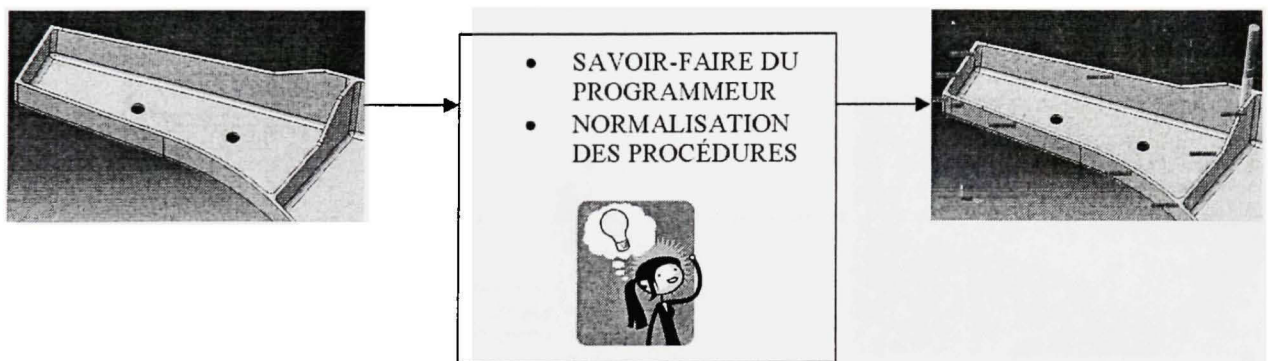


Figure 1.22 Association mentale d'une forme avec une stratégie d'usinage

Cependant, les systèmes FAO peuvent également avoir contribué à « l'éparpillement » du savoir-faire corporatif. Il y a peu de réutilisation des procédures corporatives ou les bonnes pratiques d'usinage (les « Best Manufacturing Practices »), probablement en raison du manque de normalisation des procédures. Ce problème découle du fait que les systèmes FAO commerciaux sont des outils flexibles et souvent, très vastes et les programmeurs CN n'ont pas tous le même savoir-faire. Cette constatation amène à prendre conscience qu'une forme peut mener à plusieurs stratégies d'usinage avec différents paramètres de coupe (*Voir Figure 1.23*) et que possiblement certaines de ces stratégies devraient être évitées dans le cadre des normalisations des méthodes de la compagnie.

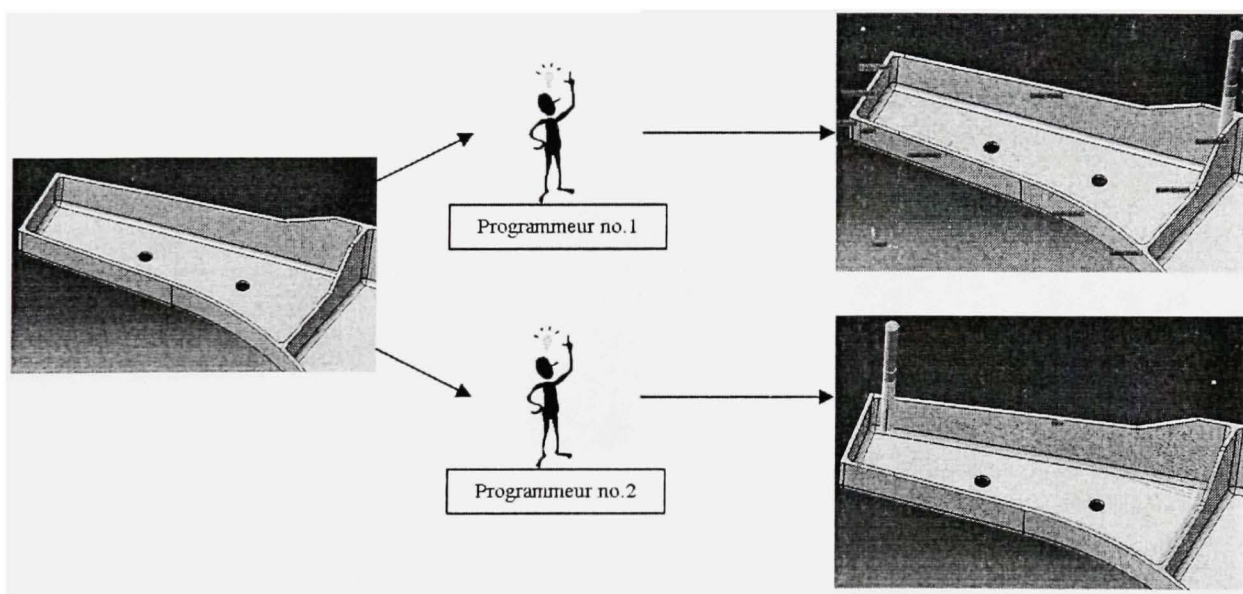


Figure 1.23 Divergence des décision des programmeurs CN

Ensuite, le programmeur doit encore procéder à une analyse mentale pour détecter l'ordre séquentiel des opérations. Il doit évaluer, pour chaque opération, quelles sont les surfaces nécessaires pour produire l'opération. Par exemple, s'il faut usiner une poche et un trou, dont la surface de délimitation est le fond de la poche, la séquence doit être le surfacage du fond de la poche suivi du perçage du trou et non l'inverse puisque la surface du trou n'est pas encore disponible (*Voir Figure 1.24*). Pour le moment, très peu de ces fonctionnalités informatiques dans les systèmes PFAO commerciaux permettent d'automatiser, ou tout simplement d'assister, cette tâche simple. Une forme d'intelligence doit encore et toujours chapeauter le système. Ce processus mental porte aussi le nom d'analyse globale d'usinage [Shah, J.J., Mantyla, M., 1995].

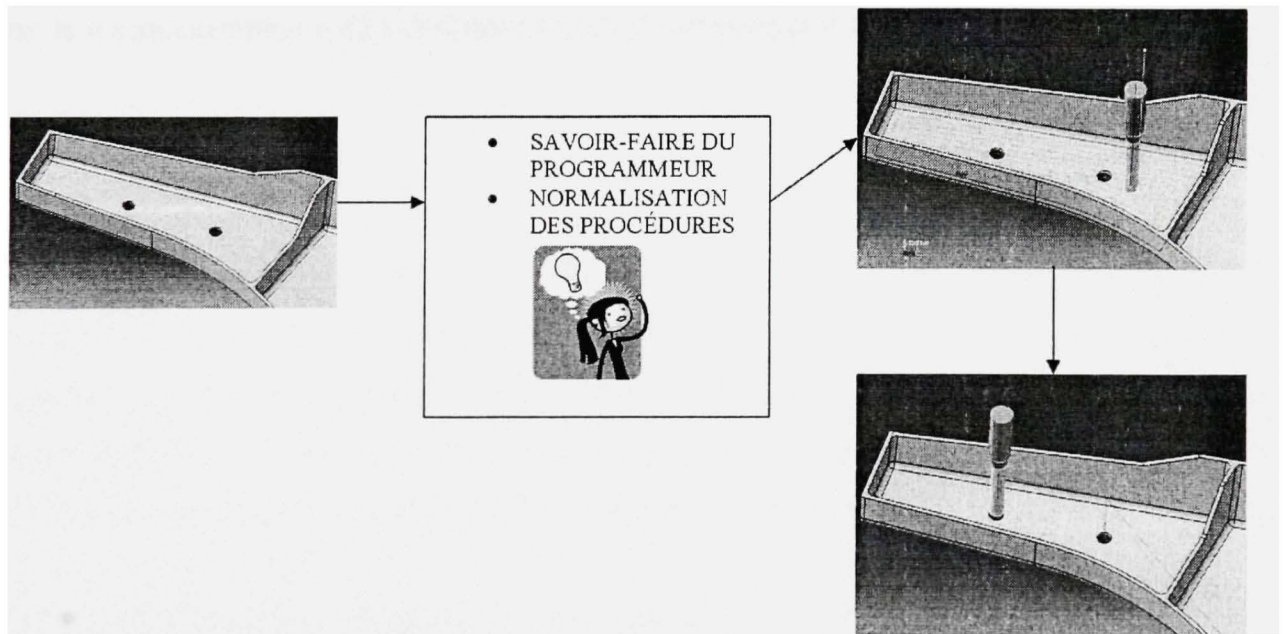


Figure 1.24 Association mentale d'une forme avec une séquence d'usinage

1.8 Objectif du travail

La contribution de ce travail se situe au niveau de l'amélioration de la préparation assistée par ordinateur (PFAO) dans le domaine du fraisage pour les pièces structurelles en aéronautique.

L'objectif global du travail est la proposition d'une méthodologie qui permet l'association de caractéristiques de forme de pièces structurelles (des poches, des trous, etc.) avec des stratégies d'usinage.

Malgré le fait qu'elle est une étape importante dans la PFAO, ce travail ne se concentre pas sur le « séquençement » ou l'ordonnancement des stratégies d'usinage dans la gamme.

CHAPITRE 2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 L'analyse globale d'usinage

2.1.1 Définition de l'analyse globale d'usinage

Selon [Msaaf, 2002], l'analyse globale d'usinage (AGU) correspond à une analyse exhaustive de la pièce en conception dans le but de dégager un ensemble d'alternatives d'usinage (stratégies d'usinage) dans une séquence organisée. Pour structurer ces stratégies d'usinage, il faut procéder en trois étapes génériques. La première étape consiste à extraire les caractéristiques de forme, c'est-à-dire des associations de surfaces à partir d'un format B-REP (*Voir* Figure 2.1). La deuxième étape est d'établir des liens entre les surfaces associées et des stratégies d'usinage possibles et, de plus pour chaque stratégies d'usinage candidates, cette étape détermine les orientations relatives entre la broche et la pièce mécanique (*Voir* Figure 2.3). La dernière étape de l'analyse globale d'usinage procède à une génération de la gamme d'usinage correspondante en utilisant des contraintes d'antériorité de la pièce usinée (*Voir* Figure 2.4). Ces contraintes sont établies suite à l'analyse des relations entre les différentes associations de surfaces définies durant la première étape.

Ce travail se base sur l'analyse globale d'usinage qui englobe les mêmes étapes. Avec l'ingénierie concourante comme philosophie directrice, une intégration informatisée d'une analyse globale d'usinage en phase de conception mécanique est souhaitable.

2.1.2 Définition d'une caractéristique de forme

Une caractéristique de forme peut être définie comme un ensemble de données topologiques et géométriques obtenues suite à une opération d'usinage de finition [Msaaf, 2002]. 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 (*Voir Figure 2.1*).

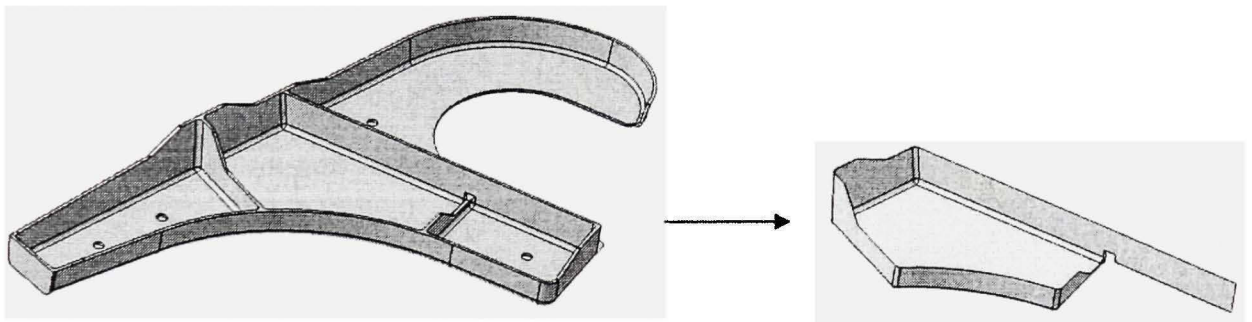


Figure 2.1 CF – Ensemble de faces dépendantes lors de l'usinage

2.1.3 Les étapes de l'analyse globale d'usinage

2.1.3.1 Extraction de caractéristiques de forme

La première étape de l'analyse globale d'usinage se concentre sur l'extraction d'associations de surfaces à partir du modèle B-REP. Pour parvenir à cette étape, on doit préalablement faire une analyse du modèle B-REP pour ensuite en dégager des caractéristiques de forme. L'analyse pour déduire les caractéristiques de forme peut être effectuée selon différentes méthodes et modèles.

La première étape retourne donc comme sortie une liste d'associations de surfaces, ces associations sont les caractéristiques de forme à l'état brut de la pièce mécanique (*Voir Figure 2.2*). Ces caractéristiques de forme sont, en quelque sorte, une partie importante de ce travail puisqu'à partir de ces représentations numériques découlera la reconnaissance des stratégies d'usinage.

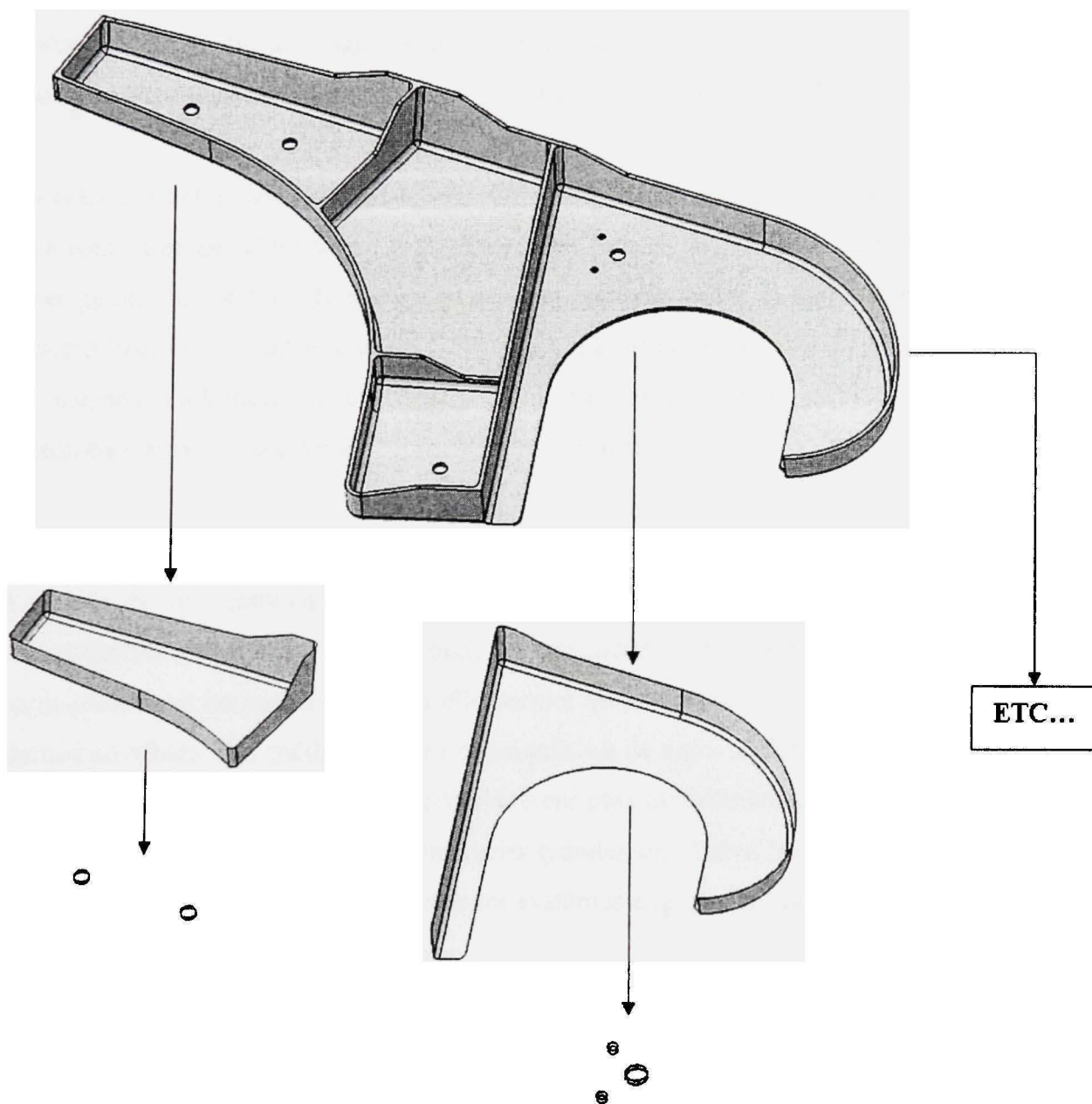


Figure 2.2 AGU – Extraction des caractéristiques de forme

2.1.3.2 Reconnaissance de stratégies d'usinage

La deuxième étape de l'analyse globale d'usinage est la reconnaissance de stratégies d'usinage à partir de caractéristiques de forme. Pour parvenir à cette fin, ce travail explore les possibilités offertes, en termes d'outils informatiques, pour associer ou « mapper » une caractéristique de forme à une stratégie d'usinage, ou encore mieux, proposer une liste de stratégies d'usinage possibles pour chaque caractéristique de forme (*Voir Figure 2.3*).

Les pièces structurelles en aéronautique offrent des caractéristiques de forme similaires mais elles sont rarement identiques : il y a donc une infinité de formes possibles à associer. Par conséquent, l'utilisation de systèmes linéaires ne peut offrir la flexibilité recherchée. Un système linéaire, est un ensemble d'équations mathématiques entre deux espaces vectoriels qui respecte l'addition des vecteurs et la multiplication scalaire définie dans ces espaces vectoriels ou qui « préserve les combinaisons linéaires »s.

Cette méthode de « mapping » peut être vue également comme une application dans le domaine de la reconnaissance de forme, qui utilise habituellement des algorithmes d'intelligence artificielle comme outil informatique. La reconnaissance de formes est particulièrement intéressante puisqu'elle permet de traiter une infinité de caractéristiques de formes possibles. Les méthodes dites classiques ou de types linéaires, c'est-à-dire celles qui n'utilisent pas l'intelligence artificielle s'avèrent plus difficile puisque les caractéristiques de forme des pièces structurelles peuvent varier grandement. Parmi les techniques informatiques d'intelligence artificielle, on peut noter les systèmes experts, la logique floue, les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques.

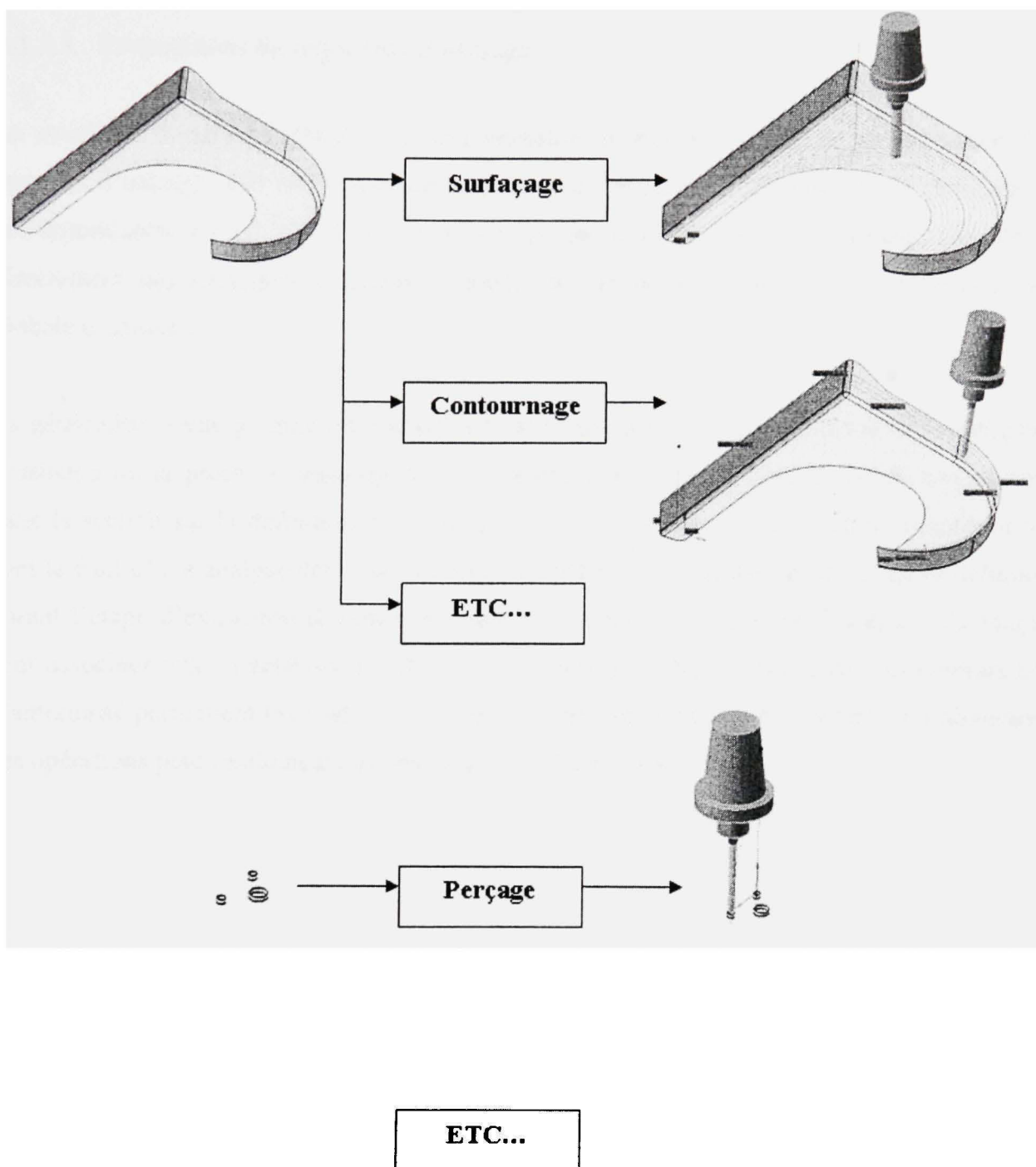


Figure 2.3 AGU – Association des caractéristiques de forme à des stratégies d'usinage

2.1.3.3 Propositions de séquences d'usinage

La troisième et dernière étape de cette proposition d'analyse globale est la génération de gammes d'usinage. Cet outil informatisé propose à l'utilisateur des gammes de fabrication correspondantes à l'usinage de la pièce. Les propositions de gammes d'usinage découlent directement des stratégies d'usinage attribuées durant la deuxième étape de cette analyse globale d'usinage.

La génération d'une gamme est calculée comme une possibilité combinatoire des stratégies d'usinage de la pièce en fonction des contraintes d'antériorité. Comme citées auparavant dans la section sur la définition de l'analyse globale d'usinage, les contraintes d'antériorité sont le fruit d'une analyse des relations entre les différentes associations de surfaces définies durant l'étape d'extraction des caractéristiques de forme. Lorsque les stratégies d'usinage sont associées aux caractéristiques de la forme pendant l'étape précédente, ces contraintes d'antériorité permettent la construction d'arbres constitués de parents et enfants. La séquence des opérations peut finalement être décidée. (*Voir Figure 2.4*)

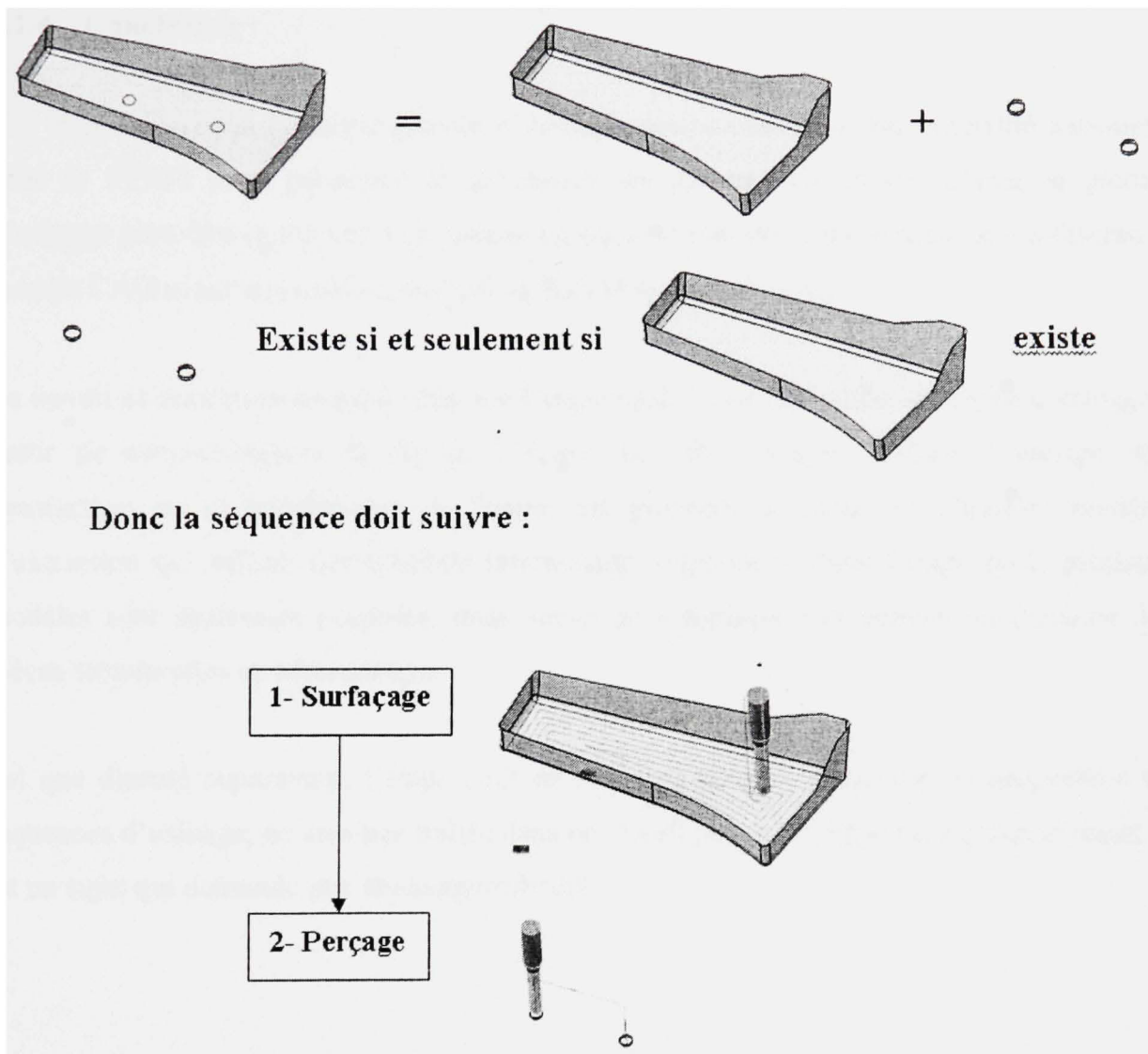


Figure 2.4 AGU – Génération de la gamme d'usinage

2.1.4 Conclusion

Ces étapes décrivent l'analyse globale d'usinage comme étant une fonctionnalité essentielle dans la PFAO pour permettre la génération de gammes d'usinage. L'analyse globale d'usinage peut être également vue comme un outil ou une aide informatique qui utiliserait le modèle CAO avant que celui-ci soit utilisé dans le module de FAO.

Le travail se concentre en particulier sur l'étape no.2, l'association de stratégies d'usinage à partir de caractéristiques de forme. L'étape no.1 de l'analyse globale d'usinage, soit l'extraction de caractéristiques de forme, est proposée à partir de plusieurs modèles d'extraction qui offrent des résultats intéressants. Cependant, dans l'étape no.2, plusieurs modèles sont également proposés, mais aucun ne s'applique directement au domaine des pièces structurelles en aéronautique.

Tel que discuté auparavant, l'étape no.3 de l'analyse globale d'usinage, la proposition de séquences d'usinage, ne sera pas traitée dans ce travail puisque l'étape no.2 prime d'abord et est un sujet qui demande une étude approfondie.

2.2 Modèles d'extraction de caractéristiques de forme

2.2.1 Méthodes des cavités

[Owodunni O., Hinduja S., 2002] procède à une revue de toutes les techniques courantes d'extractions de caractéristiques de forme ainsi qu'un autre article, des mêmes auteurs, donne les performances de chacune de ces méthodes [Owodunni O., Hinduja S., 2002].

La méthode des cavités donne les meilleurs résultats en termes de reconnaissance de caractéristiques de forme. Cette méthode, simple et efficace, implique de dépouiller une pièce de ses surfaces dite "enveloppe". Les surfaces "enveloppes" sont les surfaces dites extérieures ou encore celles qui n'ont aucune surface adjacente visible, c'est-à-dire que cette surface ne peut atteindre une autre surface en projetant des rayons. Par exemple avec la figure ci-dessous, les surfaces A et B sont visibles mais A et C sont pas visibles l'une par rapport à l'autre. Donc la surface C est une surface « enveloppe » puisqu'aucune surface ne peut la voir. (*Voir Figure 2.5*)

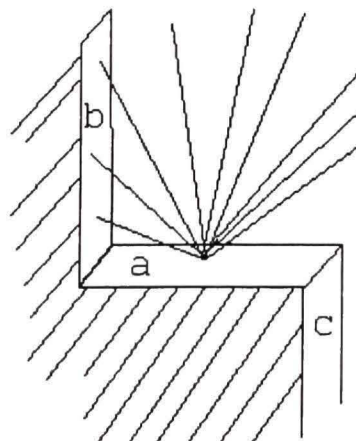


Figure 2.5 Méthode des cavités - surfaces visibles

Après avoir dépouillé la pièce de ses surfaces "enveloppe", les surfaces restantes qui sont adjacentes deviennent des caractéristiques de forme. (*Voir Figure 2.6*)

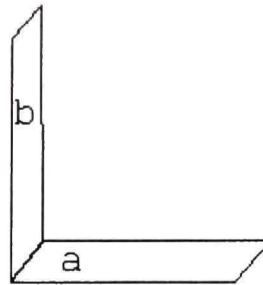


Figure 2.6 **Méthode des cavités - surfaces restantes dépouillées**

Le seul désavantage de la méthode des cavités demeure qu'elle regroupe parfois plusieurs caractéristiques de forme dans un même ensemble. Cet ensemble doit être par la suite décomposé de nouveau.

2.2.2 CAO à partir des caractéristiques

[Bouras A., Belaziz M., Tehari A., Wahu G. Brun J., 1999] démontre bien l'utilité d'exploiter un environnement CAO pour la conception de pièce mécanique en utilisant des caractéristiques de forme. D'ailleurs selon [Chep A., Tricarico L., 1999], cette méthode de conception, orientée-objet, permet de faciliter l'extraction et la reconnaissance de caractéristiques de forme tout en limitant les erreurs ainsi que de véhiculer rapidement l'information nécessaire durant la phase de FAO. (Voir Figure 2.7)

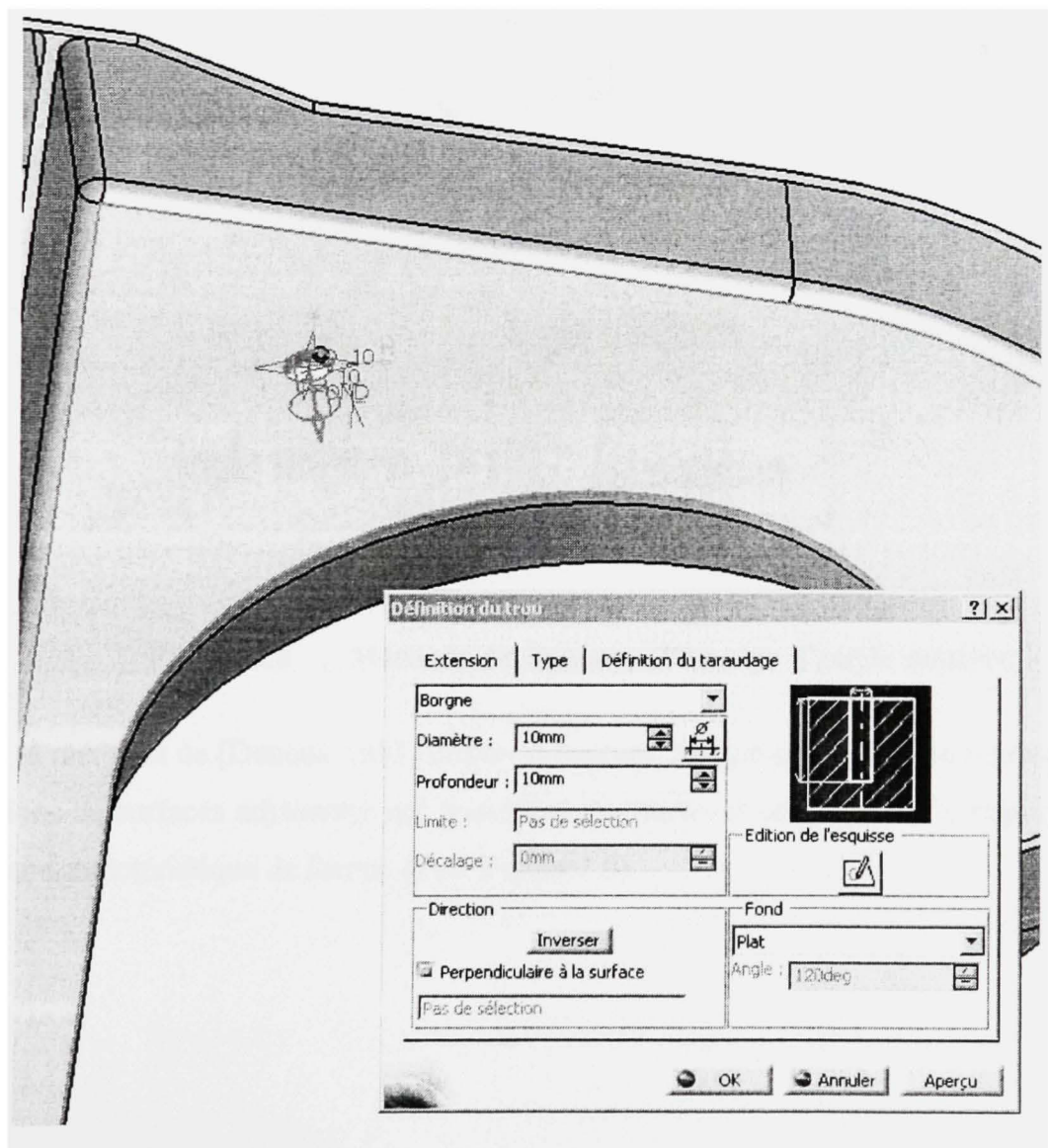
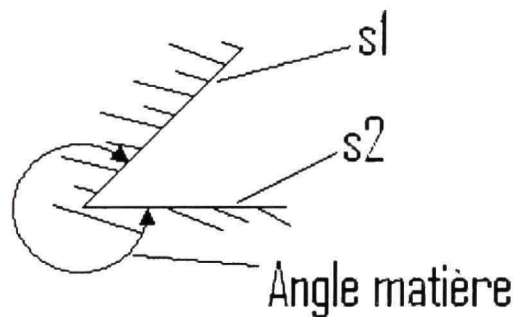


Figure 2.7 CAO en utilisant des caractéristiques de forme

2.2.3 Extraction selon le principe d'angle-matière et de propagation

Cette extraction est effectuée grâce à la méthode proposée par [Deneux 1993] avec le principe d'angle matière et de propagation. Elle obtient, au moyen d'un algorithme simple mais puissant, les associations de surfaces dans le modèle B-REP. Cet algorithme analyse les arêtes d'un modèle en regardant l'angle matière : si la matière (le solide de pièce) possède un angle supérieur ou égal à 180 degré, une association entre les deux surfaces liées à cette arête est créée. (Voir Figure 2.8)

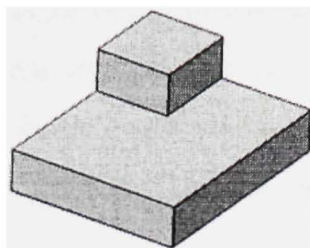


$$\text{Angle matière} \geq 180^\circ = \text{Association}$$

Figure 2.8 Méthode de Deneux - Principe d'angle matière

Ensuite, la méthode de [Deneux 1993] utilise le concept de « propagation » en regroupant les associations de surfaces adjacentes qui possèdent des surfaces communes. Ce regroupement produit une caractéristique de forme. (Voir Figure 2.9)

Pièce

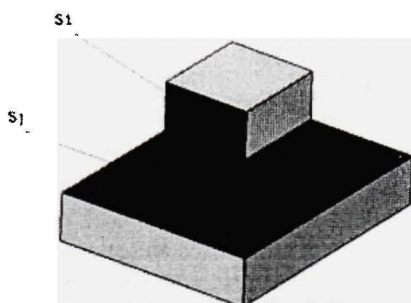


Légende :

A_{ij} : Association binaire
d'élément de surface
 CF_n : Caractéristiques de
forme

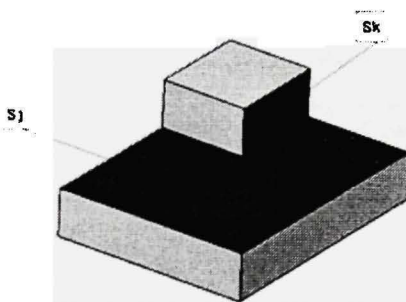
Association no.1

$A_{ij} = [S_i, S_j]$



Association no.2

$A_{jk} = [S_j, S_k]$



Caractéristique de forme propagée

$CF_n = [S_i, S_j, S_k]$

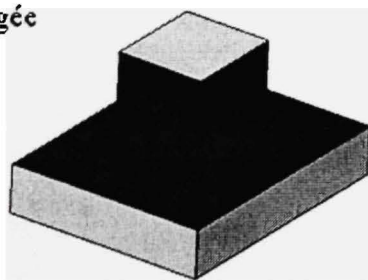


Figure 2.9 Méthode de Deneux - Principe de propagation

[Liu S., Gonzalez M., Chen J., 1995] ont développé un système d'extraction de caractéristiques de forme permettant l'analyse globale de la pièce. Ce système utilise

plusieurs algorithmes de reconnaissance de caractéristiques de forme dont l'algorithme de [Deneux, 1993] de l'angle matière. Lorsque la caractéristique de forme est extraite, ce système tente de classifier la forme extraite avec une classification de formes prédéfinies et donc, demeure assez rigide et, parfois, il ne peut établir une relation s'il ne connaît pas cette classe. (Voir Figure 2.10)

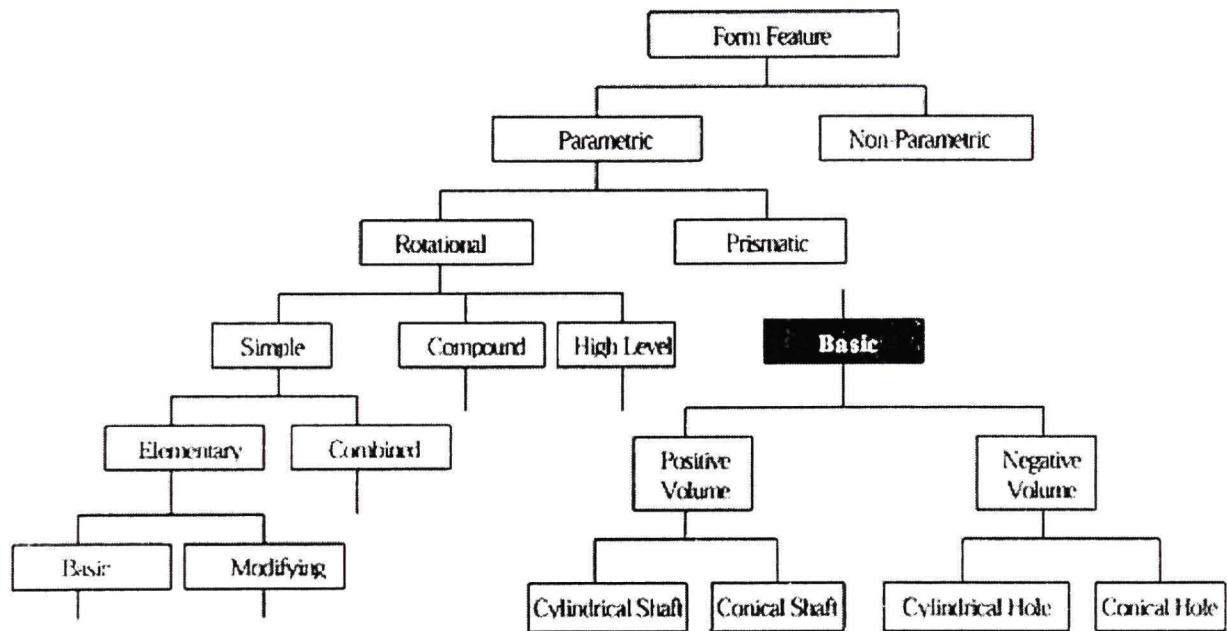


Figure 2.10 Exemple de classification de caractéristiques de forme

2.2.4 Graphes d'adjacence (FAAG)

[El-Mehalawi M., Miller R., 2001] ainsi que [Ou-Yang C., Liu P.Y., 1999] présentent un système de base de données ainsi qu'une méthode d'extraction. Cette base de données contient des pièces mécaniques représentées à l'aide de graphe d'adjacence (« Face Attributed Adjacency Graphs FAAG ») dont chaque nœud représente une face alors que chaque lien représente une arête. Cette représentation topologique, utilisée par [Inoue K., Shimada K., Chilaka K., 2003] également, ne contient aucune dimension, seulement des relations entre différentes faces. (Voir Figure 2.11 et Figure 2.12)

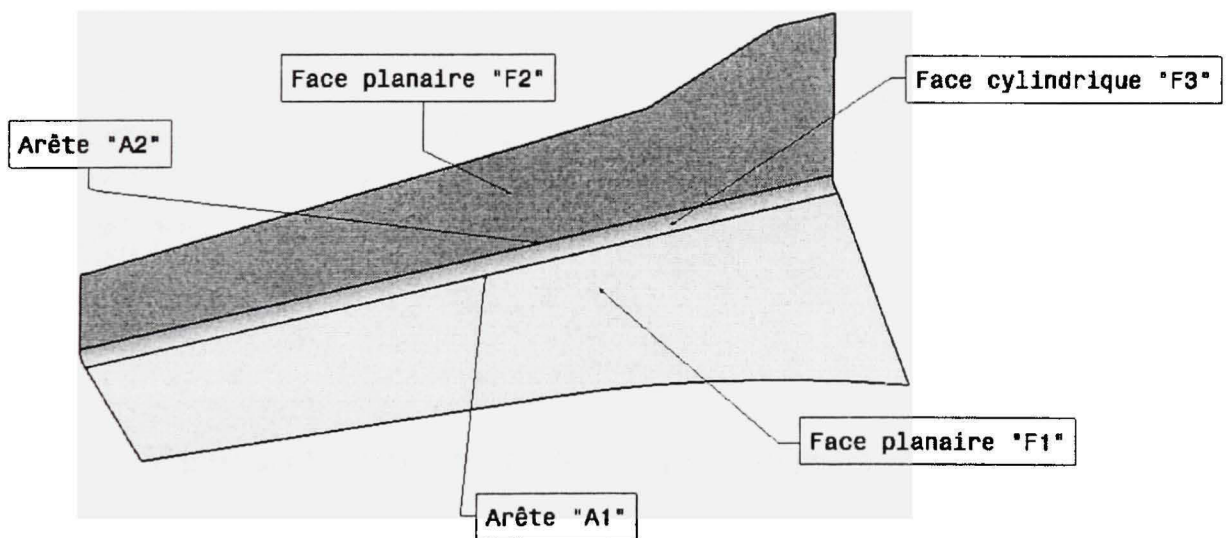


Figure 2.11 FAAG - Définition des surfaces et des arêtes d'un flanc

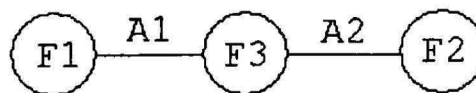


Figure 2.12 FAAG - Graphe d'adjacence d'un flanc simple

Cependant, leur technique est limitée par l'étendue de la base de données. Sa capacité ne peut dépasser celle-ci et ne peut "traiter" des caractéristiques de forme non-définies. Puisque ce

travail doit se concentrer sur un système plus flexible, cette option ne peut être envisagée, mais toutefois elle demeure intéressante et viable.

[Liu, Z., Li, J., Wang, Y., Li, C., Xiao, X., 2003] propose également un système d'extraction de caractéristiques de forme orienté pour les pièces de métal en feuille basé sur une variante des graphes topologiques (*Voir Figure 2.13*). Cette technique se base encore sur une base de données de graphes prédéfinis qui dictera la flexibilité des formes extraites. Malgré cette limitation, puisque le système se concentre uniquement sur les caractéristiques de formes de métal en feuille (brochage, pliage, etc.), il peut reconnaître plusieurs formes (*Voir Figure 2.14*).

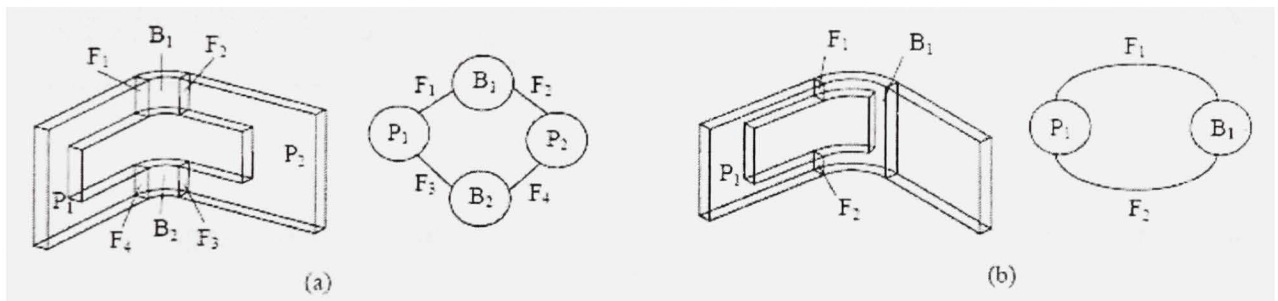
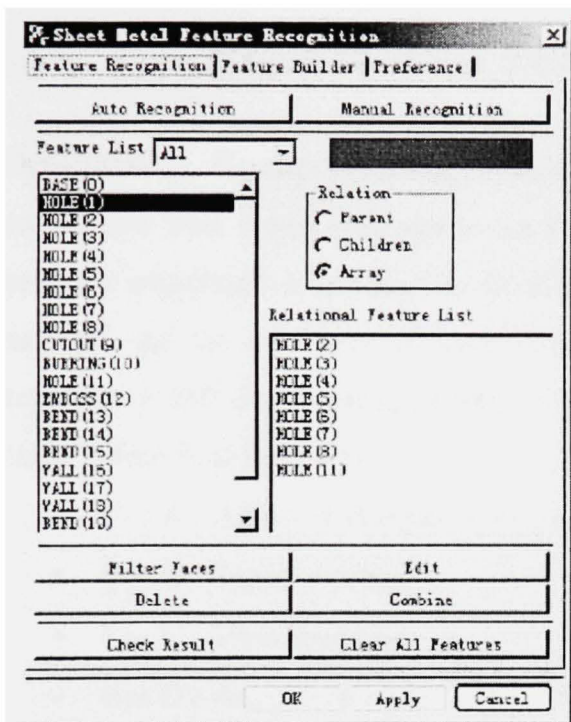
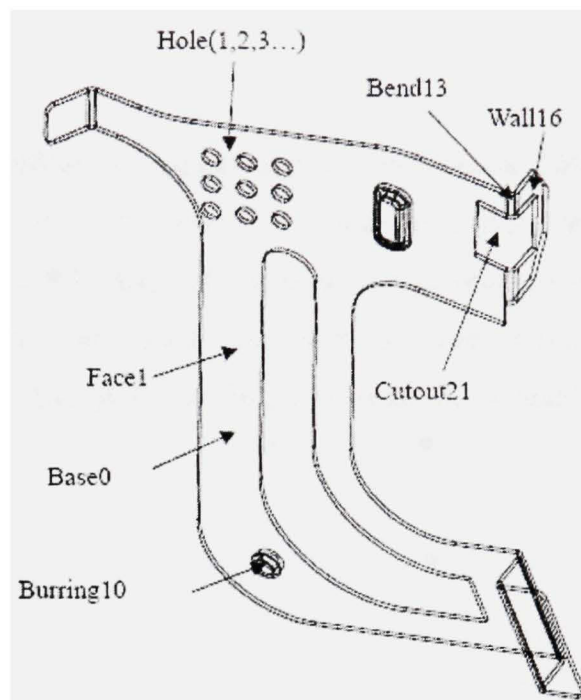


Figure 2.13 Métal en feuille - Graphes topologiques [Liu, et al, 2003]



(a)



(b)

Figure 2.14 Métal en feuille - Interface pour extraire les formes [Liu et al, 2003]

2.2.5 Super graphes de relation (SRG)

Dans [Kao C., Kumara S., 2001], la nouvelle méthode des super graphes de relation (SRG) est utilisée avec deux techniques. La première est la technique de super-concavité: cette méthode ressemble à la méthode de [Deneux, 1993] mais elle s'étend sur la relation des surfaces qui ne sont pas nécessairement adjacentes, mais possèdent un angle-matière supérieur à 180 degré. (Voir Figure 2.15) En se basant sur la figure ci-dessous, la relation entre la face A et B devient :

- Cas A : Adjacent et super-concave
- Cas B : Super-concave
- Cas C : Super-concave
- Cas D : Aucune relation

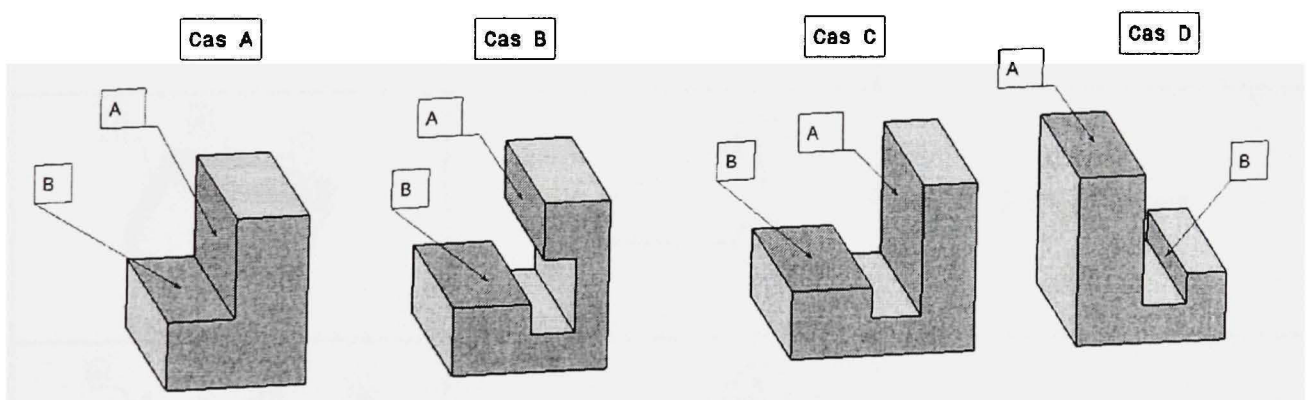


Figure 2.15 SRG - Technique de super-concavité

La deuxième technique est la méthode de face-à-face: elle extrait d'une pièce les relations de faces qui possèdent une relation de parallélisme. Pour chaque SRG (un SRG par technique pour chaque pièce), la technique extrait des sous-graphes qui possèdent toujours 4 nœuds maximum ou moins contenant les relations extraites des techniques de super-concavité et de face-à-face. Ces 4 nœuds sont par la suite transmis dans un réseau de neurones qui fait la classification de la caractéristique de forme. (Voir Figure 2.16).

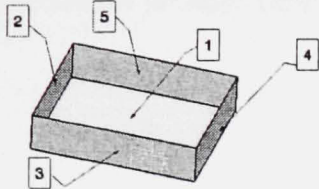
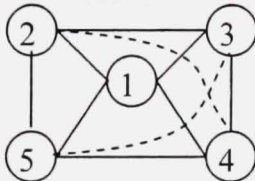
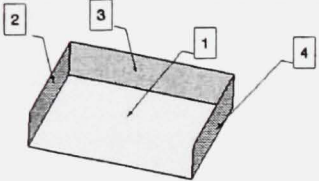
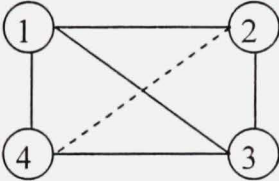
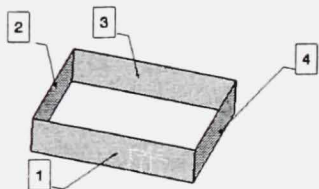
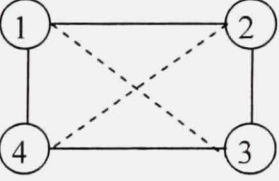
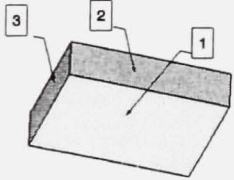
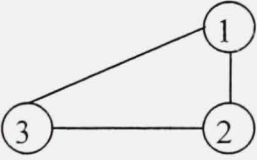
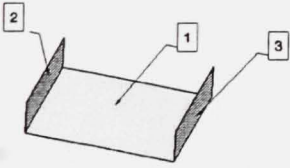
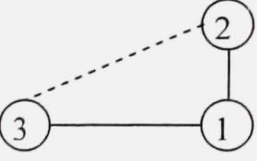
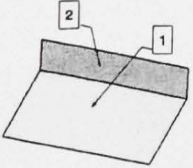

Topologie	SRG	C.F.
		Poche
		Poche ouverte
		Trou prismatique
		Poche ouverte
		Tranchée
		Marche

Figure 2.16 SRG - Extraction de caractéristique de forme

Cette méthode pour définir les entrées des réseaux de neurones par des SRG demeure prometteuse pour de plus amples recherches. Elle propose une alternative intéressante dans le but d'obtenir de bons résultats pour les modèles CAO.

2.2.6 Extraction à partir d'un système expert

Dans [Mudurai S., Lin L., 1992], un modèle d'extraction de caractéristiques de forme est proposé. Ce modèle est basé sur un système expert, qui est une forme d'intelligence artificielle utilisant une logique préétablie, et permet de déterminer un bon nombre de caractéristiques de forme. Malheureusement, ce type de système offre peu de flexibilité lorsqu'il y a des caractéristiques de forme inconnues du système et demeure une méthode onéreuse à développer.

2.2.7 Conclusion sur les modèles d'extraction de caractéristiques de forme

Dans cette section, ce travail définit des modèles d'extraction de caractéristiques de forme à partir de modèles CAO. De toutes ces techniques, la méthode de Deneux propose un algorithme flexible permettant d'éviter de construire une classification ou une base de données de familles de caractéristiques de forme prédéfinies. Cet algorithme retourne la topologie et la géométrie d'associations de surfaces, c'est-à-dire elle fait une « extraction ». Cette technique ne retourne pas le nom de l'ensemble de caractéristiques, comme par exemple une « poche » est un ensemble de caractéristiques de forme, c'est-à-dire qu'elle ne fait pas une « reconnaissance » ou une « classification ».

2.3 Modèles d'association de caractéristiques de forme en procédés d'usinage

2.3.1 Volumes élémentaires d'usinage en procédés d'usinage

[Shirur, A., Shah J.J., Hirode, K., 1998] propose une méthode qui possède une base de données contenant les volumes élémentaires, c'est-à-dire des volumes de matériel enlevé par la partie coupante de l'outil sans mouvement. Dans cette base de données, il y a également les contraintes de la machine (enveloppe de la machine X Y Z, et le changement de l'axe de l'outil, etc.).

De plus, [Shirur, A., Shah J.J., Hirode, K., 1998] proposent des opérateurs géométriques qui simulent les mouvements d'avance de la machine. Grâce à ces opérateurs géométriques et aux volumes élémentaires d'usinage, on peut définir les volumes d'enlèvement de matière disponibles pour chaque procédé d'usinage.

À partir de la pièce d'ébauche et de la pièce finale, on peut donc évaluer avec de simples opérations booléennes, les volumes d'enlèvements de matière (*Voir Figure 2.17*) et donc faire une association avec les procédés d'usinage et leurs volumes d'enlèvement de matière disponibles.

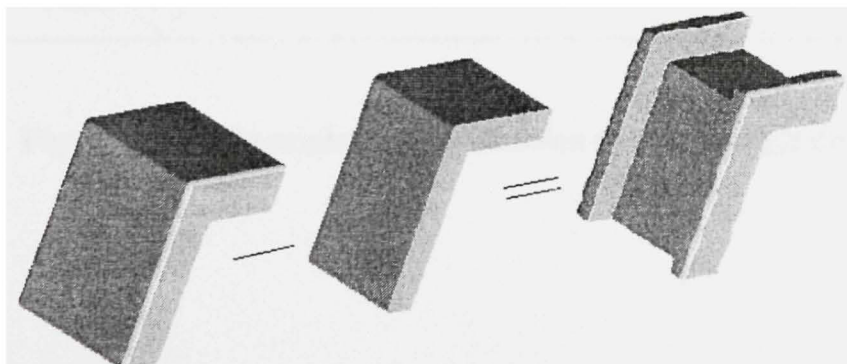


Figure 2.17 Volume d'enlèvement de matière

2.3.2 La technologie de groupe

[Warren T., Lee K., 1993] propose une méthode de reconnaissance de la technologie de groupes (GT) c'est-à-dire des familles de caractéristiques de forme comme par exemple la famille des poches, etc. Cette méthode utilise un réseau de neurones de type ART et décompose la pièce mécanique en caractéristiques de forme de base. Ces caractéristiques sont exprimées en vecteurs binaires et forment ensuite une chaîne de valeurs numériques qui est par la suite donnée au réseau de neurones pour finalement l'associer avec une famille technologique.

La technologie de groupe est une philosophie manufacturière dans laquelle les pièces mécaniques ayant un design similaire se regroupent dans une même famille pour ensuite prendre avantage de ces similarités durant la fabrication. (*Voir Figure 2.18*)

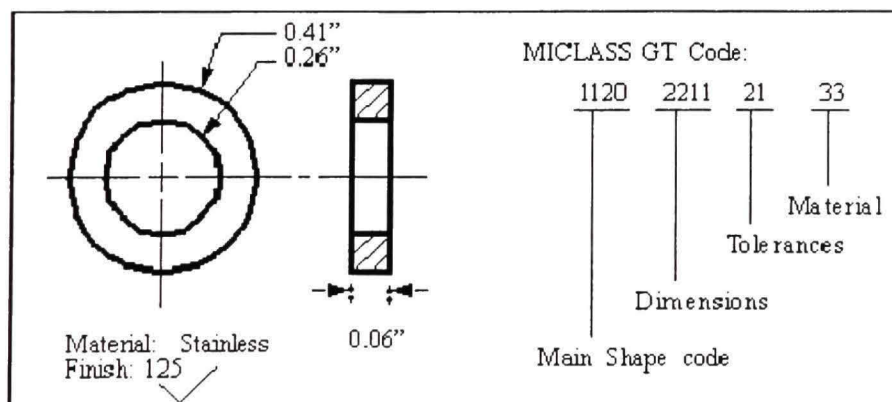


Figure 2.18 Exemple de classification de technologie de groupe

2.3.3 Extraction de caractéristiques d'usinage à partir de l'angle-matière

[Mawussi, K., Duong, V., Ponsonnet, R., 2000] propose une extraction de caractéristiques d'usinage avec la méthode d'angle matière de [Deneux, D., 1993]. Ils utilisent une classification pour séparer les caractéristiques extraites en trois grandes familles :

- Évidement : Une face est reliée à toutes autres
- Lumière : Chaque face est reliée à deux autres faces
- Enfoncement : Ceux qui ne peuvent être classés dans « Évidement » ou « Lumière »

Les auteurs définissent un ensemble de contraintes portant sur les faces et les associations de faces que les outils disponibles peuvent générer.

2.3.4 Reconnaissance de caractéristiques d'usinage utilisant les réseaux de neurones

Plusieurs recherches ont été menées pour améliorer la reconnaissance de caractéristiques de forme à partir de modèles CAO dont certains avec l'aide de réseaux de neurones (*Voir Figure 2.19*). Cependant, peu de recherches sont disponibles sur l'association des stratégies d'usinage à partir de caractéristiques de forme en utilisant des réseaux de neurones.

[Yue Y., Ding L., Ahmet K., Painter J., Walters M., 2001] dicte clairement que la représentation des caractéristiques de forme par un réseau de neurones doit être conçue selon trois aspects majeurs:

- 1 L'information doit contenir des paramètres topologiques et géométriques provenant de la caractéristique de forme en B-REP (par exemple, des faces, des arêtes, des sommets, etc.). Cette information peut également contenir des informations supplémentaires sur la pièce comme par exemple, le type de matériel, la tolérance, etc.
- 2 L'information doit représenter une caractéristique de forme et permettre ainsi de la distinguer de façon unique.
- 3 Cette information doit être numérique. Les réseaux de neurones nécessitent des valeurs numériques.

De plus, selon les auteurs tel que [Osakada, Yang, 1991] et [Mei *et al.*, 1995], les réseaux de neurones de type MLP (Multi-Layer Perceptron) avec l'algorithme de rétro-propagation démontrent un haut taux de succès dans les applications de reconnaissances de forme dans la PFAO.

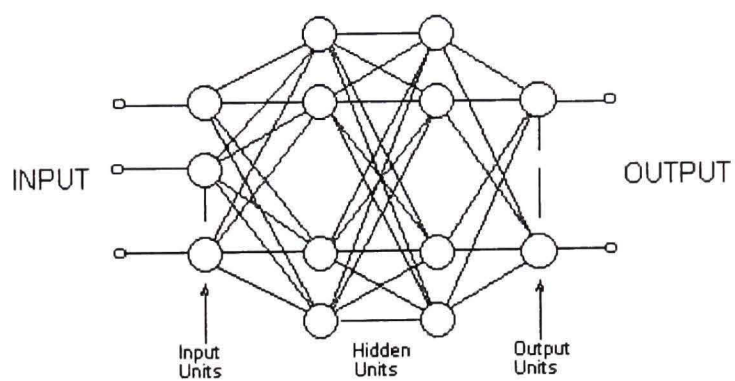


Figure 2.19 Réseau de neurones de type MLP

2.3.5 Conclusion sur les modèles d'association de caractéristiques de forme en procédés d'usinage

Cette section démontre qu'il y a peu de travaux œuvrant dans ce sens. La reconnaissance de stratégies d'usinage à partir de caractéristiques de forme de pièces structurelles est une application qui nécessite une méthodologie flexible car ces pièces vont toujours avoir des caractéristiques de formes différentes. Le système doit être en mesure d'accepter ou « d'interpréter » des caractéristiques de forme jamais vues. Les techniques d'intelligence artificielle sont toutes indiquées pour ce genre d'application.

Un réseau de neurones, correctement entraîné, offre des meilleures réponses ainsi que des temps inférieurs aux techniques algorithmiques séquentielles et linéaires actuellement utilisées.

L'avantage du réseau de neurones artificiel réside dans sa capacité d'interprétation ou de « généraliser » avec les nouvelles caractéristiques de forme. Ces caractéristiques, comportant des divergences avec celles durant l'entraînement du réseau, sont dites nouvelles, c'est-à-dire que le réseau de neurones ne les a jamais abordé (passées en traitement dans le but de les assimiler). Le réseau artificiel permet donc d'obtenir une certaine constance avec les nouvelles caractéristiques en donnant la réponse la plus réaliste et ce, de façon rapide et efficace.

2.4 Conclusion

L'analyse globale d'usinage est un sujet de recherche qui demande une attention particulière puisqu'elle permet l'amélioration de la PFAO pouvant ultimement faire une évaluation précoce de la fabrication lors de la conception de la pièce structurelle. Cette analyse globale d'usinage encadre donc une approche d'ingénierie concourante durant le processus manufacturier des entreprises car elle amène le savoir-faire manufacturier durant la conception [Shah, J.J., Mantyla, M., 1995]. Elle possède trois étapes dont deux qui sont importantes pour ce travail : l'extraction de caractéristiques de forme et la reconnaissance de celles-ci en stratégies d'usinage.

Pour la première étape, l'extraction de caractéristiques de forme, la méthode proposée par [Deneux, 1993] permet d'extraire des formes sans la nécessité de « connaître » ces formes à travers un système quelconque de classification ou une base de données de caractéristiques prédéfinies. Cet algorithme extrait des caractéristiques de forme qui sont des éléments topologiques et géométriques du modèle B-REP.

Ensuite, la deuxième étape de l'analyse globale d'usinage est l'association des stratégies d'usinage à partir des caractéristiques de forme extraite préalablement. Plusieurs auteurs dont [Yue, *et al.*, 2001] utilisent les réseaux de neurones pour la reconnaissance de caractéristiques de forme mais également pour reconnaître des stratégies d'usinage (ou même des caractéristiques d'usinage). Un réseau de neurones artificiel s'avère être une technique pouvant répondre à la problématique du travail puisqu'il offre une interprétation face aux nouvelles données, c'est-à-dire qu'il permette d'établir des associations avec des caractéristiques de forme non définies.

Dans le prochain chapitre, ce travail propose un modèle de caractéristiques de forme, de stratégies d'usinage et une modélisation d'un réseau de neurone. Ces trois modèles permettront d'établir une méthodologie pour résoudre la problématique globale de ce travail.

CHAPITRE 3

DESCRIPTION DES MODÈLES UTILISÉS

3.1 Introduction

Le chapitre précédent propose une revue de la littérature sur deux aspects. Le premier aspect est la méthodologie pour extraire les caractéristiques de forme à partir d'un modèle B-REP. Le second aspect introduit différents travaux sur l'association de caractéristiques de forme aux stratégies d'usinage. Le but de ce chapitre est de présenter des modèles. Ces modèles sont utilisés par la suite pour en déduire la méthodologie générale de ce travail et ainsi répondre à la problématique.

La première modélisation est celle de la caractéristique de forme extraite à partir de la méthode proposée par [Deneux, 1993]. Cette modélisation se concentre particulièrement sur les paramètres B-REP des différents types de caractéristiques de forme (topologie et géométrie) mais également sur les données technologiques entourant la pièce structurale.

Le second modèle propose des stratégies d'usinage pour les pièces structurales en aéronautique. Cette liste de stratégies d'usinage, sans associer avec des caractéristiques de forme, devient les choix possibles du réseau de neurones.

Le troisième modèle présenté est le réseau de neurones qui permettra l'association des paramètres de la caractéristique de forme avec une stratégie d'usinage désirée. Les réseaux de neurones sont un domaine vaste. La modélisation de celui-ci sera faite premièrement à partir d'un type de réseau de neurone choisi. Ensuite, elle portera sur les caractéristiques du réseau, tels le nombre d'entrées, le nombre de couches cachées, etc. Finalement, le modèle du réseau de neurones introduira les différents algorithmes de calcul tel la rétro-propagation ainsi que son apprentissage.

3.2 Modélisation de la caractéristique de forme

3.2.1 Caractéristiques de forme typiques de pièces structurales

3.2.1.1 Poches

Les poches sont des formes essentielles dans les pièces structurales en aéronautique. Elles sont définies par une surface de fond et des flancs (parois minces). La surface de fond est généralement plane. La jonction entre la surface de fond et les différents flancs est souvent définie avec un congé, c'est-à-dire un rayon de courbure pour assurer qu'il y a toujours une tangence entre les surfaces pour éviter les concentrations de contraintes.

Il y a plusieurs types de poches, notamment les poches fermées et ouvertes (*Voir* Figure 3.1 et Figure 3.2), mais également les poches aux flancs prismatiques ou courbés. Comme souligné auparavant, les flancs courbés sont des parois qui ne sont pas perpendiculaire à la surface de fond (*Voir* Figure 1.18). Les flancs courbés doivent être usinés, la plupart du temps, avec des MOCN en 5 axes continus.

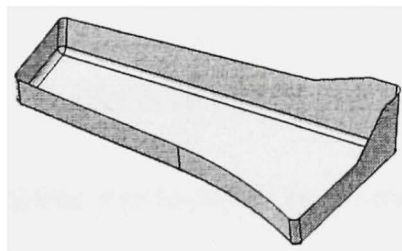


Figure 3.1 Poche fermée

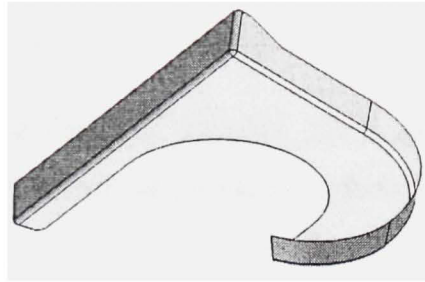


Figure 3.2 Poche ouverte

Également, il y a les ensembles de poches qui possèdent un ou plusieurs flancs communs. (Voir Figure 3.3) Avec l'algorithme de propagation de [Deneux, 1993], cet ensemble de poches sera traité comme une seule caractéristique de forme.

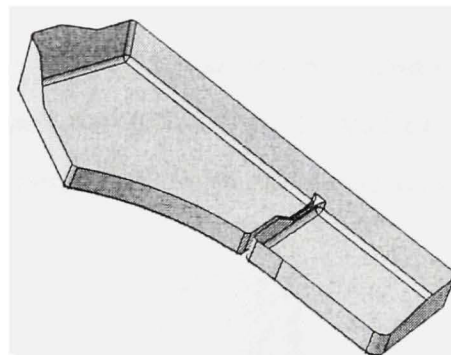


Figure 3.3 Poches avec une ou plusieurs faces communes

Dans ce travail, certains paramètres topologiques et géométriques sont considérés sur les poches :

- Profondeur de la poche
- Épaisseur des parois
- Rayon de courbure des congés
- Angle des flancs par rapport à la surface de fond
- Aire totale de la surface de fond
- Distance entre flancs parallèles

3.2.1.2 Trous

Les trous partagent une forme des plus simples. Dans les pièces structurales, ils sont nombreux et, habituellement, sont positionnés sur la surface de fond des poches. (*Voir Figure 3.4*).

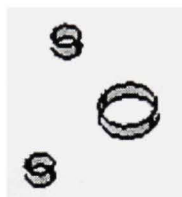


Figure 3.4 Trous

Un trou sans fond est habituellement composé de deux faces cylindriques avec des rayons de courbure identiques se rejoignant. Les trous avec une surface de fond peuvent être des fonds plats (*Voir Figure 3.5*), soit de simples surfaces circulaires ou en « v » (*Voir Figure 3.6*).

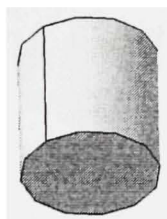


Figure 3.5 Trou avec fond plat

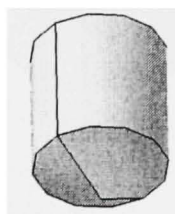


Figure 3.6 Trou avec fond en "V"

Plusieurs types de trous peuvent être extraits tels des trous simples (*Voir Figure 3.7*), chanfreinés (*Voir Figure 3.8*), coniques (*Voir Figure 3.9*) ou lamés (*Voir Figure 3.10*).

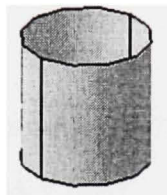


Figure 3.7 **Trou simple**

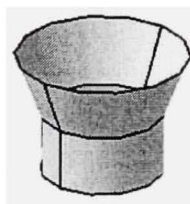


Figure 3.8 **Trou chanfreiné**

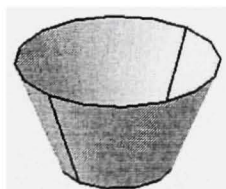


Figure 3.9 **Trou conique**

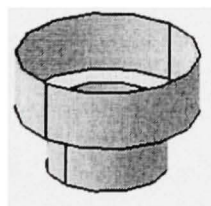


Figure 3.10 **Trou lamé**

Dans ce travail, certains paramètres topologiques et géométriques sont considérés sur les caractéristiques de forme de type « trous » :

- Profondeur du trou
- Diamètre du trou
- Orientation du trou par rapport à la surface de fond
- Type de fond (plat ou en « V » avec angle)
- Type de trou (simple, conique, lamé, chanfreiné, taraudé, etc.)

3.2.2 Modélisation des paramètres topologiques et géométriques

Après avoir procédé à l'extraction des caractéristiques de forme, une nouvelle modélisation doit être ensuite conduite pour chaque caractéristique de forme. Cette modélisation consiste à l'énumération ou le calcul de certains paramètres topologiques et géométriques de la caractéristique de forme, ainsi que le choix d'autres paramètres technologiques qui peuvent influencer le choix de la stratégie d'usinage, mais l'information ne réside pas nécessairement dans le modèle B-REP (*Voir* Figure 3.11).

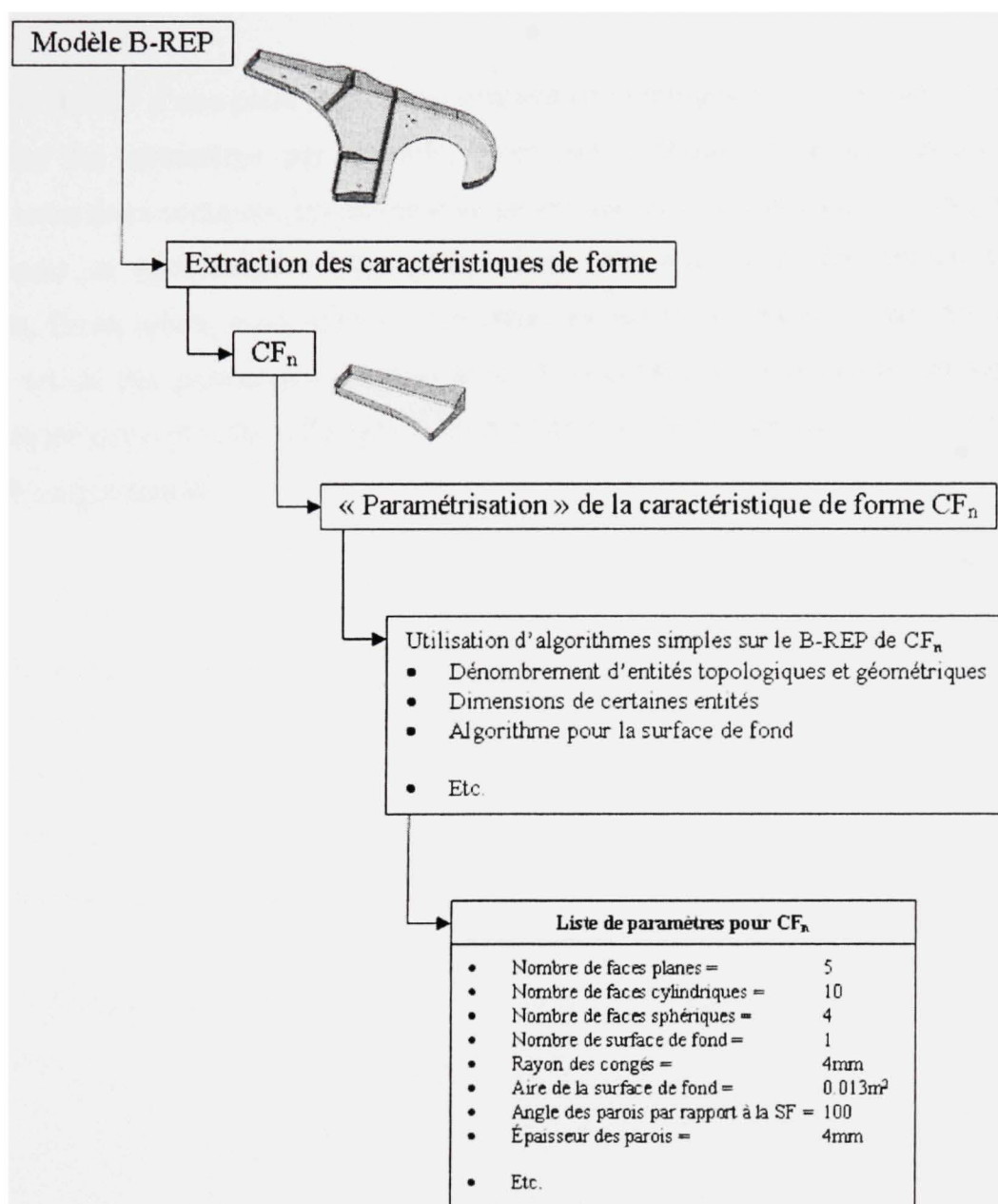


Figure 3.11 « Paramétrisation » topologique et géométrique

Le modèle B-REP d'une pièce mécanique contient de nombreuses informations utiles durant l'extraction des paramètres, par exemple, il contient la définition de tous les sommets, la distance entre deux sommets, le nombre d'arêtes qu'une surface contient, etc. Les paramètres topologiques et géométriques font référence au dénombrement des entités contenues (sommets, faces, arêtes, etc.), mais ils permettent également de mesurer certaines entités et ainsi en retirer des paramètres dimensionnels. Finalement, les paramètres topologiques et géométriques peuvent aider à déduire la surface de fond de la caractéristique de forme avec de simples algorithmes.

3.2.2.1 Le dénombrement d'entités

Les paramètres topologiques représentent la structure du modèle B-REP. La modélisation propose l'utilisation d'un dénombrement de différentes entités de la caractéristique de forme répondant à certains critères de sélection. Ces critères de sélection peuvent être implémentés facilement dans un système informatique automatique. Ce travail suggère quelques entités:

- Nombre de sommets
- Nombre d'arêtes droites
- Nombre d'arêtes circulaires (avec rayon de courbure)
- Nombre d'arêtes concaves (avec un angle matière supérieur ou égal à 180 degrés)
- Nombre de faces planes
- Nombre de faces sphériques
- Nombre de faces cylindriques
- Nombre de congés
- Nombre de surfaces de fond

Lorsque le dénombrement d'une entité est nul, ce paramètre peut tout simplement afficher la quantité zéro « 0 ».

3.2.2.2 Les paramètres dimensionnels

Dans les paramètres topologiques et géométriques, la modélisation procède également à l'extraction de dimensions (magnitude) d'entités. Ces grandeurs, qui sont appelés paramètres dimensionnels dans ce travail, peuvent devenir des paramètres influents sur le choix de la stratégie d'usinage.

Extraits également des paramètres topologiques et géométriques, les dimensions peuvent être des mesures absolues ou des mesures relatives. Les mesures absolues (une entité) sont, comme par exemple, une dimension de rayon de courbure (*Voir Figure 3.12*), l'aire d'une surface, etc. Les mesures relatives (la relation entre deux entités) sont, comme par exemple, une distance entre deux surfaces, un angle entre la surface de fond et les parois (*Voir Figure 3.13*), etc. Toute cette information peut être accumulée et répertoriée pour chaque caractéristique de forme pour finalement être interprétée.

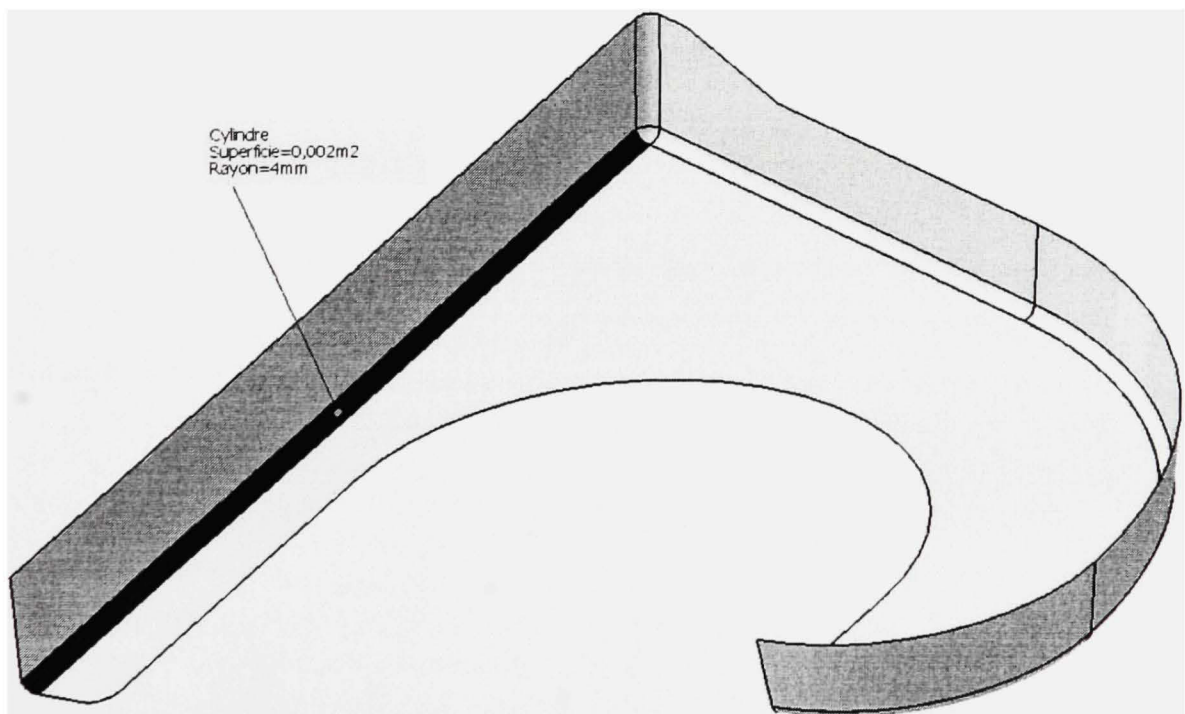


Figure 3.12 Dimension absolue - Rayon de courbure d'un congé

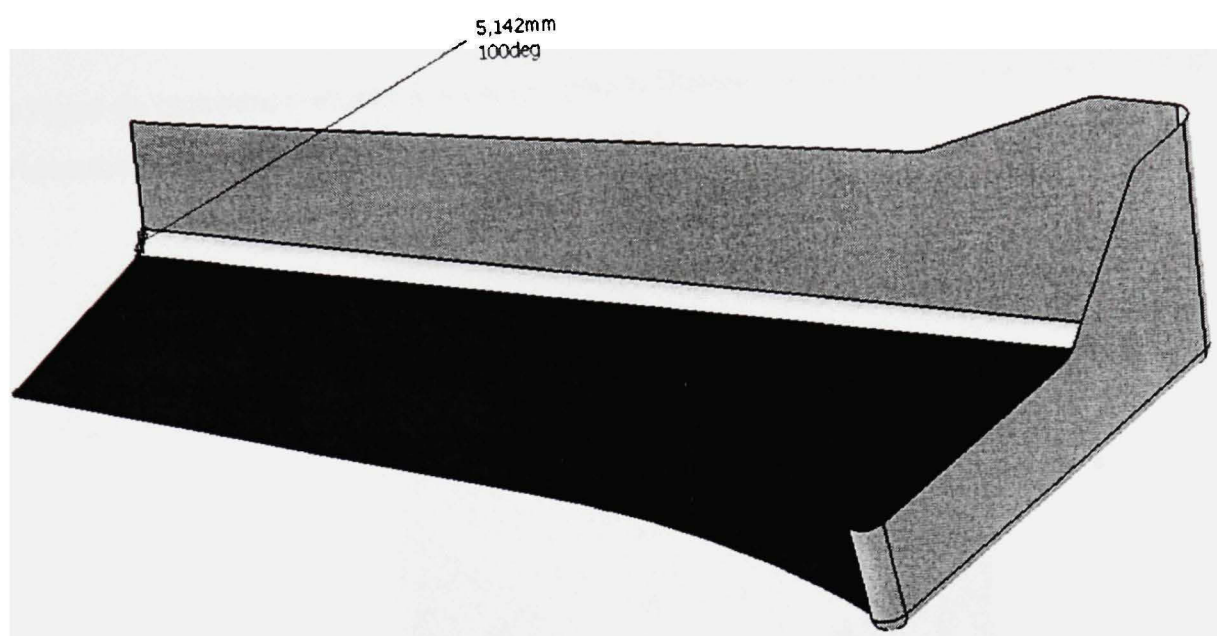


Figure 3.13 Dimension relative - Angle entre un flanc et la surface de fond

3.2.2.2.1 Rayon de courbure des congés

Le rayon de courbure minimal des congés peut influencer le choix de la stratégie d'usinage et évidemment, le choix de l'outil. (*Voir Figure 3.14*)

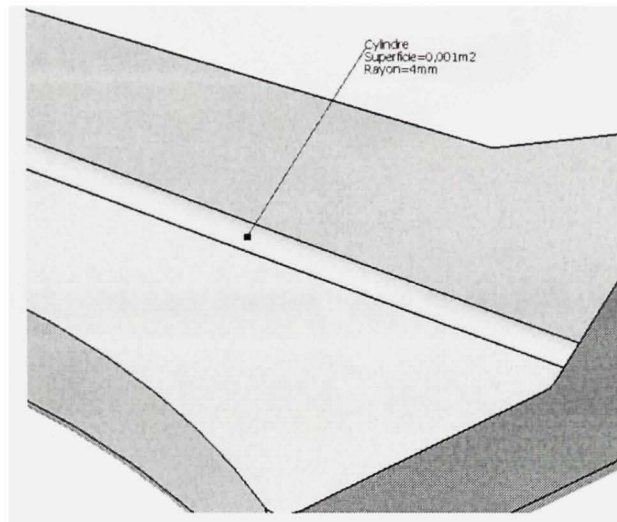


Figure 3.14 Mesure absolue - Rayon de courbure d'un congé

3.2.2.2.2 Aire totale de la surface de fond

L'aire de la surface de contrôle peut avoir une influence sur le choix de la stratégie d'usinage par exemple, un trou avec un fond plat peut devenir un perçage ou un fraisage circulaire dépendamment de l'aire de la surface de fond (ou le diamètre). (*Voir Figure 3.15*)

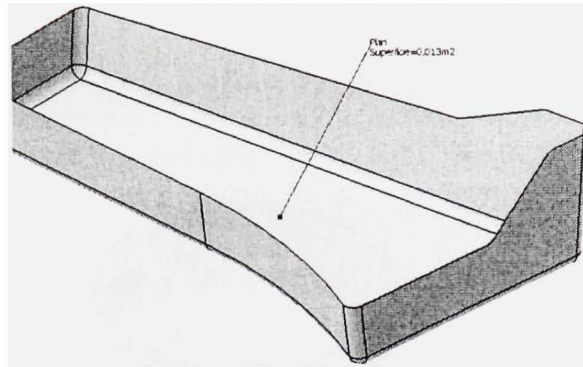


Figure 3.15 Mesure absolue - Aire de la surface de fond

3.2.2.2.3 Diamètre d'un trou

Le diamètre est donné par le rayon de courbure des faces cylindriques. (*Voir Figure 3.16*)

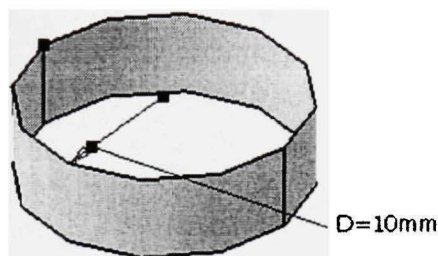


Figure 3.16 Mesure absolue - Diamètre d'un trou

3.2.2.2.4 Profondeur d'une poche ou d'un trou

La profondeur d'une poche ou d'un trou est facile à calculer et peut s'avérer utile pour déterminer une stratégie d'usinage. (*Voir Figure 3.17*). Elle nécessite, comme préalable, la définition de la surface de fond et calcule la distance maximale avec la paroi la plus haute.

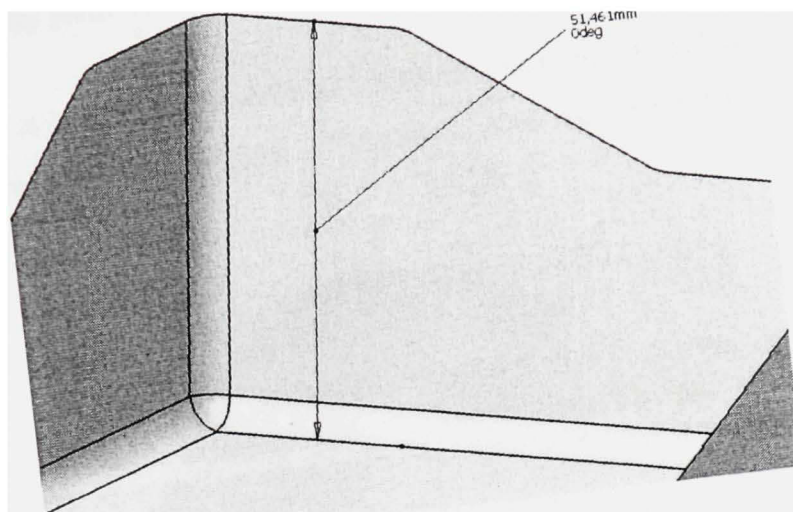


Figure 3.17 Mesure relative - Profondeur d'une poche

3.2.2.2.5 Angle entre un flanc et la surface de fond

L'angle entre un flanc et la surface de fond est également une mesure relative. Elle calcule, en degrés, l'angle entre la surface de fond et la paroi la plus inclinée par rapport à celle-ci. (Voir Figure 3.18)

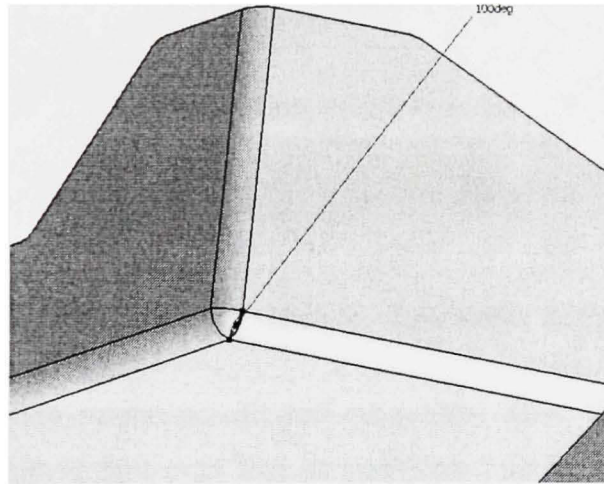


Figure 3.18 Mesure relative - Angle entre flanc et surface de fond

3.2.2.2.6 Épaisseur des parois

L'épaisseur des parois est un paramètre ayant une influence majeure sur la stratégie d'usinage puisqu'elle affecte beaucoup les distorsions (effort de coupe, thermique, etc.). Cependant, le calcul de ce paramètre peut s'avérer fastidieux puisqu'il nécessite la prise en compte de deux caractéristiques de forme, pour être capable d'en déduire la distance entre deux flancs. (Voir Figure 3.19)

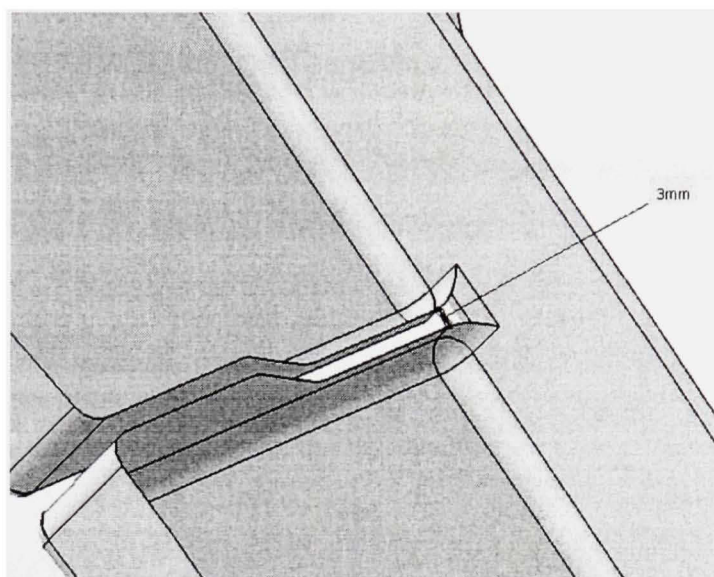


Figure 3.19 Mesure relative - Épaisseur des parois

Il se peut également que cette valeur ne soit pas calculable, donc il en convient qu'elle pourrait être entrée manuellement dans cette liste de paramètres de caractéristiques de forme. (Voir Figure 3.20)

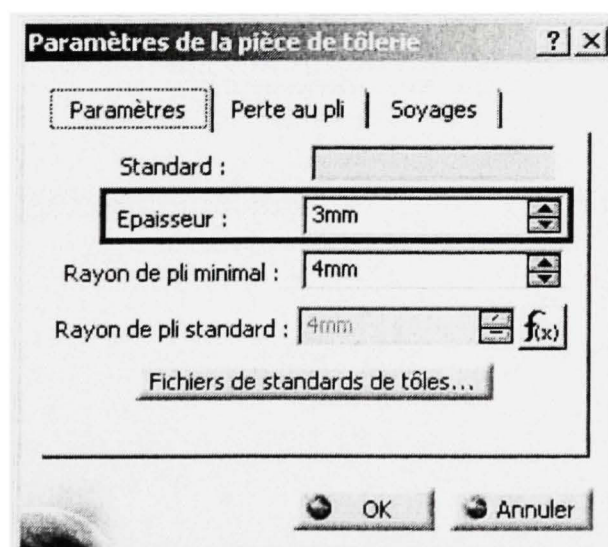


Figure 3.20 Dialogue pour définir l'épaisseur de la paroi

3.2.2.2.7 Unité de mesure désignant les dimensions

L'unité de mesure est importante pour désigner les dimensions de longueurs et angulaires.
Par défaut, ce travail propose comme modèles les suivants :

Paramètre « Unité de longueur » :

Impérial (pouce) = 0

Métrique (mm) = 1

Paramètre « Unité angulaire » :

Degrés (°) = 0

Radians (rad) = 1

3.2.2.3 Algorithme pour l'identification de la surface de fond

La surface de fond est un concept utile dans la « paramétrisation » de la caractéristique de forme. Ce travail propose la définition suivante : la surface commune (ou une direction, donc la surface perpendiculaire à cette direction), c'est-à-dire celle qui est reliée avec tous les autres flancs d'une caractéristique de forme (*Voir* Figure 3.21 et Figure 3.22).

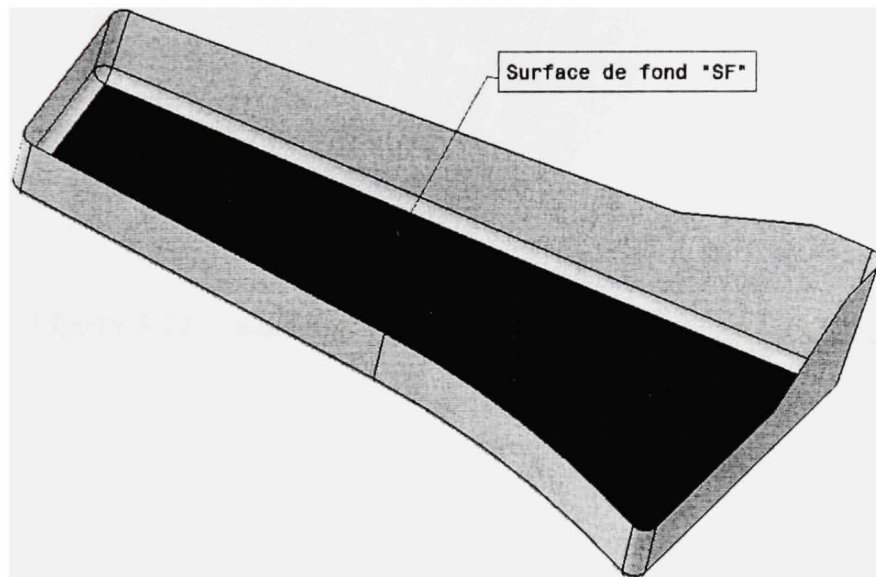


Figure 3.21 Surface de fond d'une poche

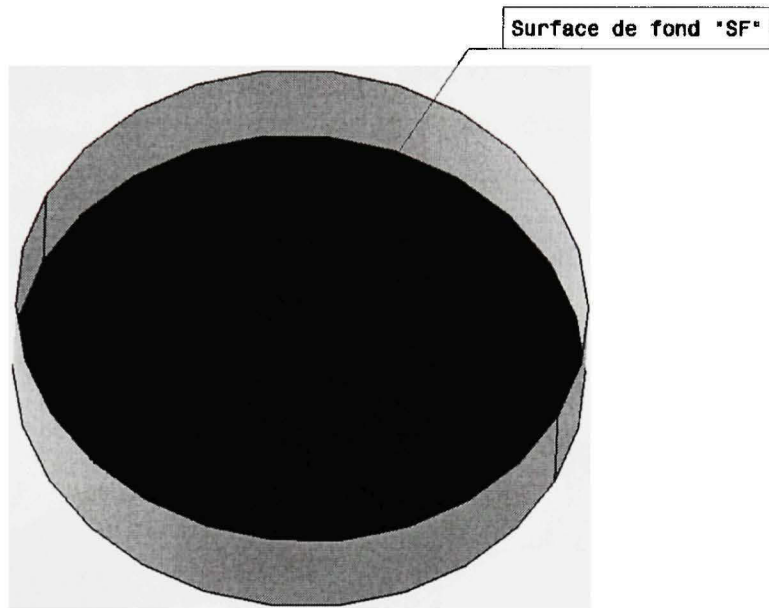


Figure 3.22 Surface de fond d'un trou ou d'une poche circulaire

Cette direction ou surface de fond commune est liée à une seule caractéristique de forme mais elle peut devenir, dans la plupart des cas, une direction globale par un simple principe de propagation, c'est-à-dire que chaque face de chaque caractéristique de forme perpendiculaire à cette direction devient, si elle existe, la surface de fond de cette caractéristique de forme. (*Voir Figure 3.23*)

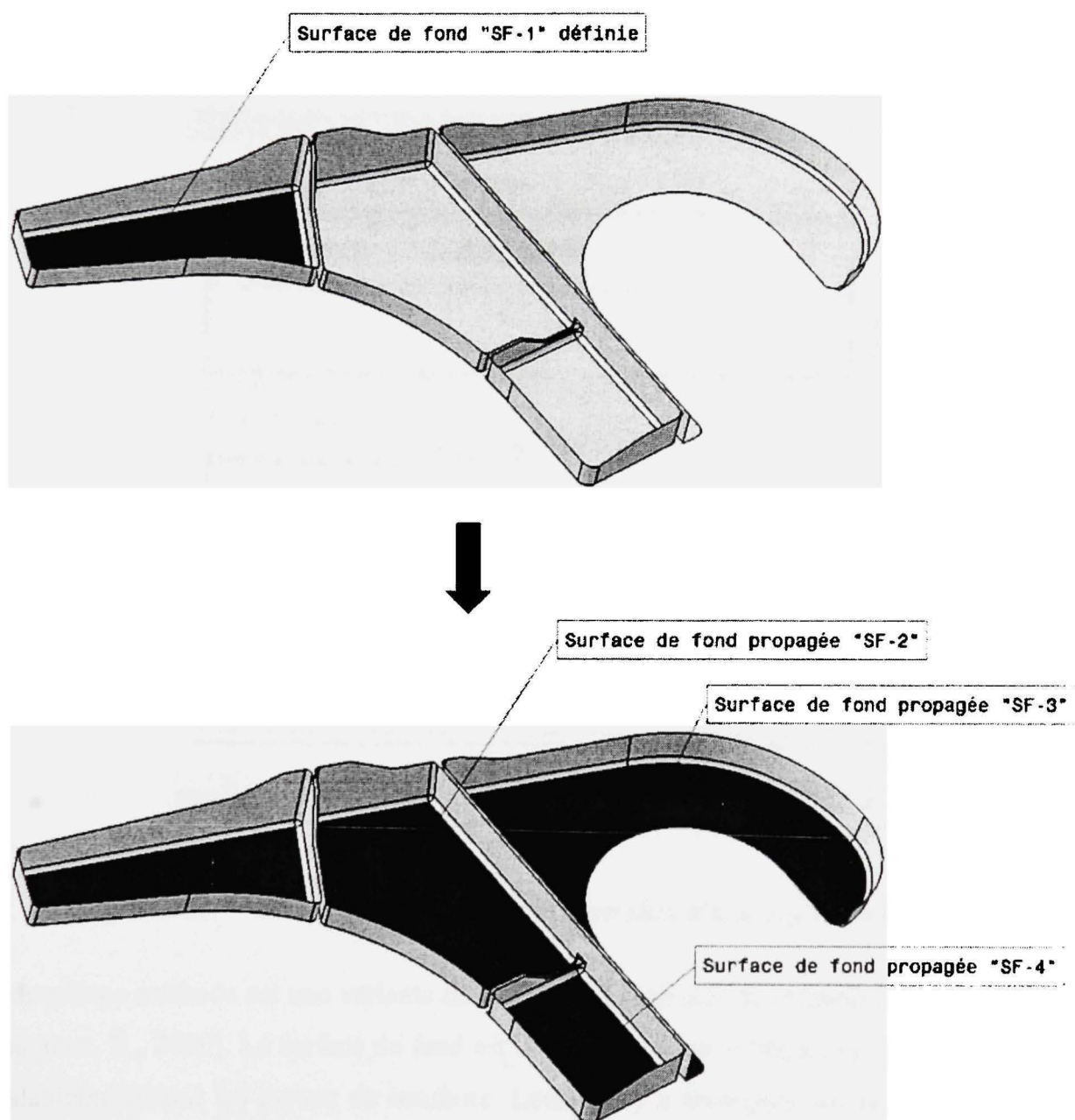


Figure 3.23 Surface de fond - Principe de propagation

À partir du modèle d'extraction de [Deneux, 1993], qui ne fait aucune classification ou de reconnaissance de forme, ce travail propose un moyen d'extraction de la surface fond à partir de ces deux méthodes :

La première méthode est simple mais efficace. C'est la définition manuelle dans le modèle B-REP, en sélectionnant la « direction de l'usinage » durant la phase de PFAO. Certains logiciels de PFAO de grades commerciaux utilisent déjà cette méthode pour aider durant l'étape de reconnaissance de caractéristiques d'usinage. (Voir Figure 3.24)

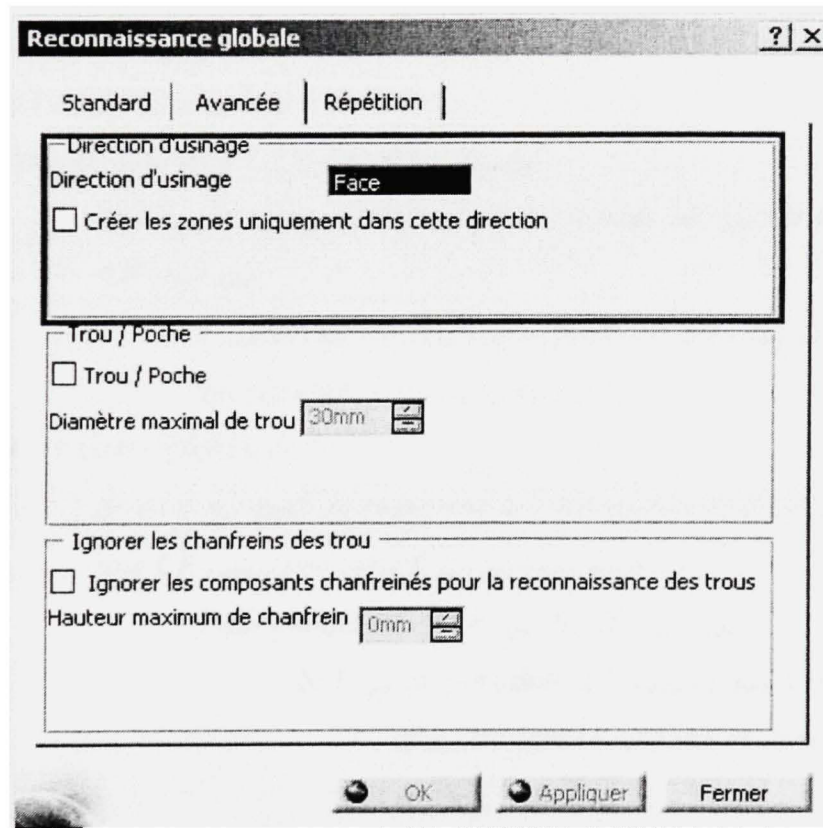


Figure 3.24 Sélection manuelle de la direction d'usinage dans CATIA V5R16

La deuxième méthode est une variante du concept d'évidement de [Mawussi, K., Duong, V., Ponsonnet, R., 2000]. La surface de fond est la surface qui est reliée à toutes autres en ayant préalablement omit les rayons de courbure. Lorsqu'il y a ambiguïté sur la surface de fond pour une caractéristique de forme, sélectionner la surface de fond parallèle à une autre caractéristique de forme du modèle B-REP.

Voici l'algorithme proposé pour identifier les surfaces de fond (SF) à partir des caractéristiques de forme (CF) de type « poche » ou de type « trou » :

Extraction de CF à partir du modèle B-REP

Initialiser l'incrément « i » à 0

Pour chaque CF_{extraite}

Créer un modèle B-REP temporaire de la CF_{extraite} « CF_{temporaire} » en omettant les faces cylindriques classées « rayons de courbure »

Initialiser l'incrément « j » à 0

Pour chaque face « F_{test} » de CF_{temporaire}

Si F_{test} possède des arêtes reliant toutes les autres faces restantes de CF_{temporaire}

F_{test} devient la surface de fond « F_{surface de fond} » de la CF_{extraite}

Incrémenter « i » et « j » de 1

Si « j » est différent de 1

Si « i » est égal ou supérieur à 1 (le modèle B-REP contient au moins une CF_{extraite} avec une F_{surface de fond} définie)

Pour chaque face « F_{test} » de CF_{temporaire}

Si F_{test} est parallèle à F_{surface de fond} d'une autre CF

F_{test} devient la surface de fond « F_{surface de fond} » de la CF_{extraite}

Si la F_{surface de fond} n'est pas définie correctement dans CF_{nouvelle}

Ouvrir le mode manuel de sélection de la direction d'usinage

3.2.3 Modélisation des paramètres technologiques

La « paramétrisation » technologique est l'information qui ne peut être extraite à partir du modèle B - REP. Ces paramètres proviennent de toutes autres sources d'information comme par exemple, le système CFAO, le savoir-faire corporatif et individuel, le matériau à usiner, les tolérances de la pièce, etc. bref, tout ce qui ne se trouve pas directement dans la définition du modèle B-REP ou ses fichiers de transfert (.igs, .stp, etc.). (Voir Figure 3.25)

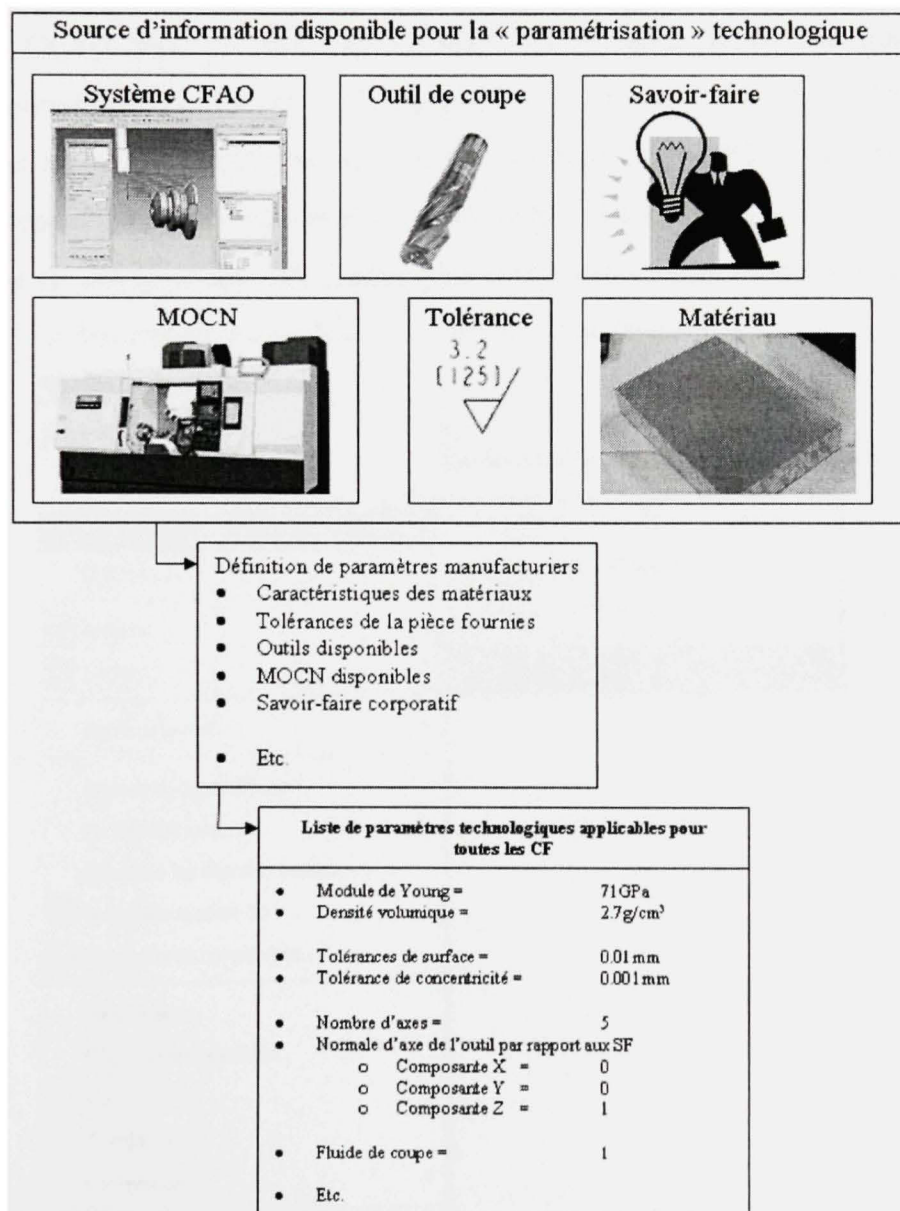


Figure 3.25 « Paramétrisation » technologique de la pièce structurale

Étant donné la richesse de ces sources d'information, ce travail propose un survol de quelques paramètres technologiques qui peuvent avoir une certaine influence sur le choix des stratégies d'usinage.

3.2.3.1 Systèmes CFAO

Les systèmes CFAO peuvent être une source d'information disponible pour retirer des paramètres technologiques. Ils peuvent supporter une quantité d'information sur la pièce structurale qui ne se trouverait pas nécessairement dans le B-REP et ils sont intéressants puisqu'ils permettraient d'automatiser facilement l'extraction de ces paramètres technologiques en utilisant des API disponibles directement dans les systèmes CFAO (Voir Figure 3.26) et ils demeurent accessibles pour les programmeurs CN.

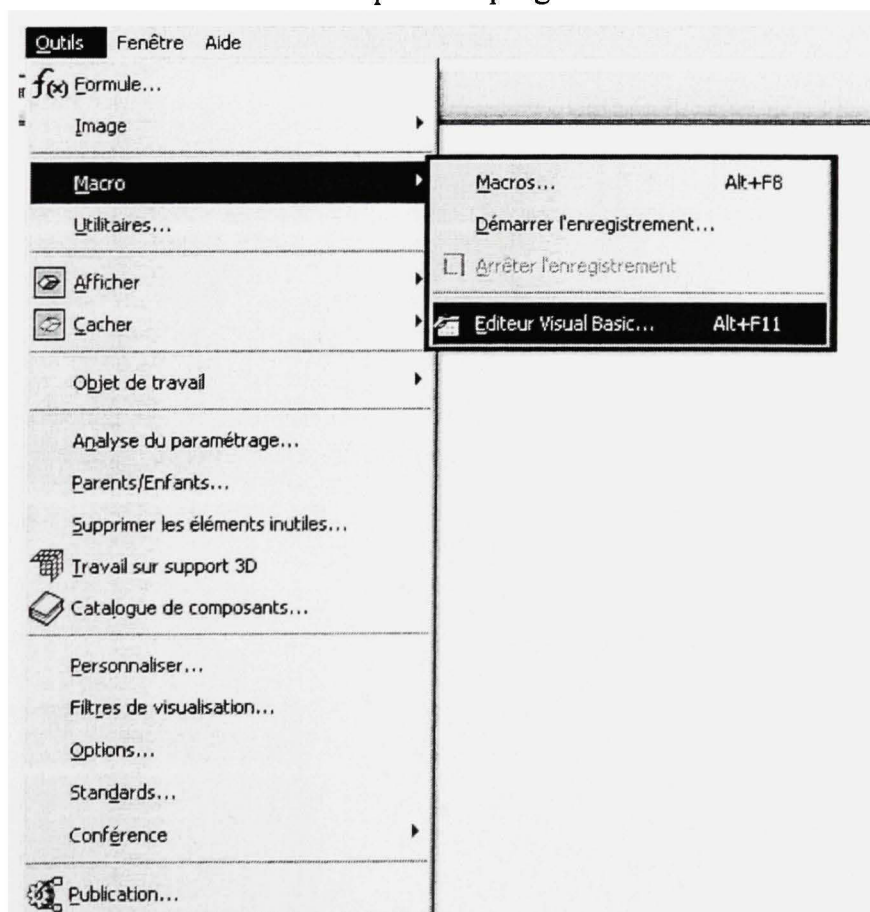


Figure 3.26 API disponibles dans un environnement CFAO

3.2.3.1.1 Caractéristiques des matériaux

La plupart des systèmes CAO/FAO de haut niveau offre des modules complémentaires d'analyse d'éléments finis (FEA). Ces modules permettent de simuler des efforts (torsion, pression, etc.) sur diverses pièces conçues en CAO. La première étape est, avant même d'ouvrir le module d'analyse d'éléments finis, lorsque le modèle CAO est complété, lui assigner un matériau avec ses propriétés structurales. (*Voir Figure 3.27*)

Cette assignation affecte plusieurs paramètres technologiques au modèle CAO évidemment, le modèle B-REP ne reçoit pas ces paramètres. Toutefois, ces paramètres technologiques peuvent s'avérer être des facteurs déterminants dans le choix de stratégies d'usinage

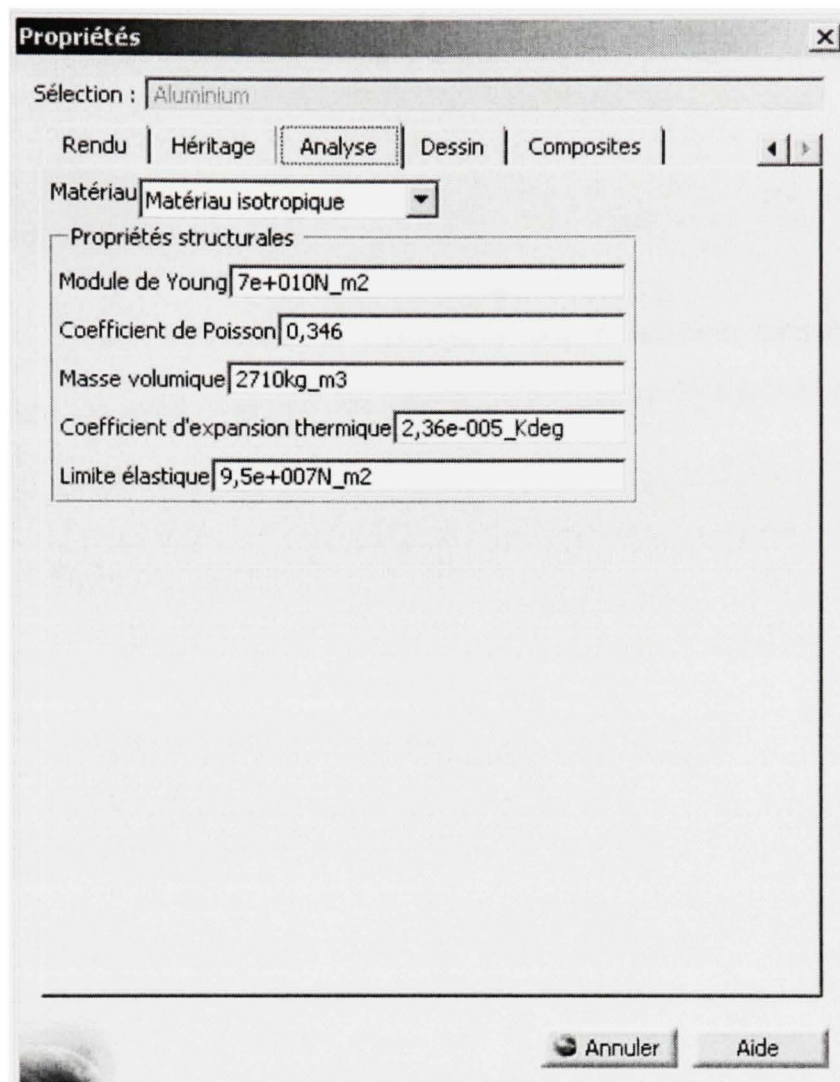


Figure 3.27 CFAO - Affectation d'un matériau et de ses propriétés

Ce travail suggère quelques paramètres technologiques sur les matériaux :

- Module de Young
- Densité volumétrique

Ces valeurs vont permettre de déterminer aisément le type de matériau utilisé et d'adapter la stratégie d'usinage et surtout, d'ajuster les vitesses d'avance et de rotation de la broche en conséquence.

3.2.3.1.2 Tolérances de la pièce structurelle

Un autre module complémentaire des systèmes CAO est la capacité de générer des dessins industriels des pièces préalablement modélisée en 3-D. (*Voir* Figure 3.28). Ces dessins peuvent contenir de l'information nécessaire à la fabrication comme par exemple des tolérances :

- de finition (ou rugosité) de certaines surfaces, (*Voir* Figure 3.29)
- dimensionnelles, spécifiant les déviations permises d'une dimension nominale,
- géométriques, par rapport à certain élément (concentricité, position, battement, etc.)

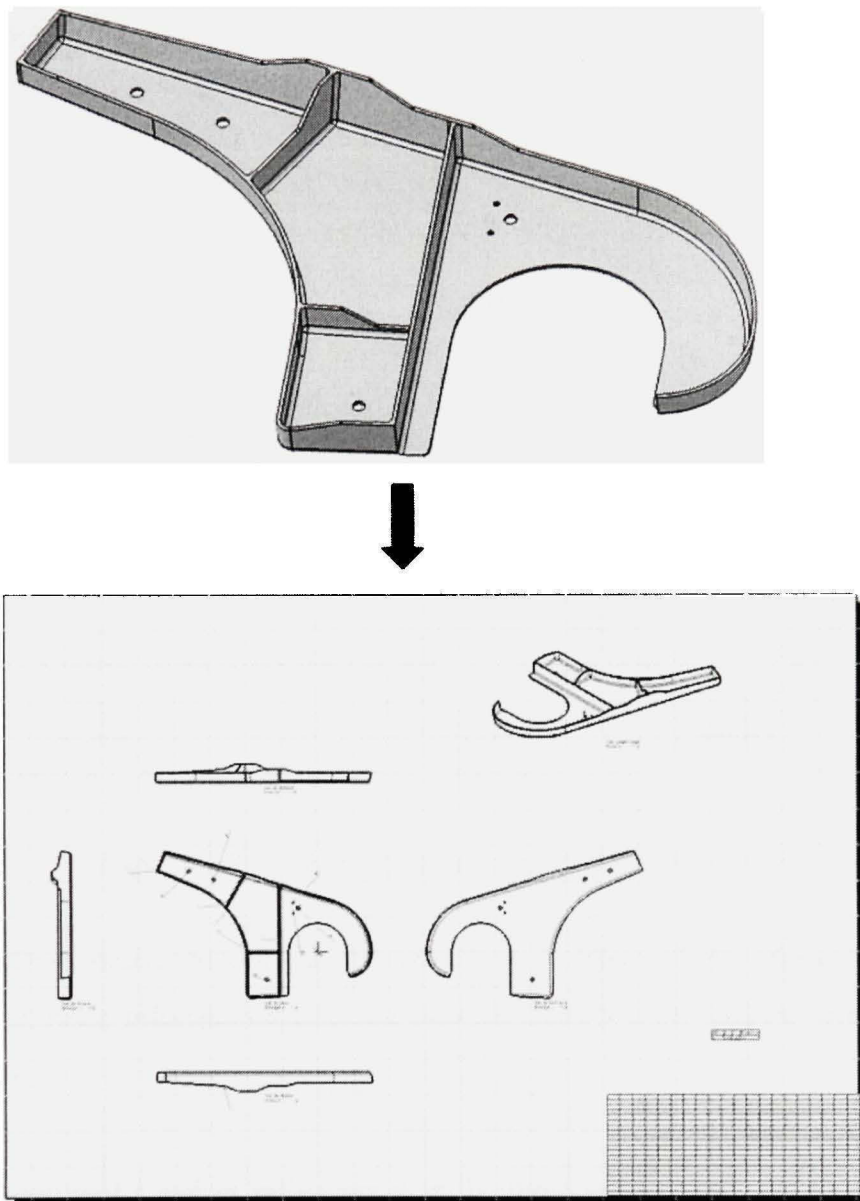


Figure 3.28 Génération de dessins de CATIA V5R16

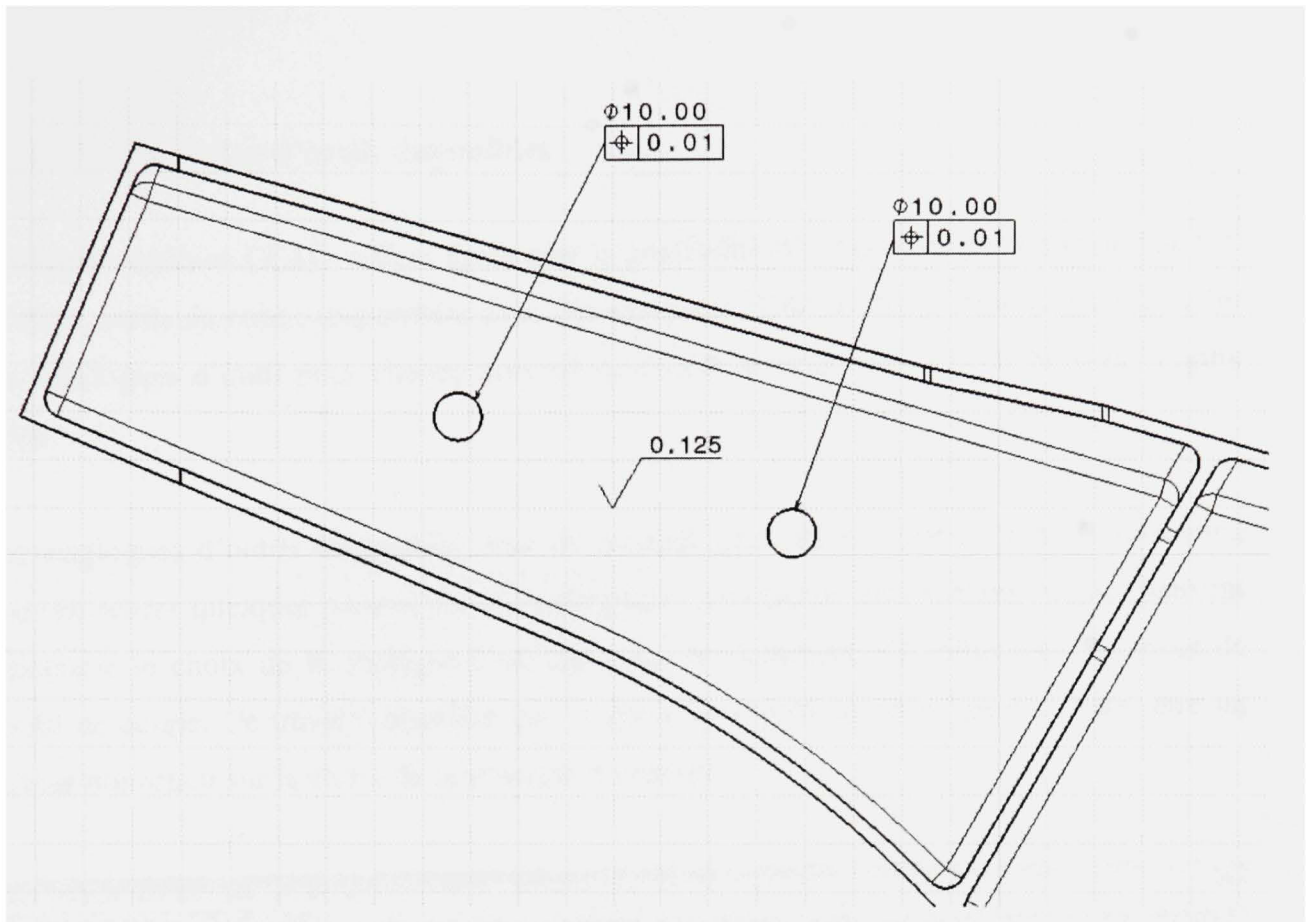


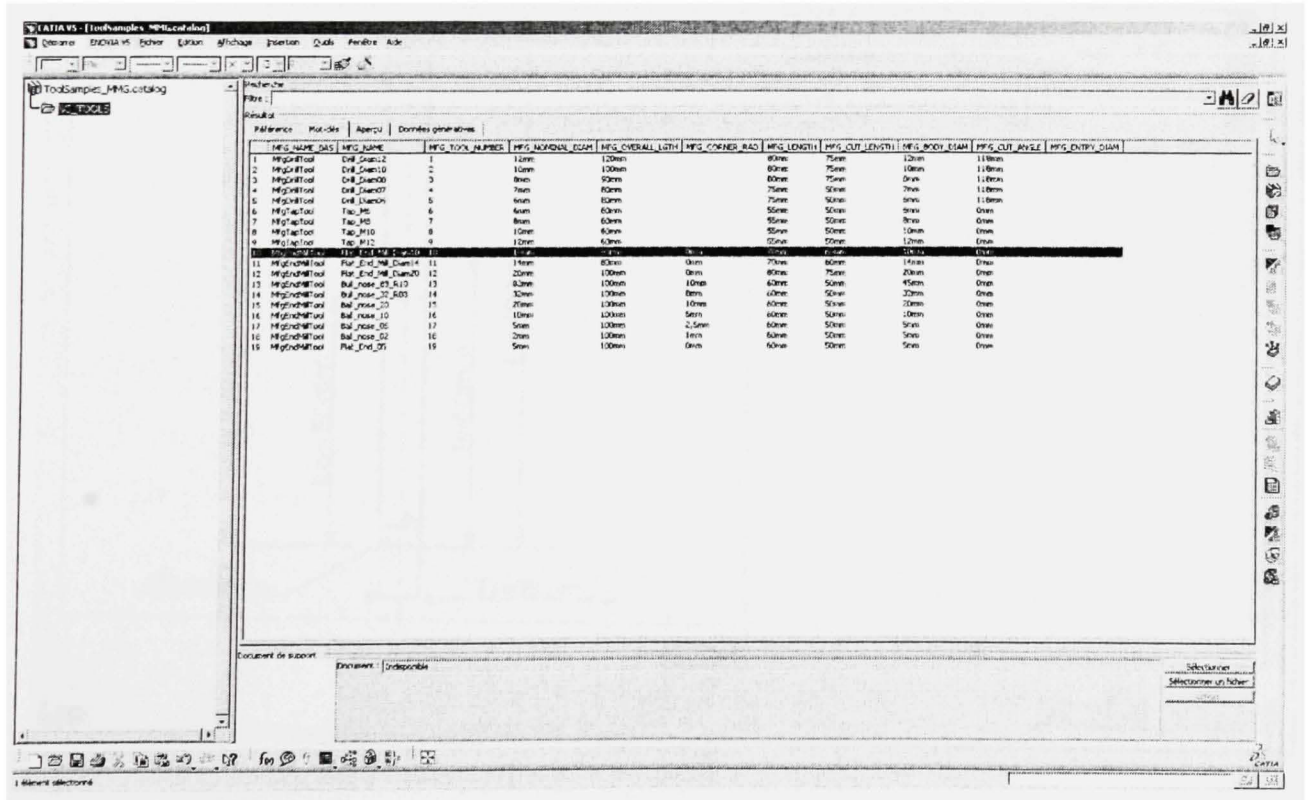
Figure 3.29 Exemple de tolérancement géométrique

Les traditions d'ingénierie dictent que les tolérances se trouvent sur un dessin industriel de fabrication, mais cette information pourrait bien se trouver directement dans le modèle 3D CAO de la pièce.

Ces tolérances peuvent s'avérer influentes pour le choix de certaines stratégies sur d'autres. Par exemple, certaines stratégies d'usinage peuvent offrir moins de précision (peut être causés par la MOCN) sur le mouvement de l'outil de coupe que d'autres stratégies, etc.

Ce travail suggère un paramètre technologique sur les tolérances:

- Rugosité de la surface de fond et des flancs



Ce travail suggère quelques paramètres technologiques relatifs aux outils de coupe, particulièrement axés sur la géométrie de l'outil elle-même (*Voir Figure 3.31*) :

- Longueur coupante (« cutting length ») de l'outil
- Outil à bout sphérique
- Diamètre nominal de l'outil
- Rayon de coin

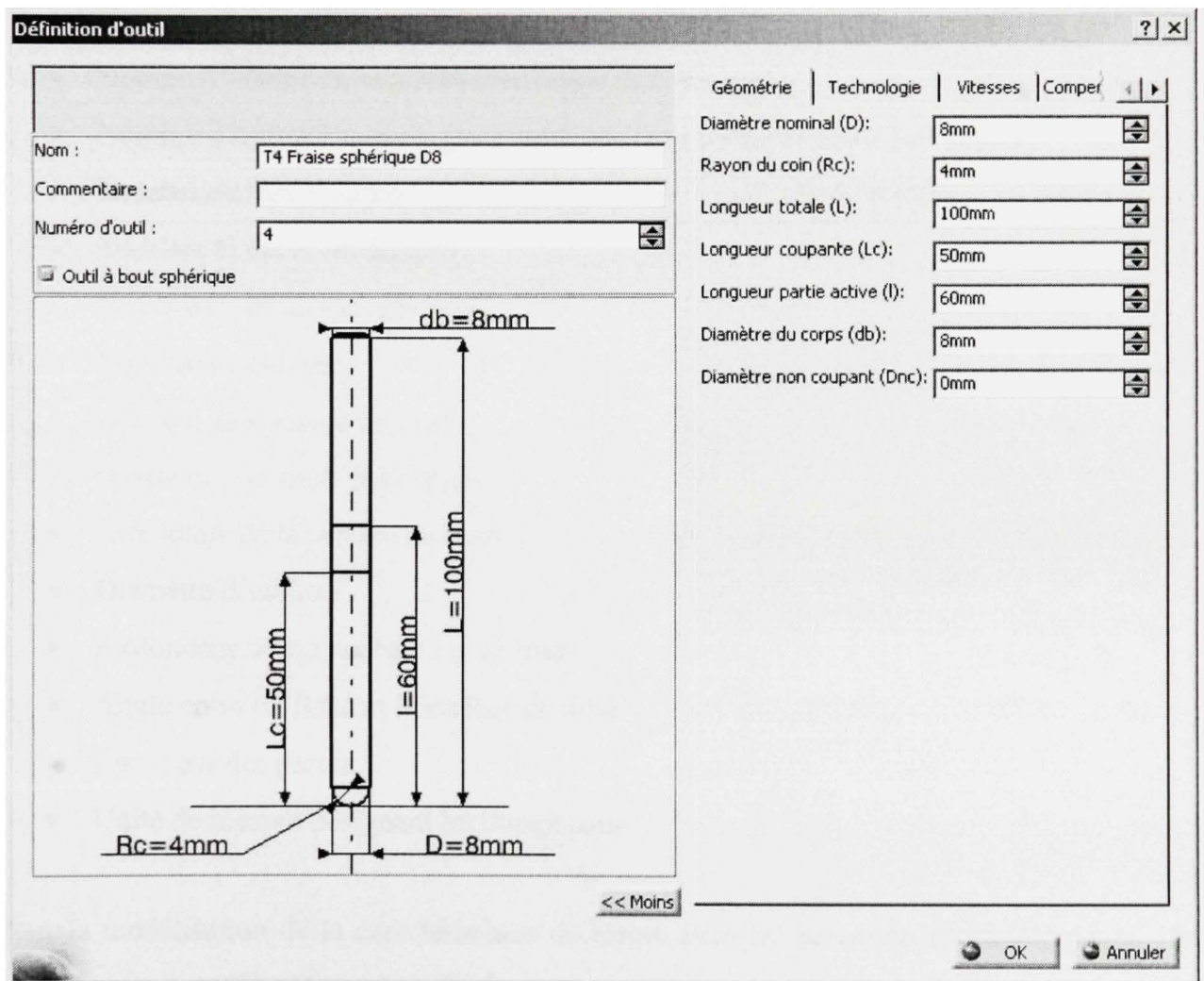


Figure 3.31 Dialogue de définition de la géométrie d'outil dans CATIA V5R16

3.2.4 Extraction des paramètres

Pour extraire les paramètres topologiques et dimensionnels, un « préprocesseur » doit analyser chaque modèle B-REP de la caractéristique de forme. La modélisation de la caractéristique de forme proposée par ce travail est faite à partir de cette liste de paramètres topologiques et géométriques :

- Nombre de sommets
- Nombre d'arêtes droites
- Nombre d'arêtes circulaires (avec rayon de courbure)
- Nombre d'arêtes concaves (avec un angle matière supérieur à 180 degrés)
- Nombre de faces planes
- Nombre de faces sphériques
- Nombre de faces cylindriques
- Nombre de congés
- Nombre de surfaces de fond
- Rayon de courbure des congés
- Aire totale de la surface de fond
- Diamètre d'un trou
- Profondeur d'une poche ou d'un trou
- Angle entre un flanc et la surface de fond
- Épaisseur des parois
- Unité de mesure désignant les dimensions

Pour la modélisation de la caractéristique de forme avec les paramètres technologiques, ils sont extraits à partir des sources d'information autre que le B-REP de la caractéristique de forme, comme par exemple dans le système CAO/FAO directement, dans le savoir-faire de la compagnie, etc. Évidemment, ces paramètres deviennent invariables avec les caractéristiques de forme différentes. Ce travail propose cette liste :

- Module de Young
- Densité volumétrique
- Rugosité de la surface de fond
- Rugosité des flancs
- Longueur coupante (« cutting length ») de l'outil
- Outil à bout sphérique
- Diamètre nominal de l'outil
- Rayon de coin

Au total, un modèle de 24 paramètres topologiques, géométriques et technologiques doit être numérisé avec chaque caractéristique de forme extraite.

Pour chaque paramètre qui ne peut être calculé ou extrait de la caractéristique de forme, il lui sera attribué la valeur « zéro » (0). Par exemple, un diamètre de trou n'est pas disponible si la caractéristique de forme est de type « poche », etc. Donc, la première étape avant d'extraire les paramètres est instinctivement d'initialiser le modèle de la forme avec 24 valeurs égales à zéro.

3.2.5 Conclusion sur la modélisation des caractéristiques de forme

Dans cette section, ce travail propose une modélisation numérique des caractéristiques de forme. Il est important de noter que ce travail fait une proposition simplifiée, sans plus, d'une modélisation de la caractéristique de forme par l'entremise de paramètres topologiques et géométriques du modèle B-REP ainsi que de paramètres technologiques extraits du système CAO/FAO. Il ne s'attarde pas à trouver les « meilleurs » paramètres qui donnent les influences optimales sur le choix des stratégies. Ce travail se concentre plutôt sur la conception d'une méthodologie à suivre pour associer des stratégies d'usinage avec des caractéristiques de forme.

Avec cette modélisation numérique des caractéristiques de forme achevée, ce travail discute d'un outil capable de faire l'association entre stratégies et formes : les réseaux de neurones.

3.3 Modélisation des stratégies d'usinage

En se référant à la gamme d'usinage typique d'une pièce structurale (Section 1.4), avec le système FAO « CATIA V5R16 » utilisé durant ce projet, ce travail propose la modélisation de stratégies d'usinage (de finition).

Il est important de préciser que certaines stratégies populaires dans les systèmes FAO, notamment les stratégies d'usinage de type « ébauche », ne peuvent être considérées puisqu'elles sont conçues pour l'usinage global de la pièce et ne s'adaptent pas ou très peu à une caractéristique de forme à la fois (*Voir Figure 3.32*). Pour les pièces structurales, l'ébauche « multi-poches » est une bonne pratique pour dégrossir la pièce dans la plupart des cas (*Voir Figure 3.33*).

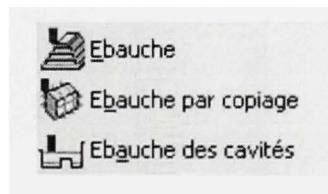


Figure 3.32 Stratégies d'usinage global - Ébauches surfaciques

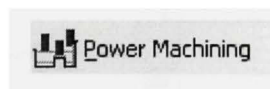


Figure 3.33 Stratégies d'usinage global - Ébauche multi-poches

3.3.1 Stratégies d'usinage modélisées d'une pièce structurale

3.3.1.1 Surfaçage

Le surfaçage est une opération habituellement requise pour la finition des surfaces de fond de poches à la rugosité voulue (*Voir Figure 3.34*).

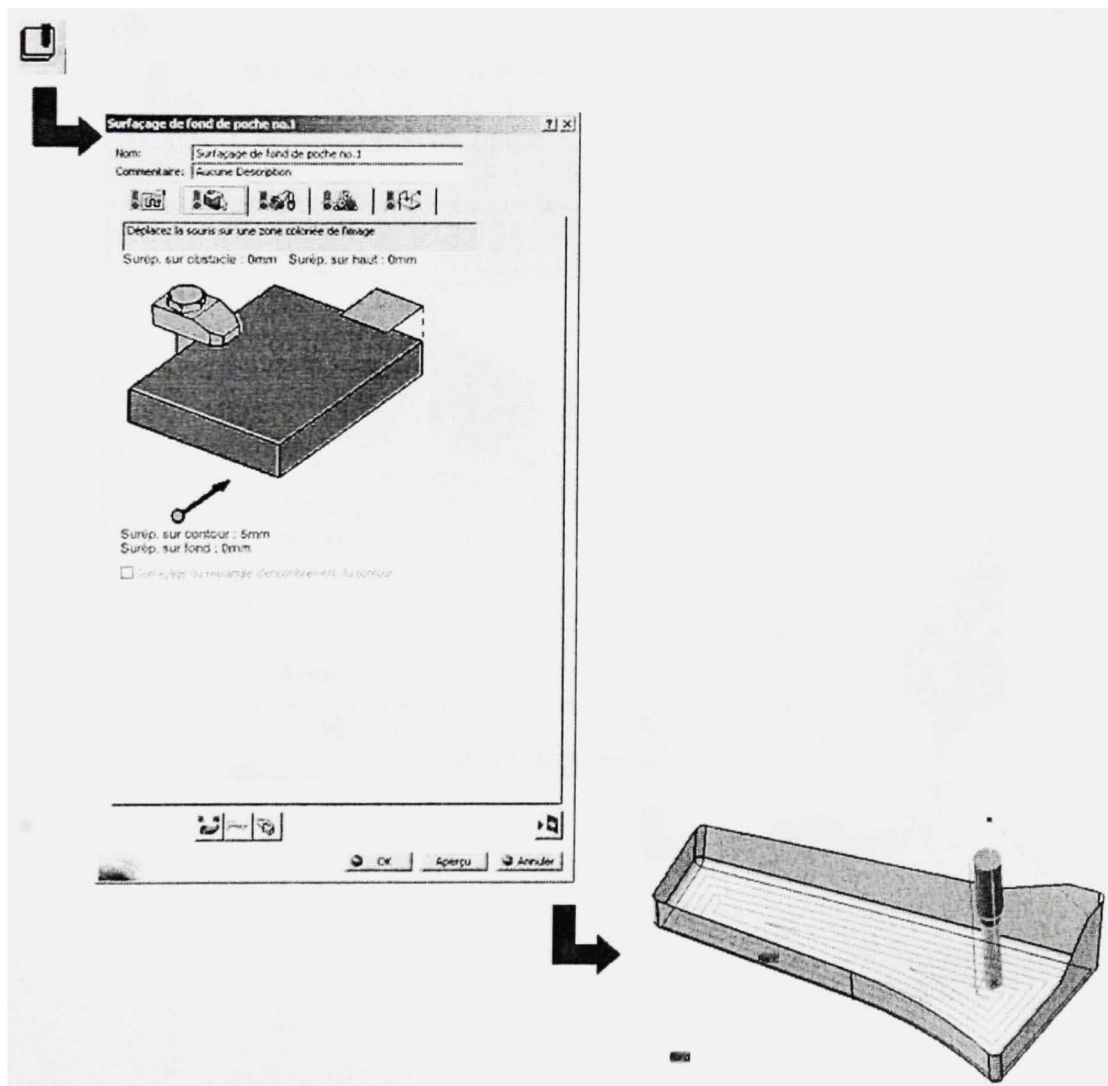


Figure 3.34 Stratégie d'usinage - Surfaçage

3.3.1.2 Contournage prismatique

Le contournage prismatique est une opération utilisée pour la finition des flancs prismatiques (c'est-à-dire perpendiculaire à la surface de fond) de poches à la rugosité désirée. Cette opération peut être également utilisée pour la finition des contours extérieurs de la pièce (Voir Figure 3.35).

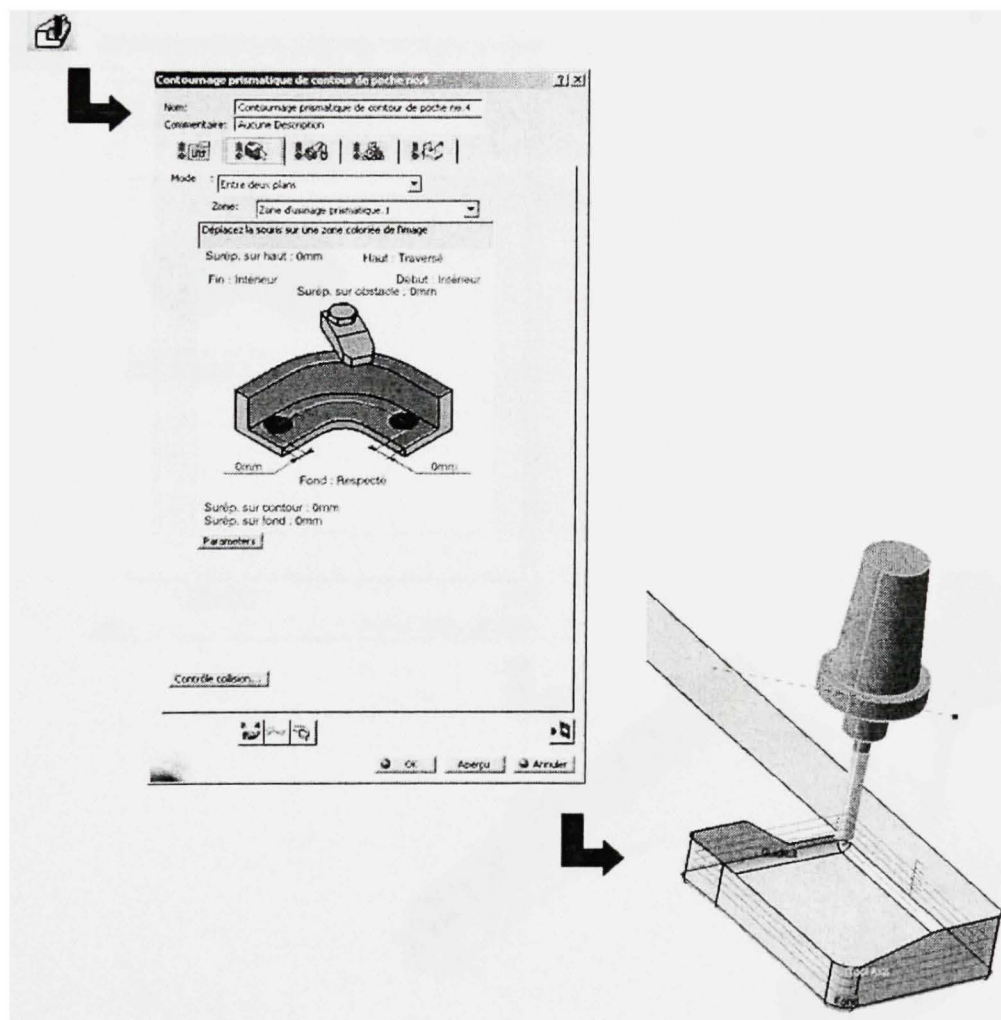


Figure 3.35 Stratégie d'usinage - Contournage prismatique

3.3.1.3 Contournage multiaxes

Le contournage multiaxes est une opération très pratiquée pour la finition des flancs inclinés (c'est-à-dire non-perpendiculaire à la surface de fond) de poches à la rugosité désirée (*Voir* Figure 3.36).

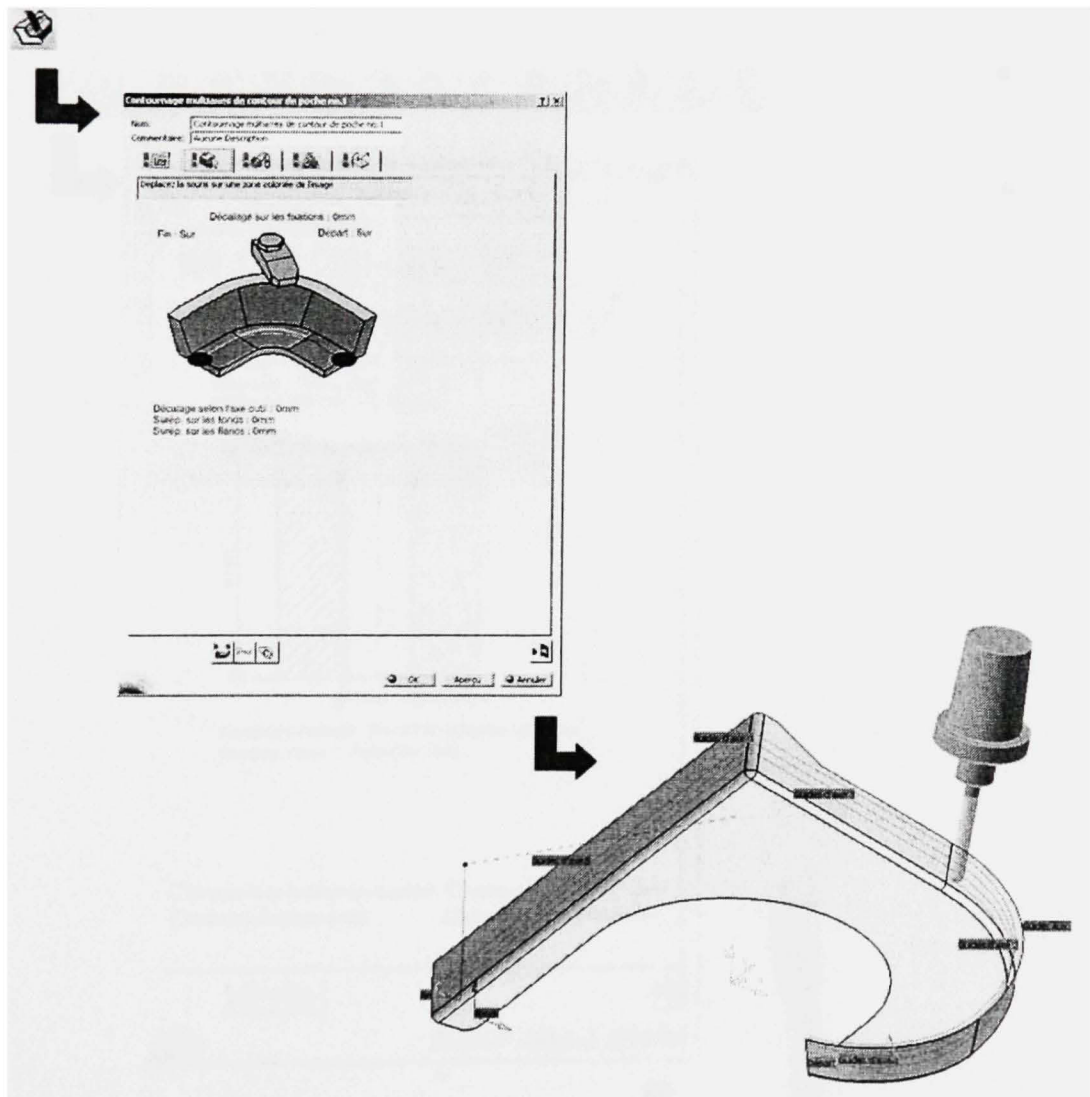


Figure 3.36 Stratégie d'usinage - Contournage multiaxes

3.3.1.4 Perçage et autres opérations pour trous

Le perçage et autres opérations de génération de trous sont des opérations répandues dans les pièces structurales. Ces opérations créent des simples parcours axiaux. Le diamètre du trou est obtenu directement par opération booléenne de soustraction avec le diamètre de l'outil (Voir Figure 3.37).

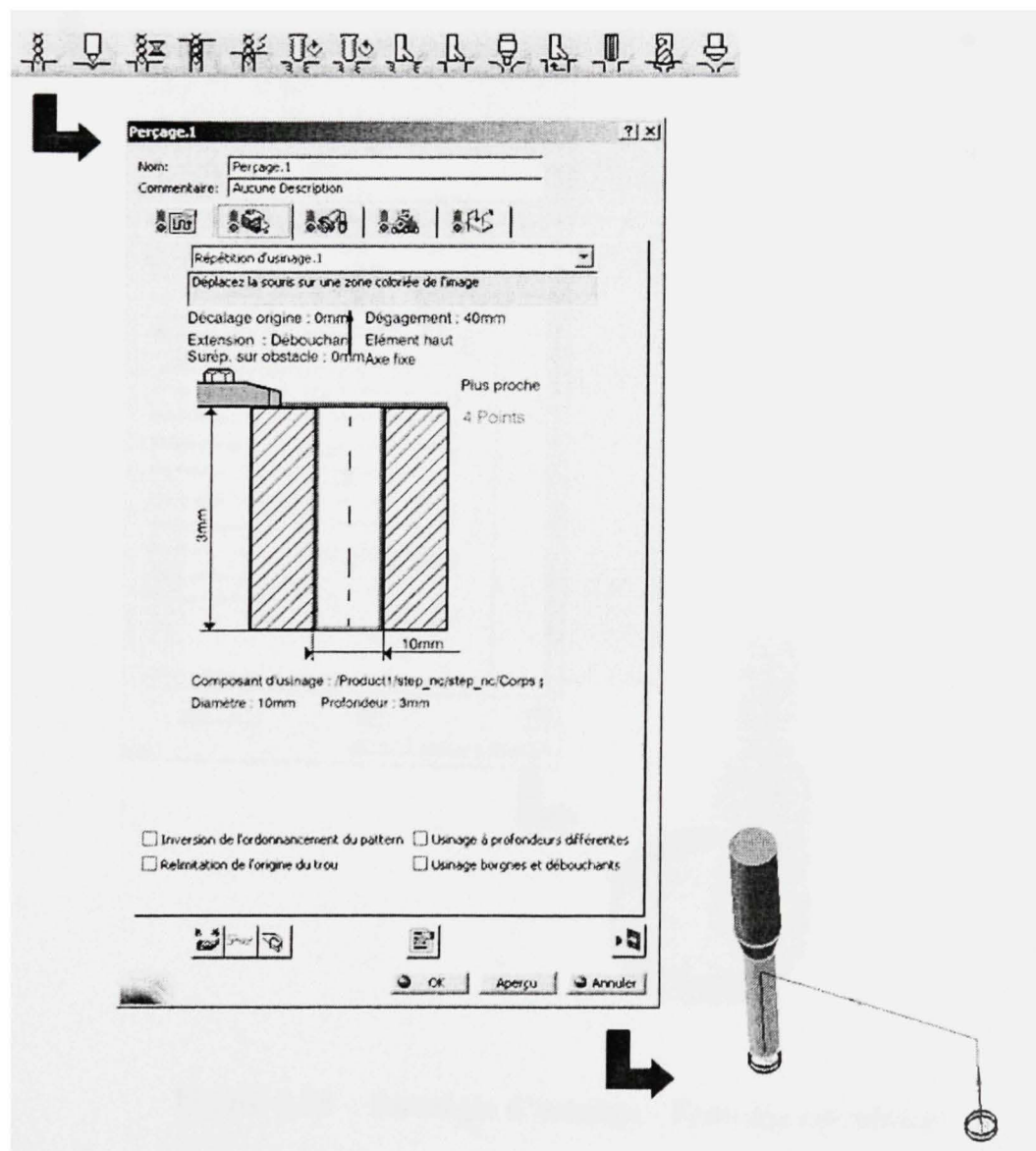


Figure 3.37 Stratégie d'usinage - Perçage

3.3.1.5 Fraisage circulaire

Le fraisage circulaire est une alternative au perçage lorsque le diamètre du trou est supérieur aux diamètres d'outil disponibles dans les catalogues. Il génère un parcours hélicoïdal pour permettre d'usiner un diamètre supérieur (Voir Figure 3.38).

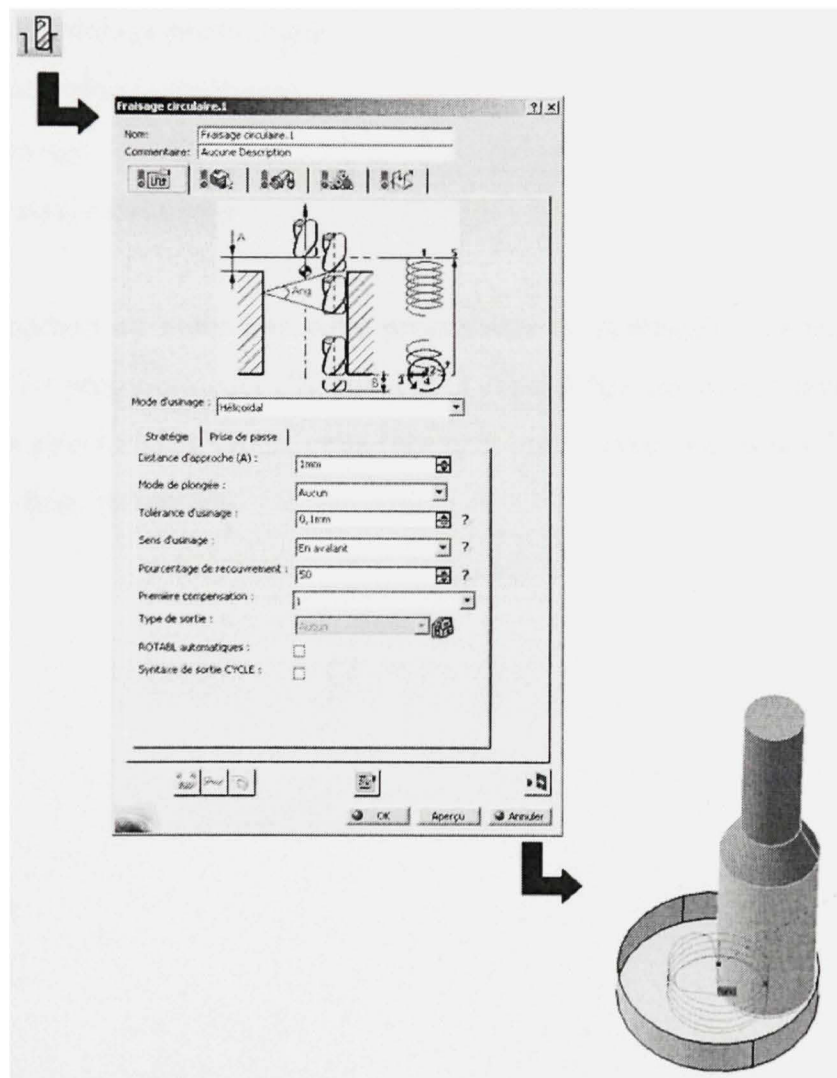


Figure 3.38 Stratégie d'usinage - Fraisage circulaire

3.3.2 Conclusion sur la modélisation des stratégies d'usinage

Au total, ce travail propose cinq (5) stratégies d'usinage utiles pour la finition des pièces structurales dans l'éventail de parcours d'outil disponible dans CATIA V5R16. Les stratégies d'usinage proposées sont les suivantes :

- Surfaçage
- Contournage prismatique
- Contournage multiaxes
- Perçage
- Fraisage circulaire

Il est important de noter que cette proposition de stratégies d'usinage dépend du système FAO que les programmeurs CN utilisent et dépend également des savoir-faire pour l'usinage des pièces structurales. Donc, cette liste peut varier avec une recherche plus approfondie sur les savoir-faire industriels.

3.4 Modélisation du réseau de neurones

3.4.1 Type du réseau de neurones

Plusieurs types de réseaux de neurones sont disponibles. Ce travail propose l'utilisation des réseaux de neurones MLP avec rétro-propagation. Ces réseaux se sont avérés être, de loin, les plus populaires puisqu'ils ont une excellente capacité d'adaptation pour les applications de reconnaissance de forme. D'ailleurs, selon [Osakada, Yang, 1991] et [Mei *et al.*, 1995], les MLP avec rétro-propagation offrent une bonne performance en reconnaissance de forme en PFAO. En effet, le « mapping » de caractéristiques de forme aux stratégies d'usinage s'avère être en quelque sorte une forme de haut niveau de reconnaissance de forme (*Voir ANNEXES I*).

3.4.2 Architecture du réseau de neurones

Un MLP, comme son nom l'indique (Multi-Layer Perceptron), est un réseau qui possède plusieurs couches de neurones. La première couche se nomme toujours la couche d'entrée ou tout simplement « les entrées », alors que la dernière couche se nomme la couche de sorties ou « les sorties ». Les couches entre les entrées et les sorties se nomment les couches cachées (*Voir Figure 3.39*).

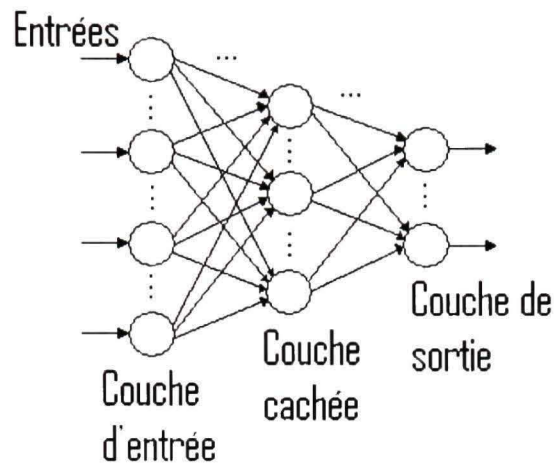


Figure 3.39 Réseau de neurones de type MLP avec les différentes couches

Le choix de l'architecture du réseau de neurones est important. Un réseau de neurones MLP avec rétro-propagation peut réagir complètement différemment selon son nombre de couches cachées, son nombre d'entrées et de sorties, etc. Les possibilités des différentes architectures des réseaux MLP représentent en soi une avenue de recherche que ce travail a commencé à explorer (*Voir ANNEXES I*)

Également, une architecture de réseaux de neurones est fixe. Elle ne peut varier durant l'existence de ce réseau. Donc, le nombre de neurones de la couche d'entrée, de sortie et la couche cachée doivent être des nombres fixes.

3.4.2.1 Le nombre de neurones d'entrée

Premièrement, le nombre d'entrées dépend directement du nombre de paramètres extraits de la caractéristique de forme. Dans la section précédente, ce travail avait noté 24 paramètres topologiques, géométriques et technologiques par caractéristique de forme. Donc, le nombre de neurones à la couche d'entrée doit être de 24.

Évidemment ce nombre pourrait varier avec une recherche plus approfondie dans l'exploration de l'influence de paramètres sur le choix de la stratégie. Cependant, un problème fondamental en découle automatiquement : une caractéristique de forme peut contenir une quantité variable de paramètres topologiques, géométriques et technologiques. Un réseau de neurones, lorsqu'il est conçu, possède un nombre d'entrées et de sorties fixes. Donc, si le concepteur génère un réseau avec 50 entrées possibles au maximum, un choix difficile s'impose : quels sont les paramètres ayant une influence notable avec le choix des stratégies d'usinage, mais surtout quels sont les paramètres qui sont invariablement toujours disponibles. Donc il est impératif de choisir des paramètres topologiques et dimensionnels qui seront toujours disponibles.

3.4.2.2 Le nombre de neurones de sortie

Pour trouver le nombre de neurones en sortie, ce nombre dépend d'un facteur majeur : les stratégies d'usinage utiles, dans le système FAO courant, pour l'usinage des pièces structurales en aéronautique. Dans la section précédente, ce travail avait noté 5 stratégies d'usinage utiles à la génération de forme pour les pièces structurales. Donc, le nombre de neurones à la couche de sortie doit être de 5.

Encore une fois, cette liste de stratégies d'usinage peut varier, donc le nombre de neurones de sortie peut changer également.

3.4.2.3 Le nombre de neurones de la couche cachée

Selon [Dereli, 1998], il n'existe aucune recherche démontrant la meilleure quantité de neurones de la couche cachée pour obtenir des résultats de reconnaissance de forme optimaux. La pratique courante est d'utiliser une quantité entre le nombre de neurones de la couche d'entrée et celui de la couche de sortie. Dans ce cas-ci, le nombre de neurones de la couche cachée devrait se situer entre 24 et 5. Ce travail propose donc une valeur de 20 pour la couche cachée. Donc ce travail propose l'architecture du MLP suivante :

- Architecture du réseau MLP = 24-20-5
- Nombre d'entrée = 24
- Nombre de neurones cachées = 20
- Nombre de sorties = 5

Bref, explorer les architectures de ces MLP avec rétro-propagation en utilisant certains paramètres de caractéristiques de forme pour ultimement en faire ressortir les meilleures configurations (paramètres d'entrées et architecture) qui donnent des résultats satisfaisants dans le domaine de l'analyse globale d'usinage représente une part significative de ce travail.

3.4.3 Fonction d'activation

Cette fonction tente d'émuler le comportement électrique de sortie d'un vrai neurone qui reçoit un signal externe. Sa réponse dépend (0 ou 1) de sa fonction d'activation. Avec la rétro-propagation standard, ce travail propose l'utilisation de la sigmoïde binaire, la fonction d'activation la plus utilisée avec les réseaux MLP (*Voir Figure 3.40*). Les neurones de sortie et ceux dans les couches cachées donnent toujours des réponses entre 0 et 1 puisque la fonction d'activation est la sigmoïde binaire (*Voir Figure 3.41*).

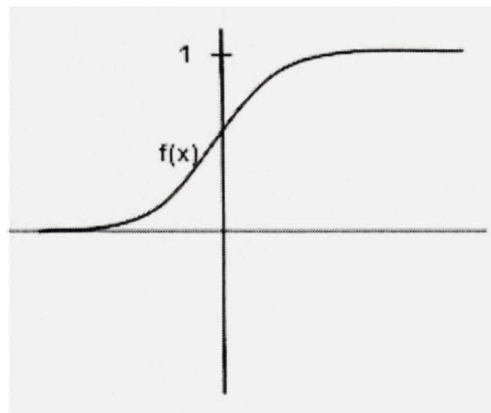


Figure 3.40 Fonction d'activation - Sigmoïde binaire

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Figure 3.41 Fonction d'activation - Équation de la sigmoïde binaire

3.4.4 Conclusion sur la modélisation du réseau de neurones

Les réseaux de neurones de type MLP sont l'outil utilisé dans ce travail pour l'association de caractéristiques de forme en stratégies d'usinage. L'architecture du réseau de neurones est 24-20-5 et le sigmoïde binaire est la fonction d'activation (*Voir* Figure 3.42).

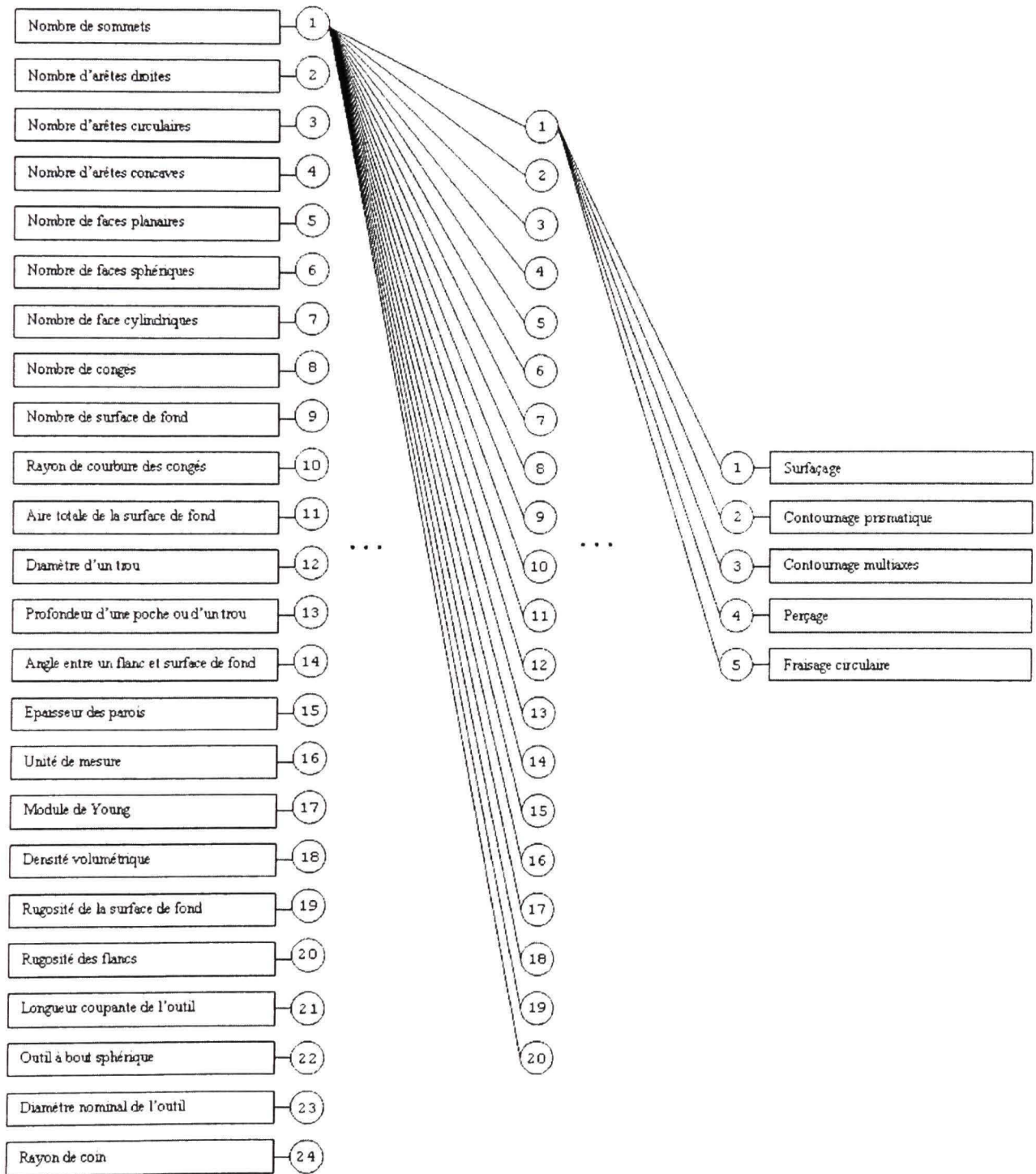


Figure 3.42 Architecture de réseau MLP

L'entraînement du réseau de neurones doit être également fait avant d'être capable d'utiliser correctement le réseau. Cette étape sera vue au prochain chapitre.

L'optimisation de l'architecture des réseaux de neurones demeurent un sujet de recherche d'envergure qui dépasse les objectifs de ce travail puisqu'il est presque impossible de prédire quelle est l'architecture optimale. Également, il faut noter l'importante dépendance du réseau face aux nombres de paramètres d'entrées (les paramètres de la caractéristique de forme) et ceux de sorties (les stratégies d'usinage considérées).

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, ce travail a établi les modèles qui vont être utilisés pour la méthodologie. La première modélisation est la « paramétrisation » de la caractéristique de forme en paramètres topologiques, géométriques issus du modèle B-REP et les paramètres technologiques provenant du système CAO/FAO utilisé. La seconde modélisation est la définition de stratégies d'usinage possibles pour faire les opérations de finition et/ou de semi-finition sur les pièces structurelles et disponibles dans les systèmes CFAO. La dernière modélisation est l'outil d'association entre les caractéristiques de forme et les stratégies d'usinage soit, les réseaux de neurones. Le type proposé par ce travail est le MLP avec rétro-propagation avec la fonction d'activation sigmoïde binaire. Son architecture est [24-20-5] et est directement dépendante du nombre de paramètres extraits de la caractéristique de forme et du nombre de stratégies d'usinage possibles.

Dans le prochain chapitre, ce travail présente la méthodologie envisagée pour l'association de stratégies d'usinage à partir des caractéristiques de forme. Cette méthodologie utilise évidemment les modèles proposés dans le présent chapitre.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE DE RECONNAISSANCE DE STRATÉGIES D'USINAGE

4.1 Introduction

La définition de « méthodologie » dans le contexte du travail est la procédure à suivre pour définir les caractéristiques de forme listées en paramètres topologiques, géométriques et technologiques pour finalement en ressortir, par association, une matrice résultante pointant vers la stratégie d'usinage.

Au chapitre précédent, le travail a proposé plusieurs modèles utiles pour la méthodologie. Le premier modèle est la numérisation de la caractéristique de forme en paramètres topologiques, géométriques et technologiques. Cette numérisation crée des matrices de 24 chiffres. Le deuxième modèle proposé est l'ensemble des cinq stratégies d'usinage ayant les capacités requises pour générer les formes rencontrées dans les pièces structurelles d'aéronautique. Finalement, le dernier modèle est le réseau de neurones de type MLP qui fait l'association entre le premier modèle et le deuxième.

Dans ce chapitre, une méthodologie est proposée et ensuite, suivie d'un exemple de numérisation de caractéristique de forme typique de pièces structurelles. Dans cet exemple, il y a premièrement l'étape d'apprentissage du réseau de neurones requis pour qu'il soit suffisamment entraîné à distinguer des formes structurelles. La deuxième étape est l'extraction de paramètres à partir de la caractéristique pour ensuite finir avec l'association, à travers le réseau entraîné, à une stratégie d'usinage possible.

4.2 Méthodologie envisagée pour la reconnaissance de stratégies d'usinage

Ce travail se concentre sur l'association de stratégies d'usinage à des caractéristiques de forme numérisées en utilisant un réseau de neurones de type MLP pour les pièces structurales en aéronautique (*Voir Figure 4.1*).

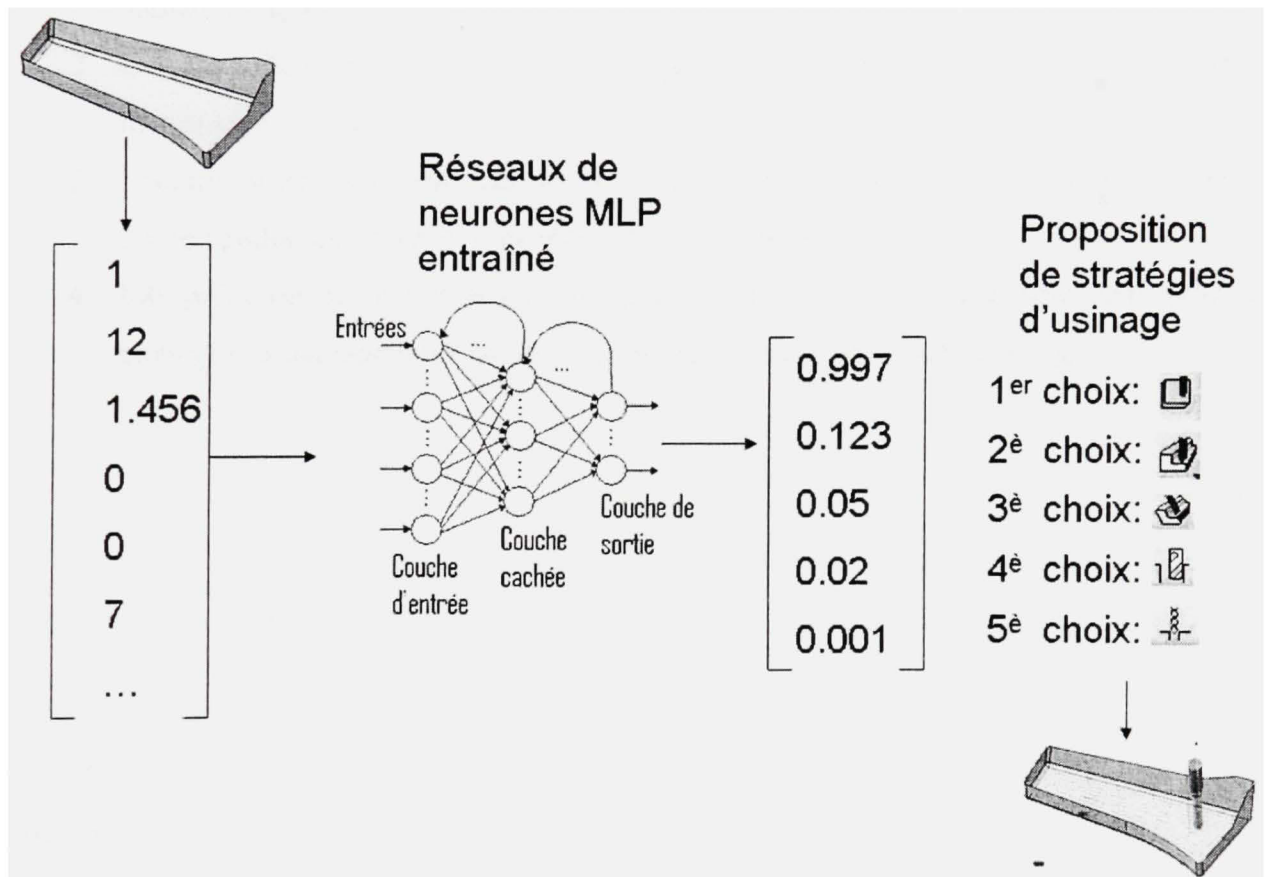


Figure 4.1 Méthodologie de reconnaissance de stratégies d'usinage

La première étape de la méthode proposée est la « numérisation » de la caractéristique de forme ensuite, la seconde étape est la création d'un vecteur d'entrée (de dimensions 1 par 24) à partir des paramètres extraits dans un fichier de transfert qui sera lu par le réseau. La troisième étape consiste à utiliser un réseau de neurones MLP entraîné préalablement et d'obtenir un vecteur de sortie (de dimensions 1 par 5). La quatrième et dernière étape est l'interprétation des résultats, c'est-à-dire comparer cette matrice de sortie par rapport à la

liste de stratégies d'usinage et d'affecter un « niveau de confiance » à chacune d'elle. Évidemment, la stratégie qui a le plus haut niveau de confiance devient la stratégie d'usinage que le système préfère.

Donc, en résumé, voici les étapes de la méthodologie :

1. Extraction des paramètres topologiques, géométriques et technologiques de la caractéristique de forme.
2. Création d'un vecteur de dimensions 1 par 24 des paramètres extraits dans un fichier de transfert.
3. Lecture du fichier de transfert et calcul du réseau de neurones entraînés du vecteur 1 x 24, le résultat est le vecteur de sortie de dimensions 1 par 5.
4. Interprétation des résultats du vecteur de sortie par rapport à la liste disponible des stratégies d'usinage pour en déduire les propositions de la méthodologie.

4.3 Apprentissage du réseau de neurones

Les réseaux de neurones nécessitent toujours, avant de devenir efficaces et performants, un entraînement avec l'aide d'une base de données. Cette base de données contient des caractéristiques de forme « typiques » en aéronautique qui contient les paramètres topologiques, géométriques et technologiques, mais également l'association avec sa stratégie d'usinage correspondante (*Voir*

Figure 4.2). Cette base de données est en quelque sorte le savoir-faire industriel numérisé du machiniste et du programmeur CN. Plus cette base de données est grande, meilleures sont les chances du réseau d'obtenir un meilleur apprentissage.

Cet entraînement doit être supervisé, c'est-à-dire que les sorties désirées sont comparées avec celles obtenues durant l'entraînement et permet ainsi d'ajuster les poids des neurones (les liaisons entre les différents neurones). Donc, ces fichiers d'entraînement doivent posséder une section supplémentaire, la réponse désirée, c'est-à-dire la stratégie d'usinage particulière vers laquelle une caractéristique de forme particulière est supposée converger (*Voir ANNEXES I*).

La différence numérique entre les sorties désirées et celles obtenues permet d'effectuer une rétro-propagation des poids. Pour chaque fichier d'entraînement, le réseau de neurones ajuste ses liaisons (les poids) entre les différents neurones. L'utilisateur choisit les nombres d'itérations (ou communément appelé les « époques »), c'est-à-dire le nombre de fois où le réseau apprend la base de données complète d'entraînement. De plus, l'utilisateur doit choisir la valeur du taux d'apprentissage qui influencera le calcul de rétro-propagation.

Une fois l'entraînement du réseau complété, l'utilisateur a simplement à donner en entrée des nouvelles caractéristiques de forme (ne contenant pas les sorties désirées) et le réseau tentera de converger vers une solution (stratégie d'usinage) possible, parmi les sorties offertes lors de la conception du réseau de neurones.

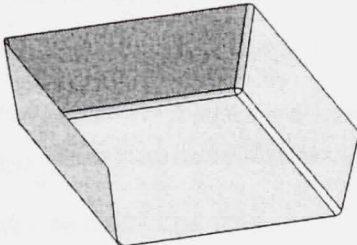
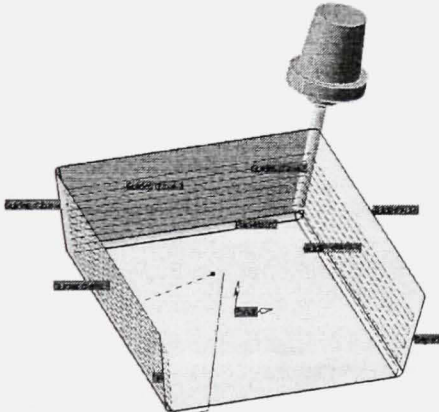
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-012		
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=		
		Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	16	
			Nombre d'arêtes droites	16	
			Nombre d'arêtes circulaires	10	
			Nombre d'arêtes concaves	16	
			Nombre de faces planes	4	
			Nombre de faces sphériques	2	
			Nombre de faces cylindriques	5	
			Nombre de congés	7	
			Nombre de surface de fond	1	
					Technologiques
Aire totale de la surface de fond	0.026				
Diamètre du trou	0.000				
Profondeur de poche ou de trou	60.000				
Angle entre un flanc et le fond	99.462				
Épaisseur des parois	11.589				
Unité de mesure	1				
Matrice de sortie (5)		=			
Surfaçage	0				
Contournage prismatique	0				
Contournage multiaxe	1				
Perçage	0				
Fraisage circulaire	0				

Figure 4.2 Fiche d'entraînement d'une caractéristique de forme typique

4.3.1 Nombre de caractéristiques de forme d'entraînement nécessaires

Selon [Fausett, 1994], une relation simple existe entre le nombre d'entités d'entraînement (dans le cas du travail, les caractéristiques de forme d'entraînement) disponibles, P , le nombre de poids à entraîner, W , et le pourcentage de tolérance du réseau espéré, e . La question que l'utilisateur peut se demander est la suivante : « Sous quelles circonstances puis-je m'assurer qu'un réseau entraîné capable de classer un certain pourcentage x des entités d'entraînement soit capable également de classer avec un certain pourcentage y des entités de test (*Voir Figure 4.3*). »

La réponse est que s'il y a assez d'entités d'entraînement, le réseau sera capable de généraliser correctement. La règle simple est la suivante :

$$\frac{W}{P} = e$$

ou

$$P = \frac{W}{e}$$

Figure 4.3 Calcul du nombre d'entités d'entraînement

Par exemple, avec une fiabilité de 90% ($e = 0.1$), un réseau de neurone avec 2400 poids ($24 \times 20 \times 5$) aura besoin de 24000 entités d'entraînement.

4.3.2 Optimisation de l'entraînement du réseau de neurones

L'optimisation de l'entraînement est un sujet qui demande une recherche plus approfondie puisqu'il y a de nombreux outils et algorithmes disponibles. Un réseau de neurones surentraîné peut rapidement devenir inefficace et risque de converger souvent vers les mêmes solutions (*Voir* Figure 4.4).

[Moody, J., 1994] fait une récapitulation des outils dont une méthode efficace : la validation croisée (« cross validation » CV) qui est cependant dispendieuse en calcul.

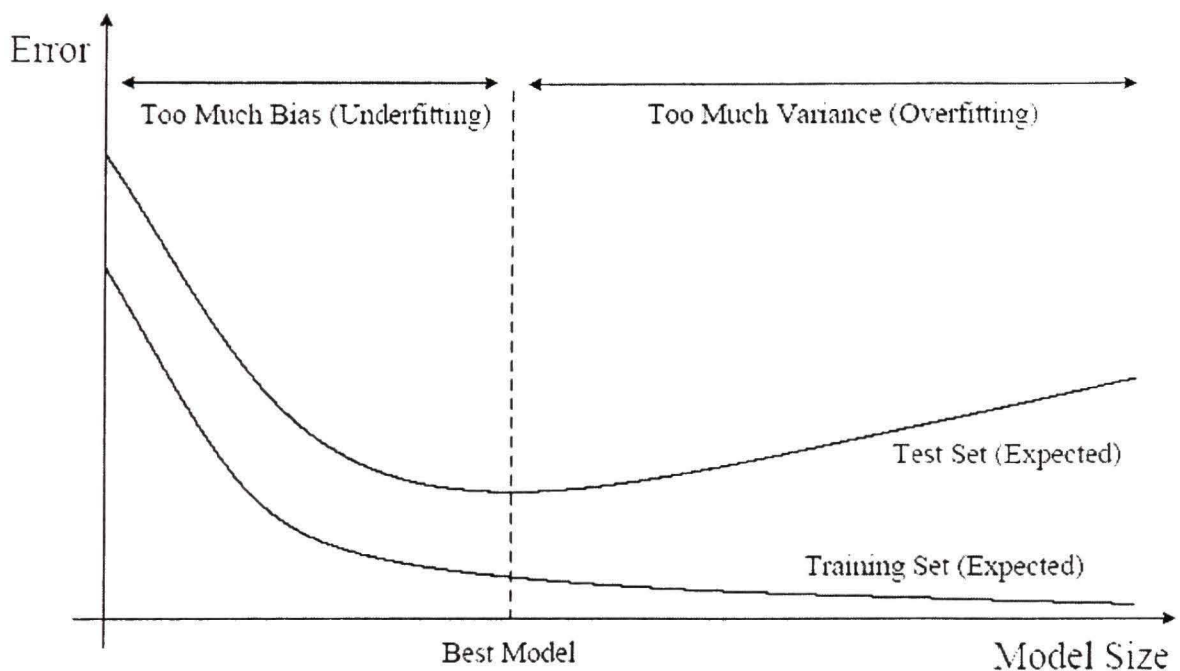


Figure 4.4 Idéalisations des erreurs durant l'entraînement [Moody, 1994]

La méthode de validation croisée consiste, avec l'aide d'une base de données contenant N caractéristiques de forme, à entraîner N réseaux de neurones additionnels avec une base de données de $N-1$. La méthode consiste à minimiser, en établissant un seuil, la somme moyenne carrée des erreurs de validation croisée CV (*Voir* Figure 4.5).

$$CV(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (t_j - \hat{\mu}_{\lambda(j)}(x_j))^2$$

Figure 4.5 Équation de la validation croisée

[Fausett, 1994] prône une autre méthode simple : la méthode Hecht-Nielsen. Cette technique propose l'utilisation de deux bases de données d'entraînement. Une base contient les données d'entraînement alors que l'autre contient des données de test. Pendant l'entraînement du réseau de neurones, avec la base de données d'entraînement, les poids s'ajustent. Cependant, à intervalles réguliers (par exemple à toutes les 10 époques), le réseau est testé avec la base de données de test en donnant les erreurs des moindres carrés. Tant et aussi longtemps que l'erreur des moindres carrés diminue, l'entraînement se poursuit. Si l'erreur commence à augmenter, l'entraînement est arrêté.

4.3.3 Optimisation de l'architecture du réseau de neurones

Selon [Dereli, 1998], il n'y a pas encore de moyens ou d'algorithmes capables de prédire une architecture efficace et performante dans un certain domaine d'application. Cependant, certains auteurs comme [Moody, J., 1994] propose l'algorithme « Sequential Network Construction » (SNC) qui dicte une méthode pour optimiser le nombre de neurones de la couche cachée.

Cette méthode consiste à commencer l'optimisation avec un réseau de neurones ayant un petit nombre de neurones dans la couche cachée (par exemple, 5 neurones). On entraîne ce réseau avec les méthodes d'entraînement normales de rétro-propagation (Voir ANNEXES I).

On itère le processus suivant :

- On ajoute un nombre C de neurones dans la couche cachée jusqu'à une certaine limite fixée au départ
- Les poids des neurones du réseau précédent sont utilisés comme poids initiaux alors que les nouveaux neurones obtiennent des valeurs aléatoires petites.
- On entraîne le nouveau réseau en gardant le poids des neurones du réseau précédant fixes jusqu'à un optimum local.
- On recommence l'entraînement du nouveau réseau en permettant la variation des poids de tous les neurones du réseau jusqu'à un optimum local.

On compare ensuite les erreurs obtenues des différents réseaux créés durant les itérations. [Moody, J., 1994] note qu'un réseau ayant un nombre important de neurones dans la couche cachée n'est pas nécessairement plus performants.

4.4 Processus de validation

4.4.1 « Paramétrisation » d'une caractéristique de forme

Ce travail propose l'exemple d'une caractéristique de forme extraite de la pièce structurelle suivante (*Voir Figure 4.6*). Cette poche nommée « poche.4 » est une forme typique d'une pièce structurelle. Avant l'extraction des paramètres numériques, le système procède à l'extraction de la forme à partir de l'algorithme de Deneux.

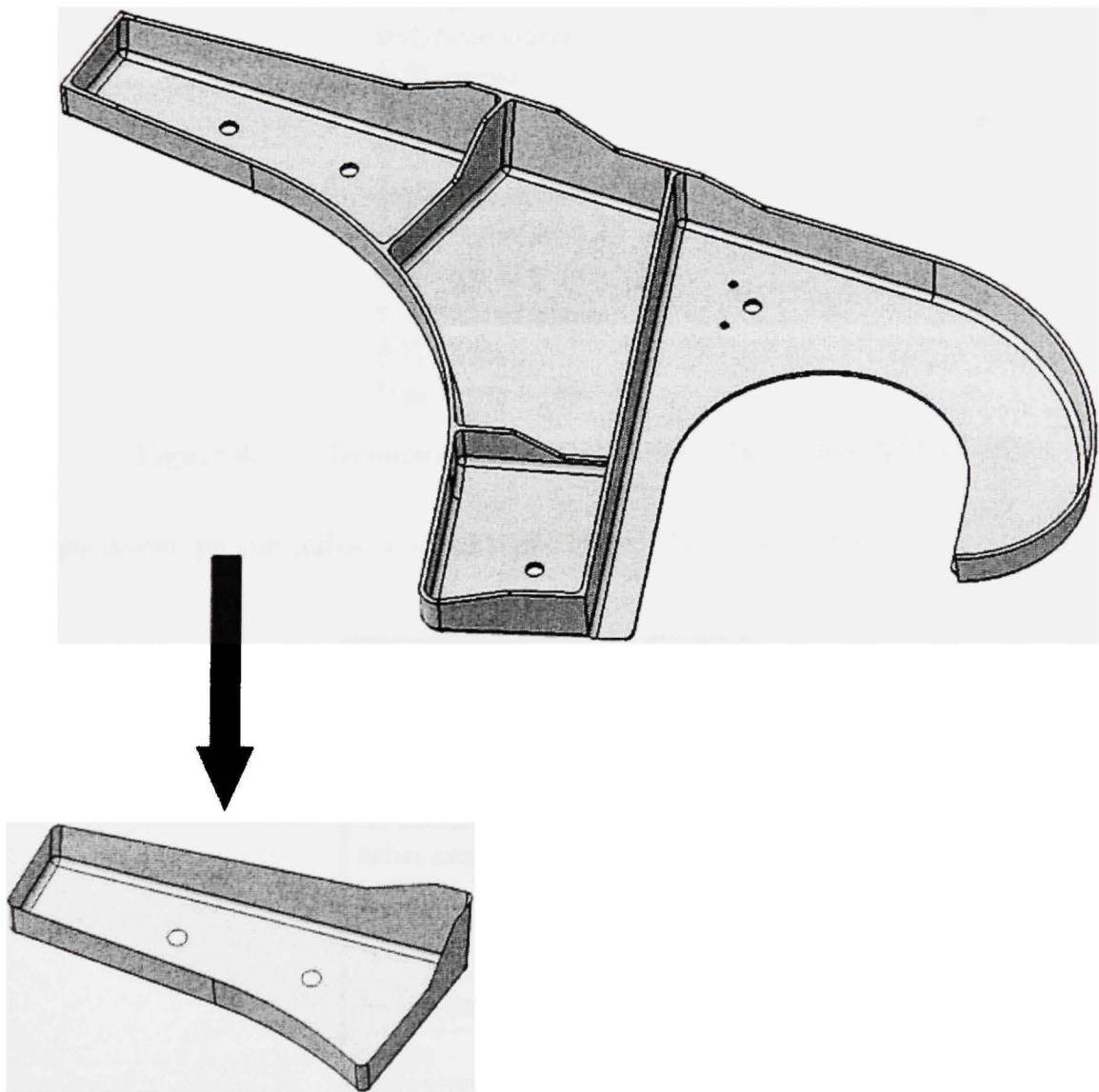


Figure 4.6 Extraction d'une caractéristique de forme « poche.4 »

4.4.1.1 Dénombrements d'entités de « poche.4 »

Pour procéder à l'extraction des paramètres de dénombrements d'entités, ce travail utilise directement un logiciel CAO avec une représentation B-REP. Les systèmes CAO permettent de gérer de façon efficace les entités et même de les regrouper en sous-ensembles (*Voir* Figure 4.7). Grâce aux API des systèmes CAO, un utilisateur peut facilement automatiser ce processus de dénombrement.



Figure 4.7 Dénombrement des entités à l'aide de CATIA V5R16

Le dénombrement qui suit utilise la légende ci-dessous (*Voir* Figure 4.8).

Légende	
Sommets	⊙
Arêtes droites	—
Arêtes circulaires	—
Arêtes avec l'angle matière	—
Faces planes	■
Faces sphériques	■
Faces cylindriques	■
Congés	■

Figure 4.8 Légende des entités

4.4.1.1.1 Nombre de sommets

Les sommets sont les jonctions entre deux arêtes. Les sommets qui sont utilisés pour les entités de construction ne peuvent être calculés (comme par exemple, le centre d'un cercle). Le nombre de sommets dans la caractéristique de forme est de 32 (*Voir Figure 4.9*).

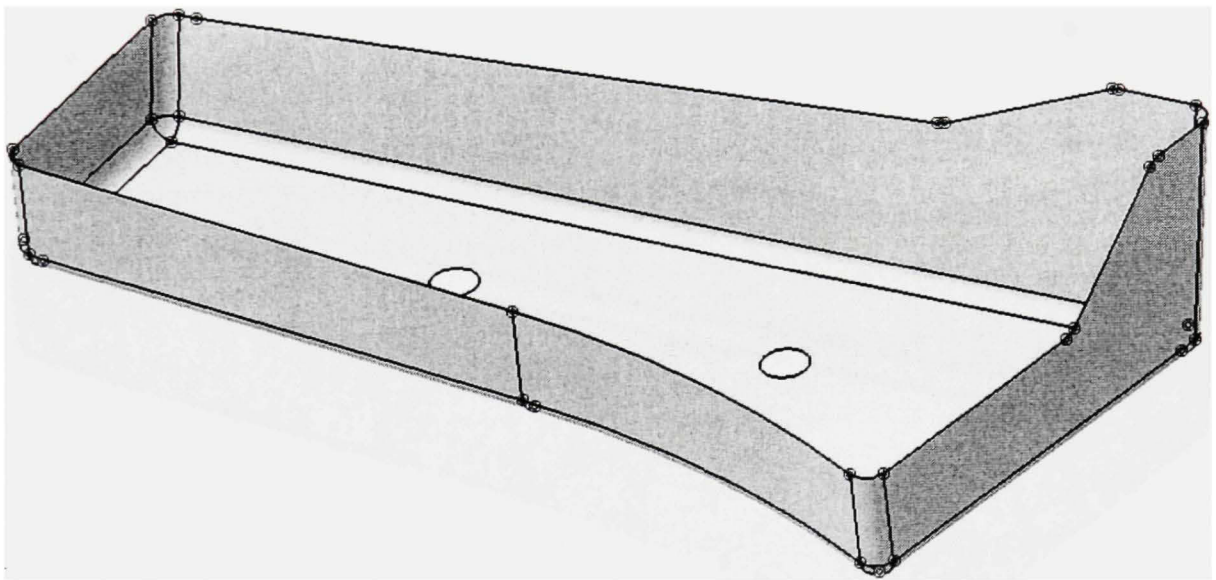


Figure 4.9 Nombre de sommets

4.4.1.1.2 Nombre d'arêtes droites

Les arêtes droites sont des arêtes qui ne possèdent pas de rayon de courbure et ne peuvent être de longueur infinie (généralement, celles-ci sont considérées comme des entités de construction). Le nombre d'arêtes droites dans la caractéristique de forme est de 26 (Voir Figure 4.10).

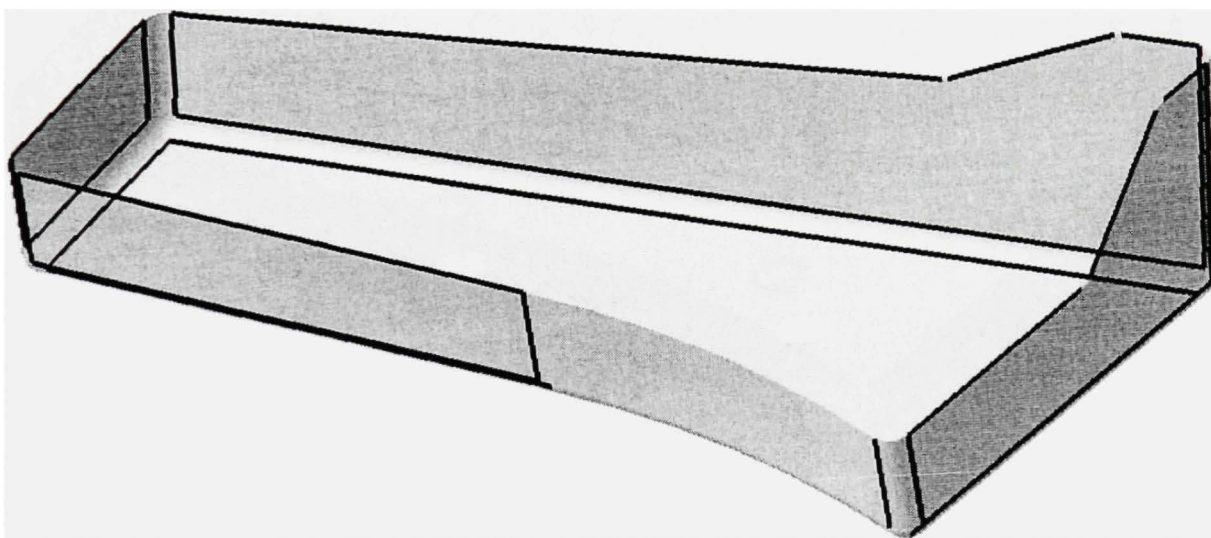


Figure 4.10 Nombre d'arêtes droites

4.4.1.1.3 Nombre d'arêtes circulaires

Les arêtes circulaires sont des arêtes qui possèdent rayon de courbure et un centre mais ne peuvent être des entités de construction. Dans une pièce structurale, les arêtes circulaires sont souvent attribuées à la définition des courbes dans les congés. Le nombre d'arêtes circulaires dans la caractéristique de forme est de 26 (*Voir Figure 4.11*).

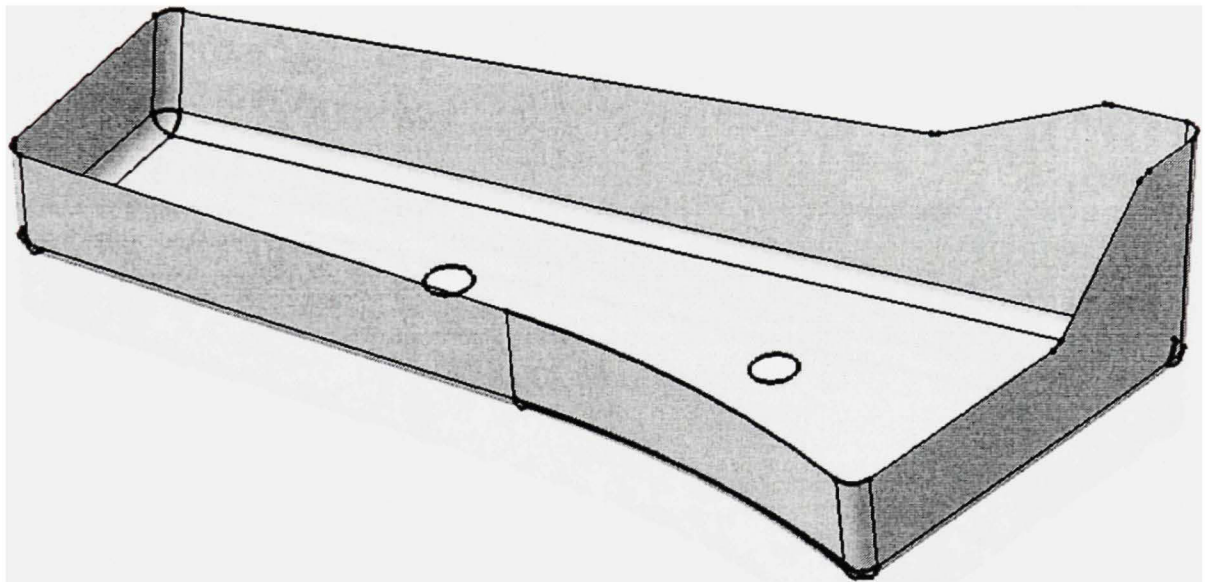


Figure 4.11 Nombre d'arêtes circulaires

4.4.1.1.4 Nombre d'arêtes concaves (contenant l'angle matière)

Les arêtes concaves sont des entités plus difficiles à calculer dans les systèmes CAO puisqu'elles nécessitent une analyse de l'angle entre les deux faces reliées. Pour obtenir cet angle, le système doit également avoir connaissance du volume du solide (la matière) pour calculer correctement l'angle matière. Elles peuvent être droites ou circulaires. Le nombre d'arêtes concaves dans la caractéristique de forme est de 30 (*Voir Figure 4.12*).

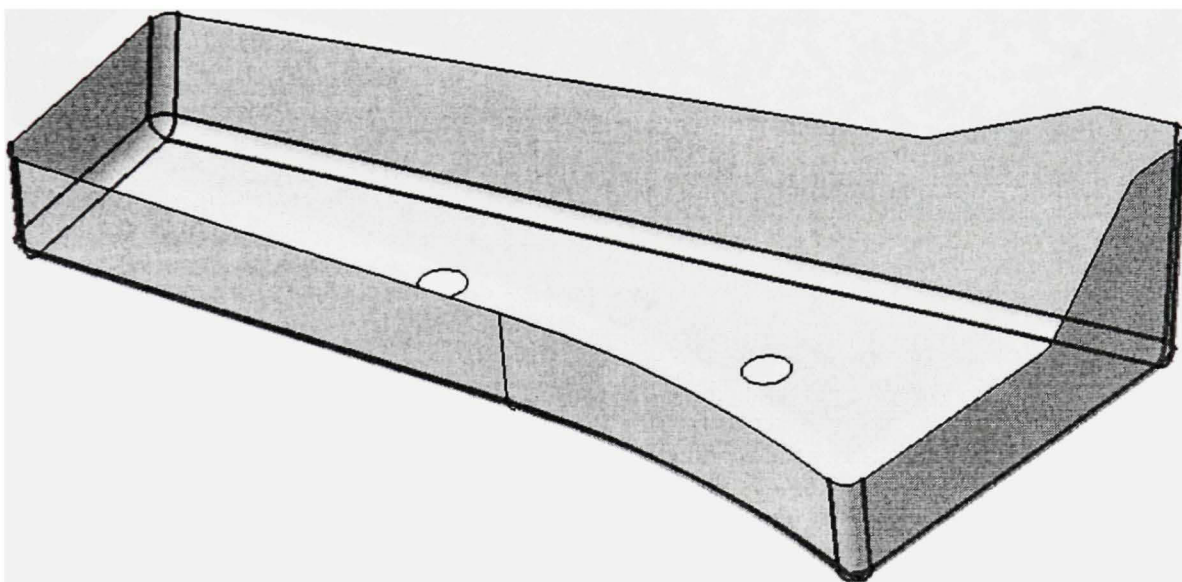


Figure 4.12 Nombre d'arêtes concaves

4.4.1.1.5 Nombre de faces planes

Les faces planes peuvent posséder des arêtes circulaires mais leurs normales doivent toujours être perpendiculaires à celles-ci. Le nombre de faces planes dans la caractéristique de forme est de 5 (*Voir Figure 4.13*).

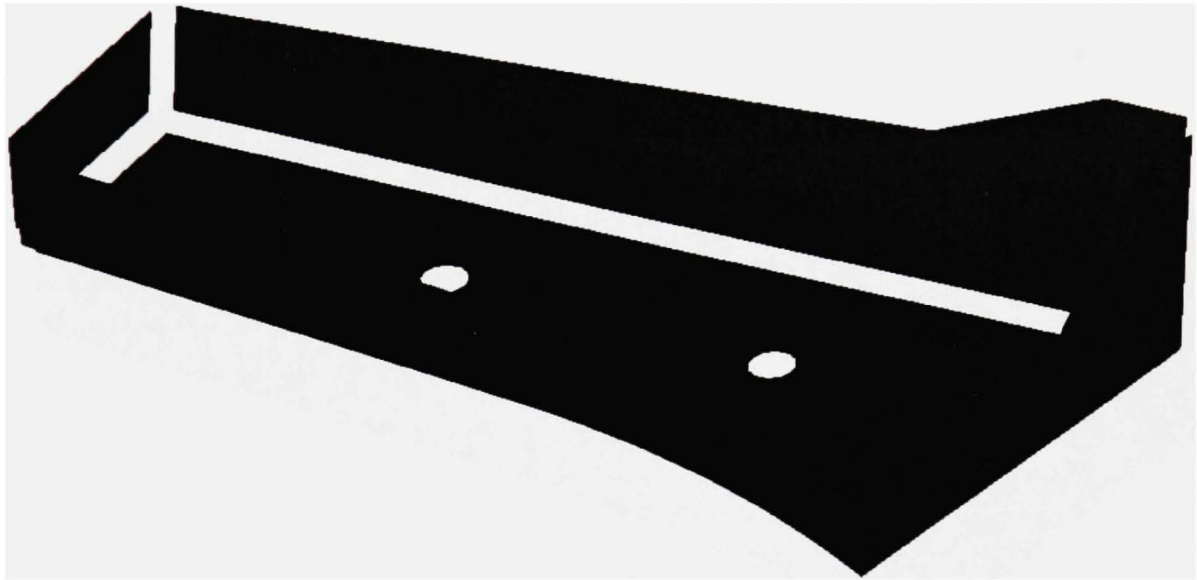


Figure 4.13 Nombre de faces planes

4.4.1.1.6 Nombre de faces sphériques

Habituellement, les faces sphériques sont générées avec les rayons de coins des outils dans les pièces structurales. Elles sont toujours associées à une jonction entre deux ou plusieurs congés. Ce nombre pourrait être un bon indicateur d'une poche. Le nombre de faces sphériques dans la caractéristique de forme est de 4 (*Voir Figure 4.14*).

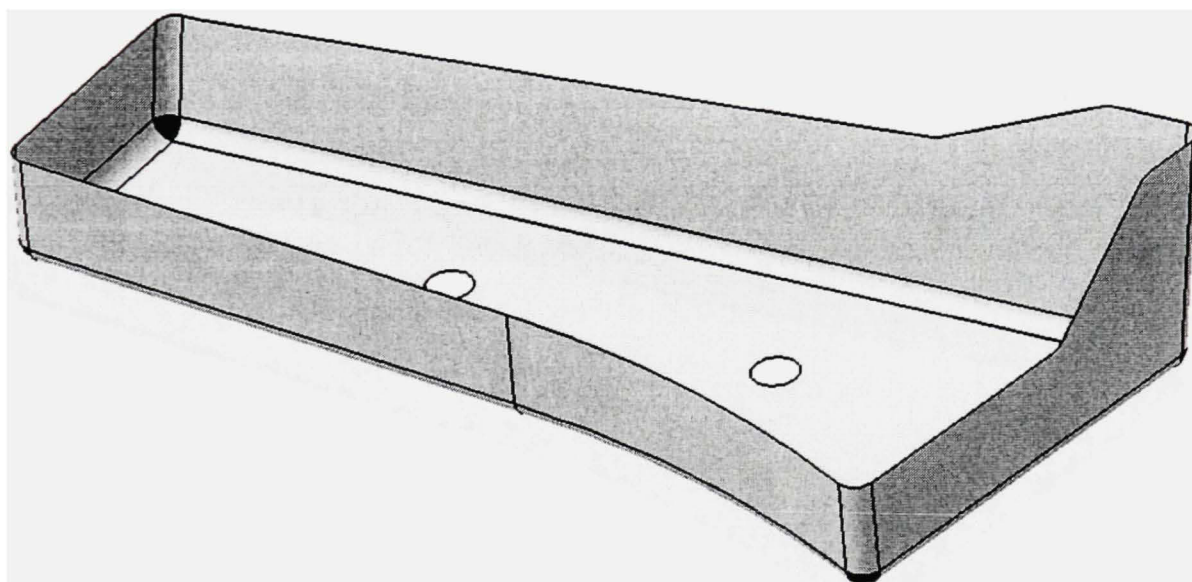


Figure 4.14 Nombre de faces sphériques

4.4.1.1.7 Nombre de faces courbées

Les faces courbées sont un regroupement de deux classes : les cylindres ayant un axe de centre constant et les faces qui composent le « tore », c'est-à-dire des cylindres ayant une courbure dans l'axe de centre en excluant les faces sphériques. Le nombre de faces courbées dans la caractéristique de forme est de 10. (*Voir Figure 4.15*)

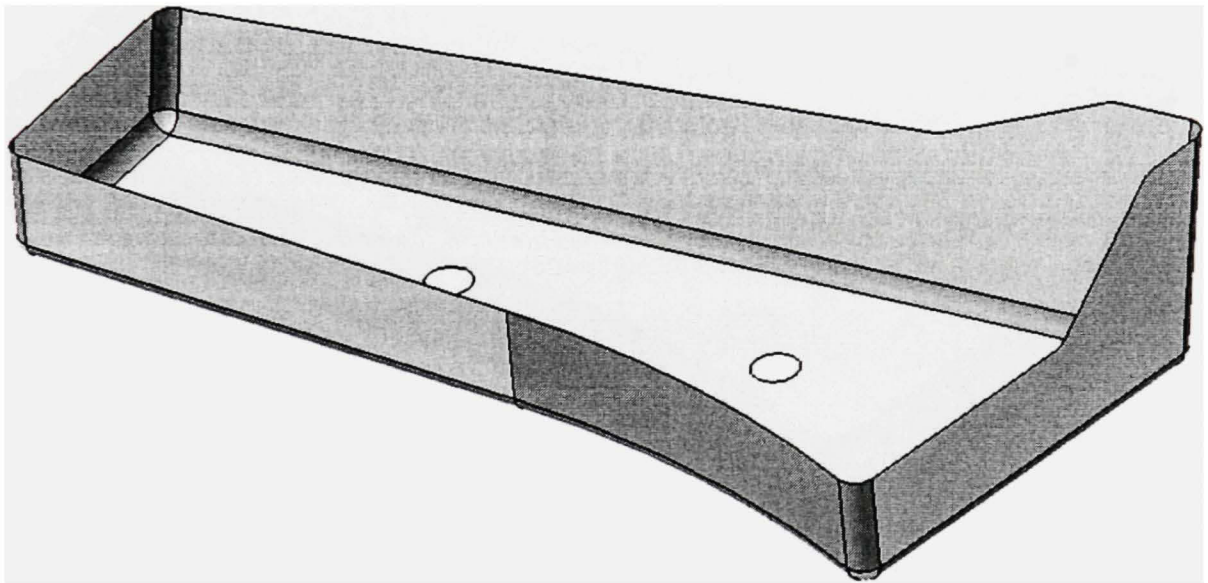


Figure 4.15 Nombre de faces courbées

4.4.1.1.8 Nombre de congés

Les faces cylindriques et sphériques qui possèdent un même rayon de courbure et une tangence avec les surfaces reliées peuvent être regroupées dans cette catégorie. Les congés sont d'habitude un bon indice du rayon de coin des outils qui peuvent être utilisés. Le nombre de congés dans la caractéristique de forme est de 13 (*Voir Figure 4.16*).

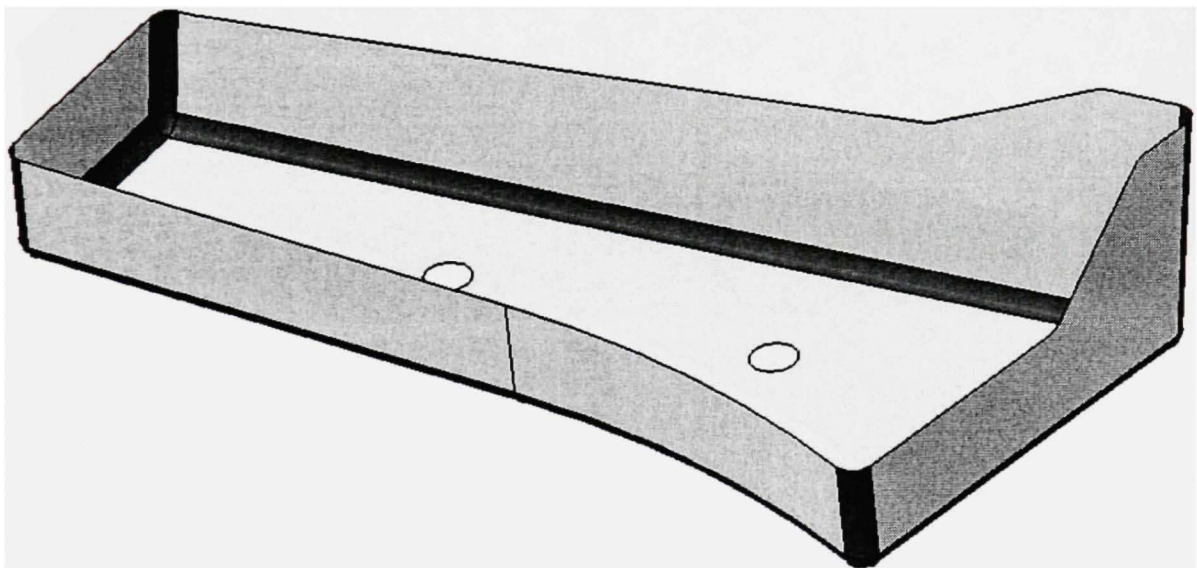


Figure 4.16 Nombre de congés

4.4.1.1.9 Nombre de face de fond

En utilisant une des méthodes proposées dans la section 3.2.2.3, la face de fond est définie dans ce cas comme le fond de la poche. Donc, le nombre de surface de fond dans la caractéristique de forme est de 1 (*Voir Figure 4.17*).

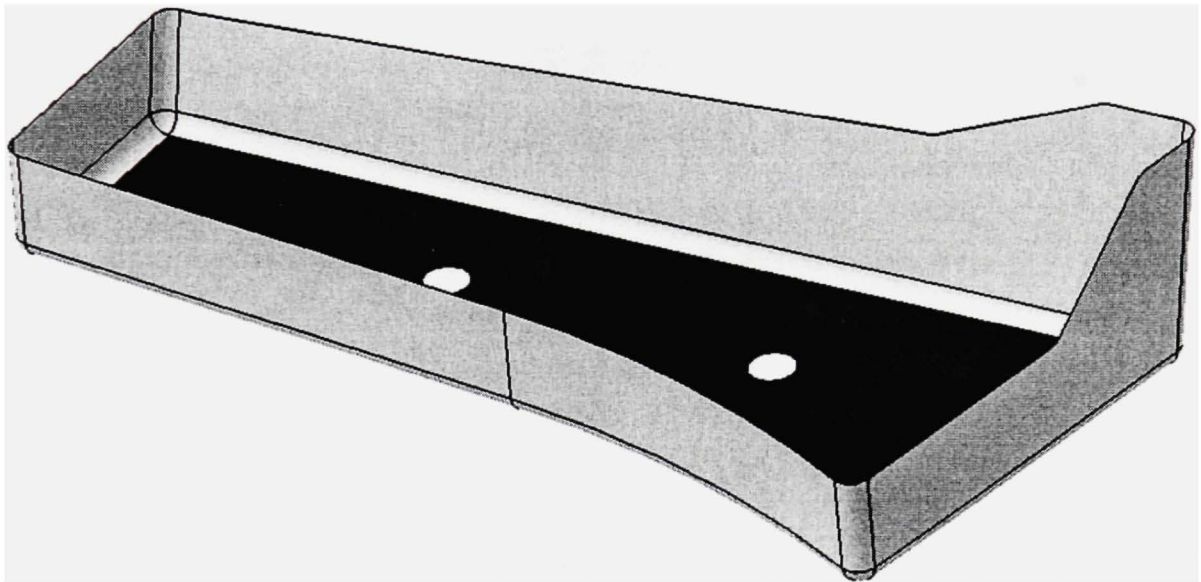


Figure 4.17 Nombre de face de fond

4.4.1.2 Mesures dimensionnelles de « poche.4 »

Pour procéder à l'extraction des paramètres dimensionnels, ce travail utilise encore un logiciel CAO avec une représentation B-REP. Les systèmes CAO offrent des outils pour mesurer des entités (absolue ou relative) (*Voir Figure 4.18*). Également, avec les API des systèmes CAO, un utilisateur peut facilement automatiser ce processus de mesure.

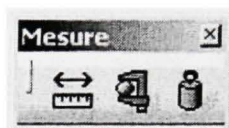


Figure 4.18 Outils disponibles pour la mesure d'entités dans CATIA V5R16

4.4.1.2.1 Rayon de courbure des congés

Le rayon de courbure des congés est de 4mm (*Voir Figure 4.19*).

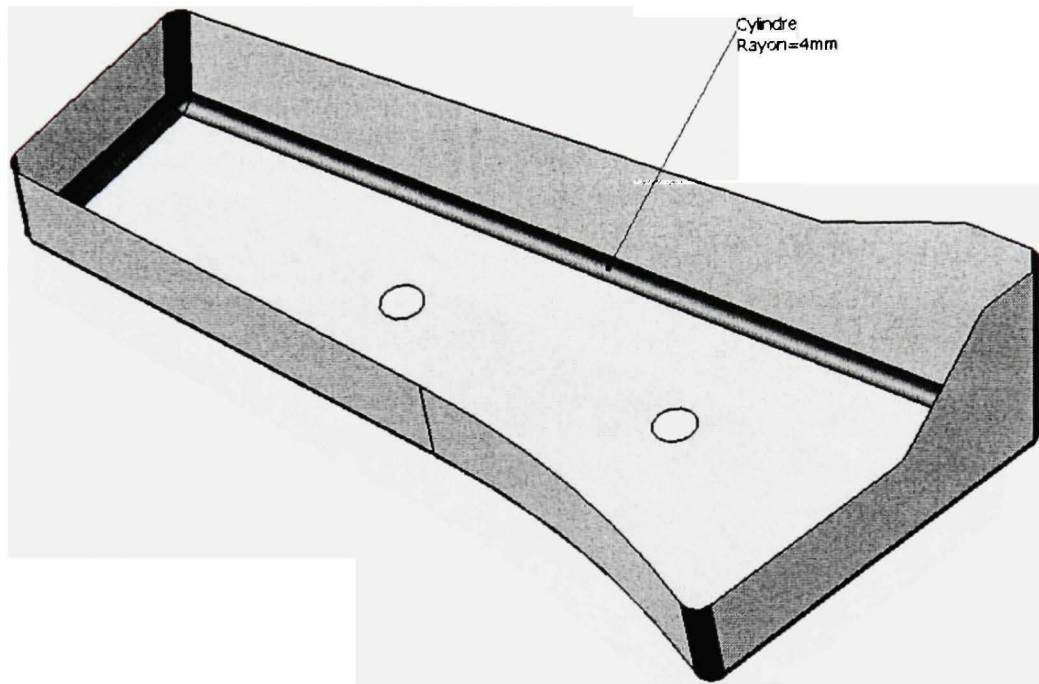


Figure 4.19 Rayon de courbure de « poche.4 »

4.4.1.2.2 Aire de la surface de fond

L'aire de la surface de fond est de 0.013m^2 (ou $13\,000\text{mm}^2$) (Voir Figure 4.20).

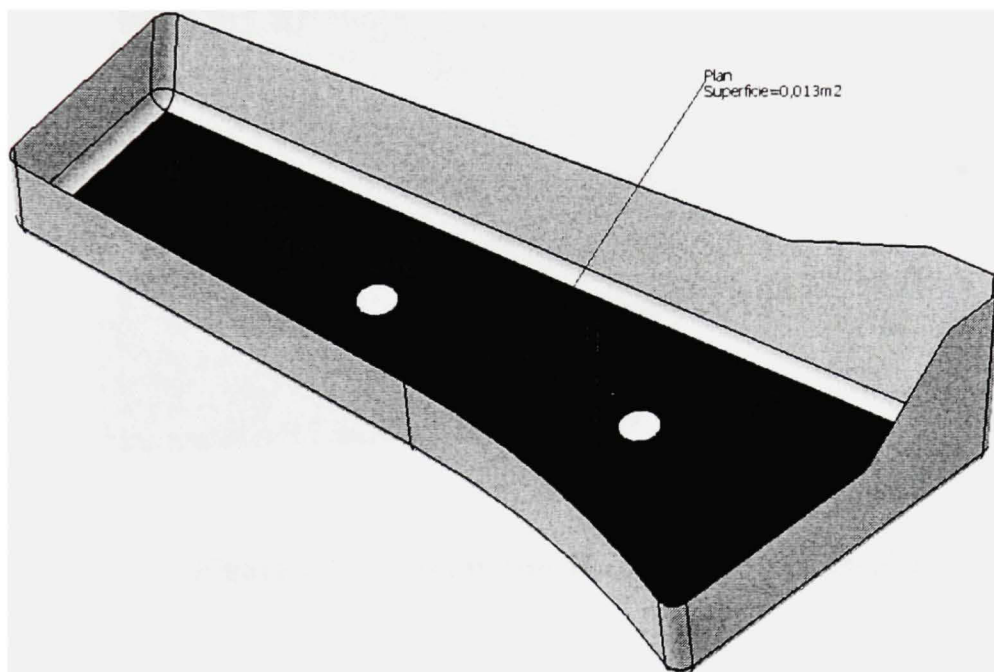


Figure 4.20 Aire de surface de « poche.4 »

4.4.1.2.3 Diamètre du trou

Cette mesure n'est pas disponible. Malgré le fait qu'il y a des arêtes circulaires complètes (des cercles), le diamètre du trou est mesuré à partir de la face cylindrique du trou. Le diamètre du trou est de 0mm.

4.4.1.2.4 Profondeur de la poche

La profondeur maximale de la poche est de 50.16mm (*Voir Figure 4.21*).

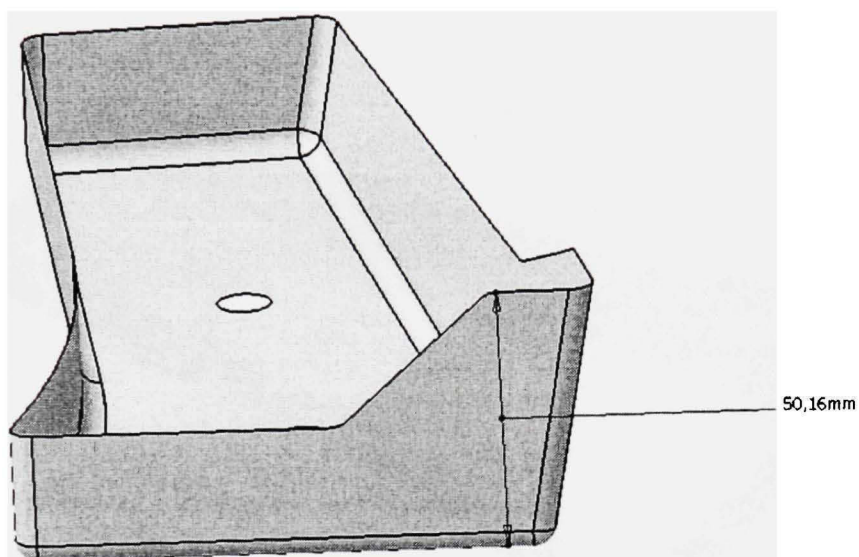


Figure 4.21 Profondeur maximale de « poche.4 »

4.4.1.2.5 Angle entre un flanc et le fond

L'angle maximal entre un flanc et la surface de fond est de 100° (Voir Figure 4.22).

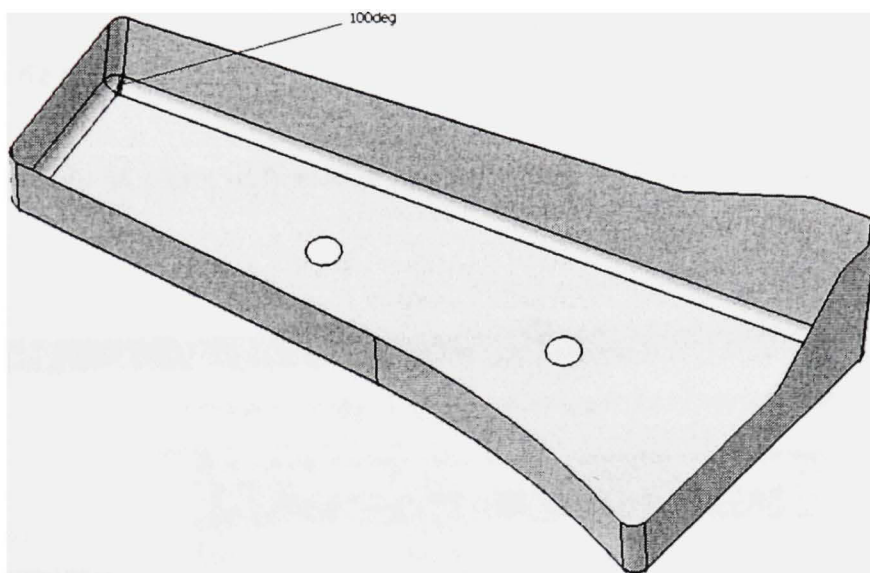


Figure 4.22 Angle maximal de « poche.4 »

4.4.1.2.6 Épaisseur des parois

L'épaisseur calculée entre deux parois de caractéristiques de forme adjacentes est de 3mm.

4.4.1.2.7 Unité de mesure

L'unité de mesure de la pièce structurale est en « mm ». Donc, le paramètre est 1 (Voir Figure 4.23).

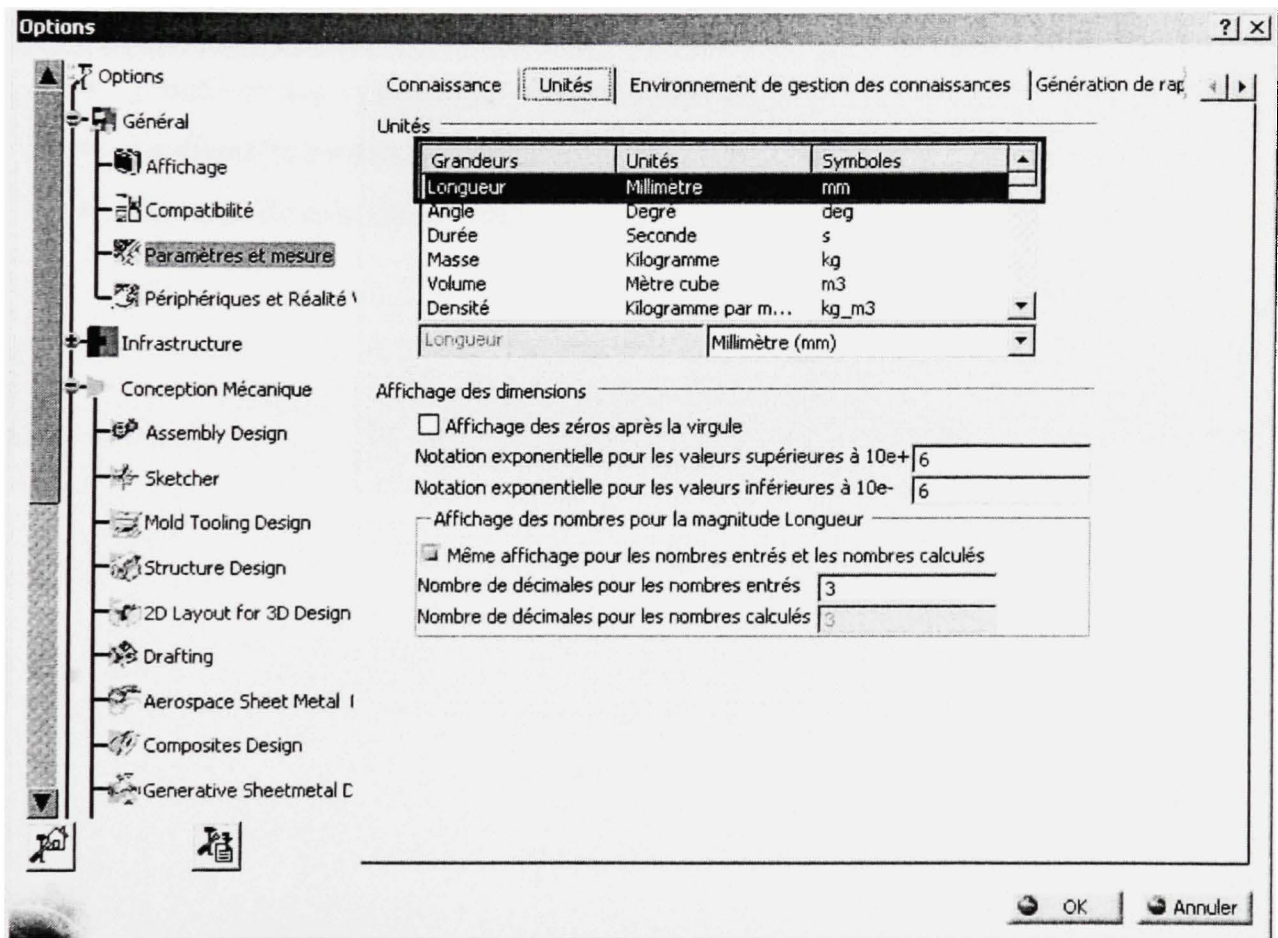


Figure 4.23 Unité de mesure de « poche.4 »

4.4.1.3 Paramètres technologiques de « poche.4 »

Selon la [Figure 3.27], la pièce structurelle contenant la « poche.4 » est une pièce en aluminium. Donc, le module de Young est de 70MPa et sa densité volumique est de 2.710 g/cm³.

Les rugosités de surface proposées sont 0.25mm pour la surface de fond et 0.08mm pour les flancs intérieurs.

Les outils disponibles dans les catalogues permettent le choix de cet outil (*Voir* Figure 4.24) :

- La longueur coupante de l'outil est de 60mm.
- L'outil est à bout sphérique donc, la valeur est 1.
- Le diamètre nominal est 8mm.
- Le rayon de coin est de 4mm

Définition d'outil ? x

Nom : T4 Fraise sphérique D8

Commentaire :

Numéro d'outil : 4

☒ Outil à bout sphérique

db = 8mm

Lc = 60mm

l = 70mm

L = 100mm

Rc = 4mm

D = 8mm

<< Moins

OK Annuler

Géométrie	Technologie	Vitesses	Compensation
Diamètre nominal (D):	8mm		
Rayon du coin (Rc):	4mm		
Longueur totale (L):	100mm		
Longueur coupante (Lc):	60mm		
Longueur partie active (l):	70mm		
Diamètre du corps (db):	8mm		
Diamètre non coupant (Dnc):	0mm		

Figure 4.24 Définition de l'outil disponible pour la « poche.4 »

4.4.1.4 Fiche de la caractéristique de forme « poche.4 »

La fiche de la caractéristique de forme « poche.4 » se résume ainsi (Voir Figure 4.25) :

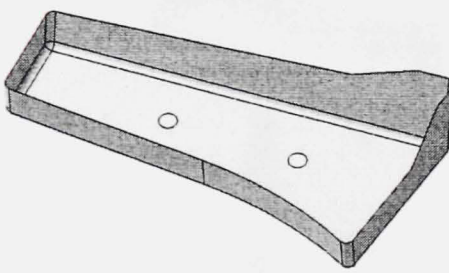
FICHE D'UNE NOUVELLE CARACTÉRISTIQUE DE FORME			
Forme	Paramètres de l'entrée (24)		=
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	32
		Nombre d'arêtes droites	26
		Nombre d'arêtes circulaires	26
		Nombre d'arêtes concaves	30
		Nombre de faces planes	5
		Nombre de faces sphériques	4
		Nombre de faces cylindriques	10
		Nombre de congés	13
		Nombre de surface de fond	1
		Rayon de courbure des congés	4.000
		Aire totale de la surface de fond	0.013
		Diamètre du trou	0
		Profondeur de poche ou de trou	50.160
		Angle entre un flanc et le fond	100.00
		Épaisseur des parois	3.000
		Unité de mesure	1
	Technologiques	Module de Young	70.000
		Densité volumétrique	2.710
		Rugosité de la surface de fond	0.250
		Rugosité des flancs	0.080
		Longueur coupante de l'outil	60.000
		Outil à bout sphérique	1.000
		Diamètre nominal de l'outil	8.000
		Rayon de coin	4.000

Figure 4.25 Fiche de la caractéristique de forme « poche.4 »

4.4.2 Création d'un fichier de transfert contenant les paramètres d'entrées

L'étape suivante consiste à créer un fichier de transfert qui servira d'intermédiaire entre la caractéristique de forme et le réseau de neurones. Un fichier de transfert, pour chaque caractéristique de forme, permet également une meilleure portabilité et une modularité du système puisque ces fichiers peuvent être édités manuellement, sauvegardés dans la mémoire, etc. (Voir Figure 4.26).

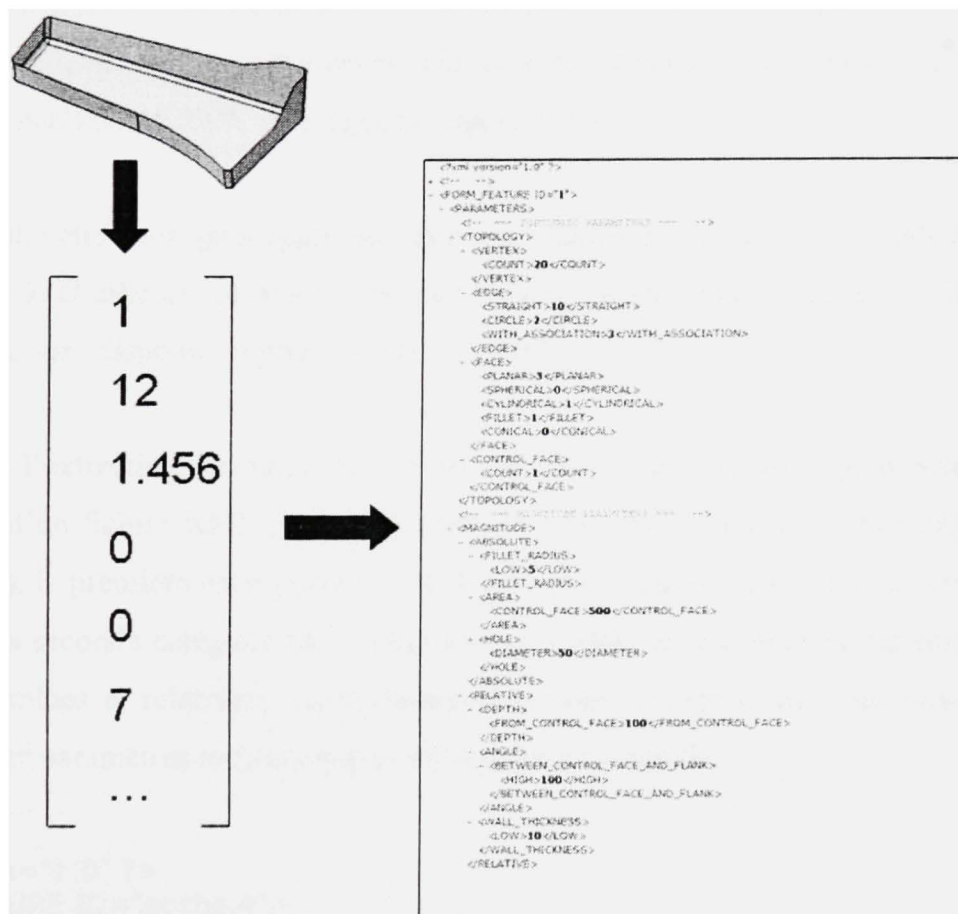


Figure 4.26 Création d'un fichier de transfert

Plusieurs formats de transfert existent. Pour une meilleure compréhension et une information modulaire, ce travail utilise le format XML. Le format XML offre de nombreux avantages dont celui d'être un langage standard pour établir des liens entre différentes informations. Les « nœuds » définissent ainsi les paramètres topologiques, géométriques et technologiques. Il


```

        <PLANAR>5</PLANAR>
        <SPHERICAL>4</SPHERICAL>
        <CYLINDRICAL>10</CYLINDRICAL>
        <FILLET>13</FILLET>
    </FACE>
    <CONTROL_FACE>
        <COUNT>1</COUNT>
    </CONTROL_FACE>
</TOPOLOGY>
<!-- == MAGNITUDE PARAMETERS == -->
<MAGNITUDE>
    <ABSOLUTE>
        <FILLET_RADIUS>
            <LOW>4</LOW>
        </FILLET_RADIUS>
        <AREA>
            <CONTROL_FACE>0.013</CONTROL_FACE>
        </AREA>
        <HOLE>
            <DIAMETER>0</DIAMETER>
        </HOLE>
    </ABSOLUTE>
    <RELATIVE>
        <DEPTH>
            <FROM_CONTROL_FACE>50.16</FROM_CONTROL_FACE>
        </DEPTH>
        <ANGLE>
            <BETWEEN_CONTROL_FACE_AND_FLANK>
                <HIGH>100</HIGH>
            </BETWEEN_CONTROL_FACE_AND_FLANK>
        </ANGLE>
        <WALL_THICKNESS>
            <LOW>3</LOW>
        </WALL_THICKNESS>
    </RELATIVE>
    <UNIT>1</UNIT>
</MAGNITUDE>
<!-- == MANUFACTURING PARAMETERS == -->
<MANUFACTURING>
    <MATERIAL>
        <YOUNG_MODULUS>70</YOUNG_MODULUS>
        <VOLUMETRIC_DENSITY>2.710</VOLUMETRIC_DENSITY>
    </MATERIAL>
    <RUGOSITY>
        <CONTROL_FACE>0.25</CONTROL_FACE>
        <FLANKS>0.08</FLANKS>
    </RUGOSITY>
    <TOOL>
        <CUTTING_LENGTH>60</CUTTING_LENGTH>
        <BALL_NOSE>1</BALL_NOSE>
        <NOMINAL_DIAMETER>8</NOMINAL_DIAMETER>

```



```
        <CORNER_RADIUS>4</CORNER_RADIUS>
    </TOOL>
</MANUFACTURING>
</PARAMETERS>
</FORM_FEATURE>
```

Figure 4.27 Fichier de transfert XML de « poche.4 »

Neurone no.	Description	Valeur d'entrée
1	Nombre de sommets	32
2	Nombre d'arêtes droites	26
3	Nombre d'arêtes circulaires	26
4	Nombre d'arêtes concaves	30
5	Nombre de faces planes	5
6	Nombre de faces sphériques	4
7	Nombre de faces cylindriques	10
8	Nombre de congés	13
9	Nombre de surface de fond	1
10	Rayon de courbure des congés	4.000
11	Aire totale de la surface de fond	0.013
12	Diamètre du trou	0.000
13	Profondeur d'une poche ou trou	50.160
14	Angle entre le flanc et la surface de fond	100.000
15	Épaisseur des parois	3.000
16	Unité de mesure	1
17	Module de Young	70
18	Densité volumétrique	2.710
19	Rugosité de la surface de fond	0.25
20	Rugosité des flancs	0.08
21	Longueur coupante de l'outil	60.000
22	Outil à bout sphérique	1
23	Diamètre nominal de l'outil	8.000
24	Rayon de coin de l'outil	4.000

Figure 4.29 Association des paramètres avec les neurones d'entrée

Le réseau de neurones 24-20-5 a été préalablement entraîné avec les paramètres suivants :

- une fonction d'activation sigmoïde binaire
- un taux d'apprentissage de 0.01
- un nombre d'époque de 100
- une polarisation (« bias ») de 1

La réponse du réseau de neurones entraîné donne une matrice de dimension 5 par 1 avec des valeurs se situant entre 0 et 1 (puisque la fonction d'activation est la sigmoïde binaire). Pour la caractéristique de forme « poche.4 », la réponse est la suivante : (Voir Figure 4.30)

Neurone no.	Description	Valeur de sorties
1	Surfaçage	0.068073
2	Contournage prismatique	0.405000
3	Contournage multiaxes	0.523689
4	Perçage	0.151787
5	Fraisage circulaire	0.087166

Figure 4.30 Réponse du réseau de neurones 24-20-5 avec « poche.4 »

4.4.4 Interprétation des résultats de la matrice de sortie

L'interprétation de la matrice de sortie est l'étape finale de la méthodologie. Elle permet d'en déduire les stratégies d'usinage que le système propose.

La valeur des résultats obtenus se situe entre 0 et 1. Lorsque le réseau de neurones calcule la matrice de sortie, le système réordonne les stratégies d'usinage en ordre décroissant : celle qui obtenu la plus grande valeur (niveau de confiance) se retrouve au premier rang (*Voir Figure 4.31*).

Description	Valeur de sorties
1-Contournage multiaxes	0.523689
2-Contournage prismatique	0.405000
3-Perçage	0.151787
4-Fraisage circulaire	0.087166
5-Surfaçage	0.068073

Figure 4.31 Proposition de stratégies d'usinage réordonnée

On peut pousser l'interprétation de ces résultats en analysant la faisabilité de ces stratégies d'usinage. Par exemple, puisque la troisième stratégie est un « perçage », ce qui est tout à fait improbable, il serait correct d'éliminer les trois dernières propositions. Ainsi, la caractéristique de forme « poche.4 » propose les stratégies d'usinage de contournage multiaxes ou un contournage prismatique (*Voir Figure 4.32*).

Il est important de noter que la stratégie d'usinage « contournage prismatique » est possible, mais demeure peu probable. Cette stratégie est utile pour des contours prismatiques uniquement. Ce travail peut conclure qu'il faut plus d'exemple d'apprentissage de ce type de choix. En général, selon [Fausett, 1994], lorsqu'un réseau de neurones offre des résultats

moins intéressants, il nécessite souvent plus d'entraînement avec des exemples concrets de formes à différencier.

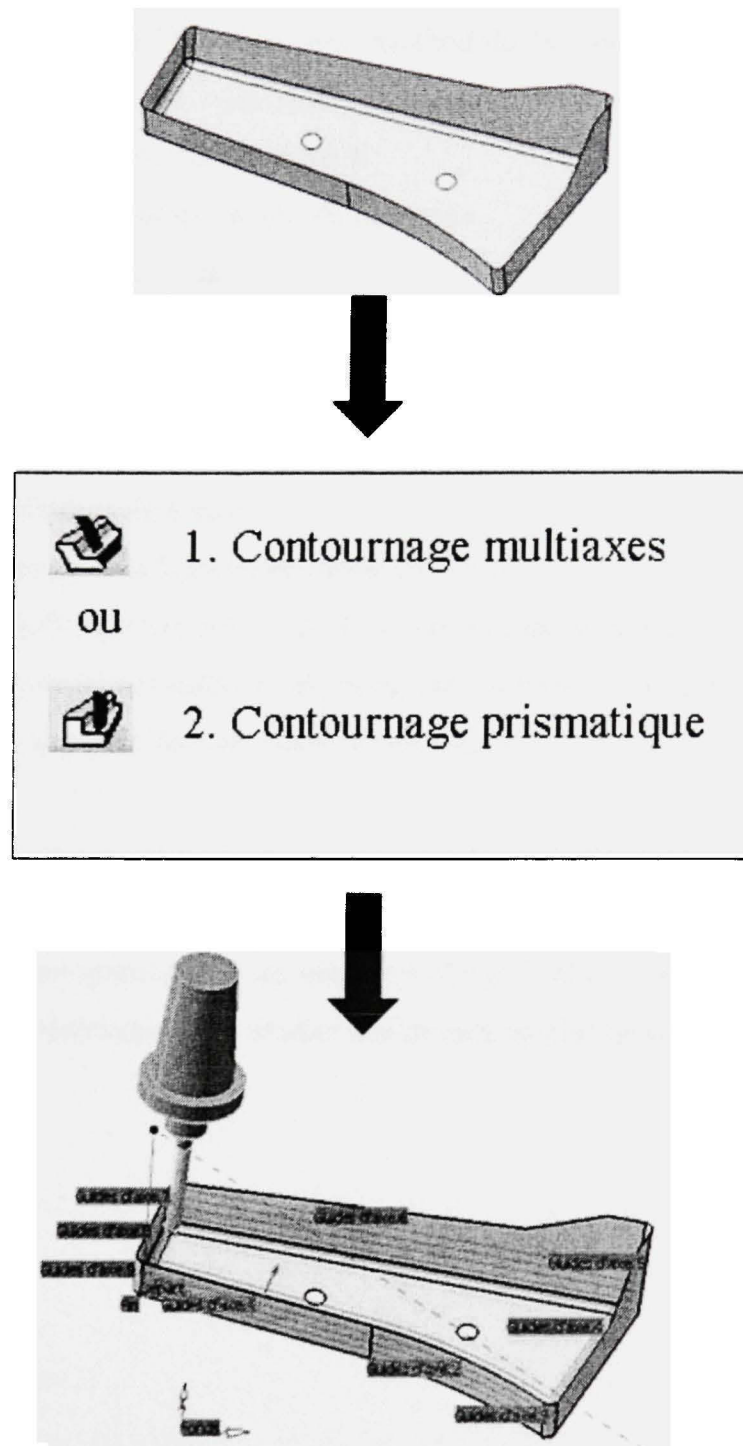


Figure 4.32 Proposition finale de stratégies d'usinage réordonnée

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, ce travail propose une méthodologie complète pour reconnaître des caractéristiques de forme en stratégies d'usinage pour les pièces structurelles en aéronautique. Cette méthodologie fait appel à :

1. Entraînement supervisé du réseau de neurones
 - Nombre d'époque = 100
 - Taux d'apprentissage = 0.01
 - Polarisation = 1

Pour chaque caractéristique de forme :

1. « Paramétrisation » de la caractéristique de forme
2. Création d'un fichier de transfert XML contenant les paramètres
3. Calcul du réseau de neurones et obtention de la matrice de sortie
4. Interprétation des résultats de la matrice de sortie

Dans le prochain chapitre, ce travail propose une validation informatique de la méthodologie. Puisqu'une architecture de réseau de neurones est fixe et que les paramètres topologiques, géométriques et technologiques sont un domaine d'exploration vaste, un outil informatique offre une flexibilité intéressante pour étudier différentes configurations.

CHAPITRE 5

VALIDATION AVEC UN OUTIL INFORMATIQUE

5.1 Introduction

Un outil de validation informatique est une bonne démarche pour la validation de certains procédés. La reconnaissance de stratégies d'usinage à partir de caractéristiques de forme avec des réseaux de neurones est une expérience qui demande l'utilisation de plusieurs algorithmes mathématiques plus ou moins complexes. Ces algorithmes peuvent être modélisés aisément en un outil informatique pour valider un concept.

D'ailleurs, concevoir un outil informatique avec un langage de programmation de haut-niveau offre la possibilité d'utiliser des bibliothèques de dialogues graphiques de type GUI qui facilite son utilisation et son appréciation. Les contrôles de type dialogiques sont quasi omniprésents puisqu'ils permettent une meilleure ergonomie d'interface-usager, c'est-à-dire une utilisation optimale par les usagers.

Ce travail propose donc un outil informatique qui reflète cet ordre d'idée. Cet outil de validation permet de générer aisément des réseaux de neurones qui, par la suite, peuvent être utilisés pour reconnaître des stratégies d'usinage.

L'objectif principal de cet outil de validation informatique est de permettre une grande flexibilité à l'utilisateur lors de la conception et de l'entraînement du réseau de neurones. Grâce à cette flexibilité, la reconnaissance de stratégies à partir de caractéristiques de forme avec les réseaux de neurones en sera grandement simplifiée. Le deuxième objectif de cet outil est d'offrir une base de code source facilement modifiable et réutilisable pour permettre une intégration avec d'autres outils, comme par exemple un extracteur de caractéristiques de forme.

5.2 Méthodologie de l'outil informatique

L'outil informatique se concentre sur les étapes suivantes de la méthodologie proposée dans le chapitre précédent :

1. Création d'architecture de réseaux de neurones de type MLP
2. Entraînement de réseaux de neurones avec une base de données
3. Tester le réseau de neurones entraîné avec des nouvelles caractéristiques de forme

La méthodologie de l'outil informatique proposée dans ce mémoire est résumée dans cette séquence schématique ci-dessous (*Voir Figure 5.1*).

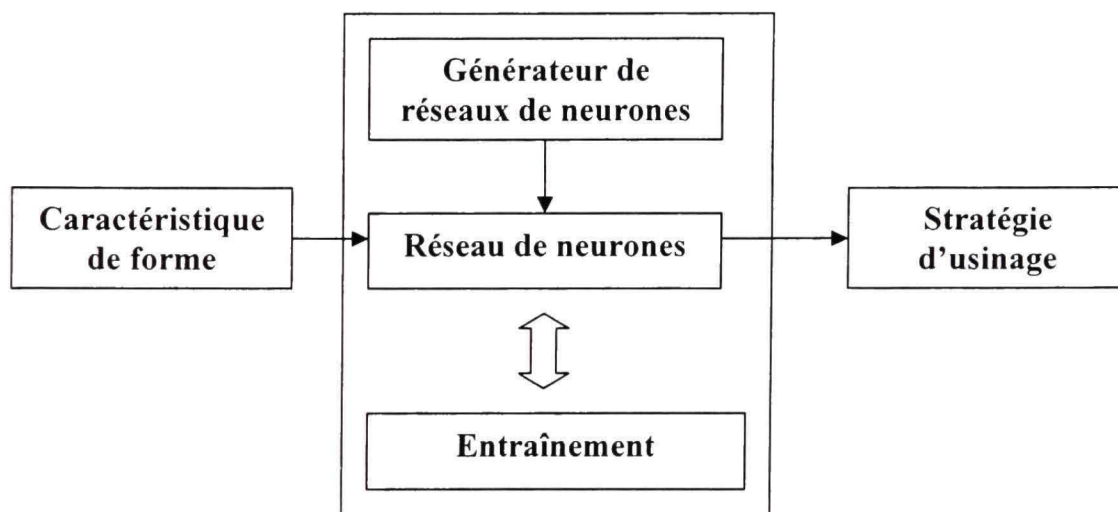


Figure 5.1 Méthodologie générique d'outil informatique

Avec cet outil informatique, l'utilisateur peut commencer par définir un nouveau réseau de neurones ou tout simplement, en charger un existant dans la mémoire de l'ordinateur. Ce réseau de neurones contient toutes les informations nécessaires pour permettre de reconnaître des caractéristiques de formes comme son nombre d'entrées possibles, son nombre de sorties, le nombre de couches cachées, le nom des paramètres lus dans les fichiers de caractéristiques de forme qui les associe aux entrées et le nom des paramètres de sorties.

Évidemment, cet outil informatique est avant tout un outil de recherche, il permet donc, avant toute chose, de faire des essais avec les réseaux de neurones et ses paramètres. Dans cette optique, l'outil propose ainsi une approche généraliste pour concevoir et générer rapidement des réseaux de neurones. Ensuite, l'utilisateur a la possibilité de modifier la lecture des entrées (à partir des fichiers de caractéristiques de formes générés auparavant) ainsi que les sorties offertes. Ces réseaux sont par la suite soumis à un entraînement cognitif à partir d'une base de données d'entraînement (des fichiers de caractéristiques de forme pointant vers des caractéristiques d'usinage correspondantes connues).

5.3 Maquette informatique

5.3.1 Architecture

L'architecture de l'outil de validation est simple. Cet outil est programmé à partir d'un langage évolué orienté objet, le C++. Ce langage est populaire et offre des performances de premier ordre pour les applications qui nécessitent des temps de calculs optimaux. De plus, puisque ce langage est orienté objet, il offre de bonnes opportunités de réutilisation pour certains objets, par exemple dans ce travail, les réseaux de neurones, les couches de réseaux de neurones et les neurones eux-mêmes, sont des objets. Cette réutilisation des objets évite aux concepteurs de construire à nouveau des objets réseaux de neurones. Également, grâce aux nombreuses bibliothèques d'objets graphiques « Microsoft Foundation Classes » (MFC) et de fonctions communes « Standard Template Library » (STL), le C++ possède toutes les qualités requises pour arriver à terme pour la création de l'outil de validation informatique de ce travail et même permettre aux concepteurs d'en utiliser certaines composantes.

L'outil de validation est organisé en trois parties majeures. La première est un générateur paramétrique de réseaux de neurones (*Voir* Figure 5.2). Cette « paramétrisation » est une fonctionnalité majeure de l'outil informatique : le domaine des réseaux de neurones demande toujours la méthode d'essais et erreurs de plusieurs architectures différentes. Selon [Dereli, 1998], il n'y a pas encore de moyens ou d'algorithmes capables de prédire une architecture efficace et performante dans un certain domaine d'application. L'outil de validation permet donc de créer un réseau de neurones MLP en modifiant son nombre de couches total, le nombre de neurones par couches (incluant la couche d'entrée et la couche de sortie) et sa fonction d'activation. Ensuite, un autre aspect important du projet est de permettre la modification des paramètres d'entrées et de sorties. Ainsi, chaque réseau de neurones possède la capacité de modifier les paramètres d'entrées des caractéristiques de forme et de choisir quelles sont les sorties affectées au réseau de neurone.

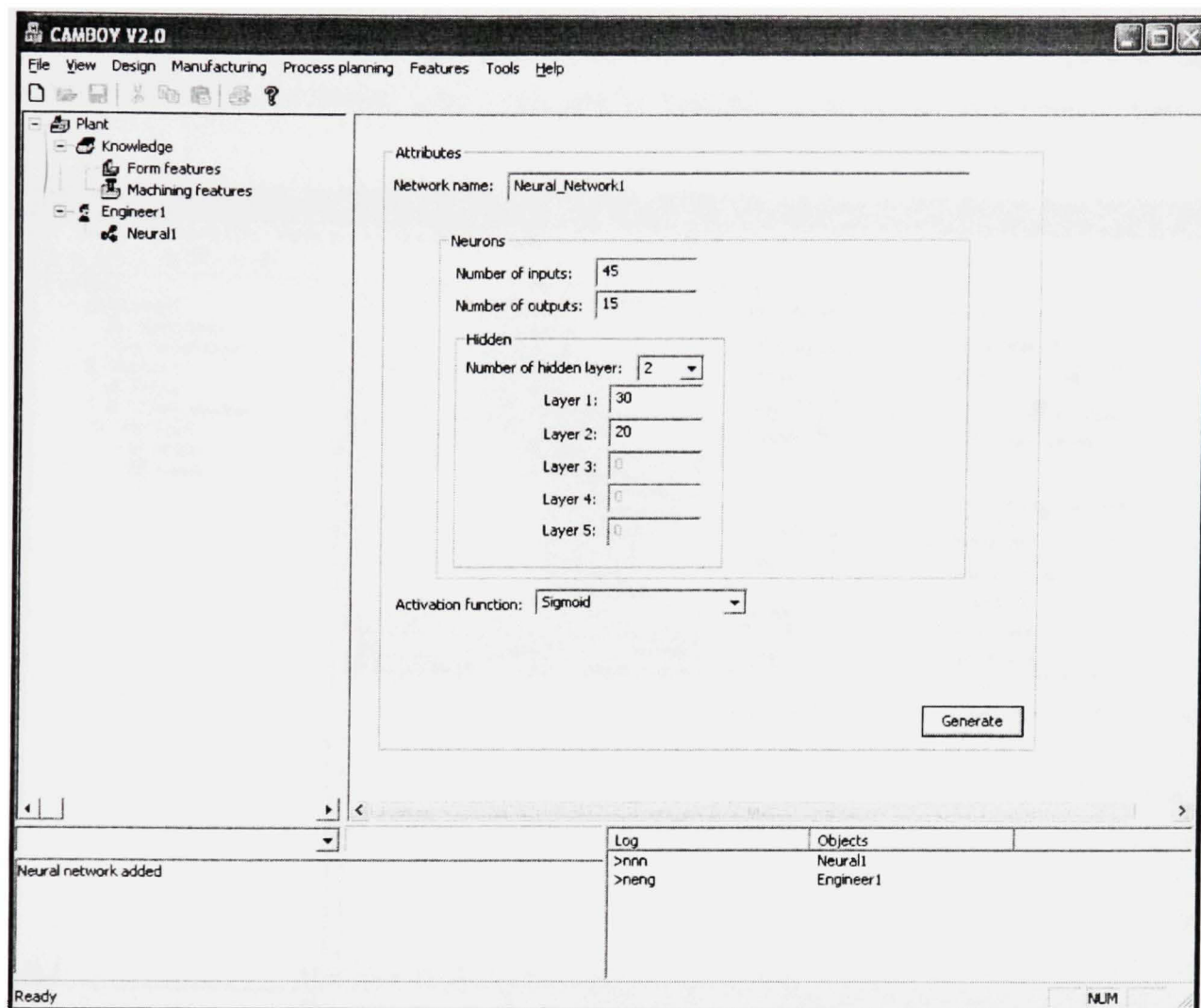


Figure 5.2 Module de génération paramétrique d'architecture

La deuxième partie de l'outil de validation informatique est l'entraînement du réseau de neurones (Voir Figure 5.3). Dans cette section de l'outil, l'utilisateur peut modifier les paramètres d'entraînement tel le nombre d'époques, le type de fonction d'activation (binaire, polaire ou autre spécification). De plus, avant de procéder à l'entraînement, le concepteur du réseau de neurones doit initialiser les poids du réseau. Le logiciel permet d'établir un intervalle d'initialisation pour générer des poids aléatoires entre les deux bornes de l'intervalle. Lorsque l'initialisation est complétée, il peut choisir le nombre d'itération (les époques) et le taux d'apprentissage pour ensuite déclencher l'entraînement. Selon la vitesse

de l'ordinateur, l'entraînement peut prendre quelques secondes ou durer jusqu'à quelques minutes. Le module d'entraînement lit les fichiers de caractéristiques de forme qui possèdent une section supplémentaire, celle contenant la stratégie d'usinage désirée pour ce type de forme.

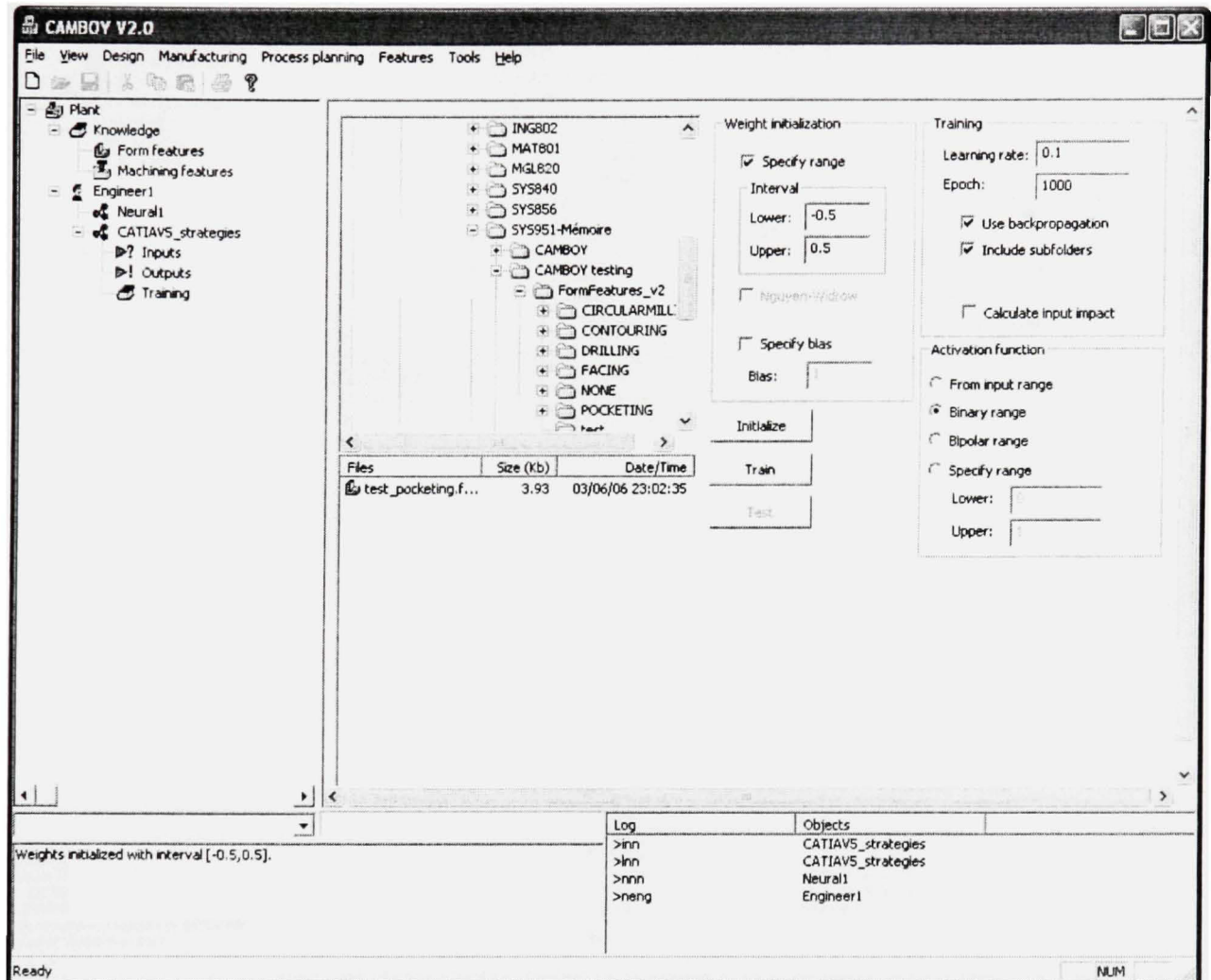


Figure 5.3 Module d'entraînement du réseau de neurones

La troisième partie est le module d'essai du réseau de neurones avec des caractéristiques de forme. Lorsque le réseau de neurones vient d'effectuer son entraînement, il est prêt pour tester son apprentissage avec des nouvelles caractéristiques de forme. Ce module permet tout simplement de lire des fichiers de caractéristiques de forme en XML, de calculer les sorties

avec le réseau de neurones choisi et d'afficher les résultats en déterminant le neurone gagnant et la stratégie d'usinage qui y correspond (Voir Figure 5.4).

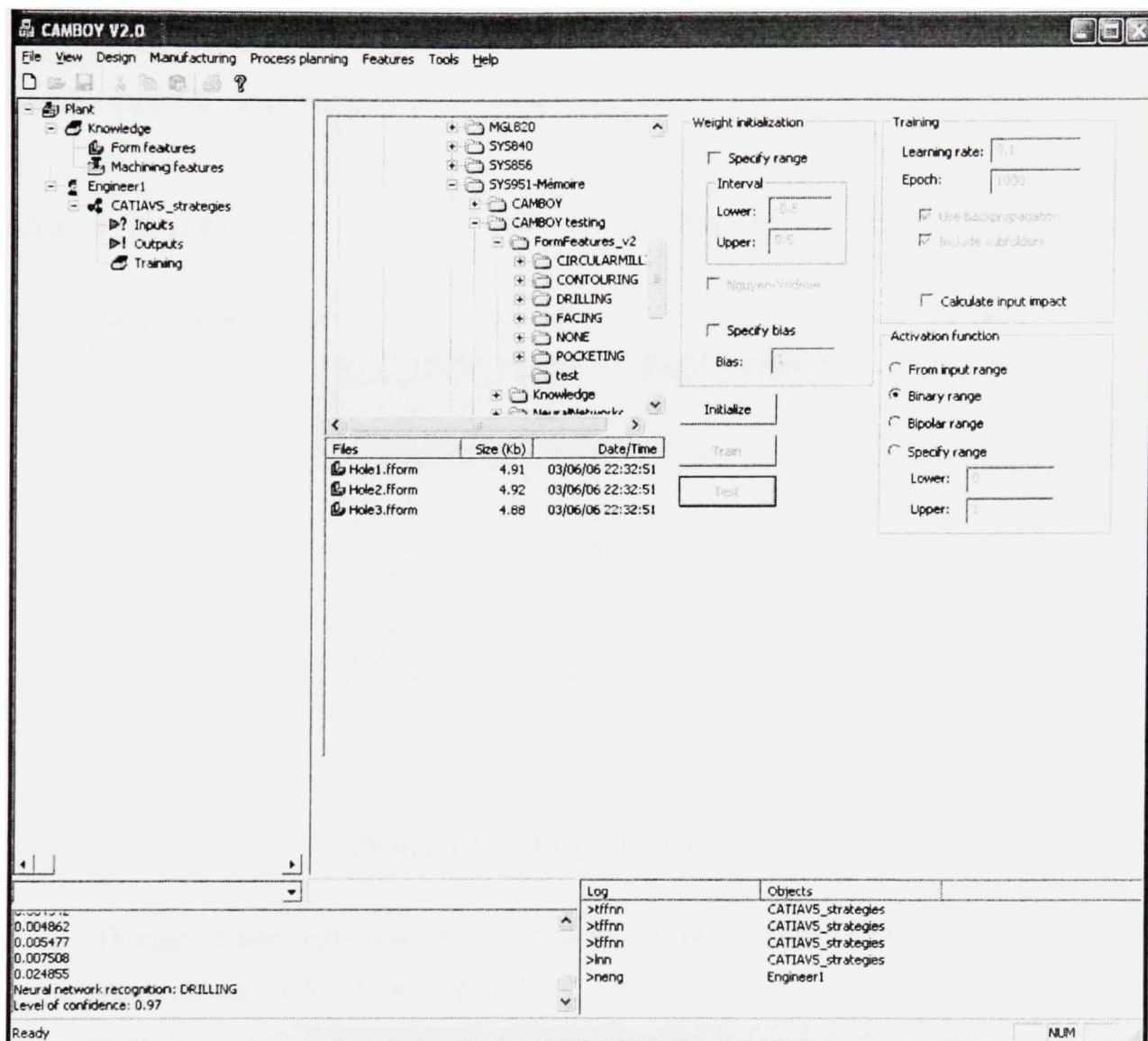


Figure 5.4 Module d'essai du réseau de neurones

5.3.2 Exemple d'utilisation de l'outil de validation informatique

5.3.2.1 Création d'architectures de réseau de neurones de type MLP

5.3.2.1.1 Création d'un « conteneur » de un ou plusieurs réseaux de neurones

1. Sélectionner le menu « File – New » (*Voir Figure 5.5*).

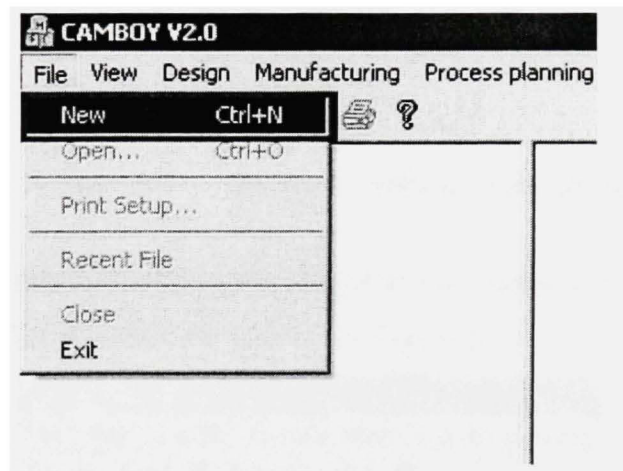


Figure 5.5 Étape 1 - Sélection du menu

2. Donner un nom significatif au « conteneur » de réseaux de neurones.
3. Appuyer sur « OK » (*Voir Figure 5.6*).

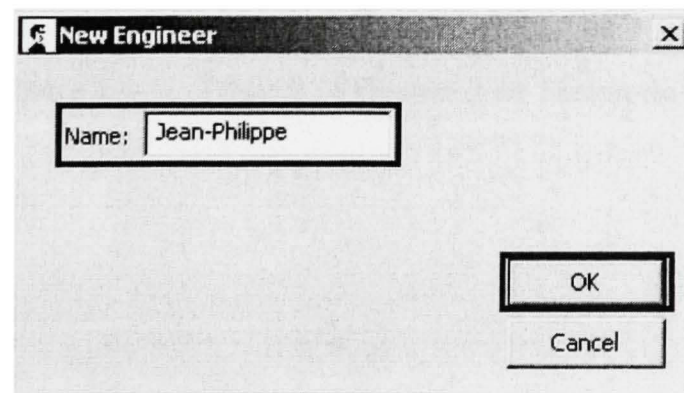


Figure 5.6 Étape 2 - Définition du conteneur

5.3.2.1.2 Création d'un réseau de neurones

1. Sélectionner le conteneur avec le bouton gauche de la souris (*Voir Figure 5.7*).

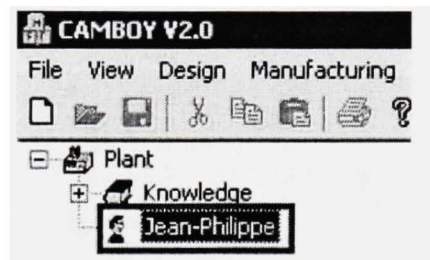


Figure 5.7 Étape 3 - Sélection du conteneur

2. Appuyer sur le bouton droit de la souris pour faire apparaître le menu contextuel du « conteneur » de réseaux de neurones (*Voir Figure 5.8*).

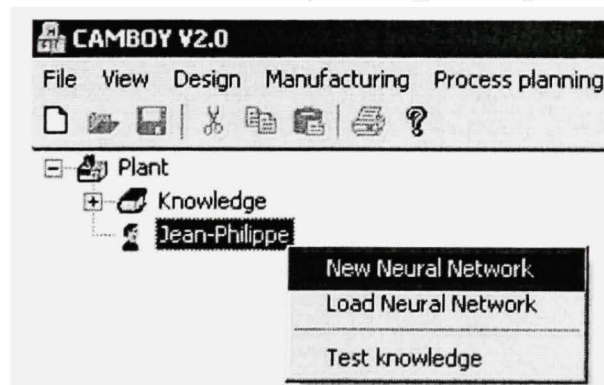


Figure 5.8 Étape 4 - Création d'un réseau de neurones

5.3.2.1.3 Configuration du réseau de neurones

1. Sélectionner le nouveau réseau de neurones qui vient d'apparaître et double-cliquer sur celui-ci pour accéder au dialogue des propriétés du réseau de neurones (*Voir Figure 5.9*).

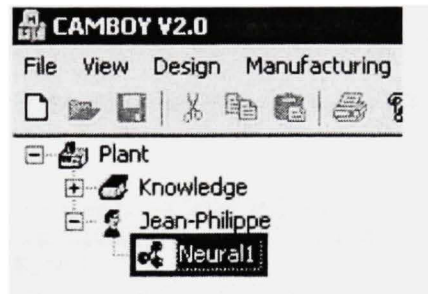


Figure 5.9 Étape 5 - Sélection du réseau de neurones

2. Modification des paramètres du réseau de neurones (*Voir Figure 5.10*)
 - Définir le nom du réseau de neurones
 - Définir le nombre d'entrées et de sorties
 - Définir le nombre de couches cachées (1-5)
 - Définir le nombre de neurone pour chaque couche cachée
 - Définir le type de fonctions d'activation (Sigmoid, identité ou marche binaire)
3. Appuyer sur « Generate » lorsque le réseau de neurones est bien configuré.

The image shows a software window titled "Attributes" for configuring a neural network. It includes the following elements:

- Network name:** A text field containing "NN_structural_parts".
- Neurons section:**
 - Number of inputs:** A text field containing "24".
 - Number of outputs:** A text field containing "5".
- Hidden section:**
 - Number of hidden layer:** A dropdown menu set to "1".
 - Layer 1:** A text field containing "20".
 - Layer 2:** A text field containing "0".
 - Layer 3:** A text field containing "0".
 - Layer 4:** A text field containing "0".
 - Layer 5:** A text field containing "0".
- Activation function:** A dropdown menu set to "Sigmoid".
- Generate button:** A button with a double border located at the bottom right.

Figure 5.10 Étape 6 - Configuration du réseau de neurones

5.3.2.1.4 Assignment des paramètres d'entrées

1. Sélectionner l'attribut « Inputs » du nouveau réseau de neurones qui vient d'être généré et double-cliquer sur celui-ci pour accéder au dialogue des propriétés des entrées (*Voir Figure 5.11*).

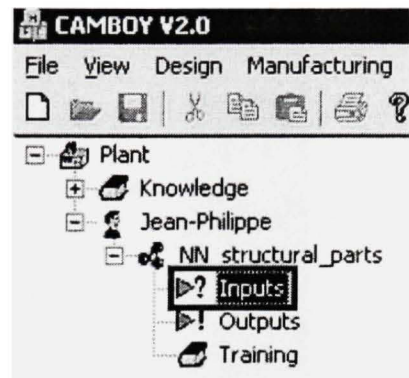


Figure 5.11 Étape 7 - Sélection des entrées

2. Appuyer sur le bouton « Load parameters... » pour accéder à un navigateur de fichiers de caractéristiques de forme (*Voir Figure 5.12*).

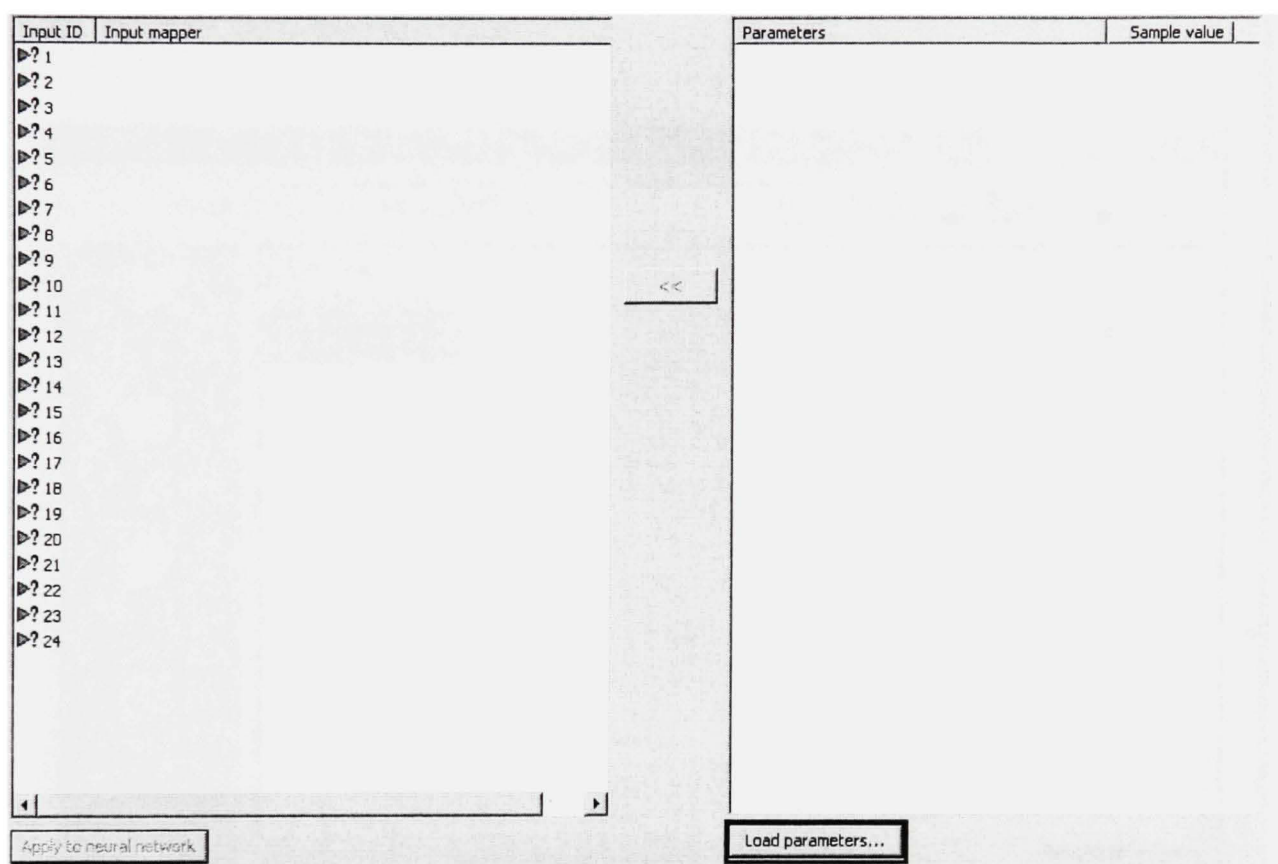


Figure 5.12 Étape 8 - Charger des paramètres d'entrées types

3. Naviguer pour trouver un exemple de fichier de caractéristique de forme (l'extension est « .fform ») (Voir Figure 5.13).
4. Sélectionner la caractéristique de forme choisie.
5. Appuyer sur le bouton « Open ».

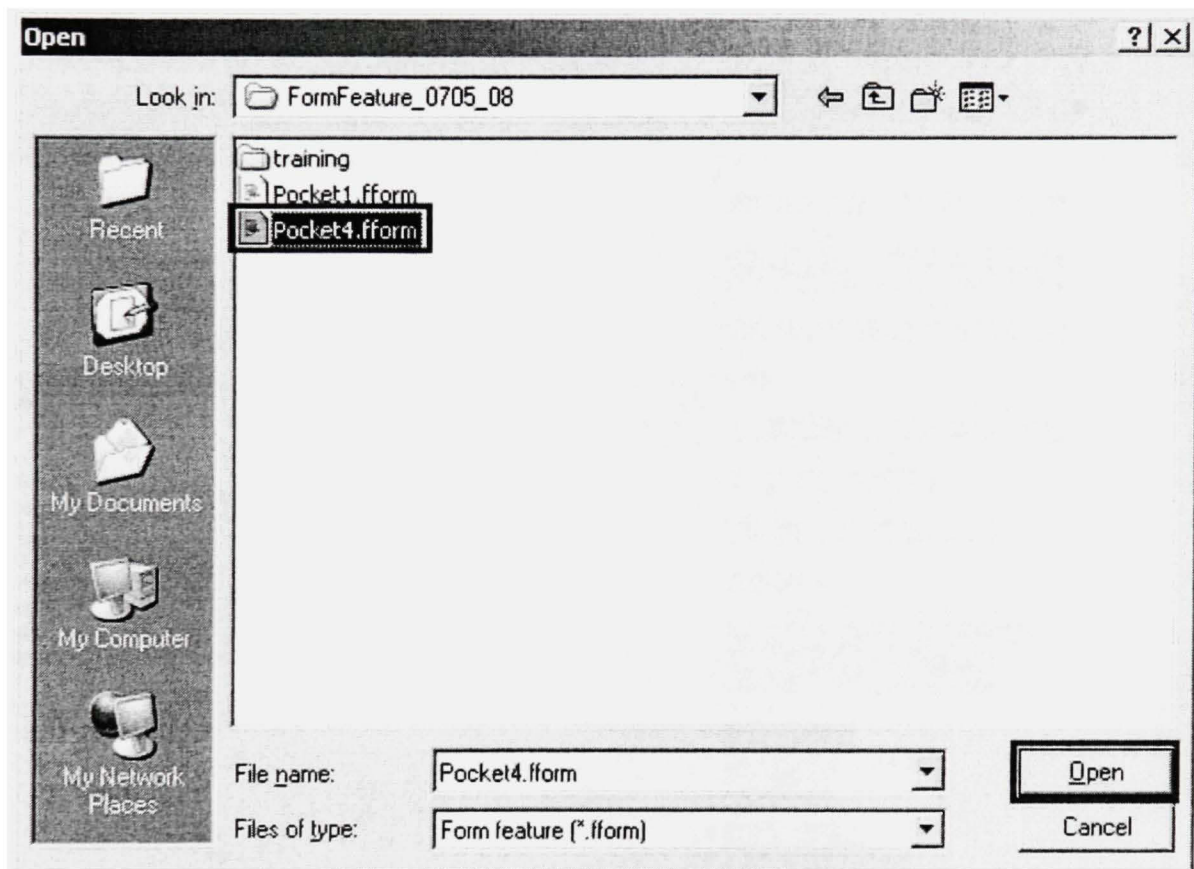


Figure 5.13 Étape 9 - Sélection d'un fichier de caractéristique de forme

6. Lorsque les paramètres topologiques, dimensionnels et technologiques apparaissent, faire une multi-sélection des paramètres désirés. Garder enfoncer CTRL sur le clavier et cliquer avec le bouton gauche de la souris (*Voir Figure 5.14*).
7. Sélectionner autant de paramètres qu'il y a de neurones sur la couche d'entrée.
8. Appuyer sur le bouton « << » pour transférer ces paramètres vers les neurones numérotées des entrées à gauche.

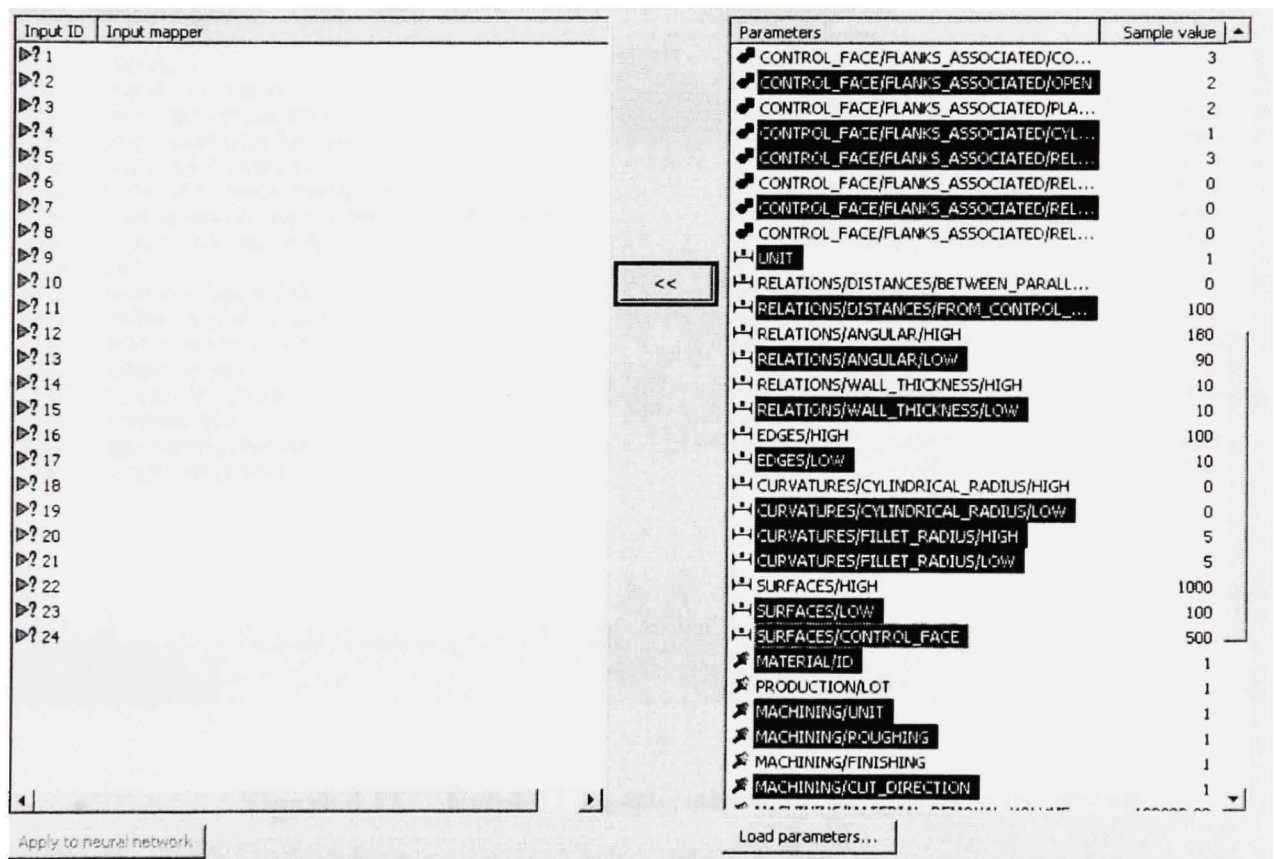


Figure 5.14 Étape 10 - Multi-sélection des paramètres d'entrées

9. Lorsque les paramètres d'entrées sont bien définis, appuyer sur le bouton « Apply to neural network » pour assigner ces paramètres au réseau de neurones (Voir Figure 5.15).

Input ID	Input mapper	Parameters	Sample value
▶? 1	VERTEX/COUNT	☑ VERTEX/COUNT	32
▶? 2	EDGE/STRAIGHT	☑ EDGE/STRAIGHT	26
▶? 3	EDGE/CIRCLE	☑ EDGE/CIRCLE	26
▶? 4	EDGE/WITH_ASSOCIATION	☑ EDGE/WITH_ASSOCIATION	30
▶? 5	FACE/PLANAR	☑ FACE/PLANAR	5
▶? 6	FACE/SPHERICAL	☑ FACE/SPHERICAL	4
▶? 7	FACE/CYLINDRICAL	☑ FACE/CYLINDRICAL	10
▶? 8	FACE/FILLET	☑ FACE/FILLET	13
▶? 9	CONTROL_FACE/COUNT	☑ CONTROL_FACE/COUNT	1
▶? 10	ABSOLUTE/FILLET_RADIUS/LOW	☑ ABSOLUTE/FILLET_RADIUS/LOW	4.000
▶? 11	ABSOLUTE/AREA/CONTROL_FACE	☑ ABSOLUTE/AREA/CONTROL_FACE	0.013
▶? 12	ABSOLUTE/HOLE/DIAMETER	☑ ABSOLUTE/HOLE/DIAMETER	0.000
▶? 13	RELATIVE/DEPTH/FROM_CONTROL_FACE	☑ RELATIVE/DEPTH/FROM_CONTROL_FACE	50.160
▶? 14	RELATIVE/ANGLE/BETWEEN_CONTROL_FACE_AND_FLANK/HIGH	☑ RELATIVE/ANGLE/BETWEEN_CONTROL_FACE...	100.000
▶? 15	RELATIVE/WALL_THICKNESS/LOW	☑ RELATIVE/WALL_THICKNESS/LOW	3.000
▶? 16	UNIT	☑ UNIT	1
▶? 17	MATERIAL/YOUNG_MODULUS	☒ MATERIAL/YOUNG_MODULUS	70
▶? 18	MATERIAL/VOLUMETRIC_DENSITY	☒ MATERIAL/VOLUMETRIC_DENSITY	2.710
▶? 19	RUGOSITY/CONTROL_FACE	☒ RUGOSITY/CONTROL_FACE	0.25
▶? 20	RUGOSITY/FLANKS	☒ RUGOSITY/FLANKS	0.08
▶? 21	TOOL/CUTTING_LENGTH	☒ TOOL/CUTTING_LENGTH	60.000
▶? 22	TOOL/BALL_NOSE	☒ TOOL/BALL_NOSE	1
▶? 23	TOOL/NOMINAL_DIAMETER	☒ TOOL/NOMINAL_DIAMETER	8.000
▶? 24	TOOL/CORNER_RADIUS	☒ TOOL/CORNER_RADIUS	4.000

Apply to neural network

Load parameters...

Figure 5.15 Étape 11 - Assignment des paramètres au réseau

5.3.2.1.5 Assignment des paramètres de sorties

1. Sélectionner l'attribut « Outputs » et double-cliquer sur celui-ci pour accéder au dialogue des propriétés des sorties (*Voir Figure 5.16*).

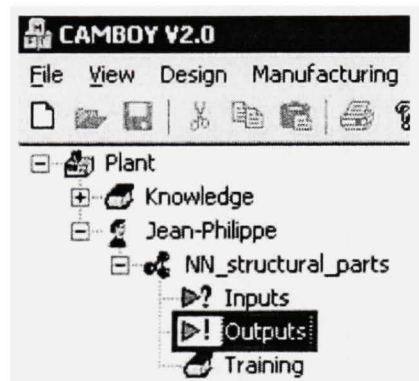


Figure 5.16 Étape 12 - Sélection des sorties

2. Appuyer sur le bouton « Get knowledge... » pour accéder à un navigateur de fichiers de savoir-faire (*Voir Figure 5.17*).

Output type

Output ID	Output mapper
▶! 1	
▶! 2	
▶! 3	
▶! 4	
▶! 5	

>>

Output value

Get knowledge... Load values Apply to neural network

Figure 5.17 Étape 13 - Charger les réponses du réseau

3. Naviguer pour trouver un savoir-faire (l'extension est « .know ») (Voir Figure 5.18).
4. Sélectionner le savoir-faire choisi.
5. Appuyer sur le bouton « Open ».

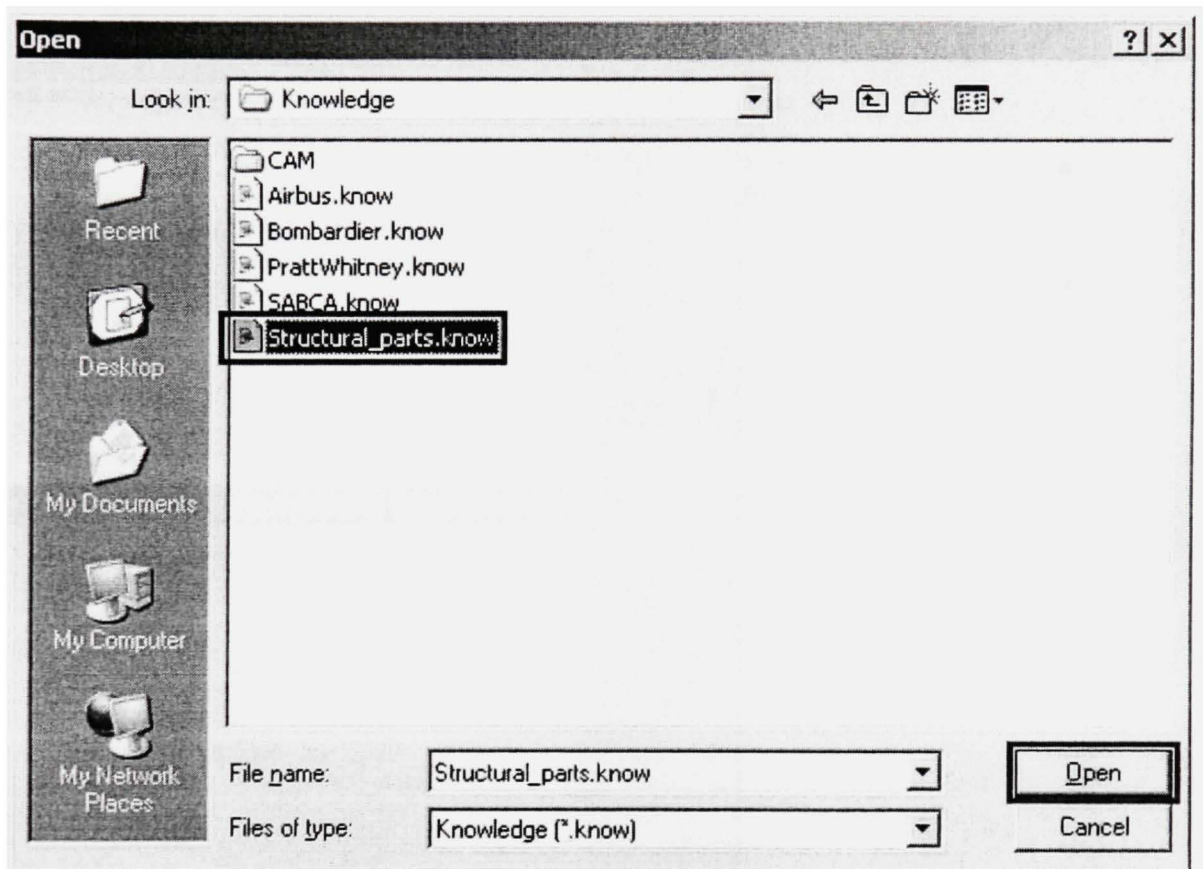


Figure 5.18 **Étape 14 - Sélection d'un fichier de savoir-faire**

6. Lorsque les types de sortie apparaissent, faire une sélection du type de sorties désirées (Voir Figure 5.19).
7. Appuyer sur le bouton « Load values » pour lire les paramètres de sortie du type.

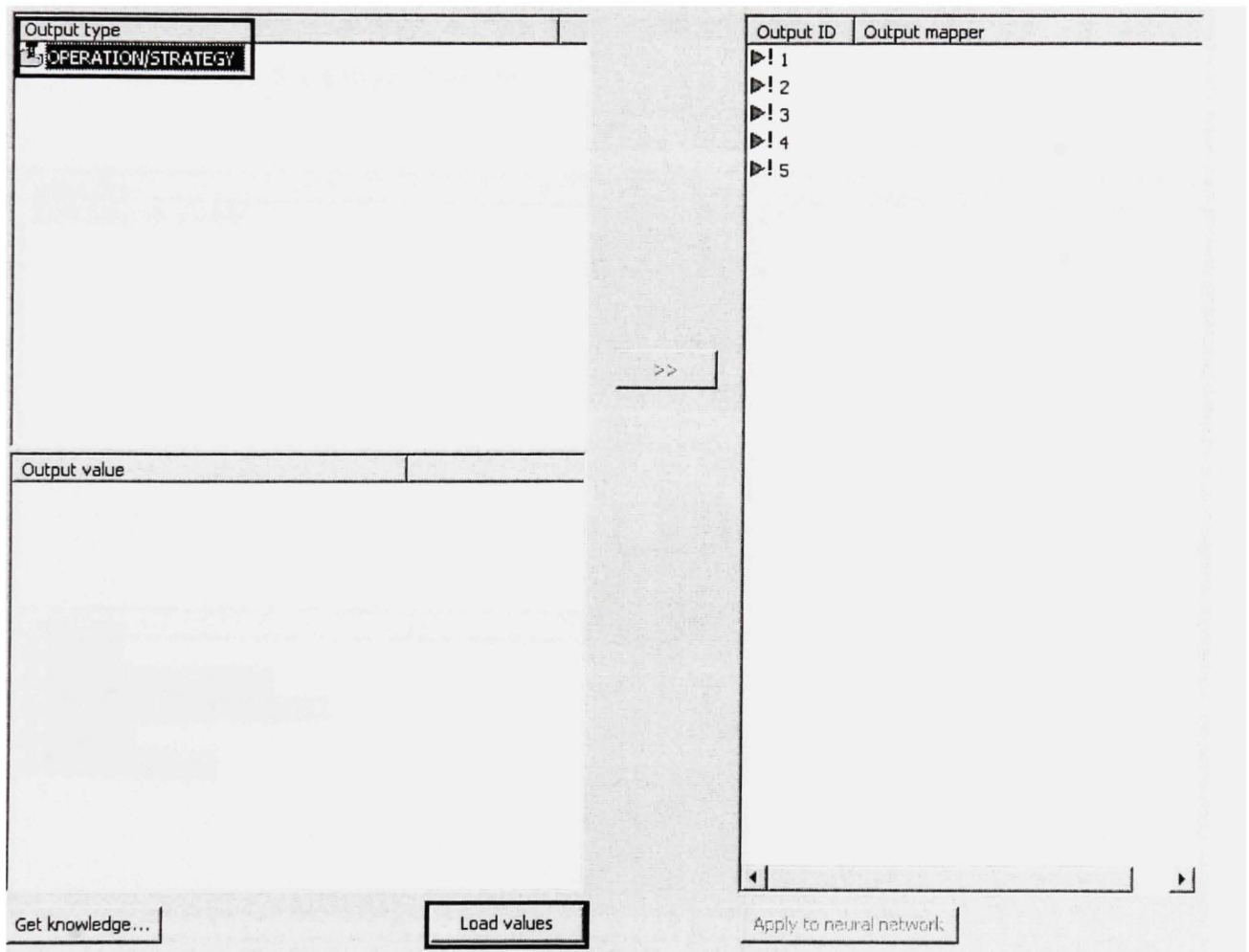


Figure 5.19 Étape 15 - Sélection du type de sortie

8. Lorsque les réponses possibles du savoir-faire apparaissent, faire une multi-sélection des réponses désirées. Garder enfoncer CTRL sur le clavier et cliquer avec le bouton gauche de la souris (*Voir Figure 5.20*).
9. Sélectionner autant de paramètres qu'il y a de neurones sur la couche de sortie.
10. Appuyer sur le bouton « >> » pour transférer ces paramètres vers les neurones numérotées des entrées à droite.

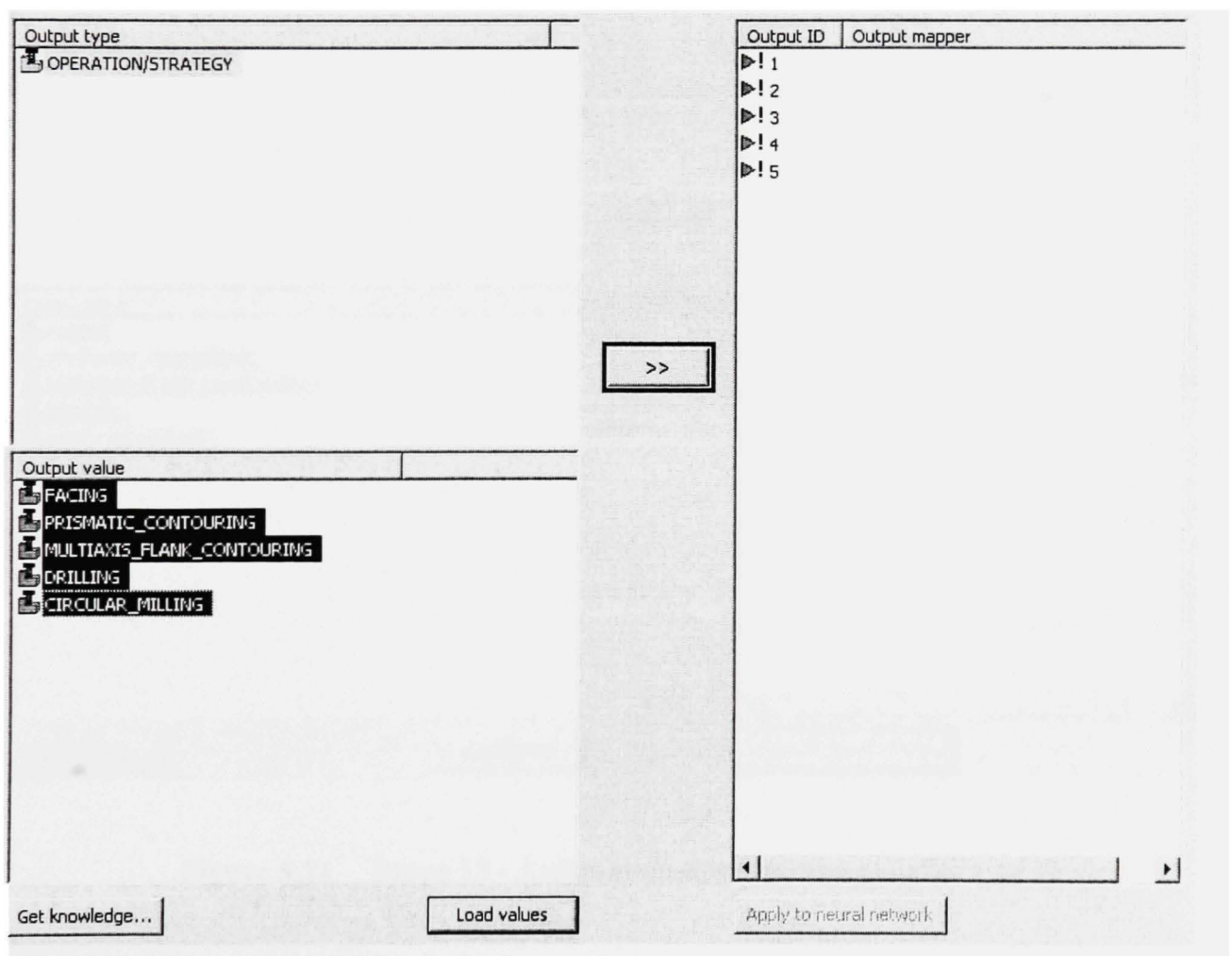


Figure 5.20 Étape 16 - Multi-sélection des réponses possibles

11. Lorsque les réponses (paramètres de sortie) sont bien définies, appuyer sur le bouton « Apply to neural network » pour assigner ces paramètres au réseau de neurones (Voir Figure 5.21).

Output ID	Output mapper
▶! 1	FACING
▶! 2	PRISMATIC_CONTOURING
▶! 3	MULTIAXIS_FLANK_CONTOURING
▶! 4	DRILLING
▶! 5	CIRCULAR_MILLING

Figure 5.21 Étape 17 - Assignment des réponses possibles au réseau

5.3.2.2 Entraînement du réseau de neurones

1. Sélectionner l'attribut « Training » et double-cliquer sur celui-ci pour accéder au dialogue d'entraînement (*Voir Figure 5.22*).

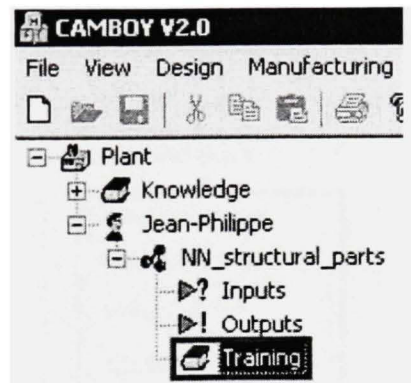
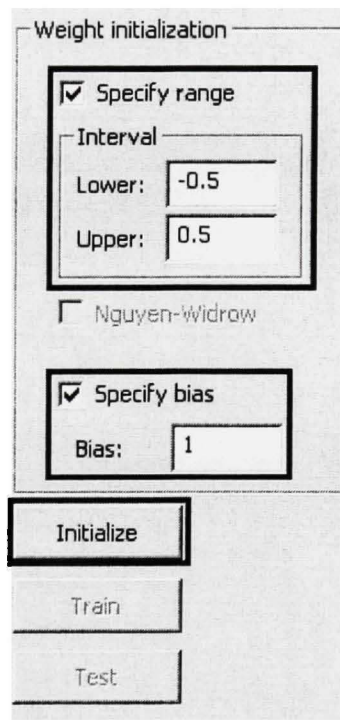


Figure 5.22 Étape 18 - Sélection de l'entraînement

5.3.2.2.1 Initialisation des poids du réseau de neurones

1. Modification des paramètres d'initialisation du réseau de neurones (*Voir Figure 5.23*)
 - Spécifier une plage d'initialisation des poids
 - Spécifier le poids des polarisations
2. Appuyer sur « Initialize » lorsque l'initialisation est bien configurée.



The image shows a 'Weight initialization' dialog box. It has a title bar 'Weight initialization'. Inside, there are two main sections. The first section is titled 'Specify range' and is checked. It contains an 'Interval' group box with 'Lower' set to '-0.5' and 'Upper' set to '0.5'. Below this is an unchecked checkbox for 'Nguyen-Widrow'. The second section is titled 'Specify bias' and is also checked. It contains a 'Bias' field set to '1'. At the bottom of the dialog are three buttons: 'Initialize', 'Train', and 'Test'. The 'Initialize' button is highlighted with a thick black border.

Figure 5.23 Étape 19 - Configuration de l'initialisation

5.3.2.2.2 Apprentissage du réseau de neurones

1. Modification des paramètres d'entraînement du réseau de neurones (*Voir Figure 5.24*)

- Définir le taux d'apprentissage « Learning rate »
- Définir le nombre d'époque « Epoch »
- Définir l'intervalle de la fonction d'activation
- Cocher « Use backpropagation » pour utiliser l'algorithme de rétro-propagation lors de l'entraînement

The image shows two overlapping windows from a software interface. The top window, titled 'Training', contains the following settings: 'Learning rate' is set to 0.01, 'Epoch' is set to 100, 'Use backpropagation' is checked, 'Include subfolders' is checked, and 'Calculate input impact' is unchecked. The bottom window, titled 'Activation function', shows four radio button options: 'From input range' (unchecked), 'Binary range' (checked), 'Bipolar range' (unchecked), and 'Specify range' (unchecked). Below these options, the 'Lower' value is set to 0 and the 'Upper' value is set to 1.

Figure 5.24 Étape 20 - Configuration de l'entraînement

2. Spécifier le répertoire principal contenant les caractéristiques de forme d'entraînement.
3. Cocher « Include subfolders » pour étendre l'entraînement avec les sous-dossiers du répertoire principal.
4. Appuyer sur « Train » lorsque les paramètres de l'apprentissage sont bien configurés pour démarrer l'entraînement (Voir Figure 5.25).

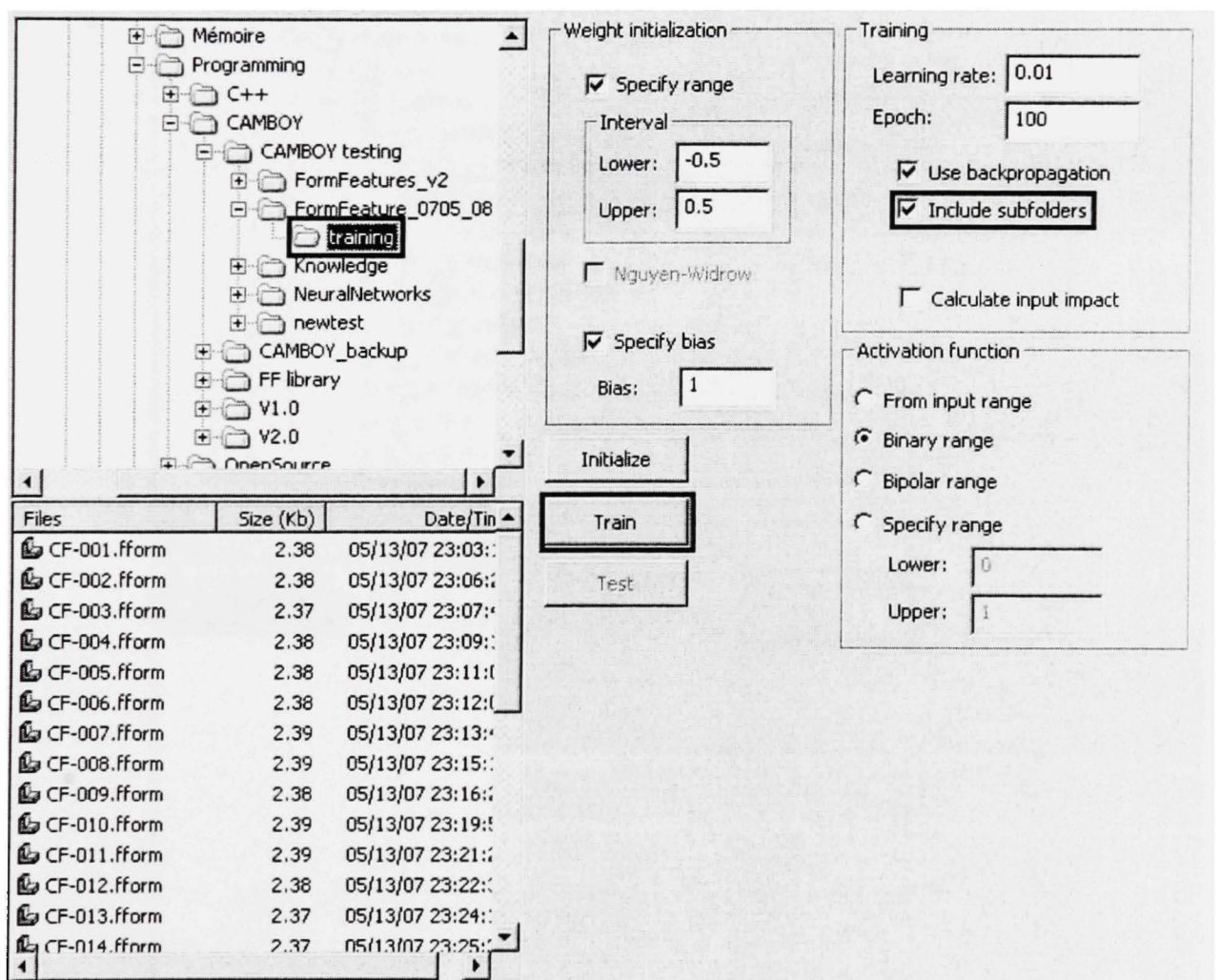


Figure 5.25 Étape 21 - Entraînement du réseau de neurones

5.3.2.3 Essai du réseau de neurones

1. Spécifier le répertoire contenant les caractéristiques de forme pour le test de reconnaissance du réseau de neurones (*Voir Figure 5.26*).
2. Sélectionner une caractéristique de forme.
3. Appuyer sur « Test » pour calculer la réponse du réseau de neurones.

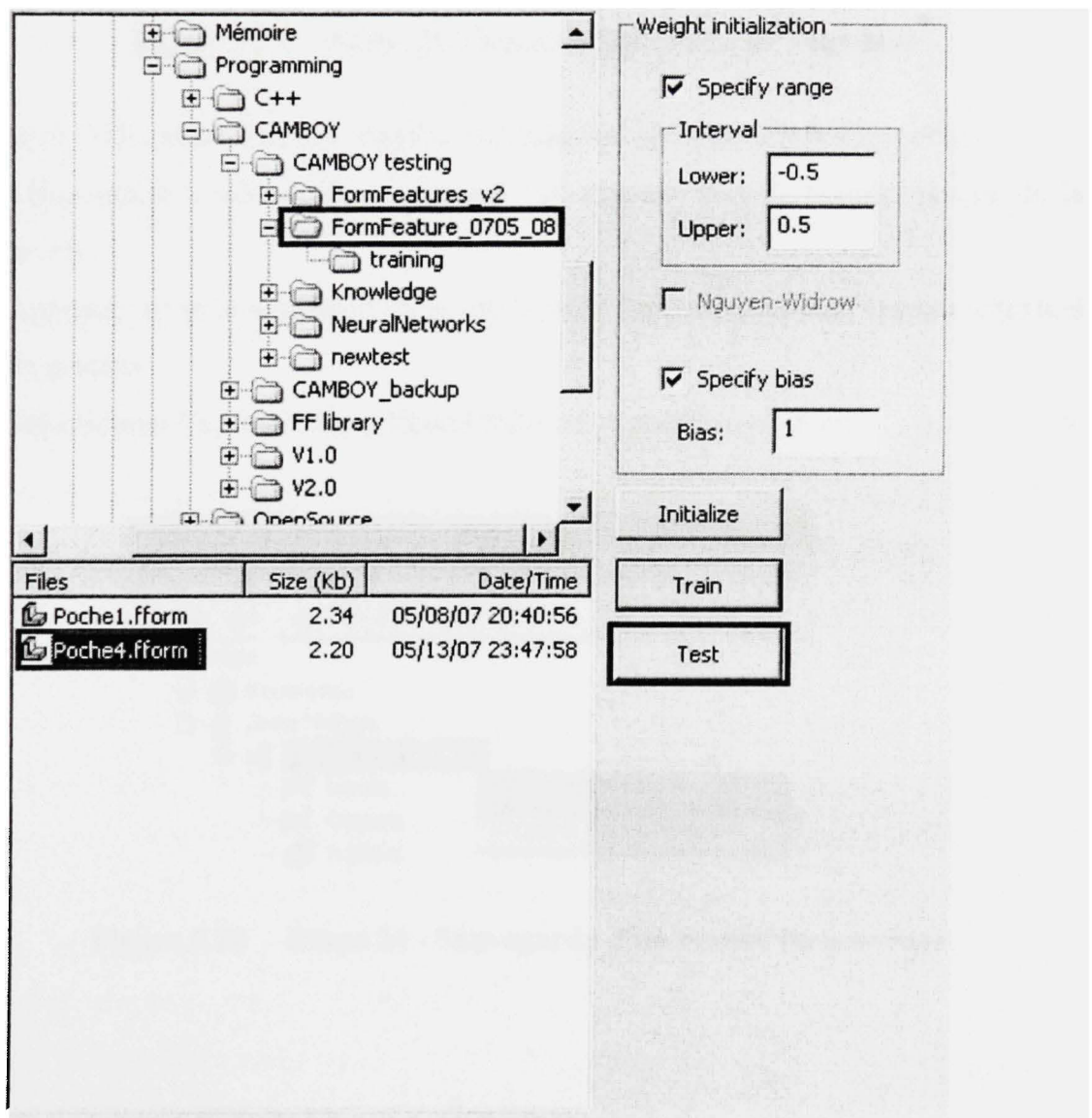


Figure 5.26 Étape 22 - Sélection d'une caractéristique de forme « test »

4. Les résultats sont disponibles dans la fenêtre en bas à gauche. (Voir Figure 5.27) Le réseau de neurones donne la stratégie d'usinage avec le meilleur niveau de confiance.



Figure 5.27 Étape 23 - Réponse du réseau de neurones

5. Lorsque l'utilisateur veut sauvegarder un réseau de neurones (Voir Figure 5.28) :
- Sélectionner le réseau de neurones à sauvegarder avec le bouton gauche de la souris.
 - Appuyer sur le bouton droit de la souris pour faire apparaître un menu contextuel de gestion.
 - Sélectionner l'option « Save Neural Network » pour sauvegarder.

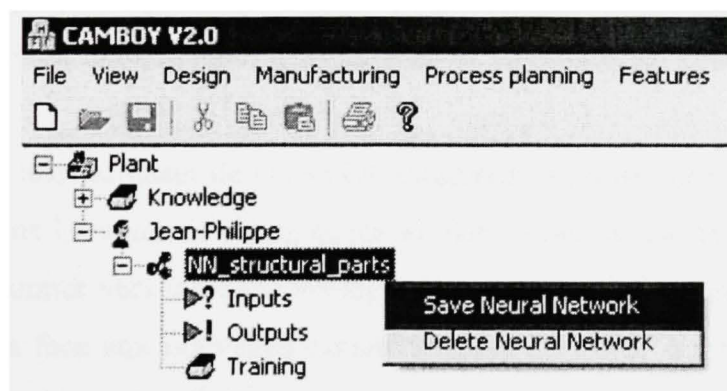


Figure 5.28 Étape 24 - Sauvegarde d'un réseau de neurones

5.4 Résultats

5.4.1 Reconnaissance de stratégies d'usinage

Pour chaque test, le réseau de neurones produit une matrice de niveau de confiance associée à chaque stratégie d'usinage. Grâce au niveau de confiance des résultats, l'utilisateur peut obtenir une meilleure interprétation pour savoir si la stratégie d'usinage correspondante est reconnue correctement par le réseau de neurones. De plus, avec ce niveau de confiance, il peut comparer la stratégie d'usinage « gagnante » avec les autres niveaux de confiance. Cette comparaison permet d'établir si le réseau de neurones prône plusieurs stratégies d'usinage pour cette même caractéristique de forme. Ainsi, la plupart du temps, une forme peut être usinée à partir de plusieurs stratégies d'usinage et le réseau permet de proposer une gamme de solutions plutôt qu'une seule.

Un autre avantage des réseaux de neurones est le fait que le niveau de confiance d'une stratégie d'usinage proposée peut être trop bas pour l'utilisateur. Donc, il peut fixer un seuil de confiance pour éviter des stratégies d'usinage ayant peu d'attraits pour le réseau.

Avec de nombreux tests utilisant de nouvelles caractéristiques de forme (c'est-à-dire que le réseau de neurones ne les a jamais vues), ce travail dénote une bonne association des réseaux de neurones pour pointer vers la bonne stratégie d'usinage, mais le réseau possède toutefois certaines limitations face aux nouvelles caractéristiques de forme qui peuvent contenir des paramètres qui pourraient mener à d'autres stratégies d'usinage. Rien n'empêche l'utilisateur d'intégrer les caractéristiques de forme qui sont difficiles à reconnaître correctement dans la base de données d'entraînement. Cependant, dans le cadre de reconnaissance de stratégies d'usinage dans le domaine aéronautique pour les pièces structurales, le réseau de neurones atteint les objectifs initiaux.

5.4.2 Influence des paramètres de caractéristiques de forme

Avec cet outil de validation, l'utilisateur peut obtenir de bons résultats avec certains paramètres de caractéristiques de forme influents. On peut observer que certains paramètres topologiques et géométriques de la caractéristique de forme ont beaucoup d'influence sur le niveau de confiance alors que d'autres en ont très peu. Ainsi ceux qui ont très peu d'influence sur le réseau de neurones peuvent être mis à l'écart pour améliorer les performances.

Cependant, il devient très difficile d'évaluer la performance de certains paramètres puisqu'il est presque impossible de prédire leur influence à travers un réseau de neurones. Certains paramètres peuvent avoir très peu d'influence sur la convergence d'une certaine stratégie d'usinage alors que dans d'autres cas, elles ont un effet important. Cette situation est fortement non-linéaire et difficile à classer immédiatement. Il faut donc procéder à de nombreux tests pour obtenir des résultats convenables. Certains paramètres peuvent être supprimés immédiatement parce qu'ils demeurent invariants pour toutes les caractéristiques de forme, par exemple :

- Unité de mesure
- Module de Young
- Densité volumétrique
- Etc.

Ce travail se concentre sur le développement d'une méthodologie pour sélectionner des stratégies d'usinage à partir de caractéristiques de forme. Ce travail démontre également qu'avec certains paramètres et une architecture de réseau proposés, il est possible reconnaître des stratégies d'usinage pour les pièces structurales. La recherche sur les paramètres topologiques, géométriques ayant de l'influence est un sujet vaste qui demande un effort considérable.

5.5 Conclusion

Ce travail propose un outil de validation pour alimenter et effectuer avec facilité les recherches en reconnaissance de forme avec des réseaux de neurones dans le domaine du de la PFAO. Cet outil informatique permet d'élaborer rapidement des réseaux de neurones paramétriques et de les entraîner efficacement.

Puisque la recherche en PFAO avec les réseaux de neurones est encore au niveau « d'essai et d'erreur », le but de cet outil de validation est de permettre d'essayer, et de comparer très rapidement plusieurs configurations, paramètres d'entraînement, etc. de réseaux de neurones MLP avec la permission de modifier également les types d'entrées lues et les types de sorties désirées.

Dans ce chapitre, ce travail discute de l'architecture générique de cet outil et de ses sections majeures : la création d'un réseau de neurone, son entraînement et sa période de test avec de nouvelles caractéristiques de forme. Il propose ensuite un exemple d'utilisation pour aider le lecteur désireux de s'en servir.

CONCLUSION

Dans le domaine manufacturier de l'aéronautique et en considérant le contexte de mondialisation, l'amélioration du transfert d'information dans la PFAO offre de nombreux atouts aux entreprises. Durant ce transfert, une technique d'intelligence artificielle peut être considérée puisque la reconnaissance de caractéristiques d'usinage ou de stratégies d'usinage demande l'utilisation d'un système de reconnaissance de forme qui est fastidieuse et/ou onéreuse pour des systèmes informatiques conventionnels et linéaires. Étant l'une de ces techniques des plus populaires, les réseaux de neurones offrent de nombreux avantages dans ce domaine pour améliorer la reconnaissance de caractéristiques de forme, issues de modèles B - REP, en stratégies d'usinage. Ces stratégies d'usinage pourront par la suite être utilisées pour construire une séquence d'usinage.

Ce travail a fait un survol des limites actuelles des systèmes PFAO et CFAO actuels et de certains articles sur l'exploration des réseaux de neurones comme technique pour reconnaître des caractéristiques d'usinage à partir de modèles CAO. Il a aussi discuté des gammes typiques de l'usinage de pièces structurelles en aéronautique. Il a ensuite présenté un exposé sur les étapes de l'analyse globale d'usinage et son exploitation avec un système informatique. Le projet de ce travail consiste justement à l'élaboration et la validation de l'une de ces étapes d'analyse globale d'usinage.

Le travail propose des modèles permettant de définir par la suite la méthodologie. Les réseaux de neurones appartiennent à une technique d'intelligence artificielle qui peut prendre plusieurs formes et plusieurs sortes d'architecture. La forme la plus utilisée est, sans aucun doute, les réseaux de neurones MLP avec algorithme de rétro propagation. Cette forme exploite le principe d'entraînement du réseau pour améliorer sa performance de façon drastique. De plus les réseaux MLP offrent une excellente résistance aux bruits, c'est-à-dire les entrées ayant des paramètres pouvant brimer la convergence du réseau vers une sortie désirée.

Dans le même ordre d'idée, le travail se penche sur la modélisation des entrées du réseau de neurones, les caractéristiques de forme. Ces caractéristiques sont extraites à partir d'un modèle B-REP à partir du principe de [Deneux, 1993] puis finalement, pour chaque caractéristique est extraite une certaine quantité d'information numérique de type topologique, géométrique et technologique comme par exemple le nombre de d'arêtes droites dans la caractéristique de forme. Ces paramètres numériques forment les entrées du réseau de neurones. Une autre modélisation est exposée, la définition de stratégies d'usinage applicables pour les pièces structurelles. Ces stratégies sont les réponses désirées du réseau de neurones et elles sont tirées des systèmes FAO qui dictent les méthodes pour créer un usinage pour une caractéristique de forme donnée.

Finalement, le travail propose un outil de validation pour effectuer des tests avec les réseaux de neurones MLP dans le domaine de la reconnaissance de stratégies d'usinage à partir de paramètres. Cet outil est construit en trois grandes parties : la création d'un réseau de neurones, son entraînement et sa période de test. En regardant ce test, ce mémoire peut conclure que la méthode des réseaux de neurones a le potentiel de devenir un élément important d'une assistance informatique pour générer des gammes d'usinage à partir de format B-REP pour la prochaine génération de système CAO/FAO.

Perspectives futures

Ce travail dénote plusieurs perspectives futures pour la continuité de ce projet. Le projet s'est concentré sur une méthodologie pour la reconnaissance de forme dite locale, c'est-à-dire, individuelle pour chaque forme contenue dans une pièce. Il serait intéressant d'effectuer une autre reconnaissance de forme dite globale, qui prendrait compte de toutes les stratégies d'usinage reconnues dans la pièce et dicterait par la suite une approche optimale pour fabriquer cette pièce. Cette approche permettrait de tenir compte des contraintes d'antériorité (une forme peut exister si et seulement si une autre forme vient d'être produite) de la pièce et d'assurer l'optimisation de la mise en position (setup) initiale de la pièce sur la machine-outil.

Une autre avenue intéressante est d'automatiser le processus d'extraction des paramètres numériques à partir des caractéristiques de forme. Ce processus lirait la caractéristique de forme et donnerait, avec l'aide d'un ensemble de règles, les valeurs topologiques et géométriques correspondantes.

Cette automatisation permettrait d'intégrer plusieurs modules de transfert CAO/FAO ensemble. Comme par exemple, le module d'extraction des caractéristiques de formes à partir de modèle B-REP (basé sur le principe d'angle matière) pourrait acheminer les caractéristiques de forme extraites au module d'extraction des paramètres dont celui-ci pourrait acheminer également les paramètres aux réseaux de neurones qui pointerait vers les caractéristiques d'usinage correspondantes. Le système FAO utilisé pourrait ensuite, au moyen de scripts, recréer la séquence des opérations. Cette automatisation optimale réduirait le temps de création de la session FAO et une réutilisation de l'information, déjà disponible dans le domaine CAO, ainsi qu'une normalisation des méthodes de programmation.

ANNEXES I

RÉSEAUX DE NEURONES

Introduction

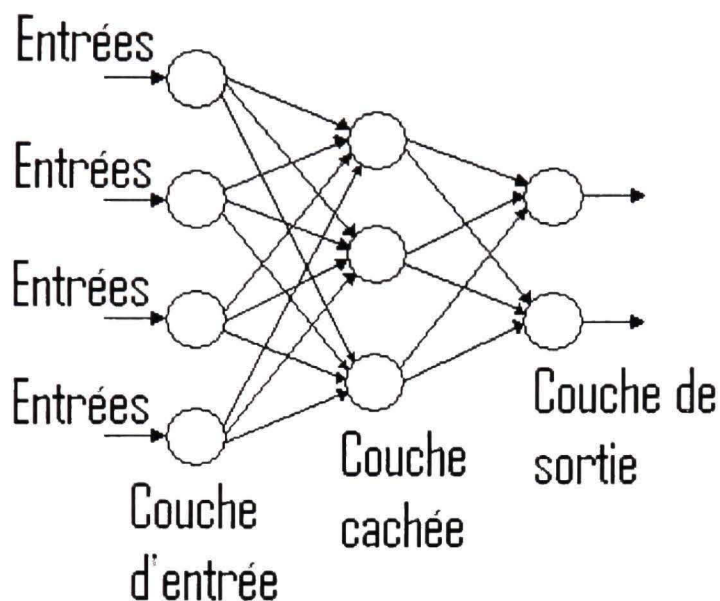
La programmation conventionnelle d'un outil informatique requérant une interprétation intelligente s'avère une tâche extrêmement fastidieuse et onéreuse voire impossible puisqu'elle n'est aucunement flexible. Par contre, la programmation avec intelligence artificielle semble être tout à fait désignée pour approcher ce problème. Plusieurs techniques d'intelligence artificielle peuvent être utilisées. Dans l'optique du travail, l'objectif principal met l'emphasis sur l'exploitation des réseaux de neurones artificiels comme technique d'intelligence artificielle.

Définitions et terminologie

Définitions

Les réseaux de neurones artificiels sont une technique et même, un domaine en soi, d'intelligence artificielle d'envergure. Selon [Fausett, 1994] ainsi que [Stergiou C., Siganos D., 1996], l'étude des réseaux de neurones peut se résumer en une tentative mathématique d'approcher la fonctionnalité d'un cerveau humain. Les réseaux de neurones sont des systèmes numériques imitant le processus de résolution de problème du cerveau humain. Un réseau de neurones est composé d'une multitude d'unités de traitement parallèle alors que la fonction mathématique globale du réseau est principalement déterminée par un schéma de connectivité. Ces systèmes offrent des fonctions mathématiques de très haut niveau permettant ainsi d'obtenir des comportements similaires à l'apprentissage (adaptation du réseau). Ainsi, les réseaux de neurones ont été inspirés par le système nerveux biologique humain (et animal) et les théories mathématiques d'apprentissage et de traitement d'information. Un réseau de neurones peut, de façon analogique, être comparé à boîte noire qui lit en entrée une série numérique pour en sortir une autre série de chiffres définissant la réponse. Donc, un réseau est, en quelque sorte, une gigantesque équation non-linéaire.

Plusieurs termes communs sont utilisés dans le domaine des réseaux de neurones artificiels. Ce mémoire en dénombre quelques-uns dont l'importance est capitale. L'architecture d'un réseau de neurones est simplifiée dans la représentation schématique ci-dessous.



Les **entrées** et les **sorties** sont des termes couramment utilisés. Les entrées définissent une matrice de valeurs numériques que le réseau de neurones utilise pour alimenter la première couche de neurones. Ce tableau, à une dimension, contenant de valeurs numériques est caractérisé par une grandeur égale au nombre d'entrées définissant ce réseau. Ces valeurs numériques sont préalablement puisées à partir d'une source externe, dans ce cas échéant, les caractéristiques de forme précédemment extraites du format CAO neutre de type B-REP.

$$\begin{bmatrix} 0.3468 \\ 0.9677 \\ 0.0391 \\ 0.0983 \\ \dots \end{bmatrix}$$

Les **poids** entre neurones sont un concept important en réseau de neurones. De façon abstraite, ils offrent un moyen de quantifier la force qui existe entre deux neurones. Pendant un entraînement, ces liens s'ajustent pour améliorer la performance du réseau. La plupart du

temps, les liaisons d'un neurone sont arrangés en cascade, c'est-à-dire qu'un neurone sera lié, en utilisant un poids, avec toutes les neurones de la couche successive.

$$\delta = (t_k - y_k) f'(y_{in_k})$$

$$\Delta w_{jk} = \alpha \delta_k z_j$$

$$\Delta w_{0k} = \alpha \delta_k$$

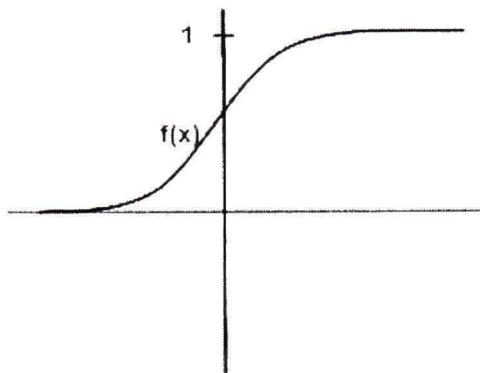
L'entraînement est un terme pour désigner le processus itératif de calcul des sorties et d'ajustement des poids des neurones. L'ajustement des poids, nommé la rétro-propagation, est calculé en fonction de la différence entre les sorties désirées et les sorties obtenus par calcul. Cette rétro-propagation est effectué en propageant la différence des sorties à travers les poids des couches précédentes de neurones.

L'architecture demeure un terme primordial dans le domaine des réseaux de neurones. Elle permet de définir la combinaison des neurones et leurs liaisons potentielles. Par exemple, une architecture 50 x 35 x 10 signifie un réseau de neurones composé de trois couches, la première couche est la couche des entrées (le réseau prend 50 valeurs numériques), la deuxième est la couche cachée, contenant 35 neurones et la dernière couche est la couche des sorties (le réseau donne 10 réponses).

Le **niveau de confiance** est attribué aux neurones de sorties. Cette désignation qualifie le niveau de convergence du neurone de sortie (un pourcentage de confiance de ce neurone). Un neurone de sortie qui possède une valeur près de 1 est un neurone qui possède un niveau de confiance élevé. Parmi tous les neurones de sortie, celui qui possède le niveau de confiance le plus élevé sera interprété comme étant la réponse du système.

La **fonction d'activation** du réseau de neurones est un concept important. Chaque neurone du réseau est affecté par son propre état interne soit, sa fonction d'activation. Cette fonction tente d'émuler le comportement électrique de sortie d'un vrai neurone qui reçoit un signal

externe. Sa réponse dépend (0 ou 1) de sa fonction d'activation. Les neurones de sortie et ceux dans les couches cachées donnent toujours des réponses entre 0 et 1 puisque la fonction d'activation est la sigmoïde binaire.



$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Nomenclature

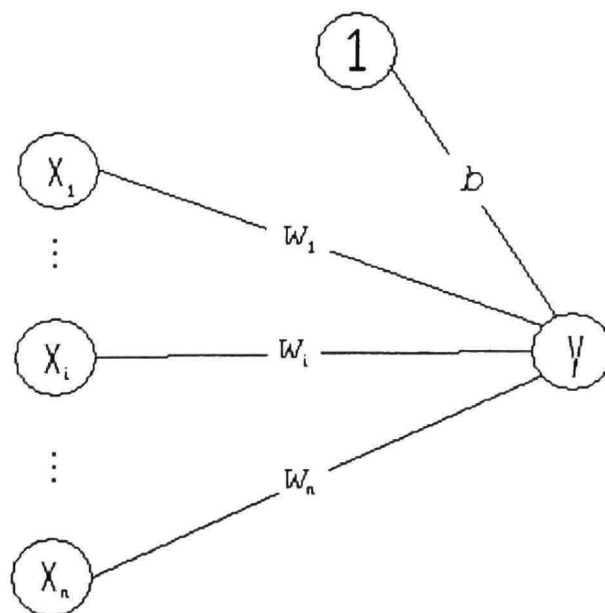
Symbole	Description
x	Matrice d'entrées $x = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$
t	Matrice de sorties $t = (t_1, \dots, t_k, \dots, x_m)$
δ_k	Ajustement de poids pour w_{jk} causé par l'erreur de sortie du neurone Y_k
δ_j	Ajustement de poids pour v_{ij} causé par l'algorithme de rétro-propagation Z_j
α	Taux d'apprentissage
X_i	Neurone d'entrée i
v_{0j}	Seuil du neurone de couche cachée j
Z_j	Neurone de couche cachée j
w_{0k}	Neurone de seuil de couche de sortie Y_k
Y_k	Neurone de couche de sortie k

Types de réseaux de neurones et leurs applications

La famille des réseaux de neurones est composée d'une multitude de combinaisons et d'architectures possibles. Étant concerné par le niveau de faisabilité et la divergence des architectures et combinaisons, ce mémoire porte son attention sur un type en particulier, soit les perceptrons multicouches avec rétro-propagation. Voici quelques-uns des plus populaires :

Perceptron simple

Le perceptron simple est la forme la plus simpliste. Il contient une couche d'entrée et un unique neurone de sortie. Il peut aussi contenir un neurone de polarisation (ou de seuil) qui ajuste les sorties en conséquences, sans être affecté par les fonctions d'activations. Ce type de réseau peut être utilisé dans filtrage de signaux électriques simples. Du à sa forme simple et limitative au niveau des équations non-linéaires à traiter, ce réseau est peu utilisé.

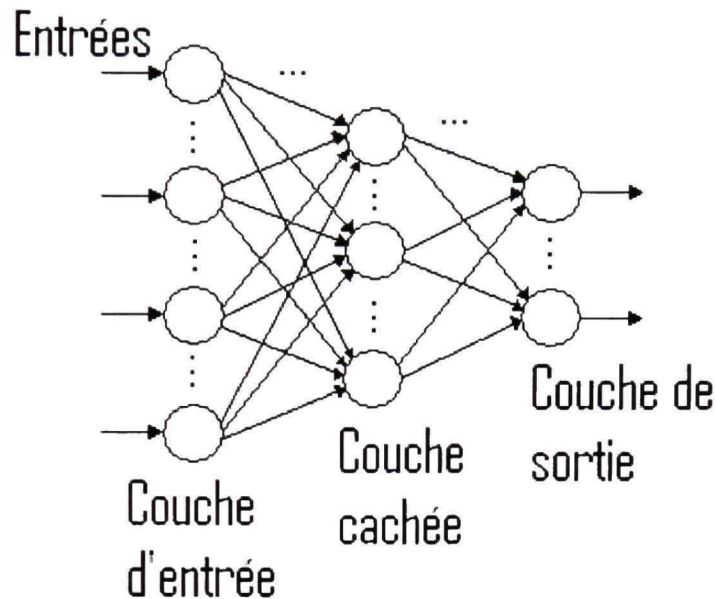


Perceptron multicouche

Les perceptrons, disposés en plusieurs couches superposées, forment un amalgame qui possède de bien meilleures possibilités en termes de généralisation. Les MLP sont composés au moins d'une couche d'entrée et une couche de sortie ainsi qu'une ou plusieurs couches dites « cachées ». Ces couches cachées offrent une capacité de généralisation intéressante, elles permettent l'interprétation avec succès de problématique non-linéaire et difficilement réalisable sur un réseau de neurones de type perceptron simple.

Le nombre de neurones par couche cachée peut avoir un impact décisif sur la capacité de généralisation d'un réseau de neurones. Selon [Dereli, 1998], il n'existe aucune théorie assez solides permettant d'expliquer un nombre optimal de neurones pour les couches cachées. Tester des architectures et les configurations possibles pour un MLP demeurent encore le meilleur moyen pour obtenir les résultats voulus. Par contre, le nombre de couches cachées peut être aussi un facteur déterminant dans la performance des résultats.

Pour les réseaux de neurones de type MLP, la fonction d'activation doit être une fonction continue, de type sigmoïde qui offre d'excellents résultats et de bons temps de calculs.



Réseau BAM

Les réseaux BAM, Bidirectionnal Associative Memory, offre une matrice de deux couches de neurones (les X et les Y) connecté de façon directionnelle (entre les X et les Y seulement). Cette fonctionnalité permet à ce réseau de s'ajuster et de donner des réponses avec des entrées dans n'importe quelles des deux couches X ou Y.

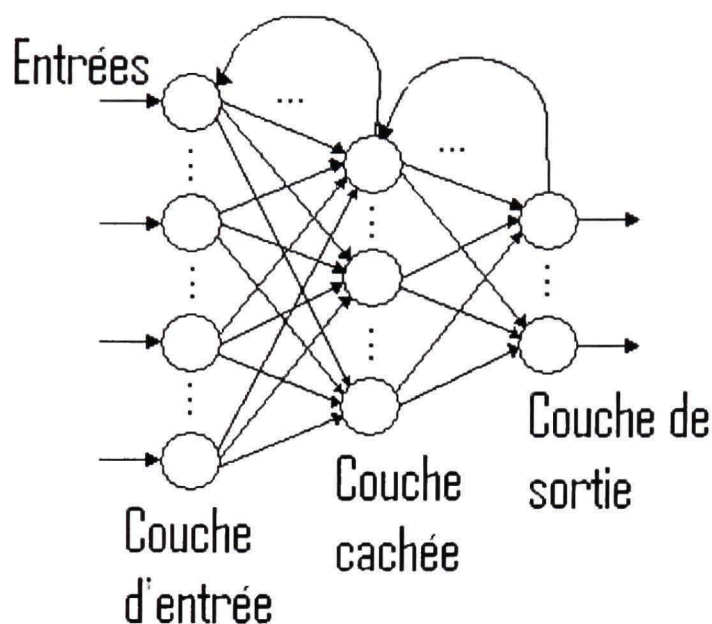
Ces réseaux utilisent des entrées numériques de type bipolaires, c'est-à-dire des entrées se limitant à -1 et 1. Puisque les caractéristiques de forme contiennent des valeurs numériques ayant plusieurs types de valeurs comme par exemple, la dimension d'une arête en millimètre peut donner une valeur de 50. Donc, ce mémoire n'a pas concentré ses efforts vers ce type de réseau de neurones.

MLP avec rétro-propagation

Les perceptrons multicouches sont les réseaux de neurones les plus populaires. Alliés avec l'algorithme de rétro-propagation, ces réseaux offrent des résultats fantastiques, une bonne capacité de généralisation ainsi qu'une résilience impressionnante avec le traitement des données contenant des erreurs. Cette dernière caractéristique s'avère être la pierre angulaire des réseaux de neurones pour la reconnaissance des caractéristiques de forme en stratégies d'usinage ou en caractéristiques d'usinage.

L'architecture est identique aux réseaux de neurones de type MLP. La seule différence se trouve au niveau de l'algorithme d'apprentissage du réseau. Cet algorithme, combiné avec un apprentissage supervisé, ajuste les poids des connexions entre neurones. L'ajustement de ces poids est proportionnel aux différences entre les sorties obtenues et les sorties désirées.

Un apprentissage supervisé repose sur le concept de comparaison des sorties. Un apprentissage supervisé compare les sorties désirées avec celles obtenues dans le calcul d'ajustement des poids. L'avantage avec la rétro-propagation, c'est justement sa capacité d'apprentissage avec un entraînement supervisé, c'est-à-dire un ensemble d'entrées pour qui elles possèdent les sorties correspondantes.



Définition de la technique générique de reconnaissance de forme

La reconnaissance de forme est une technique couramment utilisée en intelligence artificielle dans le but d'automatiser un procédé qui demande une interprétation face à une situation spécifique. Avec les réseaux de neurones, il y a de nombreuses applications possibles pour reconnaître différents types de formes. Dans le cadre de ce mémoire, les formes à reconnaître sont des stratégies d'usinage à partir des caractéristiques de forme. Le domaine de la reconnaissance de forme est dédié à la détection de patrons (formes régulières) à travers une panoplie de patrons irréguliers. Inconsciemment, le cerveau humain fonctionne souvent à tenter de « reconnaître des formes », c'est-à-dire de chercher à classifier quelque chose dans une catégorie reconnue par lui-même.

Par exemple, une application couramment utilisée avec les réseaux de neurones est la reconnaissance de lettres manuscrites. La reconnaissance de caractères écrits est un problème très complexe voire impossible à traiter avec les systèmes logiques et séquentiels car les entrées peuvent diverger énormément (évidemment, chaque personne écrit de manière différente). Ces divergences provoquent une non-linéarité importante dans la fonction mathématique d'association. Par contre, un réseau de neurones est très permissif, accepte

une importante marge de bruit (données floues) et s'adapte au besoin, des atouts intéressants, ou plutôt essentiels, pour ce type d'application en automatisme.

Lettre « A »

La première étape consiste à numériser l'entrée de façon cohérente. Cet exemple propose comme hypothèse de prendre les pixels ayant deux états possibles : soit blanc ou noir. La seconde hypothèse propose des valeurs numériques pour ces états de pixels, puisque le réseau de neurones nécessite des valeurs numériques pour fonctionner. Par exemple :

X = 1.0

O = -1.0

@ = 0.0

Avec une lettre majuscule « A » manuscrite comme celle-ci, la numérisation de cette lettre

```

○○○○○x○○○○○
○○○○xxx○○○○
○○○xx○xx○○○
○○xx○○○xx○○
○xxxxxxxxxx○
xx○○○○○○○xx

```

devient :

$$\begin{bmatrix} -1.0 \\ -1.0 \\ -1.0 \\ -1.0 \\ -1.0 \\ 1.0 \\ -1.0 \\ -1.0 \\ -1.0 \\ -1.0 \\ \dots \end{bmatrix}$$

Figure 8 Exemple des lettres reconnues

○○@○○**x**○○@@○
 ○○○○@**x**@@○○○
 ○○○@**x**○**xx**○○○
 ○○@@@○○**xx**○○
 ○**xx**@@**xx**@@**x**○
xx○○○○@@@○**x**

devient :

$$\begin{bmatrix} -1.0 \\ -1.0 \\ 0.0 \\ -1.0 \\ -1.0 \\ 1.0 \\ -1.0 \\ -1.0 \\ 0.0 \\ 0.0 \\ -1.0 \\ \dots \end{bmatrix}$$

Figure 8 Exemple de lettre contenant du bruit

Le plus grand défi dans les étapes de la reconnaissance de forme demeure toujours la stratégie utilisée pour la numérisation des entrées. Ces entrées sont, la plupart du temps, de nature abstraite ou complexe où il faut en puiser certains paramètres variants, les numériser pour finalement les donner en entrée au réseau de neurones.

La conception, l'entraînement et l'exécution des réseaux de neurones

Un réseau de neurones repose, la plupart du temps, sur le concept d'entraînement c'est-à-dire, qu'il doit adapter ses poids pour obtenir des résultats satisfaisants. Pour ce faire, la première étape de l'entraînement, dès que l'architecture du réseau de neurones est établie, l'utilisateur doit initialiser la totalité des poids du réseau. L'initialisation consiste à donner une valeur numérique prise dans une plage, généralement une plage entre -1 et 1, pour chaque liaison entre les neurones.

Ensuite, l'utilisateur peut procéder au lancement de l'entraînement itératif qui commence par lire des données d'entraînement. Ces données d'entraînement contiennent les entrées (une suite de valeurs numériques) ainsi que les sorties désirées correspondantes aux entrées. Avec les entrées et les poids ajustés aléatoirement lors de l'initialisation, le réseau calcule les sorties obtenues et calcule la différence entre les valeurs obtenues et valeurs désirées. Le réseau peut ainsi procéder à l'accumulation de ces différences entre liaisons. Ces différences sont ensuite appliquées, communément appelé la rétro-propagation, sur l'ensemble des liaisons du réseau de neurones

Habituellement, le réseau de neurones applique la rétro-propagation à la fin d'une époque seulement, c'est-à-dire uniquement lorsque le réseau vient de compléter la lecture et le calcul de toutes les données d'entraînement. C'est seulement par la suite que l'ajustement des poids se produit sur l'ensemble des liaisons neuroniques. Ce processus est dit itératif, donc s'entraîne durant plusieurs époques avant d'obtenir des résultats satisfaisants. Un résultat satisfaisant peut se dénoter comme un réseau de neurones calculant des sorties qui possèdent une différence inférieure à une tolérance spécifiée par l'utilisateur.

Cependant, il est d'une importance capitale de noter le danger possible du surentraînement d'un réseau de neurones. Le surentraînement peut également être défini comme étant l'incapacité de généralisation du réseau et peut s'avérer néfaste pour les résultats, c'est-à-dire, les sorties. Le surentraînement peut être provoqué par une « sur-spécialisation » pour

un type, ou un ensemble, d'entrées et ainsi, il perd sa capacité d'interprétation face à des nouvelles entrées jamais traitées par le système. Fort heureusement, ce phénomène peut être freiné si l'architecture du réseau de neurones est bien conçue et surtout, si l'entraînement est appliqué de façon très contrôlée et ses performances sont monitorées durant chaque époque. Habituellement, la meilleure façon pour vérifier cet entraînement est de calculer la différence des moindres carrés et de la comparer à une valeur *epsilon*. Si cette dite valeur est plus grande que celle des moindres carrés, l'entraînement arrête. Malgré cet effort, il y a toujours un certain degré d'incertitude et d'imprédictibilité d'un réseau de neurones. Le meilleur moyen demeure encore, et toujours la méthode d'essai et d'erreur.

Après l'entraînement, l'algorithme de rétro-propagation n'est plus effectué. Ainsi, le réseau est prêt pour « tester » ces connaissances. La lecture des données est donc effectuée avec les neurones d'entrées et le calcul des neurones de sorties sont basés sur les nouveaux poids, ajustés durant l'entraînement. Chaque neurone de sortie donne une valeur numérique. Cette valeur numérique peut être interprétée pour obtenir les résultats.

Normalement, en reconnaissance de forme, le concepteur du réseau de neurones assigne un nombre de neurone de sortie qui reflète exactement le nombre de choix (de « patrons ») à reconnaître. Par la suite, la valeur numérique la plus grande (c'est-à-dire celle qui est supérieure aux autres) parmi les neurones de sorties permet d'associer ce neurone vers le patron correspondant. Le réseau de neurones converge ainsi vers une solution.

Avantages et inconvénients

[Dereli, 1998] propose une liste d'avantages et d'inconvénients qui cerne bien le milieu d'automatisation dans le domaine de la reconnaissance de caractéristiques d'usinage. L'avantage incontesté des réseaux de neurones artificiels s'avèrent être leur haut niveau de résistivité à l'erreur. Un programme conventionnel peut facilement tomber ou faillir à la tâche si le problème posé s'avérerait une problématique jamais entamée par ce programme.

Avantages :

- Les réseaux de neurones possèdent la capacité de généralisation d'un problème. À partir d'expériences passées, ils peuvent converger vers une solution même si le problème est considéré comme nouveau.
- Malgré leur apparence, les réseaux de neurones ont une structure simple puisqu'il nécessite seulement des entrées et des sorties.
- Les réseaux de neurones artificiels possèdent une excellente tolérance avec des entrées contenant des fautes ou des données manquantes. Cette caractéristique permet d'aborder une infinité de problèmes nouveaux.
- Les réseaux de neurones offrent des performances informatiques très intéressantes. Ces algorithmes sont de beaucoup plus petites tailles que les programmes conventionnels.
- Les neurones sont des éléments de calculs simples à comprendre, efficaces et performants puisqu'ils peuvent être placés dans une architecture en parallèle.

Malgré cette panoplie d'avantages notables, le domaine du réseau de neurones souffre de plusieurs lacunes. Ces désavantages, souvent d'ordre économique, limitent encore aujourd'hui le domaine des réseaux de neurones et celui de l'intelligence artificielle à trouver une place d'envergure dans les applications industrielles. Cependant, il y a une explosion

d'application en recherche scientifique avec les réseaux de neurones dans de nombreux domaines manufacturiers.

Inconvénients :

- Très demandant au niveau de la configuration. Se base encore sur la méthode « Essai et erreur »
- Représentation abstraite et difficile à interpréter.
- La convergence du réseau de neurones n'est jamais garantie
- Aucune théorie robuste disponible au niveau de la configuration optimale.

ANNEXE II

LA MODÉLISATION DES STRATÉGIES D'USINAGE

Introduction

Dans le quatrième chapitre, le mémoire porte son attention sur les entrées du réseau de neurones soit les caractéristiques de forme numérisées. Dans ce chapitre, le mémoire définit les sorties du réseau de neurones et discute sur l'interprétation des résultats. Il traite sur la définition d'une stratégie d'usinage et la définition d'une caractéristique d'usinage. Ensuite, il propose un exemple de classification des types de stratégies d'usinage. Finalement, il démontre les résultats avec des associations de stratégies d'usinage avec des caractéristiques de forme.

Le réseau de neurones calcule et donne une série de chiffres pour sortie. Dans cette série de chiffres, chaque chiffre correspond à une sortie, donc il y a autant de chiffres que de sorties pour le réseau de neurones. Avec cette matrice de chiffres, le réseau de neurones trouve tout simplement la valeur maximale de cette matrice. La valeur maximale dicte le neurone « gagnant ». Ainsi, le réseau converge ensuite vers une stratégie d'usinage correspondante. Chaque stratégie d'usinage est associée avec une sortie.

Définition d'une stratégie d'usinage

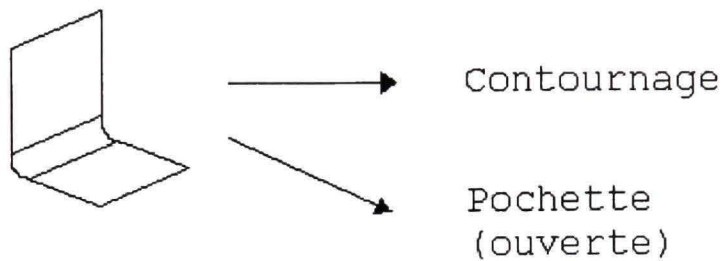
Dans un système FAO, une stratégie d'usinage est le type d'opération associé à une caractéristique de forme. La stratégie d'usinage peut être un mot ou une phrase désignant le type d'opération. (Perçage, par exemple) Une opération, dans un système FAO, est un ensemble d'information sur la géométrie de la caractéristique de forme, les paramètres d'usinage et l'outil utilisé. Cette information, lorsque compilée dans le système FAO génère un parcours d'outil qui pourra être généré en un fichier APT. Ainsi, une stratégie d'usinage peut être aussi qualifiée comme tout type d'opération du système FAO qui permet de produire une séquence APT. Évidemment, les stratégies d'usinage varient d'un système FAO à l'autre mais toutefois elles demeurent toujours similaires.

Exemple de commande APT

```
LOADTL/1
SPINDL/300,RPM,CLW
GOTO/1,2,3,0,0,1
```

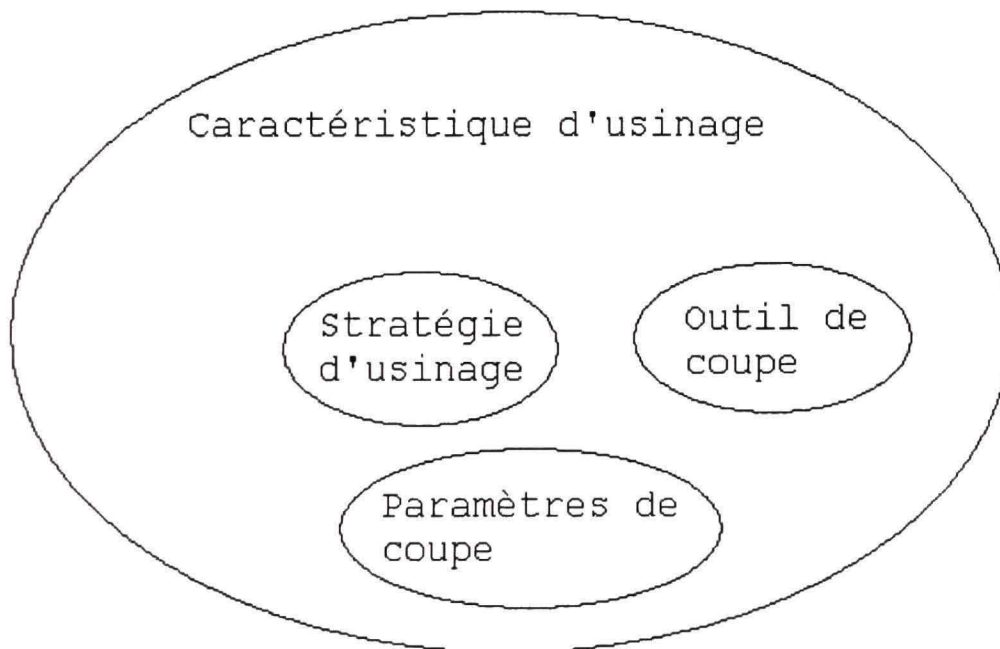
Il est important de noter qu'une caractéristique de forme n'est pas réalisable d'une seule stratégie d'usinage, elle peut résulter en plusieurs stratégies d'usinage. Par exemple, une caractéristique de forme composée d'une surface plane circulaire comme surface de contrôle et associée avec une surface cylindrique peut faire converger un réseau de neurones vers un perçage et une pochette circulaire. De plus, certaines caractéristiques de forme peuvent ne pas converger vers une stratégie d'usinage.

Réponses possibles
acceptables du système



Définition d'une caractéristique d'usinage

Selon [Shah, J.J., Mantyla, M.], une caractéristique d'usinage est un ensemble d'informations qui est auto-suffisant pour reproduire la caractéristique de forme conformément avec la méthode d'usinage proposée. Elle contient toute l'information sur la géométrie de la caractéristique de forme et toute l'information sur la méthode d'usinage employée soit : la stratégie d'usinage envisagée, le choix de l'outil, les paramètres de coupe, etc. Dans un futur proche, un système FAO pourra lire ces caractéristiques d'usinage et générera le code machine appropriée pour la machine, ou encore mieux, les caractéristiques d'usinage seront directement lues et interprétées par les contrôleurs numériques des machines.



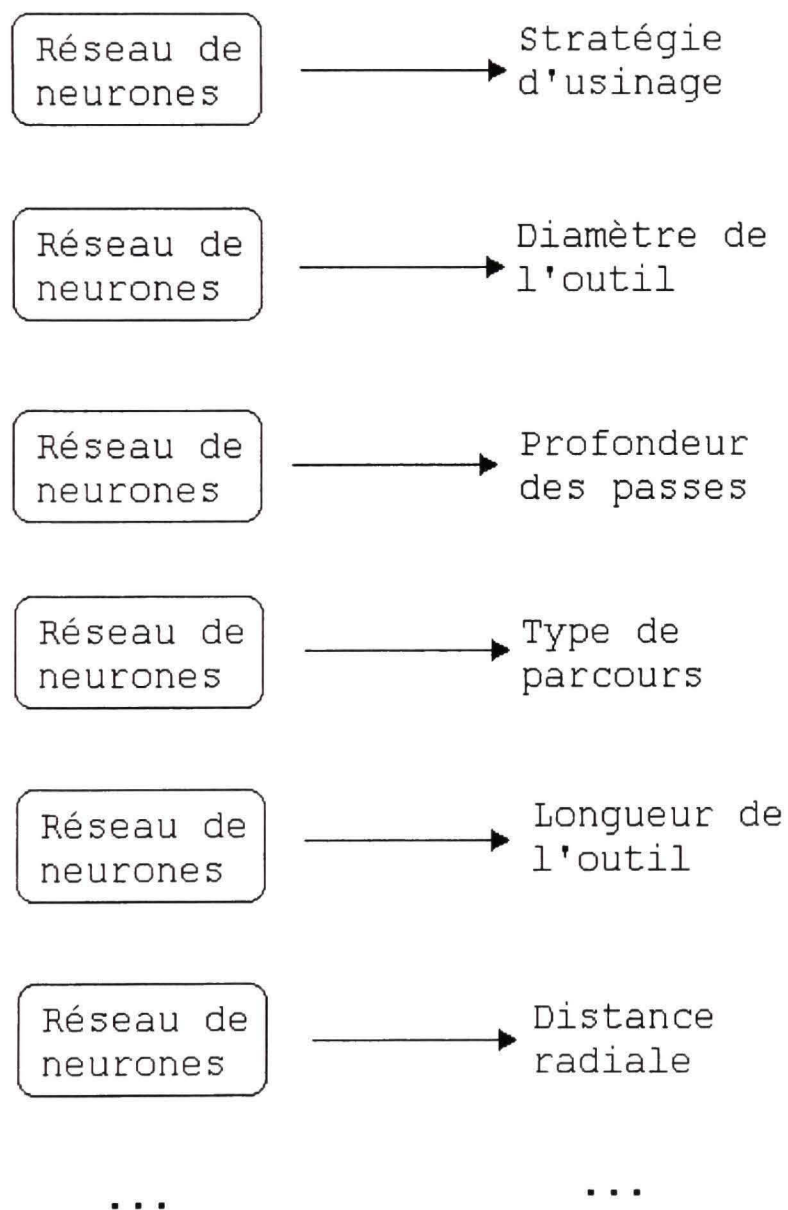
De nombreux travaux de thèses et projets de recherche se concentrent sur la détermination des caractéristiques d'usinage directement à partir des caractéristiques de formes tel [Nezis, K., Vosniakos, G. 1997] et [Park, S., Jun, Y. 2002] qui proposent des systèmes de reconnaissance de caractéristiques d'usinage. Cependant, ces systèmes sont lourds et offrent moins de performance puisqu'il y a presque une infinité de caractéristiques d'usinage possibles. Donc, ces systèmes devaient se limiter par rapport au nombre de caractéristiques pouvant être reconnues pour permettre aux algorithmes utilisés de converger. Certains

auteurs tels [Gu, Z., Zhang, F., Nee, A. Y. C. 1997] et [Öztürk, N., Öztürk, F. 2000] font abstraction de cette conséquence et se concentre sur la reconnaissance de classes de caractéristiques d'usinage uniquement. Cette méthode offre des meilleurs succès mais demeure plutôt générique et/ou trop abstraite pour être appliquée ou intégrée avec un système FAO actuel.

Ainsi, ce mémoire se concentre sur le choix de la stratégie d'usinage uniquement. Cette limitation est explicable par le fait que chaque paramètre de caractéristique d'usinage demanderait un réseau de neurones bâti avec une nouvelle architecture et des paramètres topologiques et dimensionnels différents de ceux de la stratégie d'usinage. Dans une caractéristique d'usinage, chaque information nécessite que le programmeur CN valide un certain choix, une certaine décision avec un raisonnement mental. Par exemple, pour le choix du diamètre de l'outil de coupe, qui est un paramètre primordial dans la caractéristique d'usinage, le programmeur doit probablement évaluer d'autres paramètres à partir de la caractéristique de forme que ceux proposés dans le chapitre 4. Il peut mettre l'emphasis seulement sur les rayons de courbure des arêtes et sur la grandeur de surface de contrôle de la caractéristique de forme, etc. Donc, un réseau de neurones pouvant reconnaître toutes les caractéristiques d'usinage à partir de n'importe quelle caractéristique de forme est difficile voire impossible puisqu'il y a une quasi-infinité de paramètres d'entrées, extraits des caractéristiques de forme et de plus, il y a quasi-infinité de caractéristiques d'usinage possibles. D'ailleurs, un réseau capable de telles performances demanderait des ordinateurs beaucoup plus puissants.

L'outil de validation informatique propose une approche flexible qui permet de modifier, ajouter ou supprimer des paramètres pour les caractéristiques de forme. Rien n'empêche un concepteur de créer un réseau de neurone qui deviendra « l'expert » pour trouver le diamètre de l'outil ou autre, avec des paramètres d'entrées et de sorties totalement différents pour être « le spécialiste » pour trouver le type d'outil. D'ailleurs, cet outil permet d'utiliser plusieurs réseaux de neurones en même temps, donc il peut, avec un certain temps de recherche,

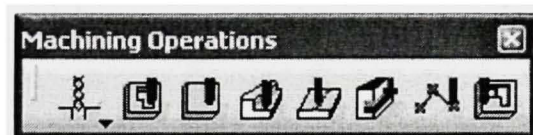
déterminer certaines caractéristiques d'usinage entières. Cependant, ce projet dépasse le cadre de l'objectif de ce mémoire qui était de se concentrer sur les stratégies d'usinage.



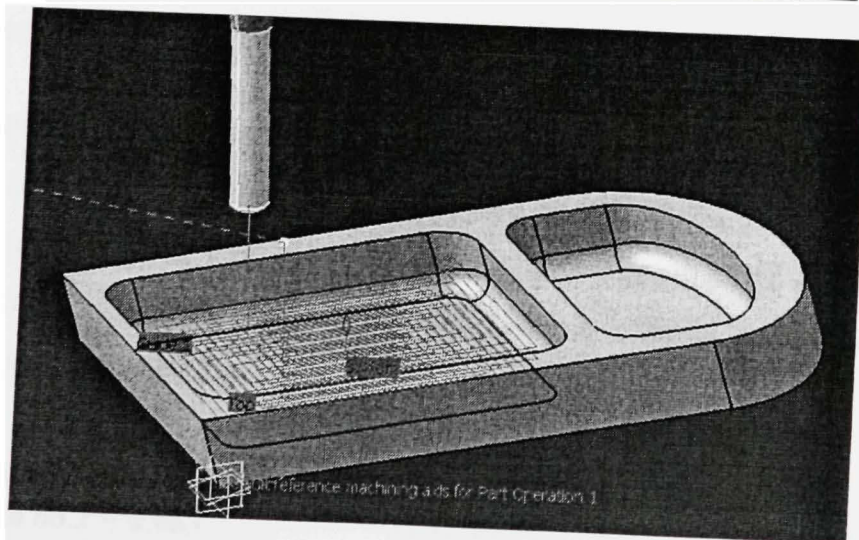
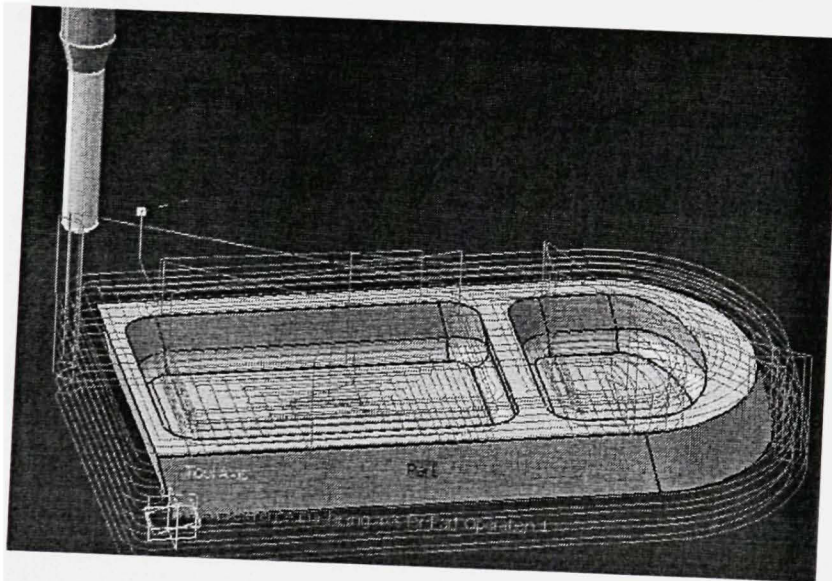
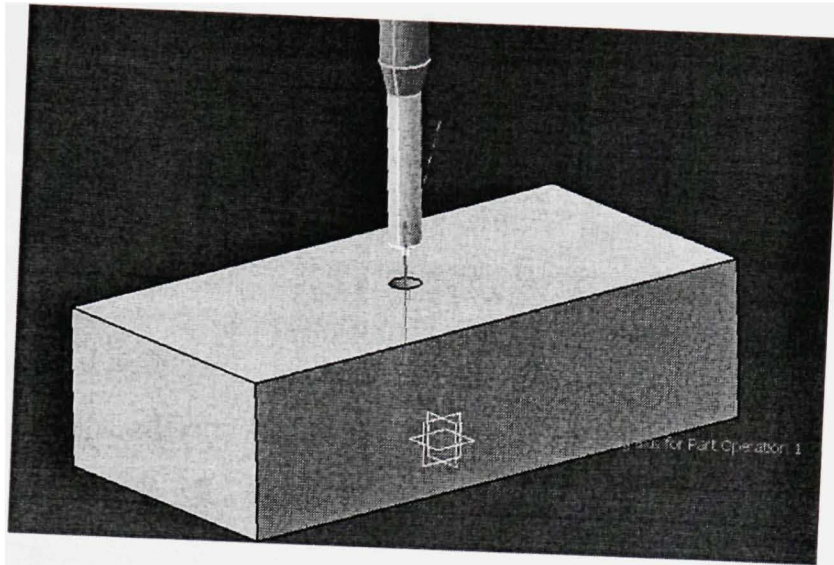
Types de stratégie d'usinage

Puisque la stratégie d'usinage est dépendante du système FAO, le mémoire se base sur un système FAO populaire et générique, CATIA V5. Ce système FAO possède plusieurs modules d'usinage offrant de multiples fonctionnalités dans le domaine de la machine-outil. Ce mémoire se concentre sur le module d'usinage prismatique (3 axes) mais peut très bien s'étendre sur le module d'usinage 5 axes et même celui de tournage ou de tournage multiaxes.

Dans le module prismatique, les types de stratégies disponibles se résument en plusieurs opérations d'ébauche, des opérations axiales (cycles de perçage), du contournage, du surfacage, des opérations de balayage et des pochettes.



Les opérations d'ébauche sont faites avec toujours l'axe de l'outil fixe, elles consistent, la plupart du temps, en plusieurs passes pour enlever le maximum de matériel possible sans compromettre la vitesse de coupe. Ce type d'opération est utilisé pour enlever le surplus de matériel en ébauche et tire un meilleur profit en utilisant un outil de grand diamètre. Les opérations axiales demeurent utiles lorsqu'il faut procéder à l'enlèvement de matière pour créer des trous. Plusieurs cycles de perçage sont disponibles soit les cycles de perçage normal, les cycles de perçage profond, les cycles de taraudage, les cycles de perçage les cycles de perçage incrémental, les cycles de perçage en surface, etc. Les opérations de contournage sont utilisées, dans la majorité des cas pour la finition et la semi-finition des parois (surfaces parallèles à l'axe de l'outil) d'une caractéristique de forme alors que les opérations de balayage et de surfacage sont utiles sur les surfaces normales à l'axe de l'outil. Les pochettes utilisent une combinaison des deux méthodes précédentes pour enlever du matériel en semi-finition et finition dans les cavités d'une pièce.



Dans l'outil de validation, les stratégies d'usinage possibles sont énumérées dans un fichier externe, ce qui offre une plus grande flexibilité pour modifier, ajouter ou supprimer les types de stratégies d'usinage. Le réseau de neurones utilise ce fichier pour faire son apprentissage durant l'entraînement, pour chaque résultats, il compare la sortie désirée avec le niveau de confiance de chacun et ajuste en conséquence ses poids. Par exemple, si l'utilisateur change de système FAO, les types et le nombre d'opérations possibles peuvent changer également. Pour une meilleure flexibilité, l'utilisateur peut ajouter une stratégie d'usinage qui ne converge pas, tel « Aucune ».

```
<KNOWLEDGE>
  <OPERATION>
    <STRATEGY>
      <STRATEGY_1>Contouring</STRATEGY_1>
      <STRATEGY_2>Pocketing</STRATEGY_2>
      <STRATEGY_3>Facing</STRATEGY_3>
      <STRATEGY_4>Sweeping</STRATEGY_4>
      <STRATEGY_5>Drilling</STRATEGY_5>
      <STRATEGY_6>Tapping</STRATEGY_6>
      <STRATEGY_7>Spot_drilling</STRATEGY_7>
      <STRATEGY_8>Counter_boring</STRATEGY_8>
      <STRATEGY_9>Slotting</STRATEGY_9>
      <STRATEGY_10>None</STRATEGY_10>
    </STRATEGY>
  </OPERATION>
</KNOWLEDGE>
```

Association des stratégies d'usinage avec les caractéristiques de forme

Les sorties produites par un réseau de neurones sont une matrice de chiffres. Cette matrice de chiffres est de même dimension que le nombre de sorties de l'architecture du réseau de neurones. Pour déterminer la stratégie d'usinage qui converge, le neurone de sortie ayant le plus grand niveau de confiance (entre 0 et 100%) sera le neurone dit gagnant, c'est-à-dire qu'il y a convergence vers cette sortie.

Neurone de sortie no.1 = 0.012	Contouring
Neurone de sortie no.2 = 0.963	Pocketing → Convergence de "Pocketing"
Neurone de sortie no.3 = 0.343	Facing
Neurone de sortie no.4 = 0.235	Sweeping

Neurone de sortie no.5 = 0.001	Drilling
Neurone de sortie no.6 = 0.002	Tapping
Neurone de sortie no.7 = 0.002	Spot_Drilling
Neurone de sortie no.8 = 0.006	Counter_Boring
Neurone de sortie no.9 = 0.002	Slotting
Neurone de sortie no.10 = 0.001	None

Donc, le réseau de neurones vient de déterminer la stratégie d'usinage à partir d'une caractéristique de forme préalablement traitée pour extraire certains paramètres topologiques et géométriques. Dans cet exemple, la caractéristique de forme peut probablement être machinée avec une stratégie d'usinage « pochette » puisque cette stratégie d'usinage a obtenu un niveau de confiance d'environ 96%. De plus, il se peut que la matrice des neurones de sortie offre plusieurs bons résultats, par exemple, un surfaçage vient d'obtenir un niveau de confiance de 34% alors qu'un balayage a obtenu un niveau de confiance de 24%. Une caractéristique de forme n'est pas obligatoirement dépendante d'une stratégie d'usinage. Cependant, le réseau de neurones « préfèrent largement » une pochette comme stratégie.

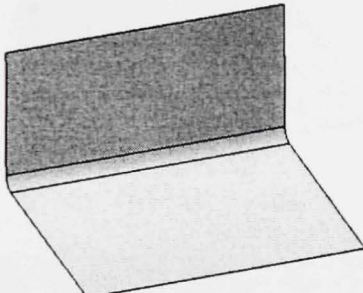
Conclusion

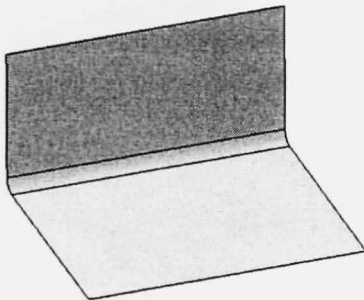
Dans cette annexe, le travail vient de faire un survol sur les stratégies d'usinage qui sont au cœur du projet. Les réseaux de neurones observent des paramètres topologiques et géométriques extraits de caractéristiques de forme pour ensuite converger vers des stratégies d'usinage pouvant machiner ces caractéristiques de forme. Une stratégie d'usinage est un élément intrinsèque à un ensemble d'informations manufacturières pour machiner la caractéristique de forme soit une caractéristique d'usinage. Obtenir une caractéristique d'usinage à partir de caractéristiques de forme demande l'utilisation de plusieurs réseaux de neurones, chacun étant un spécialiste pour reconnaître un élément faisant parti de l'ensemble formant une caractéristique d'usinage.

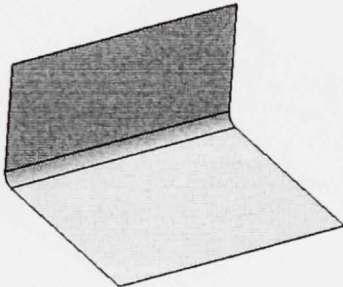
Plusieurs types de stratégies d'usinage sont disponibles et elles varient selon le type de système FAO utilisé. Ce mémoire se concentre sur le système FAO CATIA V5 – PMG, le module d'usinage prismatique. Ce module contient de nombreuses opérations avec l'axe de l'outil fixe. Les types d'opérations (stratégies d'usinage) FAO sont implémentés dans un fichier texte qui est lus par le réseau de neurones, ce qui offre une meilleure flexibilité au niveau des types de stratégies d'usinage qui peuvent être reconnues.

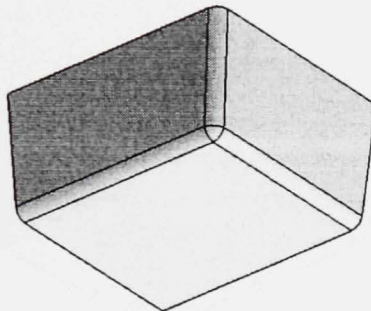
ANNEXE III

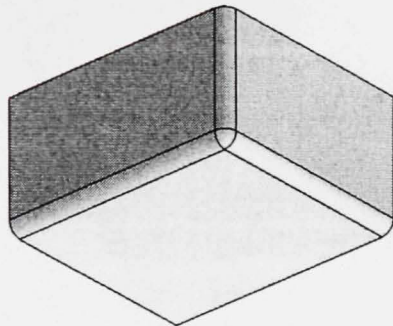
BASE DE DONNÉES D'ENTRAÎNEMENT

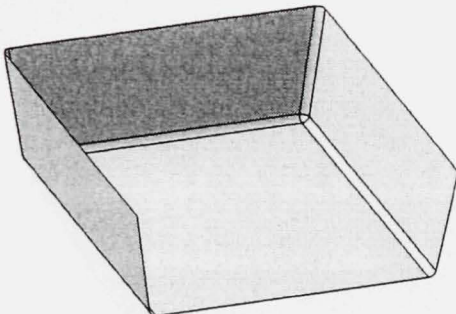
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-001
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	8
		Nombre d'arêtes droites	8
		Nombre d'arêtes circulaires	2
		Nombre d'arêtes concaves	2
		Nombre de faces planes	2
		Nombre de faces sphériques	0
		Nombre de faces cylindriques	1
		Nombre de congés	1
		Nombre de surface de fond	1
Stratégie d'usinage désirée		Rayon de courbure des congés	4.000
	Technologiques	Aire totale de la surface de fond	0.005
		Diamètre du trou	0.000
		Profondeur de poche ou de trou	40.000
		Angle entre un flanc et le fond	101.31
		Épaisseur des parois	10.198
		Unité de mesure	1
		Module de Young	70.000
		Densité volumétrique	2.710
		Rugosité de la surface de fond	0.100
		Rugosité des flancs	0.010
		Longueur coupante de l'outil	75.000
		Outil à bout sphérique	1.000
		Diamètre nominal de l'outil	8.000
		Rayon de coin	4.000
Matrice de sortie (5)		=	
Surfaçage		0	
Contournage prismatique		0	
Contournage multiaxe		1	
Perçage		0	
Fraisage circulaire		0	

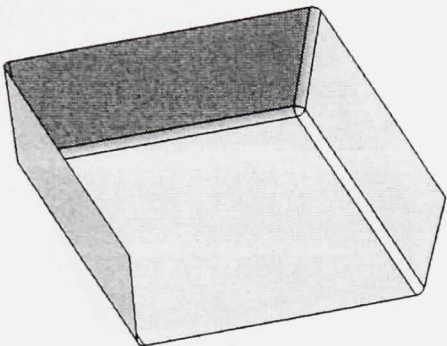
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-002	
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=	
		Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	8
			Nombre d'arêtes droites	8
			Nombre d'arêtes circulaires	2
			Nombre d'arêtes concaves	2
			Nombre de faces planes	2
			Nombre de faces sphériques	0
			Nombre de faces cylindriques	1
			Nombre de congés	1
			Nombre de surface de fond	1
			Stratégie d'usinage désirée	
		Technologiques	Aire totale de la surface de fond	0 . 005
			Diamètre du trou	0 . 000
			Profondeur de poche ou de trou	47 . 663
			Angle entre un flanc et le fond	101 . 31
			Épaisseur des parois	4 . 079
			Unité de mesure	1
			Module de Young	70 . 000
			Densité volumétrique	2 . 710
			Rugosité de la surface de fond	0 . 100
			Rugosité des flancs	0 . 010
Longueur coupante de l'outil	75 . 000			
Outil à bout sphérique	1 . 000			
Diamètre nominal de l'outil	8 . 000			
Rayon de coin	4 . 000			

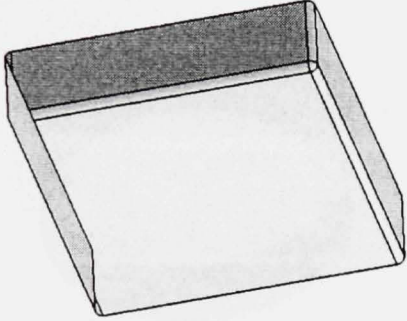
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-003	
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=	
		Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	8
			Nombre d'arêtes droites	8
			Nombre d'arêtes circulaires	2
			Nombre d'arêtes concaves	2
			Nombre de faces planes	2
			Nombre de faces sphériques	0
			Nombre de faces cylindriques	1
			Nombre de congés	1
			Nombre de surface de fond	1
			Stratégie d'usinage désirée	
		Aire totale de la surface de fond	0 . 006	
		Diamètre du trou	0 . 000	
		Profondeur de poche ou de trou	45 . 000	
		Angle entre un flanc et le fond	90 . 000	
		Épaisseur des parois	5 . 853	
		Unité de mesure	1	
		Matrice de sortie (5)		=
Surfaçage	0	Technologiques	Module de Young	70 . 000
Contournage prismatique	1		Densité volumétrique	2 . 710
Contournage multiaxe	0		Rugosité de la surface de fond	0 . 100
Perçage	0		Rugosité des flancs	0 . 010
Fraisage circulaire	0		Longueur coupante de l'outil	75 . 000
			Outil à bout sphérique	1 . 000
			Diamètre nominal de l'outil	8 . 000
		Rayon de coin	4 . 000	

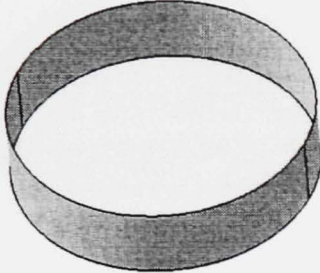
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-004
Forme	Paramètres de l'entrée (24)		=
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	12
		Nombre d'arêtes droites	12
		Nombre d'arêtes circulaires	6
		Nombre d'arêtes concaves	9
		Nombre de faces planes	3
		Nombre de faces sphériques	1
		Nombre de faces cylindriques	3
		Nombre de congés	4
		Nombre de surface de fond	1
	Technologiques	Rayon de courbure des congés	4 . 000
		Aire totale de la surface de fond	0 . 004
		Diamètre du trou	0 . 000
		Profondeur de poche ou de trou	40 . 000
		Angle entre un flanc et le fond	97 . 125
		Épaisseur des parois	5 . 122
		Unité de mesure	1
		Module de Young	70 . 000
Densité volumétrique	2 . 710		
Rugosité de la surface de fond		0 . 100	
Rugosité des flancs		0 . 010	
Longueur coupante de l'outil		75 . 000	
Outil à bout sphérique		1 . 000	
Diamètre nominal de l'outil		8 . 000	
Rayon de coin		4 . 000	
Stratégie d'usinage désirée			
Matrice de sortie (5)		=	
Surfaçage	0		
Contournage prismatique	0		
Contournage multiaxe	1		
Perçage	0		
Fraisage circulaire	0		

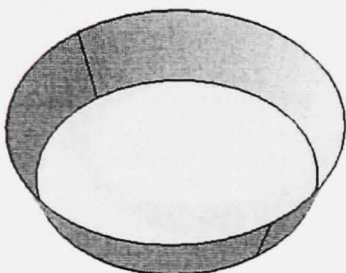
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-005
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	12
		Nombre d'arêtes droites	12
		Nombre d'arêtes circulaires	6
		Nombre d'arêtes concaves	9
		Nombre de faces planes	3
		Nombre de faces sphériques	1
		Nombre de faces cylindriques	3
		Nombre de congés	4
		Nombre de surface de fond	1
		Stratégie d'usinage désirée	Topologiques et géométriques
	Aire totale de la surface de fond	0.004	
	Diamètre du trou	0.000	
	Profondeur de poche ou de trou	40.000	
	Angle entre un flanc et le fond	90.000	
	Épaisseur des parois	10.122	
	Unité de mesure	1	
Technologiques	Module de Young	70.000	
	Densité volumétrique	2.710	
	Rugosité de la surface de fond	0.100	
	Rugosité des flancs	0.010	
	Longueur coupante de l'outil	75.000	
	Outil à bout sphérique	1.000	
	Diamètre nominal de l'outil	8.000	
	Rayon de coin	4.000	
Matrice de sortie (5)		=	
Surfaçage	0		
Contournage prismatique	1		
Contournage multiaxe	0		
Perçage	0		
Fraisage circulaire	0		

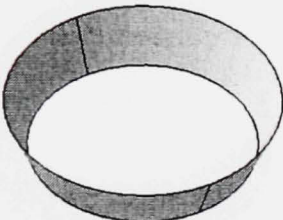
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-006	
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=	
		Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	16
			Nombre d'arêtes droites	16
			Nombre d'arêtes circulaires	10
			Nombre d'arêtes concaves	16
			Nombre de faces planes	4
			Nombre de faces sphériques	2
			Nombre de faces cylindriques	5
			Nombre de congés	7
			Nombre de surface de fond	1
			Stratégie d'usinage désirée	
		Aire totale de la surface de fond	0 . 026	
		Diamètre du trou	0 . 000	
		Profondeur de poche ou de trou	60 . 000	
		Angle entre un flanc et le fond	99 . 462	
		Épaisseur des parois	11 . 589	
		Unité de mesure	1	
		Matrice de sortie (5)		=
Surfaçage	0		Module de Young	70 . 000
Contournage prismatique	0		Densité volumétrique	2 . 710
Contournage multiaxe	1		Rugosité de la surface de fond	0 . 100
Perçage	0		Rugosité des flancs	0 . 010
Fraisage circulaire	0		Longueur coupante de l'outil	75 . 000
			Outil à bout sphérique	1 . 000
			Diamètre nominal de l'outil	8 . 000
			Rayon de coin	4 . 000

FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-007
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	16
		Nombre d'arêtes droites	16
		Nombre d'arêtes circulaires	10
		Nombre d'arêtes concaves	16
		Nombre de faces planes	4
		Nombre de faces sphériques	2
		Nombre de faces cylindriques	5
		Nombre de congés	7
		Nombre de surface de fond	1
		Stratégie d'usinage désirée	
	Technologiques	Aire totale de la surface de fond	0.031
		Diamètre du trou	0.000
		Profondeur de poche ou de trou	67.000
		Angle entre un flanc et le fond	98.130
		Épaisseur des parois	3.030
		Unité de mesure	1
		Module de Young	70.000
		Densité volumétrique	2.710
		Rugosité de la surface de fond	0.100
		Rugosité des flancs	0.010
Longueur coupante de l'outil	75.000		
Outil à bout sphérique	1.000		
Diamètre nominal de l'outil	8.000		
Rayon de coin	4.000		
Matrice de sortie (5)		=	
Surfaçage	0		
Contournage prismatique	0		
Contournage multiaxe	1		
Perçage	0		
Fraisage circulaire	0		

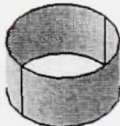
FICHE D'ENTRAÎNEMENT		CF-008
Forme	Paramètres de l'entrée (24)	=
	Nombre de sommets	16
	Nombre d'arêtes droites	16
	Nombre d'arêtes circulaires	10
	Nombre d'arêtes concaves	16
	Nombre de faces planes	4
	Nombre de faces sphériques	2
	Nombre de faces cylindriques	5
	Nombre de congés	7
	Nombre de surface de fond	1
	Rayon de courbure des congés	4.000
Stratégie d'usinage désirée	Aire totale de la surface de fond	0.026
	Diamètre du trou	0.000
	Profondeur de poche ou de trou	40.000
	Angle entre un flanc et le fond	90.000
	Épaisseur des parois	21.589
	Unité de mesure	1
	Module de Young	70.000
	Densité volumétrique	2.710
	Rugosité de la surface de fond	0.100
	Rugosité des flancs	0.010
Matrice de sortie (5)	Longueur coupante de l'outil	75.000
	Outil à bout sphérique	1.000
	Diamètre nominal de l'outil	8.000
	Rayon de coin	4.000
Surfaçage	0	
Contournage prismatique	1	
Contournage multiaxe	0	
Perçage	0	
Fraisage circulaire	0	

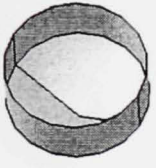
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-009	
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=	
		Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	2
			Nombre d'arêtes droites	0
			Nombre d'arêtes circulaires	2
			Nombre d'arêtes concaves	1
			Nombre de faces planes	1
			Nombre de faces sphériques	0
			Nombre de faces cylindriques	1
			Nombre de congés	0
			Nombre de surface de fond	1
			Stratégie d'usinage désirée	
		Aire totale de la surface de fond	0.071	
		Diamètre du trou	300.00	
		Profondeur de poche ou de trou	75.000	
		Angle entre un flanc et le fond	90.000	
		Épaisseur des parois	0.000	
		Unité de mesure	1	
		Technologiques	Module de Young	70.000
			Densité volumétrique	2.710
Rugosité de la surface de fond	0.100			
Rugosité des flancs	0.010			
Longueur coupante de l'outil	10.000			
Outil à bout sphérique	0.000			
Diamètre nominal de l'outil	50.000			
Rayon de coin	0.000			
Matrice de sortie (5)		=		
Surfaçage	0			
Contournage prismatique	0			
Contournage multiaxe	0			
Perçage	0			
Fraisage circulaire	1			

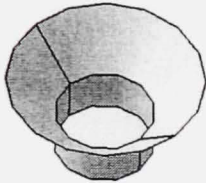
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-010			
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=			
		Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	2		
			Nombre d'arêtes droites	0		
			Nombre d'arêtes circulaires	2		
			Nombre d'arêtes concaves	1		
			Nombre de faces planes	1		
			Nombre de faces sphériques	0		
			Nombre de faces cylindriques	1		
			Nombre de congés	0		
			Nombre de surface de fond	1		
			Stratégie d'usinage désirée		Rayon de courbure des congés	0.000
		Topologiques et géométriques	Aire totale de la surface de fond	0.008		
			Diamètre du trou	120.70		
			Profondeur de poche ou de trou	25.000		
			Angle entre un flanc et le fond	112.50		
			Épaisseur des parois	0.000		
			Unité de mesure	1		
				Technologiques	Module de Young	70.000
					Densité volumétrique	2.710
					Rugosité de la surface de fond	0.100
					Rugosité des flancs	0.010
Longueur coupante de l'outil	25.000					
Outil à bout sphérique	0.000					
Diamètre nominal de l'outil	10.000					
Rayon de coin	0.000					
Matrice de sortie (5)		=				
Surfaçage	0					
Contournage prismatique	0					
Contournage multiaxe	1					
Perçage	0					
Fraisage circulaire	0					


FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-011	
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=	
		Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	2
			Nombre d'arêtes droites	0
			Nombre d'arêtes circulaires	2
			Nombre d'arêtes concaves	0
			Nombre de faces planes	0
			Nombre de faces sphériques	0
			Nombre de faces cylindriques	1
			Nombre de congés	0
			Nombre de surface de fond	0
			Stratégie d'usinage désirée	
		Aire totale de la surface de fond	0 . 000	
		Diamètre du trou	120 . 70	
		Profondeur de poche ou de trou	25 . 000	
		Angle entre un flanc et le fond	112 . 50	
		Épaisseur des parois	0 . 000	
		Unité de mesure	1	
		Matrice de sortie (5)		=
Surfaçage	0	Technologiques	Module de Young	70 . 000
Contournage prismatique	0		Densité volumétrique	2 . 710
Contournage multiaxe	1		Rugosité de la surface de fond	0 . 100
Perçage	0		Rugosité des flancs	0 . 010
Fraisage circulaire	0		Longueur coupante de l'outil	25 . 000
			Outil à bout sphérique	0 . 000
			Diamètre nominal de l'outil	10 . 000
		Rayon de coin	0 . 000	

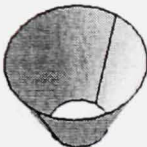
FICHE D'ENTRAÎNEMENT		CF-012	
Forme	Paramètres de l'entrée (24)		
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	2
		Nombre d'arêtes droites	0
		Nombre d'arêtes circulaires	2
		Nombre d'arêtes concaves	0
		Nombre de faces planes	0
		Nombre de faces sphériques	0
		Nombre de faces cylindriques	1
		Nombre de congés	0
		Nombre de surface de fond	0
		Stratégie d'usinage désirée	Topologiques et géométriques
Aire totale de la surface de fond	0.000		
Diamètre du trou	300.00		
Profondeur de poche ou de trou	100.00		
Angle entre un flanc et le fond	90.000		
Épaisseur des parois	0.000		
Unité de mesure	1		
Matrice de sortie (5)	Technologiques		
		Densité volumétrique	2.710
		Rugosité de la surface de fond	0.100
		Rugosité des flancs	0.010
		Longueur coupante de l'outil	10.000
		Outil à bout sphérique	0.000
		Diamètre nominal de l'outil	50.000
Rayon de coin	0.000		
Surfaçage	0		
Contournage prismatique	0		
Contournage multiaxe	0		
Perçage	0		
Fraisage circulaire	1		


FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-013	
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=	
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	2	
		Nombre d'arêtes droites	0	
		Nombre d'arêtes circulaires	2	
		Nombre d'arêtes concaves	1	
		Nombre de faces planes	1	
		Nombre de faces sphériques	0	
		Nombre de faces cylindriques	1	
		Nombre de congés	0	
		Nombre de surface de fond	1	
		Stratégie d'usinage désirée		Rayon de courbure des congés
	Topologiques et géométriques	Aire totale de la surface de fond	0.0005	
		Diamètre du trou	25.400	
		Profondeur de poche ou de trou	15.000	
		Angle entre un flanc et le fond	90.000	
		Épaisseur des parois	0.000	
		Unité de mesure	1	
		Technologiques	Module de Young	70.000
			Densité volumétrique	2.710
			Rugosité de la surface de fond	0.100
			Rugosité des flancs	0.010
Longueur coupante de l'outil	15.000			
Outil à bout sphérique	0.000			
Diamètre nominal de l'outil	25.400			
Rayon de coin	0.000			
Matrice de sortie (5)		=		
Surfaçage	0			
Contournage prismatique	0			
Contournage multiaxe	0			
Perçage	1			
Fraisage circulaire	0			

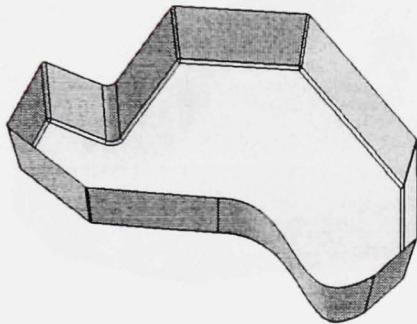
FICHE D'ENTRAÎNEMENT		CF-014	
Forme	Paramètres de l'entrée (24)		
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	3
		Nombre d'arêtes droites	2
		Nombre d'arêtes circulaires	2
		Nombre d'arêtes concaves	1
		Nombre de faces planes	0
		Nombre de faces sphériques	0
		Nombre de faces cylindriques	2
		Nombre de congés	0
		Nombre de surface de fond	1
Stratégie d'usinage désirée	Topologiques et géométriques	Rayon de courbure des congés	0.000
		Aire totale de la surface de fond	0.0005
		Diamètre du trou	25.400
		Profondeur de poche ou de trou	15.000
		Angle entre un flanc et le fond	90.000
		Épaisseur des parois	0.000
		Unité de mesure	1
	Matrice de sortie (5)	Technologiques	Module de Young
Densité volumétrique			2.710
Rugosité de la surface de fond			0.100
Rugosité des flancs			0.010
Longueur coupante de l'outil			15.000
Outil à bout sphérique			0.000
Diamètre nominal de l'outil			25.400
Rayon de coin	0.000		
Surfaçage	0		
Contournage prismatique	0		
Contournage multiaxe	0		
Perçage	1		
Fraisage circulaire	0		

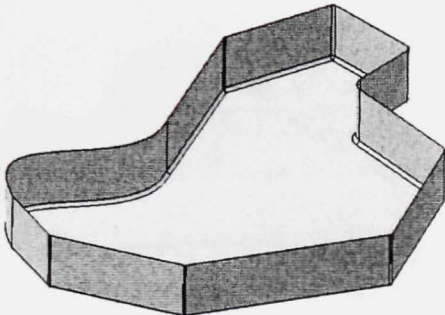
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-015
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	3
		Nombre d'arêtes droites	2
		Nombre d'arêtes circulaires	2
		Nombre d'arêtes concaves	1
		Nombre de faces planes	1
		Nombre de faces sphériques	0
		Nombre de faces cylindriques	2
		Nombre de congés	0
		Nombre de surface de fond	1
		Stratégie d'usinage désirée	
	Technologiques	Aire totale de la surface de fond	0.0001
		Diamètre du trou	10.000
		Profondeur de poche ou de trou	5.000
		Angle entre un flanc et le fond	90.000
		Épaisseur des parois	0.000
		Unité de mesure	1
		Module de Young	70.000
		Densité volumétrique	2.710
		Rugosité de la surface de fond	0.100
		Rugosité des flancs	0.010
Longueur coupante de l'outil	5.000		
Outil à bout sphérique	0.000		
Diamètre nominal de l'outil	10.000		
Rayon de coin	0.000		
Matrice de sortie (5)		=	
Surfaçage	0		
Contournage prismatique	0		
Contournage multiaxe	0		
Perçage	1		
Fraisage circulaire	0		

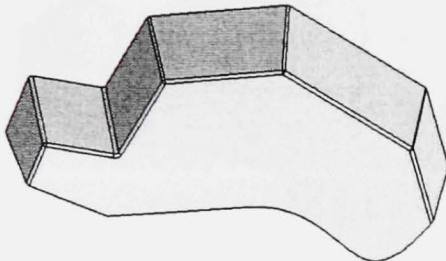
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-016
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	2
		Nombre d'arêtes droites	0
		Nombre d'arêtes circulaires	2
		Nombre d'arêtes concaves	1
		Nombre de faces planes	1
		Nombre de faces sphériques	0
		Nombre de faces cylindriques	1
		Nombre de congés	0
		Nombre de surface de fond	1
Stratégie d'usinage désirée		Rayon de courbure des congés	0.000
	Technologiques	Aire totale de la surface de fond	0.0001
		Diamètre du trou	10.000
		Profondeur de poche ou de trou	5.000
		Angle entre un flanc et le fond	112.50
		Épaisseur des parois	0.000
		Unité de mesure	1
		Module de Young	70.000
		Densité volumétrique	2.710
Matrice de sortie (5)		=	
Surfaçage	0		
Contournage prismatique	0		
Contournage multiaxe	0		
Perçage	1		
Fraisage circulaire	0		

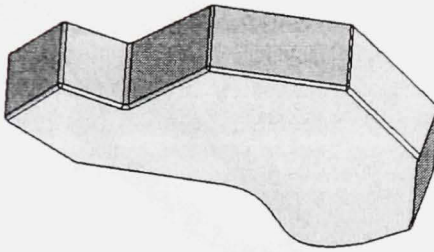
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-017
Forme	Paramètres de l'entrée (24)		=
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	2
		Nombre d'arêtes droites	0
		Nombre d'arêtes circulaires	2
		Nombre d'arêtes concaves	0
		Nombre de faces planes	0
		Nombre de faces sphériques	0
		Nombre de faces cylindriques	1
		Nombre de congés	0
		Nombre de surface de fond	0
Stratégie d'usinage désirée	Topologiques et géométriques	Rayon de courbure des congés	0.000
		Aire totale de la surface de fond	0.0000
		Diamètre du trou	15.000
		Profondeur de poche ou de trou	25.000
		Angle entre un flanc et le fond	112.50
		Épaisseur des parois	0.000
		Unité de mesure	1
		Matrice de sortie (5) =	Technologiques
Densité volumétrique	2.710		
Rugosité de la surface de fond	0.100		
Rugosité des flancs	0.010		
Longueur coupante de l'outil	25.000		
Outil à bout sphérique	0.000		
Diamètre nominal de l'outil	15.000		
Rayon de coin	0.000		
Surfaçage	0		
Contournage prismatique	0		
Contournage multiaxe	0		
Perçage	1		
Fraisage circulaire	0		

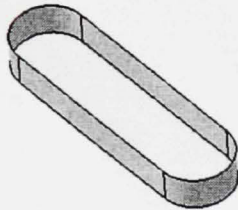
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-018	
Forme		Paramètres de l'entrée (24)		=
		Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	2
			Nombre d'arêtes droites	0
			Nombre d'arêtes circulaires	2
			Nombre d'arêtes concaves	0
			Nombre de faces planes	0
			Nombre de faces sphériques	0
			Nombre de faces cylindriques	1
			Nombre de congés	0
			Nombre de surface de fond	0
			Stratégie d'usinage désirée	
		Aire totale de la surface de fond	0.0000	
		Diamètre du trou	25.400	
		Profondeur de poche ou de trou	5.000	
		Angle entre un flanc et le fond	90.000	
		Épaisseur des parois	0.000	
		Unité de mesure	1	
		Matrice de sortie (5)		Technologiques
		Densité volumétrique	2.710	
		Rugosité de la surface de fond	0.100	
		Rugosité des flancs	0.010	
		Longueur coupante de l'outil	5.000	
		Outil à bout sphérique	0.000	
		Diamètre nominal de l'outil	25.400	
Surfaçage		0	Rayon de coin	0.000
Contournage prismatique		0		
Contournage multiaxe		0		
Perçage		1		
Fraisage circulaire		0		

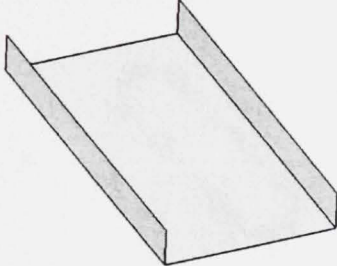
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-019
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	51
		Nombre d'arêtes droites	50
		Nombre d'arêtes circulaires	44
		Nombre d'arêtes concaves	69
		Nombre de faces planes	10
		Nombre de faces sphériques	10
		Nombre de faces cylindriques	21
		Nombre de congés	30
		Nombre de surface de fond	1
		Stratégie d'usinage désirée	
	Technologiques	Rayon de courbure des congés	4.000
		Aire totale de la surface de fond	0.091
		Diamètre du trou	0.000
		Profondeur de poche ou de trou	76.000
		Angle entre un flanc et le fond	100.62
		Épaisseur des parois	4.070
		Unité de mesure	1
		Module de Young	70.000
		Densité volumétrique	2.710
		Matrice de sortie (5)	=
Surfaçage	0		
Contournage prismatique	0		
Contournage multiaxe	1		
Perçage	0		
Fraisage circulaire	0		

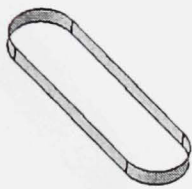
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-020		
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=		
		Nombre de sommets	51		
		Nombre d'arêtes droites	50		
		Nombre d'arêtes circulaires	44		
		Nombre d'arêtes concaves	69		
		Nombre de faces planes	10		
		Nombre de faces sphériques	10		
		Nombre de faces cylindriques	21		
		Nombre de congés	30		
		Nombre de surface de fond	1		
		Stratégie d'usinage désirée		Rayon de courbure des congés	4.000
Aire totale de la surface de fond	0.111				
Diamètre du trou	0.000				
Profondeur de poche ou de trou	76.000				
Angle entre un flanc et le fond	90.000				
Épaisseur des parois	4.000				
Unité de mesure	1				
Matrice de sortie (5)				=	
		Surfaçage	0		
		Contournage prismatique	1		
		Contournage multiaxe	0		
		Perçage	0		
		Fraisage circulaire	0		
		Technologiques		Module de Young	70.000
				Densité volumétrique	2.710
				Rugosité de la surface de fond	0.100
				Rugosité des flancs	0.010
Longueur coupante de l'outil	80.000				
Outil à bout sphérique	1.000				
Diamètre nominal de l'outil	8.000				
Rayon de coin	4.000				

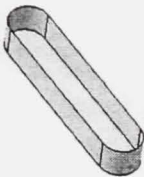
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-021	
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=	
		Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	35
			Nombre d'arêtes droites	33
			Nombre d'arêtes circulaires	24
			Nombre d'arêtes concaves	32
			Nombre de faces planes	7
			Nombre de faces sphériques	5
			Nombre de faces cylindriques	11
			Nombre de congés	16
			Nombre de surface de fond	1
			Stratégie d'usinage désirée	
		Aire totale de la surface de fond	0.089	
		Diamètre du trou	0.000	
		Profondeur de poche ou de trou	76.000	
		Angle entre un flanc et le fond	104.04	
		Épaisseur des parois	4.123	
		Unité de mesure	1	
		Technologiques	Module de Young	70.000
Densité volumétrique	2.710			
Rugosité de la surface de fond	0.100			
Rugosité des flancs	0.010			
Longueur coupante de l'outil	80.000			
Outil à bout sphérique	1.000			
Diamètre nominal de l'outil	8.000			
Rayon de coin	4.000			
Matrice de sortie (5)		=		
Surfaçage	0			
Contournage prismatique	0			
Contournage multiaxe	1			
Perçage	0			
Fraisage circulaire	0			

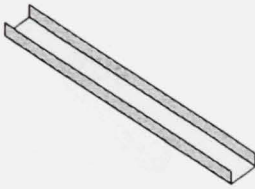
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-022		
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=		
		Nombre de sommets	35		
		Nombre d'arêtes droites	33		
		Nombre d'arêtes circulaires	24		
		Nombre d'arêtes concaves	32		
		Nombre de faces planes	7		
		Nombre de faces sphériques	5		
		Nombre de faces cylindriques	11		
		Nombre de congés	16		
		Nombre de surface de fond	1		
		Stratégie d'usinage désirée		Rayon de courbure des congés	4.000
Aire totale de la surface de fond	0.115				
Diamètre du trou	0.000				
Profondeur de poche ou de trou	76.000				
Angle entre un flanc et le fond	90.000				
Épaisseur des parois	4.000				
Unité de mesure	1				
Technologiques				Module de Young	70.000
				Densité volumétrique	2.710
				Rugosité de la surface de fond	0.100
		Rugosité des flancs	0.010		
		Longueur coupante de l'outil	80.000		
		Outil à bout sphérique	1.000		
		Diamètre nominal de l'outil	8.000		
		Rayon de coin	4.000		
Matrice de sortie (5)		=			
Surfaçage	0				
Contournage prismatique	1				
Contournage multiaxe	0				
Perçage	0				
Fraisage circulaire	0				

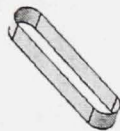
FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-023	
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=	
		Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	8
			Nombre d'arêtes droites	8
			Nombre d'arêtes circulaires	4
			Nombre d'arêtes concaves	4
			Nombre de faces planes	3
			Nombre de faces sphériques	0
			Nombre de faces cylindriques	2
			Nombre de congés	0
			Nombre de surface de fond	1
			Stratégie d'usinage désirée	
		Technologiques	Rayon de courbure des congés	0.000
			Aire totale de la surface de fond	0.019
			Diamètre du trou	75.000
			Profondeur de poche ou de trou	35.000
			Angle entre un flanc et le fond	90.000
			Épaisseur des parois	0.000
			Unité de mesure	1
			Module de Young	70.000
			Densité volumétrique	2.710
			Rugosité de la surface de fond	0.100
Rugosité des flancs	0.010			
Longueur coupante de l'outil	40.000			
Outil à bout sphérique	0.000			
Diamètre nominal de l'outil	25.000			
Rayon de coin	0.000			

FICHE D'ENTRAÎNEMENT		CF-024
Forme	Paramètres de l'entrée (24)	=
	Nombre de sommets	8
	Nombre d'arêtes droites	10
	Nombre d'arêtes circulaires	0
	Nombre d'arêtes concaves	2
	Nombre de faces planes	3
	Nombre de faces sphériques	0
	Nombre de faces cylindriques	0
	Nombre de congés	0
	Nombre de surface de fond	1
	Rayon de courbure des congés	0.000
Stratégie d'usinage désirée	Aire totale de la surface de fond	0.103
	Diamètre du trou	0.000
	Profondeur de poche ou de trou	50.000
	Angle entre un flanc et le fond	90.000
	Épaisseur des parois	0.000
	Unité de mesure	1
	Module de Young	70.000
	Densité volumétrique	2.710
	Rugosité de la surface de fond	0.100
	Rugosité des flancs	0.010
	Longueur coupante de l'outil	50.000
	Outil à bout sphérique	0.000
Matrice de sortie (5)	=	
Surfaçage	1	
Contournage prismatique	0	
Contournage multiaxe	0	
Perçage	0	
Fraisage circulaire	0	

FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-025												
Forme	Paramètres de l'entrée (24)		=												
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	8												
		Nombre d'arêtes droites	8												
		Nombre d'arêtes circulaires	4												
		Nombre d'arêtes concaves	0												
		Nombre de faces planes	2												
		Nombre de faces sphériques	0												
		Nombre de faces cylindriques	2												
		Nombre de congés	0												
		Nombre de surface de fond	0												
		Stratégie d'usinage désirée	Topologiques et géométriques	Rayon de courbure des congés	0.000										
Aire totale de la surface de fond	0.000														
Diamètre du trou	75.000														
Profondeur de poche ou de trou	35.000														
Angle entre un flanc et le fond	90.000														
Épaisseur des parois	0.000														
Unité de mesure	1														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Matrice de sortie (5)</th> <th>=</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Surfaçage</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Contournage prismatique</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Contournage multiaxe</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Perçage</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Fraisage circulaire</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Matrice de sortie (5)			=	Surfaçage	0	Contournage prismatique	1	Contournage multiaxe	0	Perçage	0	Fraisage circulaire	0	Technologiques
	Matrice de sortie (5)	=													
	Surfaçage	0													
	Contournage prismatique	1													
	Contournage multiaxe	0													
	Perçage	0													
	Fraisage circulaire	0													
	Densité volumétrique	2.710													
Rugosité de la surface de fond	0.100														
Rugosité des flancs	0.010														
Longueur coupante de l'outil	40.000														
Outil à bout sphérique	0.000														
Diamètre nominal de l'outil	25.000														
Rayon de coin	0.000														

FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-026												
Forme	Paramètres de l'entrée (24)		=												
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	8												
		Nombre d'arêtes droites	8												
		Nombre d'arêtes circulaires	4												
		Nombre d'arêtes concaves	4												
		Nombre de faces planes	3												
		Nombre de faces sphériques	0												
		Nombre de faces cylindriques	2												
		Nombre de congés	0												
		Nombre de surface de fond	1												
		Stratégie d'usinage désirée	Topologiques et géométriques	Rayon de courbure des congés	0.000										
Aire totale de la surface de fond	0.003														
Diamètre du trou	25.400														
Profondeur de poche ou de trou	20.000														
Angle entre un flanc et le fond	90.000														
Épaisseur des parois	4.000														
Unité de mesure	1														
<table border="1"> <tr> <th>Matrice de sortie (5)</th> <th>=</th> </tr> <tr> <td>Surfaçage</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Contournage prismatique</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Contournage multiaxe</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Perçage</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Fraisage circulaire</td> <td>0</td> </tr> </table>	Matrice de sortie (5)			=	Surfaçage	0	Contournage prismatique	1	Contournage multiaxe	0	Perçage	0	Fraisage circulaire	0	Technologiques
	Matrice de sortie (5)	=													
	Surfaçage	0													
	Contournage prismatique	1													
	Contournage multiaxe	0													
	Perçage	0													
	Fraisage circulaire	0													
	Densité volumétrique	2.710													
Rugosité de la surface de fond	0.100														
Rugosité des flancs	0.010														
Longueur coupante de l'outil	20.000														
Outil à bout sphérique	0.000														
Diamètre nominal de l'outil	25.400														
Rayon de coin	0.000														

FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-027
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	8
		Nombre d'arêtes droites	10
		Nombre d'arêtes circulaires	0
		Nombre d'arêtes concaves	2
		Nombre de faces planes	3
		Nombre de faces sphériques	0
		Nombre de faces cylindriques	0
		Nombre de congés	0
		Nombre de surface de fond	1
Stratégie d'usinage désirée		Rayon de courbure des congés	0.000
	Technologiques	Aire totale de la surface de fond	0.014
		Diamètre du trou	0.000
		Profondeur de poche ou de trou	20.000
		Angle entre un flanc et le fond	90.000
		Épaisseur des parois	0.000
		Unité de mesure	1
		Module de Young	70.000
		Densité volumétrique	2.710
		Rugosité de la surface de fond	0.100
Matrice de sortie (5)	=	Rugosité des flancs	0.010
Surfaçage	0	Longueur coupante de l'outil	20.000
Contournage prismatique	1	Outil à bout sphérique	0.000
Contournage multiaxe	0	Diamètre nominal de l'outil	25.400
Perçage	0	Rayon de coin	0.000
Fraisage circulaire	0		

FICHE D'ENTRAÎNEMENT			CF-028
Forme		Paramètres de l'entrée (24)	=
	Topologiques et géométriques	Nombre de sommets	8
		Nombre d'arêtes droites	8
		Nombre d'arêtes circulaires	4
		Nombre d'arêtes concaves	0
		Nombre de faces planes	2
		Nombre de faces sphériques	0
		Nombre de faces cylindriques	2
		Nombre de congés	0
		Nombre de surface de fond	0
		Stratégie d'usinage désirée	Rayon de courbure des congés
	Technologiques	Aire totale de la surface de fond	0.000
		Diamètre du trou	25.400
		Profondeur de poche ou de trou	20.000
		Angle entre un flanc et le fond	90.000
		Épaisseur des parois	0.000
		Unité de mesure	1
		Module de Young	70.000
		Densité volumétrique	2.710
		Rugosité de la surface de fond	0.100
		Rugosité des flancs	0.010
Longueur coupante de l'outil	20.000		
Outil à bout sphérique	0.000		
Diamètre nominal de l'outil	25.400		
Rayon de coin	0.000		

BIBLIOGRAPHIE

- Bouras A., Belaziz M., Tehari A., Wahu G. Brun J., (1999). *A Strategy to Support Application's Dependent Features Interpretation*. Journal of Intelligent Manufacturing 10, 41-47
- Chen, Y. H., Lee, H. M. (1998). *A neural network system for two-dimensional feature recognition*. Int. J. Computer Integrated Manufacturing, Vol.11 no.2 111-117
- Chen A., Tricarico L., (1999). *Object-oriented Analysis and Design of a Manufacturing Feature Representation*. Int. J. Prod. Res. Vol.37 No.10 2349-2376
- Deneux, D. (1993). *Méthodologie de reconnaissance de caractéristiques d'usinage*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France.
- Dereli, T. (1998). *Development of a Process Planning System for Prismatic Parts*. Thèse de doctorat, Université de Gaziantep.
- El-Mehalawi M., Miller R., (2001). *A Database System of Mechanical Components based on geometric and topological Similarity Part 1: Representation*. Department of Industrial, Welding and systems Engineering, Ohio State University
- El-Mehalawi M., Miller R., (2001). *A Database System of Mechanical Components based on geometric and topological Similarity Part 2: Indexing, Retrieval, Matching and Similarity Assessment*. Department of Industrial, Welding and systems Engineering, Ohio State University
- Fan T., Medioni G., Nevatia R., (1989). *Recognizing 3-D Objects Using Surface Descriptions*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11 No.11
- Fausett, L. (1994). *Fundamentals of Neural Network*. Prentice Hall. ISBN0-13-334186-0
- Gardan, J. (2003). *CATIA V5 : Association de caractéristiques de forme avec des stratégies d'usinage*. Projet de Fin d'Étude, École de Technologie Supérieure, Université du Québec.
- Gu, Z., Zhang, F., Nee, A. Y. C. (1997). *Identification of important features for machining operations sequence generation*. Int. J. Prod. Res., Vol.35 no.8, 2285-2307
- Inoue K., Shimada K. Chilaka K., (2003). *Solid Model Reconstruction of Wireframe CAD Models Based on Topological Embeddings of Planar Graphs*. Journal of Mechanical Design Vol.125, 434-442

- Kao C., Kumara S., (2001). *3-D Manufacturing Feature Recognition Using Super Relation Graph Method*. 2nd Industrial Engineering Research Conference Proceedings.
- Liu S., Gonzalez M., Chen J., (1995). *Development of an Automatic Part Feature Extraction and Classification System taking CAD Data as Input*. Computers in Industry Vol. 29, 137-150
- Liu Z., Li, J., Wang, Y., Li, C., Xiao, X., (2003). *Automatically extracting sheet-metal features from solid model*. Journal of Zhejiang University 2004: 1456-1465
- Marquez, M., Gill, R., White, A. (1999). *Application of Neural Networks in Feature Recognition of Mold Reinforced plastic Parts*. Concurrent Engineering: Research and Applications, Vol.7 No.2, Technomic Publishing Co. Inc.
- Mawussi, K., Duong, V., Ponsonnet, R. (2000). *Détermination de ressources virtuelles pour la conception intégrées*. IDMME 2000 SCGM, Presses internationales Polytechnique, 59
- Mei, J., Zhang, H.C., Oldham, W.J.B. (1995). *A neural network approach for datum selection in computer-aided process planning*. Computers in Industry, Vol.27 No.1, 53-64
- Moody, J. (1994). *Prediction Risk and Architecture Selection for Neural Networks*. From Statistics to Neural Networks: Theory and Pattern Recognition Applications. NATO ASI Series F, Springer-Verlag
- Msaaf, O. (2002). *Validation des caractéristiques d'usinage par des grammaires d'usinage attribuées*. Thèse de doctorat, École de Technologie Supérieure, Université du Québec.
- Mudurai S., Lin L., (1992). *Rule-Based automatic Part Feature Extraction and Recognition from CAD Data*. Computers ind. Engng Vol.22 No.1 49-62
- Nezis, K., Vosniakos, G. (1997). *Recognizing 2.5D shape features using a neural network and heuristics*. Computer-Aided Design, Vol.29 No.7
- Osakada, K. Yang, G.B. (1991), *Neural Networks for process planning of cold forging*. Annals of the CIRP, Vol. 40 No.1 243-246
- Ou-Yang C., Liu P.Y., (1999). *Applying the Topological Relationship of Form Features to Retrieve Part Files From a CAD System*. IIE Transactions Vol.31 323-337

- Owodunni O., Hinduja S., (2002). *Evaluation of Existing and New Feature Recognition Algorithms Part 1: theory and implementation*. Proc Institution Mechanical Engineers Vol 216 Part B.
- Owodunni O., Hinduja S., (2002). *Evaluation of Existing and New Feature Recognition Algorithms Part 2: Experimental Results*. Proc Institution Mechanical Engineers Vol 216 Part B.
- Öztürk, N., Öztürk, F. (1999). *Feature-based environmental issues: neural network-based feature recognition*. Int. J. of Vehicule Design, Vol.21 No.2-3
- Öztürk, N., Öztürk, F. (2000). *Neural network based non-standard feature recognition to integrate CAD and CAM*. Computers in Industry, Vol.45 123-125
- Park, S., Jun, Y. (2002). *Automated segmentation of point data in a feature-based reverse engineering system*. Engineering Manufacture, Vol.216 Part B:J
- Prabhakar, S., Henderson, M.R., (1992). *Automatic form feature recognition using neural-network based techniques on boundary representations of solid models*. Computer Aided Design Vol.24 No.7 381-393
- Shah, J.J., Mantyla, M. (1995). *Parametric and Featured based CAD/CAM*. John Wiley and Sons. ISBN0-471-00214-3
- 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
- Stergiou C., Siganos D., (1996). *Neural Networks*, Report for Department of Computing, Imperial College of London.
- Warren T., Lee K., (1993). *Integration of a Feature-Based CAD System and an ART1 Neural Model for GT coding and Part Family Forming*. Computers ind. Engng, Vol. 26 No.1, 93-104
- Wong, T. N., Lam, S. M., (2000). *Automatic recognition of machining features from computer aided design part models*. Proc Institution Mechanical Engineers Vol.214 Part B
- Wong, T. N., Lam, S. M., (2000). *Recognition of machining features – a hybrid approach*. Int. F. Production Research Vol.38 No.17 4301-4316
- Yue Y., Ding L., Ahmet K., Painter J., Walters M., (2001). *Study of neural network techniques for computer integrated manufacturing*. Engineering Computations, Vol. 19 N. 2, 2002, 136-157